

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk



DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Zwiększenie efektywności transmisji z wykorzystaniem
węzłów pośrednich w sieciach LoRa**

Autor: mgr inż. Artur Frankiewicz

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Krzysztof Grochla, prof. IITiS PAN

Praca wykonana w ramach Wspólnej Szkoły Doktorskiej

Gliwice, 2025

Spis treści

1	Wprowadzenie	1
1.1	Skala zastosowania sieci IoT w rozwiązaniach inteligentnych miast	2
1.2	Motywacja	3
1.3	Cele pracy	4
1.4	Metodyka badawcza	6
1.5	Organizacja pracy	7
1.6	Wkład do stanu wiedzy	7
2	Zastosowanie węzłów pośrednich w sieciach bezprzewodowych	11
2.1	Technologia LPWAN	12
2.2	Strategie retransmisji sygnału w sieciach bezprzewodowych	13
2.3	Zastosowanie węzłów pośrednich w wybranych sieciach radiowych	14
2.3.1	Wize / Wireless M-Bus (gwiazda)	14
2.3.2	Wi-SUN FAN (siatka wielokokowa)	17
2.4	Założenia modelowe i metryki modelu	18
2.4.1	Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu <i>uplink</i>	20
2.4.2	Prawdopodobieństwo dostarczenia zgłoszenia dziennego	20
2.4.3	Wypełnienie medium komunikacyjnego	20
2.4.4	Zużycie „energii” (ładunku) przez urządzenie końcowe	20
2.4.5	Zużycie „energii” (ładunku) przez retransmitter	21
2.4.6	Zużycie „energii” (ładunku) przez sieć	21
2.4.7	Koszt różnicowy budowy sieci	21
2.4.8	Koszt budowy sieci	22
3	Specyfika technologii LoRa	25
3.1	Modulacja LoRa – kodowanie symboli za pomocą chirpów	25
3.1.1	Opis matematyczny	25
3.1.2	Wizualizacja sygnałów	26
3.1.3	Interpretacja fizyczna	26
3.1.4	Wykorzystanie up- i down-chirp w protokole LoRaWAN	27
3.1.5	Wnioski do projektowanego modelu retransmisji	28
3.2	Współczynnik rozpraszania	28

3.2.1	Czas transmisji, przepływność, czułość	29
3.2.2	Działanie algorytmu Adaptive Data Rate	29
3.3	Lokalizacja urządzeń na podstawie sygnałów ze stacji bazowych	32
4	Badanie wybranych aspektów LoRa	35
4.1	Dobór kanałów transmisyjnych oraz zjawisko wygaszania wielotorowego	35
4.1.1	Model teoretyczny	35
4.1.2	Modele statystyczne	36
4.1.3	Test syntetyczny	37
4.1.4	Weryfikacja pomiarów rzeczywistej sieci	39
4.1.5	Wpływ zjawiska dla projektowanego mechanizmu	39
4.2	Prawdopodobieństwo odebrania pakietu w funkcji siły odbieranego sygnału	40
4.2.1	Szum termiczny i czułość odbiornika LoRa	41
4.2.2	Związek pomiędzy RSSI, SNR oraz mocą użytecznego sygnału	41
4.2.3	Obserwacja zależności RSSI i SNR	42
4.2.4	Obserwacja prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu na podstawie SNR	43
4.2.5	Wnioski	46
4.3	Ortogonalność	47
4.3.1	Zbiór danych i metodyka	47
4.3.2	Miary i wzory	47
4.3.3	Wnioski z Testu 1	48
4.3.4	Wnioski z Testu 2	48
4.3.5	Podsumowanie testu i wnioski implementacyjne	49
4.4	Uwarunkowania energetyczne urządzeń sieci LoRaWAN	49
4.4.1	Wpływ temperatury	51
4.4.2	Rozrzut produkcyjny	52
4.4.3	Źródła zasilania	53
4.4.4	Parametry zużycia energii a projektowane mechanizmy retransmisji	53
4.5	Sterowanie mocą nadawania	55
4.6	Regulacyjne ograniczenia czasu emisji	55
5	Mechanizm retransmisji z urządzeniem pośrednim w sieci LoRaWAN	57
5.1	Model retransmisji TS011	57
5.2	Sposób retransmisji dla sieci LoRaWAN z wykorzystaniem predefiniowanych slotów czasowych	62
5.2.1	Model systemu i założenia	62
5.2.2	Fazy działania mechanizmu	70
5.2.3	Uwagi implementacyjne	71
5.2.4	Podsumowanie	72
6	Model symulacyjny retransmisji pakietów	73

6.1	Uzasadnienie wyboru platformy symulacyjnej	73
6.2	Model warstwowy i implementacja	73
6.3	Walidacja symulatora	75
6.4	Model kolizji w warstwie fizycznej	75
6.5	Statyczny model propagacji sygnału	76
6.6	Dynamiczny model propagacji sygnału	77
6.6.1	Zmienność warunków propagacji	77
6.6.2	Dane i dopasowanie rozkładów	78
6.6.3	Założenia modelu generatywnego	78
6.6.4	Ujęcie statystyczne i metryki błędu	79
6.6.5	Porównanie błędów średniokwadratowych na próbkach dobowych	79
6.6.6	Zmienność czasowa i anomalie	79
6.6.7	Zgodność rozkładów i wykresy kwantyl-kwantyl	82
6.6.8	Dyskusja i wnioski	82
6.7	Autentykacja w sieci	83
6.8	Model synchronizacji zegarów oraz okien nasłuchu	83
6.9	Założenia modelu dotyczące parametrów transmisji	86
6.9.1	Zawartość ramek zgłoszeń dobowych	89
6.9.2	Kanały komunikacyjne	90
7	Porównanie efektywności komunikacji	91
7.1	Wartości przyjęte do symulacji	91
7.2	Weryfikacja i potwierdzenie tezy pracy	102
7.2.1	Pokrycie i skuteczność uplink	103
7.2.2	Koszt budowy sieci (CAPEX)	103
7.2.3	Bilans energetyczny	103
7.2.4	Konkluzja	104
8	Podsumowanie	105
	Spis rysunków	112

Rozdział 1

Wprowadzenie

Obecny trend w rozwoju *Internetu Rzeczy* (*Internet of Things (IoT)*) to szybki wzrost liczby urządzeń podłączonych do sieci. Zdalne monitorowanie i sterowanie urządzeniami umożliwia efektywne zarządzanie rozproszonymi, złożonymi systemami pomiarowo–sterującymi — pozwala optymalizować procesy pod kątem minimalizacji zużycia energii, utrzymania wysokiej wydajności oraz poprawy bezpieczeństwa. Instalacja urządzeń IoT staje się także ekonomicznie uzasadniona dzięki automatyzacji powtarzalnych czynności dotychczas wykonywanych przez operatorów. Wraz z postępem technologicznym, wzrostem kosztów pracy i spadkiem kosztów wytwarzania elektroniki, a także w świetle obecnego rozwoju systemów *IoT*, można oczekiwać dalszego przyspieszenia ich adopcji — zarówno poprzez szersze wykorzystanie obecnie stosowanych technologii, jak i powstawanie nowych.

Wzrost liczby urządzeń *IoT* następuje również dzięki postępom technologicznym w obszarze komponentów elektronicznych, m.in. znaczącej poprawie czułości odbiorników radiowych, większej odporności na interferencje, wyższej efektywności energetycznej nadajników oraz pojemniejszym i trwalszym źródłom zasilania. W rezultacie coraz więcej urządzeń może pracować wyłącznie z zasilania bateryjnego, co istotnie poszerza katalog przypadków użycia. Sieci *Low Power Wide Area Network (LPWAN)* umożliwiają codzienną transmisję krótkich danych pomiarowych na odległość nawet kilku kilometrów przy zasilaniu pojedynczą litową baterią typu AA, co — w sprzyjających warunkach i przy odpowiednim profilu pracy — przekłada się na czas eksploatacji rzędu 10 lat.

Rozwój możliwości sprzętowych — w tym wydajniejszych bloków cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP) oraz mikrokontrolerów o ultraniskim poborze mocy — umożliwia projektowanie i wdrażanie nowych technologii radiowych dla *IoT*. Przykładem jest komunikacja oparta na modulacji z rozproszonym widmem *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, wykorzystywana w *LoRa*. Łączy ona wysoką odporność na zakłócenia z dalekim zasięgiem przy niewielkim poborze energii. Dalszy spadek zużycia energii przez mikrokontrolery i układy radiowe pozwala stosować coraz bardziej zaawansowane, obliczeniowo złożone protokoły komunikacyjne, przy jednoczesnym zachowaniu wieloletniego czasu pracy na baterii.

W efekcie rozwiązania *IoT* są wdrażane w coraz nowych obszarach, w których dotąd były technicznie niewykonalne lub ekonomicznie nieopłacalne. W niektórych domenach ich stosowanie jest już wymagane prawnie, jak w przypadku systemu *eCall*, stosowanego we wszystkich nowo sprzedawanych

samochodach na terenie Unii Europejskiej od 2018 r. (*Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/758 [14]*), oraz w systemach rozliczenia prosumentów energii elektrycznej.

Dynamiczny rozwój bezprzewodowych sieci komunikacyjnych dla *IoT* rodzi szereg wyzwań: zapewnienie zasięgu i dostępności łączności w całym obszarze działania; utrzymanie wysokiej niezawodności i jakości usług; konieczność ciągłego zwiększania przepustowości sieci; a także współistnienie wielu technologii w tych samych pasmach częstotliwości.

Dlatego w obliczu dynamicznego rozwoju rozwiązań *IoT*, kluczowym kierunkiem jest równoczesne obniżanie kosztów budowy i utrzymania sieci *LPWAN*, zwiększanie ich zasięgu i dostępności oraz wydłużanie czasu życia urządzeń. Cele te można realizować poprzez optymalizację architektury sieci i planowania radiowego (wybór lokalizacji punktów dostępowych, efektywniejsze gospodarowanie widmem i adaptacyjne sterowanie łączem, wykorzystanie urządzeń pośredniczących). W rezultacie możliwe jest budowanie skalowalnych, niezawodnych i ekonomicznie uzasadnionych systemów *IoT*.

Jednym z elementów technologicznych podnoszących efektywność energetyczną oraz skalowalność sieci *LPWAN* jest wprowadzenie urządzeń pośredniczących (węzłów pośrednich). Węzły te odbierają ramki od urządzeń końcowych i retransmitują je w kierunku punktu dostępowego, skracając długość pojedynczego skoku. Pozwala to obniżyć wymaganą moc nadawczą i/lub zwiększyć przepustowość bitową, a tym samym zmniejszyć czas zajęcia kanału i energię potrzebną do transmisji kompletnego pakietu.

1.1 Skala zastosowania sieci *IoT* w rozwiązaniach inteligentnych miast

Obecne statystyki wskazują, że liczba aktywnych urządzeń *IoT* globalnie rosła w 2024 r. w tempie przekraczającym 10% w ujęciu rocznym i według poniższych ośrodków badawczych wyniosła 18,8 mld na koniec roku [15]. Długoterminowe prognozy mówią o 40,6 mld urządzeń do 2034 r. (*CAGR* ok. 9%) [16]. W segmencie *IoT* komórkowego (*NB-IoT/LTE-M/4G/5G*) baza połączeń zbliżyła się do 4 mld na koniec 2024 r., a do 2030 r. ma przekroczyć 7 mld (*Compound Annual Growth Rate (CAGR)* ok. 11%) [17]. Równolegle, według GSMA, komercyjnie uruchomiono już setki sieci *LPWAN* w paśmie licencjonowanym (*Narrowband Internet of Things (NB-IoT)* i *Long Term Evolution for Machines (LTE-M)*) — łącznie 287 sieci, według stanu na lipiec 2025 r. [18]. W ekosystemie nielicencjonowanym *Industrial Scientific and Medical (ISM)* jednym z największych pozostaje protokół *Long Range Wide Area Network (LoRaWAN)* oparty na warstwie fizycznej *LoRa*, z ponad 350 mln zainstalowanych urządzeń potwierdzonych w 2025 r. [19].

LoRa Alliance ogłosiła roczny raport [20] (11 lutego 2025), podkreślając dalsze umacnianie pozycji *LoRaWAN* jako wiodącego dostawcy rozwiązań *LPWAN* dla „*Massive IoT*”. Kluczowe dane są zgodne z informacją podaną przez Semtech wskazującą ponad 350 mln zainstalowanych urządzeń końcowych działających w sieci *LoRa* oraz 6,9 mln bramek (stan na czerwiec 2024). Raport wskazuje też na szybki wzrost wdrożeń u operatorów i integratorów (przykłady: *Actility*, *The Things Industries*, *ZEN-NER*). Rośnie również liczba operatorów technologii satelitarnej opartej na komunikacji *LoRaWAN*. Obecnie rozwiązanie dostępne jest już u przynajmniej 3 dostawców (*Lacuna Space*, *EchoStar Mobile*, *FOSSA Systems*), a organizacja *LoRa Alliance* zaczyna aktywnie rozpoznawać i wspierać technologie

Non-Terrestrial Networks (NTN) o czym świadczą liczne doniesienia prasowe i wytyczne prawne dotyczące implementacji [21, 22, 23]. Rozwój w kierunku technologii satelitarnych może dalej umocnić *LoRaWAN* w pozycji lidera rynku.

Jednym z istotnych obszarów zastosowań *IoT* są rozwiązania typu *smart city*. Globalna liczba połączeń *IoT* w obszarze *smart city* wyniosła w 2024 r. około 271 mln [24]. Rozwiązania te znajdują zastosowanie zarówno w dużych aglomeracjach, jak i na obszarach mniej zurbanizowanych. Zdalne pozyskiwanie danych pomiarowych z liczników (*smart metering*) eliminuje konieczność ręcznych odczytów w terenie, jednocześnie umożliwiając gromadzenie danych niemal w czasie rzeczywistym.

Rozwój technologii *smart metering* nie tylko zastępuje ręczne odczyty, ale także otwiera przestrzeń dla kolejnych zastosowań. Kompletnie opomiarowanie procesów, takich jak dystrybucji wody w sieciach wodociągowych, umożliwia wykorzystanie danych do rozliczeń. W takich zastosowaniach zwykle wystarcza jeden poprawny odczyt w okresie rozliczeniowym (np. raz w miesiącu). Ta sama infrastruktura może jednak służyć do zaawansowanej analityki i detekcji zdarzeń (wycieki w odcinkach sieci przesyłowej, uszkodzenia wodomierzy, nieuprawniony pobór), gdzie kluczowe znaczenie mają ciągłość strumienia danych i rozdzielczość czasowa. Dla celów bilansowania i detekcji anomalii odczyty muszą być przesyłane częściej (np. co najmniej raz dziennie, a nawet godzinowo), a brak choćby pojedynczego punktu danych może uniemożliwić przeprowadzenie pełnej analizy całej sieci. W konsekwencji wymagania dotyczące jakości łączności — takie jak wskaźnik dostarczania pakietów *Packet Delivery Ratio (PDR)*, kompletność danych oraz opóźnienia — systematycznie rosną, a mechanizmy zwiększające prawdopodobieństwo dostarczenia pakietów stają się niezbędnym elementem systemów *IoT*.

1.2 Motywacja

Celem budowy sieci telemetrycznej jest zapewnienie kompletnego zbierania danych ze wszystkich urządzeń końcowych *End Device (ED)* działających na zadanym obszarze. Jednym z najefektywniejszych sposobów budowy sieci telemetrycznej pozostaje wykorzystanie technologii *LPWAN*, takich jak *LoRa*, które dzięki pracy w nielicencjonowanym paśmie i niskiemu zużyciu energii zdobywają znaczną popularność. W praktyce, mimo szeroko zakrojonych wdrożeń systemów zdalnego opomiarowania opartych na *LoRaWAN*, w wielu projektach po zakończeniu budowy infrastruktury pozostaje część urządzeń, które nie są w stanie nawiązać łączności z żadnym punktem dostępowym *Gateway (GW)*. Aby objąć zasięgiem te urządzenia, można zwiększać gęstość rozlokowania punktów dostępowych lub doposażać urządzenia końcowe *ED* w zewnętrzne anteny wyniesione. Oba podejścia są jednak kosztowne (sprzęt, montaż, wizyty terenowe) i nie zawsze przynoszą oczekiwane rezultaty.

Możliwe jest także zastosowanie bateryjnych retransmiterów działających na warstwie sieciowej (warstwa 3 modelu ISO/OSI), tj. węzły brzegowe *Border Router (BR)* agregujące ruch *LoRa* i przekazujące go przez łącze komórkowe (np. *LoRa-LTE*). Rozwiązanie to bywa skuteczne, lecz jest kosztowne (sprzęt, abonament komórkowy, instalacja) i zwykle nieefektywne energetycznie po stronie urządzenia pośredniczącego. Ze względu na zasilanie bateryjne, urządzenie klasy *BR* może realizować zbieranie danych jedynie w wąskich oknach nasłuchu oraz ma istotne ograniczenia funkcjonalne względem zasilanego sieciowo *GW*. Z tego względu atrakcyjniejszą ekonomicznie i energetycznie opcją są węzły

pośredniczące *LoRa–LoRa*, które przekazują ruch w tej samej technologii radiowej, umożliwiając realizację ciągłej funkcji retransmisji także w trybach zasilania bateryjnego.

W chwili rozpoczynania prac nad niniejszą rozprawą standard *LoRaWAN* nie przewidywał wprost mechanizmu retransmisji realizowanego przez urządzenia pośredniczące; w literaturze naukowej pojawiały się jedynie pierwsze opisy koncepcji i eksperymentów (por. [25, 26, 27]). Jednocześnie specyfika *LoRa* — m.in. zmienny współczynnik rozpraszania (*Spreading Factor (SF)*, zob. 3.2), ortogonalność (4.3) oraz zdolność odbioru sygnałów przy ujemnym SNR (4.2) — sprawia, że bezpośredni transfer mechanizmów retransmisji znanych z innych technologii wymaga istotnych modyfikacji, aby w pełni wykorzystać możliwości modulacji *LoRa*.

1.3 Cele pracy

Cel badawczy. Celem niniejszej pracy doktorskiej jest opracowanie i weryfikacja sposobu retransmisji działającego w sieci *LoRaWAN*, który w realnych warunkach środowiska miejskiego (duża tłumienność kanału wynikająca z zabudowy oraz zmienność uwarunkowana aktywnością człowieka) minimalizuje zużycie energii urządzeń bateryjnych oraz zapewnia wysokie prawdopodobieństwo kompletnego pozyskania dobowych odczytów z wszystkich urządzeń końcowych *ED* przy jednoczesnym ograniczeniu czasów niedostępności.

1.3.1 Teza pracy

1. *Poprzez zastosowanie węzłów pośrednich możliwe jest zwiększenie efektywności transmisji w sieciach LoRaWAN.*

Spełnieniem tezy jest wykazanie, że proponowana strategia budowy sieci z użyciem węzłów pośrednich może osiągnąć lepsze pokrycie sieci niż konfiguracja bazowa, podobne pokrycie i niższy koszt budowy sieci jak konfiguracja polegające na zwiększeniu liczby bram dostępowych oraz podobne pokrycie i niższy koszt budowy sieci przy równoczesnym niższym wydatku energetycznym niż konfiguracja polegające na użyciu lokalnych retransmiterów pakietów *LoRa* opartych na komunikacji w technologii komórkowej.

$$\text{(pokrycie)} \quad C_1 \geq C_0, \quad C_1 \approx 1, \quad (1.1)$$

$$\text{(koszt)} \quad \mathcal{C}^{\text{build}}(G, R_1, 0) < \mathcal{C}^{\text{build}}(G_A, 0, 0), \quad (1.2)$$

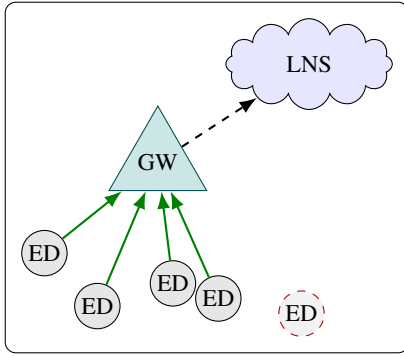
$$\mathcal{C}^{\text{build}}(G, R_1, 0) < \mathcal{C}^{\text{build}}(G, 0, B_B), \quad (1.3)$$

$$\text{(zużycie energii urządzeń bateryjnych)} \quad E_1 \leq E_B, \quad (1.4)$$

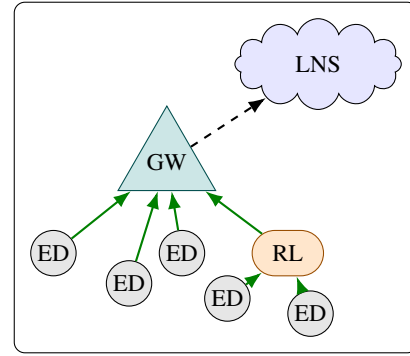
$$E_1 \geq E_A. \quad (1.5)$$

Legenda oznaczeń:

- G – liczba punktów dostępowych (GW) w konfiguracji bazowej,
- R_1 – liczba węzłów pośredniczących ($Relay$ (RL)) w konfiguracji 1,
- B_B – liczba węzłów brzegowych (BR) w konfiguracji B,
- C_0, C_1 – wskaźniki pokrycia (odsetek ED z poprawnym odczytem) dla (0 i 1),
- E_A, E_B, E_1 – całkowite zużycie energii elementów bateryjnych (ED, RL, BR) dla A, B i 1,
- $\mathcal{C}^{build}(\cdot)$ – koszt budowy sieci w danej konfiguracji.

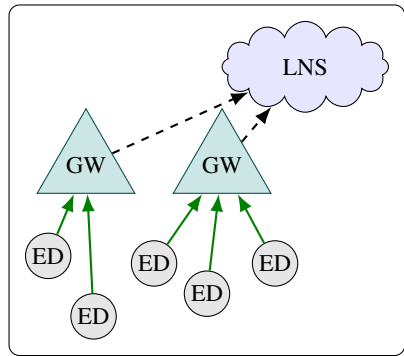


Obszar miejski

(a) Konfiguracja 0: istnieje ≥ 1 (ED) bez pokrycia.

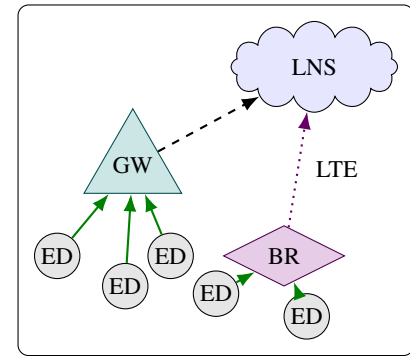
Obszar miejski

(b) Konfiguracja 1: węzły pośredniczące (RL)



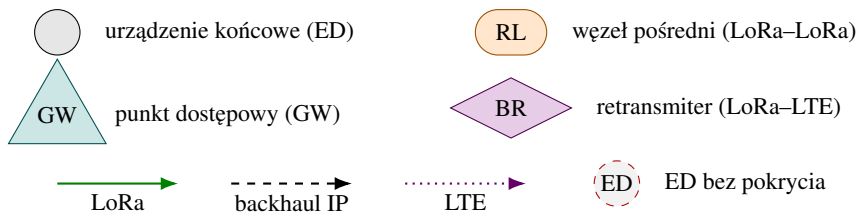
Obszar miejski

(c) Konfiguracja A: zagęszczanie (GW).



Obszar miejski

(d) Konfiguracja B: węzły brzegowe (BR)



Rysunek 1.1: Porównanie czterech wariantów architektury sieci LoRaWAN.

W analizie porównuję cztery konfiguracje przedstawione na rysunku 1.1:

- *Konfiguracja 0*: sieć bazowa z liczbą punktów dostępowych G i bez węzłów pośrednich ani retransmitterów komórkowych, o niepełnym pokryciu $C_0 < 1$.
- *Konfiguracja 1*: sieć badana z dodatkowymi węzłami pośrednimi RL .
- *Konfiguracja A*: sieć referencyjna z zagęszczonymi punktami dostępowymi GW .

- *Konfiguracja B*: sieć referencyjna z dodatkowymi retransmiterami (np. *LoRa-LTE*).

1.4 Metodyka badawcza

Poniższy rozdział przedstawia metodykę badawczą przyjętą w pracy. Ramę teoretyczną wyznaczają możliwości wykorzystania sieci *LoRa* przy zachowaniu pełnej kompatybilności z *LoRaWAN* oraz ograniczenia wynikające z wymogów biznesowych i konieczności implementacji rozwiązania na fizycznym urządzeniu. W tym ujęciu metodologia pozostaje ściśle aplikacyjna - rozwiązanie musi mieć stosowność przemysłową.

W celu potwierdzenia postawionej tezy zaplanowano realizację badań obejmujących zarówno eksperymenty z wykorzystaniem rzeczywistych urządzeń, jak i symulacje komputerowe. Część symulacyjna została oparta na dedykowanym środowisku, przygotowanym na podstawie danych zebranych z komercyjnych instalacji *LoRaWAN*. Rozkłady prawdopodobieństwa zdarzeń i zakłóceń odwzorowano na bazie długookresowych obserwacji funkcjonowania sieci, a scenariusze testowe sformułowano w oparciu o przypadki typowe dla praktyki wdrożeniowej. Ze względu na ograniczenia wydajnościowe oraz potrzebę wielokrotnego powtarzania doświadczeń, symulacje skoncentrowano na reprezentatywnym wycinku sieci, podczas gdy pozostałe otoczenie modelowano jako kontrolowane tło.

Eksperymenty prowadzę w próbach losowych. Liczbę uruchomień symulacji ustalam przez wymaganą precyzję estymacji; wartość $n \approx 30$ traktuję jako punkt odniesienia wynikający z centralnego twierdzenia granicznego [28] (dla wielu metryk sieciowych średnia z próby jest zbliżona do normalnej już przy kilkudziesięciu replikach) oraz malejących przyrostów korzyści, bo szerokość przedziału ufności skaluje się jak $1/\sqrt{n}$. W praktyce prowadzę krótki pilotaż (n_0), wyznaczam odchylenie s i średnią $\bar{X}$ badanej metryki, a następnie dobieram n tak, aby współczynnik ufności (95% przedziału) spełniał warunek absolutny $h \approx t_{0.975, n-1} s/\sqrt{n} \leq \varepsilon$ (co w przybliżeniu daje $n \gtrsim (z_{0.975} s/\varepsilon)^2$), albo względny $(t_{0.975, n-1} s/\sqrt{n})/\bar{X} \leq r$. Gdy współczynnik zmienności jest umiarkowany, typowo otrzymuję n wartość poniżej 30. Przy wysokiej zmienności zwiększam n sekwencyjnie do spełnienia kryterium precyzji.

Losowość kolejnych prób n zapewnia mechanizm generatorów w symulatorze, który używa generatora Mersenne Twister i dobiera ziarna automatycznie i deterministycznie na podstawie numeru uruchomienia (run number) i numeru strumienia *Random Number Generator* (*RNG*). Dla tej samej pary (run, *RNG*-id) zostanie wybrane to samo ziarno, a zmiana numeru uruchomienia daje inny „seed set”. Daje to z jednej strony możliwość ponowienia dowolnej symulacji z dokładnie tym samym ziarnem a co za tym idzie, z takim samym zestawem losowanych wartości, a drugiej strony pełną losowość kolejnych prób.

Dane empiryczne pochodzą w całości z serwerów *LoRa Network Server* (*LNS*). W celach zapewnienia ochrony danych wszystkie dane podaję w sposób zanonimizowany, usuwając nazwy miast oraz lokalizacji urządzeń. Dla ścisłości pracy ujawniam jedynie numery seryjne urządzeń jako nie stanowiące danych poufnych. Dane w horyzoncie krótkoterminowym (ok. trzech miesięcy) zawierają szczegółowe rekordy wraz z danymi kontrolnymi (m.in. *Received Signal Strength Indicator* (*RSSI*), *Signal to Noise Ratio* (*SNR*) również dla odbioru przez redundantne bramki), natomiast analizy długookresowe wykonuję na danych zagregowanych.

Plan analizy statystycznej ustaliam na podstawie pilotażu niezależnego od właściwych eksperymentów. Ze względu na znaczne wahania sygnałów radiowych wszystkie wyniki raportuję jako estymatory punktowe z przedziałami ufności przy poziomie ufności $1 - \alpha = 0,95$ (tj. 95%), oraz—tam, gdzie porównuję warianty—z testami statystycznymi przy poziomie istotności α i z korektą wielokrotnych porównań (Holm–Bonferroni [29]). Poprawność działania symulatora weryfikuję *testami jednostkowymi* w warunkach zbliżonych do laboratoryjnych (np. układ 1ED + 1RL + 1GW), w których oczekiwane zachowanie jest deterministyczne, a wartości można obliczyć analitycznie; testy te służą potwierdzeniu poprawności implementacji, a nie zastępują wnioskowania statystycznego. Łącznie sprawdzam cztery syntetyczne przypadki zgodności z bazą teoretyczną oraz z niezależnymi rachunkami wielkości fizycznych.

Symulator wyposażono w mechanizmy automatycznego wyliczania metryk modeli i zapisu danych wynikowych, który minimalizuje ryzyko błędów ludzkich przy gromadzeniu i przetwarzaniu wyników. Metryki modelu zostały omówione w rozdziale 2.4.

1.5 Organizacja pracy

Struktura niniejszej pracy przedstawia się następująco. Po zdefiniowaniu celu (1.3) przedstawiam aktualny stan wiedzy dotyczący retransmisji sygnałów w sieciach LPWAN (2), z uwzględnieniem powszechnie stosowanych standardów i praktyk wdrożeniowych. Dla każdej technologii analizuję możliwość zastosowania analogicznych mechanizmów w projektowanym modelu retransmisji. Następnie analizuję techniczne aspekty LoRa oraz jej unikalne cechy (3), które umożliwiają odmienne podejście do projektowania modelu retransmisji. Kolejno przedstawiam proponowane rozwiązanie oparte na mechanizmach transmisji wykorzystujących pseudolosowość (5). W dalszej części porównuję szczegółowo mechanizm *Technical Specification No. 11 (TS011)* w wersji referencyjnej z jego rozszerzeniem o pseudolosowe czasy komunikacji. Jako punkt odniesienia uwzględniam także trzeci mechanizm retransmisji. Do oceny algorytmów wykorzystuję autorski symulator sieci LoRaWAN, opisany w rozdziale (6), natomiast wyniki symulacji zostały przedstawione w (7). Całość kończę podsumowaniem zawierającym wnioski dotyczące projektowania i doboru algorytmów retransmisji w warunkach rzeczywistych (8).

1.6 Wkład do stanu wiedzy

Kluczową nowością przedstawioną w niniejszej pracy jest projekt mechanizmu retransmisji sygnałów radiowych z wykorzystaniem urządzeń pośredniczących, przeznaczonego dla sieci LoRaWAN. Gdy rozpoczynałem pracę nad doktoratem, nie istniał jeszcze zdefiniowany sposób takiej retransmisji dla tego typu sieci. Opracowane rozwiązanie, bazujące na pseudolosowych czasach zgłoszeń, zostało zgłoszone do Europejskiego Urzędu Patentowego w dniu 2022-07-26, uzyskując pierwszeństwo zgłoszenia; publikacja nastąpiła 2024-01-31 [10]. Na dzień przygotowania tego rozdziału (sierpień 2025) postępowanie znajduje się na etapie oczekiwania na udzielenie patentu (*intention to grant*). Byłem głównym autorem przedmiotowego zgłoszenia patentowego. Warto podkreślić, że zgłoszenie oraz uzyskanie pierwszeństwa nastąpiły przed publikacją oficjalnego mechanizmu retransmisji w specyfikacji TS011-1.0.0 [30],

opublikowanej przez organizację *LoRa Alliance* w dniu 2022-10-03 [31]. Prace nad przedstawionym podejściem prowadziłem równolegle z procesem standaryzacyjnym prowadzonym przez *LoRa Alliance*.

Symulator opisany w rozdziale 6 został opracowany przeze mnie samodzielnie na potrzeby niniejszej rozprawy. Ze względu na jego inżynierski charakter nie był przedmiotem odrębnych publikacji. Badania nad sieciami LoRa przedstawione w rozdziale 4 stanowią oryginalny wkład w stan wiedzy. W szczególności samodzielnie przeprowadziłem prace obejmujące elementy nowości: zastosowanie generatywnych sieci neuronowych do modelowania strat w kanale transmisyjnym; rozwiązanie to opracowałem i szczegółowo opisałem w [1]. Zgodnie z moją najlepszą wiedzą, jako pierwszy w literaturze naukowej przedstawiłem obliczenia oraz analizę zużycia energii przez urządzenie pośredniczące w rozwiązaniu *TS011* [2]. Niezależnie opisałem także badania nad algorytmami sterowania mocą nadajnika w sieciach kratowych [3]. Ponadto w ramach eksperymentów z wykorzystaniem rzeczywistych urządzeń opracowałem i przedstawiłem: analizę wpływu parametrów pracy na wydajność węzła pośredniczącego w technologii LoRa, ocenę efektywności zaproponowanego mechanizmu retransmisji w porównaniu z rozwiązaniem standardowym, metodę odtwarzania ruchu sieciowego w *LoRaWAN* na podstawie rzeczywistych pomiarów i modeli generatywnych, a także koncepcję synchronizacji zegarów w sieci.

W pozostałych pracach [4, 5, 6, 7] odpowiadałem wyłącznie za wybrane elementy badań. Doktorat realizowałem w trybie wdrożeniowym, łącząc studia doktoranckie z pracą w przedsiębiorstwie projektującym i produkującym systemy *IoT*. Dzięki temu uzyskałem bezpośredni dostęp do rozległych zbiorów danych z rzeczywistych sieci, w tym z największego wdrożenia *acLoRaWAN* obejmującego 350 tysięcy liczników wody w dwóch sąsiadujących miastach. W związku z moją pozycją na skraju wdrożeń i badań głównym wkładem w powyższe publikacje była analiza danych obiektowych, analiza danych produkcyjnych, prowadzenie pomiarów laboratoryjnych oraz wszelkie badania sprzętowe prowadzone w sposób eksperymentalny jak również ocena ograniczeń implementacyjnych.

Poza zgłoszeniem patentowym stanowiącym trzon rozprawy jestem autorem trzech patentów europejskich w obszarze *smart city*, zapewniających ochronę prawną stosowanych rozwiązań technicznych: do opomiarowania zawartości gazu płynnego w przydomowych zbiornikach LPG [11], do pomiaru poziomu cieczy metodą mikrofalową [12] oraz szeregu rozwiązań służących pomiarowi i bezprzewodowej transmisji danych z wnętrza metalowego zbiornika LPG [13]. Wymienione patenty zostały opublikowane i sklasyfikowane przez *Patent Cooperation Treaty* (PCT) oraz uzyskały odrębne zgłoszenia na różnych rynkach.

Publikacje własne

- [1] A. Frankiewicz i K. Grochla. „Using Time Series Analysis to Generate Synthetic Traffic Data for LoRa Network Simulation”. W: *Advances in Artificial Intelligence Research: Proceedings of the 6th Polish Conference on Artificial Intelligence (PP-RAI 2025)*. Red. Beata Zielosko i in. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Katowice, Poland: Springer Nature, kw. 2025.

- [2] A. Frankiewicz i K. Grochla. „Performance evaluation of relay mechanism TS011_1.0.0 in LoRaWAN networks”. W: *Konferencja Radiokomunikacji i Teleinformatyki (KRiT2024)*. Poznań, Poland, wrz. 2024.
- [3] Artur Frankiewicz. „Self-adapting algorithm for transmission power control in integrated meter reading systems based on wireless sensor networks”. W: *Computer Networks. CN 2011*. T. 160. Communications in Computer and Information Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, s. 436–445.
- [4] Michał Gorawski, Rafał Marjasz, Krzysztof Grochla i Artur Frankiewicz. „Comparative Analysis of Energy Consumption in Simulated LoRa Water Meter Reconfiguration vs. Real-world Readings”. W: *Proceedings of the 2024 IFIP Networking Conference*. Thessaloniki, Greece, czer. 2024.
- [5] Anna Strzoda, Krzysztof Grochla, Artur Frankiewicz i Zbigniew Laskarzewski. „Measurements and Analysis of Large Scale LoRa Network Efficiency”. W: *2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. 2022, s. 818–823.
- [6] Michał Gorawski, Krzysztof Grochla, Rafał Marjasz i Artur Frankiewicz. „Energy Minimization Algorithm for Estimation of Clock Skew and Reception Window Selection in Wireless Networks”. W: *Sensors* 21.5 (2021), s. 1768.
- [7] Artur Frankiewicz i in. „LP WAN Gateway Location Selection Using Modified K-Dominating Set Algorithm”. W: *Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. Springer International Publishing, 2021, s. 209–223.
- [8] Artur Frankiewicz i Rafał Cupek. „Smart passive infrared sensor - Hardware platform”. W: *Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*. Vienna, Austria: IEEE, 2013, s. 7543–7547.
- [9] Konrad Połys, Krzysztof Grochla, Artur Frankiewicz i Michał Gorawski. „Accuracy of UWB Location Tracking Devices When on the Move”. W: *International Conference on Computer Networks (CN 2019)*. T. 1039. Communications in Computer and Information Science. Springer, 2019, s. 233–241.

Patenty własne

- [10] A Frankiewicz, K Grochla i Z Łaskarzewski. „A method of transmitting data, a relay and end-device”. EP 4312388 A1. Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Pan Aiut Spolka Z Ograniczona Odpowiedzialnoscia. 31 sty. 2024.
- [11] Artur Frankiewicz i Marek Gabryś. „Method for digital wireless communication through a barrier made of conductive material, system for performing such communication, and system for monitoring cylinder content”. European Patent EP4096105C0. 9 lip. 2025.
- [12] Artur Frankiewicz i Marek Gabrys. „Method and System for Measuring a Level of Liquid Inside a Hermetically Closed Container”. Patent WO2022249031A1. 1 grud. 2022.

- [13] Artur Frankiewicz i Marek Gabryś. „Container for Pressurized Liquid Gas and Liquid Level Measuring System”. Patent Application US20250189360A1. 12 czer. 2025.

[8, 13, 12] Stanowią publikacje i patenty nie związane stricte z tematyką sieci bezprzewodowych.

Wkład w tworzenie standardów: W czasie pracy nad niniejszą rozprawą pełniłem funkcję eksperta delegowanego przez Polski Komitet Normalizacyjny do prac w Europejskim Komitecie Technicznym CEN/TC-294 „*Communication systems for meters*” (w strukturze CEN/CENELEC). Zaangażowanie to przyczyniło się bezpośrednio do realizacji rozprawy, umożliwiając pogłębienie wiedzy na temat systemów komunikacji bezprzewodowej oraz korzystanie z doświadczeń innych ekspertów działających w obszarze standaryzacji. Efektem tego procesu było współtworzenie normy EN-13757-8 [32], stanowiącej część serii EN-13757 (w wydaniu krajowym PN-EN-13757), regulującej interfejsy komunikacyjne oraz zasady wymiany danych w systemach odczytu liczników i zdalnego odczytu przyrządów pomiarowych, w tym w systemach bezprzewodowych *wireless Meter Bus* (*wM-Bus*). Norma EN-13757-8:2023 została zatwierdzona przez CEN 19 czerwca 2023 r. i opublikowana we wrześniu 2023 r. jako standard europejski. Definiuje ona warstwę adaptacyjną *MBAL* (M-Bus Adaptation Layer) pomiędzy warstwami wyższymi M-Bus (*TPL/AFL/APL*) a niższymi warstwami sieci *LPWAN*. W Aneksie-D (informacyjnym) opisano mechanizm adaptacji dla *LoRaWAN*, w tym scenariusz „*M-Bus over LoRaWAN*”, który stanowił mój wkład w prace grupy.

Zbierałem również doświadczenia, będąc współautorem polskiego standardu technicznego ST-IGG-0201:2014 [33] oraz jego późniejszych wydań (2018 i 2023), opublikowanego przez Izbę Gospodarczą Gazownictwa (IGG). Dokument definiuje protokół komunikacyjny *SMART-GAS* przeznaczony do zdalnego odczytu gazomierzy inteligentnych i rejestratorów, obejmujący komunikację poprzez sieć telefonii komórkowej (SMS, transmisja pakietowa), protokoły Internetu Rzeczy (*IoT*) oraz lokalne łącza komunikacyjne rejestratora; standard przewiduje także rozszerzenia funkcjonalne, m.in. sterowanie zaworem gazomierza i funkcje przedpłatowe. W działaniach grupy odpowiadałem ze wytyczne implementacje uwzględniające ograniczenia sprzętowe. Definiowałem warunki użycia *SMART-GAS* poprzez sieci *LPWAN* (*wM-Bus* oraz *LoRaWAN*) jak również lokalne linki komunikacyjne (port optyczny (IEC 62056-21), *NFC*, Bluetooth).

Rozdział 2

Zastosowanie węzłów pośrednich w sieciach bezprzewodowych

Historia zastosowania węzłów pośrednich w sieciach bezprzewodowych Celem niniejszej sekcji jest nakreślenie, czym są sieci *LPWAN* i jaki jest ich kierunek dalszego rozwoju. Koncepcja węzłów pośrednich (*RL*) w sieciach telekomunikacyjnych ma swoje źródła w teorii informacji. Już w 1971 roku van der Meulen w pracy *Three-terminal communication channels* [34] sformalizował problem kanału z trzema terminalami, w którym sygnał nadawcy może być retransmitowany przez pośrednika do odbiorcy. Model ten stał się podstawą teorii retransmisji w systemach bezprzewodowych i określił granice pojemności dla transmisji wspomaganych przez dodatkowe węzły.

Kolejnym znaczącym wkładem były prace Covera i El Gamala [35], które w 1979 roku sformułowały twierdzenia pojemnościowe dla kanału relay. Wyniki te pokazały, że relay może zwiększać pojemność systemu poprzez stosowanie strategii *decode-and-forward* oraz *compress-and-forward*. W latach 2000. badania były rozwijane m.in. przez Gastpara, Kramera i Gupta [36], którzy rozszerzyli analizę na przypadek wielu węzłów pośrednich (*multiple-relay channel*) i problem klasteryzacji anten.

Z czasem koncepcja relay została zaadaptowana w rzeczywistych systemach bezprzewodowych. Laneman, Tse i Wornell [37] pokazali, że retransmisja może być traktowana jako forma *kooperacyjnej różnorodności* (*cooperative diversity*), pozwalającej na redukcję prawdopodobieństwa zaniku łącza (*outage probability*). Rozwój technologii *Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)* umożliwił wprowadzenie kooperacyjnych relay z wieloma antenami, czego przykładem jest praca Adinoyi i Yanikomeroglu [38]. Z kolei Xia i in. [39] zaproponowali mechanizmy buforowania w prostym kanale trzywęzłowym, co pozwalało na lepsze dopasowanie retransmisji do warunków kanałowych.

Na przełomie lat 2000–2010 intensywnie rozwijano koncepcję retransmisji w sieciach sensorowych *Wireless Sensor Network (WSN)*, wskazując na jej znaczenie dla efektywności energetycznej i niezawodności [40, 41]. Wraz z pojawieniem się Internetu Rzeczy zaczęto implementować różne strategie wsparcia komunikacji przez węzły pośrednie. W standardzie *Standardized protocol prepared by Wise Alliance in 2017 (WIZE)*, bazującym na profilu *wM-Bus-N*, retransmisja została wbudowana w architekturę systemową. Mechanizm deterministycznego *Time Division Multiple Access (TDMA)* eliminuje kolizje i zapewnia przewidywalne opóźnienia, co ma kluczowe znaczenie dla zastosowań w inteligent-

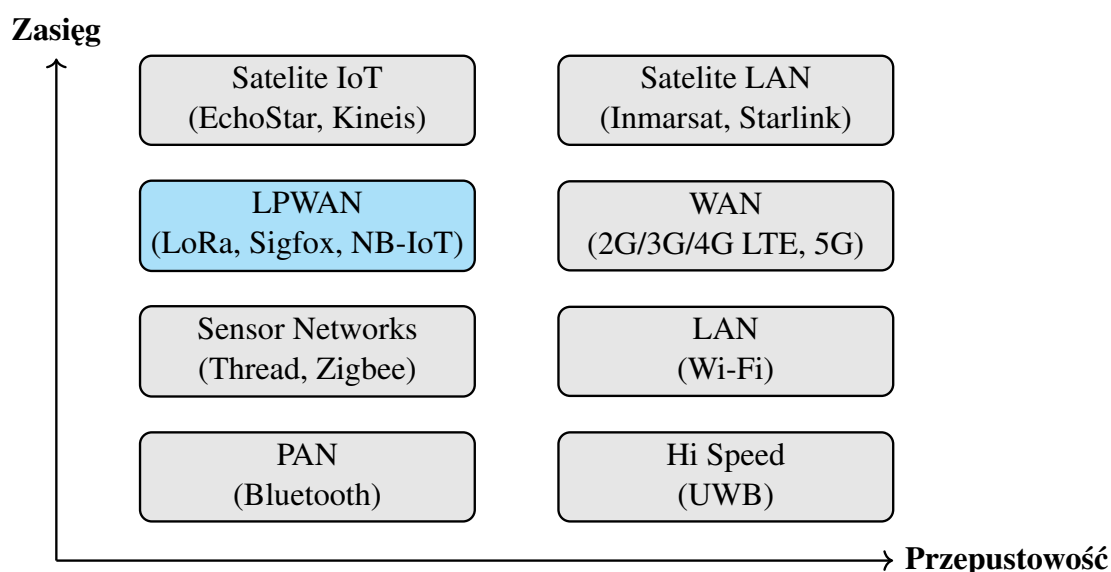
nych sieciach gazowych czy wodociągowych [42, 43]. W odmiennym kierunku rozwijał się *LoRaWAN*, gdzie stosowany jest prosty schemat ALOHA, a retransmisja realizowana jest głównie przez ponowne wysyłanie ramek w losowych oknach czasowych, co upraszcza protokół kosztem deterministyczności i zwiększa ryzyko kolizji. Z kolei w protokole *Wi-SUN*, wywodzącym się z rodziny IEEE 802.15.4, rola węzłów pośrednich realizowana jest poprzez mechanizm routingu mesh z dynamiczną selekcją ścieżki. W tym przypadku retransmisja nie jest ściśle slotowana, lecz wynika z protokołu routingu i potwierdzeń na warstwie MAC. Porównanie tych trzech podejść pokazuje, że rozwiązania LPWAN (np. *LoRaWAN*, *WIZE*) i sieci kratowych (np. *Wireless Smart Utility Networks (Wi-SUN)*) inaczej równoważą prostotę implementacji, deterministykę i efektywność energetyczną.

Historia badań nad relay prowadzi od teorii kanałów [34, 35], przez analizy wielorelayowe [36], kooperacyjną różnorodność [37], aż do praktycznych implementacji w systemach MIMO [38] i IoT [44]. Dzisiejsze standardy, takie jak *LoRaWAN*, *WIZE*, *Wi-SUN* są praktycznym zastosowaniem klasycznych idei — łączą deterministyczny *Medium Access Control (MAC) TDMA*, synchronizację czasową i retransmisję przez *RL*, aby zapewnić niezawodną komunikację w trudnych warunkach propagacji jak w przypadku rozwiązań *Smart City*.

2.1 Technologia LPWAN

Sieci *LPWAN* są projektowane z myślą o transmisji stosunkowo niewielkich porcji danych na znaczne odległości. W warunkach otwartej przestrzeni zasięg komunikacji może wynosić od kilkuset metrów do nawet kilkudziesięciu kilometrów [45]. Właściwości tych sieci w zakresie przepustowości oraz zasięgu, w porównaniu z innymi powszechnie stosowanymi technologiami komunikacyjnymi, przedstawia ilustracja 2.1. *LPWAN* stanowią efektywne medium transmisyjne dla rozwiązań *IoT* oraz komunikacji *Machine to Machine (M2M)*, w szczególności w zastosowaniach wymagających stacjonarnego odczytu danych, gdzie kluczowym ograniczeniem jest dostępność energii. Urządzenia końcowe zasilane bateryjnie mogą dzięki temu funkcjonować w sieci przez wiele lat, co czyni tę technologię atrakcyjną w przypadku rozproszonych wdrożeń urządzeń bateryjnych.

Ewolucja technologii *LPWAN* wskazuje na istnienie kilku równoległych nurtów rozwojowych, wynikających z odmiennych wymagań aplikacyjnych oraz modeli biznesowych. Rozwiązania oparte na pasmach nielicencjonowanych (np. *LoRaWAN*, *Sigfox*) zapewniają niski koszt wdrożeń i dużą elastyczność topologiczną, podczas gdy technologie *Third-Generation Partnership Project (3GPP) (NB-IoT, LTE-M)* korzystają z infrastruktury operatorów komórkowych i oferują integrację z ekosystemem *Fifth Generation (5G)*, większy determinizm dostarczenia danych kosztem opłat za transmisje oraz większym zużyciem energii. Obecny obraz sieci *LPWAN* charakteryzuje się koegzystencją i postępującą integracją różnych podejść, co stanowi podstawę do dalszych badań nad ich interoperacyjnością oraz efektywnością w zróżnicowanych scenariuszach *IoT*.



Rysunek 2.1: LPWAN na tle innych technologii radiowych. Zestawienie własne.

2.2 Strategie retransmisji sygnału w sieciach bezprzewodowych

W literaturze przedmiotu opisano kilka strategii retransmisji sygnału przez urządzenia pośredniczące [44]. W zależności od operacji, jakie wykonuje re-transmitter na odebranych sygnałach, można wyróżnić następujące strategie retransmisji:

- **Amplify-and-Forward AF** - przekaźnik retransmituje wzmocnioną wersję sygnału otrzymanego od źródła. Zaletą tego podejścia jest prostota implementacji, co czyni je atrakcyjnym w rozwiązaniach wymagających niskiej złożoności obliczeniowej. Wadą jest jednak fakt, że wraz z użytecznym sygnałem wzmocniane są również szумы oraz zakłócenia, co może obniżać jakość transmisji. Zagadnienie to zostało szeroko przeanalizowane w pracach dotyczących optymalizacji i alokacji zasobów [46, 47, 48]. Opiera się ono na zasadzie kooperacyjnej retransmisji.
- **Decode-and-Forward DF** - przekaźnik demoduluje i dekoduje do postaci cyfrowej otrzymany sygnał, a następnie ponownie go koduje i retransmituje do odbiorcy. Dzięki temu eliminowane są błędy wynikające z propagacji zakłóceń. Warunkiem skuteczności tej metody jest poprawne zdekodowanie sygnału przez stację pośrednią. Technika DF była szeroko badana np. w kontekście komunikacji MIMO [49] oraz w systemach z wieloma przekaźnikami [50].
- **Compress-and-Forward CF** - w tym przypadku przekaźnik przesyła skompresowaną lub zredukowaną wersję odebranego sygnału. W literaturze przedmiotu technika ta jest jednak opisywana rzadziej, a dominujące zastosowanie mają protokoły AF oraz DF. Niemniej jednak, CF wykazuje zalety w scenariuszach z ograniczoną przepustowością kanału powrotnego lub złożonymi warunkami propagacyjnymi, jak wskazują badania [51, 52, 53, 54].

W systemach *LPWAN* wykorzystywanych w zdalnym opomiarowaniu (smart metering) dominują rozwiązania bez węzłów pośrednich, w których niezawodność osiąga się przez powtórzenia ramek oraz dywersyfikację kanałową/czasową. Tam, gdzie dopuszcza się węzły pośredniczące (retransmitery), stosuje się przede wszystkim strategię *Decode-and-Forward (DF)*. Strategii *Compress-and-Forward (CF)*

w praktyce nie stosuje się, ponieważ ramki danych są krótkie i mają sztywną strukturę, przez co kompresja sygnału nie przynosi istotnych korzyści, a dodatkowo powszechne szyfrowanie typu *End-to-End (E2E)* uniemożliwia węzłowi pośredniemu dostęp do treści pakietu, co praktycznie wyklucza jej wykorzystanie (np. [55, 56]). Przegląd najczęściej używanych technologii wraz z informacją o obecności węzłów pośrednich zestawiono w tab. 2.1.

W odróżnieniu od powyższego, w komórkowych systemach *NB-IoT* i *LTE-M (Cat-M1)* pojęcie „retransmisji” obejmuje inny mechanizm fizyczny, zbliżony do *Amplify-and-Forward (AF)* oraz wielopunktowego odbioru: sygnał użytkownika jest równocześnie odbierany przez wiele stacji bazowych (*BTS/eNB/gNB*), a następnie łączony z wykorzystaniem precyzyjnej synchronizacji czasu/częstotliwości oraz znacznych zasobów obliczeniowych (m.in. w ramach procedur z rodziny *Hybrid automatic repeat request (HARQ)*). Taka architektura, choć technicznie interesująca, jest w praktyce nieadekwatna dla urządzeń bateryjnych i sieci niskoenergetycznych (wymaga stałej łączności z infrastrukturą operatora, ścisłej synchronizacji oraz dużej mocy obliczeniowej), dlatego nie będzie dalej analizowana w niniejszej pracy.

W dalszej części praca koncentruje się na retransmisji przez węzły pośrednie z zastosowaniem strategii *DF*. Pozostałe strategie (*CF*, *AF*) są nadmienione jedynie w celu zdefiniowania przestrzeni możliwych rozwiązań oraz odróżnienia ich od przyjętego modelu.

2.3 Zastosowanie węzłów pośrednich w wybranych sieciach radiowych

Celem niniejszej sekcji jest omówienie stanu wiedzy oraz powszechnie stosowanych rozwiązań retransmisji w kontekście dwóch sieci o różnych topologiach: gwiazda (reprezentowana przez *Wize/wM Bus*) oraz **siatka wieloskokowa** (reprezentowana przez *Wi SUN*). Analizujemy: (i) warstwę fizyczną (pasma, moc, modulacje/kodowanie), (ii) warstwę łącza danych (MAC) w kontekście retransmisji, (iii) zasady doboru węzła pośredniczącego i deduplikacji, (iv) mechanizmy bezpieczeństwa i widoczność danych pośrednika, (v) wyzwalanie retransmisji, (vi) politykę nasłuchu/wybudzania węzłów pośrednich, oraz (vii) implikacje energetyczne i pojemnościowe. Topologie i przebiegi czasowe pokazano odpowiednio na rysunkach 2.5, 2.4 a topologie sieci na 2.3, 2.2.

2.3.1 Wize / Wireless M-Bus (gwiazda)

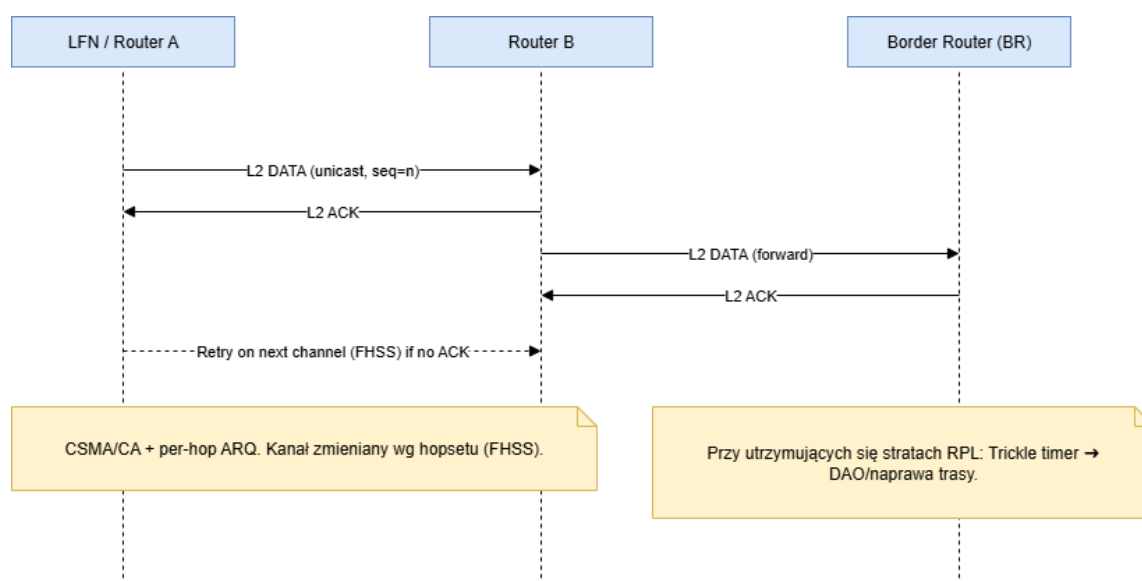
Warstwa fizyczna. Wize korzysta z rodziny trybów EN 13757-4 (Wireless M-Bus), z priorytetem dla pasma 169 MHz. Stosowane są kanały wąskopasmowe (np. 12,5 kHz) oraz modulacje z rodziny FSK (2FSK/4GFSK) o przepływnościach rzędu 2,4–6,4 kb/s. Dopuszczalne moce wypromieniowane w 169 MHz sięgają 500 mW (ERP), co w połączeniu z wąskim pasmem zapewnia korzystny budżet łącza. Warianty wM-Bus dla 868 MHz (tryby S/T/C) stosują analogiczną filozofię niskiej szybkości transmisji i niskiego poboru energii.

Warstwa MAC i retransmisja. Warstwa łącza definiuje identyfikację telegramów przez *Access Number (ACC)* oraz tryby jednokierunkowe (np. T1/S1) i dwukierunkowe (T2/S2). W trybach dwukierunko-

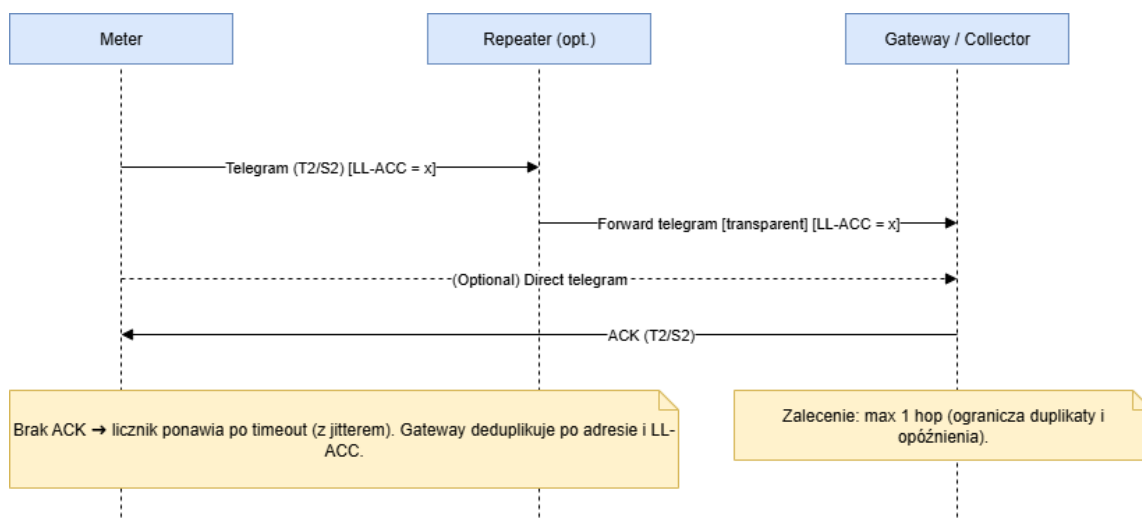
Tabela 2.1: Obecność węzłów pośredniczących w wybranych protokołach LPWAN

Protokół (rok)	Topologia (pasmo)	Węzły pośrednie		Uwagi
		Definicja	Klasa	
Wireless M-Bus (1997)	gwiazda <i>ISM</i>	tak (Multi hop)	DF	Licznik przeskoków i limit 1 hop; repeatery powszechne [57].
DASH7 / D7A (2005)	drzewo/mesh (433MHz + <i>ISM</i>)	tak (routing 2+ hop)	DF	Wieloskok w warstwie sieciowej. [58]
RPMA (2008)	gwiazda (2,4GHz)	nie	–	Spotykane „extenders”; brak formalizacji w rdzeniu [59].
Sigfox (2010)	gwiazda (<i>ISM</i>)	nie	–	Ograniczone przekaźnictwo, często tylko uplink [60].
Weightless (2010)	gwiazda (<i>ISM</i> , 169MHz)	nie	–	Brak jawnego mechanizmu multi-hop.
LoRaWAN (2015)	gwiazda (<i>ISM</i>)	tak (Relay TS011)	DF	TS011 definiuje przekaźnictwo; istnieją też eksperymentalne nakładki „mesh” poza core spec.
Wi-SUN (2015)	mesh (2,4GHz)	tak (mesh z BR)	DF	Multi-hop i RPL w specyfikacji [61].
NB-IoT (2017)	gwiazda (prywatne)	w warstwie sieciowej	AF	retransmisja na infrastrukturze komórkowej.
LTE-M (2017)	gwiazda (prywatne)	w warstwie sieciowej	AF	Analogicznie do NB-IoT.
Wize (2017)	gwiazda (169MHz)	tak (Single hop)	DF	Bazuje na EN 13757/wM-Bus; w praktyce 1 hop przez repeatery.
ZETA (2019)	mesh + gwiazda <i>ISM</i>	tak (mesh)	DF	Architektura LPWAN 2.0 z repeaterami i trasowaniem.
mioty (2020)	gwiazda <i>ISM</i>	nie	–	Brak wsparcia relay w specyfikacji.

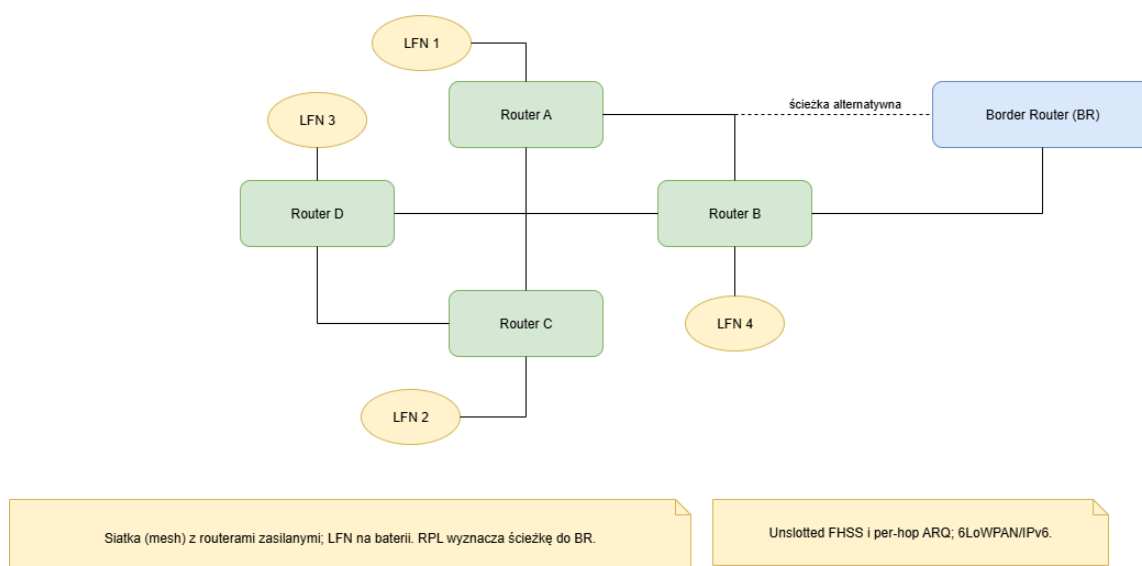
Legenda: „tak/nie” odnoszą się do obecności mechanizmu w oficjalnej specyfikacji.



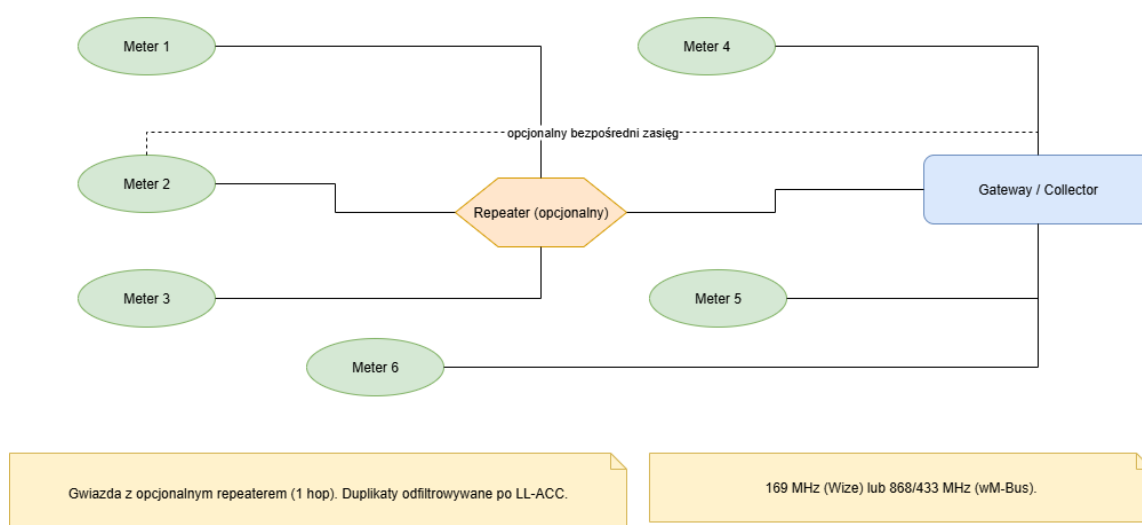
Rysunek 2.2: Sekwencja retransmisji w WiSUN.



Rysunek 2.3: Sekwencja retransmisji w Wize/wM-Bus.



Rysunek 2.4: Topologia Wi-SUN.



Rysunek 2.5: Topologia Wize / wM-Bus.

wych nadawca oczekuje potwierdzenia (ACK) w zdefiniowanym oknie czasowym; jego brak uruchamia retransmisję zgodnie z polityką trybu (liczba i odstęp powtórzeń). Dodatkowe pola rozszerzone *Extended Link Layer (ELL)* umożliwiają sterowanie zachowaniem retransmiterów i identyfikację źródła retransmisji.

Węzeł pośredniczący i deduplikacja. Węzeł pośredniczący *repeater* pracuje w trybie *przezroczystym DF*: po detekcji preambuły i słowa synchronizacji odbiera telegram, po czym emituje go ponownie bez ingerencji w dane. Wdrożenia praktyczne stosują *listy dozwolone* (białe) i *listy zabronione* (czarne) filtrujące po identyfikatorze urządzenia, co ogranicza powielanie ruchu. Deduplikacja realizowana jest w bramie/koncentratorze na podstawie pary {adres urządzenia, ACC}. Dla stabilności pojemnościowej przyjmuje się ograniczenie do **jednego przeskoku** (1 hop).

Szyfrowanie i widoczność danych. Profile *Open Metering System (OMS)* przewidują szyfrowanie *AES-128* (m.in. tryby *CBC* i *CCM*) oraz kontrolę integralności. Repeater nie posiada materiału klucza aplikacyjnego i nie odszyfrowuje telegramów; wszelka modyfikacja ładunku byłaby wykryta przez odbiorcę dzięki polom integralności.

Wyzwalanie retransmisji. W trybach T2/S2 brak *Acknowledge Radio Frame (ACK)* w oknie odpowiedzi powoduje ponowienie nadawania (z parametrami interwałów zgodnymi ze specyfikacją). W trybach jednokierunkowych powtórzenia mają charakter okresowy (raportowanie cykliczne) albo zdarzeniowy (stany alarmowe).

Polityka nasłuchu/wybudzania węzła pośredniego. Repeater jest z reguły zasilany z sieci i utrzymuje ciągły nasłuch na skonfigurowanych kanałach; odmiany bateryjne realizują nasłuch okienkowy. Nie stosuje się dedykowanego sygnału „budzącego” — aktywacja retransmisji wynika z detekcji preambuły/synchronizacji.

Energia i pojemność. Niska aktywność nadajnika po stronie liczników oraz wąskopasmowa emisja umożliwiają wieloletnią pracę zasilaną bateryjnie. Pojemność systemu ograniczają: (i) wąskie pasmo kanału, (ii) retransmisje generowane przez urządzenia pośredniczące (*repeater*), oraz (iii) konieczność unikania wieloskokowości. Zaletą rozwiązania jest deterministyczna deduplikacja na poziomie ACC oraz przewidywalny profil ruchu. Analogiczny efekt minimalizacji liczby aktywnych retransmiterów wykazano dla sieci BLE Mesh [62].

2.3.2 Wi-SUN FAN (siatka wieloskokowa)

Warstwa fizyczna. *Wi-SUN Field Area Network (FAN)* korzysta z *PHY* IEEE 802.15.4g w pasmach sub-GHz (m.in. 863–870, 902–928, 920 MHz), stosując modulację *FSK* (dziesiątki–setki kb/s) oraz, w nowszych profilach, *OFDM*. Istotnym elementem jest skakanie po częstotliwościach (*Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)*), realizowane w całej domenie sieciowej, co zwiększa odporność na zakłócenia i rozprasza kolizje. Limity mocy nadawczej wynikają z regulacji regionalnych.

Warstwa MAC i retransmisja. Warstwa łącza oparta na IEEE 802.15.4e wykorzystuje dostęp do nośnika z unikaniem kolizji *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)* oraz **potwierdzenia per-skok ACK** na łączu radiowym. W warstwach wyższych zastosowano kompresję nagłówków *IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN)* i trasowanie *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)* (IPv6). Retransmisje inicjowane są lokalnie na danym skoku (brak ACK), przy czym dzięki *FHSS* kolejne próby realizowane są na różnych kanałach. W scenariuszach degradacji ścieżki *RPL* rekonfiguruje drzewo trasowania, ograniczając konieczność eskalacji powtórzeń.

Węzeł pośredniczący, LFN i deduplikacja. Węzłami pośrednimi są routery siatki; pełnią one funkcję rodziców dla węzłów o ograniczonej funkcji *Low-Power FAN Node (LFN)*. *LFN* są bateryjne, nie realizują routingu i komunikują się wyłącznie przez rodzica; nie nadają bezpośrednio do *Border Router (BR)*. Wybór rodzica odbywa się zdecentralizowanie na podstawie funkcji celu *RPL* (np. *Minimum Rank with Hysteresis Objective Function (MRHOF)*) minimalizujący *Expected Transmission Count (ETX)* z histerią i progami jakości sygnału. Deduplikację zapewniają numery sekwencyjne 802.15.4 oraz mechanizmy *6LoWPAN* dla rozgłoszeń.

Szyfrowanie i widoczność danych. Dostęp do sieci realizuje się z użyciem *802.1X/EAP-TLS*, po czym dystrybuowane są klucze unicastowe i grupowe. Ochronę warstwy łącza zapewnia *AES-128-Counter with CBC-MAC (CCM)* na każdym skoku, zatem routery odszyfrowują i ponownie szyfrują ramki L2 (przy braku wglądu w treści wyższych warstw chronionych np. *DTLS/TLS*).

Wyzwalanie retransmisji. Brak potwierdzenia L2 ACK na danym skoku uruchamia retransmisję z parametrami zgodnymi z 802.15.4e i implementacją stosu. Długotrwały brak łączności skutkuje zmianą rodzica/ścieżki w *RPL* (sterowaną zegarem *trickle*), co redukuje lokalne powtórzenia.

Polityka nasłuchu/wybudzania węzłów pośrednich. Routery siatkowe są zawsze włączone (zwykle zasilane sieciowo) i podążają za harmonogramem *FHSS*. *LFN* realizują odbiór w *oknach czasowych* synchronizowanych z rodzicem; router musi być stale dostępny, aby terminowo dostarczać im dane i sterowanie.

Energia i pojemność. Pojemność sieci zwiększają: (i) wieloskokowość i alternatywne ścieżki, (ii) potwierdzenia per-skok, (iii) skakanie po częstotliwościach. Koszt energetyczny utrzymywania siatki przenoszony jest głównie na routery (zasilanie sieciowe), podczas gdy *LFN* osiągają długą żywotność dzięki okienkowemu odbiorowi.

2.4 Założenia modelowe i metryki modelu

W dalszej analizie przyjmuję następujące założenia modelowe do projektowanego sposobu retransmisji:

1. *Zakres zastosowań.* Rozwiązanie jest projektowane dla domeny *smart metering* i nie zakłada optymalizacji pod inne klasy zastosowań.
2. *Budżet energetyczny.* Zużycie energii *ED* pozostaje niezmiennie względem rozwiązania bazowego: $\sum_{i \in \mathcal{E}} E_{i,1}^{\text{ED}} = \sum_{i \in \mathcal{E}} E_{i,0}^{\text{ED}}$. Punkty dostępowe *GW* traktujemy jako zasilane sieciowo (brak ograniczeń energetycznych). Urządzenie pośredniczące *RL* jest zasilane bateryjnie z użyteczną pojemnością $C_{\text{batt}} = 3.2 \text{ Ah}$ i projektowanym czasem eksploatacji co najmniej $T_{\text{life}} = 5 \text{ lat}$.
3. *Realizowalność implementacyjna.* Model ma nadawać się do implementacji na fizycznym urządzeniu *RL* zbudowanym z powszechnie dostępnych komponentów elektronicznych o relatywnie niskim koszcie wytworzenia.
4. *Funkcja celu w skali infrastruktury.* Dążymy do minimalnej liczby węzłów pośredniczących R_1 przy maksymalizacji prawdopodobieństwa kompletnego zebrania dobowych danych P_{full} (zob. 2.4.1).
5. *Topologia i polityka retransmisji.* Model dopuszcza pojedynczy skok ($h_{\text{max}} = 1$) i zakłada brak wielokrotnego nadawania tej samej jednostki danych (*no multi-copy*). Ze względu na ograniczenia energetyczne *ED* nie zakłada się retransmisji przez inne *ED*.
6. *Zgodność protokołowa.* *RL* jest w pełni zgodny z *LoRaWAN*; z perspektywy komunikacji $ED \rightarrow GW$ również zachowana jest pełna zgodność z wymogami protokołu.
7. *Czasy dostarczenia pakietu.* Rozwiązanie powinno minimalizować czas potrzebny na dostarczenie pojedynczego pakietu z *ED* do *GW*.

W kolejnych podsekcjach zostały zdefiniowane zestawy metryk służących do oceny badanych zjawisk i scenariuszy działania mechanizmów retransmisji sygnału. Każda metryka ma spójne oznaczenie, krótki opis oraz zapis matematyczny, zgodny z implementacją w symulatorze (por. 6).

Konwencje i symbole wspólne

- $\mathcal{E}$ — zbiór urządzeń końcowych *ED*, $|\mathcal{E}| = N_E$.
- $\mathcal{R}$ — zbiór retransmiterów *RL*; podzbiory: $\mathcal{R}^{\text{LL}}$ (LoRa–LoRa), $\mathcal{R}^{\text{LTE}}$ (LoRa–LTE).
- $\mathcal{G}$ — zbiór punktów dostępowych *GW*.
- $\mathcal{C}$ — zbiór kanałów radiowych (gdy rozróżniamy wypełnienie per kanał).
- T_{sim} — horyzont czasowy symulacji; $T_d = 24 \text{ h}$ — okno dobowe; $\mathcal{D}$ — zbiór następujących po sobie okien dobowych w T_{sim} .
- „Dostarczony pakiet” = unikalna ramka UL, która dotarła do *LNS* (duplikaty sklejjane, np. po $\langle \text{DevAddr}, \text{FCntUp}, \text{payload} \rangle$).
- $\mathbf{1}[\cdot]$ — funkcja wskaźnikowa.
- Stany energetyczne $s \in \{\text{idle}, \text{rx}, \text{tx}\}$ z prądem I_s oraz czasem trwania T_s .

- Konwencja jednostek: we wszystkich metrykach oznaczonych symbolem E , rozumiemy *zużyty ładunek* w **mAh** (nie energię w J). Gdy symulator raportuje czasy w sekundach, stosujemy prze-licznik $\text{mAh} = \frac{1}{3600} (\text{mA} \cdot \text{s})$.

2.4.1 Prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu *uplink*

Oznaczenie: P_{UL}

Opis: Odsetek ramek *uplink* z urządzeń końcowych skutecznie dostarczonych do sieci, tj. takich, które dotarły do *LNS*. Ramka jest uznana za dostarczoną, jeśli została poprawnie odebrana i zdekodowana (FEC/CRC); błędy bitowe naprawione przez kodowanie korekcyjne *nie* obniżają wskaźnika. Ponieważ łącze *GW-LNS* traktujemy jako bezstratne, wskaźnik odpowiada także odsetkowi ramek odebranych przez co najmniej jedną stację bazową. Wielokrotne odebranie tej samej ramki (np. przez kilka *GWs*) nie zmienia wartości metryki.

$$\hat{P}_{\text{UL}} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{E}} N_{i,\text{UL}}^{\text{ok}}}{\sum_{i \in \mathcal{E}} N_{i,\text{UL}}^{\text{tx}}} \quad (2.1)$$

2.4.2 Prawdopodobieństwo dostarczenia zgłoszenia dziennego

Oznaczenie: $P_{\geq 1/d}$

Opis: Udział *dni-urządzeń*, w których dana *ED* ma co najmniej jedną dostarczoną ramkę *uplink* (tj. spełnia wymóg „odczytu dziennego”). Dostarczenie wielu kopii ramki w tej samej dobie nie zwiększa wartości wskaźnika.

$$Y_{i,d} = \mathbf{1}[N_{i,\text{UL}}^{\text{ok}}(d) \geq 1], \quad \hat{P}_{\geq 1/d} = \frac{1}{N_E |\mathcal{D}|} \sum_{i \in \mathcal{E}} \sum_{d \in \mathcal{D}} Y_{i,d} \quad (2.2)$$

2.4.3 Wypełnienie medium komunikacyjnego

Oznaczenie: ρ_{air} (globalnie) oraz ρ_c (per kanał $c \in \mathcal{C}$)

Opis: Procent czasu, w którym medium radiowe jest zajęte transmisją (przez dowolny nadajnik: *ED*, retransmiter lub *GW*). Dla LoRaWAN, gdzie dostęp do łącza realizowany jest w modelu ALOHA, wysokie wypełnienie wiąże się z rosnącą częstością kolizji i spadkiem P_{UL} ; po przekroczeniu pewnego progu może nastąpić gwałtowna degradacja wydajności. Wartość raportujemy globalnie oraz per kanał.

$$\hat{\rho}_{\text{air}} = \frac{\left| \bigcup_j \langle t_j^{\text{start}}, t_j^{\text{end}} \rangle \right|}{T_{\text{sim}}}, \quad \hat{\rho}_c = \frac{\left| \bigcup_{j \text{ na kanale } c} \langle t_j^{\text{start}}, t_j^{\text{end}} \rangle \right|}{T_{\text{sim}}} \quad (2.3)$$

2.4.4 Zużycie „energii” (ładunku) przez urządzenie końcowe

Oznaczenie: $E_{\text{ED}}, \bar{E}_{\text{ED}}$

Opis: Zużyty ładunek przez pojedynczą *ED* w horyzoncie T_{sim} oraz średnia po całej populacji. W

analizach urządzeń zasilanych bakteryjnie operujemy ładunkiem (mAh/mAs); przeliczenie do energii (Wh/J) wymaga uwzględnienia napięcia, jednak w niniejszej pracy raportujemy wartości w mAh (dla baterii Li-SOCl₂ typowo 3,6 V).

$$E_{ED}^{(i)} [\text{mAh}] = \sum_{s \in \{\text{idle}, \text{rx}, \text{tx}\}} I_s^{(i)} [\text{mA}] \cdot T_s^{(i)} [\text{h}], \quad \bar{E}_{ED} = \frac{1}{N_E} \sum_{i \in \mathcal{E}} E_{ED}^{(i)} \quad (2.4)$$

2.4.5 Zużycie „energii” (ładunku) przez retransmiter

Oznaczenia: E_{REL}^{LL} , E_{REL}^{LTE}

Opis: Zużyty ładunek przez retransmiter LoRa–LoRa oraz LoRa–LTE. W wariantcie LTE doliczamy ładunek na procedury przyłączenia i transmisję w sieci komórkowej.

$$E_r^{LL} = \sum_{s \in \{\text{idle}, \text{rx}, \text{tx}\}} I_s^{(r)} T_s^{(r)}$$

$$E_r^{LTE} = \sum_{s \in \{\text{idle}, \text{rx}, \text{tx}\}} I_s^{(r)} T_s^{(r)} + N_{\text{attach}}^{(r)} E_{\text{attach}} + N_{LTE_tx}^{(r)} E_{LTE_tx} \quad (2.5)$$

gdzie E_{attach} i E_{LTE_tx} są wyrażone w mAh na pojedyncze zdarzenie (zgodnie z modelami zasilania modemu).

2.4.6 Zużycie „energii” (ładunku) przez sieć

Oznaczenie: E_{NET}

Opis: Suma zużytego ładunku przez wszystkie EDs oraz wszystkie retransmitery. Zużycie energii punktów dostępowych (GW) *nie* jest uwzględniane (zasilanie sieciowe).

$$E_{NET} = \sum_{i \in \mathcal{E}} E_{ED}^{(i)} + \sum_{r \in \mathcal{R}^{LL}} E_r^{LL} + \sum_{r \in \mathcal{R}^{LTE}} E_r^{LTE} \quad (2.6)$$

2.4.7 Koszt różnicowy budowy sieci

Oznaczenie: $C_{\Delta}(H)$

Opis: Dodatkowy koszt (CAPEX + OPEX) względem scenariusza neutralnego, potrzebny do osiągnięcia blisko 100% odczytów dziennych. CAPEX obejmuje wytworzenie/zakup urządzeń oraz montaż; OPEX — opłaty za łączność oraz ewentualne wymiany baterii (materiał + robocizna).

$$C_{\Delta}(H) = C_{\Delta}^{\text{CAPEX}} + C_{\Delta}^{\text{OPEX}}(H)$$

$$C_{\Delta}^{\text{CAPEX}} = \Delta N_{GW} (c_{GW}^{\text{prod}} + c_{GW}^{\text{inst}}) + \Delta N_{RL}^{LL} (c_{RL}^{\text{prod}} + c_{RL}^{\text{inst}}) + \Delta N_{RL}^{LTE} (c_{RLTE}^{\text{prod}} + c_{RLTE}^{\text{inst}})$$

$$C_{\Delta}^{\text{OPEX}}(H) = M(H) (\Delta N_{GW} c_{GW}^{\text{conn}} + \Delta N_{RL}^{LTE} c_{RLTE}^{\text{conn}}) + \sum_{x \in \{GW, RL^{LL}, RL^{LTE}\}} \Delta N_x \left\lfloor \frac{H}{L_x} \right\rfloor c_x^{\text{bat}}$$

Tabela oznaczeń

Tabela 2.2: Zestawienie oznaczeń metryk stosowanych w analizie

Metryka	Oznaczenie	Jednostka	Opis
Prawdopodobieństwo dostarczenia UL	P_{UL}	–	Jakość dosyłu ramek UL
Prawdopodobieństwo ≥ 1 ramki dziennie	$P_{\geq 1/d}$	–	Spełnienie wymogu odczytu dziennego
Wypełnienie eteru (globalnie)	ρ_{air}	%	Zajętość medium przez dowolny nadajnik
Wypełnienie eteru per kanał	ρ_c	%	Zajętość dla kanału $c \in \mathcal{C}$
Zużycie ładunku przez ED	$E_{ED}, \bar{E}_{ED}$	mAh	Ładunek zużyty przez pojedyncze ED / średnia
Zużycie ładunku przez RL LoRa–LoRa	E_{REL}^{LL}	mAh	Stany: idle, rx, tx
Zużycie ładunku przez sieć	E_{NET}	mAh	Suma ED i RL (bez GW)
Koszt różnicowy budowy sieci	$C_{\Delta}(H)$	[krotność]	CAPEX + OPEX w horyzoncie H

Legenda: symbole E oznaczają zużyty ładunek w mAh (a nie energię w J). Zużycie liczono zgodnie z modelami zasilania opisanymi w 4.4.

2.4.8 Koszt budowy sieci

Poniżej przedstawiono koszty wytworzenia poszczególnych komponentów sieci. Ze względu na wrażliwy charakter danych podane zostały wyłącznie relacje kosztowe (stosunki kosztów), co stanowi informację wystarczającą do wyznaczenia $C_{\Delta}(H)$ (zob. 2.4.7). Na potrzeby kalkulacji przyjęto następujące założenia:

- **ED** — nakładka zliczająca montowana bezpośrednio na wodomierzu; z baterią o projektowanym czasie działania 10 lat; podana wartość stanowi średnią z kilku reprezentatywnych typów nakładek;
- **RL_A/RL_B** — urządzenie retransmitujące (węzeł pośredni *LoRa/LoRa*) o różnych nominalnych pojemnościach baterii;
- **RL_LTE** — odbiornik *LoRa* z łącznością *Long Term Evolution (LTE)* i nominalną pojemnością baterii 17 Ah
- **GW** — brama dostępowa zasilana z sieci, wyposażona w antenę dookólną o zysku +6 dBi, z zestawem montażowym i zasilaczem;
- **instalacja ED** — koszt instalacji urządzenia baterijnego (*ED* lub *RL*) niezwiązanego na stałe z infrastrukturą;

- **instalacji GW** — koszt instalacji stacji bazowej, obejmujący przyłączenie do instalacji elektrycznej, montaż uchwytu antenowego oraz zabezpieczenia przed wnikaniem wody;
- **abonament LTE** — pakiet danych *M2M* na 10 lat, zakładający dzienny transfer na poziomie kilobajtów.

Tabela 2.3: Relacje między kosztami wytworzenia poszczególnych elementów sieci.

rodzaj urządzenia	poj. baterii	partia prod	relacja kosztu
C_{ED}	5.2 Ah	20 000	$= 1C_{ED}$
C_{RLA}	5,2 Ah	1000	$\approx 1.00C_{ED}$
C_{RLB}	17Ah	1000	$\approx 2.07C_{ED}$
C_{RLLTE}	17Ah	1000	$\approx 2.97C_{ED}$
C_{GW}	-	100	$\approx 23.24C_{ED}$
instalacja ED lub RL		1x	$\approx 0.77C_{ED}$
instalacja GW		1x	$\approx 11.54C_{ED}$
abonament LTE Opex		10 lat	$\approx 0.33C_{ED}$

Dane na bazie realnych kosztów produkcji 2024.

Podane pojemności stanowią wartość teoretyczną podane przez producenta ogniw. Realna użyteczna pojemność dla pracy urządzenia w horyzoncie 10 lat, w pełnym zakresie temperatur i przy realistycznym profilu obciążenia, jest istotnie niższa, co przedstawiono w 4.4.3.

Tabela 2.4: Relacja kosztów instalacji dodatkowych elementów sieci względem urządzenia końcowego.

Element sieci	Ekwiwalent kosztu [ED]
Brama dostępowa	35,1
Retransmitter LTE	3,7
Retransmitter LoRa–LoRa	2,8

Rozdział 3

Specyfika technologii LoRa

Modulacja *LoRa* stanowi specyficzną odmianę modulacji *Chirp Spread Spectrum (CSS)*, która jest znacząco różna od powszechnie stosowanych klas jak: modulacji amplitudy (*Amplitude Modulation (AM)*), częstotliwości (*Frequency-Shift Keying (FSK)*), fazy (*Phase Shift Keying (PSK)*), a także ich pochodnych, takie jak *Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)*, *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)* oraz różne kombinacje powyższych. Dzięki temu sieci oparte na *LoRa* wykazują unikalne właściwości niedostępne w systemach. Do tych właściwości można zaliczyć m.in. dobór parametru *SF*, stosowanie dwóch rodzajów komunikatów (*up-chirp* i *dow-chirp*), znaczną odporność na zakłócenia wzajemne oraz dekodowanie sygnałów o poziomie niższym od poziomu szumu tła. Właściwości te powinny być brane pod uwagę podczas projektowania dedykowanego protokołu retransmisji. W kolejnych podrozdziałach omówiono szczególne cechy modulacji *LoRa* oraz możliwości ich wykorzystania w konstrukcji mechanizmów retransmisji.

3.1 Modulacja LoRa – kodowanie symboli za pomocą chirpów

Modulacja *LoRa* jest przykładem techniki *CSS*, w której pojedynczy symbol jest przedstawiony jako sygnał o liniowo zmieniającej się częstotliwości (*chirp*). W podstawowej wersji stosuje się *up-chirp*, tj. sygnał o częstotliwości rosnącej w funkcji czasu, oraz jego odwrotność – *down-chirp*, w którym częstotliwość maleje. Chirpy te wykorzystywane są zarówno do synchronizacji (preambuła), jak i do właściwego przenoszenia informacji.

3.1.1 Opis matematyczny

Długość symbolu T_s zależy od szerokości pasma B oraz SF co wynika bezpośrednio z 3.5:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{B}. \quad (3.1)$$

Chwilową częstotliwość bazowego *up-chirpa* można zapisać jako:

$$f_{\text{up}}(t) = \left(\frac{B}{T_s} t \right) \bmod B, \quad 0 \leq t < T_s. \quad (3.2)$$

Dla down-chirpa mamy analogicznie:

$$f_{\text{down}}(t) = \left(B - \frac{B}{T_s} t \right) \bmod B. \quad (3.3)$$

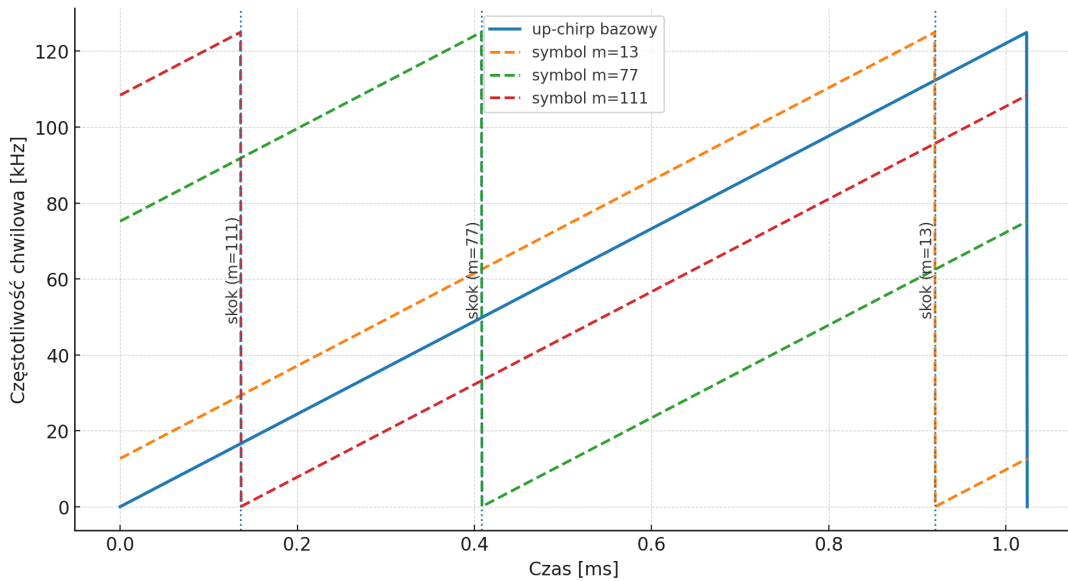
Symbol $m \in \{0, 1, \dots, 2^{SF} - 1\}$ jest kodowany jako czasowe przesunięcie bazowego chirpa o ułamek $m/2^{SF}$ jego długości:

$$f_m(t) = \left(\frac{B}{T_s} \left(t + \frac{m}{2^{SF}} T_s \right) \right) \bmod B. \quad (3.4)$$

Z powyższego równania wynika, że informacja jest reprezentowana przez moment tzw. *skoku częstotliwości* (*wrap-around*), czyli punkt w czasie, w którym sygnał osiąga granicę pasma i powraca do zera.

3.1.2 Wizualizacja sygnałów

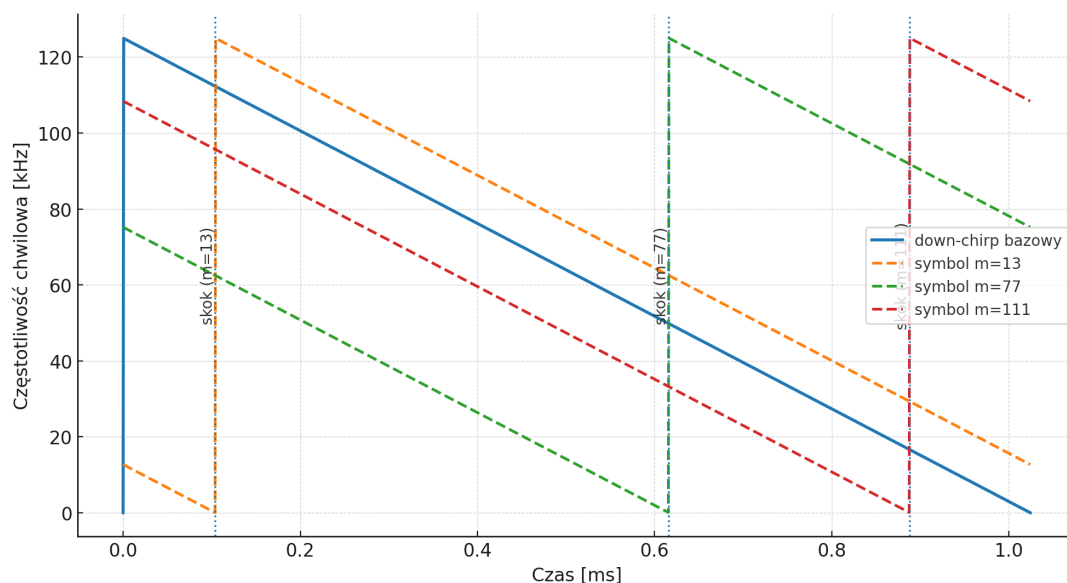
Na rysunkach 3.1 i 3.2 przedstawiono odpowiednio przebieg chwilowej częstotliwości dla up-chirpa oraz down-chirpa. Zaznaczono także przykłady symboli ($m = 13, 77, 111$), które powodują przesunięcie chirpa i generują różne pozycje skoków.



Rysunek 3.1: LoRa up-chirp z zaznaczonymi przykładami symboli i miejscami skoku dla $B = 125$ kHz, $SF = 7$, $T_s \approx 1.0$ ms.

3.1.3 Interpretacja fizyczna

Podstawą działania *LoRa* jest właściwość ortogonalności chirpów, która umożliwia dekodowanie symboli nawet przy niskim stosunku sygnału do szumu SNR . Przesunięcie fazowo-czasowe chirpa realizuje odwzorowanie $m \mapsto f_m(t)$, dzięki czemu odbiornik może odzyskać informację poprzez analizę częstotliwości chwilowej w chwili skoku. Rozdzielczość symboli, a więc i przepustowość, zależy wprost



Rysunek 3.2: LoRa down-chirp z zaznaczonymi przykładami symboli i miejscami skoku dla $B = 125$ kHz, $SF = 7$, $T_s \approx 1.0$ ms.

od wartości SF oraz pasma B . Zwiększenie SF wydłuża czas symbolu, co podnosi czułość odbioru kosztem szybkości transmisji.

3.1.4 Wykorzystanie up- i down-chirp w protokole LoRaWAN

W protokole *LoRaWAN* modulacja *CSS* pełni funkcję nie tylko mechanizmu odwzorowania symboli danych, lecz także stanowi narzędzie realizacji procesów synchronizacji oraz sygnalizacji w warstwie fizycznej. Zastosowanie przebiegów typu up-chirp oraz down-chirp można sklasyfikować w następujący sposób:

- **Up-chirp w preamble** – początkowa część każdej ramki składa się z sekwencji N symboli up-chirp, gdzie $N \geq 8$. Ich zadaniem jest umożliwienie odbiornikowi synchronizacji częstotliwościowej i czasowej poprzez korelację z lokalnie generowanym wzorcem. Preambuła pozwala zatem na wyrównanie przesunięć częstotliwości oraz fazy, przygotowując odbiornik do właściwej detekcji ramki. Dokładne wyznaczenie granicy między preambułą a częścią informacyjną następuje dopiero w oparciu o kolejną sekwencję synchronizacyjną.
- **Down-chirp jako sekwencja synchronizacyjna** – bezpośrednio po preambule nadawane są 2.25 symbolu down-chirp, które pełnią funkcję deterministycznego wzorca synchronizacyjnego (*Frame Sync*). Analiza momentu przejścia przebiegu z sygnału typu up-chirp do sygnału typu down-chirp umożliwia odbiornikowi jednoznaczne określenie początku nagłówka oraz części danych użytkowych (payload). Wzorec ten stanowi zatem granicę logiczną pomiędzy sekwencją preambuły a zasadniczą zawartością ramki.
- **Up-chirp z przesunięciem fazowo-czasowym** – w części informacyjnej każdy symbol $m \in \{0, 1, \dots, 2^{SF} - 1\}$ reprezentowany jest przez up-chirp przesunięty względem wzorca bazowego o $\frac{m}{2^{SF}} T_s$, gdzie T_s oznacza czas trwania symbolu. Proces demodulacji polega na mnożeniu ode-

branego sygnału przez lokalnie generowany down-chirp (operacja *de-chirpowania*), co powoduje sprowadzenie przesunięcia czasowego do postaci różnicy częstotliwości. Wartość zakodowanego symbolu jest następnie wyznaczana na podstawie pozycji maksimum w widmie po zastosowaniu transformaty Fouriera.

- **Down-chirp w procesie de-chirpowania** – down-chirp generowany w odbiorniku stanowi sygnał referencyjny w procesie demodulacji. Operacja de-chirpowania przekształca sygnał CSS do postaci wielotonowej, w której widmo zawiera wyraźne maksimum odpowiadające zakodowanemu symbolowi. Dzięki temu możliwe jest efektywne odwzorowanie informacji przy bardzo niskim stosunku sygnału do szumu.

3.1.5 Wnioski do projektowanego modelu retransmisji

Podsumowując, up-chirp jest wykorzystywany zarówno jako element preambuły, jak i nośnik informacji w części danych, natomiast down-chirp pełni rolę wzorca synchronizacyjnego oraz sygnału referencyjnego w procesie demodulacji.

Komunikacja pomiędzy *RL* a *GW* musi pozostać zgodna z wytycznymi *LoRaWAN* natomiast w przypadku komunikacji *ED* z *RL* możliwe było by wykorzystanie w preambule modulacji down-chirp celem np. zmniejszenia interferencji i wpływu na inne urządzenia sieci. Takie rozwiązanie na chwilę obecną niestety nie jest wspierane przez sprzętowe transceivery radiowe *LoRa* np. SX126x dlatego, ze względu na założenia pracy zakładające stosowalność przemysłową rozwiązania (zobacz 1.4), nie będzie rozpatrywane w dalszej analizie.

3.2 Współczynnik rozpraszania

Współczynnik rozpraszania SF określa stosunek liczby symboli wyjściowych do liczby bitów danych w modulacji CSS. Formalnie:

$$SF = \log_2 \left(\frac{T_{sym}}{T_{chip}} \right), \quad \text{gdzie} \quad T_{chip} = \frac{1}{B} \quad (3.5)$$

gdzie:

- T_{sym} – czas trwania symbolu,
- T_{chip} – czas trwania pojedynczego „chirpa”.
- B – szerokość pasma kanału, typowe wartości $B \in \{125 \text{ kHz}, 250 \text{ kHz}\}$.

W praktyce SF jest liczbą całkowitą z zakresu od 7 do 12 gdzie m $SF7$ oznacza najmniejsze rozciągnięcie sygnału (najkrótszy czas transmisji), a $SF12$ oznacza największe rozciągnięcie w czasie (najdłuższy czas transmisji, ale najlepszą czułość). Wzrost SF zwiększa czułość odbiornika, nawet do poziomu -137 dBm dla $SF12$ [63], co umożliwia transmisję na dalsze odległości. Parametr SF definiuje wprost liczbę bitów informacji kodowanej przez pojedynczy symbol (chirp).

3.2.1 Czas transmisji, przepływność, czułość

Czas transmisji pakietu rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem SF [63, 64]. Symbol LoRa składa się z 2^{SF} chipów. W tabeli 3.1 przedstawiona została zależność parametrów transmisji od SF oraz *Bandwidth* (BW). Rozpatrujemy przypadek ramki radiowej zawierającej 51 bajtów danych 6.9.1 nadawanej przez nadajnik z mocą +14dBm używając kodowania 4/5. Podane wartości SNR_{min} oraz *Maximum Coupling Loss* (MCL) są wartościami teoretycznymi.

Wartości bazują na poniższych wyliczeniach wg [63]:

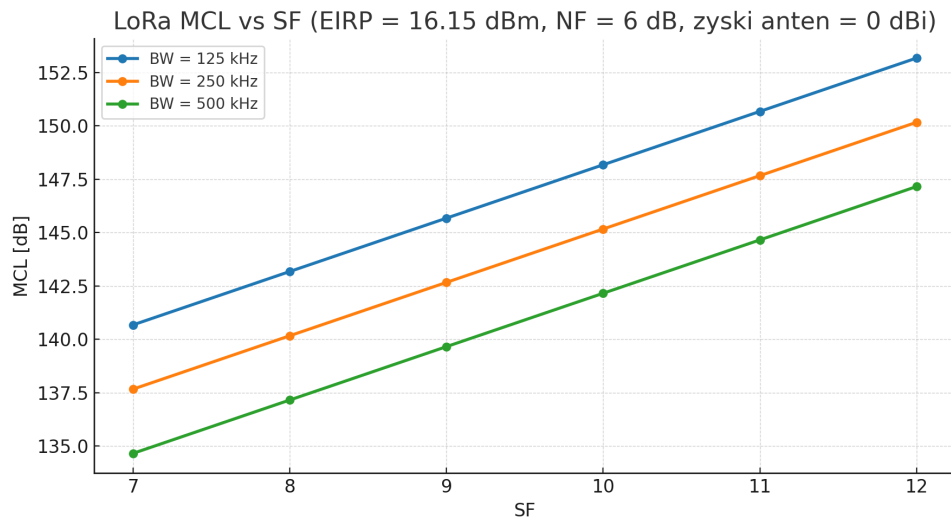
$$T_{\text{packet}} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}}, \quad (3.6)$$

$$T_{\text{preamble}} = (N_{\text{preamble}} + 4.25) T_{\text{sym}}, \quad (3.7)$$

$$T_{\text{sym}} = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad (3.8)$$

$$N_{\text{payload}} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8 PL - 4 SF + 28 + 16 CRC - 20 IH}{4 (SF - 2 DE)} \right\rceil \cdot (CR_{\text{val}} + 4), 0 \right), \quad (3.9)$$

$$T_{\text{payload}} = N_{\text{payload}} T_{\text{sym}}. \quad (3.10)$$



Rysunek 3.3: Wpływ współczynnika rozpraszania na budżet linku dla pasm od 125 do 500kHz w modulacji LoRa.

3.2.2 Działanie algorytmu Adaptive Data Rate

Algorytm *Adaptive Data Rate* (ADR) w LoRaWAN realizuje sterowanie parametrami łącza w taki sposób, aby utrzymywać poziom sygnału odebranego (SNR) w pobliżu wartości docelowej R^* — wystarczającej do poprawnej demodulacji, lecz tylko nieznacznie przewyższającej próg odbioru. Dzięki temu ograniczany jest zbędny margines mocy oraz czas zajęcia kanału, co wpływa korzystnie na skalowalność sieci i zużycie energii.

Tabela 3.1: Parametry LoRa dla różnych SF i BW

BW (kHz)	SF (–)	R_b (kbps)	T_{sym} (ms)	$N_{payload}$ (sym)	ToA (ms)	SNR_{th} (dB)	$Sens_{th}$ (dBm)	MCL (dB)
125	7	5.47	1.024	88	103	-7.5	-124.5	140.7
125	8	3.12	2.048	78	185	-10.0	-127.0	143.2
125	9	1.76	4.096	68	329	-12.5	-129.5	145.6
125	10	0.98	8.192	63	616	-15.0	-132.0	148.1
125	11	0.54	16.384	68	1315	-17.5	-134.5	150.7
125	12	0.29	32.768	63	2466	-20.0	-137.0	153.2
250	7	10.94	0.512	88	51	-7.5	-121.5	137.7
250	8	6.25	1.024	78	92	-10.0	-124.0	140.2
250	9	3.52	2.048	68	164	-12.5	-126.5	142.7
250	10	1.95	4.096	63	308	-15.0	-129.0	145.2
250	11	1.07	8.192	58	575	-17.5	-131.5	147.7
250	12	0.59	16.384	63	1233	-20.0	-134.0	150.2
500	7	21.88	0.256	88	26	-7.5	-118.5	134.7
500	8	12.50	0.512	78	46	-10.0	-121.0	137.2
500	9	7.03	1.024	68	82	-12.5	-123.5	139.7
500	10	3.91	2.048	63	154	-15.0	-126.0	142.2
500	11	2.15	4.096	58	288	-17.5	-128.5	144.7
500	12	1.17	8.192	53	535	-20.0	-131.0	147.2

Założenia do obliczeń:

- długość pola danych *netto* 51B.
- długość preambuły $N = 8$ symboli (czas preambuły obliczany jako $(N + 4.25) T_{sym}$),
- kodowanie korekcyjne $CR = 4/5$,
- nagłówek jawny ($IH = 0$),
- włączona suma kontrolna CRC,
- *Low Data Rate Optimization* aktywne, gdy $T_{sym} > 16$ ms,
- zyski anten $G_{TX} = 0$, $G_{RX} = 2.14$ dBi (antena typu dipol, zysk w przestrzeni swobodnej),
- moc nadajnika $P_{TX} = +14$ dBm (ERP) $\approx +16.15$ dBm ($EIRP$)
- figura szumowa odbiornika $NF = 6$ dB,
- brak marginesów implementacyjnych.

Specyfikacja *LoRaWAN* definiuje jedynie mechanizm *ADR* (bity *ADR/ADRACKReq*, komendy *MAC LinkADRReq/LinkADRAns*, parametry *ADR_ACK_LIMIT/ADR_ACK_DELAY* oraz procedurę *back-off* po stronie urządzenia), natomiast nie precyzuje algorytmu decyzyjnego po stronie sieci; szczegółowa logika doboru parametrów zależy od implementacji *LNS*. W literaturze podkreśla się, że niewłaściwa konfiguracja parametrów *ADR* może prowadzić do nadmiernie optymistycznego obniżania wartości SF i mocy nadawczej, co w konsekwencji skutkuje istotnym wzrostem prawdopodobieństwa utraty pakietów — nawet powyżej 50% [65].

Algorytm wykorzystuje sprzężenie zwrotne z raportowanych przez *GW* metryk łącza (typowo SNR , kumulowanych w oknie czasowym po stronie sieci). Na tej podstawie sieć wysyła komendy sterujące do urządzenia modyfikując SF , moc nadawczą P_{TX} , oraz — w razie potrzeby — liczbę powtórzeń ramek. Utrzymywanie $\overline{RSSI}$ blisko R^* ma dwie konsekwencje na poziomie sieci: Redukcja czasu zajęcia kanału (*ToA*) — przejście do szybszego trybu skraca transmisje i zmniejsza prawdopodobieństwo kolizji, co przekłada się na większą pojemność. Minimalizacja energii na bit — obniżenie mocy i skrócenie czasu emisji redukuje zużycie energii w urządzeniu końcowym.

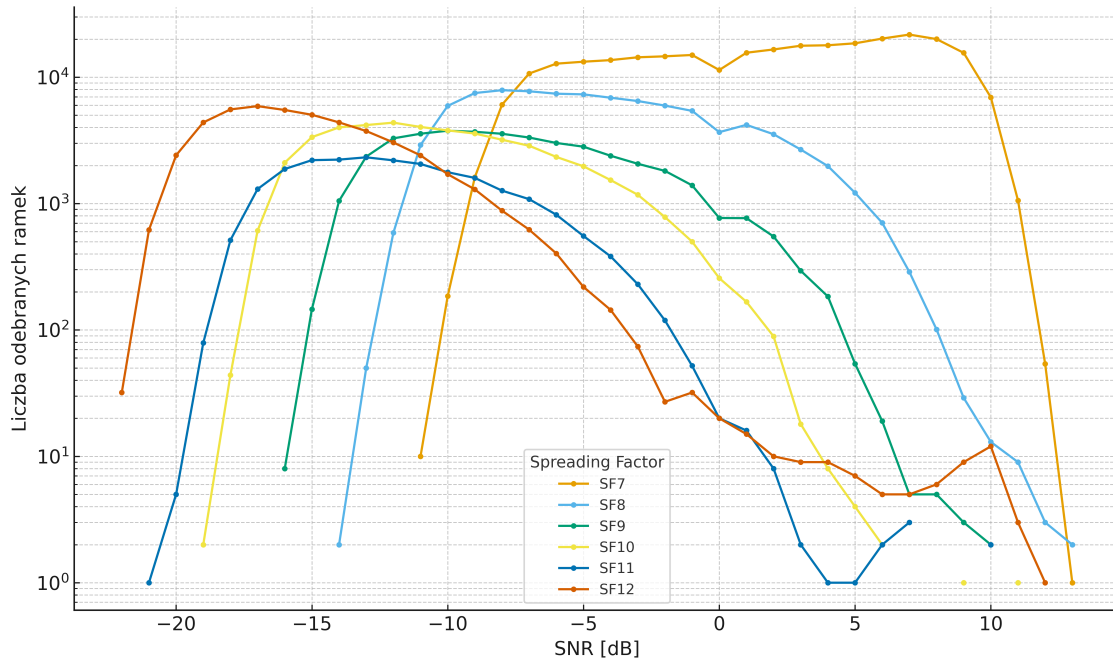
Skuteczność *ADR* zależy od stacjonarności kanału i możliwości zebrania reprezentatywnej historii pomiarów. W scenariuszach mobilnych lub silnie zmiennych konieczne jest przyjęcie większego marginesu ε oraz mniejsze kroki regulacji. Mechanizmy sygnalizacyjne (np. potwierdzenie dostarczenia pakietu przez ramkę *ACK*) ograniczają ryzyko niedostrojenia w długich okresach ciszy *uplink*. Algorytm musi również respektować ograniczenia regionalne (limity mocy, duty cycle) oraz asymetrię *downlink/uplink*.

Problem działania *ADR* można ująć jako zadanie optymalizacji:

$$\min_{SF, P_{TX}, N_{rep}} \mathbb{E}[E_{tx}] \quad \text{s.t.} \quad \overline{RSSI} \geq \text{Sens}_{th} + \varepsilon, \quad PER \leq \delta, \quad (3.11)$$

gdzie N_{rep} — liczbę powtórzeń. Rozwiązania praktyczne bazują na heurystykach progowych i krokach kwantowanych, co pozwala zapewnić zbieżność i niską złożoność obliczeniową.

Przykład poprawnie działającego mechanizmu *ADR*, na podstawie instalacji obejmującej około ≈ 62 tysięcy urządzeń końcowych, przedstawiono na rys. 3.4. Rysunek ten ilustruje liczbę odebranych ramek z poszczególnymi wartościami *SF*. Na wykresie widać, że poza przypadkiem *SF*7, dla którego algorytm *ADR* nie może już przełączyć parametru *SF* na niższy, we wszystkich pozostałych przypadkach maksymalna liczba odebranych ramek rejestrowana jest kilka decybeli powyżej progu czułości odbiornika.

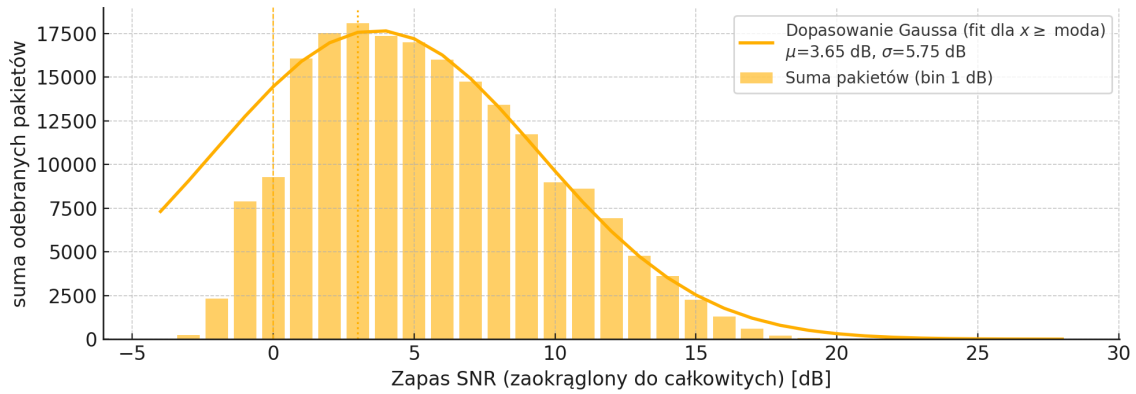


Rysunek 3.4: Liczba odebranych ramek radiowych w funkcji *SNR* dla różnych parametrów *SF*. Wykres na bazie danych tygodniowych zebranych z instalacji ≈ 62 tysięcy urządzeń.

Aby to uwidocznnić, dane dla kolejnych *SF* (z wyłączeniem *SF*12 i *SF*7, których nie można odpowiednio zwiększyć/zmniejszyć) przeliczono na zapas Δ wyrażony wzorem

$$\Delta = SNR_{meas} - SNR_{th}, \quad (3.12)$$

z progami SNR_{th} z tab. 3.1 i podzielono na przedziały o szerokości 1 dB. Otrzymany rozkład (rys. 3.5) dopasowano jednostronnie rozkładem Gaussa tylko po prawej stronie (od mody wzwyż), co eliminuje wpływ obciążenia w okolicy $\Delta \approx 0$. Uzyskano wartości $\mu \approx 3,65$ dB, $\sigma \approx 5,75$ dB oraz $R_{right}^2 \approx 0,997$, co bardzo dobrze odzwierciedla rzeczywiste dane. Obserwacja potwierdza, że ADR stabilizuje pracę sieci wokół niewielkiego, dodatniego zapasu rzędu 3–4 dB. Gdyby w badanym przypadku mechanizm ADR był wyłączony a SF wymuszone na wartość 12 sumaryczny czas nadawania w ujęciu całej sieci byłby ok. $5,6 \times$ większy.



Rysunek 3.5: Rozkład zapasu czułości Δ dla współczynnika rozpraszania $\in \{8 \dots 11\}$.

Podsumowując ADR, poprzez regulację SF oraz ewentualnie P_{TX} i N_{rep} , utrzymuje poziom SNR blisko czułości granicznej z niewielkim marginesem. Pozwala to zapewnić poprawną demodulację sygnału przy jednoczesnym ograniczeniu nadmiernych zasobów energetycznych i czasowych, zwiększając efektywność współdzielenia medium radiowego w sieciach LoRaWAN.

3.3 Lokalizacja urządzeń na podstawie sygnałów ze stacji bazowych

Wybrane mechanizmy retransmisji w architekturach z węzłami pośredniczącymi wymagają wiedzy o położeniu węzłów, aby podejmować poprawne decyzje o doborze ścieżki. W szczególności znajomość lokalizacji urządzeń końcowych ED oraz węzłów pośredniczących RL jest konieczna do działania niektórych mechanizmów retransmisji (np. zaproponowany w dalszej części pracy 5.2), dlatego zagadnienia lokalizacji w sieciach LoRaWAN zostaną krótko omówione w niniejszym podrozdziale.

Przegląd metod. W literaturze i praktyce wyróżnia się trzy główne klasy metod lokalizacji w LoRa/LoRaWAN z użyciem wyłącznie sygnałów odbieranych w wielu stacjach bazowych: (i) różnice czasu nadejścia *Time Difference of Arrival (TDoA)*, (ii) metody oparte na mocy sygnału RSSI (multilateracja lub fingerprinting), oraz (iii) *Angle of Arrival (AoA)* (kąt nadejścia). Dostępne są także podejścia hybrydowe (np. *Time Difference and Angle of Arrival (TDAoA)*, tj. fuzja TDoA i AoA). Techniki te zazwyczaj nie wymagają modyfikacji po stronie ED, gdyż obliczenia realizowane są w infrastrukturze sieci (serwer lokalizacji będący częścią LNS).

TDoA. Metody *TDoA* wykorzystują różnice czasów dotarcia tej samej ramki *uplink* do co najmniej trzech zsynchronizowanych bramek. Dla pary bramek i, j pomiar ma postać

$$\Delta t_{ij} = \frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{g}_i\| - \|\mathbf{x} - \mathbf{g}_j\|}{c} + \varepsilon_{ij}, \quad (3.13)$$

gdzie $\mathbf{x}$ to szukana pozycja *ED*, $\mathbf{g}_i$ – położenie i -tej bramki, c – prędkość propagacji, a ε_{ij} – błąd pomiaru. Rozwiązanie problemu multilateracji uzyskuje się poprzez przecięcie hiperbol wyznaczonych przez wszystkie Δt_{ij} (np. metodami Chan/Foy lub estymacją maksymalnej wiarygodności, *Maximum Likelihood Estimation (MLE)*) [66]. Kluczowym wymaganiem jest dokładne znacznikowanie czasu w bramkach oraz ścisła synchronizacja (sygnał *Pulse Per Second (PPS)* z *Global Navigation Satellite System (GNSS)*). W przypadku wąskopasmowej modulacji LoRa filtry wejściowe toru radiowego wprowadzają istotne opóźnienia grupowe (dla pasma 125 kHz odpowiada im stała czasowa rzędu $\sim 8, \mu\text{s}$) a nawet minimalna ich niedeterministyczność przekłada się bezpośrednio na błąd *ToA/TDoA*. Dla intuicji: $1 \text{ ns} \approx 0,3 \text{ m}$ przebytej drogi fali radiowej, zatem błędy nanosekundowe mogą powodować przesunięcia przekraczające 1m. Z tego powodu w *LoRaWAN* krytyczna jest jednocześnie precyzja znaczników czasu i deterministyczność toru radiowego.

Warto podkreślić, że sama koncepcja *TDoA* sprawdza się wyjątkowo dobrze w technologiach szerokopasmowych, zwłaszcza w *Ultra-Wideband (UWB)*, gdzie rozdzielczość czasowa jest o rząd wielkości wyższa niż w *LoRa/LoRaWAN*. W badaniach empirycznych na ruchomych obiektach udało nam się potwierdzić dokładność na poziomie centymetrów–dziesiątek centymetrów, co opisaliśmy w publikacji [9]. Porównanie to podkreśla, że dokładność *TDoA* w *LoRaWAN* limituje przede wszystkim wąskie pasmo (a więc i opóźnienia grupowe toru) oraz wymagania synchronizacyjne, a nie sama metoda estymacji.

RSSI. Metody oparte na *RSSI* obejmują (a) klasyczną multilaterację (po kalibracji modelu tłumienia) oraz (b) *fingerprinting*, tj. dopasowanie wektora cech radiowych do uprzednio zbudowanej radiomapy [67]. W otwartej przestrzeni (np. tereny niezabudowane) dobrze skalibrowana multilateracja *RSSI* potrafi dawać użyteczne wyniki. W przestrzeni miejskiej – ze względu na silnie *niedeterministyczne* warunki tłumienia (zacienienia, odbicia, wielodrożność) – błędy szybko rosną i podejście oparte na idealizowanych modelach zaniku okazuje się mało wiarygodne. Dodatkowo, pomiary *RSSI* są *mocno zaburzone przez interferencje i kolizje* w paśmie nielicencjonowanym, co empirycznie pokazano w 4.2.3. W takich warunkach *fingerprinting* z metodami *Machine Learning (ML)* zazwyczaj przewyższa czystą multilaterację.

AoA i podejścia hybrydowe. *AoA* estymuje kierunek do nadajnika na podstawie różnic fazowych w macierzy antenowej/torach RF; wymaga to specjalizowanych bram dostępowych oraz precyzyjnego toru fazowego. System LoRay pokazał poprawne działanie *AoA* z błędami rzędu kilku stopni w warunkach miejskich [68]. W połączeniu z *TDoA* (tj. *TDAoA*) kierunkowe informacje *AoA* poprawiają rozwiązanie multilateracyjne, zwłaszcza przy małej liczbie bramek, co potwierdzono eksperymentalnie i symulacyjnie [69].

Stan badań i granice możliwości. Poza „kanonicznym” *LoRaWAN*, intensywnie badane są systemy łączące wiele wąskopasmowych kanałów lub pasm (*frequency stitching*) oraz rozproszone sieci stacji o dużej aperturze. Przykład opisany w artykule OwLL [70] wykorzystuje *TV White Spaces (TVWS)* i osiąga medianę błędu rzędu 9 m w skali kampusu/miasta — zarówno w warunkach *Line of Sight (LOS)*, jak i *Non-Line of Sight (NLOS)* — lecz wymaga niestandardowych pasm i infrastruktury. Z kolei ILLOC [71] pokazuje, że precyzyjne znacznikowanie ramki *uplink* oraz odpowiednia obróbka czasowa umożliwiają wielometrową dokładność w obiektach wielkokubaturowych.

Implikacje wdrożeniowe. Dla zastosowań outdoor w skali miasta/regionu rekomendowana jest *TDoA* z co najmniej 3–4 bramkami o dobrej geometrii i ze *fine timestamp*. Wybór koncentratorów zbudowanych w oparciu o układy SX1303 (lub równoważnych) oraz synchronizacja *PPS* są krytyczne dla stabilności rozwiązania [72, 73]. W środowiskach *indoor* i kampusowych praktyczna jest lokalizacja oparta o fingerprinting *RSSI*, a tam gdzie liczba bramek jest ograniczona — warto rozważyć hybrydy *TDAoA* [69].

Podsumowanie. Lokalizacja realizowana po stronie infrastruktury *LoRaWAN* (serwer lokalizacji/*LNS*) jest możliwa bez ingerencji w *ED* i obejmuje spektrum metod od *TDoA* przez *RSSI* po *AoA* oraz ich fuzje. Dobór techniki zależy od środowiska (*outdoor/indoor*), geometrii bramek (*Geometric Dilution of Precision (GDOP)*), możliwości sprzętowych (*fine timestamp*, układy fazowe) oraz wymagań aplikacyjnych (dokładność vs. koszt/energia). Informacja o położeniu może być wykorzystana bezpośrednio do doboru węzła pośredniczącego *RL* dla danego *ED* oraz do wyznaczania niepokrywających się okien retransmisji dla każdego *RL*. Wnioski te mogą być użyte w projektowaniu sposobów retransmisji i sterowaniu ruchem realizowanym przez *LNS*.

Rozdział 4

Badanie wybranych aspektów LoRa

Niniejszy rozdział prezentuje wyniki badań eksperymentalnych nad wybranymi aspektami warstwy radiowej *LoRa* oraz elementów infrastruktury sieci *LoRaWAN* — urządzeń końcowych i bram dostępowej — istotnych dla projektowanego sposobu retransmisji. Zastosowano trzy komplementarne źródła danych: testy syntetyczne w warunkach kontrolowanych, pomiary terenowe w środowisku zurbanizowanym oraz analizę długookresowych danych pomiarowych z rzeczywistych wdrożeń (por. 1.4). W kolejnych podrozdziałach badam m.in. wpływ doboru kanału oraz wielodrogowości na odbiór, empiryczną zależność $RSSI/SNR$ od prawdopodobieństwa doręczenia pakietu, quasi-ortogonalność wartości SF i efekt przechwycenia, a także uwarunkowania energetyczne urządzeń i konsekwencje regulacyjne (współczynnik zajętości kanału). Uzyskane obserwacje stanowią podstawę doboru parametrów w symulatorze oraz decyzji projektowych dotyczących strategii retransmisji i sterowania współczynnikiem rozpraszania, wykorzystywanych w dalszej części pracy; definicje miar i oznaczeń zebrano w 2.4.

4.1 Dobór kanałów transmisyjnych oraz zjawisko wygaszania wielotorowego

Zjawisko wygaszania wielotorowego *Multipath Fading (MF)*, wynikające z fizycznych warunków propagacji sygnału radiowego, jest obecne we wszystkich rodzajach sieci [74], również w sieciach LoRa.

Powstaje ono w środowisku, w którym sygnał nadawczy dociera do odbiornika wieloma ścieżkami w wyniku odbić, załamania, rozproszeń i dyfrakcji sygnału na przeszkodach takich jak budynki, ściany, powierzchnie ziemi czy obiekty ruchome. W efekcie w punkcie odbioru fale o różnych opóźnieniach, fazach i amplitudach sumują się zwiększając lub zmniejszając amplitudę sygnału. Powoduje to zmienność mocy sygnału i możliwe pogorszenie jakości odbioru.

4.1.1 Model teoretyczny

Niech sygnał nadawany ma postać harmoniczną:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi), \quad (4.1)$$

gdzie: A – amplituda, f_c – częstotliwość nośna, ϕ – faza początkowa.

W kanale wielodrogowym odbiornik rejestruje sygnał będący sumą wielu kopii przesłanych różnymi ścieżkami:

$$r(t) = \sum_{i=1}^N a_i s(t - \tau_i) e^{j\phi_i}, \quad (4.2)$$

gdzie:

- a_i – tłumienie i -tej ścieżki,
- τ_i – opóźnienie czasowe,
- ϕ_i – przesunięcie fazowe,
- N – liczba dróg propagacyjnych.

W przypadku sygnału szerokopasmowego opisuje się kanał funkcją odpowiedzi impulsowej:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N a_i e^{j\phi_i} \delta(t - \tau_i), \quad (4.3)$$

a odbierany sygnał jest splotem sygnału nadawanego z odpowiedzią impulsową kanału:

$$r(t) = s(t) * h(t). \quad (4.4)$$

4.1.2 Modele statystyczne

W sieciach radiowych często stosuje się modele statystyczne do opisu zjawiska zakładając iż środowisko propagacyjne jest losowe. Przykładowo model

Rayleigh fading – gdy nie występuje wyraźna ścieżka dominująca (np. w środowiskach miejskich). Amplituda sygnału opisana jest rozkładem Rayleigha:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r \geq 0, \quad (4.5)$$

gdzie σ – parametr zależny od mocy średniej sygnału.

Rice (Rician) fading – gdy istnieje dominująca ścieżka LOS (Line-of-Sight) obok komponentów rozproszonych. Rozkład Rice’a opisuje amplitudę sygnału jako:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right), \quad (4.6)$$

gdzie A – amplituda sygnału bezpośredniego, a $I_0(\cdot)$ – zmodyfikowana funkcja Bessela pierwszego rodzaju.

W przypadku komunikacji na stosunkowo małą odległość między RL i ED zwłaszcza w sytuacji gdzie anteny obu urządzenia pozostają nieruchome przez cały okres eksploatacji oraz przy niezmiennym otoczeniu powodującym powstawanie tych samych ścieżek odbitych możliwe jest znaczące występowanie zjawiska. Dlatego został wykonany dedykowany test oraz późniejsza analiza danych obiektowych.

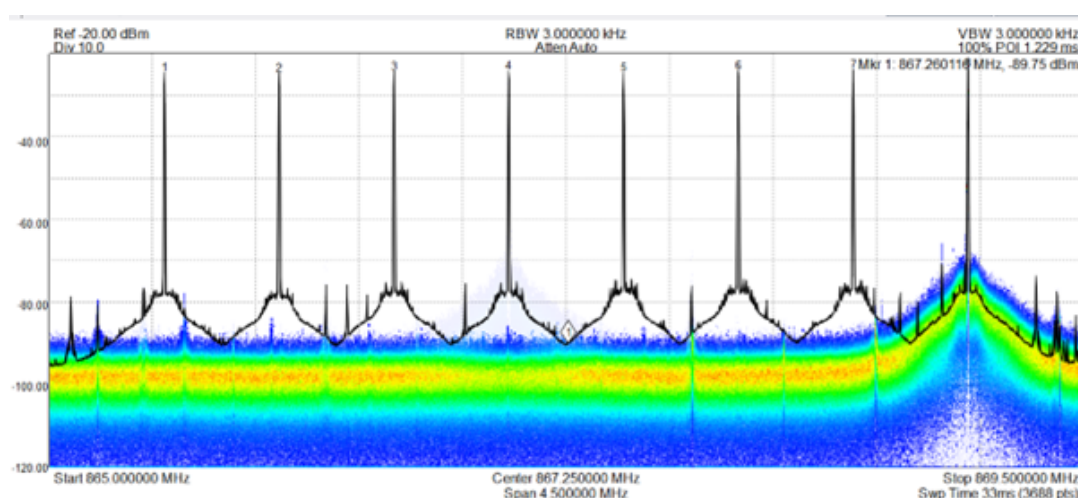
4.1.3 Test syntetyczny

W teście syntetycznym na pojedynczej parze urządzeń próbowałem odtworzyć zjawisko wygaszania lub wzmacniania wielotorowego *MF*. Jako iż efekt jest ściśle zależny od częstotliwości 4.1 jego efekt powinien być zależny od częstotliwości nośnej dlatego powinien wykazywać różne nasilenia dla różnych kanałów transmisyjnych.

Test wykonano z użyciem pojedynczego nadajnika i pojedynczego odbiornika w terenie zurbanizowanym pomiędzy budynkami. Nadajnik, pracujący z mocą przewodzoną +14 dBm i anteną dipolową, nadawał sygnał nośny (niemodulowany) w środkowej częstotliwości każdego z kanałów LoRa zdefiniowanych wg *Regional Parameters LoRaWAN EU 863–870 MHz* [75]. Odbiornikiem był analizator widma z podłączoną anteną dipolową. Urządzenia rozmieszczane były w różnych lokalizacjach w odstępach 50–100 m.

W pierwszym kroku wykonano test odbioru w warunkach bezpośredniej widoczności *LOS* anten nadawczej i odbiorczej w odległości około 10 metrów w terenie otwartym. Odległość została tak dobrana by wykluczyć wpływ krótkiego pola [EU868 MHz: $\lambda \approx 0.345 \text{ m} \Rightarrow 10\lambda \approx 3.45 \text{ m}$]. [76, 77]. Wyniki wskazały różnicę między kanałami mniejszą niż 1,5 dB (Tabela 4.1) - wpływ na to mają błędy pomiarowe oraz punkt dopasowania anteny.

Na Rysunku 4.1 przedstawiono widmo sygnału zarejestrowane analizatorem widm z włączoną funkcją zatrzaśnięcia maksymalnych wartości.



Rysunek 4.1: Analiza widmowa sygnału w paśmie LoRa EU868.

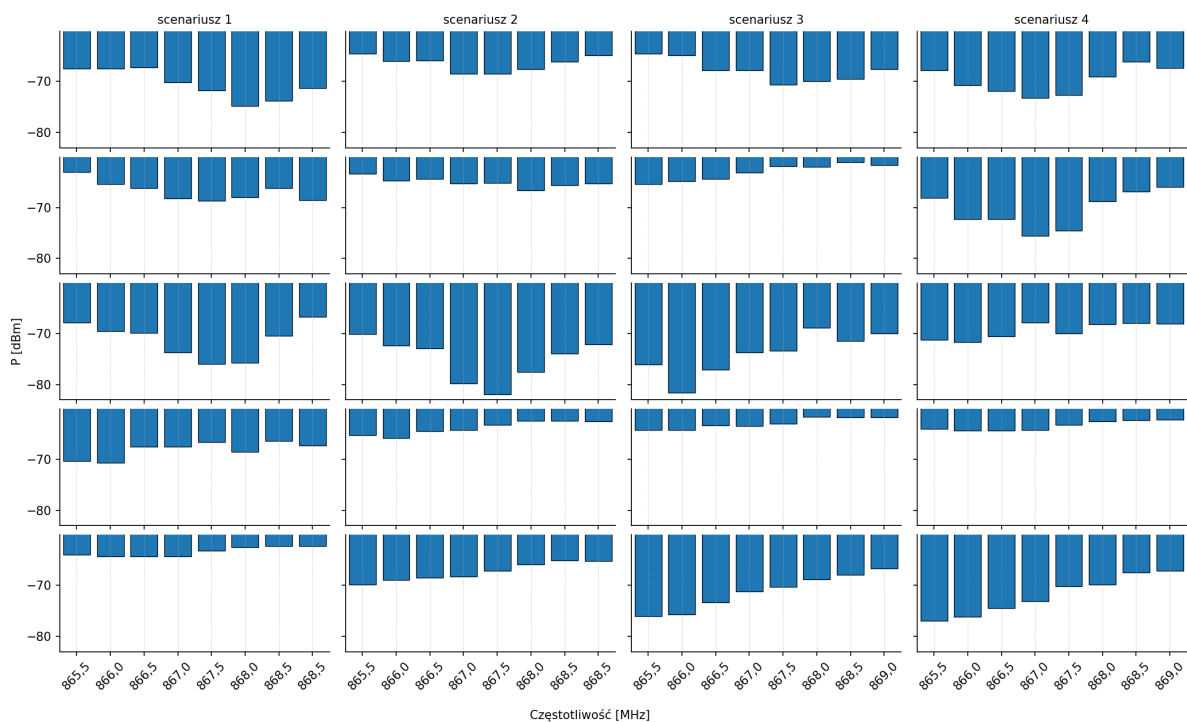
W kolejnym kroku urządzenia rozmieszczono w innych lokalizacjach. Łącznie przebadano 20 konfiguracji par nadajnik–odbiornik, uwzględniając różne scenariusze — zarówno z występowaniem *LOS*, jak i bez. Wyniki poszczególnych prób przedstawiono na rysunku 4.2.

W ustawieniu powodującym największą $\Delta A_{\max}$ pomiar został powtórzony 10 krotne. Maksymalna różnica mocy między kanałami wyniosła

$$\Delta A_{\max} = \max_{i \in \{1,2,\dots,8\}} A(i) - \min_{i \in \{1,2,\dots,8\}} A(i) = 11.79 \text{ dB}$$

Tabela 4.1: Pomiar siły sygnału dla poszczególnych kanałów podczas kalibracji

Peak (i)	Frequency f_i [MHz]	Amplitude [dBm]	Δf_i [MHz]	ΔA_i [dB]
1	865.499864	-24.42	0.000	0.00
2	866.000352	-24.65	0.500	-0.23
3	866.499619	-24.10	0.999	0.31
4	867.000107	-24.00	1.500	0.41
5	867.500594	-24.31	2.000	0.11
6	867.999861	-23.98	2.500	0.44
7	868.500349	-23.83	3.000	0.58
8	868.999616	-23.33	3.500	1.09



Rysunek 4.2: Analiza empiryczna zjawiska wygaszania wielodrogowego.

Tabela 4.2: Rozkład mocy sygnału przy zjawisku MF

Peak	Frequency [MHz]	Amplitude [dBm]	Δf [MHz]	ΔA [dB]
1	865.499864	-70.15	0.000	0.00
2	866.000352	-72.37	0.500	2.23
3	866.499619	-72.98	0.999	2.84
4	867.000107	-79.8	1.500	9.66
5	867.500594	-81.93	2.000	11.79
6	867.999861	-77.55	2.500	7.40
7	868.500349	-74.00.	3.000	3.85
8	868.999616	-72.20.	3.500	2.05

4.1.4 Weryfikacja pomiarów rzeczywistej sieci

Następnie przeanalizowano rzeczywiste dane zmierzone przez stację bazową w jednej z instalacji. Ze względu na brak przechowywania diagnostycznych danych takich jak numer kanału w warstwie hurtowni danych odczytowych, przeanalizowano około 100 dni zgłoszeń, co odpowiada w idealnym przypadku około 200 ramkom radiowym.

Do analizy wybrano cztery urządzenia działające stabilnie w sieci, odbierane przez tę samą stację bazową (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Charakterystyki wybranych urządzeń odbieranych przez jedną stację bazową

Numer seryjny	Liczba ramek	Średnie RSSI [dBm]	RSSI na tle całej populacji
1329186	187	-94.17	3%
1039265	154	-99.60	7%
1629206	175	-119.87	69%
1009266	177	-119.98	70%

Dla całej populacji urządzeń w zasięgu jednej stacji bazowej (670 urządzeń) dystrybucja odebranych ramek między kanałami wygląda następująco (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Dystrybucja ramek i parametrów sygnału w populacji urządzeń (670 ED)

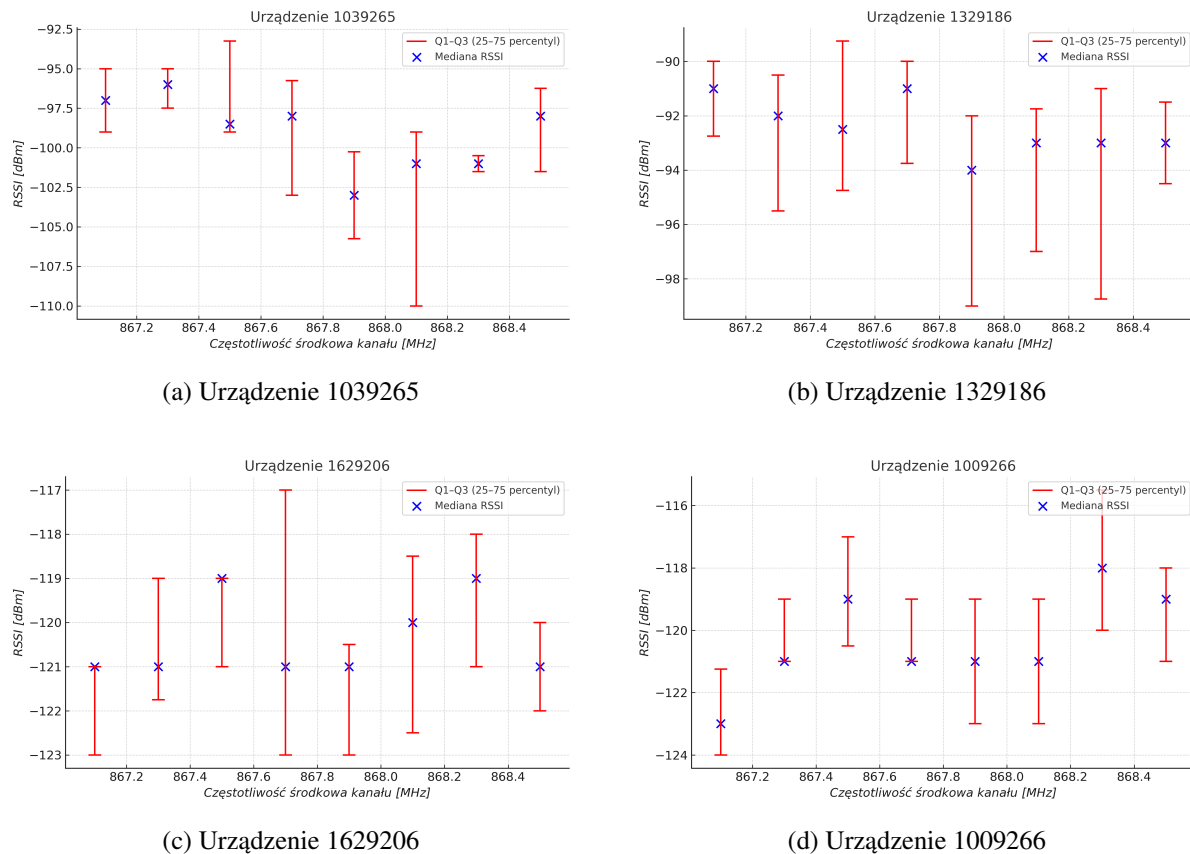
Kanał [MHz]	RSSI avg [dBm]	Δ RSSI [dB]	SNR [dB]	Δ SNR [dB]	liczba ramek
867,1	-115,17	0,00	0,32	1,93	13037
867,3	-113,94	1,23	0,28	1,89	13122
867,5	-113,25	1,92	-0,96	0,65	13163
867,7	-113,46	1,71	-0,27	1,34	12933
867,9	-115,03	0,14	0,41	2,02	12767
868,1	-115,08	0,09	-0,14	1,47	13426
868,3	-112,13	3,04	-1,61	0,00	12158
868,5	-114,29	0,88	-0,27	1,34	13247

Pogrubioną czcionką zaznaczono podstawowe kanały LoRa, które rejestrują minimalnie większy ruch ze względu na ich wykorzystanie do połączenia z siecią i wykonania procesu autoryzacji, w którym urządzenie końcowe dostaje pełną listę dostępnych kanałów w sieci.

Dla czterech wybranych urządzeń przeanalizowano rozkład wartości RSSI w zależności od kanału transmisyjnego. Na wykresach 4.3 przedstawiono medianę RSSI (znak $\times$) oraz przedziały międzykwartylowe Q1–Q3 (linie czerwone).

4.1.5 Wpływ zjawiska dla projektowanego mechanizmu

Zjawisko *MF* jest zauważalne zwłaszcza w przypadku komunikacji na niewielką odległość; widoczna jest również jego zależność od częstotliwości nośnej (wyboru kanału). W badaniu eksperymentalnym najwyższa zaobserwowana różnica mocy odebranej w poszczególnych kanałach LoRa wyniosła 11.79 dB. Znaczenie tego zjawiska przy niewielkich zasięgach komunikacji nie jest istotne, gdyż w takim przypadku zazwyczaj pozostaje duży zapas czułości w budźcie łącza komunikacyjnego. Przy ko-



Rysunek 4.3: Rozkład RSSI dla wybranych urządzeń w zależności od częstotliwości kanału.

munikacji na większe odległości, gdy siła odbieranego sygnału jest bliska czułości odbiornika, różnice między rejestrowanymi poziomami sygnału mogą być już zauważalne.

4.2 Prawdopodobieństwo odebrania pakietu w funkcji siły odbieranego sygnału

Received Signal Strength Indicator (RSSI) to wskaźnik mocy odebranego sygnału na wejściu toru radiowego odbiornika. Historycznie miał on charakter względny (stąd określenie *Indicator*), natomiast we współczesnych układach firmy Semtech stosowanych w *LoRa* wartość RSSI mapowana jest na absolutną moc w dBm zgodnie z jasno zdefiniowanymi regułami. W sensie fizycznym RSSI odpowiada mocy wejściowej P_{RX} (po uwzględnieniu strat dopasowania oraz działania wzmacniacza LNA) i prezentowany jest w skali logarytmicznej.

Signal to Noise Ratio (SNR) opisuje stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy szumu, wyrażany w skali logarytmicznej w dB. Parametry RSSI i SNR podawane są w różnych jednostkach (dBm jako miara bezwzględna mocy sygnału oraz dB jako miara względna stosunku sygnału do szumu), lecz pozostają ze sobą ściśle powiązane. Wartość SNR można bowiem wyznaczyć z różnicy pomiędzy RSSI, wyrażonym w skali logarytmicznej, a poziomem szumu w kanale, również opisanym w tej skali. W systemach *LoRa* SNR jest zawsze raportowany w dB, co potwierdzają zarówno wyniki eksperymentów, jak i dokumentacja producenta [63].

4.2.1 Szum termiczny i czułość odbiornika LoRa

Minimalny poziom szumu N wyrażony w watach [W] określany jest przez równanie Boltzmann [78]:

$$N = kTB, \quad (4.7)$$

gdzie $k \approx 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K to stała Boltzmann, T to temperatura w kelwinach, a B to szerokość pasma w Hz. Szum ten określany jest mianem *szumu termicznego* i wynika z chaotycznego ruchu nośników ładunku w przewodnikach i elementach półprzewodnikowych. Jest to zjawisko fundamentalne i nieusuwalne, obecne we wszystkich układach odbiorników radiowych, niezależnie od jakości zastosowanych komponentów ponieważ jego źródłem jest energia cieplna. W praktyce efekt ten oznacza, że nawet idealny odbiornik w temperaturze pokojowej będzie ograniczony przez skończony poziom szumu własnego. W literaturze częściej spotyka się określenie *równanie Boltzmann*, choć pierwotnie zjawisko opisali również Nyquist i Johnson.

Po przeliczeniu na jednostki dBm, dla temperatury pokojowej otrzymujemy:

$$N_{\text{dBm}} = -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \log_{10} B + NF, \quad (4.8)$$

gdzie NF (Noise Figure) [dB] opisuje dodatkowe szumy toru odbiorczego [63]. Są to przede wszystkim szumy wprowadzane przez elementy aktywne pierwszych stopni wzmacniacza niskoszumowego (*Low Noise Amplifier (LNA)*), mieszacze oraz filtry w torze radiowym. Wartość $NF = 6$ dB przyjęto jako reprezentatywną dla typowych odbiorników LoRa pracujących w paśmie *ISM*, zgodnie z danymi katalogowymi układów firmy Semtech [63], gdzie deklarowany wskaźnik szumowy mieści się zazwyczaj w zakresie 5–7 dB.

Dla LoRa przy $B = 125$ kHz i $NF = 6$ dB wartość wynosi:

$$N_{\text{dBm}} \approx -174 + 50.97 + 6 \approx -117 \text{ dBm}. \quad (4.9)$$

4.2.2 Związek pomiędzy RSSI, SNR oraz mocą użytecznego sygnału

W torze odbiorczym całkowita moc w paśmie użytecznym mierzona jako *RSSI* jest sumą mocy użytecznego sygnału oraz mocy szumu/interferencji. W jednostkach liniowych (np. mW) mamy zatem

$$P_{\text{RSSI}} = P_S + P_N, \quad (4.10)$$

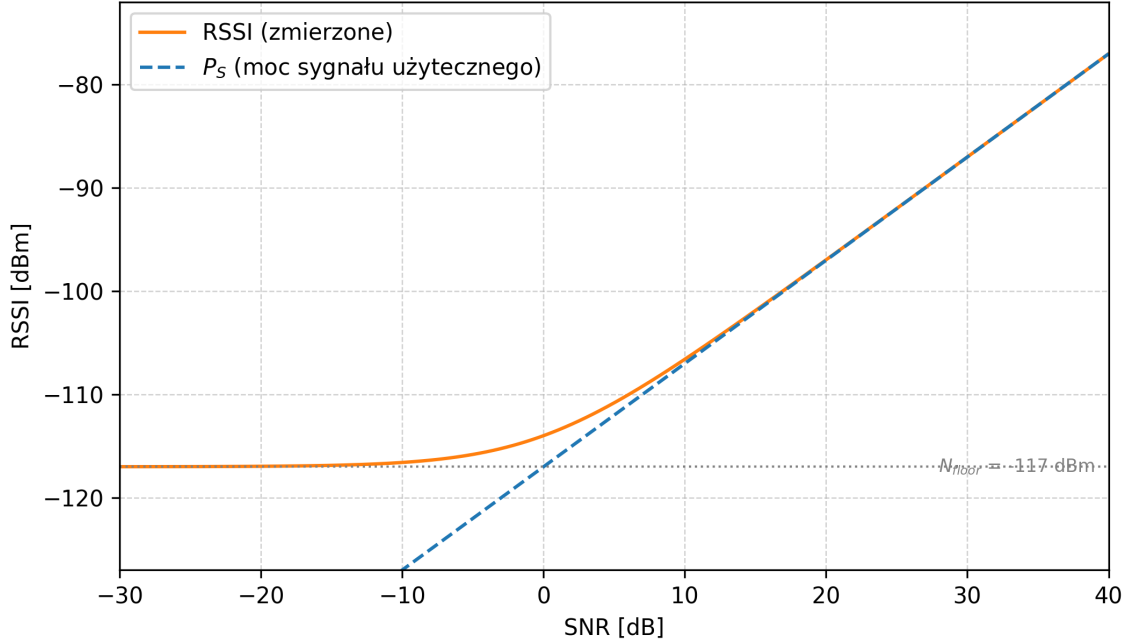
gdzie P_S oznacza moc użytecznego sygnału, a P_N moc szumu i interferencji w szerokości pasma odbiornika (por. 4.2.1). Rzeczywisty stosunek sygnał/szum definiujemy jako

$$\text{SNR} = \frac{P_S}{P_N} = \frac{P_{\text{RSSI}} - P_N}{P_N}. \quad (4.11)$$

Przechodząc do zapisu logarytmicznego, niech $X_{\text{dBm}} = 10 \log_{10}(X_{\text{mW}})$. Wtedy z (4.10)–(4.11) otrzymujemy zależność

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10}\left(\frac{P_S}{P_N}\right) = 10 \log_{10}\left(10^{\frac{P_{\text{RSSI,dBm}} - P_{N,\text{dBm}}}{10}} - 1\right). \quad (4.12)$$

Zależność ta dla $N_F = -117$ została przedstawiona na wykresie 4.4



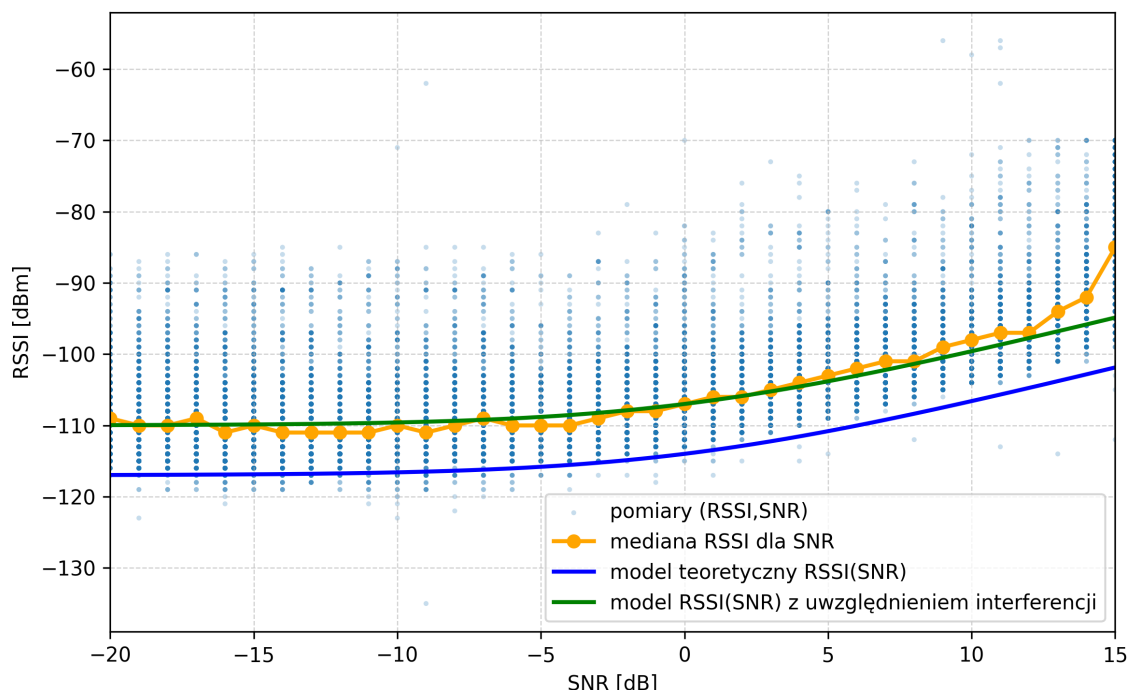
Rysunek 4.4: Relacja P_N , RSSI i SNR wyznaczona teoretycznie. Dla SF=12, BW=125kHz.

4.2.3 Obserwacja zależności RSSI i SNR

Po odebraniu ramki stacja bazowa przekazuje dane do serwera *LNS* przez bezpieczny kanał IP (np. TLS nad TCP) w postaci komunikatu *JSON*, zawierającego zdekodowany ładunek oraz metadane radiowe. Wśród metadanych znajdują się m.in. *RSSI*, *SNR* oraz znacznik czasu (*timestamp*); w zależności od implementacji mogą być dołączone także częstotliwość, numer kanału i parametry modulacji. Ze względu na fakt, że zarówno dokumentacja techniczna bram dostępowych, jak i przegląd literaturowy nie definiują jednoznacznie, w jakim modelu liczona jest wartość *RSSI*, poniżej przedstawiono analizę empiryczną, której celem jest potwierdzenie przyjętego modelu teoretycznego 4.4.

Analiza obejmuje dużą instalację *LoRaWAN* przeznaczoną do zdalnego odczytu liczników, w której — ze względu na montaż urządzeń i anten na dachach budynków — poziom interferencji radiowych jest bardzo wysoki. Zestawienie danych odebranych w ciągu jednego dnia (ok. 117 tys. odczytów wysyłanych z parametrem $SF = 12$) przedstawiono w postaci niebieskich punktów na rys. 4.5. Przedstawione dane pochodzą z krótkiego okna czasowego, aby wyeliminować ewentualny wpływ zmian interferencji w czasie. Na wykresie oś x odpowiada *RSSI* [dBm], a oś y — *SNR* [dB]. Niebieską linią zaznaczono spodziewany poziom szumu (*noise floor*), uwzględniający wyłącznie wpływ szumów termicznych wyznaczony na podstawie obliczeń przedstawionych w sekcji 4.2.1. Zielony przebieg przedstawia dodatkowe

interferencje, oszacowane w tym przypadku na 7 dB. Przyjmując dodatkowo, stały poziom interferencji w sieci, model teoretyczny pokrywa się dość ściśle z obserwacjami. Powyższa analiza potwierdza intuicję, że wartość raportowana przez bramę dostępową jako *RSSI* jest w istocie sumą mocy sygnału użytecznego oraz mocy szumów i interferencji.



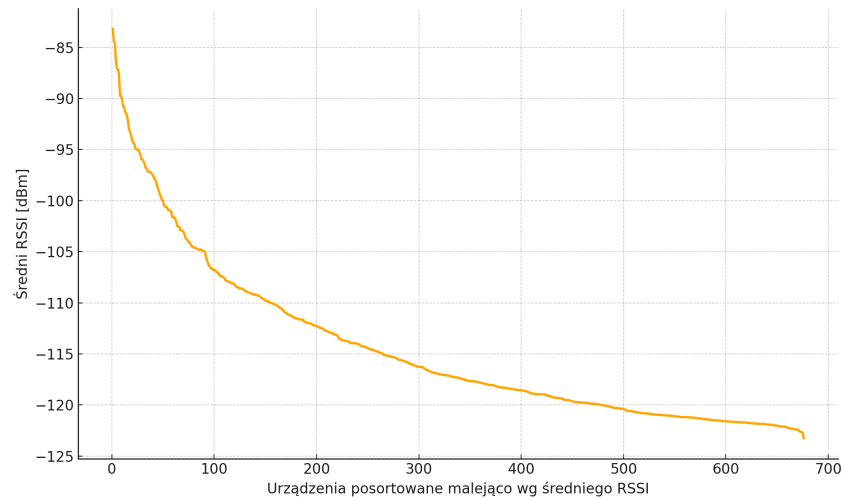
Rysunek 4.5: Relacja RSSI do SNR na bazie wdrożenia o wysokim poziomie interferencji.

Poniżej przedstawiono analizę tych samych danych dla niewielkiej instalacji (ok. 6 tysięcy urządzeń) o stosunkowo niskim poziomie interferencji. W celu jej przeprowadzenia wykonano następujące kroki:

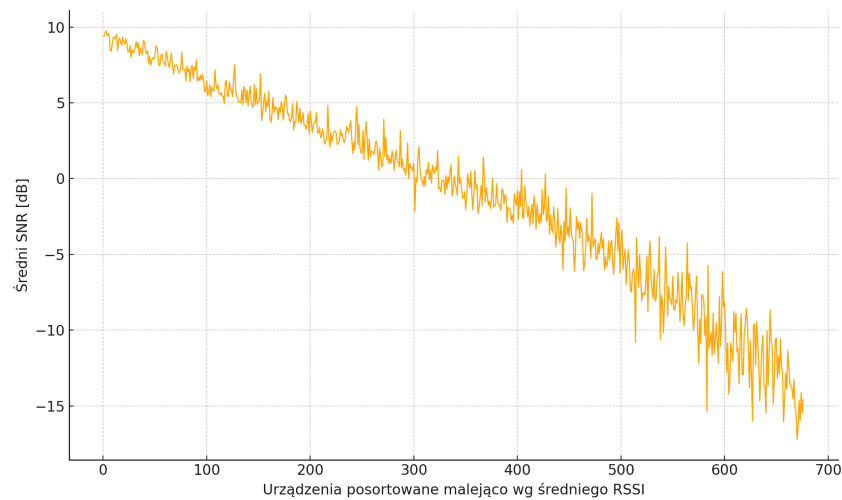
- Wybrano punkt dostępowy obejmujący swoim zasięgiem stosunkowo dużą liczbę urządzeń (>500 szt.).
- Mechanizm *ADR* został wyłączony w celu wymuszenia pracy urządzeń wyłącznie z parametrem $SF = 12$.
- Z listy wyeliminowano urządzenia, które nie działały w sieci przez cały badany okres.
- Dla pozostałych urządzeń wyznaczono: średnie wartości *RSSI*, średnie wartości *SNR* oraz liczbę odebranych pakietów z okresu 95 dni działania sieci (9 stycznia – 14 marca).
- Urządzenia posortowano w kolejności malejącej średniej wartości *RSSI*.
- Dane zwizualizowano na wykresach:
 - Rys. 4.6 przedstawia kolejne średnie wartości *RSSI*,
 - Rys. 4.7 przedstawia kolejne średnie wartości *SNR*,
 - Rys. 4.8 przedstawia zbiór par *RSSI* i *SNR*.

4.2.4 Obserwacja prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu na podstawie SNR

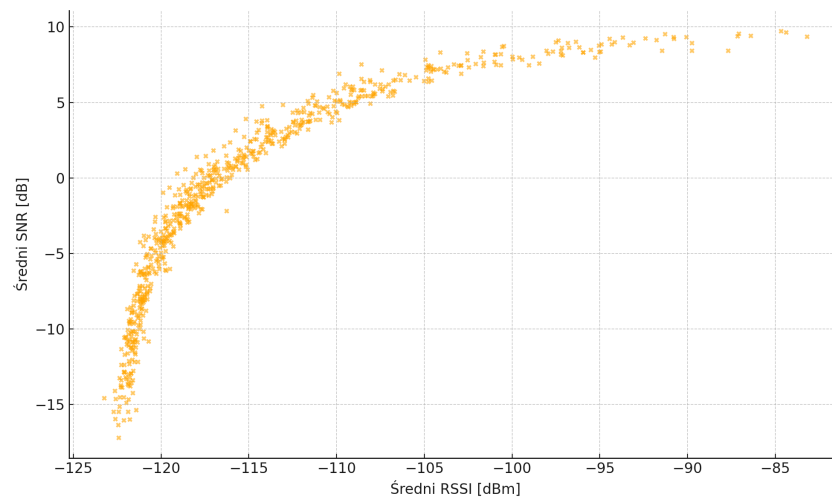
Teoretyczna zależność *Bit Error Rate* (*BER*) od *SNR* została szczegółowo przedstawiona w publikacji [79]. Ponieważ wyprowadzenia analityczne uwzględniające wpływ szumu są zagadnieniem bardzo



Rysunek 4.6: Średni stosunek SNR odbieranych urządzeń przez pojedynczą bramę LoRa.



Rysunek 4.7: Średnia wartość RSSI odbieranych urządzeń przez pojedynczą bramę LoRa.



Rysunek 4.8: Wykres punktowy zależności średniego SNR od średniego RSSI.

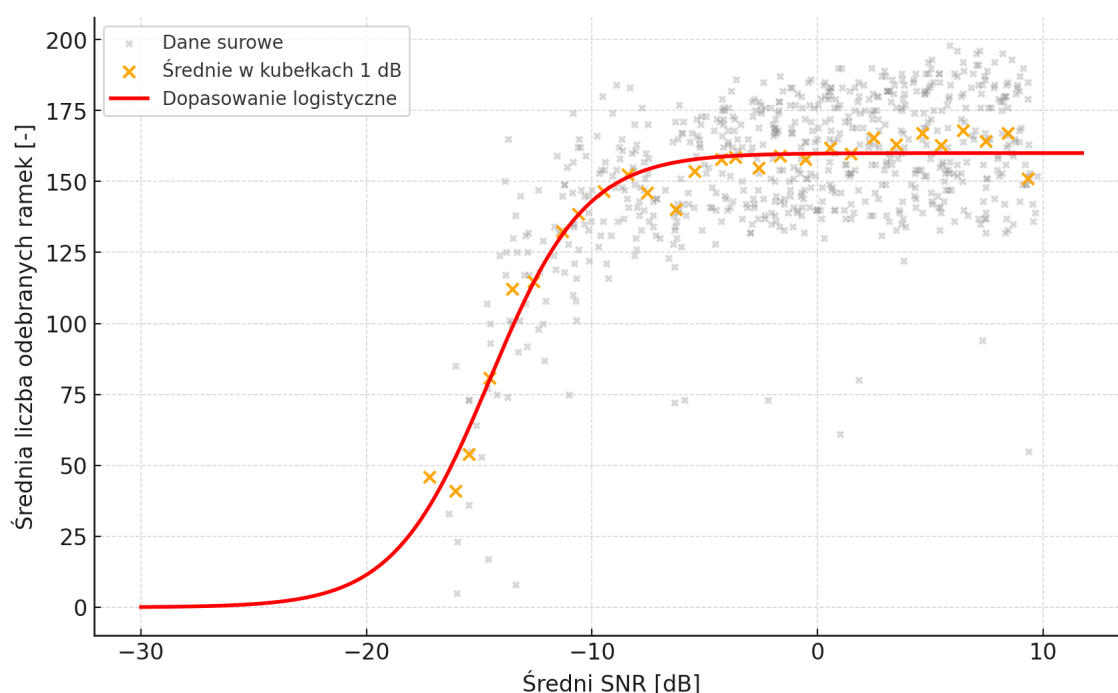
złożonym, ich pełny model nie będzie tutaj prezentowany. W niniejszym rozdziale uwaga została skoncentrowana na obserwacji i analizie danych empirycznych pochodzących z rzeczywistych instalacji.

Działając zgodnie z eksperymentem opisanym w poprzedniej sekcji 4.2.3, w kolejnym kroku dla każdego urządzenia wyznaczono średnią wartość SNR . Na tej podstawie zdyskretyzowano zakres wartości SNR do 45 przedziałów o szerokości 1 dB. Każde urządzenie przyporządkowano do odpowiedniego przedziału na podstawie średniej zmierzonej wartości SNR pakietów odebranych przez pojedynczy punkt dostępowy. Dla każdego przedziału obliczono następnie średnią liczbę poprawnie odebranych ramek.

Otrzymany zbiór par (SNR , liczba odebranych ramek) stanowi empiryczny opis zależności jakości transmisji od warunków sygnałowych. Zależność tę przybliżono za pomocą funkcji sigmoidalnej. Wybór funkcji logistycznej jest uzasadniony, ponieważ dobrze odwzorowuje charakter przejścia od stanu niskiej skuteczności transmisji (asymptotyczne dążenie do zera dla $SNR \rightarrow -\infty$) do stanu nasycenia (wartość bliska jedności dla $SNR \rightarrow +\infty$). Modele tego typu były wielokrotnie stosowane w literaturze do opisu zależności BER od SNR dla klasycznych modulacji cyfrowych [79, 80], a ich zastosowanie w przypadku *LoRa* pozwala na intuicyjną i spójną interpretację wyników.

$$f(SNR) = \frac{1}{1 + \exp(-(a + b \cdot SNR))}, \quad (4.13)$$

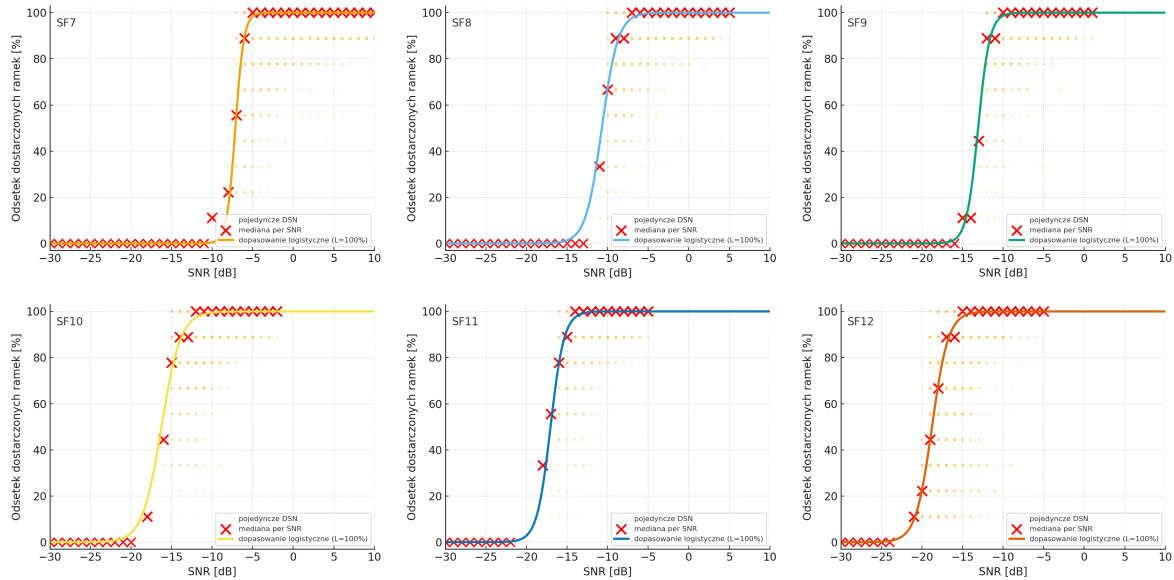
gdzie a i b są parametrami dopasowania estymowanymi metodą najmniejszych kwadratów.



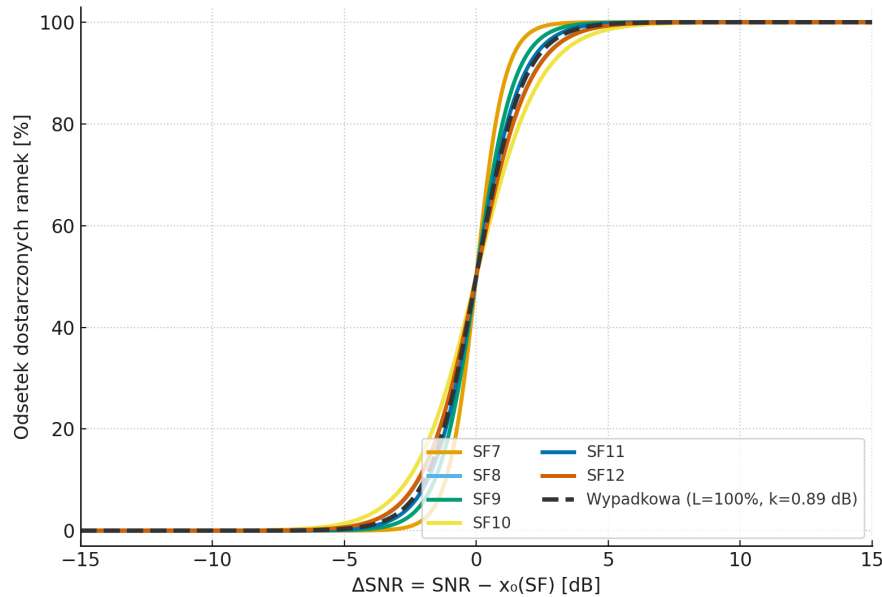
Rysunek 4.9: Zależność PDR od wartości SNR z dopasowaną funkcją logistyczną.

Wykonany eksperyment charakteryzuje się dużą niestabilnością liczby odebranych pakietów i opiera się jedynie na jednej wartości SF . Dodatkowo dane pochodzące z pojedynczej stacji bazowej mogą być podatne na zdarzenia losowe. Dlatego ten sam zestaw działań został w kolejnym kroku przeprowadzony

dla całej sieci obejmującej ponad 60 tysięcy urządzeń, opisanej wcześniej w podrozdziale 3.2.2. Dane na wstępie podzielono według wartości SF , a następnie każdą grupę przeanalizowano oddzielnie. Każdemu pustemu przedziałowi (*kubelkowi*) przypisano dodatkowo wartość liczby odebranych ramek równą zero. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.10a.



(a) Dla $SF \in \{7, 12\}$



(b) Dla wszystkich wartości SF

Rysunek 4.10: Zależność prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu od średniej wartości SNR dla różnych wartości SF .

4.2.5 Wnioski

Czułość odbiorników LoRa jest w dużej mierze determinowana przez fundamentalne ograniczenia wynikające z obecności szumu termicznego. Potencjalny obszar poprawy dotyczy jedynie redukcji figury

szumowej odbiornika, jednak i tutaj nie należy oczekiwać znaczących zmian, gdyż jej wartość jest już relatywnie niska, a pozostała część wynika w dużej mierze również z szumów termicznych.

Analiza wykresu zależności PDR od SNR potwierdza charakterystyczny, bardzo stromy przebieg funkcji przejścia: w zakresie kilku decybeli obserwuje się gwałtowne przejście od niemal 100% poprawnie odebranych ramek do niemal całkowitej utraty transmisji. Warto przy tym zauważyć, że modele bazujące na medianie liczby odebranych ramek prowadzą do jeszcze ostrzejszego przebiegu niż w rzeczywistych danych. Z jednej strony może to zawyżać stromość przejścia, z drugiej jednak skutecznie eliminuje wpływ pojedynczych zakłóceń i zdarzeń niezwiązanych bezpośrednio z obserwacją, co pozostaje zgodne z dobrymi praktykami analizy statystycznej w przypadku danych obarczonych szumem pomiarowym.

4.3 Ortogonalność

Zagadnienia związane z odbiorem sygnału *LoRa* w warunkach zbieżności czasowej i częstotliwościowej różnych transmisji zostały szczegółowo omówione w literaturze [81, 82, 83, 84]. W celu pogłębienia zrozumienia tych zjawisk oraz weryfikacji wyników przedstawionych przez innych autorów przeprowadzono eksperyment z wykorzystaniem własnych urządzeń końcowych, serwera sieciowego oraz rzeczywistego środowiska radiowego.

4.3.1 Zbiór danych i metodyka

Analizie poddano dwa eksperymenty wykonane w warunkach biurowych. **Test 1** Polegał na równoczesnym odbiorze sygnału na 8 kanałach odbiornika w tym samym czasie. Zarejestrowano całkowity odsetek utraconych pakietów równy 1,63%, nie odnotowano duplikatów. Utraty miały głównie charakter pojedynczy; dziewięciokrotnie obserwowano dwie utraty z rzędu, trzykrotnie dłuższe sekwencje. Rozkład utrat między węzłami był zbliżony (najlepszy węzeł: jedna utrata; najgorszy: 3,72% utrat). Stacja odbiorcza (Kerlink wirnet iStation) podpięta była przez sieć Ethernet do serwera *LNS*.

Test 2 zrealizowano w trzech dobach: w godzinach 21:00–23:00. Konfiguracja: częstotliwość 867,5 MHz, interwał wysyłania 5 s, $N_{tx} = 1440$ ramek na dobę i urządzenie; równoległa emisja na tym samym kanale sześciu urządzeń, każde z innym współczynnikiem rozpraszania $SF \in \{7, \dots, 12\}$. Zliczenia odebranych ramek (N_{rx}) zestawiono w Tab. 4.6.

4.3.2 Miary i wzory

Niech N_{tx} , N_{rx} oznaczają odpowiednio liczbę wysłanych i odebranych ramek dla danego węzła w analizowanym oknie. Zdefiniujmy:

$$PDR \equiv \frac{N_{rx}}{N_{tx}}, \quad PLR \equiv 1 - PDR, \quad (4.14)$$

$$SINR \text{ [dB]} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N + P_I} \right), \quad (4.15)$$

gdzie P_S to moc sygnału użytecznego, P_N — moc szumu w paśmie odbiornika, a P_I — łączna moc zakłóceń (interferencja współkanałowa).

Czułość odbiornika w warunkach szumowych wyraża się zależnością:

$$\text{Sens [dBm]} = -174 + 10 \log_{10} B [\text{Hz}] + \text{NF} + \text{SNR}, \quad (4.16)$$

gdzie B to szerokość pasma demodulatora, NF — model szumu toru radiowego (figura szumowa), a SNR — minimalny próg SNR spełniający kryterium poprawnej demodulacji dla danej modulacji i ustawień (zobacz 3.1).

4.3.3 Wnioski z Testu 1

Brak utraconych ramek. Praktycznie 100% ramek zostało poprawnie odebranych i przekazanych do LNS. Tabela 4.5 pokazuje liczbę poprawnie odebranych ramek z każdego urządzenia niezależnie.

Tabela 4.5: Odebrane pakiety i udział utraconych przy założeniu $N_{\text{ref}} = 1800$ ramek/urządzenie.

Numer seryjny	$\overline{N}_{\text{rx}}$	Utracone [%]
01170452	1800	0%
01700435	1800	0%
01780370	1799	0.05%
01549122	1799	0.05%
01169256	1799	0.05%
01180455	1800	0%
01230321	1793	0.38%
01819206	1781	1.05%

Uwagi: $\overline{N}_{\text{rx}}$ to średnia z trzech pomiarów dobowych (interwał 5 s; kanał 867,5 MHz). Procent utraconych liczono jako $100 \cdot (1 - \overline{N}_{\text{rx}}/1800)$.

Eksperyment potwierdza brak interferencji między kanałami dla sumarycznej liczby równolegle odbieranych ramek radiowych nieprzekraczającej $n \leq 8$. Należy jednak pamiętać, że typowa brama dostępowa oparta na demodulatorze klasy SX1301/SX1308 posiada 8 równoległych torów „multi-SF” dla kanałów 125 kHz, co umożliwia równoczesną demodulację do ośmiu pakietów LoRa (dowolny miks SF7–SF12) na ośmiu niezależnych kanałach częstotliwości pośredniej. Przy obciążeniu większą liczbą urządzeń pojawi się zatem stratność, której nie obserwowano w przedstawionym scenariuszu. Ograniczenie to ma charakter wyłącznie implementacyjny, dlatego nie jest dalej uwzględniane w niniejszej pracy.

4.3.4 Wnioski z Testu 2

W Tab. 4.6 przedstawiono liczbę ramek odebranych i wskaźnik PDR dla poszczególnych wartości SF i dni; wartości uśrednione wskazują na wyraźnie niższy odbiór dla $SF = 7$ oraz — w mniejszym stopniu — dla $SF = 8$, przy wysokich PDR dla $SF \in \{9, 10, 11, 12\}$

Tabela 4.6: Odbiór ramek w Tesście 2 (kanał 867,5 MHz, interwał 5 s, $N_{tx} = 1440/\text{dobę}/\text{urządzenie}$).

	SF7	SF8	SF9	SF10	SF11	SF12
Day 1: N_{rx}	991	1185	1313	1348	1390	1362
Day 2: N_{rx}	1173	1226	1343	1400	1372	1345
Day 3: N_{rx}	1254	1272	1316	1383	1356	1329
Day 1 PDR [%]	68.8	82.3	91.2	93.6	96.5	94.6
Day 2 PDR [%]	81.5	85.1	93.3	97.2	95.3	93.4
Day 3 PDR [%]	87.1	88.3	91.4	96.0	94.2	92.3
Średnio: PDR [%]	79.1	85.3	91.9	95.6	95.3	93.4

Uzasadnienie teoretyczne W rozpatrywanym trybie sześć urządzeń nadaje równolegle, co skutkuje większym poziomem interferencji P_I nad szumem P_N (*reżim ograniczony interferencją*). Przy założeniu porównywalnych mocy nadajników i torów radiowych, łączna moc interferencji może być aproksymowana jako $P_I \approx 5P_S$ dla danego węzła testowego. Wtedy z (4.15) otrzymujemy:

$$\text{SINR} \approx 10 \log_{10} \left(\frac{P_S}{5P_S} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{5} \right) \approx -6,99 \text{ dB}. \quad (4.17)$$

Wartość (4.17) leży bardzo blisko typowego progu demodulacji dla SF7, $\text{SNR}_{\min} \approx -7,5 \text{ dB}$ (i o ok. 3 dB powyżej progu dla SF = 8), co tłumaczy obniżony PDR dla SF = 7 w obecności pięciu współkanałowych transmisji. Ponadto, nieidealna (quasi-)ortogonalność SF oraz zjawisko *capture effect* dodatkowo obniżają skuteczność demodulacji dla małych SF w warunkach bliskich (4.17), szczególnie przy zbieżnościach czasowych rozpoczęcia transmisji.

4.3.5 Podsumowanie testu i wnioski implementacyjne

Zmierzone dane wskazują, że interferencje międzykanałowe w sieci LoRa są na tyle małe, iż można je pominąć, dlatego nie zostały uwzględnione w modelu symulacyjnym rozwijanym w dalszych etapach pracy. Założenie to nie obejmuje jednak sytuacji, w której stacja bazowa prowadzi transmisję. Przy rozważaniu kolizji dla różnych parametrów SF zakłada się ponadto pełną ortogonalność, zgodnie z modelem teoretycznym. Stacja bazowa ma możliwość niezależnego odbioru sygnałów o różnych SF. Należy jednak pamiętać, że sygnał zakłócający podnosi poziom szumu, a tym samym obniża SNR odbieranego sygnału.

4.4 Uwarunkowania energetyczne urządzeń sieci LoRaWAN

Zużycie energii nie jest bezpośrednią cechą samego działania sieci LoRa, lecz konsekwencją implementacji systemu z wykorzystaniem rzeczywistych komponentów sprzętowych. Jednym z celów niniejszej rozprawy jest poprawa własności energetycznych sieci w odniesieniu do konkretnych metryk opisanych w sekcji 2.4. W tym podrozdziale przedstawiono krótką analizę zużycia energii przez urządzenia końcowe stosowane do zdalnego opomiarowania liczników mediów, ze szczególnym uwzględnieniem

ograniczeń implementacyjnych i trendów ich zmian, które należy brać pod uwagę przy projektowaniu nowych systemów.

Na zużycie energii urządzenia wpływają następujące elementy:

Pobór prądu w stanie beczynności (uśpienia) Największy udział ma prąd mikrokontrolera w jednym z trybów niskiego poboru (np. *STOP1*), w którym pamięć RAM jest podtrzymywana, taktowanie rdzenia wyłączone, a aktywne pozostają wybrane peryferia: zegar czasu rzeczywistego *Real Time Clock (RTC)* i bloki wybudzeń (np. sensory sabotażu). Na pobór prądu wpływa także stabilizator *Low Dropout Regulator (LDO)* (rzędu $\sim 1 \mu\text{A}$) oraz dodatkowe elementy toru zasilania, m.in. pojemność równoległa do baterii stosowana powszechnie z ogniwami Li-SOCl₂ w celu ograniczania efektu pasywacji. Upływność tej pojemności w temperaturze pokojowej wynosi typowo 2–5 μA i znacząco rośnie wraz z temperaturą.

Pobór związany z układem pomiarowym Podstawową funkcją urządzenia jest pomiar wielkości fizycznych. W analizowanych przypadkach chodzi o odczyt liczników mechanicznych (wodomierze, gazomierze) poprzez zliczanie obrotów najniższej pozycji indeksu lub, dla wodomierzy, pełnych obrotów elementu wskaźnikowego przypadających na stałą jednostkę objętości. W praktyce stosuje się trzy metody odczytu: magnetyczną, indukcyjną oraz rzadziej optyczną. Odczyt magnetyczny jest rozwiązaniem najprostszym, lecz podatnym na celowe zaburzenia. Odczyt optyczny obarczony jest ryzykiem degradacji wskutek zabrudzeń. Odczyt indukcyjny cechuje duża stabilność i odporność na zakłócenia, jednak wiąże się z wyższym poborem prądu (typowo 10–20 μA wobec 2–5 μA dla rozwiązań magnetycznych czy optycznych). W dalszych rozważaniach przyjmuję wariant indukcyjny.

Pobór związany z wybudzeniami okresowymi Pomimo pracy w uśpieniu wymagane jest okresowe wybudzanie mikrokontrolera w celu obliczania wartości pomiarowych, weryfikacji progów alarmowych (np. przepływu chwilowego), zapisu parametrów diagnostycznych oraz ewentualnej komunikacji lokalnym interfejsem. Każde wybudzenie obejmuje start i stabilizację generatora oraz pętli *Phase-Locked Loop (PLL)*, inicjalizację rdzenia i wykonanie serii operacji. Dodatkowa konsumpcja wynika także z zapisu do nieulotnej pamięci (np. zewnętrznej pamięci flash).

Pobór podczas transmisji radiowej (TX) Dopuszczalna moc promieniowania w paśmie EU 863–870 MHz jest ograniczona (dla urządzeń klasycznych) do 25,0 mW e.r.p. Zgodnie z ECC Rec. 70-03, Annex 1 (pozycja h1.2) [85]. Stanowi to $\sim +14 \text{ dBm}$ mocy wypromieniowanej. Rzeczywiste układy wymagają wyższej mocy elektrycznej z powodu nieidealnej sprawności toru nadawczego, strat dopasowania anteny i filtracji. Ponadto konieczna jest praca oscylatora wysokiej częstotliwości i czas jego stabilizacji. Przebiegi poboru prądu podczas nadawania i odbioru przedstawiono na rys. 4.11. Teoretyczna maksymalna sprawność liniowego wzmacniacza klasy A przy dopasowanym obciążeniu wynosi 50%; współczesne układy są relatywnie blisko tych ograniczeń co pokazuje tabela 4.7, stąd nie należy oczekiwać skokowych popraw w samym torze mocy.

Tabela 4.7: Pobór prądu i sprawność wybranych układów radiowych (wartości typowe @ 3,3 V; LoRa, BW = 125 kHz). Opracowanie własne na podstawie not katalogowych.

Układ	Rok	I_{TX} @ +14 dBm [mA]	P_{TX} [mW]	η [%]	I_{RX} [mA]
CC1120 [†]	2011	45,0	148,5	16,8	22,5
SX1272	2014	28,0	92,4	27,1	10,5
SX1261	2019	25,5	84,2	29,7	4,6
STM32WL	2022	26,0	85,8	29,1	4,82
LR2021	2025	27,0	89,1	28,1	5,5

[†] CC1120 nie obsługiwał modulacji LoRa, lecz był powszechnie stosowany w systemach Smart Metering; zestawiono go jako punkt odniesienia.

Pobór podczas odbioru radiowego (RX) W odróżnieniu od TX, w odbiorze nie występują analogiczne, twarde ograniczenia teoretyczne. Pobór prądu wynika z pracy oscylatora kwarcowego i pętli PLL, szybkiego przetwornika *Analog Digital Converter (ADC)* oraz bloku cyfrowej demodulacji w scalonym transceiverze. W ostatnich ~ 15 latach typowy prąd odbioru wymagany dla demodulacji FSK spadł około czterokrotnie (por. tab. 4.7) i można spodziewać się dalszego spadku wraz z rozwojem technologii projektowania i produkcji scalonych układów. Protokół LoRaWAN nie narzuca minimalnej długości okien nasłuchowych RX1/RX2; w praktyce (dla urządzeń klasy A) czas okna 0,1–1,0 s dobiera się do warunków sieciowych (opóźnienia LNS/GW). W dalszych obliczeniach przyjmuję okna 500 ms jako wartość referencyjną.

Tabela 4.8: Bilans dobowy poboru prądu urządzenia (konfiguracja referencyjna).

Element	Pobór @ 25 °C	Czas/doba	Udział średni
Prąd w uśpieniu (MCU + LDO + upływność)	4,8 μ A	non-stop	4,8 μ A
Przetwarzanie okresowe (wybudzenia)	2,0 mA	24×60×15 ms	0,5 μ A
Sensor indukcyjny (wodomierz)	20 μ A*	non-stop	20 μ A
Odbiór radiowy (8 okien × 500 ms)	4,6 mA	4 s	0,21 μ A
Transmisja +14 dBm (4 ramki × 2,7 s)	25,5 mA	10,8 s	3,2 μ A
Suma średnia			$\approx 28,7 \mu$ A

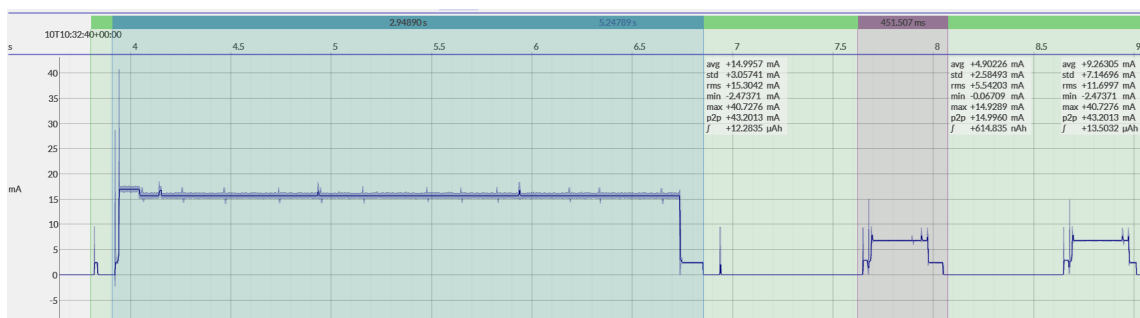
* Zakres praktyczny 11, 3–108 μ A; w obliczeniach przyjęto 20 μ A.

Model: 4 ramki LoRa/dobę (SF=12, Ładunek 51 B, BW=125 kHz), bez ramek *Re-Join*. Konfiguracja wymagań masteringowych: zob. 6.9.

W analizie pomijam pobór związany z interakcją człowieka (*HMI*, *NFC*, port optyczny, Bluetooth itp.), ponieważ elementy te są uruchamiane sporadycznie i mają pomijalny udział w bilansie dobowym.

4.4.1 Wpływ temperatury

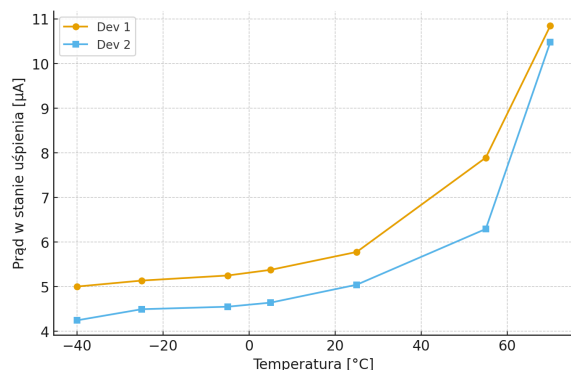
Architektura współczesnych układów scalonych, w szczególności mikrokontrolerów, charakteryzuje się występowaniem niezerowych prądów upływu wynikających z mechanizmów fizycznych w tranzystorach CMOS (m.in. prąd podprogowy, upływność bramki) oraz zjawisk pasożytniczych w obszarach złącz. Wielkość tych prądów rośnie wraz z temperaturą, co w trybach uśpienia prowadzi do wykładni-



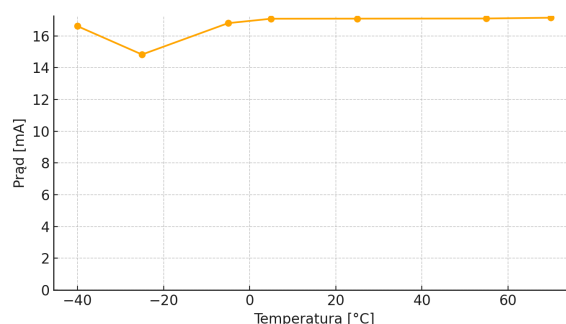
Rysunek 4.11: Przebiegi poboru prądu podczas nadawania z mocą +10dBm (*uplink*) oraz w oknach nasłuchowych RX1/RX2.

czego wzrostu poboru [86, 87, 88]. W systemach bateryjnych *IoT* z długim czasem czuwania stanowi to czynnik istotny dla bilansu energetycznego.

Rys. 4.12 przedstawia przykład pomiarów prądu w funkcji temperatury, uzyskanych w komorze klimatycznej. Pomiary wykonano w trybie magazynowym (wyłączony tor pomiarowy i sensory) dla wykresu (a) oraz podczas nadawania z mocą +10 dBm dla wykresu (b). Wyraźny, zbliżony do wykładniczego wzrost prądu obrazuje zjawisko upływności w bilansie energetycznym. Efekt ten jest obserwowany wyłącznie w prądach upływu, które stają się marginalne przy większym obciążeniu. Dla kontrastu pokazano przebieg poboru prądu w trybie transmisji, który w temperaturach powyżej 25 °C pozostaje praktycznie niezmienny.



(a) Prąd spoczynkowy tryb magazynowy.



(b) Prąd nadawania

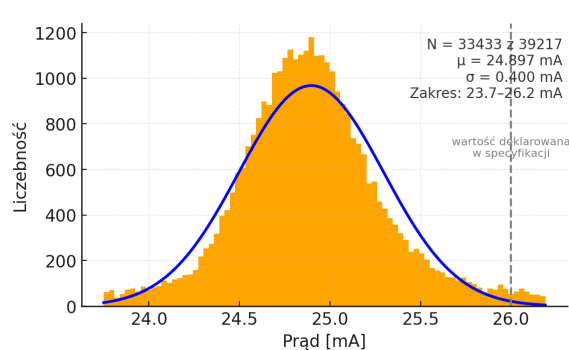
Rysunek 4.12: Zmiany prądu uśpienia i nadawania w funkcji temperatury. Dane na bazie pomiarów własnych.

4.4.2 Rozrzut produkcyjny

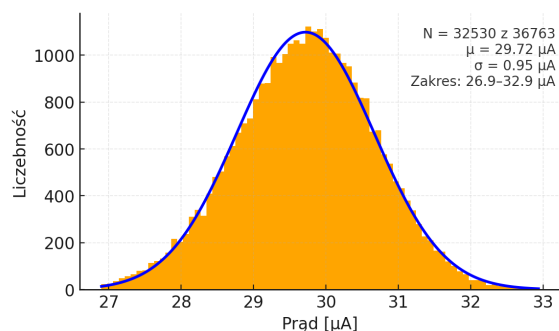
Istotnym czynnikiem jest także rozrzut produkcyjny, powodujący zmienność charakterystyk elektrycznych pomiędzy egzemplarzami, mimo identycznej architektury. Źródłem rozrzutu są tolerancje procesu wytwarzania układów scalonych i elementów pasywnych. Wraz ze skalowaniem technologii CMOS zmienność ta staje się jednym z głównych ograniczeń projektowych [88]. Statystycznie dobrze opisuje ją rozkład normalny, co pozwala na oszacowanie średnich, odchyleń oraz prawdopodobieństw wartości

odstających. Przy prądach rzędu pojedynczych μA różnice między egzemplarzami mogą przekładać się na skrócenie czasu życia baterii nawet o parę miesięcy.

Na rys. 4.13 pokazano przykładowe rozkłady prądów nadawania i uśpienia zmierzone podczas testów produkcyjnych (partia $\approx 33,000$ urządzeń do zdalnego odczytu wodomierzy). Spójność pomiarów między stanowiskami testowymi jest okresowo weryfikowana i korygowana poprzez kalibrację; niepewność toru pomiarowego oszacowano na $< 1\%$.



(a) Rozrzut produkcyjny prądu nadawania



(b) Rozrzut produkcyjny prądu uśpienia z włączonym sensorem przepływu @ 10 Hz

Rysunek 4.13: Rozrzut prądu nadawania (a) i uśpienia (b) @ 25 °C dla partii $\approx 33,000$ urządzeń; dopasowanie rozkładami normalnymi. Dane na bazie pomiarów własnych.

4.4.3 Źródła zasilania

W urządzeniach do zdalnego odczytu liczników stosuje się niemal wyłącznie pierwotne baterie litowe w jednej z dwóch technologii wykonania:

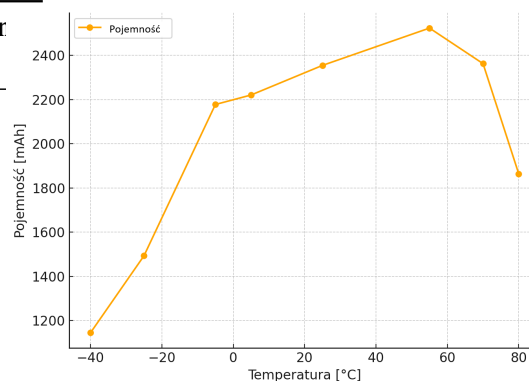
- **Li-SOCl₂ (3,6 V)** — charakteryzują się wysoką gęstością energii, lecz wykazują efekt pasywacji; często wymagają równoległej pojemności o niskiej impedancji do obsługi impulsów prądowych.
- **Li-MnO₂ (3,0 V)** — cechują się lepszą stabilnością temperaturową i brakiem pasywacji, kosztem mniejszej gęstości energii.

Rzeczywista pojemność silnie zależy od temperatury pracy. Na rys. 4.14 zestawiono wyniki pomiarów wykonanych w komorze klimatycznej, z profilem obciążenia odwzorowującym transmisję ramek LoRa (dla przyspieszenia cyklu: *uplink* co 15 s). Za punkt odcięcia przyjęto poziom napięcia ok. 2,5 V dla baterii o nominalnej pojemności 2,7 Ah.

4.4.4 Parametry zużycia energii a projektowane mechanizmy retransmisji

Poza energią zużywaną na fizyczną transmisję radiową, cała pozostała konsumpcja ma charakter „pasowy”, lecz na obecnym etapie rozwoju elektroniki pozostaje nieunikniona. Sprawność toru nadawczego we wzmacniaczach liniowych jest ograniczona teoretycznie do ok. 50%, natomiast w przypadku odbioru i przetwarzania cyfrowego takie ograniczenia nie występują, dlatego obserwuje się długofalową tendencję spadku poboru prądu. Dla dalszej analizy i symulacji zostały przyjęte parametry z tab. 4.8 oraz zadany profil temperaturowy (udziały czasu w temperaturach: $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$: 4%, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$: 8%, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$: 25%, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$: 58%, $55\text{ }^{\circ}\text{C}$: 5%).

Temp. 25 °C	Pomiar [mAh]	% względem 25 °C [%]	Poj. użyteczn [mAh]
-40	1144	0,49	915
-25	1493	0,63	1194
-5	2178	0,92	1742
5	2221	0,94	1777
25	2355	1,00	1884
55	2524	1,07	2019
70	2363	1,00	1890
80	1864	0,79	1491



Rysunek 4.14: Wpływ temperatury na pojemność baterii (profil rozładowania impulsowy zbliżony do pracy w sieci LoRaWAN).

Model rachunku energetycznego. Niech T oznacza długość doby (w sekundach). Średni prąd urządzenia:

$$\bar{I} = I_{\text{sleep}} + I_{\text{sensor}} + \frac{N_{\text{wake}} I_{\text{run}} t_{\text{run}} + N_{\text{RX}} I_{\text{RX}} t_{\text{RX}} + N_{\text{TX}} I_{\text{TX}} t_{\text{TX}}}{T} + I_{\text{leak}}.$$

Czas życia (w godzinach) dla użytecznej pojemności baterii C_{use} (w μAh):

$$t_{\text{life}} [\text{h}] = \frac{C_{\text{use}}}{\bar{I}}.$$

Przykład liczbowy. Dla wartości z tab. 4.8 otrzymujemy $\bar{I} \approx 28,7 \mu\text{A}$. Ze zbioru danych temperaturowych (rys. 4.14) średnia *użyteczna* pojemność pojedynczej celi wynosi w rozważanym profilu ok. 1,825 Ah; dla dwóch cel Li-SOCl₂ otrzymujemy $C_{\text{use}} \approx 3,65 \text{ Ah}$. Stąd $t_{\text{life}} \approx \frac{3,65 \cdot 10^6}{28,7} \approx 1,27 \cdot 10^5 \text{ h}$, czyli ok. 14,5 lat. Po uwzględnieniu dodatkowych zjawisk (samorozładowanie, starzenie, podwyższona upływność pojemności równoległej w wysokich temperaturach, zapas projektowy) realistyczny cel 10–12 lat pozostaje osiągalny. Należy jednak zauważyć, że w bilansie prądowym praktycznie nie występuje zapas, dlatego projektowany mechanizm retransmisji nie powinien powodować wzrostu poboru energii przez urządzenie końcowe.

Projektowany mechanizm retransmisji powinien minimalizować zużycie energii *na ramkę skutecznie doreczoną* (E_{frame}). Urządzenie pośredniczące, zaprojektowane w sposób zbliżony do urządzenia końcowego, dysponuje znacznym zapasem energetycznym wynikającym z braku układu sensorycznego. W szczególności, przy średnim poborze prądu przez sensor rzędu $I_{\text{avg}} \approx 20 \mu\text{A}$, dostępny dzienny budżet energetyczny wynosi:

$$E_{\text{day}} \approx 0,48 \text{ mAh/dzień},$$

Tak sformułowany cel projektowy stanowi wartościowy punkt odniesienia, choć nie jest traktowany jako twarde ograniczenie. Analogiczne założenie przyjęto w publikacji analizującej zużycie energii w mechanizmie retransmisji zgodnym z TS011 dla sieci LoRaWAN [2].

Wnioski Na podstawie powyższej analizy w narzędziu symulacyjnym przyjęto następujące założenia energetyczne:

- średni prąd pobierany przez urządzenie końcowe w stanie bezczynności (bez udziału radia):
 $I_{\text{sleep}} = 25,3 \mu\text{A}$,
- średni prąd urządzenia retransmitującego w stanie bezczynności (bez udziału radia): $I_{\text{sleep}} = 5,6 \mu\text{A}$,
- średni prąd urządzenia podczas nadawania z mocą +14 dBm: $I_{\text{TX}} = 25,5 \text{ mA}$,
- średni prąd urządzenia podczas odbioru, uwzględniając aktywność CPU: $I_{\text{RX}} + I_{\text{CPU}} = 4,9 \text{ mA}$.

4.5 Sterowanie mocą nadawania

Możliwość precyzyjnej regulacji mocy nadawczej, dostępna w układach z rodziny SX126x, pozwala na adaptację poziomu sygnału do warunków propagacyjnych z dokładnością do 1 dB. Mechanizm ten może być wykorzystany przy projektowaniu systemów retransmisyjnych w sieciach *LoRa*, w szczególności w komunikacji pomiędzy urządzeniami końcowymi (*ED*) a węzłami retransmisyjnymi (*RL*). Celem jest utrzymywanie wartości *RSSI* powyżej progu umożliwiającego poprawną demodulację, lecz bez nadmiernego zapasu mocy, co zmniejsza interferencje, ogranicza zajętość medium radiowego oraz redukuje zużycie energii nadajnika.

Podobne podejście zostało wcześniej zaproponowane przeze mnie w pracy [3], w której opracowano samo-adaptujący się algorytm sterowania mocą w sieciach *WSN*. Mechanizmy oparte na tablicach mocy nadawczej, wykorzystane w tym rozwiązaniu, mogą zostać bezpośrednio zaadaptowane do systemu retransmisyjnego *LoRa*, ponieważ komunikacja między *ED* a *RL* nie musi być zgodna ze specyfikacją *LoRaWAN*. Umożliwia to implementację strategii znanych z literatury *WSN* i ich zastosowanie w środowisku *LoRa*, co może prowadzić do bardziej efektywnego wykorzystania medium radiowego.

4.6 Regulacyjne ograniczenia czasu emisji

Istotnym ograniczeniem w sieciach *LoRa*, wynikającym z regulacji prawnych dotyczących pracy w nie-licencjonowanych pasmach *ISM*, jest obowiązek przestrzegania maksymalnego współczynnika zajętości kanału radiowego (*duty cycle*). W regionie europejskim (EU868) typowa wartość tego ograniczenia wynosi 1%, co oznacza, że czas emisji w danym podpaśmie nie może przekroczyć 36 s w ciągu jednej godziny. Restrykcja ta może ograniczać możliwości stosowania niektórych mechanizmów retransmisji, zwłaszcza tych opartych na użyciu niskich wartości *SF*.

Rozdział 5

Mechanizm retransmisji z urządzeniem pośrednim w sieci LoRaWAN

W niniejszym rozdziale omówiono dwa podejścia do mechanizmu retransmisji w sieciach *LoRaWAN*. Pierwsze z nich zostało zaproponowane przez organizację *LoRa Alliance* i opisane w dokumencie technicznym TS011 [55]. Drugie rozwiązanie stanowi autorską propozycję opracowaną równolegle. Oba mechanizmy są przystosowane do pracy w sieciach *LoRaWAN* oraz pozostają w pełni zgodne ze specyfikacją w zakresie widoczności urządzenia pośredniczącego w sieci.

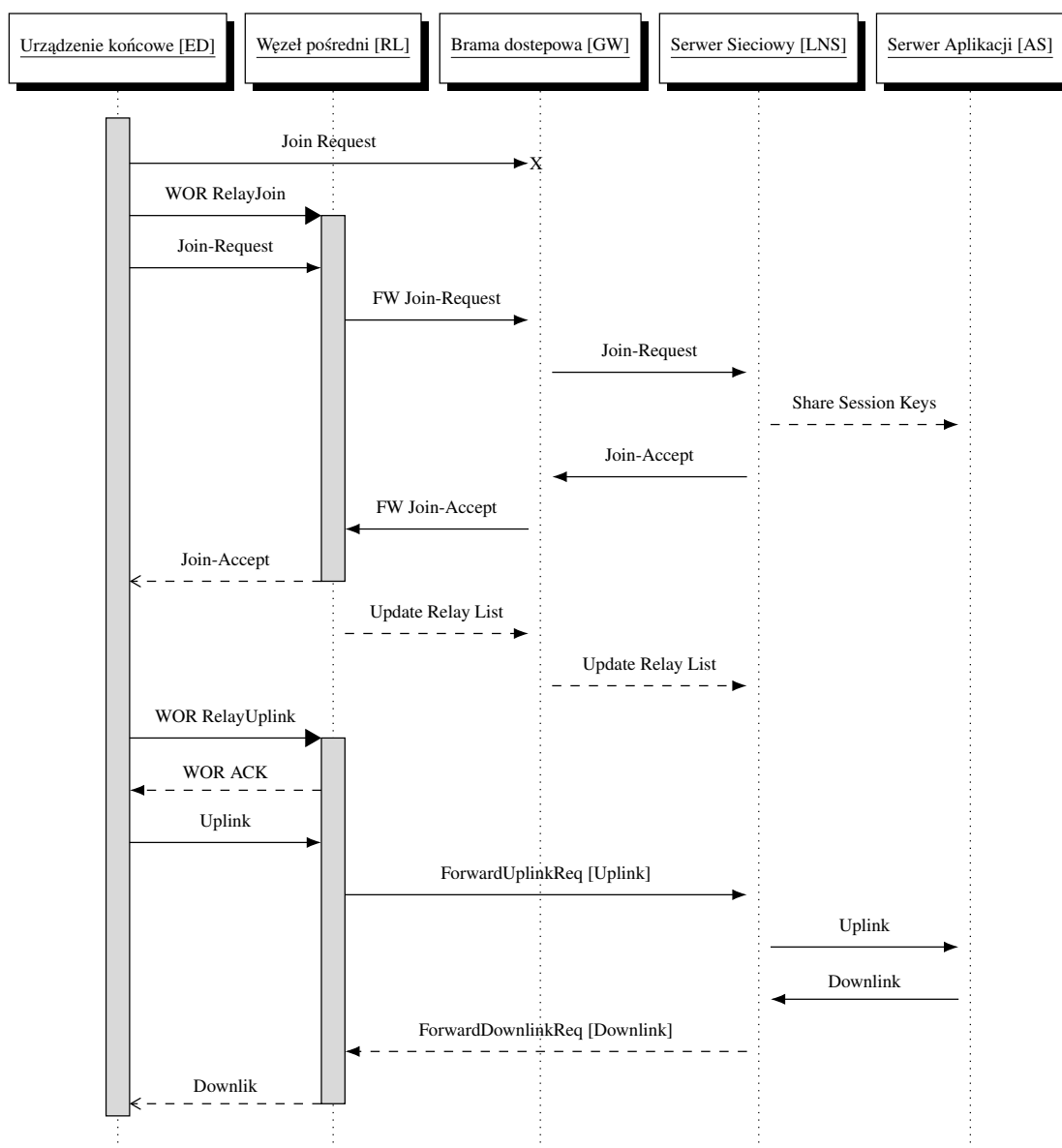
5.1 Model retransmisji TS011

Rozszerzenie *TS011*, zatytułowane *Relay Specification for LoRaWAN Networks*, zostało opracowane przez organizację *LoRa Alliance* w odpowiedzi na potrzebę zwiększenia zasięgu oraz niezawodności działania sieci *LoRaWAN* w wymagających warunkach terenowych i urbanistycznych. Standard *LoRaWAN* w swojej pierwotnej postaci zakłada jednokierunkową transmisję danych z urządzeń końcowych (*ED*, klasa A) do punktów dostępowych (*GW*), co ogranicza możliwości komunikacyjne w lokalizacjach pozbawionych bezpośredniego zasięgu stacji bazowej, takich jak piwnice, kontenery czy obszary góryste

Specyfikacja retransmisji dla *LoRaWAN* wprowadza rolę węzła pośredniczącego *RL*, który rozszerza możliwości warstwy *MAC* o funkcję retransmisji pakietów danych. Węzły pośrednie nasłuchują kanału radiowego na obecność pakietów z długą preambułą (pakiety *Wake-up On Radio (WOR)*), które są wysyłane przez urządzenia końcowe. Aby zmniejszyć zużycie energii, stosuje się technologię *WOR*, pozwala węzłowi pośredniemu włączyć odbiornik tylko w wybranych oknach czasowych. Mechanizm wymaga nadawania stosunkowo długich preambuł $t = 1[s]$ kosztem większej utylizacji sieci oraz większego zużycia baterii przez urządzenia końcowe.

Specyfikacja retransmisji dla *LoRaWAN* wprowadza rolę węzła pośredniczącego (*RL*), który rozszerza możliwości warstwy *MAC* o funkcję retransmisji pakietów danych. Węzły pośredniczące nasłuchują kanału radiowego pod kątem obecności pakietów z długą preambułą (*WOR*), wysyłanych przez urządzenia końcowe. W celu ograniczenia zużycia energii stosuje się mechanizm *WOR*, który umożliwia

węzłowi pośredniczącemu aktywację odbiornika jedynie w wybranych oknach czasowych. Mechanizm ten wymaga jednak nadawania stosunkowo długich preambuł o czasie trwania $t = 1$ s, co odbywa się kosztem zwiększonej utylizacji sieci oraz większego zużycia energii przez urządzenia końcowe.



Rysunek 5.1: Diagram sekwencji retransmisji według dokumentu TS011 (LoRaWAN Relay)

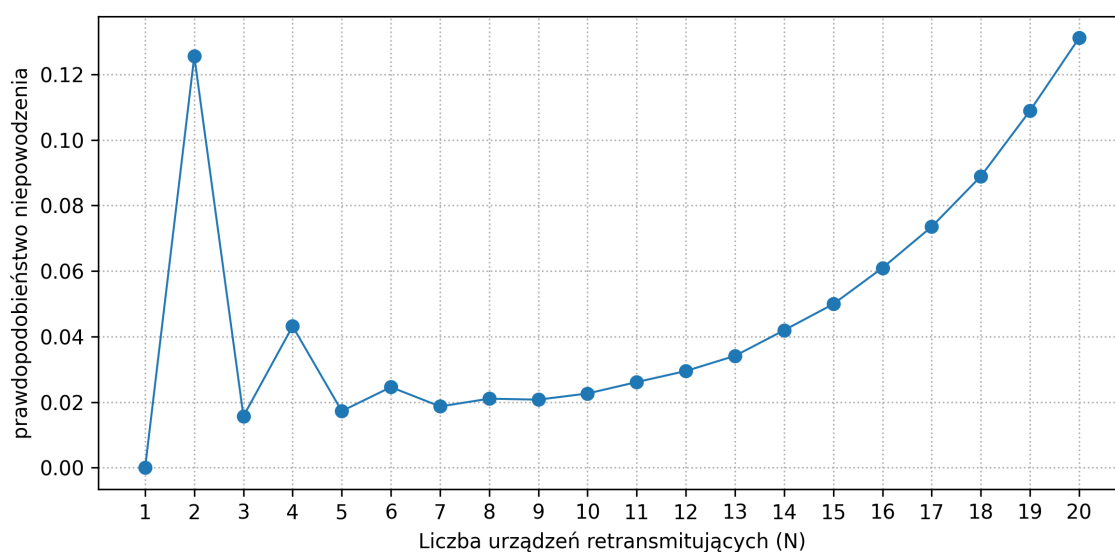
Rysunek 5.1 przedstawia proces zgodny ze specyfikacją *TS011*, w którym węzeł pośredniczący (*RL*) najpierw dołącza do sieci w taki sam sposób jak każde inne urządzenie *LoRaWAN*, realizując wymianę ramek *Join-Request* i *Join-Accept* za pośrednictwem bramy dostępowej (*GW*) oraz serwera sieciowego (*LNS*). Następnie możliwa jest próba dołączenia urządzenia końcowego (*ED*), które ze względu na słabe warunki propagacyjne nie jest w stanie skutecznie komunikować się bezpośrednio z siecią i wysyła preambułę *WOR* celem wybudzenia węzła *RL*. Węzeł pośredniczący rozpoznaje to wybudzenie i przyjmuje *Join-Request*, po czym przekazuje dalej (*Forward Join-Request*) do *GW*, a następnie przez *LNS* realizowana jest pełna procedura uwierzytelnienia i generowania kluczy sesyjnych. Po stronie aplikacyjnej wymieniane są klucze szyfrujące, a uzyskane *Join-Accept* przekazywane jest z powrotem przez *GW* i

RL do *ED*. W dalszej fazie, w ramach normalnej pracy, uplinki generowane przez urządzenie końcowe przesyłane są najpierw do *RL*, a następnie jako *ForwardUplinkReq* kierowane do *LNS*, który dostarcza je do *Application Server (AS)*. Analogicznie wiadomości downlink, pochodzące z *LNS*, są przekazywane poprzez *GW* i *RL* do *ED*, dzięki czemu zachowana zostaje pełna funkcjonalność systemu *LoRaWAN* przy wykorzystaniu mechanizmu retransmisji.



Rysunek 5.2: Zależności czasowe transmisji. Źródło specyfikacja TS011.

Ryzyko retransmisji przez wiele węzłów pośrednich *RL* działające zgodnie ze standardem *TS011* nie wymagają bezpośredniego nadzoru przez system *LNS*. Jednak w sytuacji, gdy dane urządzenie końcowe jest retransmitowane przez wiele $n > 1$ *RL*, dochodzi nie tylko do znaczącego zwiększenia zajętości medium transmisyjnego, ale także do pojawiania się kolizji w kanałach radiowych podczas prób retransmisji. Specyfikacja nie definiuje okien czasowych ani opóźnień retransmisji, co odróżnia ją od



Rysunek 5.3: Prawdopodobieństwo całkowitej porażki retransmisji dla różnej liczby węzłów pośrednich. Liczba kanałów $K = 8$. Wartości wyznaczone metodą Monte Carlo, źródło - opracowanie własne.

innych protokołów, np. Wize 2.3.1. W praktyce oznacza to, że stosowanie więcej niż jednego urządzenia pośredniczącego w obszarze, gdzie oba mogą retransmitować ten sam sygnał, wymaga aktywnego zarządzania przez warstwę *LNS* listami urządzeń końcowych przypisanych do retransmisji w poszczególnych *RL*. Idealnym scenariuszem jest retransmisja przez pojedyncze urządzenie pośredniczące, natomiast sytuacje, w których retransmisję prowadzi większa, zwłaszcza parzysta liczba *RL*, są niekorzystne. Ponieważ ramka odebrana przez *RL* od urządzenia końcowego musi zostać natychmiast przekazana do *GW* (zobacz rys 5.2), by umożliwić dostarczenie ewentualnej odpowiedzi w oknie RXR urządzenia końcowego, mechanizmy znane z innych systemów retransmisji, pozwalające unikać kolizji, nie mają tu

zastosowania. Jedynym czynnikiem ograniczającym prawdopodobieństwo kolizji jest losowy wybór kanału transmisyjnego — w przypadku działania według Regional Parameters EU863–870 (zobacz [75]) dostępnych jest osiem kanałów. Symulację prawdopodobieństwa niedostarczenia żadnej wiadomości do GW wskutek kolizji przedstawiono na rys. 5.3.

Szyfrowanie realizowane jest w modelu *E2E*, dlatego *RL* nie ma dostępu do treści ramki. Jego zadanie ogranicza się do opakowania odebranej ramki odpowiednimi znacznikami i transparentnego przekazania jej dalej. W procesie tym nie następuje uwierzytelnienie *ED* względem *RL*.

Zużycie energii Zgodnie ze specyfikacją TS011 komunikacja pomiędzy *ED* i *RL* odbywa się na kanale domyślnym (oraz opcjonalnie na kanale drugim) skanowanym przez *RL* w trybie *Channel Activity Detection (CAD)*. Są to specjalne kanały dedykowane do retransmisji, których parametry (częstotliwość/*SF*/*BW*) określone są w dokumencie *Regional Parameters* dla danej strefy radiowej, przykładowo dla Europy [75]. Serwer może dodatkowo skonfigurować drugi kanał, który może mieć inną częstotliwość i/lub *SF* niż kanał podstawowy. W rozwiązaniach nastawionych na maksymalną oszczędność energii drugi kanał zwykle nie jest wykorzystywany, ponieważ skutkowałby podwojeniem średniego zużycia energii retransmitera i energii transmisji urządzenia końcowego. Zużycie energii dla jednego kanału można wyliczyć następująco:

$$T_{\text{sym}} = \frac{2^{\text{SF}}}{\text{BW}} = \frac{2^9}{125000} \text{ s} = 4.096 \times 10^{-3} \text{ s} (= 4.096 \text{ ms}),$$

$$t_{\text{CAD}} \approx (N + 0.5) T_{\text{sym}},$$

$$I_{\text{avg}} = \frac{I_{\text{RX}} t_{\text{CAD}} + I_{\text{sleep}} (T - t_{\text{CAD}})}{T}, \quad T = 1 \text{ s}.$$

Dla $I_{\text{RX}} = 4.6 \text{ mA}$ $I_{\text{sleep}} = 4,8 \mu\text{A}$ (zobacz 4.4) otrzymujemy następujące wartości I_{avg}

N (CadToRx)	t_{CAD} [ms]	Wsp. pracy t_{CAD}/T	I_{avg} [μA]
2	10.240	0.01024	51.9
4	18.432	0.018432	89.5
6	26.624	0.026624	127.1
8	34.816	0.034816	164.8

Tabela 5.1: Średni prąd od nasłuchu CAD dla SF9/BW125, $T = 1 \text{ s}$.

Układy SX126x i STM32WLE pozwalają ustawić parametr CadToRx na wartości $N \in \{2, 4, 6, 8\}$, co odpowiada liczbie symboli LoRa używanych do detekcji kanałowej CAD. Czas pojedynczej detekcji można zapisać jako $t_{\text{CAD}} \approx (N + 0.5) T_{\text{sym}}$, gdzie T_{sym} jest czasem trwania symbolu LoRa. Według dokumentacji Semtech najmniejsze ustawienie $N = 2$ minimalizuje pobór energii, lecz zwiększa ryzyko błędnej detekcji lub utraty ramki przy niskim SNR. Dla pewnej pracy w trybie WOR stosuje się zwykle $N = 4$, co stanowi kompromis pomiędzy niezawodnością a zużyciem energii. W specyfikacji TS011

dla mechanizmu przekaźnikowego przyjęto właśnie wartość $C_{\text{adToRx}} = 4$, gwarantującą poprawne wykrywanie preambuły urządzeń końcowych przy $SF = 9$ i $BW = 125$ kHz.

Zgodnie ze specyfikacją TS011 komunikacja pomiędzy urządzeniem końcowym *ED* a węzłem pośrednim *RL* na podstawowym kanale przekaźnikowym odbywa się zawsze przy parametrach $SF = 9$, $BW = 125$ kHz oraz $CR = 4/5$. Parametry te są arbitralnie narzucone przez LoRa Alliance, dlatego w dalszej części pracy przyjęte są jako obowiązujące dla wszystkich analiz związanych z transmisją *ED-RL*. Idąc dalej, dla zadanego $C_{\text{adToRx}} = 4$ średnie zużycie prądu w nasłuchu dla różnych SF przedstawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2: Średni prąd w nasłuchu CAD dla różnych wartości SF przy $C_{\text{adToRx}} = 4$, $BW = 125$ kHz i okresie wywołań $T = 1$ s. $I_{\text{sleep}} = 4,8 \mu\text{A}$

SF	T_{sym} [ms]	t_{CAD} [ms]	Duty [%]	I_{avg} [μA]
7	1.024	4.608	0.46	26.0
8	2.048	9.216	0.92	47.2
9	4.096	18.432	1.84	89.5
10	8.192	36.864	3.69	174
11	16.384	73.728	7.37	343
12	32.768	147.456	14.7	682

Dodatkowy koszt energetyczny po stronie urządzenia wiąże się z nadaniem dodatkowej ramki *WOR* o stałej długości $t_{\text{WOR}} = 1$ [s]. Ładunek pobrany podczas transmisji pojedynczej ramki wynosi:

$$Q_1 = I_{\text{TX}} \cdot t_{\text{WOR}} \quad [\text{mAs}],$$

Nadanie 4 ramek *WOR* dziennie, z uwzględnieniem uwarunkowań energetycznych omówionych w sekcji 4.4, wiąże się z podniesieniem średniego dobowego zużycia prądu:

$$I_{\text{avg}+} = 1.2 \mu\text{A}.$$

Podsumowanie Zaproponowany mechanizm charakteryzuje się stosunkowo prostą konstrukcją i skutecznie realizuje cel retransmisji, nie wymagając skomplikowanej konfiguracji sieci. Preambuły wybudzające (*WOR*) są rozwiązaniem znanym i szeroko stosowanym w innych protokołach opartych na modulacjach *FSK*, takich jak *wM-Bus* w trybie T, IEEE 802.15.4 w trybie *beaconless* czy niejawnym protokół *Wavenis*. Ich podstawową zaletą jest możliwość inicjalizacji transmisji w dowolnym momencie, co umożliwia przesyłanie alarmów oraz innych komunikatów o charakterze asynchronicznym. Wadą mechanizmu jest natomiast zwiększone zużycie energii przez retransmiter, wynikające z konieczności ciągłego nasłuchiwanie preambuł budzących *WOR*.

5.2 Sposób retransmisji dla sieci LoRaWAN z wykorzystaniem predefiniowanych slotów czasowych

Sposób retransmisji w sieciach *LoRaWAN* z wykorzystaniem predefiniowanych slotów czasowych został opisany w europejskim zgłoszeniu patentowym EP4312388 [10]. Poniżej przedstawiono opis zgłoszenia w języku polskim, skoncentrowany na zastosowanych mechanizmach oraz ocenie ich wydajności, bez szczegółowego omawiania złożonych zastrzeżeń. Zgłoszenie prezentuje odmienne podejście do retransmisji, polegające na pominięciu klasycznego mechanizmu *WOR* oraz długich preambuł sygnału wybudzającego. Opis protokołu i późniejsze zgłoszenie patentowe zostały przygotowane przeze mnie oraz współautorów jako odpowiedź na zapotrzebowanie opracowania energooszczędnego sposobu retransmisji.

Istotą proponowanego rozwiązania jest wykorzystanie znajomości topologii sieci oraz parametrów konfiguracji urządzeń końcowych (*ED*) — w szczególności z góry ustalonych czasów nadawania — do aktywacji nasłuchu w węźle pośredniczącym (*RL*) w ściśle wyznaczonych chwilach. Dzięki temu nie jest wymagany ciągły nasłuch z wykorzystaniem *CAD*, co ogranicza pobór energii po stronie retransmitera. Nie ma także potrzeby nadawania przez *ED* długich preambuł budzących *WOR*, co obniża średni dzienny pobór prądu I_{avg} i wydłuża czas pracy *ED* przy zasilaniu bateryjnym. Kluczowym warunkiem poprawnego działania jest synchronizacja czasu nadajnika i odbiornika oraz kompensacja dryftu zegara poprzez odpowiednie poszerzanie okien nasłuchowych. Należy przy tym podkreślić, że rozwiązanie nie zapewnia retransmisji ramek wysyłanych poza harmonogramem (asynchronicznych); w reżimie deterministycznym pozwala jednak na istotną minimalizację zużycia energii.

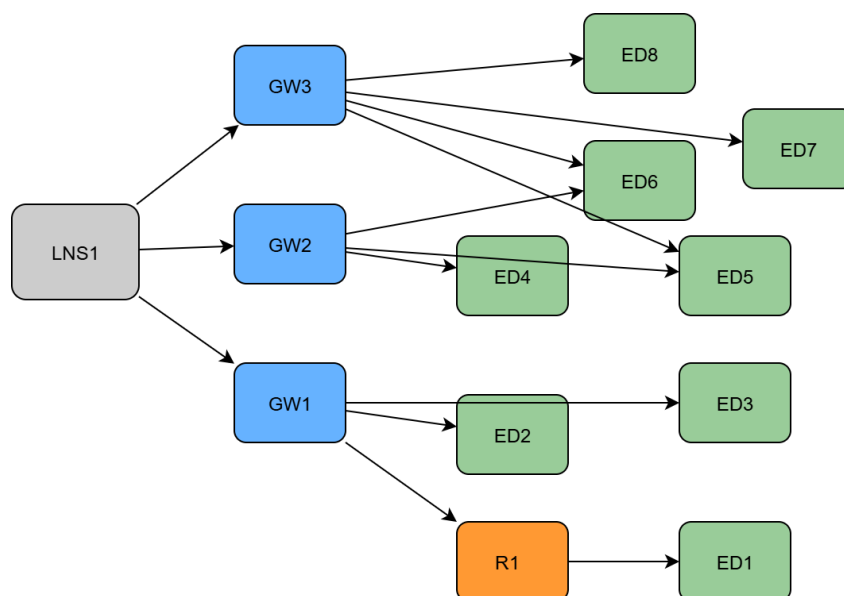
5.2.1 Model systemu i założenia

Rozważamy *LoRaWAN* z serwerem sieciowym *LNS*, zbiorami punktów dostępowych *GW* oraz urządzeniami końcowymi *ED*. Relay *RL* jest węzłem z pojedynczym transceiverem radiowym, zasilanym bateryjnie, który: (i) potrafi odebrać *uplink* *ED* i ponownie go nadać (model *DF*) do *LNS* przez *GW*, (ii) nie wymaga zsynchronizowanego „full-duplexu” ani zmian w radiu *ED*, (iii) działa wyłącznie w oknach czasowych o ograniczonym budżecie energii, (iv) używa puli kanałów wydzielonej do retransmisji.

Serwer *LNS* przechowuje informacje lokalizacyjne *ED* i potencjalnych *RL* (np. współrzędne/komórki lokalizacji) i na ich podstawie wybiera węzeł pośredni *RL* do wsparcia wybranego *ED*. Zakładamy *LoRaWAN* klasy A; *ED* utrzymuje standardowe okna odbioru RX1/RX2 po nadaniu ramki *uplink*.

Schemat blokowy sieci *LoRaWAN* przedstawiono na rys. 5.4. Sieć zawiera serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1 komunikujący się z bramkami G1, G2, G3. Bramki komunikują się z urządzeniami końcowymi klasy A ED2, ED3, ED4, ED5, ED6, ED7, ED8. Dodatkowo urządzenie końcowe klasy A ED1 komunikuje się za pośrednictwem przekaźnika R1, skonfigurowanego zgodnie z wynalazkiem.

Serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1 obejmuje system zarządzania transmisją i Head-End System (tzw. *Head-End System (HES)*), będący serwerem aplikacyjnym odpowiedzialnym za konfigurację urządzeń na warstwie danych.



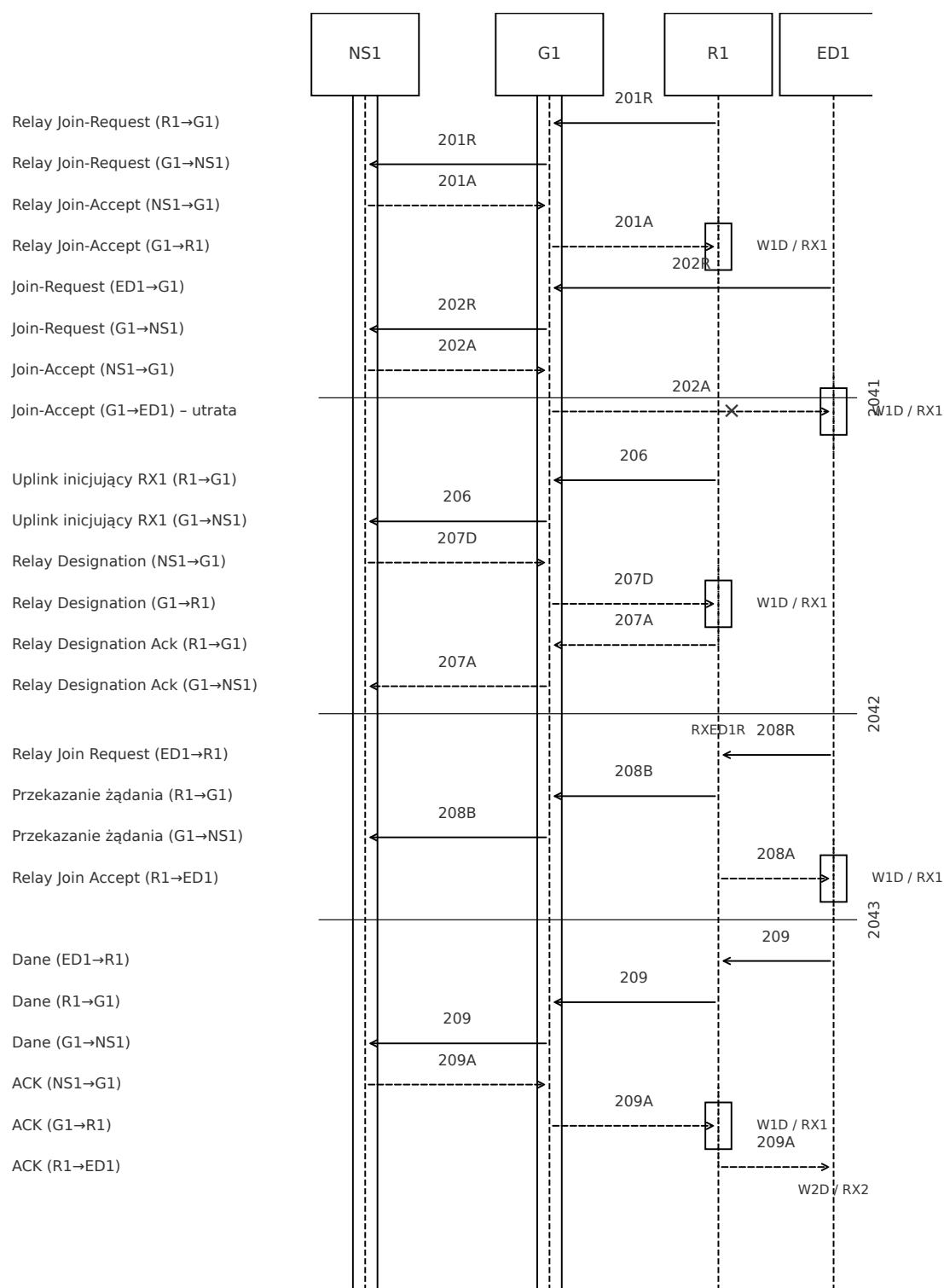
Rysunek 5.4: Topologia węzłów pośrednich w sieci LoRaWAN

Przełącznik R1 jest urządzeniem końcowym zasilanym bateryjnie, uruchamiającym produkt programowy zgodnie z wynalazkiem. Zanim przełącznik R1 będzie mógł pełnić rolę urządzenia pośredniczącego w komunikacji, musi zostać zarejestrowany w sieci. Odbywa się to poprzez wysłanie ramki Join Request 201R z przełącznika R1 do bramki G1. Żądanie jest akceptowane zwrotną ramką Join Response 202.

Konwencjonalnie transmisja pomiędzy serwerem sieciowym *LoRaWAN* NS1 a urządzeniami końcowymi ED1, ED2, ED3, ED4, ED5, ED6, ED7, ED8 realizowana jest poprzez jedną lub więcej bramek G1, G2, G3. Bramki G1, G2, G3 są zasilane z sieci energetycznej i skonfigurowane do ciągłego monitorowania 8 kanałów dostępnych dla urządzeń końcowych ED2, ED3, ED4, ED5, ED6, ED7, ED8. Zasięg sieci jest ograniczony lokalizacją rozmieszczenia bramek G1, G2, G3. Bramki wymagają zasilania z sieci energetycznej. Liczba 8 kanałów podana jest jedynie jako przykład – liczba dostępnych kanałów zależy od przepisów prawnych w poszczególnych jurysdykcjach.

Komunikacja z urządzeniem końcowym ED1, znajdującym się poza zasięgiem wszystkich bramek G1, G2, G3, została przedstawiona schematycznie na Rys. 5.5 Kolejne ramki wysyłane pomiędzy serwerem sieciowym *LoRaWAN* NS1, bramką G1, przełącznikiem R1 i urządzeniem końcowym ED1 oznaczono strzałkami. Ramki inicjujące komunikację przedstawiono liniami ciągłymi, a odpowiedzi liniami przerywanymi. Strzałki skierowane w dół oznaczają późniejsze sygnały. Strzałki pionowe wychodzące z serwera sieciowego *LoRaWAN* NS1, bramki G1, przełącznika R1 i urządzenia końcowego ED1 reprezentują źródła i cele transmisji. Strzałki pionowe w dół oznaczają opóźnienia pomiędzy wysłaniem transmisji uplink a włączeniem odbiornika. Prostokąty pionowe RX, RX1, RX2 reprezentują przedziały czasowe, w których w określonych urządzeniach włączany jest odbiornik.

Okno odbiorcze RX1 otwierane jest po opóźnieniu WD1 za każdym razem, gdy urządzenie końcowe ED1 lub przełącznik R1 transmituje dane do bramki G1. Wówczas w dół kanału przesyłane są potwierdzenia, odpowiedzi i wiadomości downlink lub potwierdzenia odbioru danych od G do ED1 albo R1. Okno RX1 jest również otwierane, gdy ED1 transmituje do R1.



Rysunek 5.5: Diagram sekwencji wg zgłoszenia patentowego EP4312388

Zdefiniowane z góry opóźnienie okna odbiorczego WD1D pozwala urządzeniu końcowemu ED1 oraz przekaźnikowi R1 na odbiór i przetwarzanie danych, przy czym serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1 oszczędza energię poprzez utrzymywanie odbiornika wyłączzonego, dopóki dane nie są przetwarzane.

Za każdym razem, gdy serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1 (w nomenklaturze pracy *LNS*) musi wysłać dane do urządzenia końcowego lub przekaźnika, oczekuje na otwarcie okna RX1 po opóźnieniu W1D. Zasada ta dotyczy również ramek wyznaczających retransmisję. Każde takie okno RX1 zamyka się po odebraniu poprawnej odpowiedzi na ostatnio transmitowaną ramkę.

RX2 reprezentuje drugi typ okna odbiorczego, które otwierane jest za każdym razem, gdy urządzenie końcowe ED1 transmituje dane do bramki G1 i oczekuje na odpowiedź z serwera sieciowego *LoRaWAN* NS1. Drugie okno odbiorcze RX2 otwierane jest po upływie zdefiniowanego opóźnienia W2D, aby umożliwić odebranie retransmitowanej ramki przez przekaźnik R1, jej przesłanie do serwera sieciowego *LoRaWAN* NS1, dalsze przetworzenie przez serwer NS1 i retransmisję do przekaźnika R1.

Po dodaniu nowego urządzenia końcowego ED1 do sieci, jego numer seryjny oraz informacje lokalizacyjne są przechowywane na serwerze sieciowym *LoRaWAN* NS1. Informacje lokalizacyjne mogą być specyficzne globalnie lub lokalnie (np. współrzędne), nazwą obiektu/facility, w którym znajduje się urządzenie, bądź specyfikacją bramek, które potencjalnie mieszczą się w zasięgu radiowym.

Chociaż współrzędne geograficzne stanowią bardzo dogodną informację lokalizacyjną, informacja ta może być również reprezentowana w postaci bardziej ogólnej, np. poprzez nazwę obiektu znajdującego się w pobliżu lub położenie względne względem najbliższej bramki.

Ponadto informacja lokalizacyjna może być przekazywana przez urządzenie końcowe do serwera lub ustalana po stronie serwera na podstawie triangulacji sygnałów radiowych odbieranych od innych urządzeń w sieci *LoRaWAN* (zobacz 3.3).

Komunikacja przedstawiona na Rys. 5.5 rozpoczyna się aktywacją przekaźnika R1 w procedurze przyłączenia zgodnej z *LoRa Link Layer Specification*, w której przekaźnik R1 rozgłasza ramkę *Relay Join-Request* 201R. Ramka 201R jest odbierana przez bramkę G1, jeśli znajduje się ona w zasięgu, i przekazywana dalej do serwera sieciowego *LoRaWAN* NS1. W odpowiedzi serwer NS1 wysyła ramkę *Relay Join-Accept* 201A do bramki G1, która przesyła ją dalej do przekaźnika R1. Przekaźnik R1 skonfigurowany jest tak, aby włączać odbiornik z opóźnieniem W1D po wysłaniu ramki *Relay Join-Request* 201A. Różnica w stosunku do specyfikacji *LoRa Link Layer Specification* polega na tym, że informacje lokalizacyjne przekaźnika R1 oraz informacje lokalizacyjne urządzenia końcowego ED1 dostarczane są przez inne urządzenia i przechowywane w serwerze sieciowym NS1.

Alternatywnie (nie pokazano na Rysunkach) aktywacja może odbywać się poprzez metodę *Activation By Personalization (ABP)*, zdefiniowaną w *LoRa Link Layer Specification*, w której informacje lokalizacyjne przekazywane są do serwera sieciowego *LoRaWAN* za pomocą innych środków, np. manualnie albo przez inną sieć telekomunikacyjną. Po instalacji urządzeń końcowych ED1, ED2, ED3, ED4, ED5, ED6, ED7, ED8 współrzędne GPS lub inne informacje lokalizacyjne mogą być komunikowane za pomocą dodatkowego łącza telekomunikacyjnego do serwera sieciowego *LoRaWAN* NS1, który przechowuje je na przyszłość. To samo dotyczy przekaźnika R1. Bramki G1, G2, G3 często mają własne odbiorniki GPS i są przystosowane do komunikowania tej lokalizacji do serwera NS1. Dla wy-

gody przechowywanie lokalizacji także w serwerze sieciowym NS1 jest korzystne. Dodatkowe łącze komunikacyjne może być również inną siecią telekomunikacyjną, siecią bezprzewodową, bezpośrednim połączeniem kablowym albo nawet połączeniem głosowym, w którym instalator podaje lokalizację urządzenia. Typowe wybory obejmują komunikację komórkową (*LTE*) lub *WiFi* poprzez aplikację mobilną technika instalującego urządzenie. Najszybszym, najbardziej niezawodnym i wygodnym sposobem jest sieć *LTE* i aplikacja mobilna.

Alternatywnie dodatkowe łącze komunikacyjne może być całkowicie pominięte, a urządzenie końcowe może zostać przystosowane do komunikowania swojej lokalizacji w sieci *LoRaWAN* już w jednej z pierwszych ramek wysyłanych do serwera.

Rys. 5.5 przedstawia również nieudaną próbę aktywacji urządzenia końcowego ED1. Urządzenie końcowe ED1 rozgłasza ramkę *Join-Request* 202R oraz kolejne ramki danych zawierające informację lokalizacyjną (nie pokazane na rysunkach). Ramka 202R jest odbierana przez bramkę G1 i przekazywana do serwera sieciowego (ramka nie pokazana na Rysunku), który odpowiada ramką *Join-Accept* 202A (również niepokazaną). Bramka G1 przekazuje ramkę 202A dalej do urządzenia końcowego ED1, lecz komunikacja jest nieudana, co oznaczono symbolem „X” na 5.5. Gdy ramka *Join-Accept* nie zostaje odebrana w czasie okna RX1, komunikacja jest utracona (*loss* 203).

Jak wspomniano wcześniej, utrata komunikacji może być odnotowana natychmiast lub po określonej liczbie nieudanych prób (nie pokazano na rysunkach), np. po przekroczeniu zdefiniowanej maksymalnej liczby prób nasłuchu w oknie RX1. Ograniczenie to oszczędza energię urządzeń końcowych lub przekaźników, gdy odpowiedź nie nadchodzi lub zostaje utracona.

Na serwerze sieciowym *LoRaWAN* NS1 transmisja od urządzenia końcowego ED1 oczekiwana jest w losowym momencie w ramach *WINDOW_SIZE*, następującym po czasie transmisji ramki 2041 przypisanej do urządzenia końcowego ED1.

Jak pokazano na Rys. 5.5, w przedziale czasowym następującym po transmisji ramki 2041, gdy od urządzenia końcowego ED1 nie nadchodzi żadna transmisja, serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1 potwierdza utratę komunikacji 205.

Serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1 oczekuje następnej transmisji z przekaźnika, który – zgodnie z przechowywaną informacją lokalizacyjną – znajduje się w zasięgu urządzenia końcowego ED1. Jest to transmisja 206 z przekaźnika R1. Ramka *Relay Designation* 207B wysyłana jest z serwera NS1 poprzez bramkę G1 do przekaźnika R1, aby ten odebrał ją w oknie RX1 po komunikacji 206, z opóźnieniem W1D. Przekaznik R1 odpowiada ramką *Relay Designation Acknowledgement* 207A, która przekazywana jest do serwera *LoRaWAN* NS1 przez bramkę G1.

Ramka wyznaczenia przekaźnika 207D obejmuje numer seryjny urządzenia końcowego ED1, które wymaga retransmisji w celu zapewnienia udanej komunikacji.

Po stronie łącza komunikacyjnego urządzenie końcowe ED1 rejestruje utratę komunikacji 203. Utrata komunikacji jest definiowana albo poprzez przekroczenie czasu oczekiwania na odpowiedź, albo – dodatkowo – poprzez przekroczenie maksymalnej liczby prób retransmisji w celu otrzymania odpowiedzi. Możliwe są też dodatkowe warunki specyficzne dla danej konfiguracji.

Po odnotowaniu utraty komunikacji urządzenie końcowe ED1 jest skonfigurowane do wysłania ramki `Relay Join Request 208R` w czasie przesunięcia i w kanale obliczonym z użyciem funkcji `Mersenne Twister`, której ziarno ustalane jest na podstawie numeru dnia w roku oraz numeru seryjnego urządzenia końcowego ED1. Numer dnia w roku i numer seryjny podane są tu jedynie jako przykład dwóch parametrów, z których pierwszy stanowi zmienną absolutną „znaną obu urządzeniom”, a numer seryjny jest przykładem parametru stałego identyfikującego urządzenie końcowe ED1.

Generator Mersenne Twister jest znany i stosowany w generatorach liczb pseudolosowych od 1998 roku, jak wskazali Makoto Matsumoto i Takuji Nishimura w pracy [89]. Posiada on dwie główne zalety: długi okres generowania liczb oraz niską złożoność obliczeniową, co przyczynia się do oszczędności energii w przypadku retransmisji węzłów bateryjnych. Funkcja `Mersenne Twister` obliczana po stronie parametrów przekaźnika R1 oraz urządzenia końcowego ED1 zwraca tę samą liczbę, jednak rozkład liczby wygenerowanych wartości w jednostce czasu jest nierozróżnialny od rozkładu losowego, a więc czasy transmisji wyznaczone z użyciem funkcji `Mersenne Twister` są zgodne ze standardem *LoRaWAN*.

W konsekwencji komunikacja pomiędzy urządzeniem końcowym ED1 a przekaźnikiem R1 rozpoczynająca się w chwili 2042 transmisji, obliczana z użyciem funkcji `Mersenne Twister`, jest równomiernie rozłożona w zdefiniowanym przedziale czasowym i tym samym zgodna ze specyfikacją *LoRaWAN* klasy A, opartą na protokole typu ALOHA. Jednakże użycie funkcji pseudolosowej, której ziarno (*seed*) składa się z dwóch parametrów znanych zarówno przekaźnikowi, jak i urządzeniu końcowemu, nadal umożliwia wysoce efektywną komunikację bez konieczności dodawania sygnałów dodatkowych.

Ziarnem dla funkcji `Mersenne Twister` jest konkatenacja numeru seryjnego urządzenia końcowego ED1 oraz parametru obiektywnego, np. wartości związanej z czasem.

Urządzenia końcowe w sieci nadają dane w chwilach losowych, lecz w z góry ustalonych przedziałach czasowych, aby zapewnić równomierny rozkład. Generator pseudolosowy wykonuje określoną liczbę iteracji odpowiadających liczbie okien transmisyjnych i oblicza wynikową wartość `MT_OUT` z zakresu $[0, 2^{32} - 1]$. Zmienna wyjściowa `MT_OUT` jest dzielona na dwa 16-bitowe fragmenty `MT_OUT_L` oraz `MT_OUT_H`, co daje dwie wartości wyjściowe o łącznej długości 16 bitów. `MAX RAND` jest stałą wartością związaną z długością zmiennej i w tym przykładzie wynosi 65536. `MT_OUT` jest następnie przeliczana, aby wskazać przesunięcie względem zdefiniowanego początku okna transmisyjnego przypisanego do danej transmisji, np. ta sama godzina każdego dnia w ramach wyznaczonego przedziału czasowego: `WINDOW_SIZE`. W konsekwencji przesunięcie transmisji Δ_T względem zdefiniowanego okna czasowego oblicza się według wzoru:

$$\Delta_T = \text{WINDOW_SIZE} \cdot \frac{\text{MT_OUT_H}}{\text{RAND_MAX}}$$

Wartość `WINDOW_SIZE` jest wprost oknem czasowym zgłoszeń opisanym w 6.11.

Rozważmy urządzenie końcowe ED1 posiadające numer seryjny, dla którego ustalono stały parametr `FP=0xFA10`, skonfigurowane do wysyłania wiadomości średnio co 12 godzin, tj. dwa razy dziennie o

godzinie 6:00 oraz 18:00. Rozważmy ponadto drugą transmisję w 5. dniu roku przy $VP=5$, czyli 5 stycznia o godzinie 18:00.

Przesunięcie czasowe $DELTA_T$ jest wyznaczane z użyciem generatora Mersenne Twister, inicjalizowanego ziarnem będącym prostą konkatenacją parametrów FP oraz VP , przedstawioną tutaj jako $SEED=0xFA100005$. Generator jest uruchamiany dwukrotnie, ponieważ jest to druga transmisja dla danego ziarna. Wynik działania generatora wynosi $3\ 248\ 757\ 446$ ($0xC1A41AC6$). Wartość wyjściowa jest następnie dzielona na dwie zmienne 16-bitowe: $MT_OUT_L = 6854$ ($1AC6$) oraz $MT_OUT_H = 49572$ ($C1A4$). Okno czasowe przypisane do transmisji $WINDOW_SIZE$ wynosi 1 godzinę, tj. 3600 s. Przesunięcie $DELTA_T$ obliczane jest jako $3600 \cdot 6854/65536 = 376$ s. Wartość $DELTA_T$ jest niezależnie wyznaczana przez $ED1$ oraz przełącznik $R1$. W konsekwencji urządzenie końcowe $ED1$ rozpoczyna drugą transmisję w 5. dniu roku o godzinie 18:06 i 18 sekund, a przełącznik $R1$ nasłuchuje w tym samym czasie. W praktyce przełącznik $R1$ aktywuje odbiornik nieco wcześniej, aby skompensować możliwe odchylenia zegara. Odbiornik jest włączony w oknie czasowym $RXED1R$, $RXED1$.

Numer kanału transmisyjnego $CHANNEL_NO$ jest wyznaczany w ten sam sposób jak przesunięcie czasowe. Do wyboru numeru kanału używana jest zmienna losowa MT_OUT_H . Kanał obliczany jest zgodnie ze wzorem:

$$CHANNEL_NO = \left\lfloor TOTAL_CHANNELS \cdot \frac{MT_OUT_H}{RAND_MAX} \right\rfloor$$

W podanym przykładzie, jeśli dostępne są 2 kanały (nazwiemy je kanałem 0 i kanałem 1), wówczas funkcja zwróci $2 \cdot 49572/65536 = 1$. Oznacza to, że do transmisji zostanie użyty kanał 1.

W tym przykładzie generator liczb pseudolosowych Mersenne Twister jest zasilany ziarnem o długości 32 bitów, będącym prostą konkatenacją numeru seryjnego $SERIAL_NBR$ i numeru dnia. Ziarno oblicza się jako:

$$SEED = (SERIAL_NO \ll 16) + DAY.$$

Generator pseudolosowy jest uruchamiany z określoną liczbą iteracji odpowiadającą liczbie transmisji w jednostce czasu (tutaj: dziennie), aby zwrócić 32-bitową liczbę losową. Następnie 32 bity liczby są dzielone i używane do wygenerowania 16-bitowego selektora kanału oraz 16-bitowego przesunięcia czasowego.

Specyfikacja *LoRaWAN* może definiować w danym regionie lub jurysdykcji jeden lub więcej kanałów przeznaczonych specjalnie do transmisji pomiędzy urządzeniami końcowymi a przełącznikami. Alternatywnie kanały używane do transmisji konwencjonalnej mogą być stosowane — pod warunkiem spełnienia wymogów dotyczących losowości wymaganej od urządzenia końcowego.

W niektórych scenariuszach sieciowych można przewidzieć tylko jeden kanał dostępny i przeznaczony dla retransmisji przez przełącznik. W takim przypadku pula kanałów do wyboru jest efektywnie równa 1 i prowadzi to do deterministycznego zachowania w zakresie wyboru kanału. Konfiguracja ta nadal działa poprawnie, lecz aby uzyskać takie samo prawdopodobieństwo powodzenia komunikacji,

wymagane jest większe `WINDOW_SIZE`, co może być niekorzystne, jeśli dane sensoryczne muszą być transmitowane z większą precyzją czasową.

Przełącznik R1 jest ustawiony w tryb nasłuchiwanie na żądanie przyłączenia `Relay Join Request` w ramach ramek 2042, 2043, z pseudolosowymi przesunięciami oraz czasami wyznaczonymi z użyciem tej samej funkcji na przełączniku R1 i urządzeniu końcowym ED1. Strona nasłuchująca `RXED1R` dla przełącznika `Relay Join Request` jest przesuwana względem kolejnych okien nasłuchu `RXED1`, jeśli urządzenie końcowe ED1 nie było zsynchronizowane przez dłuższy czas. W szczególności, wraz z numerem seryjnym urządzenia końcowego ED1 w danym scenariuszu transmisyjnym i przy braku dostępnego zegara referencyjnego, należy dostarczyć dodatkowe informacje. Wówczas stosowany jest algorytm kompensacji przesunięcia zegara i okna odbioru, opisany w [6].

Następnie w transmisjach określonych przesunięciem czasowym wyznaczonym przy kolejnym przebiegu funkcji `Mersenne Twister`, z użyciem numeru seryjnego i numeru dnia jako ziarna, wykorzystywana jest komunikacja pomiędzy urządzeniem końcowym a przełącznikiem R1. Zamiast nasłuchu ciągłego, przełącznik R1 nasłuchuje tylko w oknach `RXED1R`, `RXED1`, odpowiadających zdefiniowanemu czasom transmisji przesuniętym zgodnie z wartościami obliczonymi przez funkcję `Mersenne Twister`, a transmisje konwencjonalne realizowane są w oknach `RX1`.

W zdefiniowanym czasie transmisji 2043, określonym z użyciem przesunięcia czasowego obliczonego przez funkcję `Mersenne Twister`, w oknie `RXED1` wysyłana jest ramka danych 209 z urządzenia końcowego ED1 do przełącznika R1, a następnie potwierdzana ramką 209A. Kolejna ramka danych 209 jest wysyłana do serwera sieciowego *LoRaWAN* NS1 za pośrednictwem bramki G1. Serwer odpowiada ramką potwierdzenia 209A, która jest odsyłana do urządzenia końcowego ED1 przez bramkę G1 i przełącznik R1. Przełącznik R1 odbiera potwierdzenie w oknie `RX1`, co umożliwia wysłanie ramki danych 209 w kolejnym kroku. Ramka potwierdzenia 209A dociera do urządzenia końcowego ED1 w oknie `RX2`. Opóźnienie okna WD2 odpowiada pierwszej transmisji ramki danych 209.

W kolejnych transmisjach czasy nadawania są wyznaczane z przesunięciem obliczonym zgodnie z funkcją pseudolosową.

W sieci *LoRaWAN* pakiety są retransmitowane, jeśli wymagane jest potwierdzenie, a nie zostało ono odebrane. Urządzenie końcowe ED1 wykrywa utratę łącza, jeśli w określonym czasie nie otrzyma potwierdzenia odbioru w oknie danych `RX1`, rozpoczynając od wcześniej ustalonego okna WD1. W przypadku utraty łącza wykrycie następuje w chwili, gdy brak jest potwierdzenia odbioru następnej transmisji. Kolejną transmisją jest `Relay Join Request`.

Jednocześnie, gdy pakiet danych nie zostaje odebrany, utrata łącza jest wykrywana przez serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1. Kontynuuje on proces wyznaczania przełącznika R1, wybranego zgodnie z informacją o lokalizacji urządzenia końcowego ED1 oraz lokalizacją przełącznika R1.

Istnieje ryzyko, że urządzenie końcowe ED1 oraz serwer sieciowy *LoRaWAN* NS1 mogą wykryć utratę komunikacji w różnych momentach, w szczególności ze względu na opcjonalność używania potwierdzenia pakietu w określonych sieciach i okolicznościach. Niemniej jednak, wykrycie utraty komunikacji jest możliwe w kilku iteracjach. Aby zaradzić temu problemowi, możliwe jest dostosowanie

detekcji utraty łącza i wymuszenie próby transmisji określoną liczbę razy przed przejściem w tryb retransmisji.

Liczba możliwych stanów urządzenia końcowego jest ograniczona i można ją zdefiniować w następujący sposób:

- *Disconnected* – urządzenie nie jest w stanie komunikować się i wciąż wysyła ramkę *Join Request*.
- *Link good* – urządzenie nie obserwuje przerw w komunikacji.
- *Link bad* – stan poprzedzający wykrycie utraty transmisji. Stan ten może być podzielony na wiele podstanów osiąganych przed odnotowaniem utraty transmisji.
- *Relayed* – urządzenie otrzymało *Relay Join Acknowledgement*.
- *Link bad relay* – stan poprzedzający wykrycie utraty retransmisji przełącznikowej. Może być podzielony na wiele podstanów, które są osiągane przed utratą transmisji i w których osiągany jest stan *Disconnected*.
- *Relayed* – transmisja danych jest retransmitowana przez inny przełącznik.
- *Relay* – urządzenie pełni funkcję przełącznika dla innych urządzeń.

5.2.2 Fazy działania mechanizmu

Mechanizm składa się z trzech faz:

1. **Detekcja utraty łączności i wyznaczenie relaya.** *LNS* obserwuje niepowodzenia/timeouty w komunikacji z *ED* i desygnuje *RL* o niskim *Pathloss (PL)* z *ED*. Do *RL* trafia krótka ramka sterująca *RDA (Relay Designation Advice)* zawierająca parametry akcji (zob. 5.2.2).
2. **Aktywacja i uzgodnienie sterowania.** *RL* wysyła do *LNS* ramkę *RJR (Relay Join Request)* i otrzymuje *RJA (Relay Join Accept)* z budżetem czasowym/prób i ewentualnymi parametrami radiowymi. Pozwala to jednoznacznie rozpocząć okna retransmisji i nadać zdarzeniu identyfikator sesji.
3. **Retransmisja deterministyczno-losowa.** W każdym oknie o rozmiarze W relay wyznacza opóźnienie Δt oraz kanał ch na podstawie generatora *Mersenne Twister (MT)* (zob. [89]) zasianego (*a*) parametrem wspólnym v znanym zarówno *ED*, jak i *RL* (np. dzień roku, epoka, znacznik epizodu), oraz (*b*) stałym parametrem unikalnym u_{ED} (np. e_{vEUI} lub numer seryjny *SN*). Relay ponawia uplink *ED* na ch po Δt , aż do sukcesu albo do wyczerpania budżetu prób.

Dobór kanału i opóźnienia czasowego Niech N_{ch} oznacza liczbę kanałów w wydzielonej puli retransmisyjnej, a W — szerokość bieżącego okna czasowego. Niech $MT(\cdot)$ zwraca 32-bitowy wynik z Mersenne Twister, a $RAND_MAX$ — maksymalną wartość tego wyniku znormalizowaną do zakresu $[0, 1)$. Stosujemy dwa kolejne wyjścia generatora:

$$\Delta t = W \cdot \frac{MT_1}{RAND_MAX}, \quad (5.1)$$

$$ch = \left\lfloor N_{ch} \cdot \frac{MT_2}{RAND_MAX} \right\rfloor. \quad (5.2)$$

Ziarno MT budujemy jako konkatencję/hasz ($v \parallel u_{ED}$), zapewniając stały rozkład czasowy jednak z uniezależnieniem od interferencji o stałej strukturze (np. stały zakłócaacz kanału k). Rozkład Δt w $[0, W)$ minimalizuje systematyczne kolizje z transmisjami okresowymi innych węzłów.

Ramki danych i pola protokołu Poniżej przedstawiono logiczne ramki stosowane w procedurze. To nazewnictwo zastępuje numery zdarzeń z rysunków patentowych, zachowując jednoznaczność w pracy naukowej.

- **RDA** — Relay Designation Advice ($LNS \rightarrow RL$ przez GW). Cel: wyznaczenie węzła pośredniego i przekazanie parametrów.
Pola (przykładowe, minimalne): `ED_ID`, `R_ID`, `WindowPlan` (W , liczba okien K , `deadline`), `ChannelSet` (indeksowana pula kanałów dla retransmisji), `MaxAttempts`, `CommonVar v` (np. dzień roku), `ReportingFlag` (czy R ma raportować status po każdej próbie).
- **RJR** — Relay Join Request ($R \rightarrow LNS$ przez GW). Cel: rozpoczęcie kontrolowanej sesji retransmisji.
Pola: `ED_ID`, `R_ID`, `SessionNonce`, `Capabilities` (obsługiwane SF/DR/moc), `MIC`.
- **RJA** — Relay Join Accept ($LNS \rightarrow R$ przez GW). Cel: autoryzacja bądź odmowa oraz konfiguracja sesji.
Pola: `Accept/Reject`, `WindowPlan` (aktualizacja), `ChannelSet`, `MaxAttempts`, `AckPolicy`.
- **UR** — Uplink Relayed ($R \rightarrow LNS$ przez GW). Cel: retransmisja ramki uplink od ED .
Pola: `ED_ID`, `RelayTag` (ID sesji/okna i), `Orig_PhyPayload` (kopia bitowa lub kapsułkowana), `RSSI/SNR_ED@R` (opcjonalnie do diagnostyki).
- **UREP** — Uplink Report ($R \rightarrow LNS$ przez GW). Cel: raport sukcesu/niepowodzenia po oknie.
Pola: `ED_ID`, `R_ID`, `WindowIdx`, `Status` $\in \{\text{ACKed, NoAck, Suppressed}\}$.

5.2.3 Uwagi implementacyjne

- **Pula kanałów:** retransmisja ramek radiowych odbywa się w wydzielonym zbiorze co najmniej 8 kanałów, co pozwala odseparować ruch generowany przez retransmitery od ruchu podstawowego i tym samym zmniejszyć ryzyko wzajemnych zakłóceń.
- **Parametr wspólny:** w najprostszej postaci przyjmuje wartość dnia roku (UTC) lub numeru epoki ustalonego przez LNS w komunikacie RDA . Synchronizacja nie wymaga precyzyjnego zegara, lecz jedynie zgodności w skali minutowej.
- **Bezpieczeństwo:** komunikaty RJR/RJA umożliwiają ograniczenie aktywności do autoryzowanych retransmiterów w określonym horyzoncie czasowym i przestrzennym, natomiast raporty $UREP$ wspierają nadzór oraz diagnostykę.

5.2.4 Podsumowanie

Przedstawiony mechanizm retransmisji wykorzystuje minimalnie inwazyjną warstwę sterującą (RDA/RJR/RJA/UREP) oraz deterministyczno-losowe próbkowanie czasu i częstotliwości. Rozwiązanie to umożliwia efektywne przesyłanie ramek *uplink/downlink* z urządzeń końcowych (*ED*), przy jednoczesnym ograniczeniu kosztu energetycznego węzłów pośredniczących oraz minimalnym wpływie na istniejący ruch w sieci LoRaWAN (klasa A).

- **Zgodność ze LoRaWAN:** mechanizm pozostaje spójny z wymaganiami specyfikacji (klasa A, losowość czasu i kanału, standardowe okna odbioru). Logika retransmisji realizowana jest przez *RL/LNS* bez naruszania podstawowych zachowań *ED*.
- **Równomierny rozkład slotów:** pseudolosowy wybór czasu i kanału w obrębie okna W zapewnia rozkład startów transmisji w $[0, W)$ zbliżony do jednostajnego oraz równy rozkład wyboru kanału, co ogranicza występowanie systematycznych kolizji.
- **Minimalny koszt odbioru po stronie RL:** dzięki wiedzy *RL* o przewidywanych chwilach transmisji *ED* (wspólne ziarno i plan okien) odbiornik *RL* jest aktywowany wyłącznie w wąskich przedziałach (*RXED1R*), co znacząco redukuje współczynnik pracy odbioru i zużycie energii.
- **Ograniczona zajętość medium:** rezygnacja z długich preambułów i klasycznego wybudzania *WOR* na rzecz deterministyczno-losowego planowania oraz wykorzystania podstawowej puli kanałów obniża zajętość medium radiowego i interferencje z ruchem podstawowym.
- **Wymóg znajomości topologii sieci:** skuteczność rozwiązania zależy od wiedzy o relacji *ED-RL* (lokalizacja/pokrycie) utrzymywanej w *LNS*. Niepoprawne odwzorowanie topologii zwiększa ryzyko błędnej desygnacji retransmitera. Mechanizm nie znajduje zastosowania w przypadku węzłów mobilnych, np. w zastosowaniach śledzenia zasobów.
- **Ograniczenia funkcjonalne:** mechanizm nie zapewnia dostarczania komunikatów asynchronicznych (*event-driven*) w dowolnym, nieplanowanym momencie. Ponadto konfiguracja sposobu transmisji (częstotliwości zgłoszeń) powinna być stała i znana po stronie *LNS*.

Rozdział 6

Model symulacyjny retransmisji pakietów

Celem oceny i porównania mechanizmów retransmisji w sieciach LoRa przygotowano dedykowany symulator w środowisku *OMNeT++*. Poniżej przedstawiono założenia, architekturę oraz wybrane założenia projektowe symulatora, ze szczególnym naciskiem na modelowanie fizycznych zjawisk i skuteczność transmisji.

6.1 Uzasadnienie wyboru platformy symulacyjnej

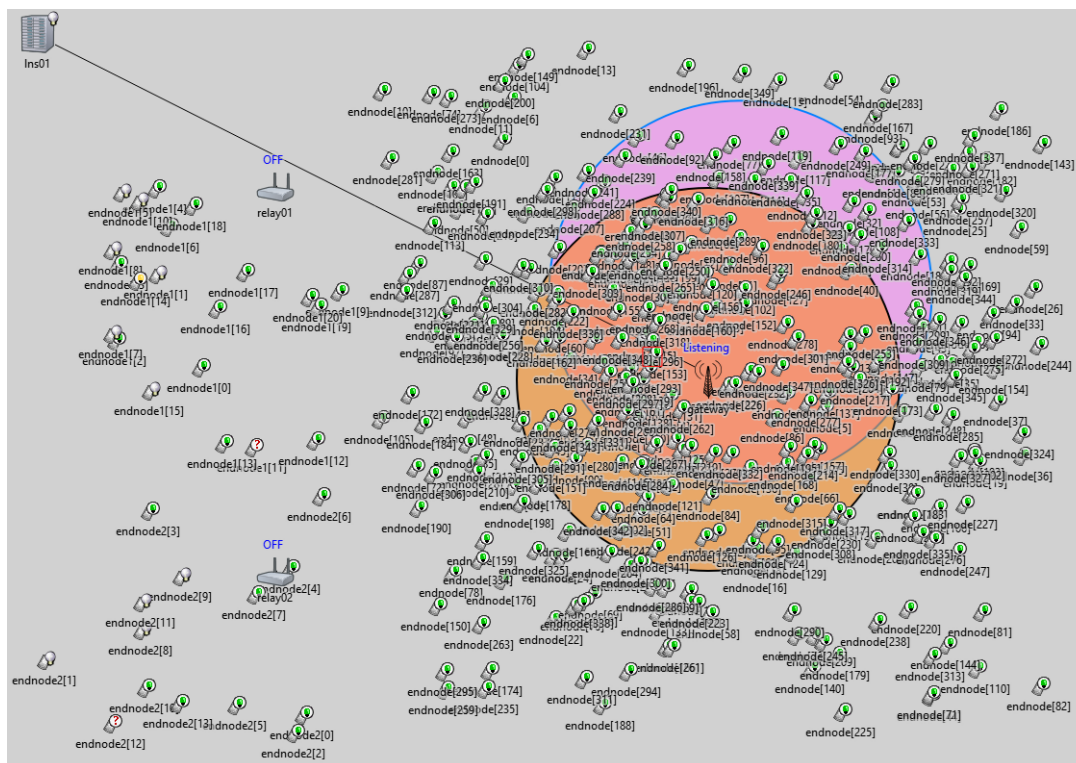
Wybór środowiska *OMNeT++* podyktowany był jego elastycznością oraz możliwością precyzyjnej kontroli nad modułami, warstwami i zdarzeniami. W odróżnieniu od narzędzi takich jak NS-3 (charakteryzujących się silnym związaniem z gotowymi implementacjami protokołów) czy *MATLAB* (pozbawionego natywnego modelu zdarzeń dyskretnych na poziomie pakietów), *OMNeT++* umożliwia wierne odwzorowanie architektury LoRa — od warstwy fizycznej aż po aplikacyjną — a także implementację niestandardowych mechanizmów, takich jak pseudolosowy dobór kanału.

Dodatkowo, możliwość gromadzenia statystyk w czasie rzeczywistym oraz pełna kontrola nad topologią i parametrami radiowymi sprawiają, że *OMNeT++* stanowi jedno z najbardziej wszechstronnych środowisk badawczych do analiz sieci *LPWAN* w kontekście akademickim. Przykładowy widok scenariusza symulacyjnego przedstawiono na rysunku 6.1.

6.2 Model warstwowy i implementacja

W opracowanym symulatorze sieci bezprzewodowej struktura funkcjonalna modułów została oparta na klasycznym modelu referencyjnym *ISO/OSI*. W szczególności zaimplementowano trzy podstawowe warstwy stosu komunikacyjnego po stronie każdego *ED*, *RL* oraz *GW*: warstwę fizyczną (*Physical Layer*), warstwę łącza danych (*Data Link Layer*) oraz warstwę sieciową (*Network Layer*). Dodatkowo, po stronie centralnego punktu sieci (serwera), zaimplementowano uproszczoną warstwę aplikacyjną odpowiedzialną za zarządzanie konfiguracją urządzeń końcowych i akwizycję danych z sieci.

Każda z warstw została odwzorowana w osobnej klasie C++ i stanowi niezależny moduł *OMNeT++*, zgodnie z zasadą enkapsulacji. Komunikacja między warstwami realizowana jest za pomocą interfejs-



Rysunek 6.1: Przykładowy widok symulatora sieci LoRaWAN w środowisku graficznym.

sów zdefiniowanych w środowisku symulacyjnym OMNeT++ — poprzez porty wejściowe i wyjściowe (gates) oraz przekazywanie komunikatów (cMessage).

Wiadomości przesyłane pomiędzy modułami zaimplementowano jako instancje klasy `LoRaPacket`, dziedziczącej po klasie `cMessage`. Rozszerzenie to umożliwia dołączenie do każdego pakietu atrybutów charakterystycznych dla transmisji LoRa, takich jak: *SF*, numer kanału, czas trwania transmisji, typ ramki (*uplink/downlink*) oraz parametry kodowania. Dzięki temu możliwe jest modelowanie właściwości fizycznych sygnału oraz ich wpływu na mechanizmy dostępu do medium i detekcję kolizji.

Do celów ewaluacji wydajności sieci i analizy statystycznej poszczególnych warstw zastosowano mechanizm sygnałów (*signals*) OMNeT++. Rozwiązanie to pozwoliło na bezpośrednią emisję zdarzeń statystycznych (np. liczby pakietów, opóźnień, kolizji) przez niższe warstwy stosu i ich rejestrację w wyższych modułach monitorujących. Należy jednak podkreślić, że taka komunikacja częściowo narusza zasadę pełnej enkapsulacji modelu warstwowego. Z tego względu jej użycie ograniczono wyłącznie do celów pomocniczych, takich jak zbieranie danych statystycznych oraz inicjalizacja parametrów konfiguracji sieci.

Przyjęte podejście umożliwia przejrzyste odwzorowanie architektury protokołów komunikacyjnych i ich współdziałania, zapewniając jednocześnie wysoką elastyczność oraz pełną kontrolę nad przebiegiem symulacji.

6.3 Walidacja symulatora

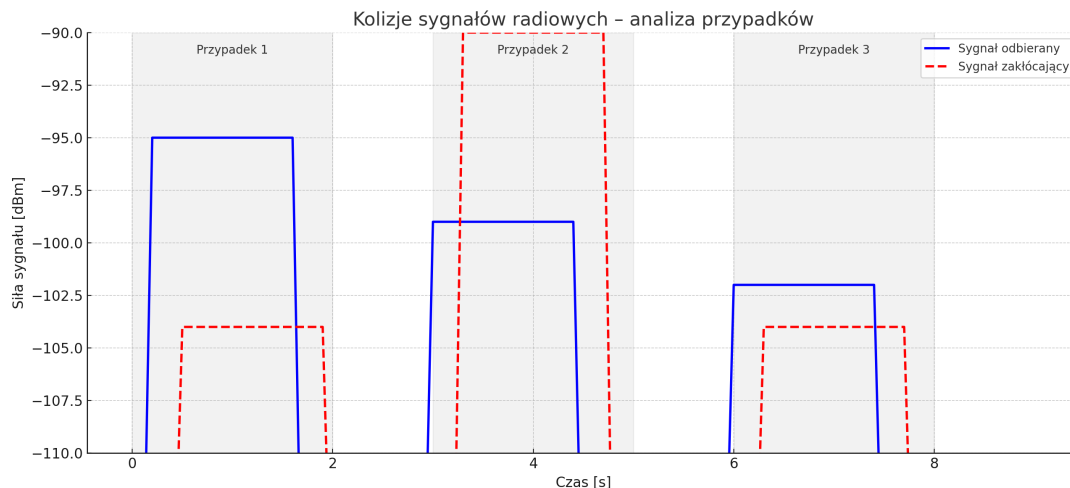
Symulator wykorzystywano do obliczeń masowych w trybie wsadowym (uruchomienie z linii poleceń) w kompilacji `release`. Na potrzeby walidacji przypadków jednostkowych oraz analizy przebiegów udostępnia on również graficzny interfejs użytkownika, umożliwiający wizualizację bieżącego stanu sieci (rys. 6.1), oraz rozbudowane mechanizmy diagnostyczne w kompilacji `debug`. Walidację przeprowadzono na topologiach referencyjnych, dla których możliwe było jednoznaczne przewidzenie zachowania oraz ręczne wyznaczenie wartości oczekiwanych. Dodatkowo, dla wybranych scenariuszy oszacowano niepewność poprzez analizę przedziałów ufności. Przykładowo, w pilotażu ($n = 29$) dla metryki *Daily read success* (*UL*) uzyskano średnią $\bar{X} = 99,29\%$ i odchylenie standardowe $s = 0,09$ p.p., co odpowiada współczynnikowi zmienności $CV \approx 0,09\%$. Dwustronny 95% przedział ufności dla średniej (na podstawie rozkładu t-Studenta, $t_{0,975, 28}$) wynosi $[99,26\%, 99,32\%]$; półszerokość przedziału to ok. 0,034 p.p., co spełnia przyjęte kryterium precyzji $\varepsilon = 0,05$ p.p. Rozkład replik jest wąski i jednomodalny, co potwierdza stabilność tego scenariusza symulacji.

6.4 Model kolizji w warstwie fizycznej

W ramach przeprowadzonych badań szczegółowo przeanalizowano trzy reprezentatywne scenariusze kolizji sygnałów radiowych w kontekście transmisji danych w sieciach LoRa. Scenariusze pochodzą z analizy przedstawionej w publikacji [90]. Dla wszystkich przypadków rozpatrujemy sytuację gdzie odbierany sygnał oraz sygnał interferujący nadawane są na tym samym kanale z użyciem tego samego parametru *SF*. Przypadki te zostały sklasyfikowane na podstawie względnych poziomów mocy sygnałów docierających do odbiornika:

Wszystkie powyższe przypadki zostały uwzględnione w środowisku symulacyjnym modelu warstwy fizycznej komunikacji.

1. **Brak przerwania odbioru *capture*:** Przypadek 1 ilustracji 6.2 - sygnał właściwy jest ≥ 6 dB silniejszy od zakłócającego; ramka dekodowana poprawnie.
2. **Odbiór sygnału zakłócającego :** Przypadek 2 ilustracji 6.2 - w trakcie odbioru pojawia się o ≥ 6 dB silniejsza transmisja; odbiornik przełącza się na nową ramkę.
3. **Zakłócenie wzajemne:** Przypadek 3 ilustracji 6.2 - poziomy mocy są porównywalne; brak dekodacji obu ramek.



Rysunek 6.2: Scenariusze kolizji: capture, preempcja i zakłócenie wzajemne

6.5 Statyczny model propagacji sygnału

W literaturze naukowej opisano szereg modeli propagacyjnych, obejmujących zarówno uwarunkowania statyczne [91, 92], jak i dynamiczne środowiska transmisyjne. W ostatnich latach rozwijane są także podejścia wykorzystujące techniki sztucznej inteligencji [93], umożliwiające adaptację modelu do zmiennego typu zabudowy oraz złożonych warunków terenowych.

Zagadnienie modelowania propagacji fal radiowych ma kluczowe znaczenie w kontekście projektowania infrastruktury sieciowej, analizy topologii oraz optymalizacji rozmieszczenia punktów dostępowych i urządzeń pośredniczących. W literaturze szeroko opisano liczne modele propagacyjne, takie jak modele empiryczne (np. [91, 94]) czy rozwiązania oparte na sztucznej inteligencji.

Należy jednak podkreślić, że w kontekście analizowanego w niniejszej pracy mechanizmu retransmisji szczegółowe modelowanie propagacji fal radiowych nie odgrywa zasadniczej roli. Model retransmisji powinien uwzględniać sieć w jej rzeczywistym kształcie i nie zakłada możliwości zmiany lokalizacji punktów dostępowych ani innych działań wymagających szczegółowej wiedzy o statycznej propagacji sygnału. Symulacje zostały oparte na odwzorowaniu rzeczywistej topologii sieci, co wymagało jedynie implementacji wybranego, reprezentatywnego modelu propagacyjnego, a nie rozwijania złożonych podejść adaptacyjnych. Z tego względu w badaniach zastosowano stosunkowo prosty model, opracowany przeze mnie i współautorów i szczegółowo opisany w publikacji [5]. Statyczny model propagacji został określony następująco:

$$PL(x) = a + 10 \beta \log_{10}(x), \quad a = 127.3, \beta = -1.9, \quad (6.1)$$

gdzie: $PL(x)$ – tłumienie ścieżki [dB]; x – odległość [km]; a – wyraz wolny dopasowania (127.3); β – współczynnik nachylenia (-1.9).

6.6 Dynamiczny model propagacji sygnału

W przeciwieństwie do modelowania propagacji w warunkach statycznych, dynamiczne zmiany *PL* pomiędzy urządzeniami sieci mają istotny wpływ na działanie mechanizmu retransmisji. Znaczenie ma zarówno bezpośrednia komunikacja pomiędzy *ED* a *GW* — jej utrata inicjuje bowiem mechanizm de-sygnacji *RL* i uruchomienie retransmisji — jak również łączność pomiędzy *RL* a *GW*, której przerwanie skutkuje utratą dostępu wszystkich *ED* znajdujących się na liście retransmisji danego *RL*. Ze względu na istotność tego zagadnienia poniżej przedstawiono szczegółową analizę możliwości zastosowania generatywnych sztucznych sieci neuronowych w celu symulacji zmian propagacyjnych w środowisku symulacji zdarzeń dyskretnych. Pełne opracowanie zostanie opublikowane w [1]. W dalszej części pracy przytoczono kompletne tłumaczenie tej publikacji na język polski.

6.6.1 Zmienność warunków propagacji

Tłumienność toru radiowego, poza statycznymi parametrami takimi jak odległość, częstotliwość nośna sygnału czy wysokość instalacji nadajnika i odbiornika, zależy również od czynników zmiennych w czasie, w tym m.in.:

1. **Zmiany klimatyczne i sezonowe** — zimne i suche powietrze powoduje zwykle mniejsze tłumienie niż gorące i wilgotne; parametry te wykazują istotną zmienność sezonową [95].
2. **Stan wegetacji roślin** — każda przeszkoda na drodze sygnału generuje dodatkowe tłumienie. Wykazano, że roślinność może powodować sezonowe różnice tłumienia rzędu kilku dB, co potwierdzają wyniki przedstawione w [96].
3. **Interakcje antropogeniczne** — w gęsto zaludnionych obszarach obecność dużych obiektów, takich jak samochody, śmieciarki czy kontenery, może również wpływać na poziom strat sygnału.

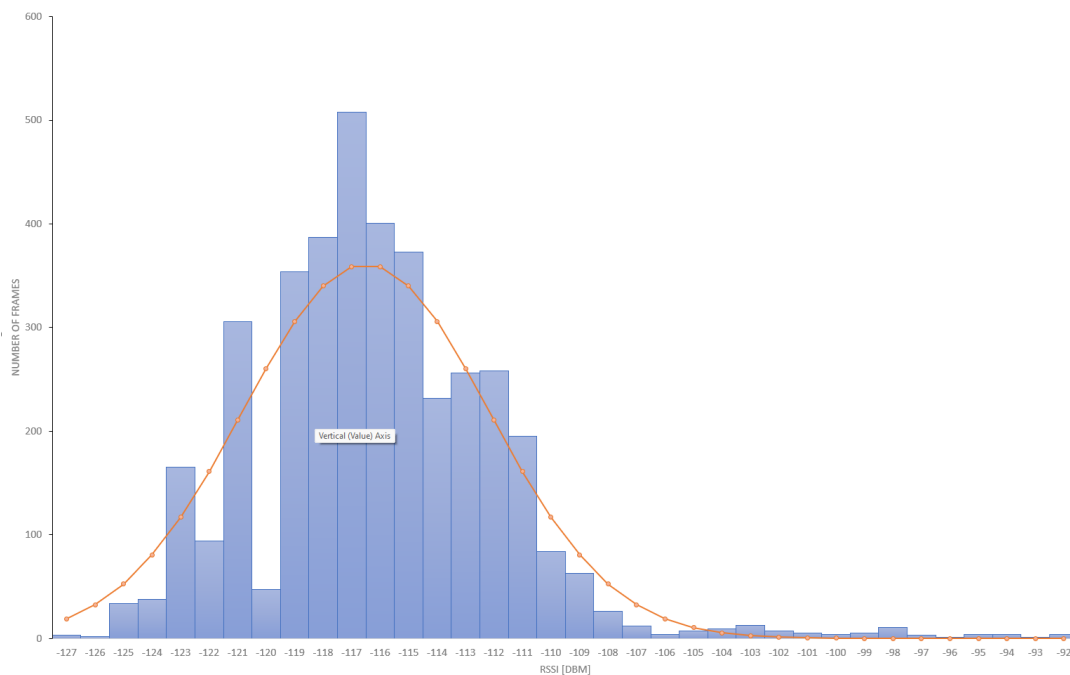
Powyższe zjawiska powinny być również uwzględnione w symulatorze zdarzeń dyskretnych, aby lepiej odzwierciedlać rzeczywistą sytuację. Ze względu na złożoność problemu oraz wielość czynników wpływających na chwilowe wahania *PL*, do modelowania tego zjawiska zastosowano generatywny model *Artificial Intelligence (AI)* oparty na sztucznej sieci neuronowej.

W niniejszym rozdziale analizowane są dane z rzeczywistej sieci LoRaWAN wdrożonej w systemie inteligentnego opomiarowania wody, obejmującym ponad 6000 punktów końcowych. Zbiór danych obejmuje okres ponad sześciu lat (2018–2024).

Celem analizy jest weryfikacja, czy sztuczne sieci neuronowe (*Artificial Neural Network (ANN)*), trenowane na danych pochodzących z sieci eksploatacyjnej, mogą generować syntetyczne szeregi *RSSI* (lub równoważnie wartości tłumienia) o właściwościach statystycznych i dynamicznych bardziej zbliżonych do danych rzeczywistych niż w przypadku klasycznych generatorów opartych na rozkładach prawdopodobieństwa dopasowanych *ex post*.

6.6.2 Dane i dopasowanie rozkładów

Rysunek 6.3 przedstawia rozkład wartości *RSSI* rejestrowanych przez jedno z urządzeń końcowych w trakcie wieloletniej eksploatacji sieci w latach 2018–2023. Słupki reprezentują histogram (skala dBm), natomiast linia ciągła przedstawia dopasowany rozkład normalny. Parametry średniej i odchylenia standardowego dobrze odwzorowują podstawowe cechy rozkładu, lecz nie oddają w pełni obecności długiego ogona ani epizodów anormalnych. W analizowanym przykładzie średnia wartość *RSSI* wynosi około -116.5 dBm, a odchylenie standardowe $\approx 4,41$ dB. Dopasowanie rozkładu Gaussa jest przydatne do modelowania statycznej części kanału, jednak nie uwzględnia sezonowości, epizodycznych przeszkód ani skokowych zmian sygnału obserwowanych w danych empirycznych.



Rysunek 6.3: Histogram *RSSI* oraz jego dopasowanie funkcją rozkładu normalnego dla wybranego węzła.

6.6.3 Założenia modelu generatywnego

W celu odwzorowania brakujących cech danych, bez konieczności jawnego modelowania wszystkich czynników środowiskowych, zastosowano model sekwencyjny *ANN* zaimplementowany w bibliotece *TensorFlow*. Wejściami modelu były: (i) znormalizowana wartość *RSSI* obserwowana w bramie oraz (ii) reprezentacja czasu w roku, wyrażona w postaci funkcji sinusoidalnej dnia roku (znormalizowanego względem 365), co umożliwiało uchwycenie sezonowości.

Model składał się z trzech warstw gęstych, a jako miary oceny jakości dopasowania zastosowano błąd średniobezwzględny (*Mean Absolute Error (MAE)*) oraz błąd średniokwadratowy (*Mean Squared Error (MSE)*). Dane z lat 2018–2023 wykorzystano do procesu uczenia, walidacji i testowania, natomiast rok 2024 przeznaczono na niezależną weryfikację poprawności działania modelu.

Wytrenowana sieć generowała 365 próbek wartości *RSSI* dla jednego roku (po jednej próbce na dzień). Procedurę generacji powtarzano wielokrotnie w celu oceny stabilności i oszacowania niepewności wyników.

6.6.4 Ujęcie statystyczne i metryki błędu

W ocenie jakości generatorów (ANN vs. rozkład normalny) wykorzystano błąd średniokwadratowy *MSE*:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - G_i)^2, \quad (6.2)$$

gdzie R_i to zmierzone *RSSI* (zbiór walidacyjny), G_i – wygenerowane. Dodatkowo, do porównania rozkładów stosujemy wariant dla histogramów:

$$MSE_D = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (C_r(k) - C_g(k))^2, \quad (6.3)$$

gdzie $C_r(k)$ i $C_g(k)$ oznaczają liczby próbek w k -tym przedziale (rzeczywiste vs. generowane), a K – liczba przedziałów.

6.6.5 Porównanie błędów średniokwadratowych na próbkach dobowych

Każdy z wariantów generatora został uruchomiony dziesięciokrotnie. Tabela 6.1 przedstawia przykładowe wartości błędu średniokwadratowego MSE_V dla modeli ANN oraz dla dopasowania rozkładem normalnym, natomiast Tabela 6.2 zawiera wartości MSE_D uzyskane w porównaniu histogramów.

Tabela 6.1: Błąd średnio-kwadratowy generowanych wartości dla modeli: ANN vs. normalny (10 uruchomień, 365 próbek)

# run	MSE (ANN)	MSE (Normalny)
1	31,93	33,26
2	45,00	34,07
3	42,73	36,49
4	45,01	34,64
5	53,51	33,91
6	30,24	36,75
7	35,21	32,38
8	58,12	37,28
9	30,24	34,10
10	35,21	36,55
Średnio	40,72	34,94

6.6.6 Zmienność czasowa i anomalie

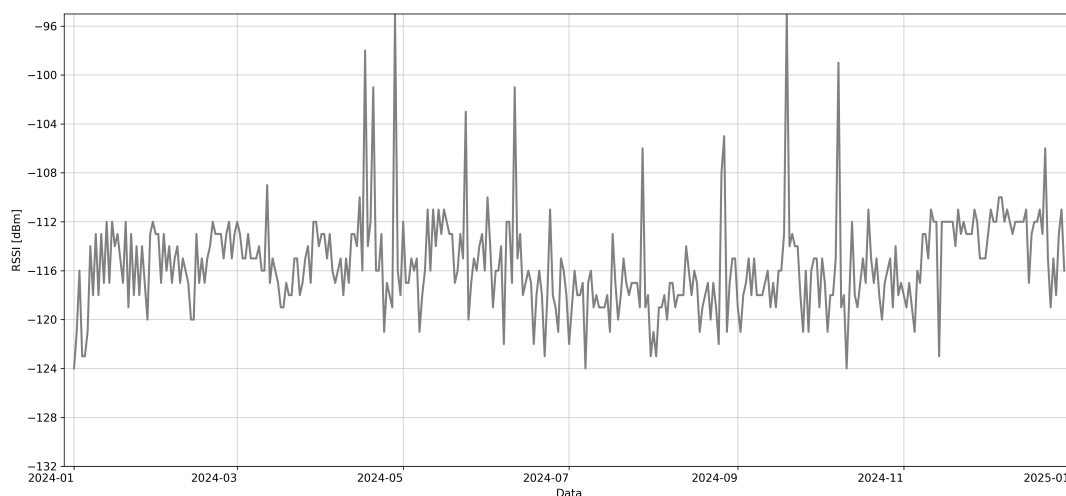
Rysunki 6.4–6.6 przedstawiają przykładowe szeregi czasowe *RSSI*: dane rzeczywiste, dane syntetyczne wygenerowane przy użyciu ANN oraz dane syntetyczne uzyskane z generatora opartego na rozkładzie

Tabela 6.2: Błąd średnio-kwadratowy generowanych rozkładów dla modeli: ANN vs. normalny (10 uruchomień, 365 próbek)

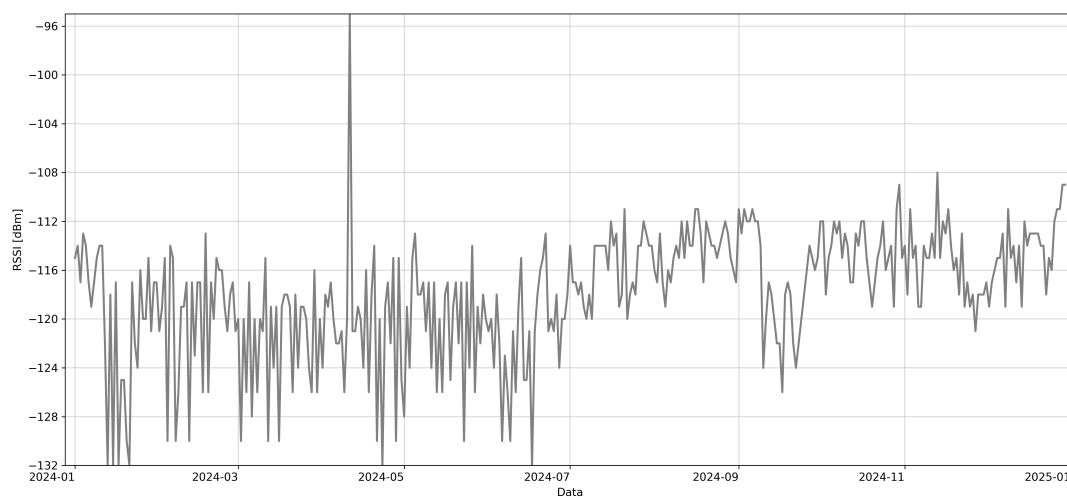
# run	MSE_D (ANN)	MSE_D (Normalny)
1	89,24	122,93
2	144,76	80,68
3	205,48	81,16
4	140,00	84,04
5	145,24	117,96
6	171,44	108,44
7	161,12	97,64
8	145,24	93,48
9	171,44	85,36
10	161,12	88,00
Średnio	153,51	95,97

normalnym. W obserwacjach rzeczywistych, a także w sekwencjach generowanych przez ANN, widoczne są: (i) zmienność sezonowa oraz (ii) epizody pogorszenia lub poprawy jakości łącza, które można interpretować w kategoriach dwustanowego łańcucha Markowa (model Gilberta–Elliotta [97]) z wyróżnionymi stanami *normalnym* i *ograniczonym*. Generator oparty na stałym rozkładzie nie odzwierciedla tego efektu w sposób naturalny.

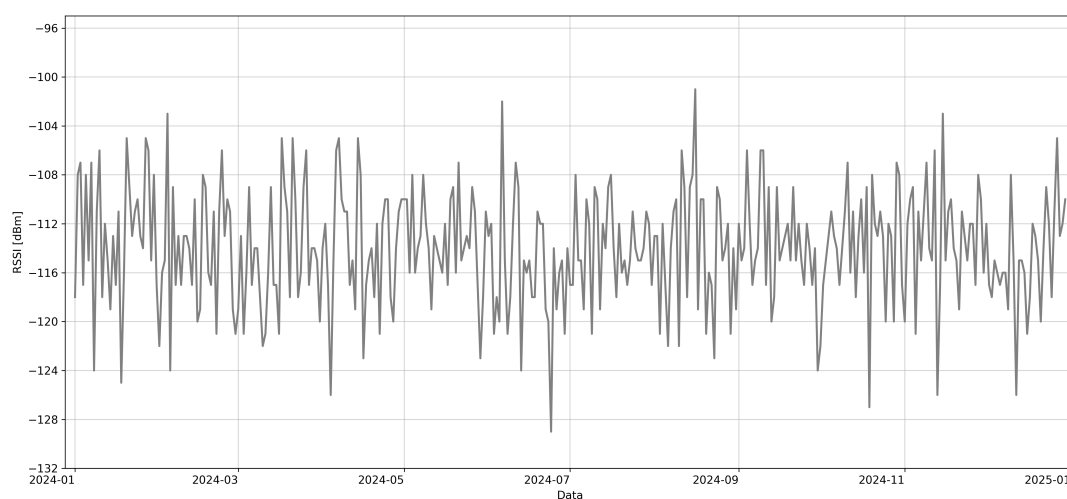
Ponadto w danych eksploatacyjnych obserwuje się artefakty wynikające z działania algorytmu estymacji wartości RSSI w bramie (np. rzadziej pojawiające się charakterystyczne poziomy, takie jak -120 dBm). Model ANN jest w stanie je odtworzyć, w przeciwieństwie do generatora bazującego na dopasowanym rozkładzie.



Rysunek 6.4: Zmienność RSSI w danych rzeczywistych (rok 2024).



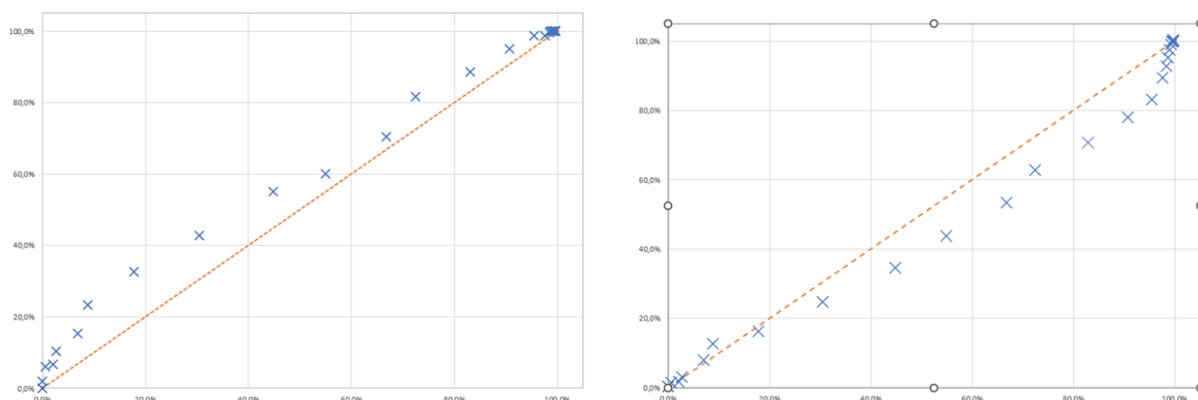
Rysunek 6.5: Zmienność RSSI – dane syntetyczne generowane przez model generatywny



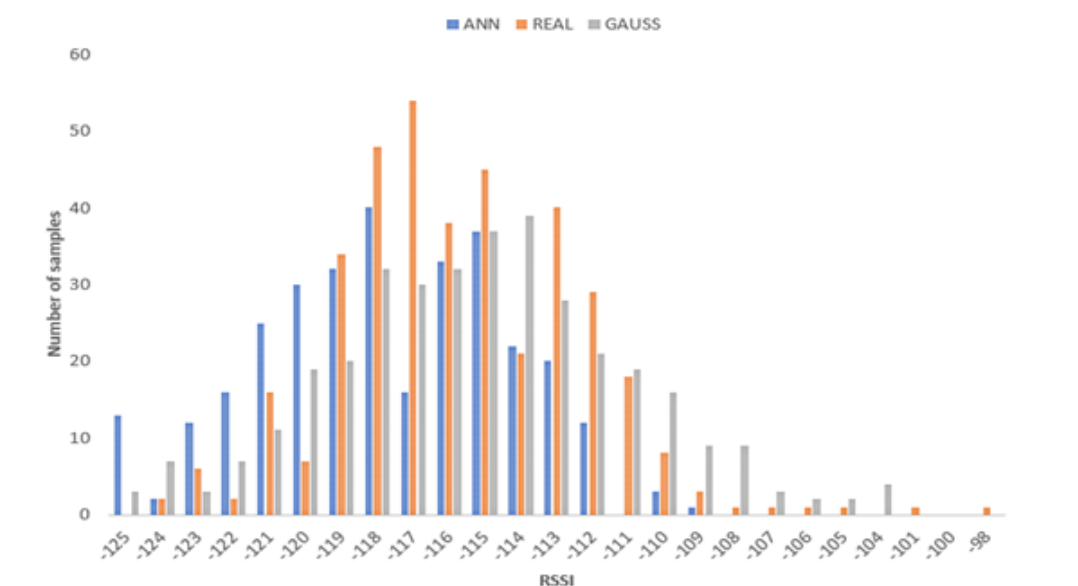
Rysunek 6.6: Zmienność RSSI – dane syntetyczne generowane przez model z rozkładu normalnego

6.6.7 Zgodność rozkładów i wykresy kwantyl-kwantyl

Rysunki 6.7 pokazują porównania *Quantile–Quantile (Q–Q)* (syntetyczne vs rzeczywiste). Obie metody wykazują silną korelację rozkładów, przy czym generator oparty na stałym rozkładzie nieco lepiej odwzorowuje rozkład globalny, natomiast ANN lepiej oddaje struktury lokalne i epizodyczne.



Rysunek 6.7: Wykresy Q–Q: porównanie danych rzeczywistych z danymi syntetycznymi. Lewy wykres dla generatora ANN prawy dla rozkładu normalnego.



Rysunek 6.8: Zestawienie wyników modeli (ANN i rozkład) względem danych rzeczywistych w ujęciu rocznym

6.6.8 Dyskusja i wnioski

Analizy wskazują, że *średnio* klasyczne dopasowanie rozkładu lepiej odwzorowuje statystykę globalną (niższe wartości MSE_D), natomiast modele ANN trafniej reprezentują dynamikę sygnału, sezonowość oraz epizodyczne zdarzenia (lepsza interpretacja w kategoriach łańcucha Gilberta–Elliotta). W kontekście symulatorów zdarzeń dyskretnych, które wymagają realizmu czasowego, a nie wyłącznie popraw-

ności rozkładów, generatory oparte na *ANN* mogą znacząco poprawić wierność odwzorowania kanału radiowego, przy zachowaniu akceptowalnej zgodności funkcji gęstości. Sztuczne sieci neuronowe mogą zatem pełnić rolę generatorów danych o tłumieniu radiowym w symulatorach sieci *LPWAN*. Modele *ANN*, trenowane na wieloletnich danych z rzeczywistych wdrożeń *LoRaWAN*, są w stanie odtwarzać zarówno globalne własności rozkładu, jak i charakterystyczne wzorce czasowe, w tym zmienność sezonową oraz epizody krótkotrwałych zakłóceń. Choć proces uczenia wymaga znacznych zasobów obliczeniowych i obszernych zbiorów danych, generowanie kolejnych próbek jest obliczeniowo tanie i umożliwia realistyczne scenariusze symulacyjne bez konieczności jawnego modelowania wszystkich czynników środowiskowych.

6.7 Autentykacja w sieci

Autentykacja urządzeń w sieci *LoRaWAN* może odbywać się w trybie *ABP* lub *Over-The-Air Activation (OTAA)*. Różnice pomiędzy tymi metodami pod względem wolumenu przesyłanych danych w procesie rejestracji są nieznaczne. Proces ten jest w pełni transparentny z perspektywy urządzeń pośredniczących (retransmiterów), dlatego w niniejszej analizie nie oceniano wpływu rodzaju autentykacji na ich funkcjonowanie.

W przeprowadzonych symulacjach zastosowano autentykację typu *OTAA*, powszechniej wykorzystywaną ze względu na wyższy poziom bezpieczeństwa. Mechanizm ten generuje dynamiczne klucze sesyjne w procesie dołączenia do sieci, co znacząco ogranicza ryzyko przechwycenia i późniejszego wykorzystania danych uwierzytelniających. W przeciwieństwie do tego w trybie *ABP* klucze sesyjne są stałe, a tym samym bardziej podatne na ataki powtórzeniowe (*replay attacks*) lub kompromitację urządzenia. Dodatkowym atutem mechanizmu *OTAA* jest możliwość okresowej reautentykacji, co zwiększa odporność systemu na zagrożenia związane z bezpieczeństwem.

6.8 Model synchronizacji zegarów oraz okien nasłuchu

Znaczenie ścisłej synchronizacji. W mechanizmach retransmisji kluczowe jest możliwie dokładne zsynchronizowanie zegarów węzła źródłowego (nadającego) i urządzenia pośredniczącego (retransmitującego). Umożliwia to: (i) precyzyjne uaktywnienie nasłuchu odbiornika w chwili spodziewanego rozpoczęcia transmisji, (ii) ograniczenie strat energetycznych wynikających z konieczności poszerzania okna nasłuchu (czas przebywania w stanie RX ma istotny udział w bilansie energii) oraz (iii) zwiększenie prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu poprzez eliminację sytuacji, w której odbiornik nie był aktywny w momencie rozpoczęcia ramki. Zagadnienie predykcji czasu nadawania i minimalizacji energii odbioru zostało szeroko opisane na wielu płaszczyznach w [98].

Ograniczenia synchronizacji. Idealna synchronizacja nie jest osiągalna, gdyż zegary węzłów są realizowane na bazie rezonatorów kwarcowych o niezerowej tolerancji w temperaturze odniesienia (typowo $\pm 20 \dots \pm 50$ ppm przy 25°C), parabolicznej zależności częstotliwości od temperatury (współczynnik

rzędu $0,04 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}^2$), a także starzenia (rzędu kilku ppm/rok) [99]. Zależność częstotliwości od temperatury dla kryształów $32,768 \text{ kHz}$ dobrze aproksymuje funkcja paraboliczna względem temperatury z punktem przegięcia w okolicy 25°C .

Składowe błędy i zakresy przyjęte w modelu. Rozpatrujemy trzy składowe:

- **rozrzut produkcyjny** (tolerancja przy 25°C , typ. $\pm 20 \text{ ppm}$),
- **dryft temperaturowy** (parabola z współczynnikiem ok. $-0,04 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}^2$),
- **starzenie** (ok. $\pm 3 \text{ ppm/rok}$ w pierwszym roku).

W praktyce składową starzeniową ograniczamy metodami uczenia czasów nadawania (estymacja i korekcja offsetu między synchronizacjami). Dodatkowo, na etapie produkcji każda sztuka urządzenia jest poddawana jednorazowej kalibracji częstotliwości, co redukuje statyczny błąd wynikający z rozrzutu produkcyjnego i ułatwia długoterminową kompensację [99].

Uwagi o TCXO – stabilność a koszty energetyczne i wytworzenia. Oscylatory kompensowane temperaturowo (*Temperature Compensated Crystal Oscillator (TCXO)*) zapewniają znacznie lepszą stabilność częstotliwości (rzędu $\leq \pm 2 \dots \pm 2,5 \text{ ppm}$ w szerokim zakresie temperatur), jednak wiążą się ze zwiększonym poborem mocy i wyższym kosztem materiałowym, a zatem całkowitym kosztem wytworzenia. Typowe prądy zasilania *TCXO* mieszczą się w przedziale około $1,5\text{--}2,5 \text{ mA}$ [100, 101]. Dla porównania, obwód oscylatora zegarkowego $32,768 \text{ kHz}$ w mikrokontrolerach klasy ultralowpower pobiera zwykle mniej niż $2 \mu\text{A}$ (często $< 1 \mu\text{A}$) [102], a zatem rząd wielkości $\sim 1000\times$ mniej niż *TCXO*. W systemach bateryjnych (np. smart metering) różnica ta w oczywisty sposób eliminuje możliwość ich użycia.

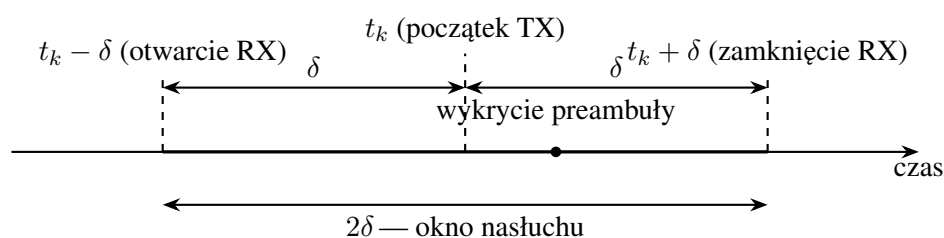
Założenie projektowe – asymetria środowisk i różnica częstotliwości. Analizujemy wariant niekorzystny: węzeł końcowy będący licznikiem zużycia wody zainstalowany wewnątrz budynku (np. 25st), podczas gdy urządzenie pośredniczące pracuje na zewnątrz (niska temperatura). Aby utrzymać zużycie energii na akceptowalnym poziomie przy zachowaniu wysokiego prawdopodobieństwa odbioru, przyjmujemy limit względnej różnicy częstotliwości między dwoma zegarami:

$$\Delta f_{\text{rel,max}} = 40 \text{ ppm}.$$

Reguła wyznaczania okna nasłuchu. Niech t_k oznacza nominalny czas rozpoczęcia k -tej ramki nadajnika mierzony zegarem odbiornika bezpośrednio po ostatniej synchronizacji, a Δt_k czas od tej synchronizacji. Maksymalny błąd czasowania wynikający z przyjętej różnicy częstotliwości $\Delta f_{\text{rel,max}}$ (w ppm) wynosi

$$\delta(\Delta t_k) = \Delta f_{\text{rel,max}} \cdot 10^{-6} \cdot \Delta t_k.$$

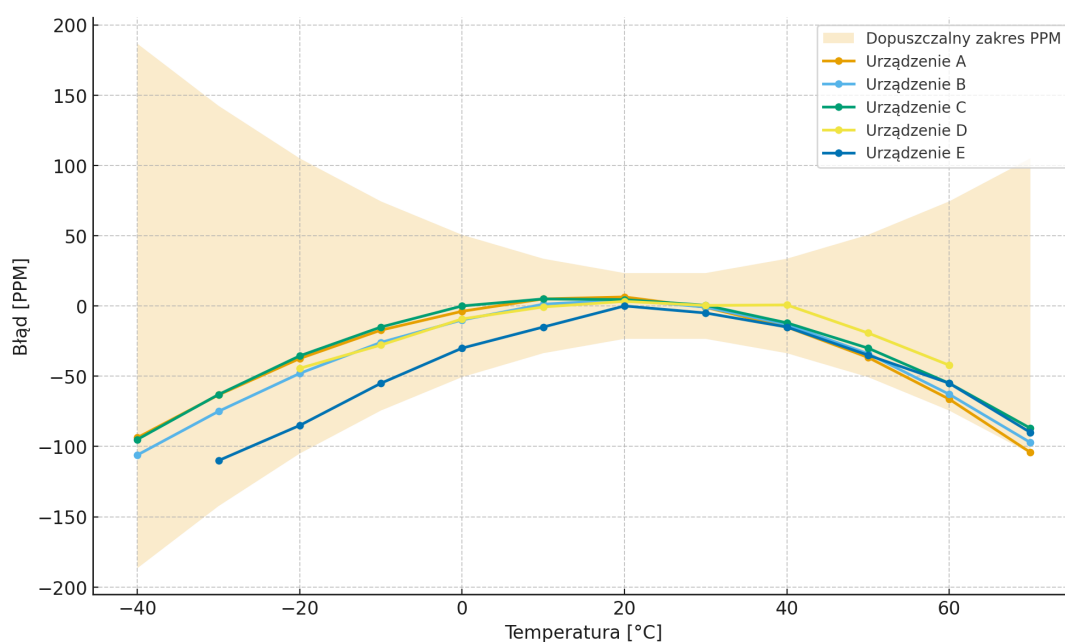
Odbiornik otwiera okno nasłuchu w przedziale $[t_k - \delta(\Delta t_k), t_k + \delta(\Delta t_k)]$ i zamyka je po upływie $2\delta(\Delta t_k)$, jeśli nie wykryje preambuły. Dla typowego w naszych zastosowaniach odstępu między synchronizacjami $\Delta t_k = 12 \text{ h}$ (43200 s) oraz $\Delta f_{\text{rel,max}} = 40 \text{ ppm}$, uzyskujemy $\delta = 1,728 \text{ s}$ (okno o szerokości $2\delta = 3,456 \text{ s}$).



Rysunek 6.9: Harmonogram okna nasłuchu z uwzględnieniem dryftu zegara czasu rzeczywistego.

Implementacja w symulatorze. Mechanizm został zaimplementowany jako reguła doboru okna nasłuchu zależna od Δt_k i parametru $\Delta f_{\text{rel,max}}$. Wykrycie preambuły wewnątrz okna skutkuje aktualizacją zapisanej wartości offsetu *RTC* nadajnika; w przeciwnym wypadku ramka jest klasyfikowana jako utracona a szerokość okna odpowiednio powiększana. Dokładną metodą synchronizacji zegarów została przedstawiona przeze mnie i współautorów w publikacji [6]. Dla przejrzystości przedstawiony jest schemat czasu otwarcia okna nasłuchu (Rys. 6.9).

Weryfikacja dryftu w komorze klimatycznej. Na rysunku 6.10 przedstawiono rzeczywistą niedokładność pracy *RTC* dla przykładowych urządzeń monitorujących zużycie medium. W badanych konstrukcjach zastosowano rezonatory firmy NDK, model NX2012SA. Eksperymenty przeprowadzono w komorze klimatycznej. Każda z temperatur była utrzymywana przez jedną godzinę, co stanowiło czas wystarczający do stabilizacji wewnętrznej temperatury urządzenia. Ze względu na ograniczenia projektowe nie wszystkie urządzenia mogły zostać przetestowane w pełnym zakresie temperaturowym.



Rysunek 6.10: Zmierzona niedokładność pracy zegara czasu rzeczywistego dla wybranych urządzeń bateryjnych. Pomiary własne.

Mechanizm kompensacji. Nie stosuje się kompensacji temperaturowej opartej na ciągłym pomiarze temperatury z dwóch powodów. Po pierwsze, okresowe wybudzanie układu, wykonanie pomiaru temperatury oraz wyznaczanie nowych parametrów kalibracyjnych generuje dodatkowy koszt energetyczny [103]. Po drugie, skuteczna kompensacja wymaga kalibracji co najmniej w dwóch punktach temperaturowych w celu dopasowania charakterystyki parabolicznej kryształu [104], co w praktyce oznacza konieczność wykorzystania komory temperaturowej w procesie produkcji i istotne podniesienie jego kosztu.

W nowszych konstrukcjach urządzeń opartych na transceiverze radiowym LoRa ze zintegrowanym mikrokontrolerem (STM32WL) stosowana jest synchronizacja zegara *RTC* względem zegara wysokiej częstotliwości wykorzystywanego przez tor radiowy (typowo 32 MHz). Ponieważ zegar wysokiej częstotliwości jest aktywowany wyłącznie na czas pracy radia, może być realizowany jako *TCXO* bez istotnego wpływu na bilans energetyczny w trybach uśpienia. Mechanizm ten dostępny jest jednak wyłącznie w nowych urządzeniach i realizowany jedynie podczas aktywności toru radiowego, co w praktyce ogranicza liczbę synchronizacji do 2–4 na dobę.

Podsumowanie. Przedstawiony model synchronizacji zegarów łączy rzeczywiste ograniczenia oscylatorów kwarcowych (rozrzut produkcyjny, wpływ temperatury, starzenie) z regułą określającą długość okna nasłuchu w zależności od czasu, jaki upłynął od ostatniej synchronizacji. Implementacja w symulatorze umożliwia bezpośrednie badanie wpływu dryftu na działanie sieci (szerokość okna RX, zużycie energii), przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu. Dokładną metodę synchronizacji zegarów przedstawiono w [6].

Należy podkreślić, że opisane ograniczenie ma charakter implementacyjny — w przyszłości można oczekiwać wzrostu dokładności odmierzania czasu, na przykład dzięki zastosowaniu generatorów opartych na technologii MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*).

6.9 Założenia modelu dotyczące parametrów transmisji

W badanych sieciach klasy *Smart City*, stosowanych do zdalnego odczytu liczników mediów, transmisja danych odbywa się w cyklach dobowych. Liczniki przesyłają informacje o zużyciu w postaci skompresowanych archiwów godzinowych. Moment tzw. *zatrzaśnięcia* danych jest zależny od rodzaju medium: w przypadku liczników wody przypada on zazwyczaj o północy, natomiast w licznikach gazu jest synchronizowany z tzw. dobą gazowniczą, która w warunkach polskich rozpoczyna się o godzinie 6:00 rano.

Po wykonaniu zatrzaśnięcia doby urządzenie końcowe, w ciągu kolejnych 24 godzin, transmituje identyczny zestaw danych, niezależnie od tego, czy skonfigurowane jest do jednej, dwóch, czy czterech transmisji dziennie. W konsekwencji, dla zapewnienia poprawnej akwizycji danych, wystarczające jest odebranie co najmniej jednej poprawnej ramki w ciągu doby. W sytuacjach, gdy w danym dniu odebranych zostanie wiele ramek, nadmiarowe dane są eliminowane przez warstwę aplikacyjną serwera.

Należy podkreślić, że w warstwie sieciowej nie istnieją natywne mechanizmy dyskryminacji duplikatów. Podobnie, węzeł pośredniczący (retransmitter) nie dysponuje podstawami decyzyjnymi po-

zwalającymi na zaniechanie retransmisji którejkolwiek z ramek, co wynika z jego roli jako elementu transparentnie przekazującego pakiety w ramach infrastruktury *LoRaWAN*.

Niech D oznacza okres dobowy. Każde urządzenie końcowe ED_i generuje zestaw ramek:

$$F_i = \{f_{i,1}, f_{i,2}, \dots, f_{i,n_i}\}, \quad f_{i,j} \in D, \quad (6.4)$$

gdzie $n_i \in \{1, 2, 4\}$ oznacza liczbę zaplanowanych transmisji na dobę.

Niech $R_i \subseteq F_i$ oznacza zbiór ramek poprawnie odebranych przez *LNS*.

Kryterium sukcesu akwizycji Sukces akwizycji danych dla urządzenia ED_i w dobie D zachodzi wtedy, gdy:

$$|R_i| \geq 1, \quad (6.5)$$

tj. co najmniej jedna ramka została dostarczona.

Metryka skuteczności akwizycji (Packet Acquisition Ratio, PAR) Dla pojedynczego urządzenia:

$$\text{PAR}_i = \begin{cases} 1, & \text{jeśli } |R_i| \geq 1, \\ 0, & \text{w przeciwnym razie.} \end{cases} \quad (6.6)$$

Średnia skuteczność dla całej populacji urządzeń N :

$$\text{PAR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{PAR}_i. \quad (6.7)$$

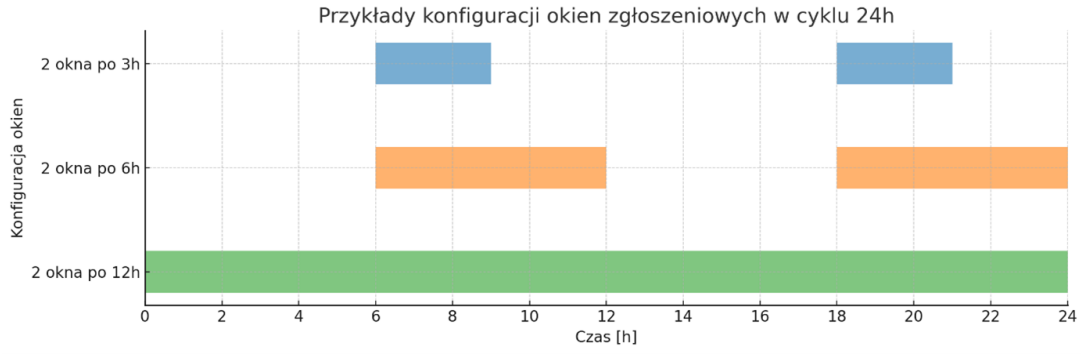
co odzwierciedla fakt, że do poprawnej akwizycji wystarcza co najmniej jedna ramka na dobę, nawet przy dużej stratności pakietów.

Komunikacja w badanej sieci realizowana jest w ramach zdefiniowanych okien zgłoszeniowych. Czas ich trwania zależy od wymagań biznesowych, w szczególności od dopuszczalnego opóźnienia w dostarczeniu danych po zakończeniu cyklu dobowego, a także od rozległości i topologii sieci. Urządzenia końcowe konfigurowane są do pracy w oknach trwających od 3 do 12 godzin (co przedstawia rys. 6.11). W każdym z okien transmisyjnych każde urządzenie generuje jedną ramkę radiową. W typowych wdrożeniach stosuje się dwa lub cztery takie okna w ciągu doby.

Żądanie potwierdzenia ramek uplink

Urządzenie końcowe może wymusić przesłanie potwierdzenia *ACK* na wysłaną ramkę *uplink*. Taka komunikacja zwrotna stanowi podstawę działania mechanizmu *ADR* (omówionego w rozdziale 3.2.2) oraz umożliwia detekcję sytuacji, w której urządzenie znajduje się poza zasięgiem sieci. Z tego względu pożądane jest, aby potwierdzenia były wysyłane możliwie często.

Nadmierna liczba ramek *ACK* prowadzi jednak do wyraźnego pogorszenia prawdopodobieństwa dostarczenia ramek w kanale *uplink*. Wynika to z faktu, że punkt dostępowy w czasie nadawania traci



Rysunek 6.11: Ramki zgłoszeniowe w ujęciu dobowym

całkowicie zdolność odbioru. Dodatkowo, mimo że sąsiednie punkty dostępne instaluje się zazwyczaj w odległościach większych niż 300 m, umieszczane są one w najwyżej dostępnych lokalizacjach. W konsekwencji transmisja jednej bramy może znacząco ograniczać zdolność odbioru bram sąsiednich.

Utrata ramki wskutek nadawania downlink

Założenia. Niech:

- N — liczba urządzeń końcowych,
- λ — średnia częstość wysyłania ramek uplink przez jedno urządzenie [1/s],
- $k \in \mathbb{N}$ — polityka potwierdzania: co k -ta ramka wymaga *ACK* (czyli $q = \frac{1}{k}$),
- τ_{dl} — średni czas w eterze pojedynczego potwierdzenia (*ACK*) [s],
- G — liczba stacji bazowych, których transmisja może pogorszyć odbiór danego uplinku ($G=1$ odpowiada tylko stacji obsługującej),
- $c \in [0, 1]$ — współczynnik wpływu stacji sąsiednich (dla stacji obsługującej $c=1$, dla sąsiednich zwykle $c<1$).

Pojedyncza stacja bazowa ($G=1$). Całkowita intensywność uplinków w zasięgu stacji wynosi $\Lambda = N\lambda$. Potwierdzenia są wysyłane ze średnią intensywnością $\Lambda q = \frac{N\lambda}{k}$, więc użycie nadajnika przez stację (frakcja czasu nadawania) równa się

$$u(k) = \frac{N\lambda}{k} \tau_{dl}. \quad (6.8)$$

Z własności PASTA[105] prawdopodobieństwo, że dowolna ramka *uplink* nadejdzie w czasie, gdy stacja nadaje (a więc nie odbiera), wynosi

$$P_{\text{loss}}^{(1)}(k) = \min\{1, u(k)\} = \min\left\{1, \frac{N\lambda}{k} \tau_{dl}\right\}. \quad (6.9)$$

Wiele stacji bazowych ($G \geq 2$). Jeżeli transmisje downlink stacji są niezależne w czasie, to prawdopodobieństwo, że w chwili nadejścia uplinku *żadna* stacja nie nadaje, wynosi $(1 - u) \cdot (1 - cu)^{G-1}$, gdzie u dane jest przez (6.8). Stąd prawdopodobieństwo utraty ramki z powodu nadawania *jakiegokolwiek*

stacji:

$$P_{\text{loss}}^{(G)}(k) = 1 - (1 - u(k)) (1 - c u(k))^{G-1}, \quad u(k) = \frac{N\lambda}{k} \tau_{\text{dl}}. \quad (6.10)$$

Dla małych obciążeń ($u \ll 1$) zachodzi przybliżenie liniowe

$$P_{\text{loss}}^{(G)}(k) \approx [1 + (G - 1)c] u(k) = [1 + (G - 1)c] \frac{N\lambda}{k} \tau_{\text{dl}}. \quad (6.11)$$

Analizując stację odbierającą 1000 ramek w oknie, z czego przyjmijmy, iż tylko w przypadku $N = 700$ urządzeń badany GW rejestruje najwyższy poziom $RSSI$, przez co LNS wybiera badaną stację do przesyłania ramek *downlink*. Możemy wyliczyć następujący procentowy czas niedostępności stacji bazowej, co mniej więcej wprost możemy przełożyć na % straconych ramek:

Tabela 6.3: Procentowy czas niedostępności stacji bazowej w zależności od strategii potwierdzania

Szerokość okna	Strategia potwierdzenia	Procentowy czas niedostępności
3h	$k = 1$	7.45%
3h	$k = 2$	3.72%
3h	$k = 5$	1.49%
12h	$k = 1$	1.86%
12h	$k = 2$	0.93%
12h	$k = 5$	0.37%

Podsumowanie Dłuższe ramki transmisji danych są korzystne z punktu widzenia efektywności komunikacji. W środowisku symulacyjnym przyjęto rozmiar okna transmisyjnego równy 3 lub 12 h oraz ładunek ramki *uplink* o wielkości 51 B. Strategia potwierdzania zakłada wysyłanie żądania *ACK* co pięć ramek *uplink*. Są to parametry stosowane w większości prowadzonych wdrożeń komercyjnych.

6.9.1 Zawartość ramek zgłoszeń dobowych

Przesyłane dane zostały skompresowane w taki sposób, aby zajmowały dokładnie 51 B. Wymóg ten wynika z wytycznych LoRa Alliance dla regionu EU868 (*Regional Parameters EU868*) i jest związany zarówno z ograniczeniami dotyczącymi maksymalnej długości pojedynczej ramki, jak i z koniecznością przestrzegania limitu sumarycznego czasu nadawania (*Duty Cycle (DC)*) w nielicencjonowanym paśmie *ISM* 863–870 MHz, regulowanym przez normę ETSI EN 300 220.

Typowa zawartość ramki zgłoszeń dziennych dla urządzeń do zdalnego odczytu liczników mediów:

1. `CI_CODE` (1 B) – typ przesyłanej wiadomości.
2. `FRAME_TYPE` (1 B) – identyfikator wersji ładunku.
3. `STATUS_WORD` (1 B) – osiem flag (każda o długości 1 bit) statusu urządzenia.
4. `PERIOD_VOLUME_USAGE` (276 b) – 23 wpisów różnicowych po 12 bitów, odpowiadających zużyciu medium w poszczególnych godzinach.
5. `BATTERY_LEVEL` (4 b) – poziom baterii.
6. `LATCH_DATA` (20 b) – zatrzaśnięte flagi błędów i zdarzeń.

7. SENSOR_ERRORS (4×1 b) – kody błędów sensora.
8. LATCH_DATESTAMP (2 B) – znacznik czasu daty zatrzaśniętych danych dobowych.
9. LATCH_HOUR (1 B) – godzina zatrzaśnięcia danych.
10. PULSE_COUNTER (4 B) – aktualny stan licznika w impulsach.
11. COUNTER_COEFF (1 B) – współczynnik przeliczeniowy impulsu (np. litry na jeden obrót kółka).
12. BACKFLOW_VOLUME (3 B) – skumulowany licznik przepływu wstecznego.

6.9.2 Kanały komunikacyjne

Symulator emuluje pracę pojedynczego kanału, co odzwierciedla obserwowaną w praktyce niezależność sąsiednich kanałów *LoRa* opisaną w sekcji 4.3.5. Jedyna interferencja międzykanałowa, którą należy uwzględnić w symulacji, występuje podczas nadawania przez stację bazową. W tym czasie odbiór ramek na pozostałych kanałach jest niemożliwy. Zjawisko to zostało odwzorowane w symulatorze poprzez okresową niedostępność odbioru.

Utrata łączności W przeprowadzonych symulacjach nie został rozpatrzony scenariusz stałej utraty łącza komunikacyjnego pomiędzy *RL* a *GW* oraz zagadnienia *network recovery*. Po pierwsze, *RL* są zwykle instalowane na podwyższonych obiektach (słupy oświetleniowe, elewacje budynków itp.), co istotnie zmniejsza prawdopodobieństwo znaczącej degradacji łącza w kierunku *GW*. Po drugie, nawet w przypadku lokalnego pogorszenia warunków propagacyjnych, typowe rozmieszczenie w warunkach widoczności bezpośredniej (*LOS*) zapewnia wysoki margines budżetu łącza *MCL*, a zatem praktyczną nadmiarowość. Po trzecie, nie uwzględniam awarii samych urządzeń, ponieważ brakuje podstaw teoretycznych do obiektywnego porównania ich awaryjności. Rozwiązania zasilane bateryjnie w praktyce można uznać za bardziej niezawodne niż stacje bazowe, z uwagi na niezależność od lokalnej infrastruktury energetycznej. Z tych powodów scenariusze utraty łącza *RL–GW* zostały pominięte w modelu.

Rozdział 7

Porównanie efektywności komunikacji

Poniższy rozdział stanowi porównawczą analizę konfiguracji sieci bez węzłów pośrednich oraz wariantów z różnymi modelami urządzeń pośredniczących. Analizowane scenariusze odpowiadają konfiguracjom przedstawionym w rozdziale 1.1. Punkt odniesienia stanowi wersja bazowa z niepełnym pokryciem radiowym, zestawiona kolejno ze strategiami: (i) zagęszczania punktów dostępowych, (ii) zastosowania retransmitera *LoRa-LTE*, oraz (iii) zastosowania retransmitera *LoRa-LoRa*. W celu zapewnienia porównywalności, wszystkie wyniki oceniane są za pomocą metryk zdefiniowanych w 2.4. Środowisko symulacyjne wykorzystane do generowania danych opisano w rozdziale 6, natomiast szczegółową metodologię badawczą przedstawiono w podrozdziale 1.4.

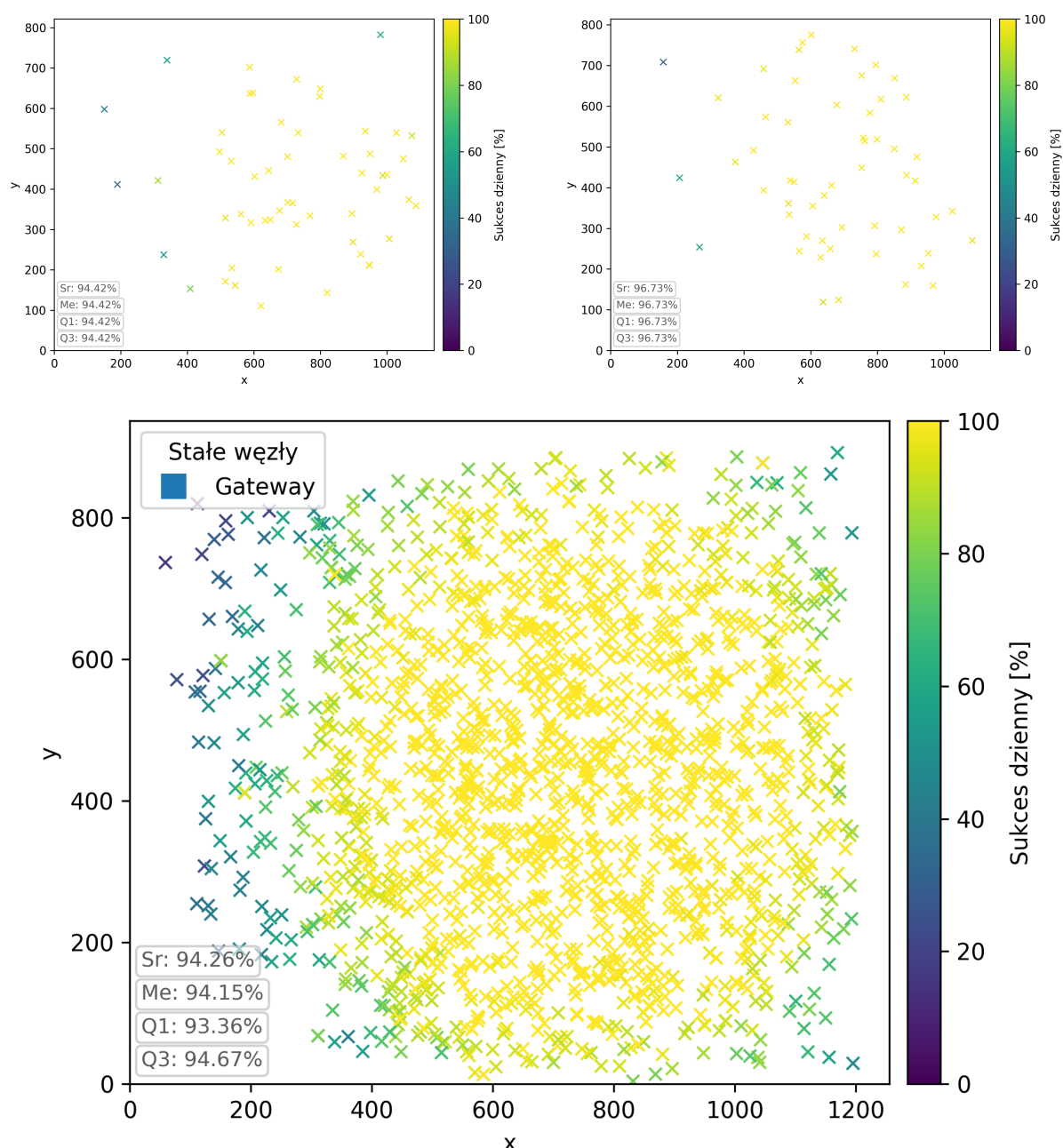
7.1 Wartości przyjęte do symulacji

W analizach przyjęto zestaw parametrów najbardziej wrażliwych z punktu widzenia jakości oraz energochłonności komunikacji w sieci *LoRaWAN*. Obejmują one zarówno wielkości warstwy radiowej (długość ramki, moc nadawania, mechanizm *ADR*, współczynnik rozpraszania), jak i systemowej (polityka potwierdzeń, szerokość okien zgłoszeniowych, liczba ramek na okno). Taki dobór umożliwia ocenę kompromisu pomiędzy skutecznością dostarczania danych a zapotrzebowaniem energetycznym urządzeń oraz porównanie strategii retransmisji w sposób spójny z praktyką wdrożeniową.

- **Długość ładunku** pojedynczej ramki *uplink* przyjęto jako typową wartość 51, B, zgodnie z definicją ramki zgłoszenia dziennego w 6.9.1.
- **Parametry PHY:** szerokość pasma $B = 125$ kHz oraz kodowanie $CR = 4/5$, przyjęte zgodnie z wymaganiami dokumentu *LoRaWAN Regional Parameters* [75].
- **Polityka potwierdzeń *uplink*** została dobrana zgodnie z praktyką opisaną w 6.9: co piąta ramka jest wysyłana jako *confirmed uplink* (stosunek 1:5).
- **Kryterium utraty łączności:** po utracie $K = 6$ kolejnych potwierdzeń ramek *uplink* lub komunikatów *Join-Request* urządzenie końcowe (*ED*) inicjuje aktywne próby nawiązania łączności z węzłem pośrednim (scenariusze z wykorzystaniem *RL*).

- **Maksymalny dryft RTC** równy 40, ppm wynika z ograniczeń fizycznych omówionych w 6.8; z tego względu wpływ tego parametru nie był dalej szczegółowo badany i w symulacjach traktowany jest jako stały.
- **Średni prąd bezczynności ED** przyjęto jako $25.3, \mu A$, zgodnie z charakterystyką sprzętową omówioną w rozdziale 4.4.
- **Średni prąd bezczynności retransmitera** (bez udziału toru radiowego) wynosi $5.9, \mu A$; wartość i uwarunkowania przedstawiono w 4.4. Wskazana wartość dotyczy konfiguracji bez elementu sensorycznego.
- **Średni prąd nadawania** przy mocy +14, dBm wynosi $I_{TX} = 25.5, mA$ (ograniczenia sprzętowe w 4.7).
- **Średni prąd odbioru** przyjęto jako $I_{RX} = 4.9, mA$ (ograniczenia sprzętowe w 4.7).
- **Ortogonalność SF:** przyjęto pełną ortogonalność współczynników rozpraszania, zgodnie z wynikami przytoczonymi w 4.3.
- **Mechanizm ADR :** stosowany w wybranych scenariuszach (opis w 3.2.2). W symulatorze użyto wariantu z *średnią kroczącą*; margines $\epsilon = 6, dB$ stanowi wartość domyślną. Parametr ten był również zmieniany eksperymentalnie a wyniki zostały przedstawione.
- **Liczba ramek na okno zgłoszeniowe:** domyślnie ED wysyła $N = 1$ ramkę na jedno okno. W wariantach porównawczych modyfikowano N i analizowano jego wpływ na pokrycie oraz zużycie energii.
- **Szerokość okna zgłoszeniowego:** wartość domyślna wynosi $T_{window} = 3, h$; w większości scenariuszy rozszerzono ją do 12, h, co odzwierciedla konfiguracje powszechnie stosowane w praktyce.
- **Liczba powtórzeń symulacji:** zgodnie z metodyką badawczą w 1.4 każdy scenariusz symulowano co najmniej 30-krotnie.
- **Okres przejściowy:** statystyki jakości usług gromadzono po upływie fazy inicjalnej, obejmującej procedurę *Join* i przypisanie węzłów pośrednich. Horyzont ten wynosi 4 dni, co odpowiada 8 oknom zgłoszeniowym. Dobrany czas jest wystarczający dla ED na zestawienie komunikacji z ED .
- **Czas trwania symulacji:** w większości przypadków 30 lub 100 dni. Dla konfiguracji wykazujących niską stabilność horyzont zwiększano testowo do 365 dni w celu weryfikacji zbieżności i stabilności wyników.

Scenariusz wyjściowy: W każdym uruchomieniu symulacji, w otoczeniu jednego odbiornika GW , losowane są pozycje 50 urządzeń końcowych (ED), rozmieszczonych w odległości nieprzekraczającej 350 m od nadajnika, określanych jako *węzły mocne*. Takie założenie gwarantuje niemal pewne dostarczenie danych w przypadku braku kolizji, przy czym średnie prawdopodobieństwo skutecznej transmisji wynosi $\hat{P}_{UL} \approx 99,1\%$. Dodatkowo, w każdym uruchomieniu rozmieszczane jest losowo pięć urządzeń klasyfikowanych jako *węzły słabe*, dla których prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu uplink $\hat{P}_{UL}$ kształtuje się na poziomie $\approx 42\%$. W konsekwencji, przy założeniu liczby ramek $N = 2$, dzienne prawdopodobieństwo sukcesu $\hat{Y}_{i,d}$ osiąga wartość $\approx 67\%$.

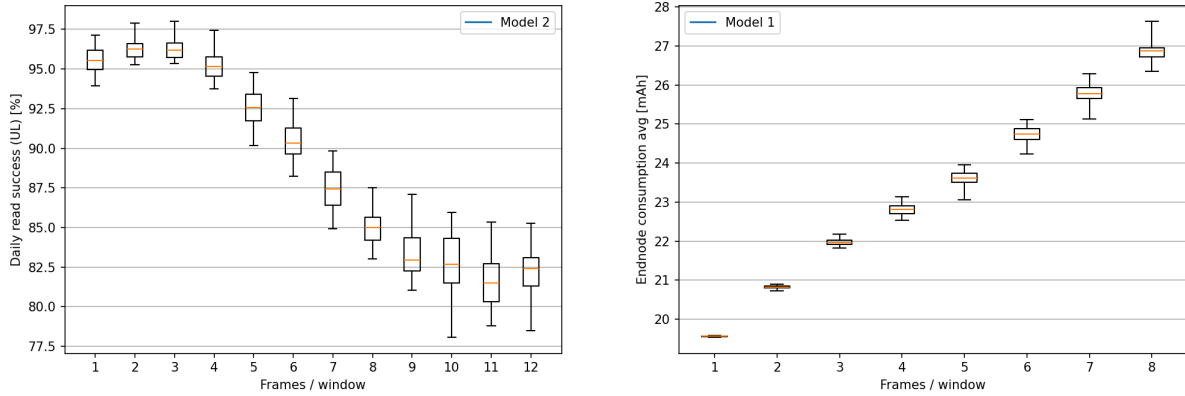


Rysunek 7.1: Przykłady kolejnych uruchomień scenariusza bazowego oraz wizualizacja skumulowanego rozmieszczenia urządzeń końcowych po 30 uruchomieniach symulacji

Przykład pojedynczego uruchomienia scenariusza zaprezentowano na górnym rysunku 7.1. Każdy scenariusz powtarzano 30-krotnie, przy czym za każdym razem losowane były nowe pozycje urządzeń. Zbiorcze rezultaty (obejmujące 30 uruchomień) zilustrowano w dolnej części rysunku 7.1, gdzie znaczniki $\times$ odpowiadają lokalizacjom poszczególnych ED . Kolorystyka znaczników odzwierciedla średni dzienny poziom sukcesu transmisji $Y_{i,d}$, zgodnie z metryką zdefiniowaną w 2.4.2. Pozycja bramy dostępnej G1 została ustalona na $x=750$, $y=450$.

Dla scenariusza wyjściowego mediana prawdopodobieństwa dostarczenia zgłoszenia dziennego $Y_{i,d}$ osiągnęła wartość 94.15%. Stanowi to wartościowy punkt odniesienia, odpowiadający typowym przypadkom spotykanym w rzeczywistych wdrożeniach systemów zdalnego odczytu liczników mediów.

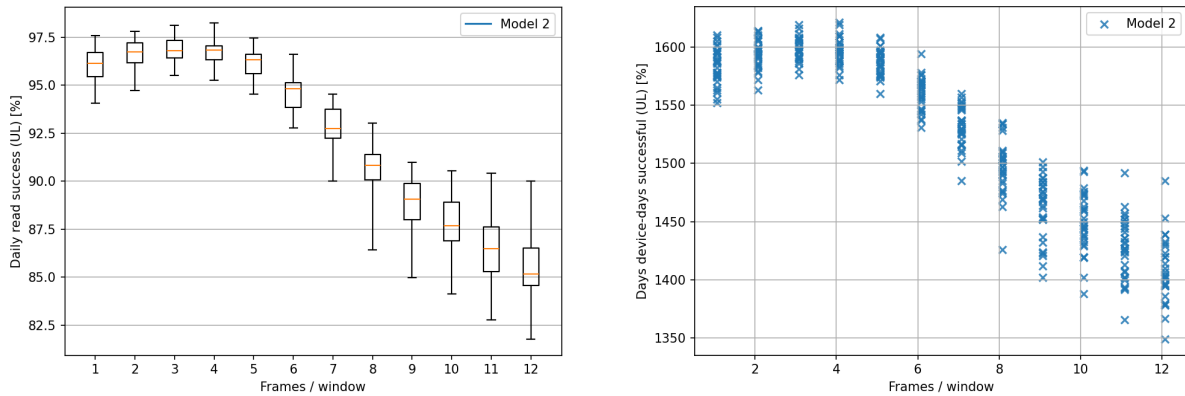
Najprostszą metodą podniesienia prawdopodobieństwa zebrania kompletu odczytów dziennych jest zwiększenie liczby ramek radiowych transmitowanych w ramach okien zgłoszeniowych. Analizę tego wariantu przedstawiono na rysunku 7.2. Wyniki wskazują, że strategia ta skutecznie podnosi prawdopodobieństwo dostarczenia danych. Należy jednak zauważyć, że wraz ze wzrostem liczby ramek rośnie zużycie energii przez *ED*, a także zajętość medium transmisyjnego, co prowadzi do zwiększonego prawdopodobieństwa kolizji i w efekcie do obniżenia ogólnej skuteczności dostarczania ramek.



Rysunek 7.2: Skuteczność dzienna / dzienne zużycie energii dla zadanej liczby wysłanych pakietów per okno zgłoszeniowe N . Scenariusz bazowy.

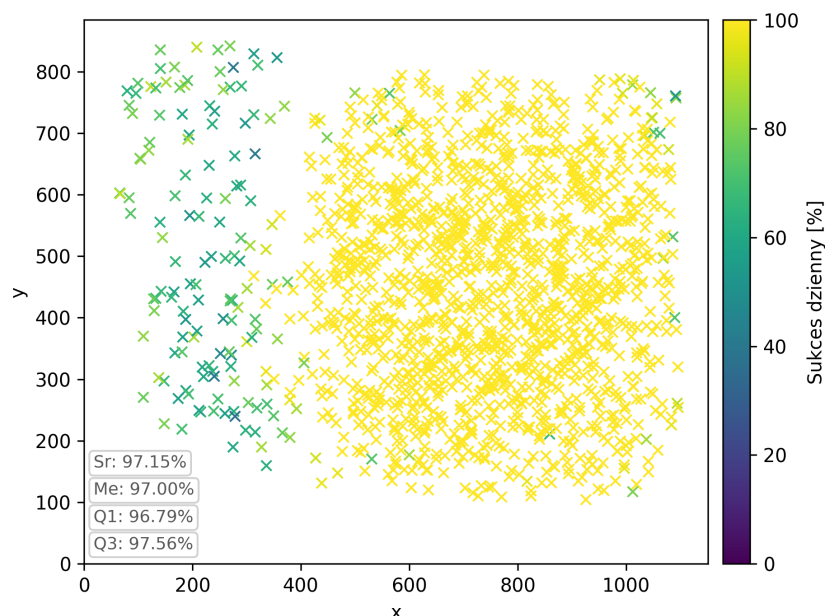
W celu zmniejszenia częstości kolizji ramek rozważono wydłużenie okien zgłoszeniowych z $T_{\text{window}} = 3\text{ h}$ do $T_{\text{window}} = 12\text{ h}$. Zmiana ta prowadzi do wydłużenia czasu oczekiwania na zebranie kompletu danych dobowych, lecz jednocześnie zwiększa prawdopodobieństwo doręczenia co najmniej jednej ramki w ciągu doby przez każde *ED*. Ilustrację uzyskanych wyników przedstawiono na rys. 7.3.

Analiza symulacyjna wykazała, że w zmodyfikowanym scenariuszu uzyskano najwyższą medianę metryki sukcesu dziennego, osiągającą $Y_{i,d} = 97,42\%$ dla $T_{\text{window}} = 12\text{ h}$ oraz liczby retransmisji $N = 3$. Jednocześnie średnie dzienne zużycie energii pojedynczego *ED* w horyzoncie 30 dni wyniosło $E_{\text{ED}} = 24.52\text{ mAh}$, co odpowiada średniemu prądowi $I_{\text{AVG}} = 34.05\text{ }\mu\text{A}$.



Rysunek 7.3: Średnia skuteczność odczytów dziennych dla $T_{\text{window}} = 12\text{ h}$, w postaci wykresu pudełkowego i zbioru punktów będących średnimi wartościami dla wszystkich urządzeń z poszczególnych uruchomień symulacji.

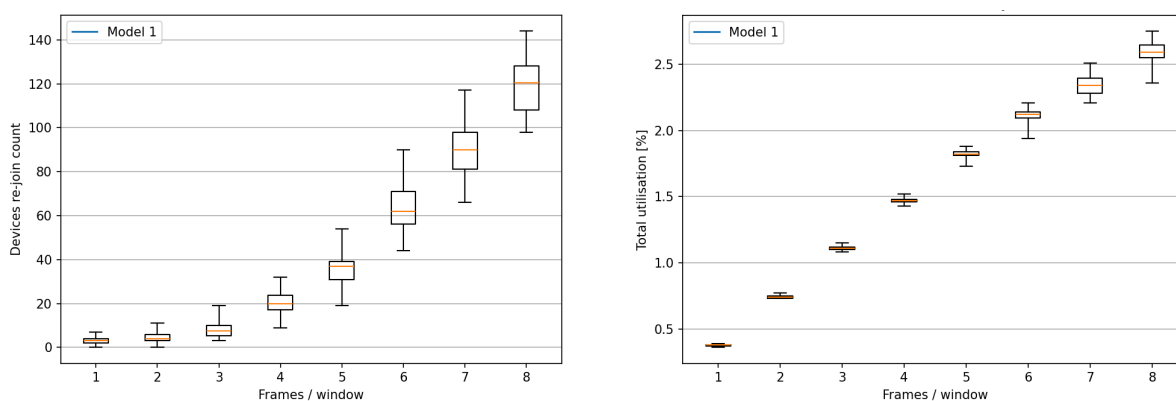
Rysunek 7.4 przedstawia wizualizację topologii sieci dla zwiększonej szerokości okien transmisyjnych oraz trzech retransmisji w każdym oknie.



Rysunek 7.4: Wizualizacja skumulowanego rozmieszczenia urządzeń końcowych wg scenariusza z węzłami pośrednimi ze zwiększoną liczbą transmitowanych ramek i wydłużonymi oknami transmisji. Scenariusz bazowy.

Dalsze zwiększanie liczby powtórzeń transmisji powyżej 3–4 ramek na jedno okno transmisyjne nie prowadzi do istotnej poprawy dobowej skuteczności dostarczania danych. Jednocześnie rosnące obciążenie kanału powoduje zwiększenie częstości interferencji wzajemnych (kolizji). Procentowa zajętość medium transmisyjnego ρ_c w początkowym zakresie rośnie w przybliżeniu liniowo wraz ze wzrostem liczby ramek w oknie czasowym, np. $\rho_c \approx 1,8\%$ dla $N = 5$.

Zjawisko to ilustruje wykres liczby operacji *re-join* inicjowanych przez urządzenia końcowe po trzech kolejnych nieotrzymanych potwierdzeniach ACK dla wiadomości *uplink* (rys. 7.5).

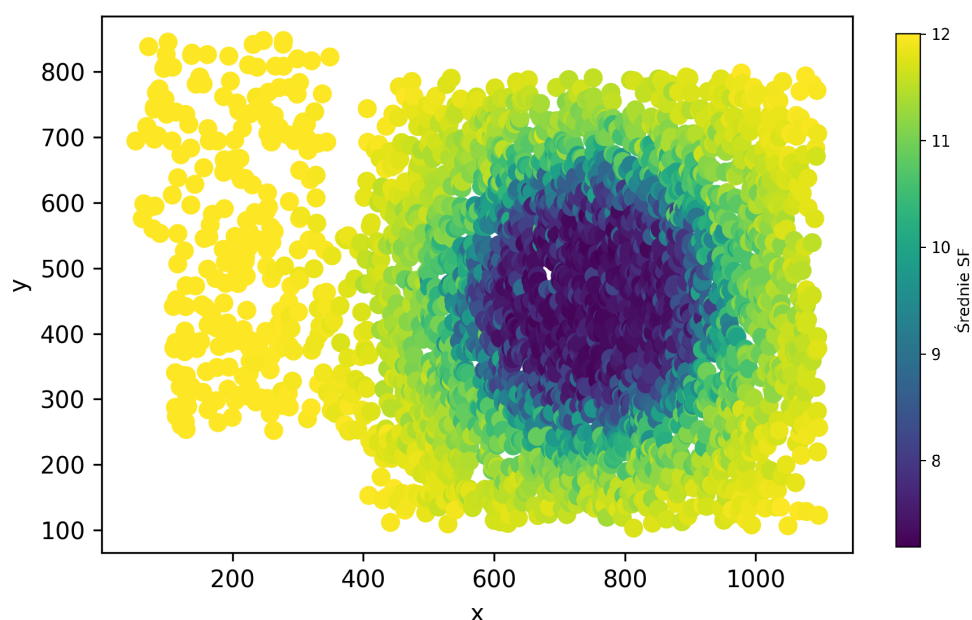


Rysunek 7.5: Liczba operacji *re-join* oraz zajętość kanału komunikacyjnego ρ_c . Dla $T_{\text{window}} = 12\text{h}$

Naturalnym sposobem ograniczenia zajętości medium radiowego jest aktywacja mechanizmu *ADR*, omówionego w podrozdziale 3.2.2. Po jego włączeniu przeprowadzono strojenie parametru ϵ w zakresie $\{1, 2, \dots, 10\}$ dB (por. 3.2.2).

W analizowanym scenariuszu o stosunkowo niskiej zajętości medium najlepszy wynik prawdopodobieństwa dostarczenia pojedynczego pakietu uzyskano dla $\epsilon = 6$ dB, dlatego wartość tę przyjęto w dalszych analizach. Należy jednak zauważyć, że dla przypadków większej zajętości medium transmisyjnego bardziej agresywna strategia, tj. niższe wartości ϵ , okazuje się korzystna. Przykładowo, dla zajętości kanału $\rho_c \approx 15\%$ najlepsze dopasowanie uzyskano przy $\epsilon = 4$ dB.

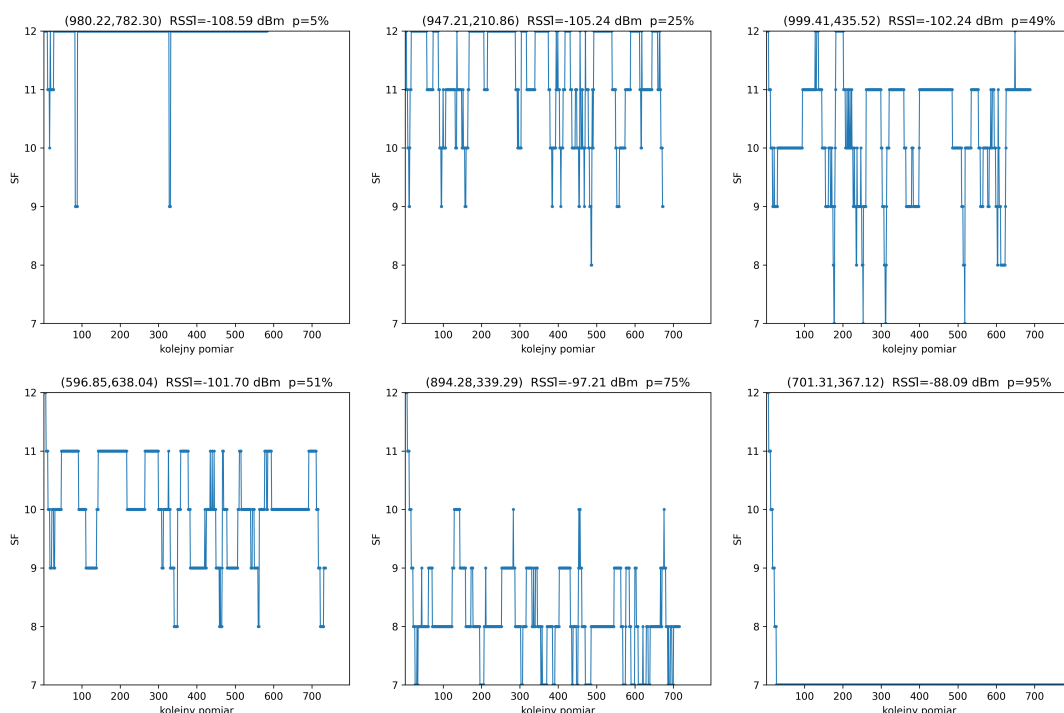
Symulacje z włączonym mechanizmem *ADR* (dla topologii przedstawionej na rys. 7.6) wykazały, że choć mechanizm ten wyraźnie redukuje zużycie energii przez urządzenia końcowe, nie prowadzi do poprawy całkowitej skuteczności dziennej.



Rysunek 7.6: Mapa średniego współczynnika *SF* dla transmisji z danego punktu sieci. Scenariusz bazowy.

Powyższe obserwacje wskazują na konieczność krytycznej oceny działania mechanizmu *ADR*. W celu jego weryfikacji oraz identyfikacji potencjalnych ograniczeń implementacyjnych przeprowadzono analizę sposobu doboru współczynnika *SF* przez algorytm. Na rys. 7.7 przedstawiono przebieg zmian tego parametru w odniesieniu do kolejnych odebranych pakietów.

Do analizy wszystkie urządzenia końcowe (*ED*) uporządkowano według średniego poziomu sygnału *RSSI* rejestrowanego przez *GW*. Następnie wybrano urządzenia odpowiadające wartościom percentyli: 5., 25., 49., 51., 75. oraz 95., dla których zilustrowano charakterystyczne przebiegi zmian *SF* w czasie.



Rysunek 7.7: Przebiegi czasowe sterowania parametrem SF dla różnych urządzeń końcowych.

Na wykresach widoczna jest tendencja zgodna z intuicją: urządzenia o wysokim poziomie odbieranego sygnału charakteryzują się stabilną pracą przy niskich wartościach parametru SF , natomiast urządzenia położone dalej od punktu dostępowego GW przeważnie pracują z $SF = 12$. Zmiana wartości SF odbywa się skokowo o ± 1 , z wyjątkiem sytuacji, w których urządzenie nie uzyska potwierdzenia dla trzech kolejnych transmisji wymagających ACK ; wówczas inicjowana jest procedura *re-join* i następuje powrót do bazowej wartości $SF = 12$.

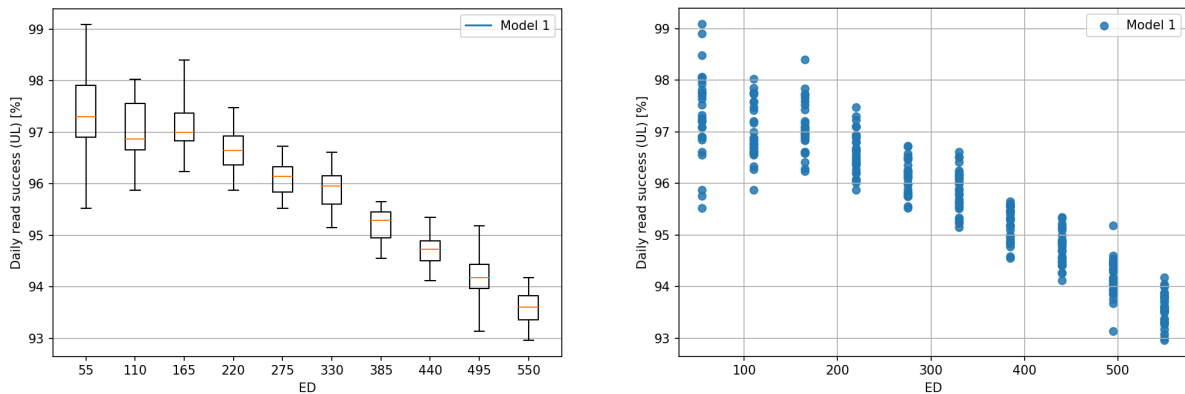
Ze względu na niedeterministyczny charakter kanału transmisyjnego, omówiony w sekcji 6.6, nawet dla urządzeń o wysokiej średniej wartości $RSSI$ obserwuje się okresowe zmiany parametru SF . Spora-dyczne przejścia najsłabszych urządzeń do $SF = 9$ wynikają z prób przełączenia komunikacji przez urządzenie pośredniczące w przypadku powtarzającego się braku odpowiedzi w operacji *join*.

Podsumowując, przebiegi są zgodne z oczekiwaniami, a mechanizm działa poprawnie. Brak zauważalnego pozytywnego wpływu jest najprawdopodobniej związany z faktem, iż w badanej sieci całkowita użycie medium transmisyjnego pozostaje niska ($\rho_c \approx 1,5\%$ dla $N = 4$). Bez zmiany topologii sieci dalsza poprawa skuteczności transmisji przy zachowaniu ograniczeń energetycznych wydaje się niemożliwa.

Przed przejściem do kolejnych analiz, dla przyjętego scenariusza testowego wykonano dodatkowe symulacje, obejmujące przypadki zwiększonej liczby urządzeń końcowych w sieci. Przy wzroście liczebności populacji przyjęto zasadę, że 10% węzłów stanowiły węzły *słabe*, natomiast pozostałe 90% sklasyfikowano jako węzły silne. Wyniki przedstawiono na rys. 7.8.

Na podstawie wykresów można zaobserwować, że nawet przy trzykrotnym zwiększeniu liczby urządzeń końcowych sieć utrzymuje stabilny współczynnik dziennych odczytów. Wypełnienie medium komunikacyjnego ρ_{air} (por. 2.4.3) dla $N = 165$ urządzeń końcowych generujących po sześć zgłoszeń

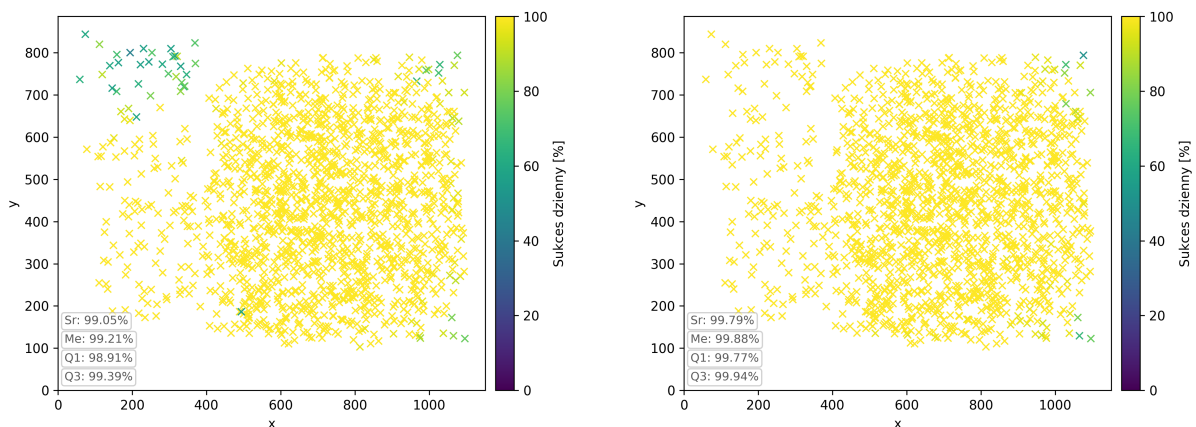
dziennie w oknach $T_{\text{window}} = 12 \text{ h}$ wyniosło $\rho_c = 3.56\%$ i przy niskich wartościach jest wprost proporcjonalne do liczby urządzeń w sieci.



Rysunek 7.8: Średnia skuteczność odczytów dziennych w funkcji liczby urządzeń końcowych.

Przyjęte modyfikacje, polegające na wydłużeniu czasu okna transmisyjnego oraz zwiększeniu liczby transmitowanych pakietów, choć przyczyniły się do poprawy prawdopodobieństwa dostarczenia danych, nie wyeliminowały całkowicie braków w odczytach. W kolejnym etapie analiz zastosowano strategię zagęszczenia rozmieszczenia punktów dostępowych, opisaną jako „Konfiguracja A” (rys. 1.1). Rozwiązanie to, choć z technicznego punktu widzenia powinno zapewnić najlepsze rezultaty, jest równocześnie najbardziej kosztowne. Zgodnie z danymi dotyczącymi kosztu budowy sieci przedstawionymi w sekcji 2.4.8, dodanie kolejnej bramy dostępowej w instalacji obejmującej 55 ED podnosi całkowity koszt wykonania instalacji o $C_{\Delta}(H) = 39\%$ względem scenariusza bazowego.

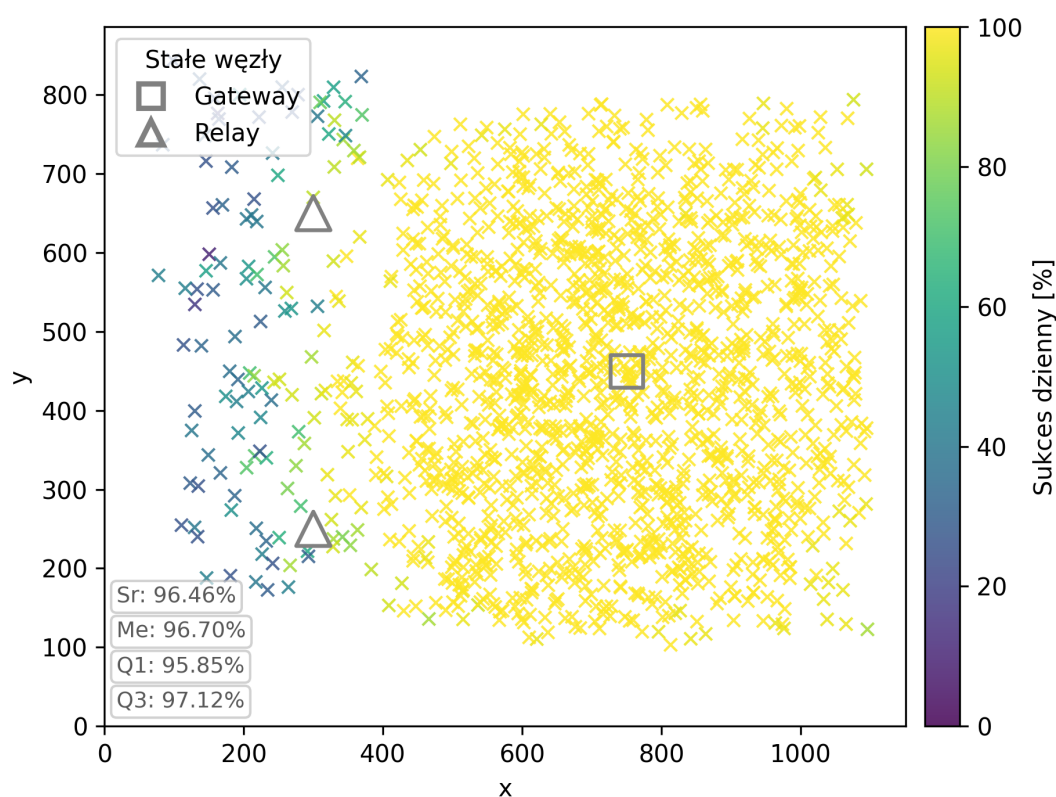
Po dodaniu jednej bramy dostępowej w punkcie G2 o współrzędnych $x=150$, $y=250$ nadal obserwowano grupę węzłów słabych (scenariusz pokazany na 7.9). Z tego względu kolejną bramę dostępową G3 umieszczono w punkcie o współrzędnych $x=250$, $y=750$. W przypadku dwóch dodatkowych bram koszt wzrósł do $C_{\Delta}(H) = 78\%$.



Rysunek 7.9: Symulacja rozbudowana o dodatkowy punkt dostępowy G2 oraz dodatkowe 2 punkty dostępowe.

Zaproponowane rozwiązanie osiąga bardzo wysoką medianę $Y_{i,d} = 99,88\%$ dla slotów o długości 12 h oraz jednej ramki w oknie zgłoszeniowym, a także jedynie nieznacznie niższy wynik $Y_{i,d} = 99,62\%$ dla okien 3 h i również jednej ramki na okno.

Użycie węzłów pośrednich. W kolejnym etapie analizie poddano scenariusz z wykorzystaniem węzłów pośredniczących, opisany jako *Konfiguracja 1* na rys. 1.1. W tym celu rozmieszczono dwa urządzenia *RL*, analogicznie jak bramy dostępne w punktach R1 oraz R2. Ze względu na konieczność zapewnienia komunikacji z *GW* oraz większą swobodę instalacji urządzeń zasilanych bateryjnie, węzły pośrednie ulokowano bliżej siebie i bliżej stacji bazowej, odpowiednio w punktach RL1 ($x=300$, $y=250$) oraz RL2 ($x=300$, $y=650$). Topologia przedstawiona na rys. 7.10 obrazuje układ wyjściowy dla konfiguracji z jedną ramką radiową w oknie transmisyjnym.



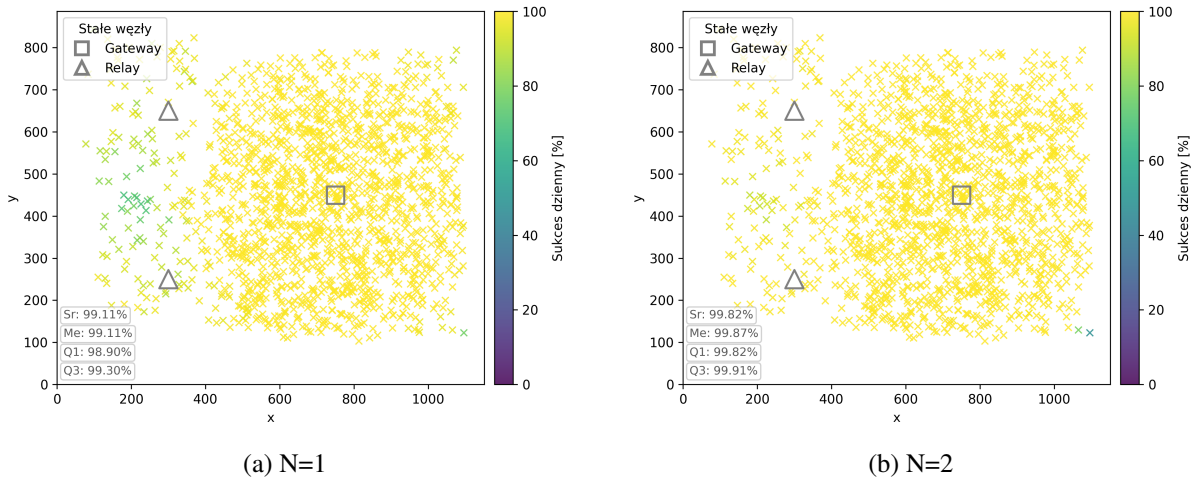
Rysunek 7.10: Wizualizacja pokrycia dla konfiguracji z dwoma węzłami pośrednimi, $N = 1$, $T_{\text{window}} = 3$ h, $SF = 12$; schemat retransmisji zgodny z mechanizmem opartym na predefiniowanych slotach czasowych.

Widać, iż wszystkie węzły słabe charakteryzują się stosunkowo niską medianą $Y_{i,d}$ ze względu na wciąż znaczną odległość *RL* od *GW*, a co za tym idzie — widoczną stratność komunikacji. Celem poprawy jakości transmisji może być umieszczenie urządzenia retransmitującego w lokalizacji zapewniającej bezpośrednią łączność ze stacją bazową w modelu *LOS*.

Zgodnie z raportem Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego [106], w paśmie 860 MHz na obszarach zurbanizowanych różnica w *MCL* pomiędzy warunkami *LOS* a sytuacją, gdy urządzenie znajduje się za jednym zakrętem, wynosi 8 dB do 11 dB. Ponieważ zastosowany model statycznej

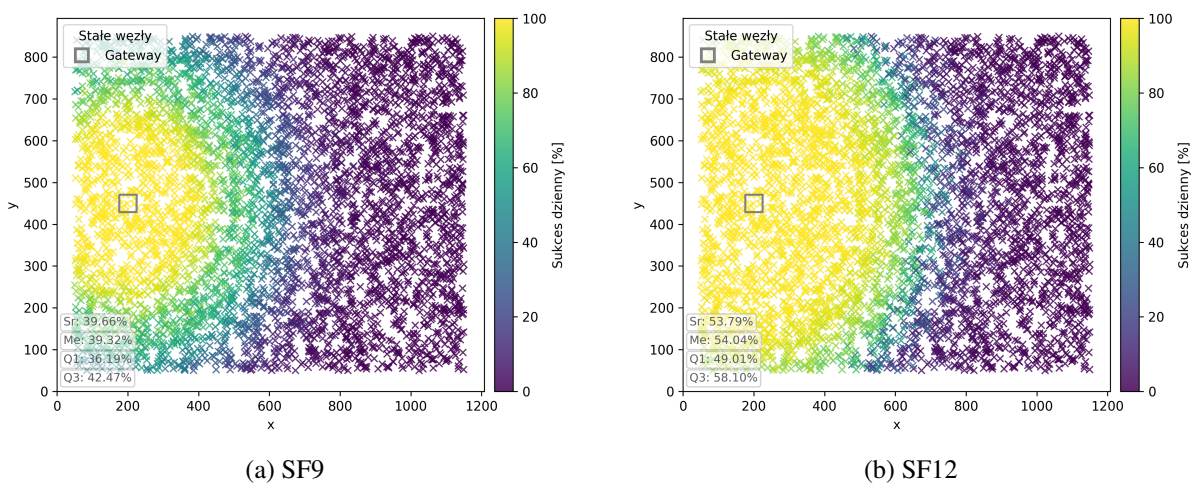
propagacji bazuje na urządzeniach instalowanych wewnątrz budynków, zwykle blisko gruntu, przyjęcie wartości 10 dB dodatkowego budżetu łącza dla scenariusza *NLOS* nie wydaje się zawyżone.

Symulacja przedstawiona na rys. 7.11 ilustruje przypadek, w którym węzeł pośredni pracujący w modelu *LOS* charakteryzuje się o 10 dB niższym *MCL*, niż wynikałoby to wyłącznie z jego lokalizacji.



Rysunek 7.11: Wizualizacja pokrycia dla konfiguracji z dwoma węzłami pośrednimi, $N = 1$ oraz $N = 2$, $T_{\text{window}} = 3$ h, $SF = 12$; schemat retransmisji oparty na predefiniowanych czasach transmisji.

Komunikacja pomiędzy *ED* a *RL* realizowana jest przy stałym współczynniku rozpraszania o wartości $SF = 9$. Parametr ten został wskazany dla ramek typu *WOR* w dokumencie LoRa Alliance *Regional Parameters* (RP002) [75]. Choć dokument nie podaje szczegółowego uzasadnienia tego wyboru, można go traktować jako kompromis pomiędzy zasięgiem łącza a zużyciem energii przez urządzenia. Wartość tę przyjęto zarówno w opracowanym mechanizmie autorskim, jak i w rozwiązaniu zdefiniowanym w specyfikacji *TS011*. Dla zobrazowania efektywnego zasięgu na rys. 7.12 przedstawiono hipotetyczny scenariusz z jedną ramką dziennie, nadawaną w pojedynczym slotcie czasowym, ilustrujący różnice w zasięgu transmisji dla $SF = 12$ oraz $SF = 9$.



Rysunek 7.12: Wizualizacja prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu z urządzeń końcowych dla wartości współczynnika rozpraszania $SF = 12$ oraz $SF = 9$.

W rozpatrywanych warunkach (ok. 2–3 węzły słabe przypadające na jeden węzeł pośredniczący, *RL*) mechanizm retransmisji zdefiniowany w specyfikacji *TS011* osiąga skuteczność odczytów porównywalną z rozwiązaniem autorskim. Należy jednak odnotować, że urządzenia znajdujące się jednocześnie w zasięgu dwóch węzłów *RL* wykazują obniżone prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu, co wiąże się ze zwiększonym ryzykiem kolizji retransmisji (sytuacja zilustrowana na rys. 5.3).

Problem ten można w praktyce skutecznie ograniczyć poprzez politykę selekcji (tzw. *czarne/białe listy*) realizowaną przez *LNS*, która zawęży liczbę dopuszczalnych ścieżek retransmisji dla danego *ED*. Z tego względu zjawisko to nie jest dalej modelowane w narzędziu symulacyjnym.

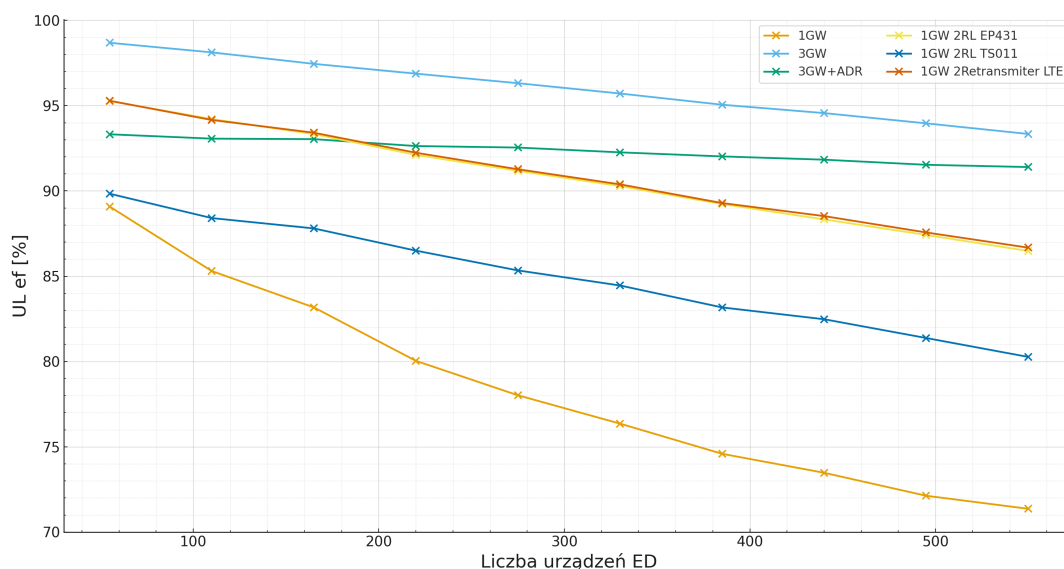
Retransmisja z użyciem komunikacji komórkowej. Alternatywą dla retransmisji w schemacie *LoRa–LoRa* może być retransmisja realizowana poprzez inne łącze komunikacyjne (sytuacja opisana jako *Konfiguracja B* na rys. 1.1), wykorzystujące protokół *TCP/IP* do bezpośredniej komunikacji z *LNS*. Wśród potencjalnych technologii transmisyjnych opartych na protokole *Internet Protocol (IP)* można wymienić rozwiązania takie jak Wi-Fi, Ethernet czy systemy komórkowe (np. *NB-IoT*, *LTE*, *5G*). Ze względu na powszechność zastosowań oraz szerokie pokrycie sieci przy relatywnie niewielkich wymaganiach energetycznych, w dalszej analizie przyjęto wariant z wykorzystaniem sieci *LTE Cat-M1*.

Z uwagi na właściwości protokołu *TCP*, łącze do serwera traktowane jest jako bezstratne. Przerwy w dostępie do usługi nie są uwzględniane w analizie, ponieważ wskaźniki jakości *Quality of Service (QoS)* sieci *LTE* w warunkach gęstej zabudowy miejskiej są bardzo wysokie. Zakładając, że urządzenie retransmitujące pracuje w pełni bateryjnie, należy przyjąć, iż nie ma możliwości implementacji odbiornika wielokanałowego o zdolnościach ortogonalnych. Tym samym zastosowany odbiornik radiowy będzie porównywalny z tym wykorzystywanym w rozpatrywanych węzłach pośredniczących.

W konsekwencji, w zakresie odbioru ramek *LoRa* zastosować można jeden z dwóch schematów retransmisji: *TS011* lub *Technical Specification EP4312388 (EP431)*. Ponieważ w dotychczasowych analizach schemat *EP431* charakteryzował się niższymi kosztami energetycznymi, został on przyjęty w dalszych rozważaniach.

Dodatkową zaletą mechanizmu opisanego w patencie jest możliwość przewidywania czasów nadawania. Dzięki temu retransmitter może nawiązać sesję *TCP* z *LNS* jeszcze przed planowanym odbiorem ramki, co pozwala na bezzwłoczne przesłanie pakietu *uplink* do serwera oraz przekazanie ewentualnego pakietu *downlink* w ramach okien *RX1* lub *RX2*. W modelu zużycia energii przyjęto uproszczenie polegające na traktowaniu sesji *LTE* jako zestawianej na żądanie. W implementacji rzeczywistej możliwe byłoby jednak zastosowanie mechanizmów oszczędzania energii, takich jak *Extended Discontinuous Reception (eDRX)* czy *Power Saving Mode (PSM)*, dostępnych w sieciach *LTE Cat-M1* lub *NB-IoT*.

Wykres 7.13 przedstawia zestawienie wyników prawdopodobieństwa dostarczenia pojedynczego pakietu w różnych modelach sieci w funkcji liczby urządzeń końcowych. Z kolei tabela 7.1 zawiera zbiorcze zestawienie wszystkich przeprowadzonych analiz wraz z uzyskanymi wynikami. Na wykresie zaprezentowano kolejno modele 2, 8, 9, 10, 11 oraz 12, opisane w tabeli.



Rysunek 7.13: Porównanie prawdopodobieństwa dostarczenia pojedynczego pakietu dla wybranych scenariuszy testowych.

Tabela 7.1: Zestawienie wyników symulacji w różnych konfiguracjach sieci

Test	GW	RL	SF	N	WL	$P_{\geq 1/d}$	$C_{\Delta}(H)$	$\bar{E}_{ED}$	E_{REL}^{LL}
1	1	-	12	1	3h	94.26	0%	27.26 μA	-
2	1	-	12	1	12h	95.80	0%	27.26 μA	-
3	1	-	12	3	12h	97.19	0%	31.12 μA	-
4	1	-	12	4	12h	97.03	0%	33.19 μA	-
5	1	-	ADR	4	12h	96.50	0%	27.64 μA	-
6	1	-	ADR	6	12h	95.72	0%	28.74 μA	-
7	2	-	12	1	12h	99.05	+39.0%	27.26 μA	-
8	3	-	12	1	12h	99.79	+78.0%	27.26 μA	-
9	3	-	ADR	2	12h	99.91	+78.0%	26.92 μA	-
10	1	2RL(T)	12	2	12h	98.82	+6.2%	28.90 μA	141.62 μA
11	1	2RL(E)	12	2	12h	99.47	+6.2%	28.80 μA	19.38 μA
12	1	2LL ^(*) (E)	12	2	12h	99.49	+8.2%	28.80 μA	135.12 μA

^(*) Retransmitter typu LoRa $\rightarrow$ LTE implementujący odczyt radiowy w modelu pseudolosowych slotów.

7.2 Weryfikacja i potwierdzenie tezy pracy

Celem niniejszej sekcji jest jednoznaczne potwierdzenie tezy pracy sformułowanej w sekcji 1.3.1:

„Poprzez zastosowanie węzłów pośrednich możliwe jest zwiększenie efektywności transmisji w sieciach LoRaWAN.”

Zgodnie z formalizacją przyjętą w rozdziale 1, teza jest spełniona wtedy, gdy jednocześnie zachodzą warunki: (i) pokrycia (1.1), (ii) opłacalności inwestycyjnej względem alternatyw (1.2)–(1.3) oraz (iii)

korzystnego bilansu energetycznego (1.4)–(1.5). W poniższych podrozdziałach pokazujemy, że wyniki rozdziału 7 spełniają te kryteria.

7.2.1 Pokrycie i skuteczność uplink

Zagęszczanie sieci poprzez dodanie dodatkowych stacji bazowych zapewnia zdecydowanie najlepszy efekt w zakresie pokrycia. Założeniem zastosowania węzłów pośrednich było natomiast osiągnięcie porównywalnego poziomu pokrycia, zbliżonego do 100%. Analiza kluczowych metryk dla okna $T_{\text{window}} = 12$ h i dwóch retransmisji ramki ($N = 2$) wskazuje, że:

- 1 GW, ($N = 4$): $P_{\geq 1/d} = 97,03\%$, przy jednoczesnym znaczącym obciążeniu energetycznym,
- 1 GW + 2 RL(EP431): $P_{\geq 1/d} = 99,47\%$, przy niewielkim narzucie kosztowym,
- 3 GW: $P_{\geq 1/d} = 99,79\%$, lecz kosztem istotnego wzrostu nakładów inwestycyjnych (por. sekcja 7.2.2).

Pokrycie w scenariuszu z węzłami pośrednimi różni się jedynie o 0,32 punktu procentowego względem wariantu alternatywnego z trzema stacjami bazowymi, co pozwala uznać warunek porównywalności za spełniony. Otrzymana wartość 99,47% może być interpretowana jako $\cong 1$ w sensie probabilistycznym.

Kluczowe jest to, że wraz ze wzrostem liczby urządzeń końcowych (ED) przewaga konfiguracji z RL nad scenariuszem bazowym (1 GW) pozostaje stabilna 7.13, a tempo spadku skuteczności jest wyraźnie mniejsze niż w przypadku wariantów pozbawionych węzłów pośrednich, co potwierdza korzystną skalowalność rozwiązania.

7.2.2 Koszt budowy sieci (CAPEX)

Porównanie nakładów inwestycyjnych pokazuje, że **włączenie węzłów pośrednich** jest rozwiązaniem ekonomicznie korzystniejszym od zagęszczania liczby bram dostępowych. Z zestawienia w tab. 7.1:

- 2 GW zwiększa koszt instalacji o ok. +39%,
- 3 GW – o ok. +78%,
- natomiast 1 GW + 2 RL – jedynie o ok. +6,2%.

Jednocześnie, jak pokazano w sekcji 7.2.1, skuteczność dzienna w wariantcie **1 GW + 2 RL** utrzymuje się na poziomie porównywalnym z **3 GW**. Zatem spełniony jest warunek opłacalności (1.2)–(1.3): dzięki RL uzyskujemy wysokie pokrycie i skuteczność przy istotnie niższych nakładach niż w przypadku gęstszej sieci GW .

7.2.3 Bilans energetyczny

Wyniki przeprowadzonych symulacji pokazują, że:

- średnie obciążenie energetyczne ED w scenariuszach z RL pozostaje porównywalne do wariantów bez RL (por. kolumna $\overline{E}_{ED}$ w tab. 7.1),

- kluczowe znaczenie ma wybór mechanizmu retransmisji po stronie *RL*: wariant autorski zapewnia *istotnie niższe* zużycie energii *RL* (rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu μA) w porównaniu z rozwiązaniem opartym na specyfikacji *TS011* (por. kolumna $E_{\text{REL}}^{\text{max}}$ w tab. 7.1).

W szczególności, dla konfiguracji 1 GW + 2 RL (autorski) uzyskano $E_{\text{REL}}^{\text{max}} \approx 19.38 \mu\text{A}$, podczas gdy w wariantcie alternatywnym wykorzystującym retransmisję przez łącze LTE średnie zużycie prądu wynosiło około $135 \mu\text{A}$. Oznacza to ponad sześciokrotnie niższy pobór energii przez *RL*, przy jednoczesnym utrzymaniu bardzo wysokiej skuteczności dziennej. Zatem spełniony jest warunek energetyczny (1.4)–(1.5).

7.2.4 Konkluzja

Zestawiając wyniki skuteczności (7.2.1), kosztów budowy (7.2.2) oraz bilansu energetycznego (7.2.3) stwierdzam, że wszystkie warunki (1.1)–(1.5) są spełnione. Teza pracy została potwierdzona: zastosowanie węzłów pośrednich w sieciach LoRaWAN *zwiększa efektywność transmisji* w porównaniu z konfiguracjami bez *RL*, a przy odpowiednio dobranym mechanizmie retransmisji wg zgłoszenia patentowego pozwala uzyskać jednocześnie wysoką skuteczność, niskie koszty inwestycyjne i korzystny bilans energetyczny.

Rozdział 8

Podsumowanie

Teza pracy, zakładająca, że włączenie węzłów pośredniczących zwiększa efektywność sieci *LoRaWAN*, została potwierdzona w przeprowadzonych analizach i symulacjach. W pracy uporządkowano podstawy systemowe *LoRaWAN*, zdefiniowano strategie retransmisji i metryki oceny, a następnie opracowano i wdrożono środowisko symulacyjne obejmujące m.in. model kolizji, propagacji i synchronizacji. Badania w różnych modelach ewaluacji wykazały, że odpowiedni dobór sposobu retransmisji oraz właściwe rozmieszczenie urządzeń pozwalają znacząco zwiększyć odsetek dostarczonych zgłoszeń względem scenariusza bazowego, uzyskując skuteczność zgłoszeń dziennych porównywalną do alternatywnej strategii zagęszczania stacji bazowych. Zaproponowane rozwiązanie z węzłami pośredniczącymi jest znacznie mniej kosztowne w realizacji szczególnie w obszarach granicznych zasięgu i niepełnego pokrycia radiowego. Jednocześnie rozwiązanie to spełnia ograniczenia energetyczne zarówno urządzeń końcowych, jak i węzłów pośrednich. Przy odpowiedniej konfiguracji możliwe jest uzyskanie 5–10 lat pracy przy zasilaniu z baterii węzła pośredniego, przy praktycznie niezmiennym zużyciu energii przez urządzenia końcowe.

W zakresie mechanizmów retransmisji porównałem rozwiązania opracowane przez LoRa Alliance z autorskim podejściem opartym na predefiniowanych slotach czasowych. Przyjęte koncepcje są na tyle odmienne, że nie sposób ich porównać w jednym wymiarze – odpowiadają one na różne potrzeby i warunki brzegowe sieci. Mechanizm LoRa Alliance, oparty na preambułach wybudzających (Wake-up On Radio), ma charakter praktycznie „*plug & play*”: jego zastosowanie nie wymaga znajomości topologii ani dodatkowej konfiguracji. Istotną zaletą jest możliwość odbioru transmisji asynchronicznych (na żądanie), co ma kluczowe znaczenie w przypadku urządzeń działających zdarzeniowo, takich jak sensory zajętości miejsc parkingowych. Dodatkowym atutem jest fakt, że rozwiązanie to stało się częścią specyfikacji *LoRaWAN* i najprawdopodobniej będzie szeroko stosowane praktycznie; na chwilę obecną, według mojej wiedzy, wdrożenia dużej skali wciąż nie używają węzłów pośrednich wg specyfikacji LoRa Alliance, choć w wersjach małoseryjnych dostępne są już urządzenia (np. firmy Actility). Należy natomiast zauważyć ograniczenia rozwiązania w środowiskach z wieloma retransmiterami. Po pierwsze, bez odpowiedniego zarządzania węzłami istnieje ryzyko kolizji wzajemnych. Po drugie, każde urządzenie pośredniczące będzie wybudzane preambułą Wake-up On Radio pochodząca z dowolnego urządzenia.

Rozwiązanie autorskie oparte na predefiniowanych slotach czasowych wyróżnia się minimalnym zakresem zmian po stronie urządzenia końcowego. Nie ma konieczności wysyłania specjalnych preambułów budzących celem „poszukiwania” węzła pośredniego przez urządzenie końcowe – ciężar koordynacji spoczywa na serwerze sieciowym, który, dysponując zgrubną wiedzą o topologii, może wyznaczać urządzenia pośredniczące do „odnalezienia” brakujących urządzeń końcowych. Wymagana modyfikacja w oprogramowaniu urządzenia końcowego polega de facto na doprecyzowaniu szczegółów implementacji. Generator slotów czasowych i generator kanałów są z natury generatorami pseudolosowymi, a proponowana zmiana jedynie uściśla sposób losowania tych wartości. Dzięki całkowitej liniowości zastosowanego generatora rozwiązanie pozostaje w pełni zgodne z wytycznymi protokołu LoRaWAN i wymogami certyfikacji. Mechanizm nie podnosi kosztu energetycznego po stronie urządzenia końcowego, gdyż nie wymaga wysyłania preambułów wybudzających do urządzenia pośredniczącego. Natomiast aby węzeł pośredni mógł skutecznie odnaleźć urządzenie końcowe, musi zostać do tego predestynowany poprzez otrzymanie z serwera unikalnej części ziarna generatora poszukiwanego urządzenia (np. pochodzącej z numeru seryjnego).

Reasumując, przedstawione mechanizmy zwiększania dziennego odsetka dostarczonych zgłoszeń nie są konkurencyjne, lecz komplementarne. Zastosowanie urządzeń pośredniczących w wielu przypadkach zapewnia najlepszy kompromis między zużyciem energii, kosztem wdrożenia a pokryciem węzłów słabych. Dostarczając przy tym efekt zbliżony do dodania kolejnego punktu dostępowego w kontekście pokrycia urządzeń „słabych”.

Wykaz skrótów

3GPP Third-Generation Partnership Project

5G Fifth Generation

ABP Activation By Personalization

ACC Access Number

ACK Acknowledge Radio Frame

ADC Analog Digital Converter

AF Amplify-and-Forward

AFL Application Functional Layer

ADR Adaptive Data Rate

AES-128 Advanced Encryption Standard with fixed block size of 128 bits

AI Artificial Intelligence

AM Amplitude Modulation

ANN Artificial Neural Network

APL Application Layer

AS Application Server

BER Bit Error Rate

BR Border Router

BTS Base Transceiver Station

BW Bandwidth

CAD Channel Activity Detection

CAGR Compound Annual Growth Rate

CBC Cipher Block Chaining

CSS Chirp Spread Spectrum

CF Compress-and-Forward

CR Coding Rate

DC Duty Cycle

DF Decode-and-Forward

DTLS Datagram Transport Layer Security

E2E End-to-End

EAP Extensible Authentication Protocol

ED End Device

eDRX Extended Discontinuous Reception

ELL Extended Link Layer

ETX Expected Transmission Count

eNB evolved Node B

EP431 Technical Specification EP4312388

ERP Effective Radiated Power

EIRP Effective Isotropic Radiated Power

FAN Field Area Network

FSK Frequency-Shift Keying

GFSK Gaussian Frequency Shift Keying

gNB next generation Node B

GW Gateway

HARQ Hybrid automatic repeat request

HES Head-End System

HMI Human Machine Interface

IoT Internet of Things

ISM Industrial Scientific and Medical

IP Internet Protocol

JSON JavaScript Object Notation

LPWAN Low Power Wide Area Network

LDO Low Dropout Regulator

LFN Low-Power FAN Node

LNA Low Noise Amplifier

LNS LoRa Network Server

LOS Line of Sight

LoRaWAN Long Range Wide Area Network

LTE Long Term Evolution

M2M Machine to Machine

MAC Medium Access Control

MAE Mean Absolute Error

MBAL M-Bus Adaptation Layer

MCL Maximum Coupling Loss

MF Multipath Fading

MRHOF Minimum Rank with Hysteresis Objective Function

MIMO Multiple-Input Multiple-Output

MSE Mean Squared Error

MT Mersenne Twister

NB-IoT Narrowband Internet of Things

NFC Near Field Communication

NTN Non-Terrestrial Networks

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OMS Open Metering System

OTAA Over-The-Air Activation

PDR Packet Delivery Ratio

PER Packet Error Rate

PHY Physical Layer

PL Pathloss

PLL Phase-Locked Loop

PSK Phase Shift Keying

PSM Power Saving Mode

RL Relay

RNG Random Number Generator

RSSI Received Signal Strength Indicator

RTC Real Time Clock

SF Spreading Factor

SNR Signal to Noise Ratio

TCXO Temperature Compensated Crystal Oscillator

TCP Transmission Control Protocol

TDMA Time Division Multiple Access

TLS Transport Layer Security

ToA Time On Air

TPL Transport Layer

TS011 Technical Specification No. 11

QAM Quadrature Amplitude Modulation

Q-Q Quantile–Quantile

Wi-SUN Wireless Smart Utility Networks

WIZE Standardized protocol prepared by Wize Alliance in 2017

wM-Bus wireless Meter Bus

WOR Wake-up On Radio

WSN Wireless Sensor Network

FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum

6LoWPAN IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks

RPL Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

CSMA/CA Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CCM Counter with CBC-MAC

LTE-M Long Term Evolution for Machines

TDoA Time Difference of Arrival

TD AoA Time Difference and Angle of Arrival

AoA Angle of Arrival

GNSS Global Navigation Satellite System

PPS Pulse Per Second

UWB Ultra-Wideband

TVWS TV White Spaces

ML Machine Learning

MLE Maximum Likelihood Estimation

GDOP Geometric Dilution of Precision

NLOS Non-Line of Sight

QoS Quality of Service

Spis rysunków

1.1	Porównanie czterech wariantów architektury sieci LoRaWAN.	5
2.1	LPWAN na tle innych technologii radiowych. Zestawienie własne.	13
2.2	Sekwencja retransmisji w WiSUN.	15
2.3	Sekwencja retransmisji w Wize/wM-Bus.	16
2.4	Topologia Wi-SUN.	16
2.5	Topologia Wize / wM-Bus.	16
3.1	LoRa up-chirp z zaznaczonymi przykładami symboli i miejscami skoku dla $B = 125 \text{ kHz}$, $SF = 7$, $T_s \approx 1.0 \text{ ms}$	26
3.2	LoRa down-chirp z zaznaczonymi przykładami symboli i miejscami skoku dla $B = 125 \text{ kHz}$, $SF = 7$, $T_s \approx 1.0 \text{ ms}$	27
3.3	Wpływ współczynnika rozpraszania na budżet linku dla pasm od 125 do 500kHz w modulacji LoRa.	29
3.4	Liczba odebranych ramek radiowych w funkcji SNR dla różnych parametrów SF . Wykres na bazie danych tygodniowych zebranych z instalacji ≈ 62 tysięcy urządzeń.	31
3.5	Rozkład zapasu czułości Δ dla współczynnika rozpraszania $\in \{8 \dots 11\}$	32
4.1	Analiza widmowa sygnału w paśmie LoRa EU868.	37
4.2	Analiza empiryczna zjawiska wygaszania wielodrogowego.	38
4.3	Rozkład RSSI dla wybranych urządzeń w zależności od częstotliwości kanału.	40
4.4	Relacja P_N , RSSI i SNR wyznaczona teoretycznie. Dla $SF=12$, $BW=125\text{kHz}$	42
4.5	Relacja RSSI do SNR na bazie wdrożenia o wysokim poziomie interferencji.	43
4.6	Średni stosunek SNR odbieranych urządzeń przez pojedynczą bramę <i>LoRa</i>	44
4.7	Średnia wartość $RSSI$ odbieranych urządzeń przez pojedynczą bramę <i>LoRa</i>	44
4.8	Wykres punktowy zależności średniego SNR od średniego $RSSI$	44
4.9	Zależność PDR od wartości SNR z dopasowaną funkcją logistyczną.	45
4.10	Zależność prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu od średniej wartości SNR dla różnych wartości SF	46
4.11	Przebiegi poboru prądu podczas nadawania z mocą +10dBm (<i>uplink</i>) oraz w oknach nasłuchowych RX1/RX2.	52
4.12	Zmiany prądu uśpienia i nadawania w funkcji temperatury. Dane na bazie pomiarów własnych.	52

4.13	Rozrzut prądu nadawania (a) i uśpienia (b) @ 25 °C dla partii $\approx 33,000$ urządzeń; dopasowanie rozkładami normalnymi. Dane na bazie pomiarów własnych.	53
4.14	Wpływ temperatury na pojemność baterii (profil rozładowania impulsowy zbliżony do pracy w sieci LoRaWAN).	54
5.1	Diagram sekwencji retransmisji według dokumentu TS011 (LoRaWAN Relay)	58
5.2	Zależności czasowe transmisji. Źródło specyfikacja TS011.	59
5.3	Prawdopodobieństwo całkowitej porażki retransmisji dla różnej liczby węzłów pośrednich. Liczba kanałów $K = 8$. Wartości wyznaczone metodą Monte Carlo, źródło - opracowanie własne.	59
5.4	Topologia węzłów pośrednich w sieci LoRaWAN	63
5.5	Diagram sekwencji wg zgłoszenia patentowego EP4312388	64
6.1	Przykładowy widok symulatora sieci LoRaWAN w środowisku graficznym.	74
6.2	Scenariusze kolizji: capture, preempcja i zakłócenie wzajemne	76
6.3	Histogram RSSI oraz jego dopasowanie funkcją rozkładu normalnego dla wybranego węzła.	78
6.4	Zmienność RSSI w danych rzeczywistych (rok 2024).	80
6.5	Zmienność RSSI – dane syntetyczne generowane przez model generatywny	81
6.6	Zmienność RSSI – dane syntetyczne generowane przez model z rozkładu normalnego	81
6.7	Wykresy Q–Q: porównanie danych rzeczywistych z danymi syntetycznymi. Lewy wykres dla generatora ANN prawy dla rozkładu normalnego.	82
6.8	Zestawienie wyników modeli (ANN i rozkład) względem danych rzeczywistych w ujęciu rocznym	82
6.9	Harmonogram okna nasłuchu z uwzględnieniem dryftu zegara czasu rzeczywistego.	85
6.10	Zmierzona niedokładność pracy zegara czasu rzeczywistego dla wybranych urządzeń baterijnych. Pomiary własne.	85
6.11	Ramki zgłoszeniowe w ujęciu dobowym	88
7.1	Przykłady kolejnych uruchomień scenariusza bazowego oraz wizualizacja skumulowanego rozmieszczenia urządzeń końcowych po 30 uruchomieniach symulacji	93
7.2	Skuteczność dzienna / dzienne zużycie energii dla zadanej liczby wysłanych pakietów per okno zgłoszeniowe N . Scenariusz bazowy.	94
7.3	Średnia skuteczność odczytów dziennych dla $T_{\text{window}} = 12\text{h}$, w postaci wykresu pudełkowego i zbioru punktów będących średnimi wartościami dla wszystkich urządzeń z poszczególnych uruchomień symulacji.	94
7.4	Wizualizacja skumulowanego rozmieszczenia urządzeń końcowych wg scenariusza z węzłami pośrednimi ze zwiększoną liczbą transmitowanych ramek i wydłużonymi oknami transmisji. Scenariusz bazowy.	95
7.5	Liczba operacji <i>re-join</i> oraz zajętość kanału komunikacyjnego ρ_c . Dla $T_{\text{window}} = 12\text{h}$	95

7.6	Mapa średniego współczynnika SF dla transmisji z danego punktu sieci. Scenariusz bazowy.	96
7.7	Przebiegi czasowe sterowania parametrem SF dla różnych urządzeń końcowych.	97
7.8	Średnia skuteczność odczytów dziennych w funkcji liczby urządzeń końcowych.	98
7.9	Symulacja rozbudowana o dodatkowy punkt dostępowy G2 oraz dodatkowe 2 punkty dostępowe.	98
7.10	Wizualizacja pokrycia dla konfiguracji z dwoma węzłami pośrednimi, $N = 1$, $T_{\text{window}} = 3 \text{ h}$, $SF = 12$; schemat retransmisji zgodny z mechanizmem opartym na predefiniowanych slotach czasowych.	99
7.11	Wizualizacja pokrycia dla konfiguracji z dwoma węzłami pośrednimi, $N = 1$ oraz $N = 2$, $T_{\text{window}} = 3 \text{ h}$, $SF = 12$; schemat retransmisji oparty na predefiniowanych czasach transmisji.	100
7.12	Wizualizacja prawdopodobieństwa dostarczenia pakietu z urządzeń końcowych dla wartości współczynnika rozpraszania $SF = 12$ oraz $SF = 9$	100
7.13	Porównanie prawdopodobieństwa dostarczenia pojedynczego pakietu dla wybranych scenariuszy testowych.	102

Bibliografia

- [14] *Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/758 z dnia 29 kwietnia 2015 r. w sprawie wymogów dotyczących homologacji pojazdów silnikowych w odniesieniu do systemu eCall opartego na numerze 112 oraz zmieniające dyrektywę 2007/46/WE*. 29 kw. 2015. (Term. wiz. 26.08.2025).
- [15] IoT Analytics. *Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion*. Wrz. 2024. URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (term. wiz. 15.08.2025).
- [16] Transforma Insights. *Global IoT connections forecast to rise above 40 billion in 2034*. Czer. 2025. URL: <https://transformainsights.com/news/global-iot-connections-forecast-above-40-billion-2034> (term. wiz. 15.08.2025).
- [17] Ericsson. *IoT connections outlook — Ericsson Mobility Report*. 2025. URL: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/iot-connections-outlook> (term. wiz. 15.08.2025).
- [18] GSMA. *Mobile IoT LPWA — LTE-M & NB-IoT Commercial Launches*. Lip. 2025. URL: <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/technologies/internet-of-things/mobile-iot-commercial-launches/> (term. wiz. 15.08.2025).
- [19] Semtech Corporation. *Semtech Receives 2024 IoT Excellence Award*. Mar. 2025. URL: <https://www.semtech.com/company/press/receives-2024-iot-excellence-award> (term. wiz. 15.08.2025).
- [20] LoRa Alliance. *LoRa Alliance Releases 2024 Annual Report: LoRaWAN Expanded Market Leadership with Strong Global Traction*. Lut. 2025. URL: <https://loro-alliance.org/loro-alliance-press-release/lorawan-expanded-market-leadership-with-strong-global-traction/> (term. wiz. 15.08.2025).
- [21] LoRa Alliance. *LoRa Alliance White Paper: Regulation for LoRaWAN Satellite — August 2025*. LoRa Alliance. Sierp. 2025. URL: <https://resources.lora-alliance.org/home/loro-alliance-white-paper-regulation-for-lorawan-satellite-august2025> (term. wiz. 27.08.2025).
- [22] LoRa Alliance. *NTN LoRaWAN Bringing Satellite IoT the Next Level*. LoRa Alliance. Czer. 2024. URL: <https://resources.lora-alliance.org/document/ntn-lorawan-bringing-satellite-iot-the-next-level> (term. wiz. 27.08.2025).
- [23] LoRa Alliance. *NTN LoRaWAN Expanding Connectivity Beyond Terrestrial Limits*. LoRa Alliance. Maj 2024. URL: <https://resources.lora-alliance.org/home/ntn-lorawan-expanding-connectivity-beyond-terrestrial-limits> (term. wiz. 27.08.2025).

- [24] International Telecommunication Union (ITU). „Session 246 – The next decade of urban digitalisation”. W: *WSIS Forum 2025: Smarter digital transformation for sustainable development*. International Telecommunication Union, 2025.
- [25] Mamour Diop i Congduc Pham. „Increased flexibility in long-range IoT deployments with transparent and light-weight 2-hop LoRa approach”. W: *2019 Wireless Days (WD)*. 2019, s. 1–6.
- [26] Olivier Flauzac, Joffrey Hérard, Franck Nolot i Philippe Cola. „A Fault Tolerant LoRa/LoRaWAN Relay Protocol Using LoRaWAN Class A Devices”. W: *Ad-hoc Networks and Wireless (ADHOC-NOW 2020)*. T. 12416. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2020.
- [27] Edouard Lumet i in. „LoRaWAN Relaying: Push the Cell Boundaries”. W: *Proceedings of the 24th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM '21)*. 2021, s. 217–220.
- [28] Wikipedia – Wolna Encyklopedia. *Centralne twierdzenie graniczne*. 2025. URL: https://pl.wikipedia.org/wiki/Centralne_twierdzenie_graniczne (term. wiz. 16.08.2025).
- [29] Sture Holm. „A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure”. W: *Scandinavian Journal of Statistics* 6.2 (1979), s. 65–70.
- [10] A Frankiewicz, K Grochla i Z Łaskarzewski. „A method of transmitting data, a relay and end-device”. EP 4312388 A1. Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Pan Aiut Spolka Z Ograniczona Odpowiedzialnoscia. 31 sty. 2024.
- [30] LoRa Alliance. *LoRaWAN Relay Specification*. Wrz. 2022. URL: <https://resources.lora-alliance.org/document/ts011-1-0-0-relay> (term. wiz. 15.08.2025).
- [31] LoRa Alliance. *LoRa Alliance® announces new Relay feature that extends LoRaWAN® coverage for metering, utilities, smart cities and industrial applications*. Paź. 2022. URL: <https://resources.lora-alliance.org/lora-alliance-blog/lora-alliance-announces-new-relay-feature-that-extends-lorawan-coverage-for-metering-utilities-smart-cities-and-industrial-applications> (term. wiz. 26.08.2025).
- [1] A. Frankiewicz i K. Grochla. „Using Time Series Analysis to Generate Synthetic Traffic Data for LoRa Network Simulation”. W: *Advances in Artificial Intelligence Research: Proceedings of the 6th Polish Conference on Artificial Intelligence (PP-RAI 2025)*. Red. Beata Zielosko i in. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Katowice, Poland: Springer Nature, kw. 2025.
- [2] A. Frankiewicz i K. Grochla. „Performance evaluation of relay mechanizm TS011_1.0.0 in LoRaWAN networks”. W: *Konferencja Radiokomunikacji i Teleinformatyki (KRiT2024)*. Poznań, Poland, wrz. 2024.

- [3] Artur Frankiewicz. „Self-adapting algorithm for transmission power control in integrated meter reading systems based on wireless sensor networks”. W: *Computer Networks. CN 2011*. T. 160. Communications in Computer and Information Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, s. 436–445.
- [4] Michał Gorawski, Rafał Marjasz, Krzysztof Grochla i Artur Frankiewicz. „Comparative Analysis of Energy Consumption in Simulated LoRa Water Meter Reconfiguration vs. Real-world Readings”. W: *Proceedings of the 2024 IFIP Networking Conference*. Thessaloniki, Greece, czer. 2024.
- [5] Anna Strzoda, Krzysztof Grochla, Artur Frankiewicz i Zbigniew Laskarzewski. „Measurements and Analysis of Large Scale LoRa Network Efficiency”. W: *2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. 2022, s. 818–823.
- [6] Michał Gorawski, Krzysztof Grochla, Rafał Marjasz i Artur Frankiewicz. „Energy Minimization Algorithm for Estimation of Clock Skew and Reception Window Selection in Wireless Networks”. W: *Sensors* 21.5 (2021), s. 1768.
- [7] Artur Frankiewicz i in. „LP WAN Gateway Location Selection Using Modified K-Dominating Set Algorithm”. W: *Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*. Springer International Publishing, 2021, s. 209–223.
- [11] Artur Frankiewicz i Marek Gabryś. „Method for digital wireless communication through a barrier made of conductive material, system for performing such communication, and system for monitoring cylinder content”. European Patent EP4096105C0. 9 lip. 2025.
- [12] Artur Frankiewicz i Marek Gabrys. „Method and System for Measuring a Level of Liquid Inside a Hermetically Closed Container”. Patent WO2022249031A1. 1 grud. 2022.
- [13] Artur Frankiewicz i Marek Gabryś. „Container for Pressurized Liquid Gas and Liquid Level Measuring System”. Patent Application US20250189360A1. 12 czer. 2025.
- [8] Artur Frankiewicz i Rafał Cupek. „Smart passive infrared sensor - Hardware platform”. W: *Proceedings of the 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013)*. Vienna, Austria: IEEE, 2013, s. 7543–7547.
- [32] *Communication systems for meters — Part 8: Adaptation layer*. Angielski. European Standard EN 13757-8:2023. European Committee for Standardization (CEN), 19 wrz. 2023. (Term. wiz. 27.08.2025).
- [33] *Protokół komunikacyjny SMART-GAS*. Standard techniczny ST-IGG-0201:2023. Warszawa: Izba Gospodarcza Gazownictwa (IGG), 22 list. 2023. (Term. wiz. 27.08.2025).
- [34] E. C. van der Meulen. „Three-terminal communication channels”. W: *Advances in Applied Probability* 3.1 (1971), s. 120–154.
- [35] T. M. Cover i A. A. El Gamal. „Capacity theorems for the relay channel”. W: *IEEE Transactions on Information Theory* 25.5 (1979), s. 572–584.

- [36] M. Gastpar, G. Kramer i P. Gupta. „The multiple-relay channel: Coding and antenna-clustering capacity”. W: *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory*. 2002, s. 136.
- [37] J. N. Laneman, D. N. C. Tse i G. W. Wornell. „Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior”. W: *IEEE Transactions on Information Theory* 50.12 (2004), s. 3062–3080.
- [38] A. Adinoyi i H. Yanikomeroglu. „Cooperative relaying in multi-antenna fixed relay networks”. W: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 6.2 (2007), s. 533–544.
- [39] B. Xia, Y. Fan, J. Thompson i H. V. Poor. „Buffering in a three-node relay network”. W: *IEEE Transactions on Wireless Communications* 7.11 (2008), s. 4492–4496.
- [40] B. Tavli i W.B. Heinzelman. „Energy and spatial reuse efficient network-wide real-time data broadcasting in mobile ad hoc networks”. W: *IEEE Transactions on Mobile Computing* 5.11 (2006), s. 1297–1312.
- [41] Winnie Louis Lee. „Flexible-schedule-based TDMA protocols for supporting fault-tolerance, on-demand TDMA slot transfer, and peer-to-peer communication in WSN”. Prac. dokt. University of Western Australia, 2008.
- [42] Carlo Pielli. „Channel Access in Wireless Networks: Protocol Design of Energy-Aware Schemes for the IoT and Analysis of Existing Technologies”. Prac. dokt. University of Padova, 2018.
- [43] Wim Torfs. „Implementation and evaluation of timeliness in wireless networks: to be or not to be-on time”. Prac. dokt. University of Antwerp, 2019.
- [44] U. Uyoata, J. Mwangama i R. Adeogun. „Relaying in the Internet of Things (IoT): A survey”. W: *IEEE Access* (2021).
- [45] G. Stanco, A. Botta i F. Frattini. „On the Performance of IoT LPWAN Technologies: The Case of Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT”. W: *2022 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2022, s. 983–988.
- [46] Samar A, J. Sidharth i C. Minghua. „Amplify-and-forward in wireless relay networks”. W: (2011), s. 311–315.
- [47] K. Singh, A. Gupta i T. Ratnarajah. „QoS-driven energy-efficient resource allocation in multiuser amplify-and-forward relay networks”. W: *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks* (2017).
- [48] S. A. Jafar i K. S. Gomadam. „Duality and rate optimization for multiple access and broadcast channels with amplify-and-forward relays”. W: *IEEE Transactions on Information Theory* (2007).
- [49] S. Simoens, O. Muñoz-Medina i J. Vidal. „Compress-and-forward cooperative MIMO relaying with full channel state information”. W: *IEEE Transactions on Signal Processing* (2009).
- [50] S. Bagheri, F. Verde i D. Darsena. „Randomized decode-and-forward strategies for two-way relay networks”. W: *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2011).

- [51] R. Blasco-Serrano. „Coding strategies for compress-and-forward relaying”. Prac. dokt. KTH Royal Institute of Technology, 2010.
- [52] W. Ding i M. Shikh-Bahaei. „A partial compress-and-forward strategy for relay-assisted wireless networks based on rateless coding”. W: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2023).
- [53] J. Haghighat i W. Hamouda. „Decode-compress-and-forward with selective-cooperation for relay networks”. W: *IEEE Communications Letters* (2012).
- [54] D. Kern. *On implementation aspects of decode and forward and compress and forward relay protocols*. Spraw. tech. University of Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [55] LoRa Alliance. *LoRaWAN Relay Specification*. Wrz. 2024. URL: <https://resources.lora-alliance.org/document/ts011-1-0-1-relay> (term. wiz. 15.08.2025).
- [56] P. M. Evjen. *Wize Protocol for LPWAN (White Paper WP016, Rev. 1.0)*. Spraw. tech. Radiocrafts AS, 2018.
- [57] OMS Group. *Open Metering System Specification, Volume 1: General, v2.4.1*. 2024. URL: https://oms-group.org/wp-content/uploads/2024/05/OMS-Spec_Vol1_General_v241.pdf (term. wiz. 28.09.2025).
- [58] Maciej Nikodem, Paweł Róžański, Tomasz Biernacki i Krzysztof Korytkowski. „DASH7 Alliance Protocol in Monitoring Applications”. W: *International Conference on Computer Networks (CN)*. 2015, s. 51–60.
- [59] Ingenu. *How RPMA Works*. 2015. (Term. wiz. 28.09.2025).
- [60] Hasan Alqurashi i Fatma Bouabdallah. „SCAP SigFox: A Scalable Communication Protocol for Low-Power Wide-Area IoT Networks”. W: *Sensors* 23.7 (2023), s. 3732.
- [61] Joao Quispe, Carlos Aguilar, Hiroshi Tanaka i Ryuji Kohno. „Analysis of Wi-SUN FAN Network Formation Time”. W: *Sensors* 24.? (2024), ?
- [62] Andrzej Bęben, Arkadiusz Bąk i Marcin Sosnowski. „Efficient relay node management method for BLE MESH networks”. W: *International Journal of Electronics and Telecommunications* 66.1 (2020), s. 29–35.
- [63] Semtech Corporation. *AN1200.22 LoRa Modulation Basics*. Application Note AN1200.22. Semtech, 2015.
- [64] F. Adelantado i in. „Understanding the Limits of LoRaWAN”. W: *IEEE Communications Magazine* 55.9 (2017).
- [65] Kamil Książek i Krzysztof Grochla. „Flexibility Analysis of Adaptive Data Rate Algorithm in LoRa Networks”. W: *2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. 2021, s. 1393–1398.
- [66] Jan Pospisil, Radek Fujdiak i Konstantin Mikhaylov. „Investigation of the Performance of TDoA-Based Localization Over LoRaWAN in Theory and Practice”. W: *Sensors* 20.19 (2020), s. 5464.

- [9] Konrad Połys, Krzysztof Grochla, Artur Frankiewicz i Michał Gorawski. „Accuracy of UWB Location Tracking Devices When on the Move”. W: *International Conference on Computer Networks (CN 2019)*. T. 1039. Communications in Computer and Information Science. Springer, 2019, s. 233–241.
- [67] Maciej Nikodem, Marcin Nowicki i Krzysztof Korytkowski. „Bluetooth Low Energy indoor localization for large industrial areas and limited infrastructure”. W: *Ad Hoc Networks* 139 (2023), s. 103083.
- [68] Noori Bni Lam i in. „LoRay: AoA Estimation System for Long Range Communication Network”. W: *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2021).
- [69] Michiel Aernouts, Noori Bni Lam, Rafael Berkvens i Maarten Weyn. „TDAoA: A Combination of TDoA and AoA Localization with LoRaWAN”. W: *Internet of Things* 11 (2020), s. 100236.
- [70] Atul Bansal i in. „OwLL: Accurate LoRa Localization using the TV Whitespaces”. W: *Proceedings of the 20th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. 2021, s. 148–162.
- [71] Dongfang Guo i in. „ILLOC: In-Hall Localization with Standard LoRaWAN Uplink Frames”. W: *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies* 6.1 (2022), s. 1–26.
- [72] Semtech Corporation. *SX1303 LoRa Core Digital Baseband Chip for Gateways — Datasheet Rev 1.2*. 2020. URL: https://www.mouser.com/pdfDocs/Semtech_DS_SX1303_W_APP_V12.pdf.
- [73] Devesh Katta. *Enhancing Asset Tracking with the LoRa SX1303 Fine Timestamp Feature*. 2020. URL: <https://blog.semtech.com/using-the-lora-sx1303-fine-timestamp-feature-to-enhance-asset-tracking>.
- [74] *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901)*. Spraw. tech. Wer. v16.1.0. 3GPP/ETSI, 2020.
- [75] LoRa Alliance. *LoRaWAN Regional Parameters*. Spraw. tech. RP002-1.0.3. LoRa Alliance, 2020.
- [76] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. 4 wyd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- [77] *IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas*. Spraw. tech. Std 145-2013. 2014.
- [78] Harry Nyquist. „Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors”. W: *Physical Review* 32.1 (1928), s. 110–113.
- [79] Carlos F. Dias, Fernando R. C. Araújo i Mário M. B. S. Lima. „Bit Error Rate Closed-Form Expressions for LoRa Systems”. W: *Sensors* 19.22 (2019), s. 4820.

- [80] R. A. Shafik, M. S. Rahman, A. R. Islam i N. S. Ashraf. „On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics”. W: *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2006, s. 408–411.
- [81] Fatma Benkhelifa, Yathreb Bouazizi i Julie A. McCann. „How Orthogonal is LoRa Modulation?” W: *IEEE Internet of Things Journal* 9.20 (2022), s. 19928–19944.
- [82] Shengkai Yu i in. „Revolutionizing LoRa Gateway with XGate: Scalable Concurrent Transmission Across Massive Logical Channels”. W: *Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*. ACM, 2024.
- [83] Zhiwei Wang i in. „Online Concurrent Transmissions at LoRa Gateway”. W: *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*. IEEE, 2020, s. 1698–1707.
- [84] Cong Pham i Mohammad Ehsan. „Dense Deployment of LoRa Networks: Expectations and Limits of Channel Activity Detection and Capture Effect for Radio Channel Access”. W: *Sensors* 21.3 (2021), s. 825.
- [85] CEPT Electronic Communications Committee (ECC). *ECC Recommendation 70-03: Relating to the use of Short Range Devices (SRD)*. Spraw. tech. ECC/REC/(70-03). European Conference of Postal i Telecommunications Administrations (CEPT), 2024.
- [86] Kaushik Roy, Saibal Mukhopadhyay i Hamid Mahmoodi-Meimand. „Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer CMOS circuits”. W: *Proceedings of the IEEE* 91.2 (2003), s. 305–327.
- [87] Moon-Cheol Jeong i in. „Analysis of gate leakage current in CMOS devices”. W: *Solid-State Electronics* 54.2 (2010), s. 187–193.
- [88] Shekhar Borkar. „Design Challenges of Technology Scaling”. W: *IEEE Micro* 19.4 (1999), s. 23–29.
- [89] M. Matsumoto i T. Nishimura. „Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator”. W: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 8.1 (1998), s. 3–30.
- [90] A. Ramadhani i F. Kuipers. „When LoRaWAN Frames Collide”. W: *Proceedings of the 11th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization (WiTECH '18)*. ACM, 2018, s. 89–97.
- [91] M. Hata. „Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services”. W: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 29.3 (1980), s. 317–325.
- [92] Ming Chen i in. „AI-Enhanced Generalizable Scheme for Path Loss Prediction in LoRaWAN”. W: *IEEE Internet of Things Journal* 11.8 (2023), s. 14593–14606.
- [93] Hui Zhang i in. „An Artificial Intelligence Radio Propagation Model Based on Geographical Information”. W: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 70.12 (2022), s. 12049–12060.

- [94] European Cooperative for Scientific and Technical Research (COST 231). „Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands”. W: *COST 231 TD(90) 119 Rev. 2, The Hague*. 1991.
- [95] Pei Tian i in. „Environmental Impact on the Long-Term Connectivity and Link Quality of an Outdoor LoRa Network”. W: *Proceedings of the 19th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '21)*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, s. 565–568.
- [96] Shamim Ahmed i in. „Vegetation Effects on LoRa-Based Wireless Sensor Communication for Remote Monitoring of Automatic Orchard Irrigation Status”. W: *IoT 6.1 (2025)*, s. 2.
- [97] Gerhard Hasslinger i Oliver Hohlfeld. „The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet”. W: *14th GI/ITG Conference - Measurement, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB)*. Dortmund, Germany, 2008, s. 1–15.
- [98] Bartłomiej Płaczek. „A Multi-Agent Prediction Method for Data Sampling and Transmission Reduction in IoT Sensor Networks”. W: *Sensors 23.20 (2023)*, s. 8478.
- [99] Seiko Epson Corporation. *MC-146 / MC-146 Type: kHz Range Crystal Unit*. 1998. (Term. wiz. 01.09.2025).
- [100] ECS Inc. International. *ECS-TXO-20CSMV4: Temperature Compensated Crystal Oscillator (TCXO) Datasheet*. 2025. (Term. wiz. 01.09.2025).
- [101] Nihon Dempa Kogyo Co., Ltd. (NDK). *NT2016SA 26 MHz TCXO: Temperature Compensated Crystal Oscillator Datasheet*. 2011. (Term. wiz. 01.09.2025).
- [102] Texas Instruments. *MSP430 32-kHz Crystal Oscillators (Rev. D)*. Spraw. tech. SLAA322D. Texas Instruments, lip. 2017. (Term. wiz. 01.09.2025).
- [103] Microchip Technology Inc. *AT03155: Real-Time-Clock Calibration and Compensation*. Spraw. tech. 42251A–SAM–03/2014. Atmel / Microchip Technology, mar. 2014. (Term. wiz. 01.09.2025).
- [104] Microchip Technology Inc. *AN2711: RTCC Calibration and Compensation on AVR MCUs*. Spraw. tech. DS00002711A. Microchip Technology, 2018. (Term. wiz. 01.09.2025).
- [105] Wikipedia contributors. *Arrival theorem — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. 2025. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Arrival_theorem.
- [106] *Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*. Recommendation ITU-R P.1411-10. International Telecommunication Union, 2019.