

dr hab. inż. Andrzej Bęben
Instytut Telekomunikacji i Cyberbezpieczeństwa
Politechnika Warszawska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Zwiększenie efektywności transmisji z wykorzystaniem węzłów pośrednich w sieciach LoRa

Autor rozprawy: mgr inż. Artur Frankiewicz

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

Dziedzina rozprawy: Nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: Informatyka techniczna i telekomunikacja

1 Syntetyczne przedstawienie rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Frankiewicza, pt. „Zwiększenie efektywności transmisji z wykorzystaniem węzłów pośrednich w sieciach LoRa” została opracowana w Instytucie Informatyki Technicznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk w ramach Wspólnej Szkoły Doktorskiej. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Krzysztof Grochła, prof. IITiS PAN.

Celem rozprawy jest opracowanie nowej, efektywnej metody przekazu danych w bezprzewodowych sieciach LoRaWAN zastosowanych w środowisku miejskim, która bazującej na wykorzystaniu węzłów pośredniczących (retransmiterów) dla zapewnienia komunikacji z urządzeniami końcowymi znajdującymi się poza zasięgiem lub na jego granicy. Opracowana metoda pozwala na zwiększenie prawdopodobieństwa dostarczenia przesyłanych wiadomości i jednocześnie optymalizuje zużycie energii urządzeń końcowych i retransmiterów, które są zasilane z baterii.

W rozprawie zaproponowano autorską metodę retransmisji przeznaczoną dla sieci LoRaWAN, która wykorzystuje algorytm sterowania transmisją urządzeń końcowych w kontrolowanych oknach czasowych. Proponowana metoda umożliwia zwiększenie efektywności działania sieci LoRaWAN wykorzystującej stacje pośredniczące w porównaniu do metody bazującej na asynchronicznym wybudzaniu urządzeń końcowych przedstawionej w standardzie TS011 opublikowanym przez LoRa Alliance. Proponowana przez Autora metoda, zakładając synchronizację zegarów urządzeń, pozwala na zwiększenie prawdopodobieństwa dostarczenia przesyłanych wiadomości oraz optymalizację zużycia energii zasilanych z baterii urządzeń końcowych i retransmiterów. Przedstawione w rozprawie wyniki analiz i badań symulacyjnych potwierdziły, że zastosowanie w sieci LoRaWAN właściwie rozmieszczonych węzłów pośredniczących wraz z zastosowaniem proponowanej w rozprawie metody sterowania transmisją pozwala na osiągnięcie znacznej przewagi względem rozwiązań alternatywnych. Metoda ta jest szczególnie efektywna w przypadku cyklicznie

przesyłanych wiadomości. Taki profil ruchowy jest charakterystyczny dla systemów akwizycji danych z urządzeń pomiarowych w środowisku miejskim.

W ramach rozprawy:

1. Przedstawiono wnikliwą analizę aktualnego stanu badań dotyczących techniki LPWAN oraz mechanizmów retransmisji stosowanych w sieciach bezprzewodowych. W szczególności szczegółowo omówiono standardy stosowane w sieciach bezprzewodowych o topologii gwiazdy (Wize / Wireless M-Bus) oraz sieci bezprzewodowych wykorzystujących topologie kratowe (mesh) (Wi-SUN FAN).
2. Sformułowano założenia dotyczące modelowania systemu LoRaWAN oraz zdefiniowano zbiór metryk dotyczących oceny efektywności pracy sieci, obejmujący m.in. prawdopodobieństwo dostarczenia pakietu w kierunku „w górę” P_{UL} (uplink), wskaźnik odczytu dziennego ($P_{\geq 1/d}$), wypełnienie medium (ρ_{air} i ρ_c) oraz zużycie energii wyrażone w mAh dla urządzeń końcowych (ED) i retransmiterów (RL), w tym ruterów LTE. Ponadto, zdefiniowano metryki dotyczące kosztu budowy sieci i jej utrzymania (CAPEX+OPEX).
3. Przeprowadzono badania analityczne i eksperymenty dotyczące aspektów radiowej warstwy fizycznej zastosowanej w sieci LoRaWAN, uwzględniając w tym zjawiska zaników wielodrogowych (Multipath Fading) przy użyciu modelowania statystycznego (rozkłady Rayleigha i Rice'a), ortogonalności współczynników rozpraszania SF (Spreading Factor) oraz mechanizmu adaptacji parametrów transmisji ADR (Adaptive Data Rate) stosowanego w sieci LoRaWAN. W eksperymentach wykorzystano testową parę urządzeń LoRa oraz także dane pomiarowe za 100 dni pracy produkcyjnej instalacji sieci LoRa obejmującej 670 urządzeń.
4. Zaproponowano oryginalny mechanizm komunikacji z urządzeniem pośredniczącym RL oparty na równomiernie rozłożonych chwilach transmisji urządzeń końcowych w predefiniowanych oknach czasowych. Urządzenia pośredniczące wykorzystują dedykowane kanały do przekazu danych co zapewnia izolację od pozostałego ruchu. Zaproponowany mechanizm wymaga znajomości topologii sieci oraz ścisłej synchronizacji chwil nadawania poszczególnych urządzeń końcowych.
5. Opracowano narzędzie symulacyjne sieci LoRaWAN wykorzystując pakiet OMNet++ w którym zaimplementowano proponowaną metodę przekazu danych z wykorzystaniem węzłów pośredniczących, a także modele propagacji sygnału bazujące na modelach wspieranych metodami uczenia maszynowego, kolizji w warstwie fizycznej oraz metody synchronizacji zegarów.
6. Przeprowadzono kompleksowe badania efektywności, udowadniając sformułowane uprzednio tezy pracy poprzez analizę wskaźników pokrycia sieci, nakładów inwestycyjnych i operacyjnych (CAPEX/OPEX) oraz całkowitego bilansu energetycznego systemu.

Rozprawa ma charakter praktyczny z bardzo dobrą podbudową analityczną dotyczącą działania urządzeń i sieci LoRa. Uzyskane wyniki mogą być bezpośrednio zastosowane w praktyce, o czym świadczą między innymi patenty uzyskane przez Autora oraz przygotowane kolejne zgłoszenia patentowe.

Rozprawa jest napisana w języku polskim, zawiera 126 stron, obejmuje 8 rozdziałów i zawiera odwołania do 106 dokumentów źródłowych. Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane na międzynarodowych konferencjach oraz w renomowanych czasopismach

znajdujących się na aktualnej liście MNiSW, m.in. IEEE IWCMC, IFIP Networking, Computer Networks (Springer), MDPI Sensors, czy KRIT. Ponadto, opracowane rozwiązania zostały objęte ochroną w ramach trzech uzyskanych patentów (krajowe i europejskie) oraz kolejnego zgłoszenia patentowego w Europejskim Urzędzie Patentowym (EPO).

2 Opinia o rozprawie

2.1 Cel badań

W rozprawie jasno sprecyzowano cel badań, którym jest opracowanie i weryfikacja nowego sposobu działania węzłów pośredniczących w sieci LoRaWAN, który zapewnia dostarczenie danych z dobowych odczytów urządzeń końcowych wdrożonych w środowisku miejskim z dużym prawdopodobieństwem i jednocześnie minimalizuje zużycie energii urządzeń LoRaWAN zasilanych z baterii. Cel ten jest również wyrażony w precyzyjnie sformułowanej tezie rozprawy, która brzmi: „Poprzez zastosowanie węzłów pośrednich możliwe jest zwiększenie efektywności transmisji w sieciach LoRaWAN”.

Proponowane w rozprawie rozwiązanie jest oparte na sterowaniu transmisją urządzeń końcowych i pośredniczących w predefiniowanych oknach czasowych. Proponowane podejście jest oryginalne i nowatorskie, gdyż większość prac badawczych dotyczących zastosowania węzłów pośredniczących w technice LoRaWAN koncentruje się na rozwoju metody asynchronicznej zaproponowanej w standardzie TS011, która bazuje na wybudzaniu urządzeń techniką preambuł wybudzających (*ang. Wake-up on Radio*) i losowym mechanizmie retransmisji lub zastosowaniu kosztownych urządzeń brzegowych LoRa-LTE. Efektywność opracowanej metody została zbadana w kompleksowy sposób, który obejmuje zarówno sformułowanie modeli analitycznych wybranych elementów systemu, jak i przeprowadzenie kompleksowych eksperymentów symulacyjnych systemu LoRaWAN przeprowadzonych w środowisku symulacyjnym OMNet++ wykorzystując dane pomiarowe pochodzące z produkcyjnych wdrożeń systemów LoRaWAN. Eksperymenty symulacyjne dotyczyły porównania efektywności działania systemu LoRaWAN w czterech rozważanych w rozprawie scenariuszach, obejmujących symulację: 1) standardowej sieci LoRaWAN traktowanej jako model odniesienia, 2) sieci LoRaWAN rozszerzonej o węzły pośredniczące działające zgodnie z zaproponowaną w rozprawie metodą, 3) sieć LoRaWAN z wdrożonymi dodatkowymi stacjami bazowymi, nazywana zagęszczoną siecią LoRaWAN, a także 4) sieć LoRaWAN z zastosowanymi ruterami brzegowym LoRa-LTE, wykorzystująca technikę LTE. Ponadto, w badaniach przeprowadzono również analizę ekonomiczną opłacalności wdrożenia rozważanych scenariuszy działania sieci LoRaWAN.

Przedstawione w rozprawie wyniki eksperymentów symulacyjnych oraz analiz ekonomicznych jednoznacznie wskazują na potencjalne korzyści wynikające z zastosowania węzłów pośredniczących, działających zgodnie z zaproponowanym mechanizmem sterowania transmisją poszczególnych urządzeń końcowych. Należy podkreślić, iż efektywności opracowanych w rozprawie rozwiązań została udowodniona w kompleksowy sposób wykorzystując w przeprowadzonych eksperymentach symulacyjnych dane pomiarowe pochodzące z eksploatowanych sieci LoRaWAN.

2.2 Analiza źródeł

Analizę stanu sztuki dotyczącą tematyki rozprawy głównie przedstawiono w rozdziale 2 i 3. W szczególności w rozdziale 2 Autor przedstawił technikę LoRaWAN, sklasyfikował strategie

retransmisji danych stosowane w sieciach bezprzewodowych, m.in. Amplify-and-Forward, Decode-and-Forward, Compress-and-Forward, a także przedstawił szczegółowe porównanie referencyjnych systemów bezprzewodowych wykorzystujących węzły pośredniczące, tj. Wize/Wireless m-BUS oraz Wi-SUN FAN. W rozdziale 3 szczegółowo opisano specyfikację warstwy fizycznej odpowiedzialną za transmisję radiową w sieciach LoRaWAN, w tym przedstawiono zastosowaną modulację Chirp Spread Spectrum (CSS) i matematyczny opis up- i down-chirpów. Opis alternatywnego sposobu zastosowania węzłów pośredniczących w sieciach LoRa, który został ostatnio zaproponowany w ramach standardu TS011 zamieszczono w rozdziale 5.1.

Oceniając zawartą w rozprawie analizę literatury, należy podkreślić, iż przedstawiona analiza źródeł jest staranna, wyczerpująca, a dobór 106 pozycji bibliograficznych jest właściwie skorelowany z tematyką rozprawy. Pewnym mankamentem jest pominięcie w analizie stanu wiedzy rozwiązań stosowanych w technice Bluetooth Low Energy MESH (BLE MESH), które również zostały zaprojektowane, i są już dość powszechnie wykorzystywane, dla realizacji wieloskokowego przekazu danych w bezprzewodowych sieciach stosowanych w rozwiązaniach IoT. Metody zastosowane w technice BLE MESH mogłyby być również inspirujące dla Autora w kontekście zaproponowanej w rozprawie metody sterowania transmisją w sieci LoRaWAN. Pomimo, iż systemy te różnią się przewidywanym zasięgiem, cel zastosowania węzłów pośredniczących jest zbliżony.

Podsumowując, stwierdzam, że zamieszczona w rozprawie analiza źródeł jest właściwa, wyczerpująca, a dobór źródeł jest właściwie skorelowany z tematyką rozprawy. Niewątpliwie, zamieszczona analiza świadczy o bardzo dobrej znajomości Autora tematyki rozprawy oraz głównych problemów w obszarze transmisji bezprzewodowej i protokołów stosowanych w bezprzewodowych sieciach LoRaWAN oraz światowych trendów w obszarze technik komunikacyjnych stosowanych w sieciach IoT.

2.3 Pozycja rozprawy i znaczenie uzyskanych wyników

Tematyka rozprawy dotyczy aktualnego i ważnego zagadnienia z zakresu telekomunikacji oraz systemów IoT zastosowanych w obszarze Inteligentnych Miast – optymalizacji zasięgu i efektywności energetycznej bezprzewodowych sieci telemetrycznych. W mojej ocenie najważniejszym osiągnięciem Autora jest opracowanie oryginalnej metody wykorzystania węzłów pośredniczących w sieciach LoRaWAN, bazującej na synchronizacji momentów transmisji urządzeń końcowych w ramach predefiniowanych okien czasowych, która pozwala osiągnąć blisko 100% skuteczności odczytów dziennych przy jednoczesnej poprawie bilansu energetycznego systemu i znaczącym obniżeniu kosztów budowy sieci (CAPEX) w porównaniu do alternatywnych rozwiązań bazujących na wdrożeniu dodatkowych stacji bazowych lub ruterów brzegowych LoRa-LTE. Bardzo wartościowym elementem pracy jest rozdział 4, w którym Autor na drodze analiz teoretycznych i weryfikacji danych zebranych z produkcyjnej sieci LoRaWAN wykorzystującej populację 670 urządzeń końcowych, zbadał wpływ zaników wielodrogowych, wykazując maksymalne różnice mocy między kanałami na poziomie 11,79 dB. Niezwykle wartościowe są również przeprowadzone kompleksowe badania symulacyjne działania systemu LoRaWAN w czterech ww. scenariuszach, w których wykorzystano charakterystyki propagacyjne środowiska radiowego LoRa zamodelowane na podstawie pomiarów. Na uwagę zasługuje również wyjątkowo szeroka baza danych wykorzystana w badaniach. Autor korzystał zarówno z danych pozyskanych z instalacji obejmujących setki urządzeń, jak również z wieloskalowych wdrożeń obejmujących dziesiątki tysięcy urządzeń końcowych. Tego typu dane

eksploatacyjne są bardzo rzadko dostępne w badaniach akademickich dotyczących sieci LPWAN, co stanowi dodatkowy walor rozprawy.

Oceniając pozycję rozprawy na tle rozwiązań przedstawionych w literaturze, należy podkreślić oryginalność proponowanego rozwiązania oraz jego wysoką efektywność, którą wykazały przeprowadzone badania symulacyjne. Przedstawione wyniki potwierdziły, że proponowany sposób działania węzłów pośredniczących pozwala uzyskać większą efektywność działania systemu i obniżyć koszty operacyjne i nakłady inwestycyjne w porównaniu do alternatywnych rozwiązań. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, iż autorska koncepcja retransmisji oparta na kontrolowanych chwilach transmisji została zgłoszona patentowo przed opublikowaniem standardu TS011 przez LoRa Alliance. Świadczy to o dużej samodzielności naukowej Autora oraz o wyprzedzającym charakterze prowadzonych badań.

O dużym znaczeniu uzyskanych wyników świadczy fakt ich publikacji na międzynarodowych renomowanych konferencjach, tj. IFIP Networking Conference (2024), IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC 2022) i uznanych czasopismach, tj. Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, Springer, MDPI Sensors, Springer Computer Networks and Advances, oraz Artificial Intelligence Research, Springer LNAI.

Ponadto o praktycznym znaczeniu opracowanej metody świadczy uzyskanie trzech patentów (oraz kolejnego zgłoszenia patentowego), a także bezpośrednie powiązanie doktoratu z działalnością przedsiębiorstwa zajmującego się produkcyjnymi systemami IoT. Autor skutecznie połączył badania naukowe z rzeczywistymi problemami przemysłowymi, a wyniki prac zostały zweryfikowane na danych pochodzących z eksploatowanych systemów oraz znalazły odzwierciedlenie w zgłoszeniach patentowych i rozwiązaniach przygotowanych do wdrożenia.

2.4 Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników (zwięzłość, jasność, umiejętność przekonywania, poprawność redakcyjna)

Generalnie proponowane w rozprawie rozwiązania, a także uzyskane wyniki, są przedstawione w sposób zwięzły, staranny i precyzyjny. Konstrukcja tekstu rozprawy charakteryzuje się logicznym ciągiem – od założeń modelowych, przez empiryczne badanie właściwości fizycznych LoRa, aż po implementację symulatora i przedstawienie kompleksowych badań symulacyjnych i analizy kosztów. Pewne zastrzeżenia może budzić dość pobieżne przedstawienie ostatnich badań.

W ogólności język pracy oraz strona redakcyjna nie budzą większych zastrzeżeń, natomiast autor nie uniknął pewnych uchybień językowych takich jak:

- Rozdział 5.1 Powtórzony akapit zaczynający się od słów „Specyfikacja retransmisji dla LoRaWAN wprowadza rolę węzła pośredniczącego (RL)...”,
- Rozdział 5.2.1: „wynalazek” zamiast np. „proponowana/opracowana metoda”. Rozdział ten jest przedstawiony w formie opisu zgłoszenia patentowego, co nieco odbiega od sposobu redakcji pozostałej części rozprawy,
- Rozdział 6.7 „Autentykacja” zamiast „Uwierzytelnienie”,
- Rozdział 7.1 „Długość ładunku” zamiast „rozmiar przenoszonych danych”.

W mojej ocenie te drobne mankamenty redakcyjne nie mają wpływu na dobrą jakość rozprawy.

3 Słabe strony rozprawy i jej główne wady

Do słabych stron rozprawy zaliczam:

1. Przyjęto dość arbitralne założenia dotyczące synchronizacji czasu. W proponowanym autorskim algorytmie retransmisji opartym na predefiniowanych oknach czasowych Autor założył pełną i stabilną synchronizację zegarów stacji. W pracy brakuje jednak szerszej i krytycznej dyskusji nad tym, jak w warunkach rozproszonej sieci telemetrycznej taką synchronizację utrzymać w długim horyzoncie czasowym oraz jakie będą praktyczne konsekwencje nawet chwilowej jej utraty przez poszczególne urządzenia. Ponadto, brakuje analizy narzutu energetycznego wynikającego z konieczności utrzymania synchronizacji.
2. Brak modelu analitycznego dotyczącego oceny efektywności proponowanego algorytmu sterowania transmisją.
3. W pracy zabrakło bardziej systematycznej analizy wrażliwości proponowanego mechanizmu retransmisji na zmianę parametrów konfiguracyjnych, takich jak długość okna transmisyjnego, liczba retransmisji czy liczba kanałów przeznaczonych do retransmisji.
4. Uproszczony model pojemności baterii: W analizach przedstawionych w rozdziale 2.4 oraz 7 Autor operuje modelami ładunku wyrażonego w mAh, przyjmując nominalne pojemności ogniw podawane przez producentów (np. 5,2 Ah lub 17 Ah dla baterii Li-SOCl₂). Choć wspomniano o uwarunkowaniach temperaturowych, w ostatecznych bilansach pominięto głębszą analizę zjawiska istotnego spadku realnej użytecznej pojemności tych ogniw w horyzoncie 5–10 lat pracy w zmiennych warunkach obciążenia.
5. Ograniczenie weryfikacji symulacyjnej: Przedstawione zaawansowane modele propagacji dynamicznej i kolizji zostały wykorzystane do symulacji wybranego profilu ruchu telemetrycznego. Pewien niedosyt budzi brak badań symulacyjnych dla warunków skrajnych (np. gwałtownego nasycenia sieci urządzeniami generującymi ruch alarmowy), co pozwoliłoby lepiej ocenić stabilność proponowanej metody w warunkach przeciążenia.
6. W rozprawie zabrakło bardziej szczegółowego ilościowego porównania zaproponowanych miar efektywności proponowanego rozwiązania z mechanizmem TS011 przy identycznych warunkach sieciowych.
7. Brak porównania wyników symulacji z badaniami rzeczywistej sieci. Chociaż model symulacyjny został bardzo starannie przygotowany i częściowo zweryfikowany pomiarowo, pewien niedosyt pozostawia brak pełnej walidacji proponowanego mechanizmu retransmisji w rzeczywistej sieci LoRaWAN wykorzystującej fizyczne urządzenia pośredniczące.

4 Podsumowanie:

Rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Frankiewicza dotyczy opracowania nowej, wysoce efektywnej metody przekazu danych z wykorzystaniem urządzeń pośredniczących w sieciach LoRaWAN. Zaproponowany model oparty na predefiniowanych oknach czasowych stanowi oryginalne i technicznie uzasadnione rozwiązanie problemu ograniczeń zasięgu w sieci LoRaWAN.

Rozprawa przedstawia dojrzały warsztat badawczy Autora, obejmujący analizę teoretyczną, badania eksperymentalne, modelowanie matematyczne, budowę własnego środowiska symulacyjnego oraz ocenę ekonomiczną proponowanych rozwiązań. Szczególnie wysoko oceniam umiejętność

powiązania aspektów analitycznych, technicznych, wdrożeniowych i ekonomicznych w jednolitą metodykę oceny efektywności proponowanego rozszerzenia sieci LoRaWAN.

Rozprawa ma cenny charakter praktyczny z bardzo dobrą podbudową analityczną. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że rozprawa nie ogranicza się jedynie do badań symulacyjnych, lecz została oparta na rzeczywistych danych eksploatacyjnych oraz prowadzi do rozwiązań o bezpośrednim potencjale wdrożeniowym i patentowym.

Wyniki prac zostały opublikowane w uznanych międzynarodowych czasopismach i konferencjach znajdujących się na liście MNiSW, a także były podstawą uzyskania trzech patentów i kolejnego.

Podsumowując, w mojej ocenie rozprawa wnosi oryginalny wkład do rozwoju techniki LoRaWAN oraz stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe i aplikacyjne w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Biorąc powyższe pod uwagę, oceniam, że **osiągnięcia naukowe Autora rozprawy spełniają warunki stawiane kandydatom ubiegającym się o stopień doktora w odnośnych ustawach. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**