

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej
Polskiej Akademii Nauk



STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa
oraz ich wpływ na efektywność sieci

mgr Anna Strzoda

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

Promotor pomocniczy: dr inż. Konrad Polys

Gliwice, 2024

Streszczenie

Istotnym wyzwaniem w sieciach LPWAN jest problem występowania obszarów w sieci, w których zasięg jest ograniczony, tzn. miejsc, gdzie urządzenia nie są w stanie skutecznie komunikować się z siecią. Możliwym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie węzłów pośredniczących w transmisji (ang. relay), które mogą zebrać dane od sąsiednich węzłów i przesłać je do punktu dostępowego, umożliwiając utrzymanie łączności urządzeń niebędących w stanie skutecznie komunikować się z siecią. Tematyka zastosowania węzłów relay w sieciach LPWAN otwiera nowe obszary badawcze, ponieważ dotychczas transmisje w tych standardach realizowano jedynie bezpośrednio pomiędzy węzłem końcowym sieci a punktem dostępowym. W 2022 roku stowarzyszenie LoRa Alliance opublikowało oficjalną specyfikację funkcjonalności relay określającą sposób działania urządzeń relay w standardzie LoRaWAN. Jednak specyfikacja ta nie odpowiada na pytanie, gdzie w sieci LoRa należy zainstalować fizyczne urządzenia relay, aby zapewnić jak najlepszą efektywność energetyczną sieci, co jest istotne w kontekście zastosowań urządzeń zasilanych baterią w technologii LoRaWAN w aplikacjach IoT. Dlatego istotność postawionego problemu badawczego wykracza poza teoretyczne analizy, odzwierciedlając uzasadnienie praktyczne, gdyż tematyka funkcjonalności relay dla standardu LoRaWAN – technologii wciąż rozwijającej się – stanowi przedmiot dyskusji w odpowiednich organizacjach standardyzacyjnych takich jak LoRa Alliance, co stanowi dodatkową motywację prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej badań.

Celem rozprawy jest opracowanie metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa, aby zapewnić jak najlepszą efektywność energetyczną sieci. Na podstawie analizy postawionego problemu badawczego oraz wyników przeprowadzonych badań przedstawionych w rozprawie doktorskiej, potwierdzono sformułowaną tezę:

Odpowiedni dobór lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa poprawia efektywność energetyczną sieci.

Aby potwierdzić postawioną tezę, w ramach rozprawy skupiono się na opracowaniu nowych metod wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieci LoRa obejmujących zestaw procedur oraz kryteriów uwzględniających odpowiednie parametry (m.in. współczynnik SF, poziom naładowania baterii urządzenia) oraz charakterystykę środowiska technologii LoRa (np. zmienność warunków propagacji sygnału radiowego) istotnych w kontekście zarządzania energią w sieci, znajdujących rozwiązania zoptymalizowane pod względem zapewnienia możliwie najlepszej efektywności energetycznej sieci.

W efekcie, sieć działająca w konfiguracji wskazanej przez wynik algorytmu ma charakteryzować się efektywnym energetycznie wykorzystaniem zasobów oraz jak najmniejszym zużyciem energii.

W początkowej fazie pracy nad problemem badawczym przeprowadzono analizę zbioru danych dotyczących transmisji z wielkoskalowych komercyjnych wdrożeń IoT, umożliwiającą ocenę czy i w jakich okolicznościach istnieje potencjał do zastosowania urządzeń relay w rzeczywistych warunkach działania sieci na dużą skalę. Uzyskane wyniki analiz wskazują na występowanie zjawiska ograniczonej łączności z siecią dla pewnego odsetka urządzeń końcowych sieci, oraz że rozwiązanie tego problemu w postaci zastosowania węzłów relay rozmieszczonych w odpowiednich lokalizacjach znajduje uzasadnienie i stanowi efektywną alternatywę dla innych metod pokrycia białych plam zasięgu sieci np. poprzez rozbudowę infrastruktury w postaci instalacji kolejnych bram LoRa. Ponadto, otrzymane wyniki analiz wykazują zgodność z ekspertyzą i założeniami lidera w rozwoju ekosystemu technologii LoRa – firmy Semtech.

W rozprawie zaproponowano nowe funkcje dla procedur optymalizacji, gdzie głównym optymalizowanym zasobem jest energia. Wynikowe węzły relay charakteryzują się wysoką nadwyżką energii oraz niską wartością współczynnika SF mającego wpływ na zużycie energii podczas transmisji pakietu, dzięki czemu mogą dłużej zapewnić ciągłość działania i utrzymanie łączności dla węzłów niemogących skutecznie skomunikować się z siecią. Ponadto, przyporządkowanie węzłów relay do węzłów o ograniczonej łączności z siecią zoptymalizowane jest pod względem minimalizacji kosztu energetycznego związanego z zapewnieniem łączności, wyznaczonego w oparciu o analizę współczynników SF w komunikacji pomiędzy urządzeniami. Takie podejście pozwala na efektywne zarządzanie energią w sieci, maksymalizację żywotności baterii urządzenia, a w efekcie wydłużenie czasu życia sieci.

Początkowo problem wyboru lokalizacji węzłów relay rozpatrzono jako problem przyporządkowania w grafie. W celu jego rozwiązania zaproponowano podejście heurystyczne, które stanowi alternatywę dla metod dokładnych w przypadkach grafów rzadkich. Eksperymenty symulacyjne wskazują, że zaproponowane podejście wykazuje wyższą skuteczność pod względem maksymalizacji czasu życia sieci, niż metoda referencyjna. Jako metodę referencyjną wykorzystano implementację algorytmu optymalizującego wybór węzłów relay pod względem minimalizacji zużycia energii, który bierze pod uwagę wiele węzłów o ograniczonej łączności z siecią oraz wiele potencjalnych węzłów do działania w trybie relay, podobnie jak w niniejszej rozprawie doktorskiej.

W kolejnym etapie prac skoncentrowano się na opracowaniu bardziej kompleksowego rozwiązania, opartego na podejściu zachłannym. Zaproponowana

metoda nie tylko odpowiada na wcześniej zidentyfikowane wyzwania, ale obejmuje nowy mechanizm zaprojektowany do cyklicznego uruchamiania, w celu okresowej rekonfiguracji sieci w odpowiedzi na zmieniające się warunki propagacji sygnału radiowego. Ponadto, rozwinięta metoda unika niepotrzebnej nadmiarowości w liczbie lokalizacji węzłów wybranych do działania w trybie relay. W końcowym etapie prac, rozpatrzono uogólnienie problemu wyboru lokalizacji węzłów relay tj. z uwzględnieniem redundancji w wyborze węzłów pośredniczących. W oparciu o opracowaną metodę zachłanną zaproponowano podejście znajdujące zestaw lokalizacji węzłów relay, przy zapewnieniu aby każdy węzeł o ograniczonej łączności z siecią znajdował się w zasięgu określonej liczby węzłów relay, zadanej parametrem metody (współczynnikiem redundancji). Takie podejście przyczynia się do poprawy niezawodności działania sieci w przypadku wystąpienia awarii urządzeń relay.

W procesie walidacji zaproponowanych algorytmów wykorzystano zaprojektowane na potrzeby badań środowisko ewaluacji efektywności metod wyboru lokalizacji węzłów relay przy użyciu implementacji modelu symulacyjnego w środowisku symulatora zdarzeń dyskretnych OMNeT++. Scenariusze eksperymentów symulacyjnych uwzględniają zarówno topologie sieci o losowym rozmieszczeniu węzłów jak i te oparte o dane z rzeczywistych wdrożeń IoT. Wyniki eksperymentów symulacyjnych wskazują, że zaproponowane podejście zapewnia możliwość wskazania takich węzłów pośredniczących, które zapewnią działanie sieci przez zadany czas, ograniczając ryzyko przerwania ciągłości operacyjnej spowodowane przedwczesnym wyczerpaniem baterii urządzenia. Poziom zaoszczędzonej energii w sieci osiągną zaproponowaną metodą zachłanną wynosi od 0.19% do 7.96% w zależności od scenariusza topologii sieci, co potwierdza, że opracowany algorytm osiąga lepsze rezultaty pod względem zapewnienia efektywności energetycznej sieci niż metoda referencyjna. W całej populacji rozwiązań wskazany przez algorytm zachłanny zestaw lokalizacji węzłów relay umożliwił pełne połączenie dla węzłów o ograniczonej łączności z siecią, zapewniając jednocześnie mniejsze zużycie energii w sieci niż rozwiązanie wskazane przez metodę referencyjną. Zaproponowany algorytm wykazuje skuteczność dla różnych wartości odsetka węzłów o ograniczonej bezpośredniej łączności z punktem dostępowym oraz o różnicowanym rozmieszczeniu takich węzłów w sieci. Tym samym wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają spełnienie celu pracy oraz potwierdzenie postawionej tezy.

Opublikowane prace

Prace bezpośrednio związane z rozprawą doktorską:

1. A. Strzoda i K. Grochla. “A Nature-Inspired Approach to Energy-Efficient Relay Selection in Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN)”. w: *Sensors* 24.11 (2024). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s24113348
2. K. Grochla, A. Strzoda, R. Marjasz, P. Głomb, K. Książek i Z. Łaskarzewski. “Energy-Aware Algorithm for Assignment of Relays in LPWAN”. w: *ACM Trans. Sen. Netw.* 18.4 (2022). ISSN: 1550-4859. DOI: 10.1145/3544561
3. A. Strzoda, K. Grochla, A. Frankiewicz i Z. Łaskarzewski. “Measurements and Analysis of Large Scale LoRa Network Efficiency”. W: *2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. 2022, s. 818–823. DOI: 10.1109/IWCMC55113.2022.9824317

Pozostałe prace:

4. A. Strzoda, R. Marjasz i K. Grochla. “How Accurate is LoRa Positioning in Realistic Conditions?” W: *Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications*. DIVANet '22. Montreal, Quebec, Canada: Association for Computing Machinery, 2022, 31–35. DOI: 10.1145/3551662.3561260
5. R. Marjasz, K. Połys, A. Strzoda i K. Grochla. “Improving Delivery Ratio in LoRa Network”. W: *Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access*. MobiWac '21. Alicante, Spain: Association for Computing Machinery, 2021, 141–146. ISBN: 9781450390798. DOI: 10.1145/3479241.3486698
6. A. Strzoda, K. Grochla, P. Głomb i A. Madej. “Link failure prediction in LoRa networks”. W: *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*. 2023, s. 1310–1315. DOI: 10.1109/IWCMC58020.2023.10183185
7. R. Marjasz, A. Strzoda, K. Połys i K. Grochla. “Mitigation of LoRa Interferences via Dynamic Channel Weights”. W: *Proceedings of the 35th annual European Simulation and Modelling Conference ESM 2021*. 2021, s. 150–154

8. A. Strzoda, R. Marjasz i K. Grochla. “LoRa Positioning in Verification of Location Data’s Credibility”. W: *Infocommunications Journal* 14.4 (2022), s. 56–61
9. A. Strzoda, K. Grochla i K. Połys. “Variability of BLE Advertisement Packets Received Signal Strength and Delivery Probability in the Presence of Interferences”. W: *Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications*. 2022, s. 37–44
10. R. Marjasz, K. Grochla, A. Strzoda i Z. Łaskarzewski. “Simulation Analysis of Packet Delivery Probability in LoRa Networks”. W: *Computer Networks: 26th International Conference, CN 2019, Kamień Śląski, Poland, June 25–27, 2019, Proceedings 26*. Springer. 2019, s. 86–98
11. A. Strzoda. “Zastosowanie heurystyki do wyboru lokalizacji węzłów pośredniczących w sieciach LP WAN”. w: *Przegląd Telekomunikacyjny+Wiadomości Telekomunikacyjne* (2023)
12. K. Grochla, R. Marjasz, K. Połys i A. Strzoda. “Kolizje pakietów w Sieciach LoRa w Zastosowaniach Smart City”. W: *Przegląd Telekomunikacyjny+ Wiadomości Telekomunikacyjne* (2019)
13. A. Frankiewicz, A. Glos, K. Grochla, Z. Łaskarzewski, J. Miszczak, K. Połys, P. Sadowski i A. Strzoda. “LP WAN gateway location selection using modified k-dominating set algorithm”. W: *Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems: 28th International Symposium, MASCOTS 2020, Nice, France, November 17–19, 2020, Revised Selected Papers 28*. Springer. 2021, s. 209–223