

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej
Polskiej Akademii Nauk

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Ograniczenie zużycia energii w rozległych sieciach
bezprzewodowych niskiej mocy przez zarządzanie
sposobem transmisji i nasłuchu

Autor: mgr inż. Zbigniew Łaskarzewski

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

Gliwice, 2025

Streszczenie

Rozwój technologii komunikacji bezprzewodowej niskiej mocy umożliwił szerokie zastosowanie urządzeń Internetu Rzeczy (IoT) m.in. w zdalnym odczycie liczników mediów, monitoringu transportu i procesów przemysłowych oraz stanu poziomu w zbiornikach. Prognozy wskazują na dalszy, dynamiczny wzrost liczby ich zastosowań. Kluczowym wyzwaniem pozostaje jednak minimalizacja zużycia energii w celu zapewnienia wieloletniej bezobsługowej pracy urządzeń zasilanych bateryjnie.

Projektowanie urządzeń IoT koncentruje się na energooszczędności wykorzystywanych komponentów elektronicznych, trybach uśpienia i mechanizmach wybudzania. Szczególne znaczenie ma jednak efektywność energetyczna stosu protokołów komunikacyjnych, które determinują sposób transmisji i nasłuchu radiowego. Odpowiedni dobór i parametryzacja protokołów mają kluczowy wpływ na zapewnienie niezawodnej, skalowalnej i długotrwałej pracy urządzeń. W związku z tym celem pracy było opracowanie mechanizmów ograniczających zużycie energii urządzeń IoT na poziomie protokołów komunikacyjnych, umożliwiających co najmniej 10-letnią pracę bez wymiany źródła zasilania przy zachowaniu pełnej funkcjonalności.

Praca obejmuje analizę propagacji fal radiowych w sieciach LPWAN z wykorzystaniem znanych modeli symulacyjnych oraz eksperyment pomiarowy dużej skali w środowisku miejskim. Analizie poddano parametry jakości komunikacji: charakterystykę przekłamań bitowych, stratność pakietów, a przede wszystkim moc odbieranego sygnału i jego zmienność. Pozwoliło to dopasować parametry rozkładów zanikania szybko- i wolnozmiennego do danych empirycznych oraz opracować metodę sterowania mocą transmisji o założonej skuteczności. Zastosowane modele propagacyjne pozwoliły na skuteczne przewidywanie tłumienności toru transmisyjnego, co potwierdziło ich przydatność w planowaniu lokalizacji koncentratorów.

W ramach pracy zaproponowano autorski protokół komunikacyjny BX-MAC, który wykorzystuje nasłuch próbkowany oraz nową koncepcję ramek wybudzających z dzieloną preambułą. Rozwiązanie to umożliwia istotne ograniczenie zużycia energii węzłów sieci w odniesieniu do dotychczasowych rozwiązań. Dodatkowo opracowane zostały mechanizmy uzupełniające, takie jak wskazanie opóźnienia odpowiedzi lub kolejnego nasłuchu, które skracają czas nasłuchu odpowiedzi oraz umożliwiają efektywną energetycznie transmisję rozgłoszeniową. Określono zasady doboru parametrów protokołu oraz oszacowano zużycie energii dla urządzeń działających w roli węzła końcowego w sieci w topologii gwiazdy oraz w roli retransmitera. Efektywność energetyczna protokołu BX-MAC została porównana z protokołami bazowymi, co wykazało jego przewagę w analizowanych scenariuszach.

Zaproponowany w protokole BX-MAC model transmisji i nasłuchu został zweryfikowany poprzez implementację systemu zdalnego odczytu gazomierzy. Praktyczna realizacja wymagała opracowania dodatkowych mechanizmów energooszczędności uwzględniających specyfikę konstrukcji urządzenia oraz wymagania czasowe funkcji metrologicznej. Przeanalizowane zostały różne modele nasłuchu próbkowanego oraz trybów uśpienia. Uzyskane rezultaty zostały zweryfikowane poprzez pomiary zużycia energii. Opracowany został również schemat komunikacji w systemie zdalnego odczytu liczników mediów, który wykorzystuje komunikację rozgłoszeniową protokołu BX-MAC w celu zainicjowania komunikacji z urządzeniami końcowymi. Zastosowany model komunikacji pozwolił na ograniczenie zużycia energii o 39% oraz co najmniej 1,8-krotnie przyspieszyć proces odczytu w odniesieniu do powszechnie stosowanego modelu periodycznego nadawania.

Protokół BX-MAC i zaproponowane mechanizmy zarządzania sposobem transmisji i nasłuchu mają charakter uniwersalny i mogą być stosowane w różnych technikach transmisji bezprzewodowej. Rozwiązanie jest szczególnie efektywne energetycznie w komunikacji asynchronicznej, w której nie jest możliwe utrzymywanie synchronizacji czasu pomiędzy węzłami, np. w systemie zdalnego odczytu obchodzonego liczników mediów. Uzyskana wysoka efektywność energetyczna umożliwia nawet 10-letnią nieprzerwaną pracę urządzenia przy jednoczesnym zapewnieniu krótkiego czasu inicjowania komunikacji, co jest oczekiwane w wielu praktycznych zastosowaniach.