

doi:10.15199/48.2016.12.51

## Metoda pomiaru opóźnień komunikacyjnych w sieciach bezprzewodowych pracujących w standardzie IEEE 802.15.4

**Streszczenie.** W artykule omówiono używane obecnie przez autorów metody do pomiaru opóźnień w sieciach bezprzewodowych pracujących w standardzie IEEE 802.15.4 oraz przegląd możliwych innych rozwiązań i zaproponowane wybrane metody możliwe do zastosowania w pomiarach w sieciach wielowęzłowych i na dużych odległościach. Przedstawiono problemy występujące w trakcie prowadzenia takich badań oraz korzyści wybranych metod pomiaru.

**Abstract.** The paper discusses the currently used by the authors the methods for measuring the delays in wireless networks based on IEEE 802.15.4 standard and a review of possible alternatives, and proposed methods chosen as applicable in the measurement of a multi-node networks and over long distances. Problems occurring during carrying out such research and the advantages and disadvantages of selected measuring methods are outlined. (Method of measuring communication delays in wireless networks based on IEEE 802.15.4).

**Słowa kluczowe:** opóźnienia komunikacyjne, transmisja bezprzewodowa, ZigBee.

**Keywords:** communication delays, wireless transmission, ZigBee.

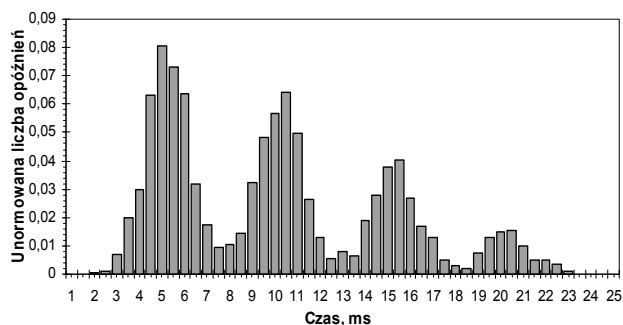
### Wstęp

Sieci bezprzewodowe są coraz częściej używane w systemach pomiarowych i przemysłowych [1, 2]. W sieciach bezprzewodowych duże znaczenie ma pobór energii przez elementy używane do transmisji danych oraz przepływność [3, 4]. Jednym z najważniejszych parametrów wpływających na przepływność jest opóźnienie pomiędzy przesłaniem danych do nadajnika a ich odczytaniem w odbiorniku [3, 5, 6]. Opóźnienie to w istotny sposób wpływa na efektywny czas transmisji. Źródłem opóźnień komunikacyjnych są różnego rodzaju operacje programowe realizowane przez węzły nadawczo-odbiorcze sieci bezprzewodowej, wynikające z przyjętego algorytmu dostępu do medium transmisyjnego umożliwiającego wielodostęp oraz wykrywanie i unikanie kolizji pakietów danych [3, 6]. Każdy węzeł przed rozpoczęciem nadawania sprawdza stan zajętości medium transmisyjnego. W przypadku jego zajętości czeka losowo odcinek czasu i ponownie sprawdza stan nośnika. Czas pomiędzy momentem wysłania danych do modułu bezprzewodowego a czasem faktycznego ich wystąpienia do odbiornika jest zatem zmienny i ma charakter losowy [5, 7, 8].

Za każdym razem, gdy węzeł zamierza transmitować dane, losowo wybiera szczelinę czasową. Jeśli kanał transmisyjny jest zajęty, węzeł pomija losowo wybraną liczbę szczelin czasowych i ponawia próbę dostępu. Jeśli kanał jest wolny, węzeł może rozpocząć nadawanie od najbliższej szczeliny. W przypadku, gdy ramka danych nie zostanie odebrana przez odbiornik np. z powodu zaburzeń transmisji występujących w medium transmisyjnym, nadajnik nie otrzyma ramki potwierdzenia i powtórnie wysyła zagubioną ramkę danych. Proces taki nazywa się retransmisją. Liczba możliwych retransmisji jest wielkością zależną w dużej mierze od producenta urządzeń bezprzewodowych, zwykle wynosi 3 lub 5. Jeżeli pakiet po ustalonej liczbie retransmisji nie dotrze do adresata, wtedy jest kasowany. W związku z takimi algorytmami dostępu do łącza, potwierdzenia i retransmisji histogram opóźnień pakietów w transmisji danych może wyglądać podobnie jak na rysunku 1. Histogram taki jest nazywany histogramem wielomodalnym. W przedstawionym przypadku można wyróżnić pierwszy mod ilustrowany pierwszą transmisją danych, oraz trzy kolejne mody przedstawiające trzy kolejne retransmisje danych. Maksymalny czas trwania transmisji pojedynczego pakietu może zostać wydłużony, gdy zostanie zwiększona liczba dostępnych retransmisji.

Podstawowym problemem w pomiarach opóźnień w sieciach bezprzewodowych jest fakt, że wartość opóźnienia

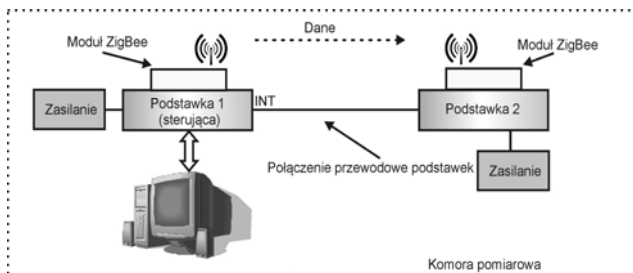
nie jest znana. Może na nią w dużym stopniu wpływać użyty rodzaj modułu do transmisji bezprzewodowej jak i warunki pomiaru. W przypadku niektórych producentów czas pierwszej transmisji danych wynosi kilka ms, a retransmisje następują po kilku kolejnych. Natomiast zdarza się, że czas pierwszej transmisji może wynieść kilkadziesiąt ms, a retransmisje będą występować co kilkaset ms. W takich przypadkach czas pomiaru może być znaczny, zwłaszcza w przypadku gdy transmisja będzie się odbywać przez kilka węzłów sieci. Wówczas uzyskanie odpowiedniej liczby wyników potrzebnych do wyznaczenia histogramu może potrwać wiele godzin.



Rys. 1. Histogram opóźnień pakietów danych ilustrujący mechanizm CSMA/CA

### Obecnie stosowany układ pomiarowy

Podstawowy układ pomiarowy umożliwia pomiar opóźnień pomiędzy dwoma modułami transmisji bezprzewodowej. Składa się on z dwóch, niezależnie zasilanych, podstawek połączonych przewodem umożliwiającym zarejestrowanie momentu odbioru danych przez moduł odbiorczy (rys. 2). Jedna z podstawek (sterująca) została wyposażona w mikrokontroler sterujący transmisją danych, który jest odpowiedzialny za rozpoczęcie transmisji bezprzewodowej przez nadajnik przy jednoczesnym rozpoczęciu zliczania czasu transmisji, zatrzymanego w momencie odebrania danych przez drugi moduł. Umożliwia także przesyłanie wyników pomiarów do komputera. Podstawki umożliwiają podłączenie różnych modułów transmisji bezprzewodowej (np. pracujących w standardzie ZigBee). Wykorzystano tu wspólną cechę wszystkich układów radiowych, a mianowicie posiadany przez nie port komunikacji szeregowej UART.



Rys. 2. Podstawowy układ pomiarowy

Początkowo wszystkie moduły zostały przystosowane do pracy w topologii punkt-punkt przez zaprogramowanie odpowiedniej konfiguracji. Po podłączeniu modułów do podstawek, cały układ pomiarowy został umieszczony w komorze pomiarowej, wolnej od zaburzeń zewnętrznych takich jak np. inne sieci bezprzewodowe. Przeprowadzono również pomiary w budynkach, badając wpływ zakłóceń pasywnych (np. ściany) i aktywnych (np. inne sieci bezprzewodowe), a także w przestrzeni otwartej, gdzie badano wpływ odległości pomiędzy modułami na efektywny czas transmisji. W trakcie badań rejestrowano serie pomiarowe składające się z kilkudziesięciu tysięcy wyników. Dla każdego z modułów radiowych pomiary zostały wykonane kilkakrotnie w różnych porach dnia i przy różnych ustawieniach anten układów. Jako najbardziej reprezentatywną formę przedstawienia uzyskanych wyników użyto histogramów obrazujących rozkład losowego opóźnienia transmitowanych danych.

Obecnie stosowany układ pomiarowy ma jednak pewne wady. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć konieczność stosowania połączenia przewodowego pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem. Wpływa to niekorzystnie na mobilność, zasięg pomiarowy oraz utrudnia badanie sieci wielowęzłowych. Konieczność łączenia każdego odbiornika z nadajnikiem osobnym przewodem znacznie komplikuje układ pomiarowy, zwłaszcza w sytuacji gdy odbiorniki są od siebie znacznie oddalone lub gdy są oddzielone przeszkodami pasywnymi takimi jak ściany budynków.

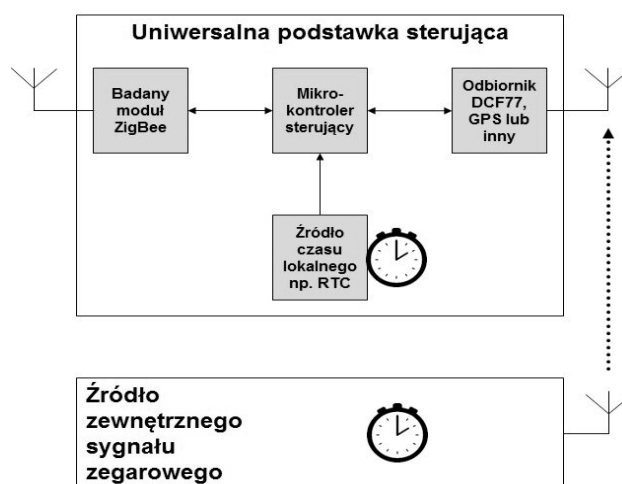
### Przegląd możliwych rozwiązań alternatywnych

W celu usprawnienia pomiarów opóźnień w wielowęzłowych sieciach bezprzewodowych przeanalizowano możliwe rozwiązania. Podstawą rozważań było przyjęcie podstawowych założeń konstrukcyjnych dla nowej koncepcji systemu pomiarowego. Układ pomiarowy powinien umożliwiać pomiar opóźnień transmisyjnych pomiędzy wysłaniem ich do nadajnika a odebraniem w dowolnym odbiorniku pracującym w aktualnie używanej sieci bezprzewodowej. Pomiar tego czasu musi odbywać się z odpowiednią rozdzielczością i wystarczającą dokładnością. Ponadto mierzony czas powinien być stabilny w trakcie pomiaru (czasy mierzone w poszczególnych węzłach powinny być skorelowane). Zbudowany system powinien zapewniać dużą mobilność, powinien być mały, lekki, wygodny w transporcie. Powinien umożliwiać długi czas pracy na zasilaniu bateryjnym. A przede wszystkim powinien być relatywnie tani w budowie i eksploatacji.

Obecnie można znaleźć w literaturze wiele rozwiązań opisujących podobne zagadnienia w systemach rozproszonych [9, 10, 11, 12, 13, 14]. W większości przypadków nie spełniają one jednak założeń pożądanых przez autorów niniejszej publikacji. Najczęściej opisywane rozwiązania układów pomiarowych bazują na systemach wykorzystujących czas UTC dostępny z Internetu. W projektowanym systemie często nie ma takiej możliwości (system ma pracować w miejscu gdzie nie są dostępne inne

częstotliwości zakłócające, takie jak WiFi), nie jest wymagana ciągła synchronizacja zegarów (stosunkowo niewielka dokładność), ani nie ma potrzeby pomiarów z dużą rozdzielczością (z dotychczasowych pomiarów wiadomo, że wystarcza 0,1 ms). W stosowanych przez innych autorów rozwiązaniach często pomija się problemy zasilania (stosowane są zasilacze lub czas pomiaru jest stosunkowo krótki), mobilności systemu (zazwyczaj opisywane są rozwiązania laboratoryjne) oraz koszty układu pomiarowego.

Przechodząc do analizy rozwiązań, dokonano podziału możliwych metod pomiarowych na kilka grup. Podział uwzględnia źródło sygnału zegarowego z uwagi na fakt, że on właśnie determinuje metodę pomiaru. Metody te nazwano metodami z zegarem zewnętrznym, wewnętrznym oraz mieszanymi. Metody najpowszechniej stosowane i opisywane są metodami mieszanymi (lokalny czas komputera synchronizowany poprzez Internet z UTC). Metody z zegarem wewnętrznym bazują na wykorzystaniu tylko źródła sygnału zegarowego zamontowanego w obrębie modułu pomiarowego. Można tu wykorzystać liczniki cyfrowe o dużej rozdzielczości zliczające impulsy zegarowe z oscylatora kwarcowego lub scalone układy do pomiaru czasu rzeczywistego. Metody wykorzystujące zegar zewnętrzny bazują na źródle sygnału zegarowego pochodzącym z zewnątrz (DCF, GPS), transmitowanym drogą radiową. Metody mieszane korzystają z połączenia obu metod. Do synchronizacji używa się sygnału zewnętrznego, a do pomiaru krótkich odcinków czasu – zegara lokalnego (rys. 3).



Rys. 3. Koncepcja nowego układu pomiarowego

Podstawowym problemem podczas korzystania z układów z zegarem lokalnym jest mała stabilność czasowa źródła sygnału zegarowego [14, 13]. Skutkuje to rozbieżnościami przy pomiarze czasu w dłuższych okresach pomiarowych. Układy wykorzystujące pomiar czasu rzeczywistego z użyciem układów RTC ułatwiają synchronizowanie i analizę wyników pomiarowych, jednak problem stabilności użytego rezonatora pozostaje. Ponadto praktycznie na rynku nie są dostępne układy umożliwiające pomiar czasu rzeczywistego z rozdzielczością 1 ms. Najczęściej występują układy z rozdzielczością 1 s, rzadziej 10 ms. Można je jednak wykorzystać do synchronizacji czasu w odbiorniku i nadajniku.

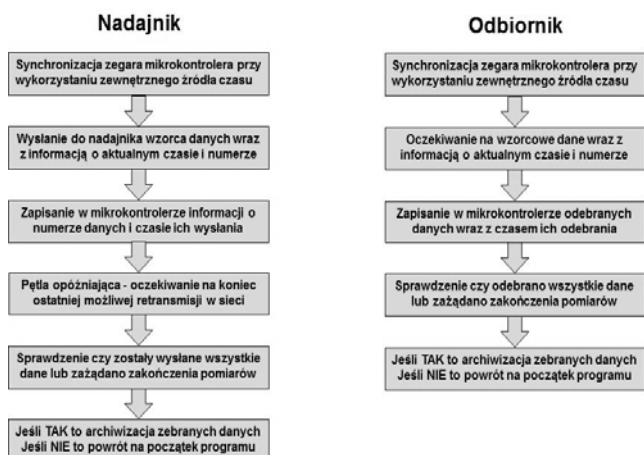
Innym sposobem na synchronizację czasu jest użycie zegara zewnętrznego. Niestety zegar DCF zapewnia małą rozdzielczość (tylko 1 s), a odbiór pełnej ramki danych jest długotrwały (do kilku minut). Może być jednak dobrą alternatywą do synchronizacji czasu w modułach

pomiarowych [15, 16, 17]. Innym sposobem na pobranie czasu rzeczywistego jest GPS. Już najprostsze odbiorniki umożliwiają odczyt czasu z rozdzielczością 1 ms [18, 19, 20]. Problemem jest jednak dość długi i nieokreślony czas akwizycji wyniku tego pomiaru, a ponadto duże zapotrzebowanie na energię elektryczną odbiornika GPS.

Najbardziej obiecującym rozwiązaniem wydaje się wykorzystanie sygnału synchronizującego zegary na innej częstotliwości (niższej), która nie wpłynie na zachowanie modułów komunikacyjnych, a nieskomplikowany protokół transmisji umożliwi jednoznaczne ustalenie opóźnienia w transmisji tegoż sygnału. Do transmisji sygnału synchronizującego mogą być użyte podstawowe modemy pracujące w paśmie 433 MHz.

## Wnioski

W wyniku prowadzonych rozważań autorzy doszli do wniosku, że najlepszą metodą pomiaru opóźnień w systemach rozproszonych są rozwiązania hybrydowe. Opóźnienia transmisji mierzone są przy wykorzystaniu zegarów lokalnych w modułach, natomiast do ich wzajemnej synchronizacji użyte zostaną zegary zewnętrzne, co schematycznie pokazano na rysunku 4. Pomiar taki powinien być wystarczająco dokładny i zapewniający odpowiednią rozdzielczość pomiaru. Jednocześnie będzie w miarę tani, a zapotrzebowanie na energię elektryczną w trakcie pomiaru niewielkie. Wyniki pomiaru będą zapisywane lokalnie.



Rys. 4. Idea algorytmu działania nowego układu pomiarowego

Należy także rozważyć pomiar czasu w samym module nadajnika z pominięciem pomiaru czasu w odbiornikach. Było by to możliwe, gdyby udało się zapewnić jednakowe warunki transmisji pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem oraz odwrotnie. Wówczas można by mierzyć opóźnienie z punktu A do B jako średniego z opóźnień transmisji z A do B i z B do A (odbiornik po odebraniu danych od razu by je odsyłał do nadajnika). Niestety mogą się zmienić warunki transmisji – inna droga (w przypadku sieci typu *mesh* bardzo możliwa), inne zakłócenia (przy długim czasie retransmisji bardzo prawdopodobne). Przy braku gwarancji stabilności warunków pomiarowych wspomniana koncepcja została odłożona do późniejszej weryfikacji.

**Autorzy:** dr inż. Ryszard Bogacz, Politechnika Śląska, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: ryszard.bogacz@polsl.pl; dr inż. Beata Krupanek, Politechnika Śląska, Instytut Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: beata.krupanek@polsl.pl

## LITERATURA

- [1] Nawrocki W., Rozproszone systemy pomiarowe, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa (2006)
- [2] Krupanek B., Innovative control systems for tracked vehicle platforms, *Springer*, (2014), 175-187
- [3] Krupanek B., Bogacz R., Mathematical model of communication delays in wireless networks, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 62 (2016) n.1, 61-64
- [4] Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E., *Wireless sensor networks: a survey*, Elsevier, *Computer Networks* 38 (2002), 393-422
- [5] Jakubiec J., Krupanek B., Probabilistyczny model opóźnień transmisji w jednorodnym systemie bezprzewodowym poddawanym zaburzeniom, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014) nr 11, 20-22
- [6] Krupanek B., Bogacz R., Modelling of communication delays in wireless networks. Advances measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety, 13th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics, Warsaw, Poland, June 26-27, (2014), Proceedings, 21-26
- [7] Akyildiz L.F., Su W., Sankarasubramanian Y., Cayirci E.: *A survey on sensor networks*, IEEE Communication Magazine, 40 (2002), 8, 102-114
- [8] Oliver R., Fohler G., Probabilistic Estimation of End-to-End Path Latency in Wireless Sensor Networks, IEEE Conference Mobile Adhoc and Sensor Systems, (2009), 423-431
- [9] Elson J., Estrin D., Time Synchronization for Wireless Sensor Networks, Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, IEEE Computer Society, April 23-27 (2001)
- [10] Schenato L., Gamba G., A distributed consensus protocol for clock synchronization in wireless sensor network, Proceedings of the 48<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, Dec.12-14 (2007), 2289-2294
- [11] Sundararaman B., Buy U., Kshemkalyani A.D., Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey, *Ad hoc networks*, Elsevier, v.3, (2005), 281-323
- [12] Maróti M., Kusy B., Simon G., Lédeczi A., The Flooding Time Synchronization Protocol, *SenSys Proceeding of the 2<sup>nd</sup> international conference on Embedded network sensor systems*, (2004), 39-49
- [13] Behrendt K., Fodero K., The Perfect Time: An Examination of Time-Synchronization Techniques, 60th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, (2006)
- [14] Ranganathan P., Nygard K, Time synchronization in wireless sensor networks: a survey, *International Journal of UbiComp*, 1 (2010) n.2, 92-102
- [15] Engeler D., Performance analysis and receiver architectures of DCF77 radio-controlled clocks, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 59, 869-88
- [16] Yin Cheny Qiang Wangz Marcus Changy Andreas Terzisy, Ultra-Low Power Time Synchronization Using Passive Radio Receivers, *Information Processing in Sensor Networks*, (2011), 1-11
- [17] Michael A Lombardi, How Accurate is a Radio Controlled Clock?, *Horological Journal*, (2010), 108-111
- [18] Kim R., Nagayama T., Jo H., Spencer B. F. Jr, Preliminary study of low-cost GPS receivers for time synchronization of wireless sensor networks, Proceedings of SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems (2012)
- [19] Garin L., Wireless Sensor Network-Based Distributed GNSS Receiver Architecture for Infrastructure Monitoring, Department of Geomatics Engineering, UCGE Reports, n.20302, (2010)
- [20] Schweitzer E. O. Whitehead D., Fodero K., Achanta S., Designing and Testing Precise Time-Distribution Systems, *Line Current Differential Protection: A Collection of Technical Papers Representing Modern Solutions*, (2014), 1-9