

Sieć bezprzewodowa do zastosowań w automatyce budynkowej

Streszczenie. Artykuł przedstawia projekt sieci bezprzewodowej przeznaczonej do zastosowań w automatyce budynkowej. W artykule opisano zagadnienia związane z wyszukiwaniem połączeń pomiędzy węzłami sieci, ustalaniem trasy przesyłanych danych i unikaniem kolizji. Przedstawiona wersja sieci służy do sterowania standardowymi elementami wykonawczymi automatyki budynkowej, ale zastosowane w niej algorytmy mogą służyć do odczytywania danych z sieci czujników lub urządzeń pomiarowych zliczających zużycie mediów (np. liczników energii elektrycznej).

Abstract. The article presents the project of wireless network designed for applications in building automation. The article includes issues related to the search of connections between network nodes, setting the route transmitted data and collision avoidance. The presented version of the network used to control actuators standard of building automation, however described algorithms can be adapted to read data from the network of sensors or measuring devices counting media consumption (eg. energy meters). (**Wireless network for applications in building automation**).

Słowa kluczowe: sieć bezprzewodowa, automatyka budynkowa, protokoły routingu.

Keywords: wireless network, building automation, routing protocols.

Wstęp

Obecnie istnieje wiele rozwiązań sieci bezprzewodowych o różnym stopniu złożoności. Szeroko rozpowszechniona komunikacja bezprzewodowa opiera się na sieciach służących do szybkiej wymiany dużej ilości danych. Najbardziej popularne są sieci Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, Z-Wave [1,2,3,4,5,6]. Implementacja złożonych protokołów komunikacyjnych tych sieci wymaga stosunkowo dużej ilości pamięci i odpowiednio szybkich procesorów. Nie jest celowym stosowanie tak złożonych protokołów komunikacyjnych w sieciach, które nie wymagają przesyłania dużej ilości danych jak to ma miejsce w automatyce budynkowej czy sieciach zdalnie odczytujących ilość zużytych mediów. W przedstawionej w dalszej części artykułu sieci radiowej skupiono się na protokole komunikacyjnym, który w założeniu miał być łatwy do zaimplementowania w dowolnym mikrokontrolerze i charakteryzował się pewnością przesyłania danych. Ponadto węzły realizowanej sieci muszą pozwalać na retransmisję danych do węzła docelowego, jeśli układ nadzorujący nie ma bezpośredniego połączenia z węzłem docelowym. Kolejnym ważnym elementem jest autokonfiguracja sieci i wyznaczanie najlepszej ścieżki połączeń pomiędzy układem nadzorującym a węzłem docelowym.

Budowa sieci

Zaprojektowana sieć składa się z urządzenia nadrzędnego (master) oraz wielu urządzeń wykonawczych (węzłów), przy czym każdy z węzłów może retransmitować odebraną ramkę danych (telegram). W danej sieci może znajdować się jeden master będący układem zarządzającym i bramą do układów zewnętrznych oraz wiele węzłów. Liczbę węzłów można dowolnie zmieniać.

Sieć została zaprojektowana w taki sposób, aby w jej gałęziach można było zastosować mikrokontrolery o jak najmniejszych zasobach. W trakcie pracy węzły nie muszą przechowywać informacji o istniejących połączeniach występujących w sieci co znacznie zmniejsza ilość pamięci potrzebnej na przechowywanie tablic zawierających informacje o połączeniach.

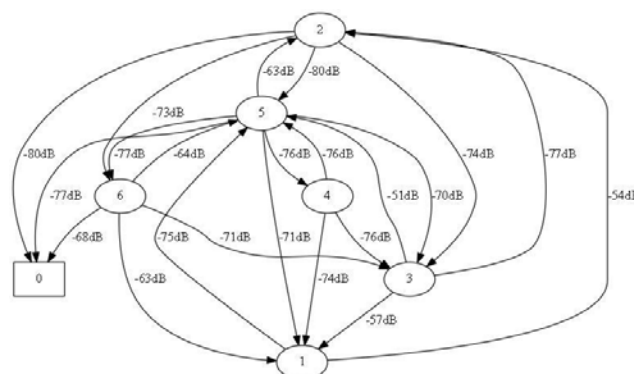
Zaprojektowane rozwiązanie umożliwia działania kilku sieci tego rodzaju w tym samym obszarze (np. dwie oddzielne sieci dla odczytu liczników energii elektrycznej i wodomierzy). Każda z sieci posiada swoją nazwę identyfikującą. Moduły przesyłając dane zawierają w nich informacje, do której z sieci te dane należą.

Konfiguracja sieci

Każdy z węzłów sieci identyfikowany jest poprzez jego unikalny 32-bitowy numer, będący odpowiednikiem numeru MAC kart sieciowych. Podczas pierwszego uruchomienia sieci urządzenie nadrzędne wykonuje operację pozwalającą na zebranie informacji o wszystkich połączeniach istniejących między węzłami sieci.

Zbieranie informacji o połączeniach między węzłami należącymi do danej sieci odbywa się sekwencyjnie. Na początku urządzenie nadrzędne rozsyła żądanie przedstawienia się wszystkich węzłów będących w jego zasięgu. Następnie do każdego z węzłów, który odpowiedział na żądanie identyfikacji przesyłany jest rozkaz, aby to on dokonał identyfikacji węzłów w swoim zasięgu. Zebrane dane przesyłane są do mastera. Powyższe operacje wykonywane są sekwencyjnie, tak aby wykonał je każdy ze znalezionych węzłów. Razem z informacjami o sieci połączeń zbierane są dane o sile sygnału (RSSI) między węzłami.

Na rysunku 1 przedstawiono graf powstały na skutek zebrania informacji o połączeniach w sieci. Ze względu na czytelność rysunku przedstawiono sieć zawierającą układ nadrzędny (oznaczony jako 0) i 6 węzłów (oznaczonych od 1 do 6). W praktyce liczba węzłów w danej sieci ograniczona jest ilością pamięci RAM mikrokontrolera znajdującego się w węzle. Mikrokontrolery posiadające 1kB RAM'u mogą pracować w sieciach zawierających do około 100 węzłów.

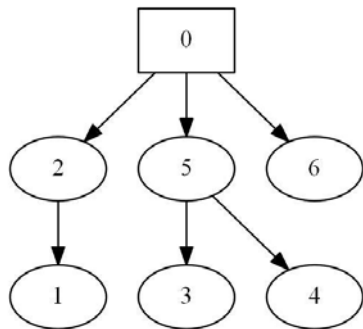


Rys. 1. Graf przedstawiający wykryte połączenia w sieci

Dysponując danymi o połączeniach między węzłami algorytm zawarty w urządzeniu nadrzędnym ustala optymalne trasy przesyłania danych do węzłów. Optymalizacja trasy przesyłania danych może odbywać się

w dwóch zasadniczych trybach: najmniejszej liczbie węzłów pośredniczących lub trasie o najsilniejszym sygnale RSSI. Trasy są wyznaczone za pomocą algorytmu Dijkstry.

Rysunek 2 przedstawia ścieżki połączeń ustalone na skutek optymalizacji pod kątem najsilniejszego sygnału.



Rys.2. Uzyskane ścieżki połączeń

Przesyłanie ramek danych (telegramów)

W najprostszym przypadku master ma bezpośrednie połączenie z węzłem docelowym. Wtedy telegram przesyłany jest bezpośrednio do węzła, a odpowiedź z węzła jest jednocześnie potwierdzeniem odebrania danych i ewentualnego wykonania żądanej operacji. W przypadku, gdy master nie ma bezpośredniego połączenia z węzłem docelowym, przesyłany telegram zawiera adresy kolejnych węzłów, przez które musi zostać retransmitowany aby dotrzeć do węzła docelowego. Węzeł docelowy po odebraniu danych odsyła odpowiedź na żądanie odtwarzając ścieżkę do mastera poprzez podawanie adresów w odwrotnej kolejności. Zawarcie trasy (adresów węzłów), po której ma zostać przesłany telegram pozwala na przesyłanie danych przez węzły pośredniczące, bez konieczności umieszczania w węzłach informacji o konfiguracji całej sieci.

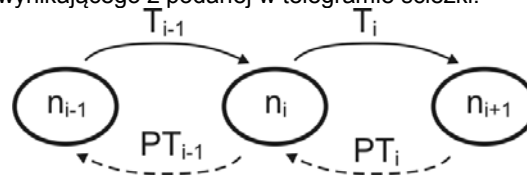
Zaletą tego sposobu przesyłania danych jest to, że pozwala on przesłać dane po dowolnie wyznaczonej trasie. Jeśli w trakcie działania systemu jeden z węzłów ulegnie uszkodzeniu master jest w stanie zlokalizować taki węzeł i wyłączyć go z trasowania. Dzięki temu nie trzeba zmieniać żadnych danych w pozostałych węzłach, aby sieć mogła pracować dalej.

Tego typu rozwiązanie pozwala także na zrównoważenie zużycia energii w sieciach, w których węzły są zasilane bateryjnie. Master wyznaczając trasę przesyłania telegramu może ją ustalać tak, aby zużycie energii związane z przesyłaniem danych przez węzły było wyrównane dla wszystkich gałęzi. Jeśli w sieci występują węzły zasilane z sieci energetycznej oraz zasilane bateryjnie trasy przesyłania telegramów można ustalić tak, aby nie były one retransmitowane przez węzły zasilane bateryjnie. Rozwiązanie to zostało wykorzystane w prezentowanej sieci.

Zastosowane w trakcie realizacji praktycznej moduły radiowe pozwalają na ustawianie mocy nadajnika każdego z węzłów sieci w trakcie jej działania. Zużycie energii przez dany węzeł silnie zależy od ilości danych przez niego przesyłanych i od mocy nadajnika [7]. Dla węzłów zasilanych bateryjnie zmniejszenie mocy nadajnika powoduje wydłużenie czasu pracy na baterii.

Rysunek 3 przedstawia retransmisję telegramu przez węzły pośredniczące w przypadku gdy master nie ma bezpośredniego połączenia z węzłem docelowym. Aby zwiększyć pewność dostarczenia telegramu T do węzła docelowego każdy retransmitujący węzeł n_i wysyła potwierdzenie PT_i do węzła n_{i-1} , z którego otrzymał

telegram, a następnie przesyła telegram do kolejnego węzła n_{i+1} wynikającego z podanej w telegramie ścieżki.



Rys.3. Retransmisja ramki danych

Jeśli węzeł retransmitujący n_i nie otrzyma potwierdzenia z węzła n_{i+1} do którego przesyłał telegram, ponawia próbę wysłania tego samego telegramu. Liczba prób przesłania informacji między sąsiednimi węzłami jest określona w telegramie. Ponadto każda retransmisja ramki danych inkrementuje odpowiednie pole w telegramie, dzięki czemu po powrocie ramki z węzła docelowego do mastera można określić czy konieczne były dodatkowe retransmisje ramek. Na tej podstawie master może ocenić jakość połączenia już w trakcie działania systemu i jeśli istnieje taka potrzeba zmienić trasę do węzła docelowego. Jeśli węzeł n_i stwierdzi brak łączności z węzłem n_{i+1} przekaże odpowiednią informację do mastera. Na tej podstawie ustalone zostaną nowe trasy z pominięciem uszkodzonego węzła.

Unikanie kolizji

Unikanie kolizji zostało zrealizowane na zasadzie wymiany danych w trybie half-duplex, co oznacza, że w obrębie danej sieci w jednym czasie może nadawać tylko jeden węzeł. Może jednak dochodzić do sytuacji, w której pasmo jest zajęte przez nadajniki nie należące do sieci, dlatego przed rozpoczęciem nadawania sprawdzana jest dostępność pasma. Jeśli pasmo jest zajęte moduł czeka losowo czas i ponawia próbę nadania. Zakres losowo wybranego czasu jest ustawiany domyślnie w przedziale od 1 ms do 10 ms, ale może być zmieniany przez mastera w trakcie normalnego działania sieci.

Dodatkowo w celu sprawdzenia czy nie doszło do kolizji już w trakcie nadawania telegramu stosuje się system potwierdzeń opisany powyżej, oraz sumy kontrolne CRC. W przypadku stwierdzenia błędu w sumie kontrolnej przesłanie pakietu danych jest powtarzane.

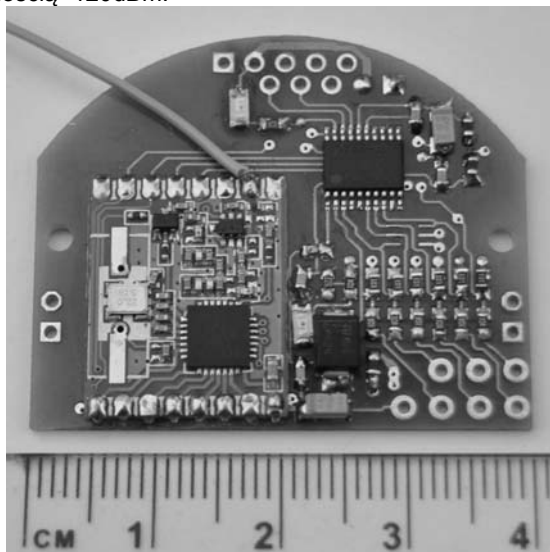
Bezpieczeństwo przesyłanych danych

Dane przesyłane drogą bezprzewodową są szczególnie narażone na możliwość ingerencji ze strony elementów nie należących do budowanej sieci. Chodzi tu zarówno o możliwość podsłuchu jak i przesyłanie do sieci nieporządanych (fałszywych) danych [8,9,10]. W przedstawionej sieci dane mogą być szyfrowane za pomocą algorytmu AES ze 128 bitowym kluczem, co uznano za wystarczający system zabezpieczania biorąc pod uwagę przeznaczenie sieci.

Realizacja praktyczna i testy sieci

W celu przeprowadzenia testów eksperymentalnych zbudowano sieć składającą się z jednego mastera i 18 węzłów. Rysunek 4 przedstawia zdjęcie praktycznej realizacji węzła sieci. W zależności od zaimplementowanego oprogramowania moduł węzła sieci mógł sterować triakami, oświetleniem LED RGB, przekaźnikami lub wystawiać napięcie z zakresu 0-10V. W trakcie eksperymentów rolę mastera pełnił komputer PC, do którego dołączono moduł radiowy. Komputer PC pozwalał dokonywać analizy zbudowanej sieci połączeń w sposób graficzny (rys.1, rys.2). Docelowo oprogramowanie mastera umieszczone będzie w mikrokontrolerze. Węzły sieci zbudowane zostały na podstawie mikrokontrolerów

STM32F030 (STMicroelectronics) i modułów radiowych RFM69HW (HOPERF). Zastosowane moduły radiowe działają w paśmie ISM 433MHz, charakteryzują się one mocą nadajnika wynoszącą 100mW (+20dBm), oraz czułością -120dBm.



Rys.4. Zdjęcie realizacji praktycznej węzła sieci

Próby eksperymentalne przeprowadzone zostały dla różnych konfiguracji sieci. Od najprostszej, w której master miał bezpośrednie połączenie ze wszystkimi węzłami, do takiej, w której telegram musiał być retransmitowany ośmiokrotnie zanim dotarł do węzła docelowego. Testy były przeprowadzane w domu jednorodzinnym oraz w budynku wzniesionym w technologii wielkopłytowej. Szybkość transmisji pakietu danych pomiędzy modułami wynosiła 500kbps. Ze względu na konieczność retransmisji danych w celu przesłania ich do węzła docelowego, efektywna szybkość transmisji była kilkukrotnie mniejsza. Retransmisja danych pomiędzy węzłami powoduje opóźnienia w przesyłanych danych rzędu 5 ms dla każdego z węzłów. Opóźnienie to jest spowodowane głównie czasem przesyłu danych. Każdy węzeł retransmitujący po odebraniu danych wysyła potwierdzenie do węzła, z którego je odebrał, a następnie retransmituje je do kolejnego węzła.

W trakcie testów wykonywano próby polegające na wyłączaniu niektórych węzłów sieci. Próby te miały na celu sprawdzenie działania sieci w wypadku awarii niektórych jej węzłów. Algorytm trasowania działa w taki sposób, że po wykryciu braku komunikacji z danym węzłem zostaje on automatycznie wyłączony z trasowania, a telegramy są przesyłane nowo wybraną ścieżką. Problemem jest uszkodzenie węzła, który jest tzw. mostem. Jego awaria powoduje, że część sieci nie ma połączenia z masterem na skutek czego staje się tzw. wyspą. Taka sytuacja jest wykrywana przez urządzenie nadrzędne, które może podjąć odpowiednie działania. O ile w takiej sytuacji nie ma możliwości nawiązania połączenia z wyspą poprzez zmianę trasy telegramów to urządzenie nadrzędne jest w stanie wysłać wiadomość do zarządcy systemu z informacją o zaistniałej sytuacji.

W celu uniknięcia potencjalnie niebezpiecznej sytuacji jaką są mosty w sieci można stosować dodatkowe węzły mające zabezpieczyć sieć przed utratą integralności na wypadek uszkodzenia modułu będącego mostem. Wykrywanie mostów w sieci może się odbywać automatycznie. Na podstawie zebranych informacji o połączeniach w sieci, algorytm jest w stanie określić gdzie występują mosty. Ponadto wykonując symulacje polegającą

na wyłączaniu kolejnych węzłów w sieci i trasowaniu ścieżek można określić gdzie pojawią się mosty na skutek awarii danego węzła.

Przeprowadzone testy potwierdzają skuteczność działania sieci w zakresie sterowania elementami automatyki budynkowej.

Podsumowanie

Przedstawiana w artykule sieć była projektowana pod kątem zastosowań w tzw. inteligentnych budynkach, oraz sieciach do odczytu danych z liczników mediów. Głównymi założeniami była automatyczna konfiguracja sieci, możliwość przesyłania danych z retransmisją, możliwość zmiany trasy przesyłanych danych już w trakcie działania systemu, możliwość rozbudowy sieci, pewność przesyłania danych oraz niewielkie wymagania sprzętowe związane z realizacją transmisji danych przez węzły.

W stosunku do istniejących na rynku rozwiązań przedstawiona w artykule sieć bezprzewodowa stanowi alternatywne rozwiązanie cechujące się łatwością implementacji algorytmów i niewielkimi wymaganiami odnośnie warstwy fizycznej.

Przedstawiona sieć w zamyśle służy do wymiany informacji pomiędzy węzłami nie zmieniającymi wzajemnej pozycji. Niemniej istnieje możliwość zastosowania jej w układach mobilnych. Przy takiej implementacji należałoby co odpowiedni czas dokonywać sprawdzenia połączeń istniejących w sieci, a następnie na ich podstawie na bieżąco generować trasy przesyłania telegramów.

Artykuł przedstawia prace badawcze zrealizowane w ramach projektu Voucher Badawczy. Projekt jest finansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013. Wyniki prac będą wdrażane w firmie DEIMIC sp. z o.o.

LITERATURA

- [1] RFC 4919, IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals, Network Working Group, Aug. 2007
- [2] RFC 4944, Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, Network Working Group, Sept. 2007
- [3] Edirisinghe, R., Zaslavsky A., Cross-Layer Contextual Interactions in Wireless Networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, issue: 2, pp. 1114-1134, 2014
- [4] Grabowski F., Paszkiewicz A., Bolanowski M., Lokalne sieci bezprzewodowe w kontekście systemów złożonych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013) nr 11, 312-316
- [5] Krygier J., Bednarczyk M., Maślanka K., Efektywny transfer danych w bezprzewodowych sieciach kratowych i sensorowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013) nr 7, 227-231
- [6] Stępień J., Kołodziej J., Ostrowski J., Golański R., System automatyki budynkowej z interfejsami ZigBee, *Elektronika* 12/2012
- [7] Boniewicz M., Zieliński M., Pomiarowa sieć radiowa o niskim zużyciu energii, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 56, nr 1/2010
- [8] Dunajewski I., Bezprzewodowe sieci sensoryczne charakterystyka i bezpieczeństwo, *Przegląd Telekomunikacyjny*, nr 2-3/2009
- [9] Studziński P., Biernacki K., Dobrowiecka B., Pikiel M., Baca K., Bezprzewodowe rozproszone systemy pomiarowe, *Elektronika*, 7/2006, 28-30
- [10] Stępień J., Marszałek K., Bezprzewodowe sieci transmisji danych w zastosowaniach sensorowych, *Elektronika* 6/2008, 275-277

Autor: dr Leszek Wydzgowski, Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń, E-mail: lehu@fizyka.umk.pl