

Dariusz CABAN

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej, PAN

BEZPRZEWODOWA REALIZACJA SEGMENTÓW SIECI POLOWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono niektóre zagadnienia związane z bezprzewodową realizacją segmentów sieci polowej. Omówiono kontrolery pakietowe, które umożliwiają współużytkowanie jednego pasma częstotliwości przez kilka niezależnie pracujących segmentów. Zaprezentowano również wyniki badań zrealizowanych segmentów bezprzewodowych.

WIRELESS IMPLEMENTATION OF SEGMENTS OF FIELDBUSSES

Summary. In this article some issues on implementation of wireless segments of fieldbuses are presented. Packet controllers, that are the devices enabling several independently working wireless segments to share one frequency band are discussed. Results of investigation of implemented wireless segments are also presented.

1. Wprowadzenie

Istniejące rozwiązania sieci polowych, przeznaczonych do zastosowań w rozproszonych systemach pomiarowo-kontrolnych, wykorzystują przewodowe media transmisyjne. W pewnych przypadkach ułożenie połączeń przewodowych jest niemożliwe, zbyt kosztowne lub sprawia zbyt wiele trudności. Pozostaje wówczas zastosowanie mediów bezprzewodowych [1,4,5,12]. Dostępnych jest wiele urządzeń transmisji bezprzewodowej wyposażonych w interfejs RS232C lub RS485, umożliwiających przesyłanie informacji zgodnie z protokołem asynchronicznej transmisji znakowej [6]. Interfejsy te oraz protokół transmisji asynchronicznej stosowane są w niektórych typach sieci polowych, jak np. Modbus [6], Profibus [9], hierarchiczna sieć polowa sterowana rozkazami języka SCPI [7]. Możliwa jest zatem realizacja łączy bezprzewodowych w tych sieciach [15,16].

Sieci polowe łączą z reguły urządzenia pomiarowo-kontrolne obsługujące jeden proces technologiczny. W niektórych przypadkach celowy jest jednak podział procesu na fragmenty obsługiwane niezależnie [7]. Urządzenia pomiarowo-kontrolne obsługujące wydzielone fragmenty sprzęga się wtedy osobnymi sieciami polowymi, tworząc segmenty, te zaś integruje się poprzez sieci typu LAN. Bezprzewodowa realizacja fragmentów sieci komputerowych (w tym przypadku segmentów sieci polowych) jest w praktyce spotykana najczęściej [10]. Stosowanie urządzeń transmisji bezprzewodowej jest w każdym kraju regulowane przepisami dotyczącymi m.in. pasm częstotliwości, których przydziałem zajmuje się odpowiedni organ administracji państwowej. Jeżeli planuje się bezprzewodową realizację n niezależnie pracujących segmentów sieci, wynikiem starań może być przydział:

- osobnego pasma częstotliwości dla każdego segmentu,
- x pasm częstotliwości, gdzie $1 < x < n$,
- 1 pasma częstotliwości.

Z uwagi na tłok panujący w eterze uzyskanie więcej niż jednego pasma może się okazać niemożliwe. Jednak nawet wtedy, gdy dysponuje się tylko jednym pasmem częstotliwości, realizacja n niezależnie pracujących bezprzewodowych segmentów sieci polowej jest możliwa, jeśli spełniony jest pewien warunek, a mianowicie obszary ich działania powinny być rozdzielone. Jeżeli jednak takie rozdzielenie jest niemożliwe, należy do realizacji bezprzewodowych segmentów zastosować urządzenia transmisyjne z wbudowanymi mechanizmami współużytkowania medium bezprzewodowego przez wielu użytkowników. Takimi urządzeniami są kontrolery pakietowe [13].

Większość sieci polowych posiada topologię magistrali, która jest łączem wielopunktowym [1]. Realizacja takiego łącza wymaga stosowania rozsiewczego trybu transmisji, którego cechą charakterystyczną jest to, że informacja wysyłana przez jednego z użytkowników łącza dociera do wszystkich pozostałych użytkowników. Nadawca musi zatem jawnie wskazać adresata. W komunikacji przewodowej rozprzestrzenianie się sygnału jest ograniczone do linii transmisyjnej, a więc informacja rozsiewana w łączu przewodowym jest odbierana tylko przez węzły sprzęgnięte tym łączem. Dzięki temu, węzłom w różnych segmentach można przypisywać te same adresy. W komunikacji bezprzewodowej sygnały rozchodzą się w wolnej przestrzeni, tak więc informacja będzie docierać do odbiorców przynależących także do innych segmentów niż nadawca. Wymusza to niepowtarzalność adresów węzłów oraz rezygnację z rozgłaszania. Realizacja przez urządzenia transmisyjne protokołu dostępu do łącza bezprzewodowego jest więc warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym do tego, aby niezależne segmenty sieci polowej mogły pracować bez ograniczania swych funkcji. Ich zachowanie można uzyskać poprzez dodatkowe adresowanie informacji przesyłanej przez łącze bezprzewodowe. Adresowanie to powinno być wprowadzane przez urządzenia transmisyjne

bezprzewodowej, w sposób dla węzłów sieci niewidoczny, co nie wymusi zmian w ich oprogramowaniu komunikacyjnym. Realizacja tego adresowania wymaga odpowiedniego zaprojektowania protokołu łącza bezprzewodowego.

Bezprzewodowa realizacja niezależnie pracujących segmentów sieci polowej przy dostępnym tylko jednym paśmie częstotliwości stanowiła przedmiot pracy doktorskiej wykonanej przez autora w Instytucie Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN [14]. W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienia poruszane w tej pracy.

2. Kontrolery pakietowe dla sieci bezprzewodowych

Węzły sieci polowych realizują protokoły dostępu do łącza transmisyjnego z grupy protokołów przydziału na żądanie - przepytывania bądź przekazywania uprawnienia (w nielicznych przypadkach stosowany jest protokół dostępu swobodnego, np. w sieciach LonWorks oraz CAN [9]). Protokoły te gwarantują przydział łącza tylko jednemu użytkownikowi; przydział ten jest poprzedzany przesłaniem informacji sterującej, przy czym przesłanie to odbywa się również w sposób bezkonfliktowy. Przy n niezależnie pracujących segmentach sieci mamy n niezależnie realizowanych mechanizmów przydziału łącza. Wprowadzanie informacji (zarówno sterującej, jak i użytecznej) do łącza nie jest w tych protokołach poprzedzane sprawdzaniem aktualnego jego stanu. Zmiana dokonana w warstwie fizycznej segmentu sieci pozostaje dla węzłów niewidoczna, więc realizują one dostęp do medium transmisyjnego na dotychczasowych zasadach. Stąd brak sprawdzania stanu łącza przed rozpoczęciem nadawania przy n bezprzewodowych segmentach pracujących w jednym paśmie częstotliwości może prowadzić do konfliktów przy dostępie do łącza bezprzewodowego. Dlatego dla organizacji poprawnego użytkowania wspólnego dla wszystkich segmentów medium bezprzewodowego należy zastosować urządzenia transmisyjne z wbudowanymi mechanizmami dostępu do tego medium.

Kontroler pakietowy dane odbierane z węzła sieci przesyła przez łącze bezprzewodowe w postaci pakietów. Zakres usług udostępnianych przez kontrolery pakietowe odpowiada usługom warstwy fizycznej i warstwy liniowej. Do komunikacji kontrolera z węzłem sieci wykorzystywany jest w większości przypadków interfejs RS232C. W podwarstwie dostępu kontrolery realizują najczęściej protokół ze sprawdzaniem stanu łącza przed rozpoczęciem nadawania (CSMA, ang. *Carrier Sense Multiple Access*) w wersji bez wymuszania transmisji (ang. *nonpersistent CSMA*, nazywany również nietrwałym CSMA) lub z wymuszeniem transmisji z prawdopodobieństwem p (ang. *p-persistent CSMA*, nazywany również p -trwałym CSMA) [11]. W podwarstwie łącza logicznego zakres usług jest w dostępnych kontrolerach pakietowych niejednolity. W najprostszym przypadku obejmuje on tylko utworzenie pakietu

złożonego z nagłówka, pola informacyjnego, w którym umieszczana jest odebrana z węzła sieci informacja, oraz pola kontrolnego. Nadawana przez kontroler pakietowy informacja jest odbierana przez wszystkie pozostałe kontrolery i przekazywana do węzłów sieci, dlatego adresowanie i ewentualne potwierdzanie poprawnego odbioru pakietu muszą dokonywać węzły sieci. Bardziej rozbudowane konstrukcje kontrolerów pakietowych realizują także adresowanie pakietów, potwierdzanie odbioru i automatyczną retransmisję pakietu w przypadku wystąpienia błędów transmisji. Adresy służą tylko do skomunikowania się kontrolerów, zawartość pola informacyjnego pakietu odebranego z łącza bezprzewodowego zostanie przekazana do węzła sieci tylko przy wystąpieniu zgodności adresu pakietu z adresem kontrolera. Są one niezmiennie w trakcie pracy sieci, zatem komunikacja odbywa się pomiędzy ustaloną parą kontrolerów; niemożliwe jest więc dostarczenie drogą bezprzewodową informacji do więcej niż jednego węzła. Pozwalają na to kontrolery dokonujące transmisji w trybie adresowania grupowego, ale wykluczają stosowanie potwierżeń. Zresztą w pewnych przypadkach potwierdzanie pakietów jest zbędne.

Prostszym rozwiązaniem, wymagającym mniejszego nakładu pracy podczas konfiguracji sieci, jest przypisywanie wszystkim kontrolerom pakietowym współpracującym z węzłami np. pojedynczego segmentu sieci polowej tego samego adresu oraz niestosowanie potwierżeń odbioru pakietów.

Charakterystykę konstrukcji dostępnych kontrolerów pakietowych można znaleźć w pracach [13,14].

3. Bezprzewodowa realizacja niezależnie pracujących segmentów sieci typu Modbus

3.1. Modelowa realizacja węzłów sieci typu Modbus

Sieć polowa typu Modbus, przeznaczona do zastosowań w rozproszonych systemach pomiarowo-kontrolnych, jest rozwiązaniem dość znanym i popularnym. Należy ona do grupy standardów *de facto*; szybkiemu rozprzestrzenianiu się sieci tego typu sprzyjało wykorzystanie w konstrukcji jej warstwy fizycznej asynchronicznej transmisji znakowej oraz ogólnodostępność specyfikacji jej architektury logicznej [8]. Ponieważ była ona prezentowana w szeregu publikacji, także krajowych [1,6], w niniejszym artykule nie będzie szczegółowej przedstawiana.

Wykorzystywane w sieci typu Modbus rozwiązania sprzętowe umożliwiły zamodelowanie jej węzłów przy użyciu popularnych mikrokomputerów IBM PC. Dla potrzeb pracy doktorskiej zaimplementowano oprogramowanie węzłów: nadrzędnego i podrzędnego, przy

czym ograniczono się do trybu transmisji RTU (ang. *Remote Terminal Unit*) oraz usługi odczytu i zapisu zawartości grupy rejestrów. Poprawność realizacji modelowej węzłów sieci potwierdziły przeprowadzone badania funkcjonalne.

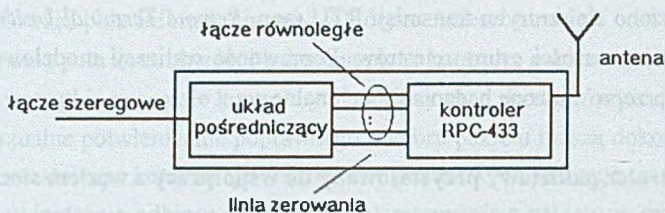
3.2. Kontroler pakietowy przystosowany do współpracy z węzłem sieci typu Modbus

Większość z dostępnych na rynku kontrolerów pakietowych jest wyposażona w łącze RS232C, a komunikacja z nimi odbywa się według protokołu asynchronicznej transmisji znakowej. Mogą więc one bezpośrednio współpracować z węzłami sieci polowej typu Modbus. Najczęściej jednak moc nadawanego przez kontrolery pakietowe sygnału przekracza wartość 20 mW, co sprawia, że ich stosowanie w Polsce wymaga uzyskania odpowiedniego zezwolenia oraz przydziału pasma częstotliwości. Ponadto przeważająca większość z nich charakteryzuje się znaczną ceną. Stąd do realizacji doświadczalnych bezprzewodowych segmentów sieci typu Modbus wykorzystano kontrolery pakietowe typu RPC-433, oferowane przez firmę Radiometrix Ltd. [17]. Są to elementy pracujące na częstotliwości nośnej 433.92 MHz, przy mocy nadawanego sygnału równej 0.25 mW. Transmisja informacji w łączu bezprzewodowym odbywa się z prędkością 40 kb/s. Są one wyposażone w cztery protokoły dostępu do łącza bezprzewodowego:

- dostęp swobodny bez sprawdzania stanu łącza przed rozpoczęciem nadawania, tak jak w protokole ALOHA [2],
- dostęp swobodny bez sprawdzania stanu łącza i ze stałym opóźnieniem od chwili utworzenia pakietu do chwili rozpoczęcia nadawania; wielkość tego opóźnienia zależy m.in. od wartości przypisanego kontrolerowi 8-bitowego identyfikatora,
- 1-trwały CSMA,
- nietrwały CSMA, przy czym możliwy jest wybór przedziału wartości, spośród których losowany jest odcinek czasu przed kolejną próbą dostępu do łącza.

Cena tych kontrolerów jest stosunkowo niska.

Kontroler RPC-433 jest jednak wyposażony w łącze równoległe, przez które komunikacja odbywa się według protokołu wymiany z potwierdzeniem. Stąd jego bezpośrednia współpraca z węzłem sieci Modbus jest niemożliwa. Poza tym kontroler RPC-433 nie ma wbudowanego mechanizmu adresowania wysyłanych przez siebie pakietów. Jeżeli jedno pasmo częstotliwości współużytkuje n niezależnie pracujących segmentów sieci polowej, brak takiego adresowania, jak wspomniano w rozdziale 1, wymusi ograniczenie ich funkcji. Ze względu na odmienność typów łączy w węzle sieci i kontrolerze RPC-433 ich współpraca wymaga zastosowania układu pośredniczącego (rysunek 1) realizującego konwersję protokołów łącza szeregowego i równoległego. Konwersja ta przysłała przed węzłem sieci zmianę wprowadzoną w technicznej implementacji warstwy fizycznej sieci, zachowując jednocześnie zakres usług



Rys. 1. Schemat blokowy radiowego kontrolera pakietowego przystosowanego do współpracy z węzłem sieci typu Modbus

Fig. 1. Block diagram of radio packet controller adapted to interoperation with node of Modbus network

przez tę warstwę udostępnianych oprogramowaniu warstwy liniowej węzła. Oprócz konwersji układ pośredniczący realizuje jeszcze następujące zadania:

- adresowanie pakietów przesyłanych przez łącze bezprzewodowe,
- grupowanie napływających z węzła sieci znaków w paczki przed ich zapisem do kontrolera RPC-433 - rozmiar paczki może wynosić maksymalnie 26 znaków,
- przekazywanie informacji odebranej z łącza bezprzewodowego do węzła sieci, z czym wiąże się filtracja pakietów na podstawie adresu,
- zapewnienie możliwości zmiany parametrów transmisji w łączu szeregowym - w sieci typu Modbus informację transmituje się z prędkością z zakresu $50 \div 19200$ b/s - oraz ustawienia niektórych parametrów transmisji w łączu bezprzewodowym m.in. adresu kontrolera.

Układ pośredniczący stanowi rozwiązanie sprzętowo-programowe, z wyprowadzonymi na zewnątrz łączami: szeregowym i równoległym, zrealizowane w oparciu o mikrokomputer jednoukładowy z rodziny MCS-51 [18]. Cechuje się ono znaczną elastycznością - zmiana typu układu radiowego wymusi tylko modyfikację oprogramowania, a nie części sprzętowej układu pośredniczącego.

Jednym z warunków rozpoczęcia transmisji przez łącze bezprzewodowe jest odebranie przez kontroler pakietowy z węzła sieci Modbus kompletnej ramki; drugim warunkiem jest brak zajętości tego łącza. Stąd istotnego znaczenia nabiera sposób wykrywania końca odbieranej ramki, gdyż ma on również wpływ na czas trwania transakcji w segmentach bezprzewodowych [8]. Według specyfikacji architektury logicznej sieci Modbus, w trybie RTU znacznikiem końca ramki jest cisza w łączu trwająca minimum $3.5 \cdot \text{czas transmisji znaku}$. Przy niskich prędkościach czas trwania ciszy przybiera więc znaczne wartości. W zrealizowanych dla potrzeb pracy doktorskiej kontrolerach pakietowych zastosowano inną metodę wykrywania końca ramki. Wykorzystano przy tym fakt, że wszystkie ramki w sieci Modbus mają identyczną strukturę, a ich całkowite długości można określić na podstawie informacji sterującej zawartej na ich początku; tą informacją jest kod funkcji. Aby jednak określenie

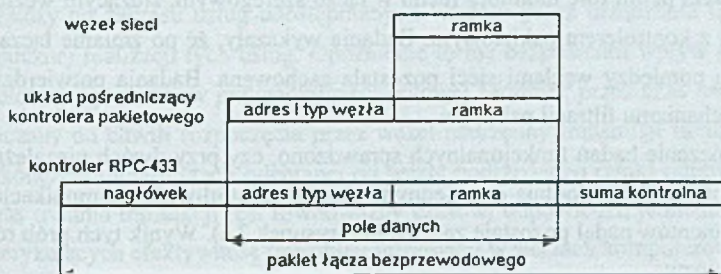
długości ramki było możliwe, kontroler pakietowy musi „wiedzieć”, czy współpracuje z węzłem nadrzędnym czy podrzędnym sieci Modbus. Informacja ta jest zapisywana w kontrolerze razem z jego adresem podczas procesu konfiguracji segmentów bezprzewodowych. Badania wykazały, że w porównaniu z metodą wykorzystującą pomiar ciszy w łączu zaimplementowana w kontrolerze metoda daje przyspieszenie o $31 + 96\%$ przy prędkości komunikacji pomiędzy węzłem sieci a kontrolerem pakietowym z zakresu $19200 + 2400$ b/s.

3.3. Protokół łącza bezprzewodowego

Protokół łącza bezprzewodowego zaprojektowano zgodnie z następującymi założeniami:

- jedna ramka sieci Modbus będzie przesyłana w jednym pakiecie łącza bezprzewodowego. W sieciach polowych przesyłane są ramki krótkie, stąd stosowanie fragmentacji ramek jest w tym przypadku niecelowe;
- wszystkim kontrolerom pakietowym współpracującym z węzłami pojedynczego segmentu sieci polowej będą przypisane te same adresy, co ułatwi proces konfiguracji segmentu;
- w pakiecie będzie umieszczana informacja o typie współpracującego z kontrolerem węzła sieci. Umożliwi to wyeliminowanie odbioru przez węzeł podrzędny segmentu ramek nadawanych przez pozostałe węzły podrzędne należące do tego samego segmentu, które to ramki i tak zostałyby odrzucone. Zmniejszy to obciążenie węzła podrzędnego;
- w podwarstwie dostępu będą stosowane protokoły: bez sprawdzania stanu łącza bezprzewodowego i wstrzymywania rozpoczęcia nadawania (przydatny przy bezprzewodowej realizacji tylko jednego segmentu sieci polowej), nietrwały CSMA oraz 1-trwały CSMA.

Postać pakietu łącza bezprzewodowego przedstawiono na rysunku 2, na którym zilustrowano również kolejne etapy jego powstawania.



Rys. 2. Pakiet łącza bezprzewodowego oraz kolejne etapy jego tworzenia
Fig. 2. Packet of wireless link and successive stages of its creating

4. Badania bezprzewodowych segmentów sieci typu Modbus

4.1. Cel badań

Przeprowadzone badania bezprzewodowych segmentów sieci można podzielić na dwie grupy:

- badania funkcjonalne,
- badania efektywności transmisji informacji w segmentach.

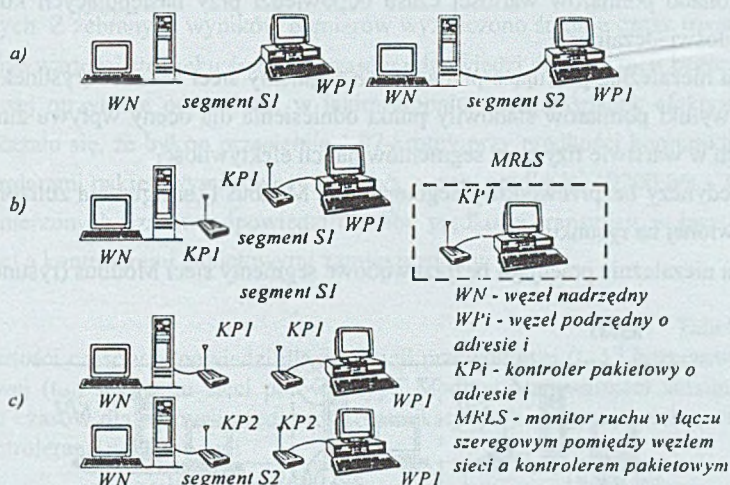
Badania z pierwszej grupy miały na celu sprawdzenie, czy zastąpienie łączy przewodowych segmentów łącami bezprzewodowymi pozostanie dla węzłów sieci niewidoczne, czyli czy zostaną spełnione założenia warstwowego modelu OSI/ISO. W trakcie tych badań sprawdzono również zgodność działania protokołu łączy bezprzewodowego z jego założeniami. Celem badań drugiej grupy była ocena wpływu zmiany łączy fizycznego na efektywność segmentów sieci.

4.2. Badania funkcjonalne

W pierwszej kolejności sprawdzono poprawność modelowej realizacji węzłów sieci polowej typu Modbus. Dla tego celu zestawiono dwa przewodowe segmenty tej sieci (rysunek 3.a). Oprogramowanie węzłów umożliwia przeprowadzanie transakcji odczytu i zapisu grupy rejestrów, przy czym prędkość transmisji i liczba rejestrów są ustawialne. Oprogramowanie węzła nadrzędnego ponadto rejestruje liczbę wysłanych ramek polecenia i odebranych ramek odpowiedzi oraz czas rozpoczęcia i zakończenia transakcji. Przeprowadzone próby wykazały poprawność modelowej realizacji węzłów sieci.

Następnie sprawdzono działanie zaimplementowanego w kontrolerze pakietowym protokołu łączy bezprzewodowego. Dla tego etapu badań zestawiono stanowisko doświadczalne złożone z trzech mikrokomputerów z przyłączonymi do nich kontrolerami pakietowymi (rysunek 3.b). Dwa z mikrokomputerów stanowiły bezprzewodowy segment sieci Modbus, natomiast trzeci pełnił rolę monitora ruchu w łączy szeregowym, służącym węzłowi sieci do komunikacji z kontrolerem pakietowym. Badania wykazały, że po zmianie łączy fizycznego komunikacja pomiędzy węzłami sieci pozostała zachowana. Badania potwierdziły też skuteczność mechanizmu filtracji pakietów.

Na zakończenie badań funkcjonalnych sprawdzono, czy przy dwóch niezależnie pracujących segmentach sieci Modbus oraz jednym paśmie częstotliwości komunikacja pomiędzy węzłami segmentów nadal pozostaje zachowana (rysunek 3.c). Wynik tych prób również okazał się pozytywny.



Rys. 3. Konfiguracje sieci doświadczalnych wykorzystywanych w badaniach funkcjonalnych dla sprawdzenia: a) poprawności modelowej realizacji węzłów sieci Modbus, b) zgodności protokołu łączy bezprzewodowego z założeniami, c) możliwości współużytkowania jednego pasma częstotliwości przez dwa niezależnie działające segmenty sieci Modbus

Fig. 3. Configurations of experimental networks used in functional investigations to test: a) correctness of model implementation of nodes of Modbus network, b) compatibility of wireless link protocol with its assumptions, c) possibility of sharing of one frequency band by two independently working Modbus segments

4.3. Badania efektywności transmisji w segmentach

Bezprzewodowa realizacja sieci polowych przy zastosowaniu zewnętrznych dla węzłów sieci urządzeń posiada tę zaletę, że nie wymusza zmian w konstrukcji i oprogramowaniu węzłów. Sposób ten wprowadza jednak dwa stopnie pośredniczące na drodze danych pomiędzy nadawcą a odbiorcą, a tym samym pewne opóźnienia w procesie transmisji. Wielkość tego opóźnienia zależy od zakresu usług udostępnianych węzłom przez urządzenia transmisyjne oraz od technicznej realizacji tych usług. Opóźnienie to ma bezpośredni wpływ na efektywność sieci polowej wyrażoną, w przypadku sieci polowej Modbus, przez czas trwania transakcji, wyznaczany od chwili rozpoczęcia przez węzeł nadrzędny transmisji ramki polecenia do chwili zakończenia interpretacji odebranej od węzła podrzędnego ramki odpowiedzi. Tak określony czas trwania transakcji jest równoważny czasowi odpowiedzi, jednemu z parametrów charakteryzujących efektywność transmisji informacji w sieciach komputerowych [19].

Następstwem wprowadzanych przez kontrolery opóźnień jest zmniejszenie efektywności sieci. Dla oceny stopnia zmian efektywności sieci po jej bezprzewodowej realizacji w trakcie

przewodowych. Z zebranych wyników pomiarów wyznaczono średnie czasy trwania transakcji. Obliczając wartości stosunku średnich czasów odpowiedzi dla realizacji bezprzewodowej i przewodowej otrzymuje odpowiedź, w jakim stopniu nastąpił spadek efektywności segmentów. Okazało się, że był on przeciętnie 1.97-krotny przy prędkości komunikacji węzłów sieci z kontrolerami pakietowymi równej 2400 b/s, a przy prędkości 19200 b/s - 3.17-krotny. Wartości zmierzonych czasów odpowiedzi dla obu prędkości transmisji w łączu pomiędzy węzłami sieci a kontrolerami pakietowymi zamieszczono w tabeli 1.

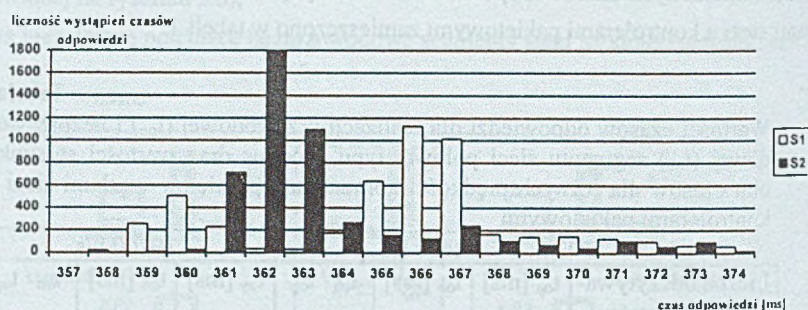
Tabela 1

Wartości czasów odpowiedzi dla realizacji przewodowej (t_{op}) i bezprzewodowej (t_{ob}) segmentu sieci polowej typu Modbus oraz wartości stosunku obu czasów dla różnych prędkości komunikacji pomiędzy węzłami sieci a kontrolerami pakietowymi

Liczba odczytywanych rejestrów	2400 b/s			19200 b/s		
	t_{op} [ms]	t_{ob} [ms]	t_{ob} / t_{op}	t_{op} [ms]	t_{ob} [ms]	t_{ob} / t_{op}
1	97.14	186.09	1.92	13.34	43.88	3.28
2	106.28	205.29	1.93	14.46	46.94	3.25
3	115.4	224.54	1.95	15.6	50.25	3.22
4	124.58	243.44	1.95	16.75	53.12	3.17
5	133.71	262.75	1.97	17.89	56.73	3.17
6	142.86	281.64	1.97	19.01	60.05	3.16
7	152.02	300.79	1.98	20.15	63.14	3.13
8	161.19	319.79	1.98	21.3	66.11	3.1
9	170.28	338.73	1.99	22.42	69.53	3.1
10	179.48	358.11	2	23.56	72.7	3.09
		Średnia	1.97		Średnia	3.17

Przy pojedynczym bezprzewodowym segmencie sieci Modbus prowadzenie przez kontrolery pakietowe nasłuchu łącza przed rozpoczęciem nadawania jest zbyteczne. Przy n niezależnie pracujących segmentach sieci Modbus, współużytkujących jedno pasmo częstotliwości, brak sprawdzania stanu łącza przed rozpoczęciem nadawania może prowadzić do kolizji. Kontrolery pakietowe zastosowane do zestawienia doświadczalnych segmentów bezprzewodowych mają wbudowane dwa typy protokołu dostępu z prowadzeniem nasłuchu łącza przed rozpoczęciem nadawania: nietrwały oraz p-trwały CSMA. Pomiary przeprowadzone przy n niezależnie pracujących bezprzewodowych segmentach sieci Modbus dały w rezultacie rozróżnienie czasów odpowiedzi, bowiem czas nasłuchu łącza nie jest stały, ale zależy od przyjętego protokołu i obciążenia łącza bezprzewodowego. Czasy odpowiedzi przyjmowały wartości losowe z pewnego przedziału; aby poznać strukturę rozkładu, należy na podstawie zebranych wyników skonstruować histogramy licznosci wystąpień czasów odpowiedzi w przedziale.

Oznacza to, że determinizm sieci polowej typu Modbus jest w tym przypadku tracony. Przykładowy histogram rozkładu czasów odpowiedzi przy realizacji transakcji odczytu zawartości 10 rejestrów, protokole dostępu do łącza bezprzewodowego bez wymuszania transmisji oraz prędkości komunikacji pomiędzy węzłami sieci a kontrolerami pakietowymi równej 2400 b/s przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Histogram licznosci wystapien czasow odpowiedzi przy dwóch niezależnie pracujących bezprzewodowych segmentach sieci typu Modbus (transakcje - odczyt zawartości 10 rejestrów, protokół dostępu - nietrwala CSMA, prędkość transmisji pomiędzy węzłem sieci a kontrolerem pakietowym - 2400 b/s)

Fig. 5. Histogram of response time measured when there were two independently working wireless Modbus segments (transactions - reading 10 registers, access protocol - non-persistent CSMA, bit rate between network node and packet controller - 2400 b/s)

Wyznaczono również odsetek transakcji nieudanych wskutek występowania kolizji w łączu bezprzewodowym, przy czym ruch w tym łączu był generowany przez węzły segmentów sieci oraz monitor łącza bezprzewodowego (rysunek 4). W najgorszym przypadku sięgał on wartości 0.4, średnio wynosił on dla wszystkich protokołów 0.1. Rozbieżności przy pomiarach dla konkretnego protokołu wynikały ze zmienności warunków pomiaru. Uzyskane wyniki osiągnięto przy maksymalnym obciążeniu wprowadzanym przez węzły segmentów - następną transakcję rozpoczynano zaraz po zakończeniu poprzedniej.

5. Podsumowanie

Zrealizowane kontrolery umożliwiają zestawianie bezprzewodowych segmentów sieci polowej typu Modbus w sposób dla węzłów segmentów niewidoczny tzn. nie wymuszający zmian w części sprzętowej i oprogramowaniu węzłów. Oznacza to, że zostało spełnione jedno z założeń siedmiowarstwowego modelu OSI/ISO dla sieci komputerowych, mianowicie to, że zmiany w realizacji warstwy i-tej powinny pociągać za sobą zmiany w bezpośrednio

z nią sąsiadującej warstwie wyższej, korzystającej z udostępnianych przez nią usług. W naszym przypadku tą warstwą, w której następują zmiany, jest warstwa fizyczna.

Kontrolery pakietowe udostępniają współpracującym z nimi węzłom sieci polowej nie tylko usługę przesłania informacji przez łącze bezprzewodowe. Są one wyposażone także w mechanizmy umożliwiające współużytkowanie jednego pasma częstotliwości przez kilka segmentów, pracujących niezależnie od siebie. Mechanizmami tymi są protokoły dostępu do łącza transmisyjnego, stanowiące część warstwy liniowej; nie należy ich jednak traktować jako element zmian w warstwie liniowej węzłów sieci polowej, ale jako jej uzupełnienie. Istnienie tych mechanizmów jest cenną właściwością, gdyż uzyskanie odrębnego pasma dla każdego z segmentów sieci może się okazać niemożliwe. Ponadto realizowany przez kontrolery pakietowe protokół łącza bezprzewodowego został tak zaprojektowany, że uniemożliwia odbiór przez węzeł dowolnego segmentu sieci informacji pochodzącej od węzłów przynależących do innych segmentów. Pozwala to na stosowanie w obrębie segmentów transmisji w trybie rozgłaszania oraz dopuszcza powtarzanie się adresów węzłów w różnych segmentach. Pozostają więc zachowane wszystkie funkcje segmentów sieci. Efekt taki uzyskano dzięki adresowaniu pakietów, w których kontroler pakietowy transmituje przez łącze bezprzewodowe nadawaną przez węzeł segmentu sieci informację. Adres stanowi podstawę do przyjęcia lub odrzucenia przez kontroler bloku odebranego z łącza bezprzewodowego.

Za stosunkowo „łagodne” przejście z realizacji przewodowej segmentu sieci polowej na bezprzewodową płaci się jednak pewną cenę. Jest nią pogorszenie efektywności segmentów, w przypadku sieci polowej Modbus wyrażoną przez czas trwania transakcji. Jego wydłużenie to skutek wprowadzenia do łącza kontrolerów pakietowych. Wielkość wnoszonych przez nie opóźnień zależy od wielu czynników, m.in. sposobu wykrywania końców ramek sieci Modbus. Wykorzystana w zrealizowanych kontrolerach metoda określania końca na podstawie informacji zawartej na początku odbieranej ramki daje pewne zmniejszenie tego opóźnienia w porównaniu z metodą wykorzystującą pomiar ciszy w łączu.

W niektórych ośrodkach naukowych na świecie były lub są prowadzone prace nad bezprzewodowym rozszerzeniem dla sieci polowych. Np. w projekcie OLCHFA (ang. *An Open Low-Cost, Time-Critical Wireless Fieldbus Architecture*) [20] założono prędkość transmisji w bezprzewodowych fragmentach sieci równą 1 Mb/s. Dla uzyskania takiej prędkości wykorzystano technologię rozproszonego widma oraz pasma ISM [10]. Obowiązujące w Polsce uregulowania prawne dotyczące zastosowania mediów bezprzewodowych w sieciach komputerowych wykluczają na razie stosowanie technologii rozproszonego widma, a tym samym podjęcie prac nad bezprzewodowym rozszerzeniem sieci polowych oferujących wyższe prędkości transmisji niż sieć typu Modbus.

LITERATURA

1. Grzywak A. (red.): Rozproszone systemy komputerowe. PRO-net, Gliwice 1994.
2. Tanenbaum A.: Sieci komputerowe. WNT, Warszawa 1988.
3. Hebert D.: When to go wireless. Artykuł dostępny w sieci Internet na stronie <http://www.controlmagazine.com/0798/c0570798.html>.
4. Hebert D.: Flying Your Plant by Radio Control. Artykuł dostępny w sieci Internet na stronie <http://www.controlmagazine.com/0896/C0360896.HTML>.
5. Mintchell G. A.: Copper's Not the Only Way to Network. Artykuł dostępny w sieci Internet na stronie <http://www.manufacturing.net/>.
6. Mielczarek W.: Szeregowe interfejsy cyfrowe. Helion, Gliwice 1993.
7. Mielczarek W., Pawłowski R.: Hierarchiczna sieć polowa sterowana rozkazami języka SCPI. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 33, Gliwice 1997.
8. Modicon Modbus Protocol. Reference Guide. PI-MBUS-300 Rev. D. AEG Schneider Automation.
9. Jordan J. R.: Serial Networked Field Instrumentation. John Wiley & Sons, 1995.
10. Nemzow M.: Implementing Wireless Networks. McGraw-Hill, Inc., 1995.
11. Kozłowski A., Woźniak J.: Radiowe systemy teleinformatyczne. W: Sobczak W.: Problemy teleinformatyki. WKŁ, Warszawa 1984.
12. Caban D., Zieliński B.: Łąca bezprzewodowe w sieciach polowych. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 34, Gliwice 1998.
13. Caban D.: Łąca bezprzewodowe dla rozproszonego węzła hierarchicznej sieci polowej sterowanej rozkazami języka SCPI. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 33, Gliwice 1997.
14. Caban D.: Protokoły komunikacyjne sieci komputerowych wykorzystujących wielopunktowe łącza bezprzewodowe pracujące w jednym paśmie częstotliwości. Rozprawa doktorska w recenzji.
15. Małysiak H., Caban D., Zieliński B.: Bezprzewodowe media komunikacyjne. Etap 2: Zasady stosowania transmisji bezprzewodowej w segmentach CIM. PBZ-31-05. IITiS PAN, Gliwice 1996.
16. Małysiak H., Caban D., Zieliński B., Fojcik M.: Bezprzewodowe media komunikacyjne. Etap 5: Realizacja i badanie współpracy segmentów przewodowych i bezprzewodowych sieci CIM. PBZ-31-05. IITiS PAN, Gliwice 1996.
17. Radio Packet Controller. Materiały informacyjne dostępne w sieci Internet na stronie <http://www.radiometrix.co.uk/products/rpc.html>.
18. Starecki T.: Mikrokontrolery jednocukłowe rodziny 51. NOZOMI, Warszawa 1996.

19. Hammond J. L., O'Reilly P. J. P.: Performance Analysis of Local Computer Networks. Addison-Wesley, 1986.
20. Izikowitz I., Solvie M.: The OLCHFA Project. Industrial needs for time-critical wireless communication & wireless data transmission and application layer support for time critical communication. Artykuł dostępny w sieci Internet na stronie <http://www.faps.uni-erlangen.de/solvie/olchfa>.

Recenzent: Dr inż. Bartłomiej Zieliński

Wpłynęło do Redakcji 6 kwietnia 1999 r.

Abstract

Existing fieldbuses most often use wire transmission media. In some cases installation of wire connections are impossible, too expensive or too difficult to accomplish. At that time wireless media can be used.

In fieldbuses are realized media access protocols on request - polling or token passing. These protocols characterize lack of channel check before start of transmission. When user is planning to implement wirelessly several independently working fieldbuses, and there is only one frequency band at his disposal, using only access protocols mentioned above may cause conflicts in wireless channel. That's why to use wireless channel properly, wireless devices with media access protocols embedded must be used. Such a device is packet controller.

In this article wireless implementation of independently working Modbus networks was presented. As a transmission devices was used packet controllers, which block diagram is shown on figure 1. Wireless link protocol and packet format (figure 2) was described. Implemented Modbus networks was investigated. The investigations carried out can be divided into two parts: functional and efficiency. In the first part (section 4.2) correctness of working of wireless Modbus networks was checked. In the second part (section 4.3) efficiency of wire and wireless Modbus networks was measured and compared (table 1).