

Zygmunt KUBIAK
Politechnika Poznańska, Instytut Informatyki

SYNCHRONIZOWANA SIEĆ POMIAROWA

Streszczenie. W artykule przedstawiono opracowanie protokołu SMN (ang. *Synchronized Measurement Network*) oraz uwarunkowania, wynikające ze specyfiki wybranych radiowych układów nadawczo-odbiorczych. Prezentowane rozwiązanie należy do bezprzewodowych sieci sensorowych (ang. WSN – *Wireless Sensor Networks*). Protokół SMN jest przeznaczony do synchronizowanej, bezprzewodowej realizacji pomiarów rozproszonych. Omawiana sieć zapewnia możliwość energooszczędnej pracy jej węzłów oraz spełnia warunki bezpieczeństwa transmisji.

Słowa kluczowe: protokół, bezprzewodowa sieć sensorowa, WSN, synchronizacja pomiarów, nadajnik, odbiornik, układ nadawczo-odbiorczy

SYNCHRONIZED MEASUREMENT NETWORK

Summary. This paper presents the development of SMN protocol (Synchronized Measurement Network) and conditions resulting from the specificity of selected radio transceiver systems. This solution is a wireless sensor network (WSN – Wireless Sensor Networks). SMN protocol is designed for execution of synchronized, distributed wireless measurement. The presented network provides the possibility of energy-saving work of its nodes and meets the security conditions of transmission.

Keywords: protocol, wireless sensor network, WSN, synchronization measurements, transmitter, receiver, transceiver, RF

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono opracowanie protokołu SMN (ang. *Synchronized Measurement Network*) oraz uwarunkowania, wynikające ze specyfiki wybranych radiowych układów nadawczo-odbiorczych. Prezentowane rozwiązanie należy do bezprzewodowych sieci sensorowych (ang. WSN – *Wireless Sensor Networks*) [1]. Protokół SMN jest przeznaczony do

synchronizowanej, bezprzewodowej realizacji pomiarów rozproszonych. Omawiana sieć zapewnia możliwość energooszczędnej pracy jej węzłów oraz spełnia warunki bezpieczeństwa transmisji. Praca z synchronizowanymi pomiarami jest typowym trybem działania tej sieci. Dla przyspieszenia etapu przesyłania odpowiedzi węzłów przydzielane im są, zdefiniowane przez koordynatora, szczeliny czasowe. Sieć SMN może działać również w prostym trybie master-slave (z cyklem zapytanie – odpowiedź).

Realizowany protokół jest zawsze powiązany z rozwiązaniem sprzętowym wykorzystawanego radiowego układu nadawczo-odbiorczego (ang. *RF transceiver*). Dla protokołów o dużej złożoności, jak np. IEEE 802.11. (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) czy protokołu IEEE 802.15.4/ZigBee, przeznaczonego do tworzenia rozbudowanych sieci sensorowych, zostały opracowane i są masowo wytwarzane specjalizowane układy RF, wspierające sprzętowo szczególnie dolne warstwy tych protokołów. Użycie takich elementów dla innych koncepcji transmisyjnych jest albo niemożliwe lub co najmniej kłopotliwe.

Aplikacje z protokołami o mniejszej złożoności wymagają stosowania bardziej uniwersalnych układów radiowych. Pierwszy monolityczny układ RF, CC1000 – opracowany w firmie Chipcon, nadal dostępny na rynku – zapewnia jedynie modulację sygnału radiowego ciągiem bitów danych [2]. Nie stawia więc programiście żadnych ograniczeń, natomiast wszystkie wymagane warstwy protokołu (poza warstwą fizyczną) muszą być realizowane w pełni programowo. Przy tworzeniu protokołu SMN założono wykorzystanie szeroko dostępnego, taniego, o interesujących właściwościach, nowej generacji układu – nRF24L01+ firmy Nordic Semiconductor. Popularność tego rozwiązania sprawiła, że pojawiły się również kompatybilne elementy, takie jak RFM70 (firmy Hope Microelectronics) czy BK-2421 (firmy Beken).

2. Nordic nRF24L01+

W tym rozdziale szczególną uwagę zwrócono na cechy układu nRF24L01+ [3, 8], uwzględnione w protokole SMN. nRF24L01+ jest monolitycznym radiowym układem nadawczo-odbiorczym, przewidzianym do pracy w paśmie ISM, w zakresie częstotliwości 2,400-2,4835 GHz, w jednym ze 126 kanałów. Dostępne są trzy prędkości transmisji: 2 Mb/s, 1 Mb/s i 250 kb/s. Nadajnik pozwala na ustawienie czterech poziomów mocy wyjściowej od -18 dBm do 0 dBm. Czułość odbiornika wynosi -82 dBm przy 2 Mb/s, -85 dBm przy 1 Mb/s oraz -94 dBm przy 250 kb/s. Układ przygotowany jest do energooszczędnej pracy węzłów RF dzięki dwóm trybom obniżania poboru energii: „Standby-I” (26 μ A) i „Power down” (900nA). nRF24L01+ może pracować przy napięciu zasilania z zakresu od 1,9 do 3,6 V. Współpraca z mikrokontrolerem (konfiguracja i obsługa nadajnika/odbiornika) realizowana jest przez synchroniczny interfejs SPI z maksymalną szybkością do 10 Mb/s.

Układ może działać w dwóch trybach transmisji: *ShockBurst*TM i *Enhanced ShockBurst*TM. Pierwszy z trybów został zachowany w celu uzyskania kompatybilności z wcześniej opracowanymi układami, tzn. nRF2401A, nRF2402, nRF24E1 i nRF24E2. Ramka transmisyjna zawiera preambułę (1 bajt), adres (3-5 bajtów), dane (1-32 bajtów) oraz opcjonalnie słowo kontrolne (CRC 1-2 bajtów). Zasadę transmisji *ShockBurst*TM wyjaśnia rys. 1. Mikrokontroler przesyła dane do bufora TX FIFO z dowolną prędkością (np. 10 kb/s), a nadajnik natychmiast po sformatowaniu całej ramki wysyła ją z ustawioną prędkością transmisji (np. 1 Mb/s). Proces ten jest realizowany sprzętowo, dzięki temu uzyskuje się oszczędności w poborze prądu – każdy układ RF pobiera największy prąd przy aktywnym nadajniku lub odbiorniku.

Rys. 1. Technologia *ShockBurst*TMFig. 1. ShockBurstTM technology

Tryb *Enhanced ShockBurst*TM dodatkowo pozwala na dynamiczną obsługę długości danych, automatyczną obsługę transakcji pakietowych (auto-ACK z możliwością wstawienia danych do pakietu ACK, auto-retransmisja), dla odbiornika daje możliwość (w ramach jednego kanału) wydzielenia do 6 logicznych kanałów do obsługi nadajników (*MultiCeiver*TM). Przy realizacji protokołu SMN przyjęto zastosowanie trybu *Enhanced ShockBurst*TM. Transakcje pakietowe trybu *Enhanced ShockBurst*TM polegają na wymianie pakietów między dwoma układami nadawczo-odbiorczymi: jednym działającym jako tzw. odbiornik podstawowy PRX (ang. *Primary Receiver*) i drugim działającym jako podstawowy nadajnik PTX (ang. *Primary Transmitter*). Transakcja rozpoczyna się zawsze od transmisji z PTX, transakcja jest zakończona, gdy PTX otrzymał pakiet potwierdzenia (ACK) z PRX. W *Enhanced ShockBurst*TM do polecenia ACK, generowanego przez PRX można dołączyć dane użytkownika realizując w ten sposób dwukierunkową transmisję danych. Automatyczna obsługa transakcji pakietowej działa następująco:

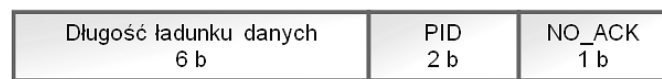
1. Transakcja rozpoczyna się przekazaniem pakietu danych z PTX do PRX, a następnie PTX automatycznie ustawia w tryb odbioru i oczekuje na ACK.
2. Jeśli pakiet został odbierany przez PRX, to automatycznie montuje on i transmituje do PTX pakiet potwierdzenia (ACK), po czym wraca do trybu odbioru.
3. Jeśli PTX nie otrzyma pakietu ACK natychmiast, to automatycznie retransmituje oryginalny pakiet danych z zaprogramowanym opóźnieniem, a następnie ustawia się w tryb odbioru, oczekując na ACK. Użytkownik może określać liczbę retransmisji i czasy opóźnień.

Na rys. 2 przedstawiono format pakietu *Enhanced ShockBurst*TM.

Rys. 2. Format pakietu *Enhanced ShockBurst*TMFig. 2. *Enhanced ShockBurst*TM packet format

Preambuła o długości 1 bajta jest ciągiem zero-jedynkowym (01010101 lub 10101010), wybranym automatycznie na podstawie wprowadzonego adresu, w taki sposób, aby ostatni bit preambuły był różny od pierwszego bitu adresu. Ma to na celu lepszą synchronizację bitową odbiornika radiowego. Użytkownik powinien dobrać adresy węzłów w taki sposób, aby nie były one kontynuacją preambuły i aby nie zawierały pojedynczego przejścia zero-jedynkowego – skrajności takie mogą prowadzić do trudności w synchronizacji bajtowej, a w rezultacie do podniesienia stopy błędów.

W porównaniu z *ShockBurst*TM pakiet został rozszerzony o 9-bitowe pole PCF (ang. *Packet Control Field*) – rys. 3. Pole określające długość danych zajmuje 6 bitów. Dozwolone są wartości od 0 (tylko dla polecenia ACK bez ładunku danych) do 32, które oznaczają liczbę bajtów danych. Dwubitowe pole PID (ang. *Packet Identification*) stosowane jest do stwierdzenia, czy odebrany pakiet jest nowy czy retransmitowany. Dokładniej mówiąc do tego celu wykorzystywane są pola PID i CRC. Jeżeli odebrany zostanie pakiet o takiej samej zawartości PID jak poprzedni, to może to oznaczać, że jest to pakiet retransmitowany lub nowy (jeżeli utracono np. 3 pakiety). Aby rozróżnić takie przypadki automatycznie kontrolowane są również CRC kolejno odebranych pakietów. W przypadku odebrania kopii poprzedniego pakietu, kopia jest odrzucana.



Rys. 3. Pole kontrolne pakietu (PCF)

Fig. 3. Packet control field (PCF)

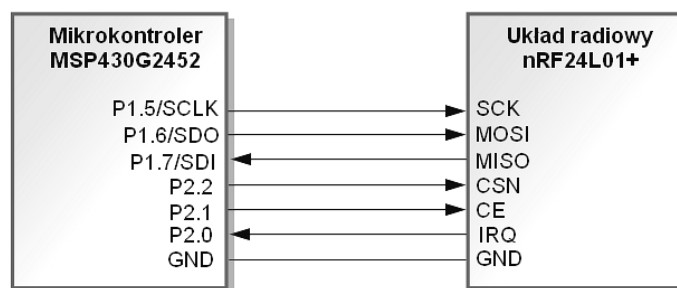
Pole PCF zakończone jest pojedynczym bitem NO_ACK. Flaga ta jest używana, gdy wybrany został tryb automatycznego potwierdzania pakietów. Ustawienie flagi (NO_ACK=1) oznacza dla PRX, że pakietu nie należy potwierdzać. PTX bezpośrednio po wysłaniu pakietu przechodzi do stanu *Standby-I*.

*Enhanced ShockBurst*TM zapewnia dwie możliwości obsługi długości pakietu: statyczną i dynamiczną. Domyślnie aktywna jest statyczna długość pakietu, co oznacza, że wszystkie pakiety przesyłane między PTX i PRX mają taką samą długość pola danych. Opcja dynamiczna umożliwia przesyłanie przez PTX pakietów o zmiennej długości.

W omawianym trybie pole CRC jest obowiązkowe. Można wybrać CRC8 z wielomianem generującym $x^8 + x^2 + x + 1$ lub CRC16 z wielomianem $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$. Odebrane pakiety z wadliwym CRC są odrzucane.

Po wpisaniu adresu oraz ładunku danych następuje automatyczne składanie pakietu przez uzupełnienie ramki o pola preambuły, PCF oraz CRC i wysłanie.

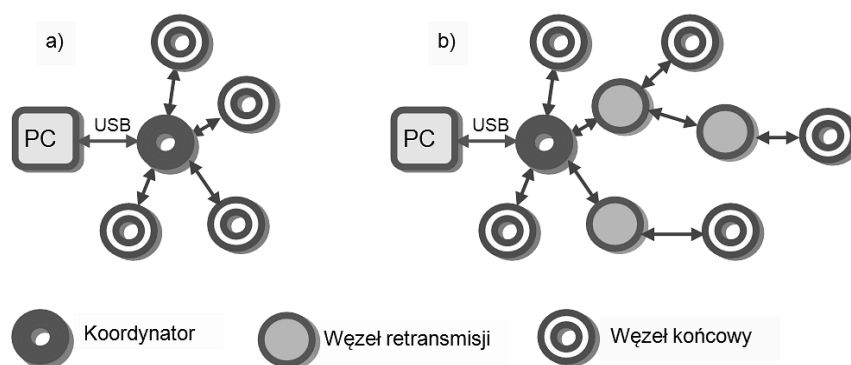
Układ nRF24L01+ dla komunikacji z mikrokontrolerem (konfiguracja i transmisja danych) został wyposażony w 4-przewodowy interfejs SPI (sygnały: MOSI, MISO, SCK, CSN). Interfejs został uzupełniony sygnałem CE, który ma udział w sterowaniu kierunkiem transmisji radiowej. Istotnym sygnałem jest też IRQ, wykorzystywany w mikrokontrolerze jako źródło przerwania zewnętrznego. IRQ jest generowany na skutek różnych zdarzeń, zachodzących w układzie RF, jak wysłanie/odebranie pakietu, odebranie pakietu ACK. Przykład sprzężenia układu nRF24L01+ z mikrokontrolerem MSP430G2452 przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przykład interfejsu z mikrokontrolerem
Fig. 4. Microcontroller interface example

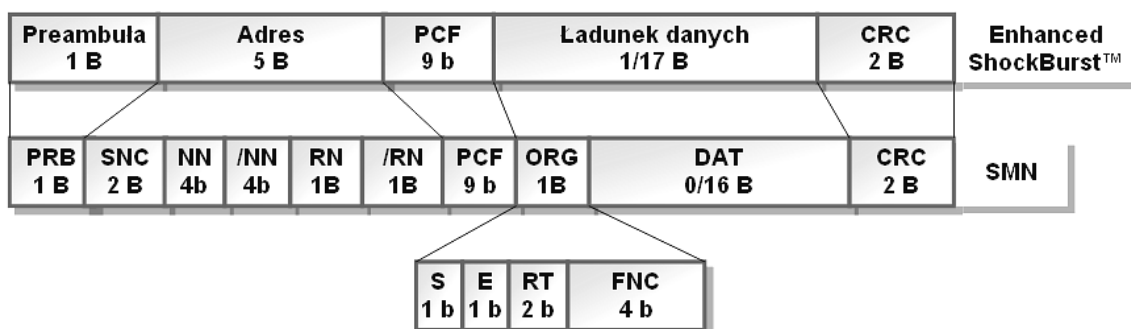
3. Protokół SMN

W założeniu SMN jest prostym, bezpiecznym protokołem dla tworzenia sieci typu *one-hop* o konfiguracji gwiazdy (rys. 5a). Przewidziano jednak możliwość prostego zwiększenia zasięgu za pomocą węzłów retransmisyjnych (rys. 5b). SMN stanowi modyfikację protokołu WMN [4], uwzględniającą specyfikę układów radiowych nRF24L01+. Sieć może być zorganizowana z trzech typów węzłów: koordynatora, końcowy oraz retransmisyjny. Sieć zasadniczo jest dedykowana zastosowaniom pomiarowym, a funkcje te bezpośrednio są realizowane za pomocą węzłów końcowych, wyposażonych w sensory. Moduły końcowe mogą obsługiwać również proste układy wyjściowe. Węzły retransmisyjne pośredniczą w wymianie pakietów między koordynatorem a węzłami końcowymi. Stosowane są w przypadku wystąpienia problemów z zasięgiem (np. w budynkach betonowe ściany wprowadzają silne tłumienie sygnałów radiowych). Między węzłem końcowym a koordynatorem mogą wystąpić maksymalnie trzy węzły retransmisyjne. Koordynator może być połączony z komputerem PC lub z bramą do innych sieci nadrzędnych przewodowych (np. CAN) lub bezprzewodowych (np. ZigBee).



Rys. 5. Topologie sieci SMN: (a) gwiazda, (b) drzewo
 Fig. 5. SMN network topologies: (a) star, (b) tree

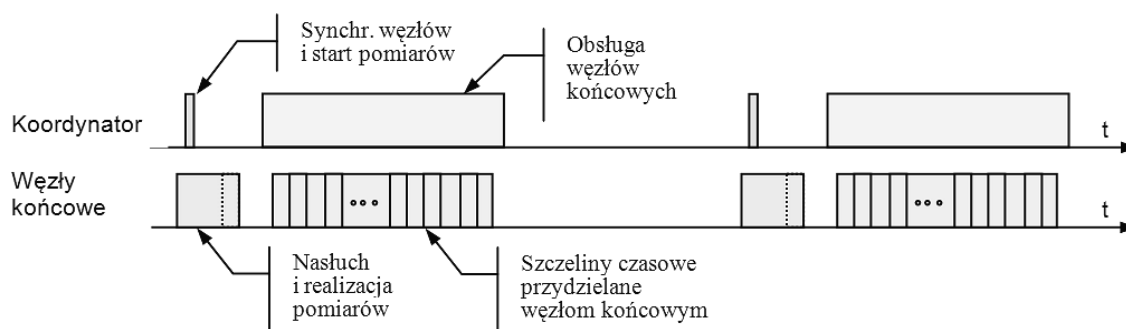
Komunikacją w sieci SMN zarządza koordynator. Oznacza to, że węzły końcowe mogą realizować jedynie zadania zlecone przez koordynatora. Organizację ramki, odniesioną do formatu *Enhanced ShockBurst*TM pokazano na rys. 6. W protokole SMN występują dwa typy pakietów: ramka podstawowa (DAT=16 B) oraz ramka krótka (DAT=0 B). Ramka krótka stosowana jest w przypadku funkcji niewymagających danych, np. start pomiarów, ramka błędów transmisji, zmiana trybu pracy węzłów.



Rys. 6. Format ramki SMN
 Fig. 6. SMN frame format

Ramka podstawowa ma stałą długość, wynikającą ze stałej długości pola danych (DAT=16 B), co z kolei jest efektem przyjętej możliwości szyfrowania blokowego z kluczem symetrycznym AES-128 [5]. Szyfrowanie obejmuje tylko pole danych DAT i jest wykonywane przed wpisaniem danych do rejestru TX FIFO układu RF. Słowo kontrolne CRC16 zabezpiecza pola SNC, NN, /NN, RN, /RN, PCF i ORG w ramce krótkiej oraz dodatkowo DAT w ramce podstawowej. W ramce krótkiej pole danych nie występuje. Pole adresowe pakietu *Enhanced ShockBurst*TM zawiera słowo synchronizacyjne SNC, numer identyfikacyjny sieci NN oraz rzeczywisty adres (numer) RN węzła docelowego (końcowego – urządzenie PRX). W układzie nRF24L01+ „zaoszczędzono” na słowie synchronizacyjnym i stąd w dokumentacji pojawiła się uwaga (patrz rozdz. 2), dotycząca doboru adresu. Przykładowo, w układzie RF firmy Texas Instruments typu CC2500, dla niezawodnej realizacji synchronizacji bitowej i bajtowej wprowadzono preambułę o długości 2-24 bajtów oraz słowo synchronizacyjne

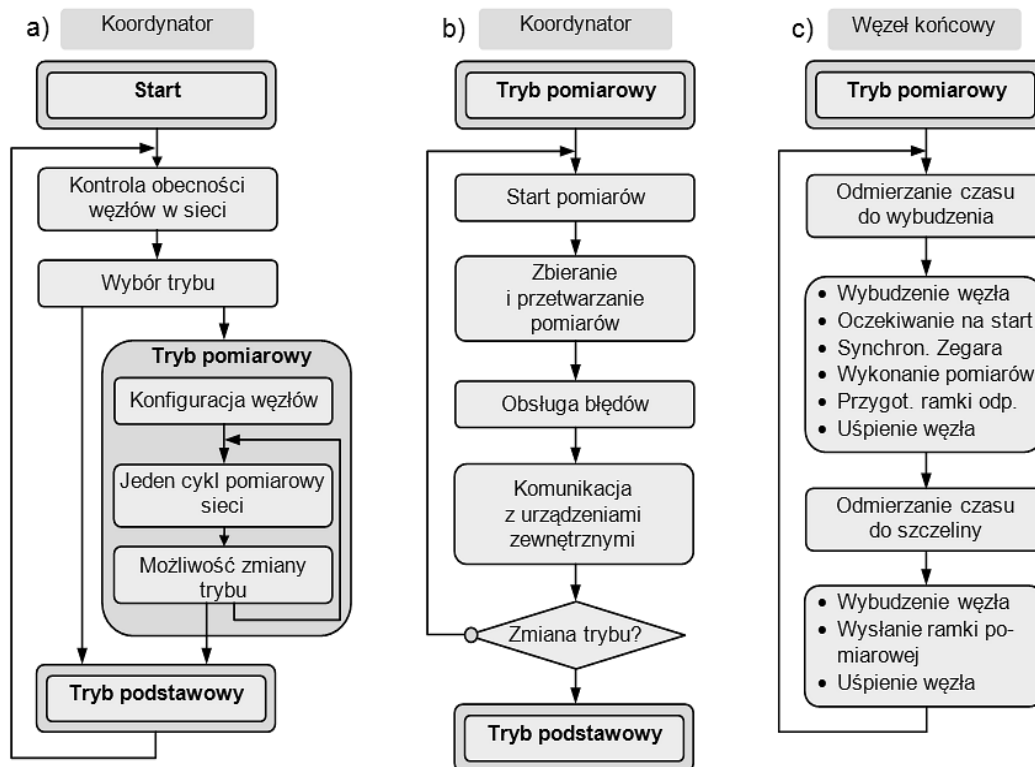
o długości 2 lub 4 bajtów. Z tego samego powodu w protokole SMN podzielono na 5 części. Słowo SNC wybrano w taki sposób, aby nie było kontynuacją preambuły oraz by zawierało w miarę dużo przejść zero-jedynkowych (SNC=0xCCE7). SNC stanowi niezmienny element każdego 5-bajtowego pola adresowego *Enhanced ShockBurst*TM. Numer identyfikacyjny sieci (4-bitowy) występuje w postaci prostej i zanegowanej. Dla sieci SMN przyjęto 8-bitowy adres węzła (z przedziału 1-254 dla węzłów końcowych), który w ramce występuje w postaci prostej i zanegowanej. Adres 0 jest adresem koordynatora a 255 jest adresem rozgłoszeniowym. Pole ORG zawiera bity organizacyjne oraz kod funkcji. Bit S=1 powoduje włączenie szyfrowania, a S=0 – wyłączenie. Jeżeli koordynator (urządzenie PTX) wysyła ramkę szyfrowaną, to wszyscy adresaci powinni również stosować szyfrowanie danych. Bit E=1 powoduje pracę węzłów końcowych w energooszczędnym trybie pomiarowym (rys. 7). Dla E=0 zasadniczym trybem węzłów jest stan aktywny. Koordynator może indywidualnie sterować aktywnością węzłów. Pole RT wykorzystywane jest dla potrzeb retransmisji pakietów w celu zwiększenia zasięgu. Węzeł retransmisyjny inkrementuje to pole, co pozwala adresatowi ramki odróżnić ramkę źródłową od retransmitowanej.



Rys. 7. Zależności czasowe w sieci SMN w energooszczędnym trybie pomiarowym
Fig. 7. Time dependencies of SMN network in energy-efficient measurement mode

Załączenie zasilania lub *reset* sprzętowy powoduje ustawienie stanu węzła na aktywny. Koordynator po inicjacji dokonuje sprawdzenia obecności węzłów sieci (rys. 8a), testuje dostępne pole adresowe sieci. Następnie w zależności od wybranego trybu pracy przechodzi do indywidualnego konfigurowania węzłów sieci. W energooszczędnym trybie pomiarowym węzły końcowe przez większość czasu znajdują się w stanie uśpienia i dlatego wcześniej, w trakcie konfiguracji otrzymują informacje o czasie wybudzeń oraz przydzielonej szczeliny czasowej (kolejności odpytywania). W trybie podstawowym szczegóły konfiguracji mogą być bardziej zróżnicowane w zależności od przyjętego scenariusza pracy sieci – zasadniczo węzły są obsługiwane przez koordynatora indywidualnie. W trybie pomiarowym koordynator (PTX) wymusza start pomiarów rozgłoszeniowo wysyłając ramkę krótką z odpowiednią funkcją. Na czas oczekiwania na odbiór koordynator przełącza się do trybu PRX, po obsłudze zadeklarowanych szczelin wraca do trybu PTX. W reakcji na poprawnie odebraną ramkę startu, węzeł końcowy (PRX) wykonuje pomiary zlecone w trakcie konfiguracji, następnie przygotowuje

ramkę odpowiedzi i przechodzi do stanu obniżonego poboru energii w oczekiwaniu na swoją szczelinę czasową (rys. 8c). Po wybudzeniu węzeł końcowy przełącza się do trybu PTX, wysyła ramkę odpowiedzi i jeżeli wybrana była opcja potwierdzeń transmisji, to po kontroli poprawności transmisji przechodzi do stanu uśpienia. W przeciwnym przypadku stan ten osiągnięty jest wcześniej, bezpośrednio po wysłaniu odpowiedzi. Po kolejnym wybudzeniu węzeł końcowy (w trybie PRX) oczekuje na ramkę startu lub inną funkcję.



Rys. 8. Uproszczone schematy działania węzłów sieci SMN: (a) koordynator, (b) koordynator w energooszczędnym trybie pomiarowym, (c) węzeł końcowy w energooszczędnym trybie pomiarowym

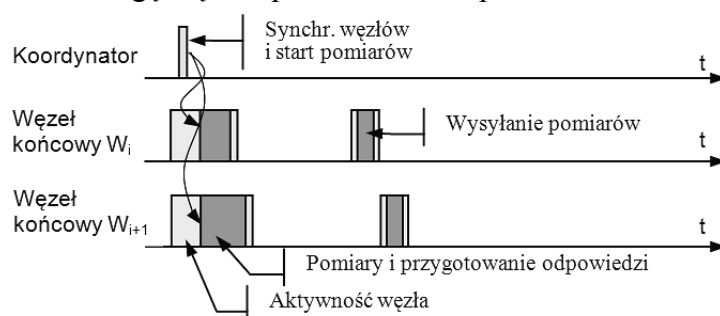
Fig. 8. Simplified flow charts activities WMN nodes: (a) Coordinator, (b) Coordinator in energy-efficient measurement mode, (c) End Node in the energy-efficient measurement mode

Jeżeli w czasie zbierania pomiarów wystąpiły błędy, to po zakończeniu tego etapu koordynator przechodzi do ich obsługi (rys. 8b). Następnie powstaje możliwość komunikacji z urządzeniami zewnętrznymi w przypadku, gdy sieć SMN współpracuje z siecią wyższego poziomu lub z PC. Po zakończeniu jednego cyklu pomiarowego koordynator może wymusić zmianę trybu pracy sieci wysyłając inne niż start pomiaru polecenie rozgłoszeniowe.

Węzły końcowe mogą być grupowane według rodzaju pomiaru (różne cykle aktywności), np. wartości temperatury mierzone co 10 min, a położenia co 5 s. Jeżeli węzeł będzie realizował obydwa pomiary, to będzie uaktywniany z cyklem krótszym (5 s). W przykładzie tym, pomiar temperatury będzie realizowany w co 120 cyklu pomiarowym węzła. Po wybudzeniu węzeł oczekuje na ramkę z funkcją startu pomiarów, wykonuje listę pomiarów zgodnie z kon-

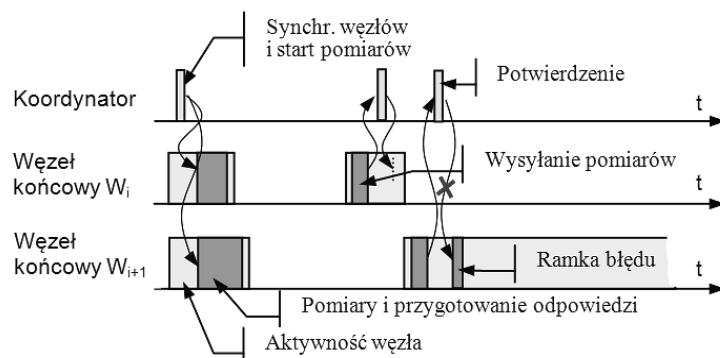
figuracją, przygotowuje ramkę odpowiedzi i przechodzi do stanu uśpienia w oczekiwaniu na swoją szczelinę czasową w celu wysłania odpowiedzi (rys. 9). Czasy aktywności węzłów mogą być różne w zależności od liczby i rodzaju wykonywanych pomiarów. Proces ten jest bardziej złożony w przypadku potwierdzeń transmisji (rys. 10). Ramka startu pomiarów pełni również funkcję synchronizacyjną. Węzły, które taką ramkę odebrały korygują ustawienia swoich zegarów.

W trybie pomiarowym bez potwierdzania transmisji (rys. 9) obsługa błędów transmisji jest opcjonalna, zależna od przyjętego scenariusza. Zwykle w wielu nadzorowanych procesach utrata na skutek zakłóceń niewielkiej liczby pomiarów jest do zaakceptowania. Koordynator może realizować obsługę błędów po zakończeniu przedziału szczelin.



Rys. 9. Zależności czasowe w sieci SMN w energooszczędnym trybie pomiarowym bez potwierdzania transmisji

Fig. 9. Time dependencies of SMN network in energy-efficient measurement mode without confirming transmission

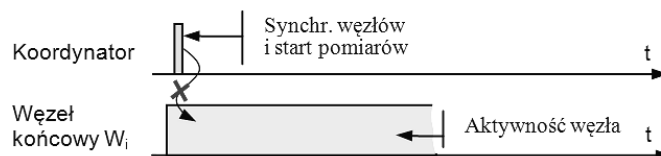


Rys. 10. Zależności czasowe w sieci SMN w energooszczędnym trybie pomiarowym z potwierdzania transmisji

Fig. 10. Time dependencies of SMN network in energy-efficient measurement mode with confirming transmission

W trybie pomiarowym z potwierdzaniem transmisji (rys. 10) poprawny odbiór pomiarów z węzła W_i zostaje poświadczony przez koordynatora krótką ramką ACK (generowaną z poziomu *Enhanced ShockBurst*TM). Węzeł W_i po odebraniu ramki ACK i jej zinterpretowaniu przechodzi do stanu uśpienia. Jeżeli węzeł (przykład W_{i+1}) nie odebrał potwierdzenia (tzn. koordynator nie odebrał ramki pomiarowej lub wystąpił błąd transmisji ramki ACK), to po ustalonym okresie oczekiwania węzeł końcowy wysyła ramkę błędu oraz pozostaje

w stanie aktywności aż do momentu obsługi błędu przez węzeł koordynatora (po zakończeniu przedziału szczelin czasowych). Jeżeli węzeł nie odebrał rozgłoszeniowej ramki startu pomiarów, a taki rodzaj błędu może powstać w przypadku rozszynchronizowania węzła, to pozostaje w stanie aktywnym do chwili obsługi błędu przez koordynatora (rys. 11).



Rys. 11. Błąd odbioru ramki start pomiarów w energooszczędnym trybie pomiarowym
Fig. 11. Reception error of measurement start frame in energy-efficient measurement mode

Tabela 1

Podstawowe funkcje protokołu WMN

Funkcja	Węzeł	Typ ramki	Transmisja	Opis
ERR	E	S	U	Błąd
NOM	C	S	B	Tryb podstawowy
STM	C	S	B	Start pomiarów
ATS	C	S	U	Test adresu
	E	L		
STS	C	S	U	Stan węzła
	E	L		
CNF	C	L	U	Konfiguracja węzła
MES	C/E	L	U	Pomiary
SLP	C	L	U	Stan uśpienia

Gdzie: C – koordynator, E – węzeł końcowy, S – ramka krótka, L – ramka podstawowa, B – transmisja rozgłoszeniowa, U – transmisja bezpośrednia

W tabeli 1 zebrano podstawowe funkcje protokołu SMN, związane z energooszczędnym trybem pomiarowym. Można je podzielić na dwie grupy: polecenia bezpośrednie (transmisja między koordynatorem a zaadresowanym węzłem końcowym) oraz rozgłoszeniowe (przeznaczone do wykonania we wszystkich węzłach; węzły końcowe nie generują potwierdzeń takich poleceń). Węzeł końcowy wysyła ramkę ERR w przypadku braku potwierdzenia poprawnej transmisji danych pomiarowych (rys. 10). Polecenie NOM, wysyłane rozgłoszeniowo przez koordynatora w postaci ramki krótkiej, powoduje wyjście wszystkich węzłów końcowych z trybu pomiarowego; węzły przełączone zostają do stanu aktywnego i oczekują na polecenia (w trybie PRX). Drugim poleceniem rozgłoszeniowym jest STM. Pierwsze użycie STM następuje po konfiguracji węzłów do energooszczędnego trybu pomiarowego i rozpoczyna pierwszy cykl pomiarowy. Kolejne STM kontynuują cykle pomiarowe. Polecenie ATS służy do testowania aktywności węzłów końcowych. Koordynator wysyła krótką ramkę ATS. Zaadresowany węzeł końcowy odpowiada długą ramką ATS (swoją adres umieszcza w polu danych). Odpowiedzią na krótką ramkę STS jest ramka długa z zawartością rejestrów stanu węzła końcowego. Polecenie CNF w przypadku energooszczędnego trybu pomiarowego

przekazuje do węzła końcowego przede wszystkim informacje o pomiarach do cyklicznego wykonywania i związanych z nimi długościami cykli (w milisekundach) oraz o przyporządkowaniu szczeliny czasowej w cyklu pomiarowym. Po zapisaniu odebranych informacji do rejestrów konfiguracyjnych, węzeł pozostaje w stanie bezczynności do momentu odebrania pierwszego polecenia STM. Polecenie MES uruchamia pojedynczy cykl pomiarowy węzła. W ramce wysyłanej przez koordynatora zawarta jest lista pomiarów do wykonania przez węzeł końcowy, natomiast zaadresowany węzeł zwraca wyniki żądanych pomiarów. W trybie pomiarowym polecenie SLP może być użyte do uśpienia węzła po obsłudze błędów. Pole danych zawiera czas (w milisekundach) do najbliższego wybudzenia.

4. Podsumowanie

Protokół SMN umożliwia tworzenie prostych sieci o topologii gwiazdy lub drzewa, gwarantujących bezpieczeństwo transmisji (integralność – słowo kontrolne CRC16 oraz poufność – AES-128). Jest siecią dedykowaną przede wszystkim zadaniom pomiarowym z uwzględnieniem energooszczędności węzłów końcowych i retransmisyjnych. Proste protokoły mają mniejsze wymagania związane z zasobami pamięciowymi węzłów i w rezultacie ich obsługa, przy tej samej częstotliwości zegara mikrokontrolera, zajmuje mniej czasu. SMN jest jednocześnie siecią uniwersalną, pozwalającą na realizację różnych scenariuszy zapisanych w pamięci kontrolera. Wprowadzenie do pola adresowego ramki fragmentu o stałej wartości (słowa SNC) poprawiło, dla przyjętego układu RF, warunki prawidłowej synchronizacji bitowej i bajtowej. Rozwiązania sprzętowe nowoczesnego układu nRF24L01+ pozwoliły na automatyczną realizację takich zadań transmisji radiowej, jak synchronizacja bitowa, bajtowa, sprawdzenie zgodności adresu, wyznaczenie i weryfikacja słowa CRC, montaż całego pakietu, kontrola nadawania i odbioru, obsługa potwierdzeń pakietów, obsługa pakietów z ładunkiem, obsługa błędów transmisji. Te cechy wpływają na skrócenie kodu aplikacji, czasu obsługi układu RF, a więc i zmniejszenie poboru energii przez węzeł. Drobnym mankamentem tego układu jest brak pomiaru poziomu sygnału odbieranego, ale został on już naprawiony w kompatybilnych elementach, takich jak RFM70 [6, 8] czy BK-2421.

BIBLIOGRAFIA

1. Holger K., Willing A.: *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

2. CC1000 Single Chip Very Low Power RF Transceiver, Data Sheet SWRS048, Texas Instruments, Dallas 2005.
3. nRF24L01+, Single Chip 2,4GHz Transceiver. Product Specification v1.0. NORDIC 2008.
4. Kubiak Z.: Bezprzewodowa sieć pomiarowa WMN, [w:] Systemy czasu rzeczywistego. Postępy badań i zastosowania, (red.) Zieliński Z., WKŁ, Warszawa 2009, s. 507-516.
5. Kubiak Z.: Problematyka bezpieczeństwa radiowych sieci małej prędkości ZigBee. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Automatyka, z. 145, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006, s. 119-124.
6. RFM70, Low power high performance 2.4 GHz transceiver module. V1.0. Hope Microelectronics.
7. <http://www.hoperf.com/>
8. <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF>

Wpłynęło do Redakcji 13 marca 2013 r.

Abstract

This paper presents the development of SMN protocol (Synchronized Measurement Network) and conditions resulting from the specificity of selected radio transceiver systems. This solution is a wireless sensor network (WSN - Wireless Sensor Networks). SMN protocol is designed for synchronized, wireless execution of distributed measurement. The presented network provides the possibility of energy-saving work of its nodes and meets the security conditions of transmission. Working with synchronized measurements is a typical operating mode of this network. To accelerate the transfer phase of nodes response, there are slots assigned to them, defined by the coordinator. SMN network can also act in a simple master-slave mode (query - response cycle).

When creating a SMN protocol, there was assumed the use of commercially available, low-cost, of interesting attributes the new generation chip - NRF24L01+ from Nordic Semiconductor. The system can operate in two transmission modes: ShockBurst™ and Enhanced ShockBurst™ (fig. 1). In the implementation of the SMN protocol the application of the Enhanced ShockBurst™ mode was adopted. An Enhanced ShockBurst™ packet transaction is always initiated by a packet transmission from the PTX (Primary Transmitter), the transaction is complete when the PTX has received an acknowledgment packet (ACK packet) from the

PRX (Primary Receiver). The PRX can attach user data to the ACK packet enabling a bi-directional data link.

SMN is a modification of the protocol WMN [WMNart], that takes into account the specificity of radio systems NRF24L01 +. The network can be organized from three types of nodes: coordinator, end node and retransmission node (fig. 5). Coordinator manages communication in SMN network. This means that the terminal nodes can perform only the tasks assigned by the coordinator. Organization of the frame which is related to the Enhanced ShockBurst™ format is shown in fig. 6.

Terminal node after waking, waits for the “start measuring” frame from the coordinator. Then it performs a list of measurements in accordance with the configuration, makes the answer frame and goes to a sleep mode in anticipation of its slot to send the response (fig. 7). Time dependencies of SMN network in energy-efficient measurement mode without confirming transmission are presented in fig. 9. Time dependencies of SMN network in energy-efficient measurement mode with confirming transmission are illustrated in fig. 10. Figure 11 shows the case of a reception error of a start frame in the energy-saving measurement mode.

Adres

Zygmunt KUBIAK: Politechnika Poznańska, Instytut Informatyki, ul. Piotrowo 3,
60-965 Poznań, Polska, zygmunt.kubiak@cs.put.poznan.pl.