

Projektowanie energooszczędnych układów elektronicznych.

Część VIII : Systemy łączności radiowej



Nawet najbardziej energooszczędne mikrokontrolery muszą komunikować się ze światem zewnętrznym. W przypadku komunikacji bezprzewodowej zwykle jest to łączność radiowa. W kolejnej części cyklu zajmiemy się systemami radiowej transmisji danych pod kątem ich zastosowania w układach mikroprądowych.

Bilans energetyczny transmisji

Jeżeli urządzenie jest zasilane z baterii o pojemności 300...2000 mAh, która musi wystarczyć mu na rok lub kilka lat pracy, to łączność radiowa podlega bardzo poważnym ograniczeniom:

- Podobnie jak w przypadku mikrokontrolerów, systemy łączności radiowej pracują w trybie cyklicznym. Stan uśpienia przerywany jest bardzo krótkimi cyklami aktywności.
- Ze względu na ograniczenie mocy nadajników, zasięg transmisji wynosi od kilkunastu centymetrów do około 500 metrów. Wydajność zasilania nie pozwala na zastosowanie modemów GSM. Pierwszym ograniczeniem jest impulsowy pobór prądu: systemy GSM pobierają krótkie impulsy prądowe o amplitudzie do 2 A, a wartość średnia przy transmisji GPRS to 200...400 mA. Kolejnym problemem jest procedura logowania do sieci i zestawiania połączenia GPRS zajmującego kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt sekund. W tym czasie modem GSM pobiera znaczną energię, która z punktu widzenia transmisji jest bezużyteczna.
- Nadajnik i odbiornik muszą pracować prawidłowo przy napięciu zasilania 2...3 V. W wypadku użycia najmniejszych ogniw litowych szczytowy pobór prądu nie powinien przekraczać 10 mA, w przeciwnym razie użyteczna pojemność ogniwa będzie mniejsza od znamionowej. Większe baterie dopuszczają prąd szczytowy w granicach 20...40 mA.

Poniżej przedstawiono dwa przykłady obliczeniowe szacunkowego zużycia energii przez radiowe systemy transmisji danych.

Przykład 1. Czujnik systemu TPMS (Tyre Pressure Monitoring System), mierzący ciśnienie w oponie samochodowej.

W USA, gdzie TPMS jest obowiązkowym wyposażeniem samochodu, jest wymagane wysyłanie raportu przez czujniki przynajmniej co 5 sekund. Przyjęto następujące założenia: transmitowana jest ramka danych o długości 64 bitów, szybkość transmisji 38400 bps, pobór prądu przez nadajnik 5 mA. Przy prędkości 38400 bps czas trwania transmisji wyniesie 1,7 ms, a liczba transmisji $3600 \text{ s} / 5 \text{ s} = 720$ na godzinę. Uwzględniając czas wybudzania nadajnika, można przyjąć czas aktywności 3 ms, czyli $3 \text{ ms} \times 5 \text{ mA} \times 720 \times 24 \text{ godz.} \times 365 \text{ dni}$ daje zużycie energii na transmisję radiową ok. 26 mAh na rok. Zakładając pobór prądu $1 \mu\text{A}$ w trybie uśpienia, otrzymujemy zużycie 8,8 mAh rocznie, czyli razem około 35 mAh. Zużycie energii przez mikrokontroler i układ pomiaru ciśnienia będzie prawdopodobnie większe, ale bateria litowa 500 mAh powinna wystarczyć na 2...3 lata pracy czujnika.

Przykład 2. System akwizycji danych wysyła wyniki pomiarów na żądanie stacji bazowej, zwykle raz na dobę, w konfiguracji łączności 2-kierunkowej.

Podczas każdej sesji łączności z prędkością 38400 bps jest przesyłanych 2 kB danych. Przy założeniu poboru prądu przez transceiver 20 mA i czasu trwania dobowej sesji łączności 440 ms, zużycie energii wy-

Dodatkowe materiały na CD i FTP:
<ftp://ep.com.pl>, user: 17855, pass: 4s406qj2
 • poprzednie części kursu

nie sie zaledwie 1 mAh rocznie, czyli około 10 mAh po uwzględnieniu zużycia w trybie uśpienia. Jednak drastyczną zmianę w bilansie energii spowoduje uwzględnienie czasu czuwania odbiornika. Przy poborze prądu 5 mA i czasie czuwania 1 sekundy w ciągu każdej minuty, zużycie energii przez odbiornik wyniesie 730 mAh rocznie. Bardzo ważny wniosek: **przy krótkich sesjach łączności największym konsumentem energii nie jest sama transmisja danych, lecz okres czuwania odbiornika.**

Z punktu widzenia oszczędności energii, istotne jest wzajemne powiązanie częstotliwości fali nośnej, rodzaju modulacji oraz szybkości transmisji. Dla niskich częstotliwości stosuje się głównie modulację amplitudową ASK, o małej odporności na zakłócenia. Wyższe częstotliwości fali nośnej umożliwiają użycie bardziej zaawansowanych systemów modulacji: FSK, PSK i *spread spectrum*. Zwiększa to odporność na zakłócenia i umożliwia uzyskanie większej przepustowości kanału. Pobór mocy przez tor radiowy w mniejszym stopniu zależy od szybkości transmisji niż w układach cyfrowych, a więc przy dużych szybkościach można przesłać tę samą ilość danych w krótszym czasie, czyli zużywając mniej energii.

Bilans energetyczny łącza

Jest to zestaw parametrów decydującej o maksymalnym zasięgu transmisji (dla docieklivych: patrz *Równanie Friisa*). Podstawowe czynniki składające się na tzw. budżet łącza to: moc nadajnika, zysk anteny nadawczej i odbiorczej, czułość odbiornika. W energooszczędnej łączności radiowej stosuje się moce nadajników z zakresu od

-10...+15 dBm, a czułości odbiorników wynoszą -90...-110 dBm. Zwiększanie mocy nadajników i czułości odbiorników odbywa się zawsze kosztem większego zużycia energii, poza tym muszą one mieścić się w podanych wyżej granicach. Bardzo ważnym i często niedocenianym przez konstruktorów czynnikiem jest dobór odpowiednich anten. Duży zysk antenowy może znacząco poprawić budżet łącza, nie powodując dodatkowego zużycia energii. Niestety anteny o dużym zysku mają też duże wymiary, dlatego praktyczne rozwiązania są zawsze kompromisem pomiędzy zyskiem antenowym i gabarytami anteny.

Systemy antenowe to temat trudny i wymagający odpowiedniej wiedzy, dlatego warto korzystać z gotowych rozwiązań producentów. Dobrej jakości moduł radiowy powinien być też wyposażony w układ symetryzujący i dopasowujący impedancję falową anteny do nadajnika/odbiornika (tzw. balun). Brak dopasowania impedancji lub dołączenie asymetrycznej anteny do symetrycznego wyjścia (albo odwrotnie) spowoduje bardzo duże straty sygnału. Jeżeli producent układu radiowego nie publikuje wyczerpującej dokumentacji na temat instalacji antenowej, to czasem lepiej jest wybrać inną, bardziej dopracowaną ofertę.

Kryteria doboru sprzętu

Zaprojektowanie toru radiowej transmisji danych wymaga wiedzy z kilku dziedzin elektroniki i informatyki. Po pierwsze, znajomość techniki wysokich częstotliwości: propagacja fal radiowych, zasady konstrukcji i obliczania anten, techniki modulacji. Po drugie, zasady transmisji danych w łączach radiowych: protokoły, kodowanie, szyfrowanie, transmisja pakietowa, radiowe technologie sieciowe. Obecnie większość konstruktorów elektroników zajmuje się techniką cyfrową i mikroprocesorami, a znajomość powyższych zagadnień jest bardzo powierzchowna. Potwierdziły to wyniki miniankiety przeprowadzonej wśród kolegów elektroników, składającej się z dwóch pytań: 1) *Co wiesz o metodach modulacji cyfrowej: ASK, OOK, FSK, PSK, GFSK, QPSK, FHSS, DSSS?* 2) *Do czego służy preambuła, a do czego nagłówek pakietu?* Wynika stąd pierwsza zasada: konstruktor o niewielkiej wiedzy na temat transmisji radiowej powinien wybierać do swoich projektów najbardziej zaawansowane technicznie moduły łączności. Paradoksalnie – zbudowanie dobrej jakości łącza radiowego z najprostszych modułów nadawczo-odbiorczych wymaga sporego doświadczenia. Jednak, istotną jest jakość dostarczonej przez producenta dokumentacji technicznej. Najlepiej korzystać z urządzeń, do których producent dostarcza gotowe rozwiązania: projekty anten, płytek drukowanych, przykłady procedur aplikacyjnych, zestawy startowe itp. Wybór konkretnego rozwiązania danego producenta jest ostatnim etapem procesu decyzyjnego. W pierwszej kolejności należy określić ilość przesyłanych danych i częstotliwość sesji łączności oraz wymagany zasięg i konfigurację systemu. Na tej podstawie można wybrać optymalny zakres częstotliwości i szybkość transmisji. Nie można jednak zbyt optymistycznie podchodzić do danych katalogowych modułów łączności. Jeżeli producent podaje maksymalną szybkość transmisji 128 kbit/s, a w innym miejscu informację o zasięgu 500 m, to nie oznacza, że obydwa warunki będą spełnione jednocześnie. Po uważnym przestudiowaniu not aplikacyjnych można znaleźć na przykład taką informację: użyteczny zasięg transmisji wynosi 1000 m przy 2,8 kb/s; 100 m przy 38,4 kb/s i tylko 10 m przy 250 kb/s.

cyjnych, zestawy startowe itp. Wybór konkretnego rozwiązania danego producenta jest ostatnim etapem procesu decyzyjnego. W pierwszej kolejności należy określić ilość przesyłanych danych i częstotliwość sesji łączności oraz wymagany zasięg i konfigurację systemu. Na tej podstawie można wybrać optymalny zakres częstotliwości i szybkość transmisji. Nie można jednak zbyt optymistycznie podchodzić do danych katalogowych modułów łączności. Jeżeli producent podaje maksymalną szybkość transmisji 128 kbit/s, a w innym miejscu informację o zasięgu 500 m, to nie oznacza, że obydwa warunki będą spełnione jednocześnie. Po uważnym przestudiowaniu not aplikacyjnych można znaleźć na przykład taką informację: użyteczny zasięg transmisji wynosi 1000 m przy 2,8 kb/s; 100 m przy 38,4 kb/s i tylko 10 m przy 250 kb/s.

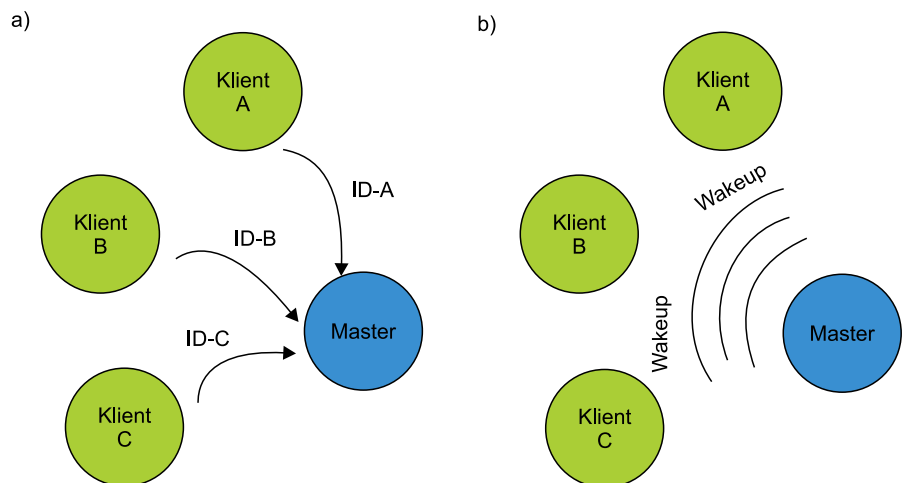
Konfiguracje łączności

W typowych konfiguracjach systemy energooszczędne komunikują się z nadrzędną stacją bazową, która nie ma tak rygorystycznych ograniczeń energetycznych. Możliwe są następujące przypadki:

- *Łączność 1-kierunkowa, nadajnik w stacji bazowej + energooszczędny odbiornik.* Jest to typowa konfiguracja zdalnego sterowania. Jeżeli nie jest dopuszczalne opóźnienie reakcji urządzenia na przesłane polecenie, to okresy aktywności odbiornika muszą być bardzo częste, a okresy uśpienia krótkie. Jedyną możliwością oszczędzania energii jest ograniczenie do minimum poboru prądu przez odbiornik. Jest to konstrukcyjnie łatwiejsze dla stosunkowo niskich częstotliwości fali nośnej.
- *Łączność 1-kierunkowa, odbiornik w stacji bazowej + energooszczędny nadajnik.* Konfiguracja wykorzystywana w bezprzewodowych czujnikach i układach pomiarowych, a także w radiowych pilotach do bram, alarmów itp. Co prawda konfiguracja ta umożliwia najmniejsze

zużycie energii, ale ma też istotne wady. Najważniejszą jest brak możliwości potwierdzenia odbioru danych i ewentualnej retransmisji błędnie odebranych pakietów. W celu poprawy jakości transmisji stosuje się kodowanie nadmiarowe z korekcją błędów oraz wielokrotne powtarzanie transmisji, jednak nie daje to 100% pewności dotarcia wszystkich danych do adresata. Kolejnym problemem jest współpraca sieciowa wielu urządzeń z jedną stacją bazową. Jeżeli dwa urządzenia będą nadawać w tym samym czasie, to nastąpi kolizja i transmisja nie zostanie odebrana. Przykładem zastosowania mogą być elektroniczne podzielniki kosztów ogrzewania mieszkań oraz liczniki zużycia wody. Jeżeli przekazywany jest raz na dobę stan bieżącego zużycia, to wywołana zakłóceniami utrata niektórych transmisji nie spowoduje istotnych problemów z rozliczeniem kosztów. Wystarczy, aby 90% wysłanych pakietów dotarło do stacji bazowej.

- *Łączność 2-kierunkowa point-to-point i w sieci lokalnej.* O ile systemy transmisji 1-kierunkowej nadają się do przesyłania niewielkich pakietów, to niezawodna transmisja większych ilości danych wymaga łączności 2-kierunkowej. Transceivery stanowią najbardziej popularną grupę urządzeń radiowej transmisji danych. Po zastosowaniu odpowiednich protokołów transmisji pakietowej umożliwiają one weryfikację i ewentualną retransmisję błędnie odebranych danych oraz budowę lokalnych sieci radiowych. Oferta producentów jest bardzo zróżnicowana: najprostsze układy wymagają implementacji protokołu i kodowania danych przez użytkownika, bardziej rozbudowane oferują wbudowane protokoły, kodowanie, szyfrowanie, czyli pełną obsługę transmisji radiowej. Do tej grupy należą też systemy objęte standardem IEEE 802.15, takie jak Bluetooth i Zig-Bee.



Rysunek 45. Typowe konfiguracje sieci radiowych

Metody eliminacji kolizji w konfiguracjach sieciowych

Typowe konfiguracje sieci radiowej tzw. *RF Star Network* przedstawiono na **rysunku 45**. Jedna stacja bazowa (master) obsługuje określoną liczbę energooszczędnych węzłów (klient). Najbardziej narażona na kolizje jest konfiguracja (a) z łącznością 1-kierunkową, jednakże jest bardzo interesująca ze względu na mniejsze zużycie energii i prostotę układu. W przedstawionych wcześniej przykładach urządzeń można zastosować proste metody eliminacji kolizji. Wypozażenie liczników pomiaru ciepła w zegary RTC umożliwi synchronizację czasu nadawania, na przykład każdy z 24 liczników nadaje raz na dobę, o określonej godzinie. Nie można zastosować takiego rozwiązania do czujników ciśnienia w oponach, ponieważ informacje muszą być przesyłane co 5 sekund lub częściej. Margines błędu jest tu bardzo wąski, po pewnym czasie eksploatacji synchronizacja zostanie zakłócona ze względu na niestabilność zegarów RTC. Jedną z możliwości jest zainstalowanie indywidualnych odbiorników przy każdym kole. Przy niewielkiej mocy nadajników, metalowa konstrukcja nadwozia zapewni wystarczającą separację sygnałów.

Najbardziej uniwersalna metoda ograniczania kolizji oparta jest na protokole ALOHA. Polega on na tym, że każdy Klient powtarza transmisję wielokrotnie, w losowych odstępach czasu. Na **rysunku 46** przedstawiono zastosowanie tej metody do konfiguracji sieci z rys. 45a. Jak widać, po trzykrotnym powtórzeniu, każdy pakiet mógł bezkolizyjnie dotrzeć do adresata. Prawdopodobieństwo kolizji jest mniejsze przy krótkim czasie transmisji pakietów i długich przerwach, dlatego też korzystne jest stosowanie dużych szybkości transmisji.

W bardziej rozbudowanych sieciach z łącznością 2-kierunkową (rys. 45b) transmisja jest synchronizowana przez stację bazową. Istnieje wiele możliwych rozwiązań, jednak w sieciach energooszczędnych preferowane są najprostsze, ze względu na niewielkie zapotrzebowanie mocy obliczeniowej:

- Protokół z wykrywaniem nośnej (CSMA). Każde urządzenie przed rozpoczęciem transmisji nasłuchuje, czy kanał nie jest zajęty przez inną transmisję.
- Sygnały budzenia *wake-up* adresowane do poszczególnych klientów. Można tu zastosować tzw. odbiornik budzący (*wake-up receiver*). Jest to ultraoszczędny odbiornik pracujący w paśmie niskich częstotliwości (np. 125 kHz), który generuje przerwanie po odebraniu zaprogramowanej sekwencji kodowej. Sygnał budzenia uruchamia główny transceiver, realizujący sesję łączności.
- Każdy Klient ma przydzieloną szczelinę czasową, a stacja bazowa nadaje sygnały synchronizujące (*beacon*). Stosuje się odpowiednie protokoły szczelinowe, np. S-ALOHA lub z rezerwacją R-ALOHA.

Zakresy częstotliwości radiowych

W krótkodystansowej, radiowej transmisji danych wykorzystuje się kilka typowych zakresów częstotliwości (podano częstotliwość środkową dla każdego pasma):

- Pasma stosowane w identyfikacji RFID: 125 kHz i 13,56 MHz
- Pasma CB 27,12 MHz
- Pasma ISM: 433,92 MHz; 868 MHz; 2,45 GHz

Dla zakresów niskich częstotliwości możliwe jest zbudowanie odbiorników o minimalnym poborze prądu, lecz trudne jest wykonanie anten o dobrej skuteczności i małych wymiarach. Nadajniki na tych zakresach muszą dysponować znaczną mocą. Jeżeli zasięg łączności nie przekracza 1–2 metrów, to jako anteny nadawcze stosuje się pętle indukcyjne, a anteną odbiorczą jest obwód rezonansowy. Liczba dostępnych kanałów łączności oraz szybkość transmisji jest niewielka – rzędu kilkuset do tysiąca bitów na sekundę.

Dla wyższych zakresów częstotliwości pasma ISM sytuacja jest odwrotna: nadajniki o stosunkowo niewielkiej mocy zapewniają większy zasięg, natomiast pobór mocy przez odbiornik jest większy – porównywalny z nadajnikiem. Anteny odbiorcze i nadaw-

cze mogą mieć małe rozmiary przy dużej skuteczności. Liczba dostępnych kanałów i szybkość transmisji jest znacznie większa – do 500 kb/s dla pasma 2,45 GHz.

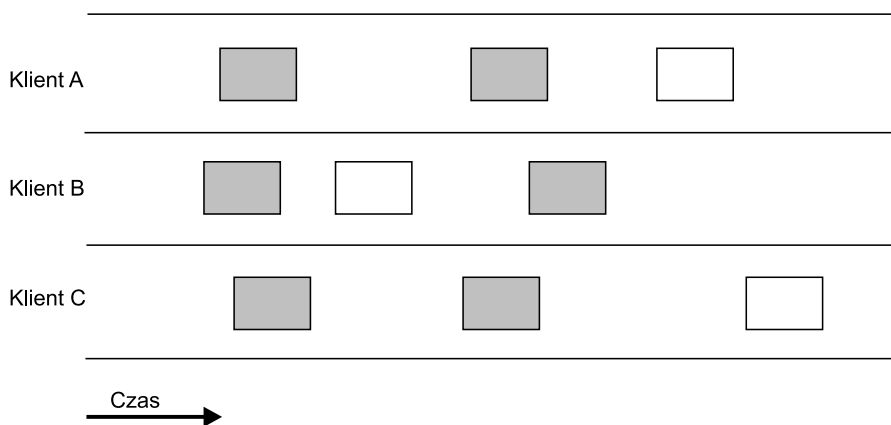
W energooszczędnych systemach łączności często stosuje się mieszanie różnych zakresów częstotliwości w jednym urządzeniu. Na przykład aktywny układ RFID może odbierać dane na częstotliwości nośnej 125 kHz, natomiast wysyłać dane w paśmie 433 lub 868 MHz.

Moduły radiowe ogólnego przeznaczenia

Najbardziej rozpowszechnioną grupę produktów stanowią moduły radiowe typu *embedded*, pracujące w pasmach ISM: 433 MHz, 868 MHz i 2,45 GHz. Parametry wybranych układów zamieszczono w **tabeli 3**.

Pierwsza grupa to popularne, tanie moduły nadajników, odbiorników i transceiverów (Telecontrolli, Aurel, Velleman), które nie najlepiej nadają się do zastosowań energooszczędnych. Większość układów wymaga zasilania 5 V (nadajniki nawet 9...12 V) i nie obsługuje trybów uśpienia *power-down*. Kolejną wadą jest brak pełnego interfejsu cyfrowego: w nadajniku sygnał wejściowy (strumień bitów) moduluje bezpośrednio falę nośną, a w odbiorniku sygnał wyjściowy jest pobierany bezpośrednio z wyjścia demodulatora. Powoduje to bardzo duże obciążenie współpracującego mikrokontrolera, który podczas nadawania musi przygotować pakiet (preambułę, nagłówki, dane, sumę CRC), zakodować go np. kodem Manchester i przetworzyć w strumień bitów wyjściowych. Przy odbiorze jest to: filtrowanie zakłóceń, odtworzenie częstotliwości zegarowej i synchronizacja odbieranych bitów, rozkodowanie i podział na bajty, identyfikacja i weryfikacja odebranych danych. Ze względu na krytyczne zależności czasowe, częstotliwość zegarowa mikrokontrolera nie może być niska, a wykonywanie w tym czasie innych zadań jest utrudnione. Niewielki pobór prądu przez moduł radiowy nie rekompensuje znacznego zużycia energii przez mikrokontroler. Układy tej grupy nadają się jedynie do transmisji bardzo krótkich sekwencji bitowych (w systemach zdalnego sterowania, pilotach do bram itp.).

Bardziej rozbudowane moduły z tzw. średniej półki są wyposażone w standardowe interfejsy szeregowy (najczęściej SPI) oraz podstawowe układy sprzętowego przetwarzania danych (nadawczy i odbiorczy rejestr FIFO, układ przerwań, Wake-up Timer). Możliwy jest odczyt i modyfikacja parametrów transmisji za pośrednictwem rejestrów konfiguracyjnych. Do tej kategorii należą moduły firmy RFM01 /02 i RFM12 firmy Hope RF, popularne ze względu na przystępną cenę i nie najgorsze parametry. Niestety cier-



Rysunek 46. Użycie protokołu ALOHA do budowy sieci z rys. 45a

Tab. 3. Uniwersalne moduły radiowe na pasmo ISM

Typ / funkcja / producent	Zakres częstotliwości, typ modulacji	Interface, szybkość transmisji	Zasilanie	Pobór prądu
RTQ10 nadajnik AM, Telecontrolli	315, 433, 868 MHz ASK	strumień bitów, maks. 40 kb/s	2,4 – 4,0 V (typ. 3,3 V)	TX: 14,5 mA @ 10 dBm Power down: 100 nA
TX-FM-MID nadajnik FM, Aurel	433 MHz FSK	strumień bitów, maks. 20 kb/s	2,1 – 3,6 V (typ. 3,0 V)	TX: 14 mA @ 10 dBm Power down: < 1 μ A
RR18 Odbiornik AM Telecontrolli	433 MHz ASK	strumień bitów, maks. 4,8 kb/s	2,75 – 3,25 V (typ. 3,0 V)	RX: 70 μ A Brak trybu Power down
RTX-MID-3V Transceiver AM Aurel	433 MHz ASK	strumień bitów, maks. 10 kb/s	2,75–3,25 V (typ. 3,0 V)	RX: 4,5 mA TX: 13 mA @ 10 dBm Power down: 1,2 μ A
RFM01 (odbiornik) RFM02 (nadajnik) Modulacja FM / PLL Hope RF	433, 868, 915 MHz FSK	SPI 0,6 do 115,2 kb/s	2,2 – 5,4 V	RX: 9 mA TX: 12 mA @ 0 dBm 23 mA @ 7 dBm Wake-up Timer: 1,5 μ A Sleep: < 0,3 μ A
RFM12 Transceiver FM Hope RF	433, 868, 915 MHz FSK	SPI 0,6 do 115,2 kb/s	2,2 – 5,4 V	RX: 9 mA TX: 13 mA @ 0 dBm 21 mA @ 7 dBm Standby: 3 mA Sleep: < 0,3 μ A
RFM31, RFM43 para odbiornik / nadajnik FM z synteza częstotliwości Hope RF	240 – 930 MHz FSK, GFSK, OOK	SPI Maks. 128 kb/s (FSK) Maks. 40 kb/s (OOK)	1,8 – 3,6 V (typ. 3,0 V)	RX: 18 mA TX: 16 mA @ 1 dBm 28 mA @ 13 dBm Sleep: < 800 nA Shutdown: 10 nA
nRF905 Transceiver z synteza częstotliwości Nordic Semiconductor	433, 868 MHz GFSK	SPI 50 kb/s (z wewn. kodowaniem Manchester)	1,9 – 3,6 V (typ. 3,0 V)	RX: 12,5 mA TX: 9 mA @ -8 dBm 30 mA @ 10 dBm Standby: 100 μ A Power down: 2 μ A
CC1100 Transceiver z synteza częstotliwości Chipcon (Texas Instruments)	300–348 MHz 400–464 MHz 800–928 MHz 2-FSK, GFSK, MSK, ASK	SPI 1,2 do 500 kb/s	1,8 – 3,6 V (typ. 3,0 V)	RX: 15–20 mA TX: 16,6 mA @ 0 dBm 29,6 mA @ 10 dBm Idle: 1,7 mA Deep Sleep: 0,3 μ A
nRF2401 Transceiver 2,45 GHz z synteza częstotliwości Nordic Semiconductor	2,4 – 2,524 GHz GFSK	SPI 250 – 1000 kb/s 0–1000 kb/s (w trybie ShockBurst)	1,9 – 3,6 V (typ. 3,0 V)	RX: 18 mA TX: 8,8 mA @ -20 dBm 13 mA @ 0 dBm TX w trybie ShockBurst: średni 0,8 mA @ -5 dBm Standby: 12 μ A Power down: 0,4 μ A
CC2500 Transceiver 2,45 GHz z synteza częstotliwości Chipcon (Texas Instruments)	2,4 – 2,483 GHz 2-FSK, GFSK, QPSK, OOK	SPI 1,2 – 500 kb/s (2-FSK) 1,2 – 250 kb/s (GFSK, OOK) 26 – 500 kb/s (QPSK)	1,8 – 3,6 V (typ. 3,0 V)	RX: 13 – 20 mA TX: 15 mA @ -6 dBm 21,2 mA @ 0 dBm Idle: 7,4 mA Deep Sleep: 0,4 μ A

pię one na typową przypadłość produktów dalekowschodnich: luki i błędy w dokumentacji oraz nieprzewidywalne zachowanie w niektórych aplikacjach. Na szczęście większość problemów znalazła już rozwiązanie na forach dyskusyjnych.

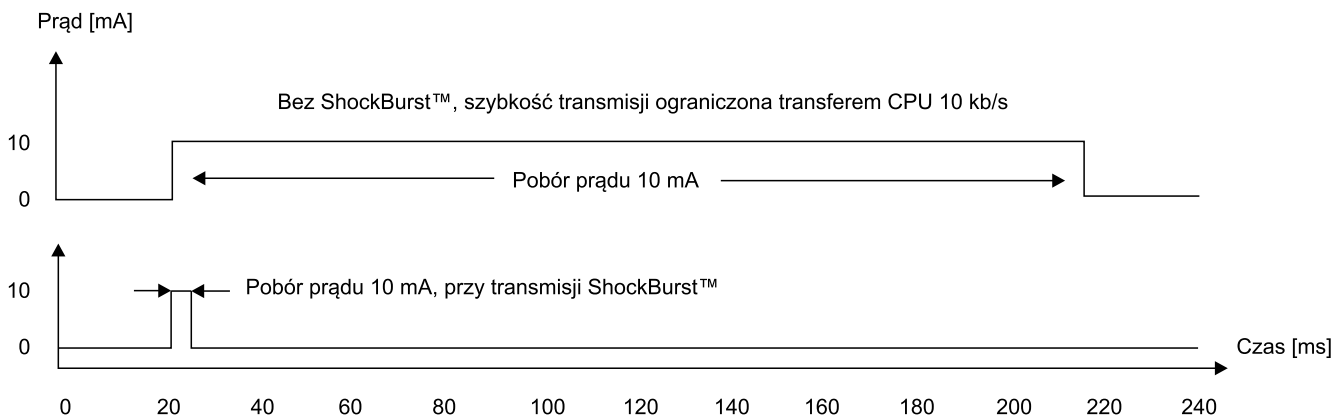
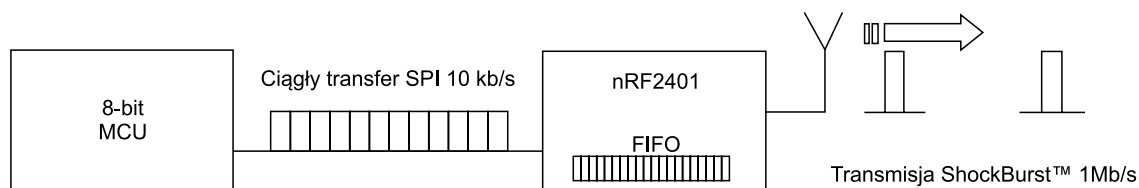
Najbardziej zaawansowane technicznie moduły radiowe oferują pełną sprzętową obsługę transmisji. Wszystkie czynności związane z obsługą transmisji radiowej są wykonywane przez wewnętrzny automat wielostanowy transceivera, dzięki czemu moc obliczeniowa mikrokontrolera jest angażowana w minimalnym stopniu. Moduły te obsługują zaawansowane tryby oszczędzania energii, często wyposażone są w dodatkowe urządzenia peryferyjne: zegar RTC, przetwornik A/C, detektor BOR, czujnik temperatury. Istnieje możliwość optymalizacji transmisji (np. mocy nadajnika, szerokości pasma,

progu czułości odbiornika itp.), zależnie od bieżących warunków propagacji. Do tej grupy należą układy RFM43 (nadajnik) i RFM31 (odbiornik) firmy Hope RF, a także opisywane już na łamach EP transceivery firmy Chipcon (obecnie Texas Instruments) oraz Nordic Semiconductor. Możliwości inteligentnych układów radiowych w zakresie energooszczędnej łączności są rzeczywiście imponujące. Po odpowiednim zaprogramowaniu układy te mogą wykonywać złożone procedury obsługi transmisji, bez nadzoru mikrokontrolera nadrzędnego. Operacje są wykonywane przez wyspecjalizowane układy logiczne, przy mniejszym zużyciu energii niż w przypadku mikrokontrolera:

- *Tryby energooszczędne.* Podobnie jak w nowoczesnych mikrokontrolerach, dostępnych jest kilka trybów pracy z ograniczonym poborem prądu. Obowiązują też te

same zasady: możliwie najmniejszy pobór prądu w stanie uśpienia i jak najkrótszy czas wybudzania. Czas wybudzania ze stanu głębokiego uśpienia jest rzędu 1–2 ms, ze względu na konieczność stabilizacji generatora i synchronizacji pętli PLL. Dla stanu gotowości (*stand-by*) czas przejścia do trybu nadawania / odbioru wynosi 50–200 μ s.

- *Kompozycja/dekompozycja pakietów (Packet handling, Data whitening).* Mikrokontroler wysyła i odbiera wyłącznie użyteczne dane, tzw. *payload data*. Transceiver w fazie nadawania realizuje sprzętowe obliczanie sum kontrolnych CRC, formowanie pakietu poprzez dodanie preambuły, adresu i CRC, kodowanie Manchester. Przy odbiorze wykonywane są odwrotne czynności, błędne dane są filtrowane, a mikrokontroler otrzymuje zweryfikowaną zawartość poprawnie odebranego pakietu.



Rysunek 47. Zasada działania i korzyści wynikające z transmisji grupowej

- Wykrywanie nośnej (*Carrier Sense, Carrier Detect*). Funkcja ta może służyć do eliminacji kolizji, a także do cyklicznego nasłuchu. Możliwe jest zaprogramowanie wartości progowej poziomu sygnału nośnej. Informacja o wykryciu nośnej może być

przekazana do mikrokontrolera (poprzez zmianę stanu pinu) lub wykorzystana do uruchomienia sekwencji odbioru pakietu.

- Rozpoznawanie adresu docelowego pakietu (*Address Detection/Filtering*). Układ odbiorczy porównuje adres w nagłówku

pakietu z zaprogramowanym wzorcem i zapisuje do bufora odbiorczego tylko pakiety z poprawnym adresem.

- Cykliczny nasłuch (*Wake-on-Radio, RX Polling*). Odbiornik jest cyklicznie uruchamiany na krótkie fazy nasłuchu i ponow-

R E K L A M A

Nowe częstościomierze i zasilacze firmy Tektronix!

Tektronix
Enabling Innovation

TESPOL
Sp. z o.o.



Pozwól Tektronix'owi zrobić więcej...

Częstościomierze: pasmo od 300MHz do 40GHz • rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości 12 cyfr/s • rozdzielczość w dziedzinie czasu do 50ps • V_{min} do 1mV • 250kSa/s do pamięci wewnętrznej • statystyka, histogramy oraz wykresy trendu w dziedzinie czasu • USB, GPIB • 3 lata gwarancji i oprogramowanie w standardzie

Zasilacze: moc do > 190W • prąd do 6A • napięcie do > 70V • rozdzielczość do 1mV / 0.1mA • praca ze stałym napięciem lub stałym prądem • ochrona panelu czołowego hasłem • USB • 3 lata gwarancji i oprogramowanie w standardzie

Siedziba Firmy: 54-413 Wrocław, ul. Klecińska 125, tel. 71 783 63 60, fax 71 783 63 61
Biuro Handlowe: 03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 74, tel. 22 675 75 42

tespol@tespol.com.pl
www.tespol.com.pl

Typ, producent	Mikrokontroler	Tor radiowy
CC430F5xx, CC430F6xx Texas Instruments	Energooszczędny rdzeń 16-bitowy MSP430F51xx (lub F61xx). CRC-16, szyfr. AES-128, 12-bit ADC, driver LCD (w serii F61)	Transceiver Chipcon CC1101, 300-928 MHz
CC1110Fx, CC1111Fx Texas Instruments	Zmodyfikowany rdzeń 8051, 8-32 kB Flash, maks. 25 MHz clock, prąd CPU: 2 mA @ 8 MHz, ADC 8-12 bit, AES-128, DMA, 2 x USART, USB (w serii 1111F).	Transceiver Chipcon CC1101, 300-928 MHz
CC2510Fx, CC2511Fx Texas Instruments	Jak dla serii CC1110F/1111F, zgodność programowa obu serii.	Transceiver Chipcon CC2500, 2,45 GHz
nRF9E5 Nordic Semiconductor	Zmodyfikowany rdzeń 8051, 10-bit ADC, aplikacja ładowana do RAM 4kB przez bootloader z zewn. pamięci EEPROM, prąd CPU 2 mA @ 4 MHz	Transceiver nRF905 433/868/915 MHz
nRF24LE1 Nordic Semiconductor	Zmodyfikowany rdzeń 8051, 16 kB Flash, 12-bit ADC, AES-128, sprzętowy ukl. mnożenia/dzielenia (32-bity), generator liczb losowych wykorzystujący szum termiczny	Transceiver nRF2401 2,45 MHz
STM32W108CB ST Micro	Rdzeń 32-bitowy Cortex-M3, bogate wyposażenie w peryferie	Transceiver 2,45 GHz zgodny z IEEE802.15.4
ATmega128RFA1 Atmel	Rdzeń 8-bitowy AVR (ATmega128). Prąd CPU 4,1 mA @ 16 MHz	Transceiver 2,45 GHz (AT86RF231) 250 kb/s do 2 Mb/s
rfPIC12F675F Microchip	Rdzeń 8-bitowy PIC12F. 1 kB Flash, 10-bit ADC	Nadajnik FSK/ASK 380-450 MHz, 40 kb/s

nie usypiany, bez ingerencji mikrokontrolera nadrzędnego. Jeżeli w fazie nasłuchu zostanie odebrany pakiet z poprawnym adresem, to generowane jest przerwanie budzące mikrokontroler nadrzędny. Zależności czasowe cyklicznego nasłuchu kontrolowane są przez energooszczędny Timer RC. W trybie pracy cyklicznej można osiągnąć wartości średniego poboru prądu przez odbiornik poniżej 100 μ A.

- *Transmisja grupowa (Burst Mode).* Dane przesyłane są do bufora nadawczego z małą prędkością. Po zapełnieniu bufora formowany jest pakiet, który jest następnie wysyłany z maksymalną dostępną szybkością transmisji. W ten sam sposób odbywa się odbiór danych. Jeżeli dodamy do tego automatyczne przetwarzanie pakietów, to bardzo szybka transmisja radiowa staje się dostępna nawet dla prostych mikrokontrolerów 8-bitowych z niską częstotliwością zegara. **Rysunek 47** ilustruje zasadę działania i korzyści ener-

tyczne transmisji grupowej na przykładzie trybu *ShockBurst™* firmy Nordic Semiconductor. Układy produkcji Chipcon/TI także obsługują tryb *burst*, lecz wymaga to nieco większego zaangażowania mikrokontrolera nadrzędnego. Jedynym ograniczeniem stosowania trybu *burst* jest to, że wymaga on dobrej jakości połączenia, umożliwiającego transmisję z dużą prędkością.

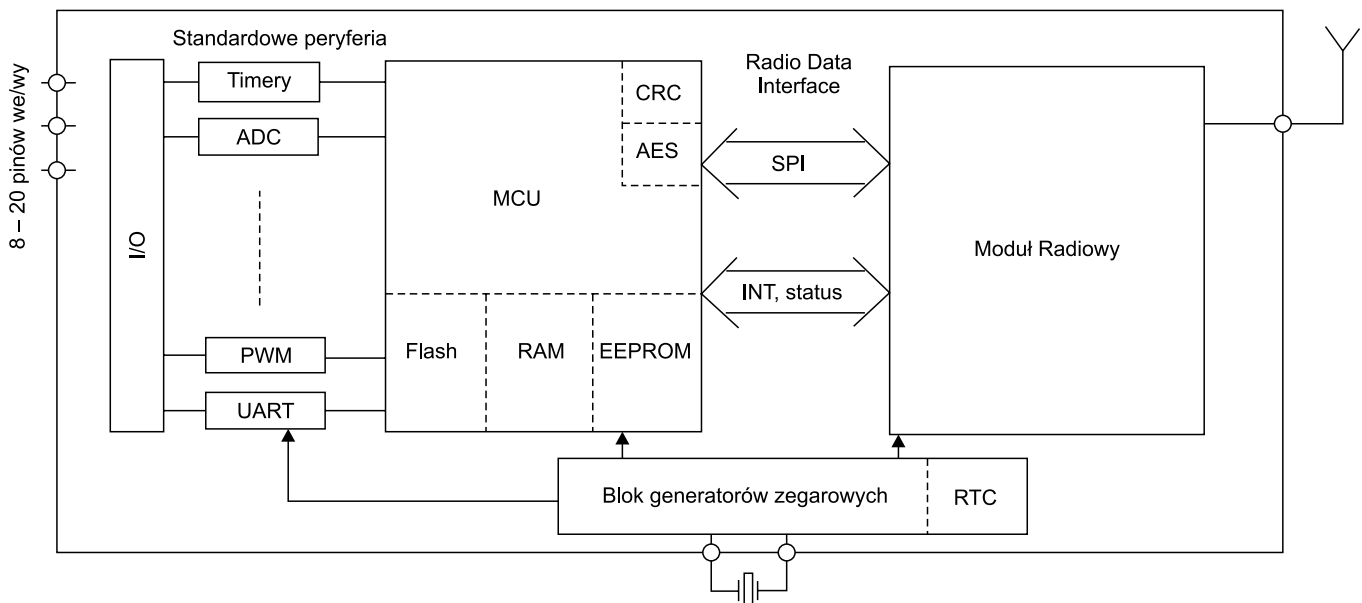
Mikrokontrolery zintegrowane z torem radiowym

Bardzo wielu producentów oferuje układy typu *System-on-Chip*, składające się z mikrokontrolera oraz toru radiowego. Takie rozwiązanie pozwala obniżyć koszty produkcji urządzeń oraz ograniczyć powierzchnię zajmowaną na płycie drukowanej. Dodatkową zaletą jest możliwość zastosowania jednego bloku generatorów zegarowych do taktowania mikrokontrolera i toru radiowego, co zmniejsza zużycie energii. Układy zintegrowane budowane są

zgodnie z ogólnym schematem blokowym, przedstawionym na **rysunku 48**. Zastosowanie tych układów jest celowe wtedy, gdy moc obliczeniowa mikrokontrolera jest wystarczająca do obsługi zarówno warstwy protokołu łączności, jak i aplikacji użytkownika. Dlatego też zaimplementowany mikrokontroler poza standardowym zestawem peryferii posiada zwykle układy sprzętowe przeznaczone do łączności radiowej: obliczania sumy CRC16, szyfrowania AES-128, a nawet generatory liczb losowych, natomiast moduły radiowe oferują pełną obsługę pakietów. W ramach wsparcia technicznego producenci publikują biblioteki procedur wspomagających i przykładowe programy aplikacyjne obsługi transmisji. Wybrane układy z tej grupy przedstawione są w **tabeli 4**.

W kolejnej części cyklu zajmiemy się układami specjalnymi, przeznaczonymi do określonych aplikacji, oraz sieciowymi systemami łączności (ZigBee, Bluetooth).

Jacek Przepiórkowski



Rysunek 48. Ogólny schemat blokowy układu zintegrowanego z torem radiowym