

Radio dla m(n)as

Nowe oblicze układów Chipcon

Radio o nazwie Moskwa należące do mojej babci ważyło kilkanaście kilogramów i kosztowało majątek. Mimo iż zawierało tylko kilka elementów aktywnych oraz garść cewek i kondensatorów, to znakomicie spełniało swoje zadanie. W tamtych czasach był to przedmiot o nadprzyrodzonych cechach i tylko nieliczni wiedzieli jak działa i jak naprawić je w przypadku awarii. Dziś radio ma wymiary znaczka pocztowego i jest bardzo tanie.

Jako produkt konsumencki radio użytkowane jest dosłownie wszędzie. Naprawy nieodmiennie są kłopotliwe, chociaż z zupełnie innych powodów, a uszkodzone odbiorniki raczej trafiają do *recyclingu* niż serwisu. Rozwiązania radiowe są też coraz bardziej powszechne wśród amatorów i profesjonalistów, znajdując zastosowanie w projektach inżynierskich.

Rozwój użytkowej transmisji radiowej krótkiego zasięgu nie byłby możliwy bez rozwoju technik cyfrowej syntezy i obróbki sygnałów. Technika cyfrowa wkracza w kolejne obszary naszego życia, wprowadzając inną jakość. Namacalnym efektem, poza miniaturyzacją, jest stosowanie coraz to wyższych częstotliwości i bardziej zaawansowanych typów modulacji. Postęp technologii odczarował zagadnienie i sprawił, że mniej w nim sztuki tajemnej a więcej rzemiosła. Niemal każdy może zbudować sprawne radio i użyć do własnych potrzeb.

Cechy nowoczesnego radia omówimy na przykładzie transceivera CC2500, dawniej wytwarzanego przez firmę Chipcon, a obecnie przez Texas Instruments. Wybór jest

nieprzypadkowy – czytelnicy mieli już okazję zapoznać się z podobnie zbudowanym układem CC1100, działającym na pasmach 433 i 868 MHz. CC2500 działa na paśmie 2,4 GHz. Oferuje dyskretną modulację częstotliwości w kilku odmianach, a przy tym jest łatwo dostępny w postaci gotowych modułów, choćby w zestawie eZ430-RF2500.

CC2500 i spółka – cyfrowe radio dla m(n)as

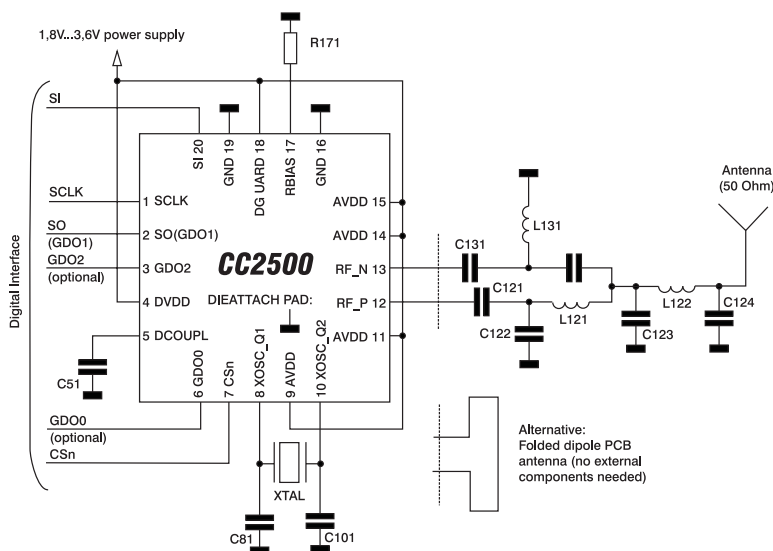
Jeszcze kilka lat temu budowa transceivera ISM, czyli urządzenia radiowego przeznaczonego do pracy w zakresie częstotliwości radiowych dostępnych do swobodnego użytkowania, stanowiła spore wyzwanie. Owszem, rynek oferował kilka rozwiązań łączących większość funkcji w jednym układzie scalonym, ale takie jednoukładowe radio wymagało do pracy wielu elementów zewnętrznych: rezonatora kwarcowego, kilku filtrów ceramicznych pośredniej częstotliwości, warikapu a czasem przełącznika antenowego. Układy o wyraźnie prostszej aplikacji oferowały z kolei bardzo skromne możliwości konfiguracji.

Dziś nowoczesny transceiver wymaga do pracy jedynie rezonatora kwarcowego i biernego układu dopasowania anteny. Komunikuje się z procesorem za pomocą jednego portu wspólnego dla danych i ustawień.

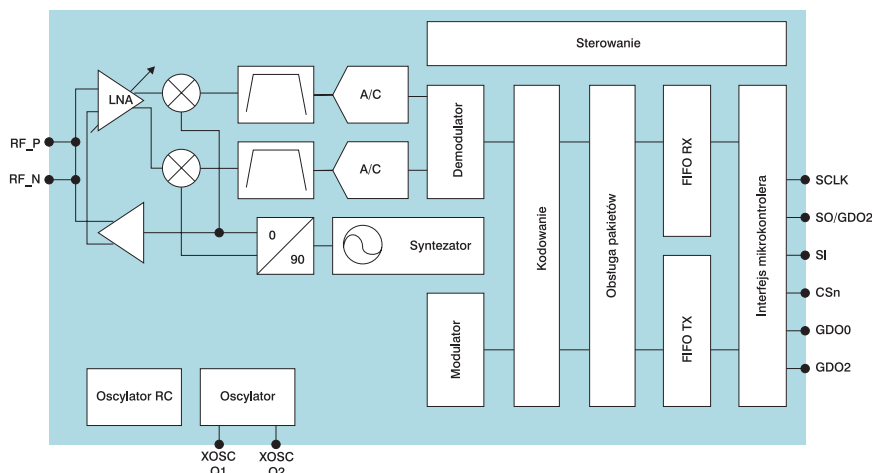
Prostą aplikacją zewnętrzną uzyskano dzięki mocno skomplikowanej strukturze wewnętrznej. Nowoczesny transceiver to nie tylko prosty układ wykonawczy. Ma własną mającą spore kompetencje jednostkę zarządzającą, która może autonomicznie podejmować decyzje o trybie pracy. Poza tym, znakomita część bloków funkcjonalnych i procesów realizowana jest lub kontrolowana cyfrowo: generator lokalny to właściwie syntezer częstotliwości, przemiana częstotliwości realizowana jest przez demodulator kwadraturowy i polega na mieszaniu sygnału w.cz. z sygnałem lokalnym w postaci dwóch zbieżnych, ale przesuniętych w fazie przebiegów. To jeszcze z grubsza przypomina klasyczny mieszacz, choć różnica jest zauważalna: częstotliwość lokalna jest właściwie identyczna z częstotliwością fali nośnej. W wyniku przemiany uzyskuje się dwa równoległe sygnały I i Q pozbawione częstotliwości nośnej, o wąskim, nie przekraczającym zwykle 1 MHz, paśmie. Po przemianie sygnał użytkowy filtrowany jest bez użycia układów rezonansowych i zewnętrznych filtrów (filtr z przełączaną pojemnością). Następnie jest on digitalizowany, a jego detekcja następuje w wyniku działań na liczbach zespolonych.

Automatyczna regulacja wzmocnienia (ARW) w torze odbiorczym bazuje również na cyfrowej reprezentacji amplitudy odbieranego sygnału i sterowaniu wzmocnieniem toru wprost z przetwornika C/A. Ciekawostką jest to, że jednym z wyznaczanych podczas obliczeń parametrów jest wartość odstrojenia odbiornika od częstotliwości pracy nadajnika. To kolejne dobrodziejstwo przetwarzania sygnału w dziedzinie częstotliwości. Krok syntezy częstotliwości jest zwykle bardzo mały i naniesienie poprawki oraz dokładne odstrojenie odbiornika jest bardzo łatwe.

Proces tworzenia sygnału radiowego na potrzeby toru nadawczego przebiega w odwrotnej kolejności. Zmodulowany sygnał trafia do dwutorowego przetwornika C/A a po filtracji i konwersji do docelowej częstotliwości trafia do wzmacniacza i anteny. Kłopotliwego zewnętrznego przełącznika an-



Rys. 1. Schemat aplikacji transceivera ISM na przykładzie CC2500



Rys. 2. Budowa CC2500

tenowego brak – jest zintegrowany w strukturze.

CC2500 ma jeszcze prostszą budowę nadawczego - nie ma tu ani przetworników C/A, ani mieszacza a sygnał wyjściowy syntetyzowany jest bezpośrednio.

Nowoczesny transceiver może realizować znacznie więcej zadań niż wytwarzanie i odbiór sygnału radiowego. By radio było faktycznie łatwe w zastosowaniu, powinno mieć elementy, które zadbają o właściwe przygotowanie informacji użytkownika, przesłanie ich do miejsca przeznaczenia i wierne odtworzenie. Pożądane są mechanizmy pozwalające na zwiększenie niezawodności transmisji i kontrolę jej parametrów. Większa funkcjonalność transceiwera pozwala na przeniesienie do części zadań procesora sterującego, a to upraszcza oprogramowanie i zmniejsza zapotrzebowanie na moc obliczeniową. Przyczynia się to do spadku aktywności procesora i redukcji poboru energii.

Na rys. 2. Pokazano strukturę logiczną transceiwera. Układ komunikuje się z kontrolerem poprzez synchroniczny port szeregowy, wspólny dla poleceń i danych. Odbiorcą poleceń jest układ kontrolny nadzorujący pracę pozostałych elementów. Mogą to być np. rozkazy wyboru trybu pracy, załączenia nadawania lub odbioru, przejścia w tryb spoczynkowy, wykonania kalibracji. Upřednio zaprogramowany układ kontrolny może również podejmować własne decyzje w oparciu o ocenę natężenia ruchu radiowego lub jakości odbieranego sygnału. Poza tym, przy każ-

dej wymianie poleceń lub danych, raportuje o stanie pracy transceiwera.

Poza synchronicznym portem szeregowym, CC2500 ma również dodatkowe linie I/O ogólnego użytku, które mogą służyć np. do szybkiej sygnalizacji stanu.

Dane użytkowe, odebrane lub przeznaczone do wysyłki, przed dostarczeniem do toru przechowywane są w buforach FIFO o długości 64 B każdy. Kolejki umożliwiają przesłanie i odebranie danych z transceiwera w relatywnie krótkim czasie (rzędu kilkadziesiąt μ s), niezależnie od szybkości transmisji radiowej. Podczas gdy dane są wysyłane torem radiowym (lub przezeń zbierane), procesor sterujący może realizować inne zadania lub pozostając w bezczynności oszczędzać energię. Po drugiej stronie kolejek FIFO znajduje się blok funkcjonalny odpowiadający za przygotowanie i analizę pakietów danych.

Transmitowane dane podzielone są na pakiety. Jedynie część danych, które składają się na pakiet, pochodzi od użytkownika. Pozostałe to dane kontrolne uzupełniane przez transceiver. Przyjrzyjmy się budowie takiego pakietu.

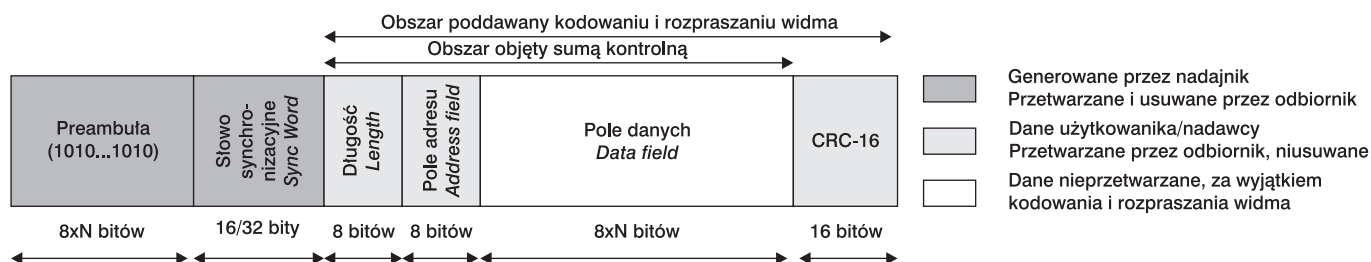
Rozpoczyna się on preambułą – naprzemiennym ciągiem zer i jedynek, który nie niesie sobą informacji, ale dzięki swojej powtarzalności jest łatwy do odróżnienia od danych lub szumu oraz umożliwia odbiornikowi optymalizację parametrów odbioru przed nadejściem istotnej treści transmisji. Po preambule następuje słowo synchronizacyjne. W transceiverze CC2500 wartość i długość

słowa podlega konfiguracji. Kolejne elementy łańcucha to już dane użyteczne. Części z nich przyznano specjalne znaczenie. Są to: pole definiujące długość pakietu, pole adresu (można tu umieścić adres odbiorcy pakietu) oraz 16-bitowa suma kontrolna CRC, obliczana i dołączana przez transceiver. Sumaryczna długość pakietu w CC2500 to 256 B.

Tor radiowy nie przenosi dobrze długich ciągów takich samych stanów logicznych, a te występują w rzeczywistych danych nader często. Dlatego dane użytkowe przed przesłaniem do toru radiowego warto poddać dodatkowym operacjom – rozpraszaniu widma lub dodatkowemu kodowaniu. Rozpraszanie widma polega na wykonaniu na ciągu danych operacji XOR z pseudolosową sekwencją generowaną przez wbudowany mechanizm. Zmniejsza to prawdopodobieństwo powstawania błędów transmisji. Skutkiem pojawienia się błędu jest nieodwracalna utrata danych – wtedy transmisję trzeba powtórzyć. Dane można zabezpieczyć przed skutkami przekłamań w inny sposób – przez zastosowanie dodatkowego kodowania czym w CC2500 zajmuje się blok *FEC/Interleaving*. Blok *FEC* wykonuje dwie operacje. Pierwsza to właściwe kodowanie, w którym część upřednio obrabianych danych jest wykorzystana ponownie. Zwiększa to ilość danych do przesłania, ale ich nadmiarowość (redundancja) pozwala odzyskać oryginał podczas odwrotnej operacji, nawet w przypadku powstania błędów. Druga operacja to taka zmiana kolejności bitów danych, by chwilowe zakłócenia radiowe wyrządziły na tyle małe szkody, by można je było odzyskać korzystając z danych redundantnych.

Podczas przygotowania pakietu do transmisji użytkownik definiuje zawartość pola długości pakietu, pola adresu oraz dane użytkowe. Typowo, transceiver oblicza sumę kontrolną z tych danych i dołącza ją na końcu pakietu. Odpowiednio zaprogramowany odbiornik podczas odbioru analizuje zawartość pakietu oraz preambułę i słowo synchronizacyjne. Na podstawie wyników analizy może ocenić jakość transmisji, zweryfikować poprawność danych oraz zdecydować o dalszym losie odebranego pakietu.

Analiza pakietu jest warunkowa. Pakiet nie będzie analizowany przez odbiornik, jeśli nie zostanie wykryte prawidłowe słowo synchronizacyjne (zdefiniowane w reje-



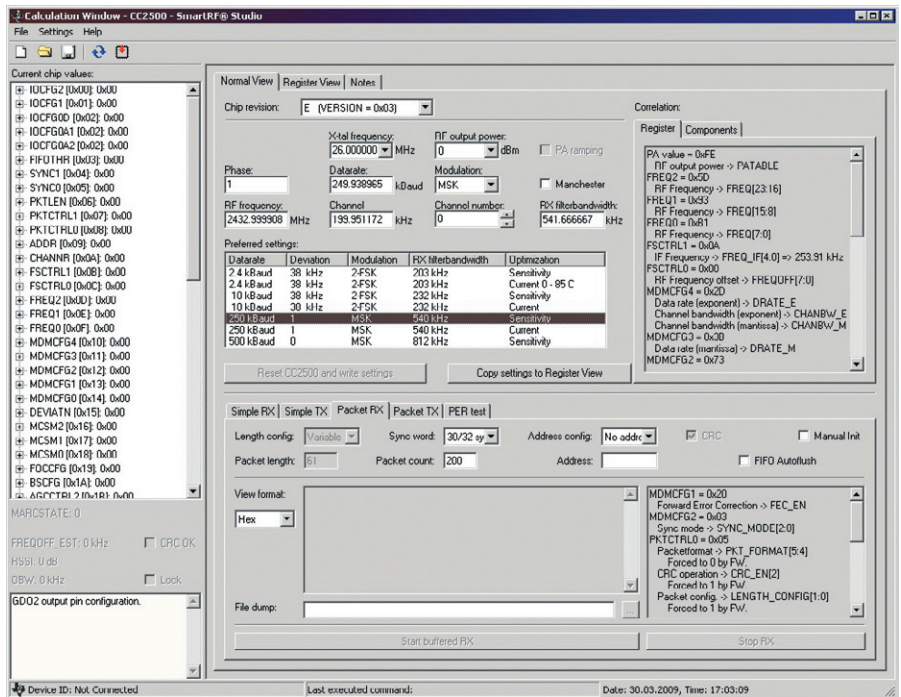
Rys. 3. Budowa pakietu

strach SYNC1 i SYNC2), przy czym stopień żądanej zgodności z definicją można również ustalić. Nie zawsze najlepszym rozwiązaniem jest żądanie pełnej zgodności - można dopuścić pewne odstępstwa. Żądany stopień zgodności preambuły (współczynnik *Preamble Quality Threshold*) jest również edytowalny. Wybór ustawień należy traktować jako rodzaj kompromisu. Zbyt restrykcyjne podejście do zgodności preambuły i słowa synchronizacyjnego może skutkować utratą pakietów poprawnych w obszarze danych użytkowych.

Podczas odbioru w sposób ciągły obliczana jest wartość wskaźnika poziomu odbieranego sygnału RSSI oraz binarny wskaźnik detekcji transmisji *Carrier Sense*. Obie te wartości są dołączane do raportu przesyłanego do procesora ale mogą być również używane przez jednostkę sterującą w procesach decyzyjnych. Podczas odbioru danych wyznaczana jest również wartość wskaźnika zajętości kanału CCA (*Clear Channel Assessment*) oraz współczynnika LQI (*Link Quality Indicator*). Jeśli wskaźnik CCA wskazuje na to, że kanał jest zajęty, transceiver zignoruje polecenie nadawania. Współczynnik LQI z kolei służy użytkownikowi do oceny jakości połączenia. Przydaje się to w systemach ze zmienną częstotliwością pracy (*frequency hopping*) do wyboru kanału roboczego.

Zarządzanie danymi

Wiadomo już, że nowoczesny transceiver ma mechanizmy pozwalające na sprawdzenie poprawności danych, których użycie odciąża procesor sterujący. Można go odciążyć bardziej, przekazując transceiverowi nieco więcej kompetencji np. filtrowanie pakietów. CC2500 może filtrować pakiety ze względu na poprawność sumy kontrolnej, deklarowaną długość oraz zawartość pola adresu. Jeśli pole adresu jest kontrolowane, to przyjęty i skierowany do FIFO (i do procesora) zostanie jedynie pakiet o adresie zgodnym z zawartością rejestru ADDR lub o adresie rozgłoszeniowym (0 lub 255). Pozostałe są filtrowane i nie trafiają do FIFO, a procesor sterujący nie jest zawiadamiany o ich nadejściu. Filtracja ze względu na długość pakietu pozwala na odrzucanie pakietów o długości większej od zadeklarowanej w rejestrze PKTLEN.PACKET_LENGTH. Podobnie filtrowane są pakiety ze względu na zgodność



Rys. 4. Okno programu konfiguracyjnego SmartRF Studio

sumy kontrolnej z takim zastrzeżeniem, że każdy pakiet trafia do FIFO ale jest z kolejki usuwany po stwierdzeniu błędu. Odrzucony w ten sposób może być tylko pakiet o długość mniejszej niż długość bufora. Przy dłuższych pakietach automatyczna kontrola CRC wymaga wzmożonej uwagi ze strony użytkownika.

Zarządzanie radiem – Wake-On-Radio

W CC2500 zaimplementowano kilka mechanizmów zarządzających trybem pracy radia. Jednym z nich jest *Wake-On-Radio* (WOR). Działanie mechanizmu WOR polega na cyklicznym włączaniu radia w tryb odbioru w poszukiwaniu nadchodzącej transmisji. Nasłuch trwa krótko, zwykle nie dłużej niż kilka milisekund, po czym radio powraca do trybu spoczynkowego. Jeśli w czasie nasłuchu pojawi się transmisja, nasłuch trwa do czasu odebrania pakietu.

Trzeba pamiętać, że pobór prądu w czasie odbioru wynosi ok. 15 do 20 mA. W systemach zasilanych z sieci energetycznej nie ma to większego znaczenia, ale w urządzeniach bateryjnych to zbyt dużo. Przy zastosowaniu mechanizmu WOR czas nasłuchu można zredukować nawet kilkaset razy,

co znacząco redukuje średni pobór prądu i uczyni wielomiesięczną pracę baterijną całkiem realną.

Narzędzia

Mnogość mechanizmów zaimplementowanych w transceiverze powoduje, że niełatwo skonfigurować go bez dobrych programów narzędziowych. Do konfiguracji CC2500 i podobnych transceiverów służy oprogramowanie *SmartRF Studio*. Ułatwia drobiazgową konfigurację pracy układu i pozwala na testowanie jakości połączenia radiowego: poziomu odbieranego sygnału, odstrojenia odbiornika wobec nadajnika lub wykonanie pomiaru ilości utraconych pakietów w prostym teście PER (*Packet Error Rate*).

Przygotowaną w *SmartRF Studio* konfigurację można wyeksportować do programu w jednym z wielu predefiniowanych lub własnym formacie.

Texas Instruments udostępniła biblioteki do komunikacji z transceiverem CC1101 i CC2500. Można je znaleźć pod adresem www.ti.com/litv/pdf/swrta141.

**Mariusz Kaczor
Contrans TI**

R E K L A M M A

Zestaw uruchomieniowy dla AVR i 51

AVT992

www.sklep.avt.pl