

# Nowy duch na pasmach ISM

## Transceiver SPIRIT i energooszczędne mikrokontrolery z oferty STMicroelectronics

Ważną nowością w ofercie STMicroelectronics są jednokładowe transceivery na pasma ISM, noszące nazwę SPIRIT1. Są one przystosowane do pracy w nielicencjonowanych pasmach radiowych, należących do „wolnych” zakresów częstotliwości poniżej 1 GHz: 150...174 MHz, 300...348 MHz, 387...470 MHz oraz 779...956 MHz.

Transceiver SPIRIT1 jest jednokładowym, kompletnym torem nadawczo-odbiorczym, który umożliwia dwukierunkowy transfer danych z prędkością (bitową, mierzona w antenie) od 1 do 500 kb/s. Układ wyposażony w uniwersalny modulator pozwalający na korzystanie z następujących metod modulacji: 2-FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK oraz ASK. Standardowy odstęp międzykanałowy wynosi 12,5 kHz, dzięki czemu w każdym paśmie radiowym można ulokować lokalnie dużą liczbę niezależnych urządzeń nadawczo-odbiorczych. Odbiornik w układzie SPIRIT1 charakteryzuje się dużą czułością (–118 dBm), a tor nadawczy jest przystosowany do emisji sygnału o mocy wyjściowej do +11 dBm. Schemat blokowy jednokładowego transceivera SPIRIT1 pokazano na **rysunku 1**.

Podczas konstruowania tego układu wyraźnie nie wzięto sobie za punkt honoru bicie jakichkolwiek rekordów, poza rekordowym komfortem jego aplikowania: dotyczy to zarówno aplikacji fizycznej (**rysunek 2**), poboru mocy (9 mA w trybie odbioru, 21 mA w trybie nadawania przy poziomie mocy wyjściowej +11 dBm) jak i wewnętrznych rozwiązań sprzętowych wspierających transfer danych.

Tor radiowy jest programowany poprzez interfejs SPI, który służy także do transferu danych. W ścieżkach nadawczej i odbiorczej zastosowano niezależne bufor FIFO o pojemności po 96 bajtów każdy, a tor radiowy wyposażony w mechanizmy minimalizujące zmiany wielkości fizycznych w otoczeniu na jakość transmisji (np. filtr odbiorczy o programowanej szerokości przenoszenia, automatyczną kompensację offsetu częstotliwości referencyjnej, „inteligentny” system dywersyfikacji anten bazujący na pomiarze



poziomu sygnału nośnego preambuły, wbudowany w strukturę czujnik temperatury itp.).

Prezentowany transceiver wyposażony także w sprzętowe bloki automatyzujące transmisję danych, w tym m.in. automatyczne potwierdzanie poprawnego odbioru, automatyczne żądanie retransmisji, monitorowanie czasu transmisji i sygnalizowanie wystąpienia timeout'u. Zautomatyzowano także system synchronizacji transmisji z mechanizmem CCA (*Clear Channel Assessment*), na którym bazuje mechanizm dostępu do kanału transmisyjnego CSMA.

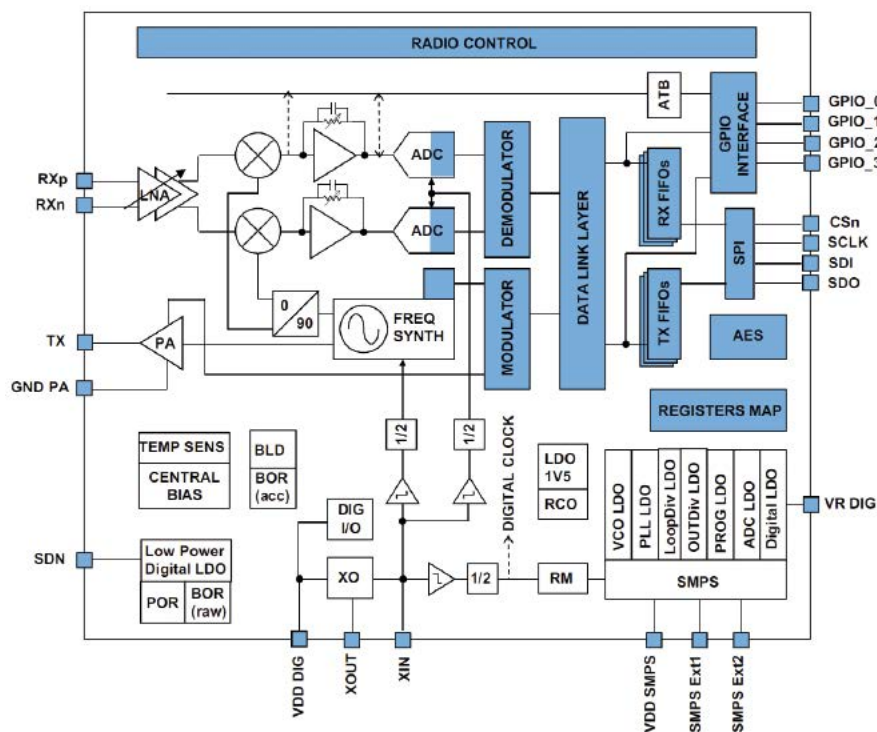
Wymienione elementy „automatyki” transmisji są wbrew pozorom łatwe do przyswojenia i bardzo przydatne zarówno w prostych systemach transmisyjnych punkt-punkt, systemach rozgłoszeniowych oraz sieciach radiowych, w których w jednym zakresie częstotliwości musi komunikować się wiele urządzeń w tym samym czasie.

Użytkownik może w protokole transmisji zaimplementować dynamicznie modyfikowaną długość ramek danych oraz automatyczną detekcję adresu urządzenia docelowego, przesyłane dane mogą być szyfrowane za pomocą sprzętowego bloku kryptograficznego AES128. Minimalizację ryzyka błędnych transferów uzyskano dzięki systemowi automatycznej synchronizacji transmisji, sprzętowej ochronie konsystencji danych z CRC oraz wbudowanemu systemowi korekcji błędów FEC (*Forward Error Correction*).

Twórcy układu zadbali także o elektromagnetyczne skutki transmisji danych za pomocą transceivera SPIRIT1 i żeby zminimalizować poziom prązków emitowanych przez niego zakłóceń zakłóceń, wyposażyli go w sprzętowy system „zaszumiania” przesyłanych danych. Jest on stosowany w torze nadawczym i odbiorczym, a jego rolą jest zminimalizowanie poziomu emisji zakłóceń podczas transmisji szybko zmieniających się danych (np. ciągu 01010101). Kolejnym zabiegiem minimalizującym emisję zakłóceń podczas nadawania jest cyfrowa modulacja ASK z dyskretnymi poziomami mocy, włączanymi stopniowo. Czasy kroków narastania i zmniejszania poziomu wyjściowego są programowane przez użytkownika.

Diagnostykę połączeń nawiązywanych przez transceivery SPIRIT1 ułatwiają dodatkowe mechanizmy w nich zaimplementowane: detektor nośnej, cyfrowy wskaźnik poziomu odbieranego sygnału RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), programowany detektor jakości preambuły, a także miernik jakości połączenia, bazujący na statystycznej weryfikacji danych przesyłanych i odbieranych.

Bardzo przydatnym – przede wszystkim w aplikacjach zasilanych z baterii – wyposażeniem układów SPIRIT1 jest wbudowany w nie system monitorowania stanu baterii zasilającej (z sygnalizacją zbyt niskiej wartości napięcia zasilającego) oraz system oszczędzania energii z mechanizmami usy-



Rysunek 1. Schemat blokowy transceiwera SPIRIT1

piania i wybudzenia za pomocą wewnętrznego timera lub zewnętrznego zdarzenia.

Bogactwu wyposażenia wewnętrznego i ogromnych możliwości transceiwera SPIRIT1 „zaprzecza” niewielka obudowa QFN z 20 wyprowadzeniami, której wymiary zewnętrzne nie przekraczają 4 mm×4 mm. Zaawansowana technologia produkcji struktur półprzewodnikowych umożliwiła jednak zintegrowanie w niej wszystkich wymienionych funkcji przy jednoczesnym zapewnieniu niewielkiego poboru mocy.

Ze względu na „niskomocową” orientację prezentowanych transceiwerów, pre-

destynowane do współpracy z nimi są mikrokontrolery STM32L z oferty STMicroelectronics. Mikrokontrolery STM32L1 są dostępne na rynku od dłuższego już czasu, w skład tej grupy wchodzi cztery podrodziny, których najważniejsze elementy wyposażenia pokazano – w zestawieniu z pozostałymi rodzinami STM32 – na **rysunku 3**:

- STM32L100 – mikrokontrolery tworzące grupę Value Line, pozbawione wyrafinowanych bloków peryferyjnych stosowanych w pozostałych rodzinach STM32L1 (jak AES, czujnika temperatury, czy brak

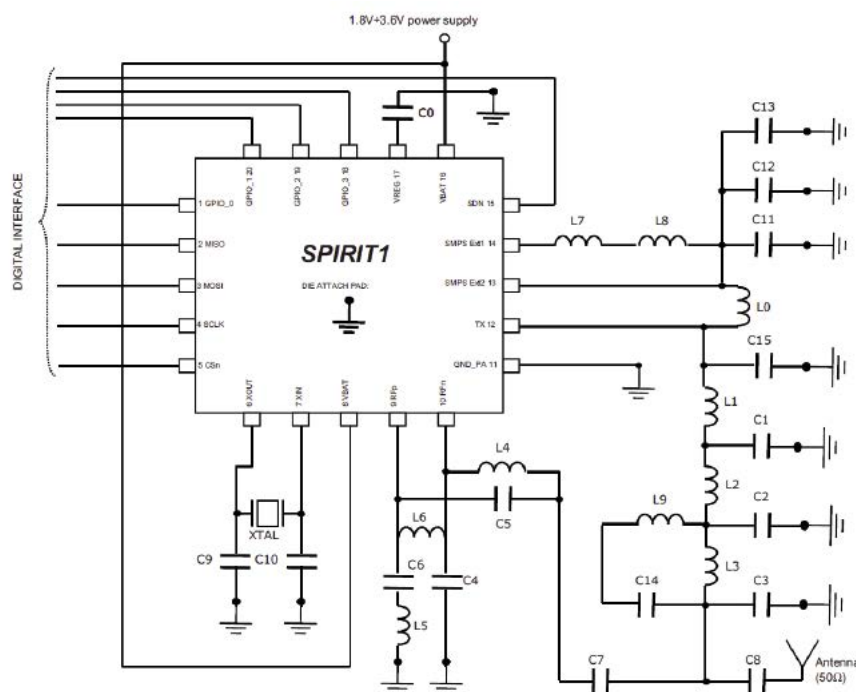
możliwości implementacji nastawników analogowych na liniach GPIO),

- STM32L151 – mikrokontrolery wyposażone tak samo jak mikrokontrolery z grupy STM32L152, bez wbudowanego wewnętrznego kontrolera LCD,
- STM32L152 – odpowiedniki mikrokontrolerów STM32L151 z wbudowanym kontrolerem segmentowych LCD,
- STM32L162 – odpowiedniki mikrokontrolerów STM32L152 z wbudowanym koprocesorem kryptograficznym.

Już w założeniach koncepcyjnych mikrokontrolery STM32L optymalizowano konstrukcyjnie i technologicznie pod kątem aplikacji wymagających minimalizacji poboru energii. Zastosowanie do produkcji mikrokontrolerów z rodziny STM32L technologii o wymiarze charakterystycznym 130 nm pozwoliło na obniżenie napięcia zasilającego do wartości 1,65 V, przy czym mikrokontrolery mogą pracować w urządzeniach zasilanych napięciem do 3,6 V – zakres dopuszczalnych napięć zasilających pozwala bardzo efektywnie wykorzystać dynamikę regeneralnych ogniw zasilających.

Technologia półprzewodnikowa zastosowana do produkcji mikrokontrolerów STM32 zapewnia minimalizację prądów pasożytniczych, dzięki czemu pobór prądu przez mikrokontroler w stanie spoczynku (*standby*) nie przekracza 0,3 mA, a w stanie *stop* nie przekracza 0,57 mA (obydwie wartości @3,6 V). Tak dobre wyniki osiągnęto m.in. dzięki zastosowaniu zaawansowanego systemu taktowania bloków peryferyjnych, co jest rozwiązaniem wprowadzonym na rynek wraz z mikrokontrolerami wyposażonymi w rdzenie z rodziny Cortex-M. Możliwość indywidualnego włączania i wyłączania sygnałów taktujących bloki peryferyjne, a także możliwość doboru częstotliwości tych sygnałów pobieranego prądu jest zależne od częstotliwości przełączania tranzystorów), że projektant ma duży wpływ na sposób wykorzystania w tworzonej aplikacji wewnętrznych bloków peryferyjnych i w wyniku tego na pobór mocy przez mikrokontroler podczas pracy.

Ograniczenie poboru mocy w mikrokontrolerach STM32L uzyskano także dzięki możliwości różnicowania wartości napięcia zasilającego rdzeń w zależności od wykonywanego zadania, co wiąże się także z maksymalną częstotliwością taktowania CPU. Pozwala to na przykład gromadzić dane za pomocą przetwornika A/C z rdzeniem zasilanym napięciem 1,2 V, taktowanym sygnałem zegarowym o częstotliwości 1 MHz i następnie – po przełączeniu napięcia zasilającego rdzeń na 1,8 V, zwiększeniu napięcia zasilającego rdzeń i włączeniu taktowania interfejsu USB – wysłanie w krótkim czasie niezbędnych danych do współpracującego komputera. Zawartość pamięci programu jest z chro-



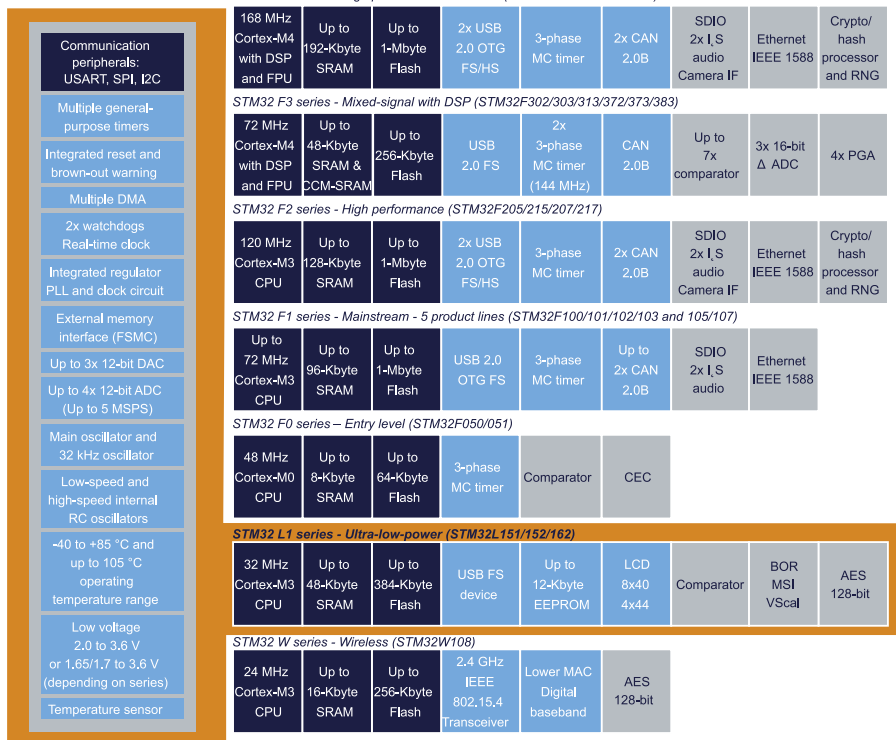
Rysunek 2. Schemat elektryczny toru nadawczo-odbiorczego na układzie SPIRIT1

niona za pomocą bloków sprzętowych MPU (*Memory Protection Unit* – mechanizm przydatny przy współdzieleniu pamięci przez różne zadania realizowane przez CPU) oraz ECC (*Error Correction Code* – chroni mikrokontroler przed wykonywaniem błędnych kodów w przypadku uszkodzenia Flash). Działanie mechanizmów ECC wspiera wysoką trwałość pamięci Flash, która według danych producenta może być kasowana aż 10000 razy. Standardowym wyposażeniem mikrokontrolerów STM32L jest także pamięć EEPROM o pojemności 4 kB, której zawartość także chroniona za pomocą bloku ECC. Żywotność tej pamięci producent określa na 300000 cykli kasowanie/zapis każdego 128-bitowego bloku.

Pomocne dla programistów piszących „energooszczędne” programy dla STM32L są specyficzne bloki peryferyjne, różniące się od stosowanych w klasycznych wersjach STM32:

- 12-bitowy przetwornik A/C potrafiący funkcjonować bez konieczności interwencji CPU, samoczynnie obsługujący tryb pomiaru *burst*,
- wybudzający rdzeń interfejs USART z mechanizmem ochrony danych – bit wybudzający CPU nie jest tracony podczas transmisji,
- komparatory analogowe, pozostające w stanie aktywności we wszystkich trybach oszczędzania energii – można je wykorzystać do „budzenia” mikrokontrolera w chwili zmiany wartości monitorowanego napięcia,
- samodzielny sterownik LCD (wyłącznie w STM32L152) zintegrowany z generatorem napięcia polaryzującego sterowaną matrycę LCD o wymiarach do 8×40 segmentów,
- zegar RTC zaprojektowany w sposób sprzeczny ze współczesnymi teoriami obowiązującymi w projektowaniu rozdzielanych systemów cyfrowych, dzięki czemu pobiera podczas pracy poniżej 1 mA.

W skład standardowego wyposażenia mikrokontrolerów STM32L wchodzi – w zależności od typu - sześć lub osiem timerów, po dwa lub trzy interfejsy SPI i I<sup>2</sup>C, trzy lub pięć USART-ów, jeden kanał USB *device*, dwa komparatory analogowe, 12-bitowy przetwornik A/C (od 16 do 40 multipleksowanych kanałów wejściowych), dwa 12-bitowe przetworniki C/A z wyjściami napięciowymi, a także interfejsy umożliwiające sterowanie segmentowymi LCD – te ostatnie są dostępne wyłącznie w mikrokontrolerach STM32L152 oraz STM32L162. Mikrokontrolery STM32L162 wyposażono dodatkowo w koprocesor kryptograficzny realizujący algorytm AES128 w trybach ECB (*Electronic CodeBook*), CBC (*Cypher Block Chaining*) oraz CTR (*Counter Mode*).



Rysunek 3. Podstawowe wyposażenie mikrokontrolerów z rodzin STM32F/L/W

Producent zadbał o kompatybilność rozmieszczenia wyprowadzeń i większości możliwości funkcjonalnych bloków peryferyjnych mikrokontrolerów STM32L z klasycznymi STM32, montowanymi w takich samych obudowach (STM32L są oferowane w: LQFP/VFQFN48, LQFP/BGA64 i LQFP/BGA100, LQFP144 oraz BGA132), dzięki czemu konstruktorzy mogą dostosować wydajność obliczeniową i pobór mocy przez mikrokontroler do wymogów aplikacji bez konieczności modyfikacji płytki drukowanej.

Niebagatelną pomocą dla programistów tworzących aplikacje dla mikrokontrolerów STM32L jest duża liczba predefiniowanych trybów oszczędzania energii, które powodują pewne ograniczenia wydajności lub funkcjonalności mikrokontrolera, pozwalając w zamian ograniczyć pobór energii. W każdym z wymienionych przypadków programista tworzący aplikację musi mieć świadomość możliwości tkwiących w mechanizmach oszczędzania energii „zaszytych” w STM32L, ale – zapewne – w niedługim czasie pojawią się narzędzia programistyczne wspomagające pisanie aplikacji na platformy energooszczędne, które wskażą programiście sposoby zoptymalizowania energetycznego pisanego programu.

Najnowsze w rodzinie w rodzinie STM32L mikrokontrolery Value Line oznaczone symbolem STM32L100. Są dostępne w obudowach QFN48 oraz LQFP64. Pojemność wbudowanej pamięci Flash wynosi 32/64/128 kB (w zależności od typu), a pamięci RAM (odpowiednio): 4/8/10 kB. Standardowym wyposażeniem tych mikrokontrolerów jest wbudowany blok MPU

(*Memory Protection Unit*), 8 interfejsów komunikacyjnych: USB2.0, 3×USART, 2×SPI, 2×I<sup>2</sup>C, łącznie 10 timerów, 12-bitowe przetworniki A/C i C/A, komparatory analogowe o zminimalizowanym poborze mocy, a także kontroler segmentowych wyświetlaczy LCD (o organizacji 4×16, 4×32 lub 8×28).

Zakres dopuszczalnych napięć zasilających mikrokontrolery Value Line jest nieco węższy niż dotychczas produkowanych STM32L i wynosi 1,8...3,6 VDC (vs 1,65...3,6 VDC), podobnie jest zakresem dopuszczalnych temperatur otoczenia podczas pracy: -40...+85°C (vs -40...+105°C).

Producent zrezygnował z wyposażania nowych mikrokontrolerów w niektóre wyrafinowane bloki peryferyjne znane z „klasycznych” STM32L – jak choćby koprocesor kryptograficzny, czy wewnętrzny czujnik temperatury, a linie GPIO pozbawiono interfejsów umożliwiających bezpośrednią implementację na nich nastawników pojemnościowych. Nowe mikrokontrolery nie mają ponadto indywidualnego znacznika ID, zmniejszono także pojemność zestawu rejestrów Backup-RAM z 80 do 20 bajtów. Uproszczenia nie odbijają się negatywnie na funkcjonalności mikrokontrolerów, których podstawowym obszarem aplikacyjnym są tanie urządzenia zasilane bateryjnie, zwłaszcza że obsługują one aż 7 trybów oszczędzania energii.

Kolejnym uproszczeniem (wynikającym z prostszych – czyli tańszych – testów) zastosowanym w STM32L Value Line jest mniejsza, niż miało to miejsce w przypadku „klasycznych” STM32L, dokładność i stabilność częstotliwości generatorów taktujące HSI i MSI (w Value Line ±10%). Producent

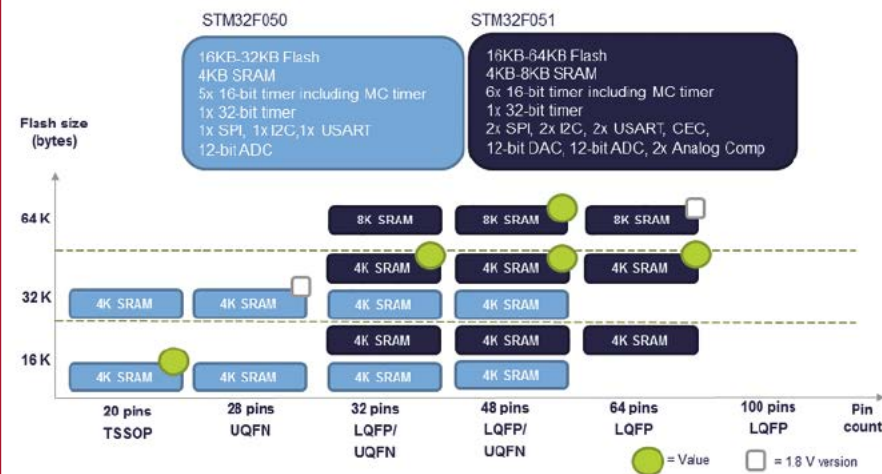
**Alternatywa dla aplikacji niskocmocowych**

W ofercie STMicroelectronics jest dostępna rodzina mikrokontrolerów z rdzeniem Cortex-M0, które są pozycjonowane przez producenta jako tanie rozwiązanie *low-power*. Mikrokontrolery STM32F0 są wyposażone w rdzeń przystosowany do taktowania sygnałem zegarowym o częstotliwości do 48 MHz, przy której osiąga wydajność ok. 38 DMIPS. W skład standardowego wyposażenia mikrokontrolerów STM32F0 wchodzi m.in.: 12-bitowe przetworniki A/C i C/A, szybkie linie GPIO z możliwością obsługi nastawników pojemnościowych (także suwaków i „obrotowych” – łącznie do 18 pól czujnikowych) i sprzętowy kontroler PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). W zależności od typu mikrokontrolera, użytkownik ma do dyspozycji od 16 do 64 kB Flash, 4 lub 8 kB SRAM i obudowy o liczbie pinów od 20 (TSSOP20), przez 32 (UFQFPN32 i LQFP32) i 48 (LQFP48), aż do 64 (LQFP64). Standardowym wyposażeniem rodziny STM32F0 jest ponadto 5-kanałowy kontroler DMA, szybki – do 1 Mb/s – interfejs I<sup>2</sup>C, interfejs SPI z obsługą CEC-HDMI i elastycznie ustawianą długością ramki danych (od 4 do 16 bitów @18 Mb/s), szybki USART (do 6 Mb/s), programowalne 16-/32-bitowe timery z możliwością generacji 3-fazowego przebiegu PWM i 17 liniami capture/compare, a także wygodny w obsłudze wbudowany RTC z kalendarzem zliczającym w kodzie BCD.

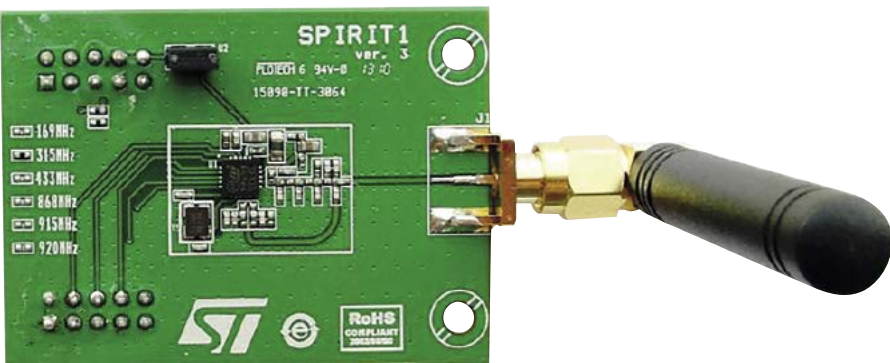
Mikrokontrolery STM32F0 wyposażono w interfejs do programowania i debugowania o nazwie SWD, który występuje także w starszych mikrokontrolerach STM32, nie wbudowano w nie natomiast interfejsu JTAG. Zastosowany w mikrokontrolerach STM32F0 blok wspomagający debugowanie jest rozszerzoną wersją standardowego rozwiązania firmy ARM, dzięki czemu m.in. programista może zarządzać sygnałami zegarowymi i przypisaniami funkcjonalnymi linii GPIO czy testować pracę mikrokontrolera w trybie obniżonego poboru mocy.

Producent dużo uwagi poświęcił na zapewnienie bezpieczeństwa aplikacji realizowanych na mikrokontrolerach STM32F0, w których pracują mikrokontrolery STM32F0, co przejawia się m.in. wyposażeniem pamięci SRAM w sprzętowy kontroler parzystości, kontroler CRC dla pamięci Flash, dwa watchdogi i system monitorowania poprawności taktowania z automatycznym przełączeniem na wewnętrzne źródło sygnału zegarowego. Prezentowane mikrokontrolery wyposażono także w rejestry z niepowtarzalnymi 96-bitowymi numerami ID, za pomocą których można identyfikować urządzenia z wbudowanymi mikrokontrolerami.

Nowością w rodzinie STM32F0 są mikrokontrolery ValueLine (STM32F03x), które uproszczone minimalizując ich cenę. Zastosowane uproszczenia nie są dotkliwe dla konstruktorów: nowe mikrokontrolery wyposażono bowiem we wszystkie podstawowe peryferia komunikacyjne (w zależności od typu: 1 lub 2 x SPI/I<sup>2</sup>C/UART), szybki przetwornik A/C (12-bitowy, 12 lub 18 kanałów, częstotliwość próbkowania do 1 MSps) i spore zasoby pamięci Flash/SRAM. Redukcji nie podległ także blok sprzętowego CRC, który może być wykorzystywany do kontroli poprawności zawartości pamięci Flash, konstruktorzy układów zachowali także w nowych mikrokontrolerach 5-kanałowy sterownik DMA oraz kalibrowalny czujnik temperatury. Mikrokontrolery Value Line są oferowane w obudowach TSSOP20 oraz LQFP z 32/48 lub 64 pinami, wszystkie obecnie oferowane modele mogą pracować z otoczeniem o temperaturze od -40 do +85°C.



Na rysunku powyżej przedstawiono zestawienie wybranych cech mikrokontrolerów STM32F0.



Fotografia 4. Wygląd zestawu uruchomieniowego STEVAL-IKR001VxD z układem SPIRIT1

prezentowanych mikrokontrolerów ograniczył także dopuszczalną katalogowo liczbę kasowań pamięci Flash (z 10000 razy do 1000 razy), a także gwarantowana jej trwałość (z 30 lat @+85°C do 20 lat @+85°C). Podobne – katalogowe! – ograniczenie dotknęło pamięci EEPROM, której zawartość w mikrokontrolerach STM32L Value Line może być modyfikowana do 100000 razy (zamiast 300000 dopuszczonych w STM32L).

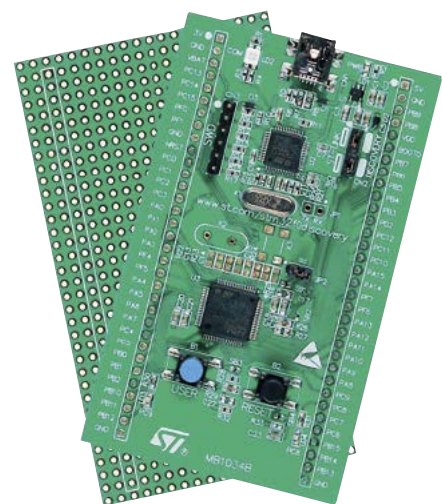
Poważną zaletą mikrokontrolerów STM32L Value Line jest ich fizyczna i logiczna zgodność z mikrokontrolerami STM32L w takich samych obudowach, co w wielu przypadkach pozwala zmniejszyć koszt realizacji aplikacji bez konieczności przebudowy płytki drukowanej lub innych elementów sprzętowych urządzenia.

Żeby ułatwić konstruktorom rozpoczęcie własnych prac ewaluacyjnych z transceiverami SPIRIT1, producent opracował i produkuje zestawy startowe o nazwie STEVAL-IKR001VxD – **fotografia 4**, które pracują w paśmie radiowym 868 MHz, pozwalając na weryfikację praktycznych możliwości transceiverów.

Także dla użytkowników mikrokontrolerów producent oferuje tanie narzędzia, spośród których dużą popularnością cieszą się zestawy z serii DISCOVERY (jak na przykład STM32F0DISCOVERY – **fotografia 5**, dostępnych w dwóch wersjach: z mikrokontrolerem STM32F05x i STM32F03x).

Na koniec warto wspomnieć, że standardowe wersje układów SPIRIT1 mogą pracować w zakresie temperatur otoczenia od -40 do +85°C, spełniają one także wymagania norm i zaleceń Wireless M-BUS, EN 300 220, FCC CFR47 15 (15.205, 15.209, 15.231, 15.247, 15.249), jest także zgodny z ARIB STD T-67, T93, T-108.

Andrzej Gawryluk



Fotografia 5. Wygląd zestawu STM32F0DISCOVERY, który jest dostępny w dwóch wersjach: z mikrokontrolerem STM32F05x lub STM32F03x