



Moduły Wi-Fi dla IoT

Internet Rzeczy (Internet of Things, IoT) przestał już być mrzonką przyszłości i narzędziem kreowania wizji nowoczesności, stosowanym przez futurystów. Dziś IoT stanowi mocno rozwinięty obszar elektroniki, obejmujący zarówno konkretne urządzenia końcowe (np. sprzęt AGD i RTV, urządzenia mobilne i ubieralne, czy też niektóre przenośne urządzenia medyczne), jak i dedykowane standardy komunikacji bezprzewodowej (takie jak coraz popularniejsze łącza LoRA oraz SigFox). W czasach zdominowanych przez urządzenia oferujące funkcjonalność opartą na transmisji danych do/z Internetu, naturalną konsekwencją rozwoju jest udostępnianie użytkownikom coraz szerszej oferty gotowych modułów radiowych. W tym artykule przyjrzymy się ofertom największych producentów modułów Wi-Fi, zaprezentujemy też interesujące przykłady wyjątkowo ciekawych rozwiązań.

Wi-Fi – schyłek czy rozkwit?

Trafnym przykładem grupy urządzeń wpisujących się doskonale w nurt IoT są wszelkiego rodzaju rozproszone sieci sensoryczne i telemetryczne. Przykładową, praktyczną realizacją takiej idei okazują się zdalnie odczytywane liczniki mediów, instalowane w domach

wielorodzinnych – ta sama zasada dotyczy jednak, także wszelkich innych urządzeń telemetrycznych. Upowszechnienie systemów rozproszonych i idący w ślad za nim gwałtowny wzrost liczby punktów pomiarowych dobitnie pokazał, jak wiele przeszkód logistycznych, technologicznych i finansowych muszą pokonać twórcy takich infrastruktur – podstawowym problemem do rozwiązania był wybór standardu, w jakim liczniki mają komunikować się z bazą. Zastosowanie łącza GSM wymaga ponoszenia stałych nakładów finansowych, związanych z utrzymaniem abonamentu na karty SIM stosowane w każdym urządzeniu. Użycie autorskich połączeń bezprzewodowych w paśmie ISM, także wiązałoby się z koniecznością inwestowania w rozbudowaną infrastrukturę, co nie sprawdziłoby się w przypadku dużej liczby punktów pomiarowych. Duże nadzieje wiąże się obecnie ze wspomnianymi wcześniej łączami LoRA i SigFox, w ich przypadku konieczny jest jednak dostęp (płatny) do istniejącej infrastruktury sieciowej.

Czy w świetle zdobywających popularność, nowych standardów niskomocowej komunikacji bezprzewodowej dalekiego zasięgu można uznać, że pocziwe Wi-Fi odchodzi do lamusa? Zdecydowana większość urządzeń IoT nie wymaga przecież wysokiej przepustowości, przesyłając jedynie niewielkie ilości danych pomiarowych lub sterujących. Okazuje się, że klasyczne połączenia Wi-Fi nie tylko nie tracą na znaczeniu, ale wręcz przeciwnie, są nadal intensywnie rozwijane i, co ważne, wcale nie pozostają domeną komputerów oraz „dużych” urządzeń mobilnych. Można bez większej przesady stwierdzić, że niemal wszystkie urządzenia IoT do zastosowań konsumenckich,

a także liczne urządzenia przemysłowe i medyczne, jeszcze przez wiele lat będą opierały swoje funkcje komunikacyjne na łączach Wi-Fi. Co zatem przemawia za stosowaniem sieci WLAN w urządzeniach „niekomputerowych”?

- Kompatybilność** – urządzenia IoT wyposażone w moduły Wi-Fi mogą bez przeszkód komunikować się z istniejącymi sieciami, dostępnymi zarówno w domach prywatnych, jak i hotelach, miejscach użyteczności publicznej oraz przedsiębiorstwach;
- Duża szybkość transmisji** – wszystkie moduły Wi-Fi oferują znacznie wyższe prędkości transferu danych, niż ma to miejsce w przypadku nowoczesnych standardów dedykowanych dla IoT (np. LoRA). Co więcej, rośnie liczba modułów obsługujących superszybkie łącza Wi-Fi dual-band, które oprócz „klasycznej” częstotliwości nośnej 2,4 GHz mogą z powodzeniem pracować także w znacznie szybszym standardzie 5 GHz;
- Brak dodatkowych opłat licencyjnych/abonamentowych** – dostęp do dowolnej sieci Wi-Fi pozwala na łączenie z zewnętrznymi serwerami aplikacyjnymi bez konieczności ponoszenia dodatkowych kosztów, jak ma to miejsce w przypadku infrastruktury utrzymywanej przez operatorów – dotyczy to zarówno sieci GSM, jak i LoRA czy SigFox;
- Wysoki poziom bezpieczeństwa** – niemal wszystkie dostępne obecnie na rynku moduły Wi-Fi obsługują zaawansowane protokoły transmisji i funkcje zabezpieczeń, co zapewnia możliwość bezpiecznej transmisji danych przy minimalizacji ryzyka uzyskania dostępu do danych przez osoby niepowołane;
- Łatwość implementacji na poziomie hardware/firmware** – moduły Wi-Fi są projektowane w sposób maksymalnie ułatwiający konstruktorom urządzeń końcowych implementację produktu zarówno na poziomie projektu PCB, jak i oprogramowania wbudowanego;
- Szeroka oferta modułów** – gotowe transceivery radiowe kompatybilne z międzynarodowymi standardami Wi-Fi oferowane są przez wielu producentów, którzy nierzadko posiadają wieloletnie doświadczenie i zaplecze badawczo-rozwojowe oraz produkcyjne w zakresie produkcji elementarnych komponentów pasywnych (tak, jak w przypadku firmy Murata) bądź układów scalonych (Silicon Laboratories, Espressif, Intel czy też Microchip), co zwiększa ich konkurencyjność i stabilność produkcji, w pewnym stopniu niezależnie też od zewnętrznych dostaw. Sytuacja taka jest korzystna dla końcowych odbiorców, którzy mogą polegać na dostawach modułów w znacznie większym stopniu, niż ma to miejsce w przypadku niektórych niskobudżetowych linii produktów, znikających z rynku w niedługim czasie od premiery.

Moduły Wi-Fi – technologie montażu

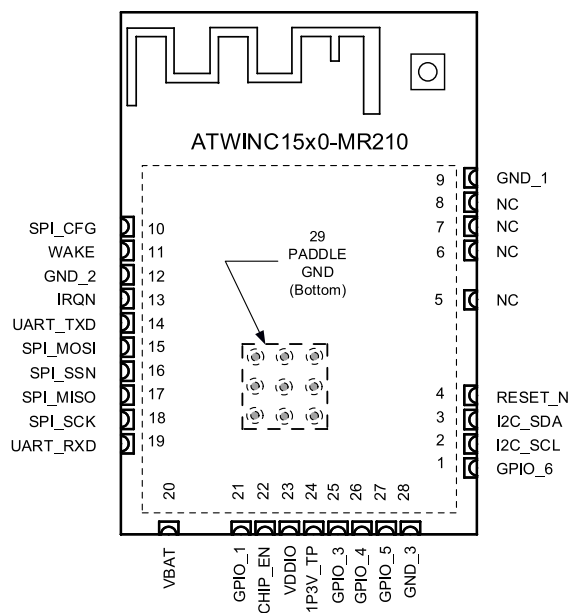
Wśród obecnych na rynku modułów Wi-Fi można wyodrębnić cztery grupy, różniące się rodzajem konstrukcji i sposobem montażu na płycie drukowanej docelowego urządzenia (w artykule celowo pomijamy moduły Wi-Fi w postaci gotowych urządzeń, stosowane powszechnie m.in. w automatyce przemysłowej i teledystryce).

Moduły płytkowe z padami krawędziowymi

Najobszerniejsza grupa rozwiązań, zapewniająca najlepszy możliwy balans pomiędzy rozmiarami i ceną modułu a łatwością montażu na płytach PCB o małej i średniej gęstości upakowania elementów. Pady lutownicze są wykonane w postaci półokrągłych, metalizowanych otworów, co zapewnia dobre warunki adhezji dla cyny i jednocześnie ułatwia montaż ręczny (na marginesie warto dodać, że wiele modułów tego typu posiada też dodatkowe pady masy, umieszczone na spodniej stronie i możliwe do wlotowania jedynie w procesie rozplwowym). Przykładem tego typu modułu jest ATWINC15x0-MR210xB firmy Microchip (**fotografia 1, rysunek 1**), dostępny w czterech wersjach różniących się rozmiarem pamięci Flash,



Fotografia 1. Wygląd modułu z serii ATWINC15x0-MR210xB (<https://bit.ly/3dPPLeP>)



Rysunek 1. Rozmieszczenie padów montażowych modułu ATWINC15x0-MR210xB

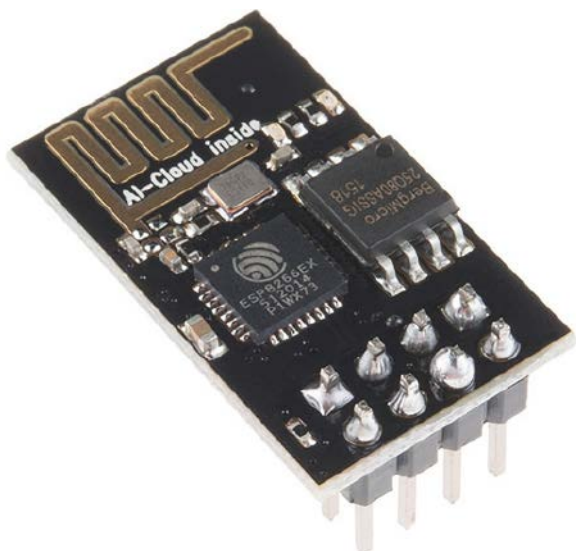
sposobem wyprowadzenia linii antenowej (złącze u.FL bądź antena mikropaskowa) oraz zakresem zapewnianej przez producenta certyfikacji. Większość wyższej klasy modułów posiada fabrycznie wbudowaną, niskoprofilową pokrywę ekranującą, zapewniającą niezbędne ekranowanie części cyfrowej (mikrokontroler, pamięć, układy taktowania) oraz radiowej.

Moduły płytkowe z padami i złączami THT

Ta klasa modułów jest najczęściej wybierana przez amatorów oraz inżynierów pracujących nad prototypem urządzenia, a to z uwagi na niebywałą wprost łatwość podłączenia za pomocą standardowych złącz goldpin i przewodów z wtykami typu BLS. Pierwszymi modułami tego typu, które zdobyły niesłabnącą do dziś popularność w szerokich kręgach elektroników, były niedrogie płytki oparte na układzie ESP8266 firmy Espressif – proste podłączenie w postaci złącza goldpin 2x4 (raster 2,54 mm), zapewniającego dostęp do linii zasilania, RESET oraz TX i RX interfejsu UART, doczekało się nawet slotów zaprojektowanych specjalnie dla ESP8266 w konwerterach USB-UART oraz modułach rozszerzeń. Przykładowy moduł z opisywanej serii został pokazany na **fotografii 2**.

Moduły płytkowe z padami powierzchniowymi

Kolejna grupa modułów o konstrukcji opartej na niewielkiej PCB. Od pierwszej z opisanych grup różni się rodzajem padów – w tym



Fotografia 2. Moduł Wi-Fi z układem ESP8266EX – przykład modułu płytkowego ze złączem goldpin 2,54 mm (<https://bit.ly/3eqrWcC>)

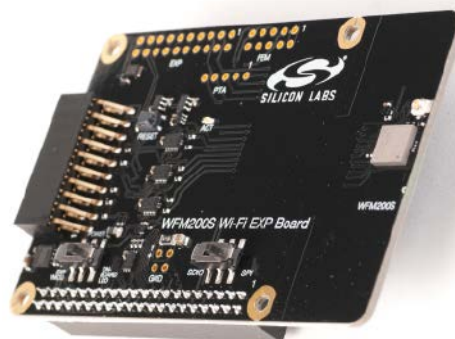
przypadku wszystkie pola lutownicze znajdują się na spodniej stronie płytki, nie zaś na jej krawędziach. Z tego względu nie jest możliwy ręczny montaż za pomocą kolby lutowniczej, zalecane jest zastosowanie procesu lutowania rozplwowego, najlepiej z użyciem automatycznie sterowanego pieca z odpowiednio ustawionym profilem termicznym (choć przy odpowiednim poziomie wprawy możliwe jest użycie ręcznej stacji typu hot-air lub IR). Niewielki rozstaw padów wymusza stosowanie wyższej klasy obwodu drukowanego, zwykle minimum 4-warstwowego, co odplaca się znaczną (zwykle 2..3-krotną) redukcją powierzchni PCB, zajmowanej przez moduł (w porównaniu do płytek z padami krawędziowymi). Do klasycznych przykładów tego typu rozwiązań należą produkty znanej marki u-blox, np. moduły Wi-Fi z rodziny NINA-W13 (fotografia 3).

Moduły w obudowach typu SiP

Najbardziej wymagające pod względem zastosowanego procesu technologicznego moduły Wi-Fi dostępne obecnie na rynku umieszczone są w obudowach nie odróżniających się na pierwszy rzut oka od monolitycznych układów SMD. Ta klasa produktów należy do rozwiązań typu SiP (System-in-Package). Wewnątrz niewielkiej puszkki z wysokotemperaturowego tworzywa znajdują się jednak, oprócz układu ASIC, pełniącego rolę kontrolera cyfrowego oraz front-endu RF, także niezbędne elementy pasywne toru radiowego, a nawet... mikroskopijna antena i oscylator kwarcowy. Przykładem może być subminiaturowy (zaledwie 6,5×6,5×1,3 mm!) moduł Wi-Fi marki Silicon Labs o oznaczeniu WFM200S. Jego wielkość dobrze obrazuje fotografia 4, pokazująca płytkę uruchomieniową z zamontowanym modułem.



Fotografia 3. Moduł Wi-Fi z serii NINA-W13 w obudowie do montażu SMT z padami powierzchniowymi (<https://bit.ly/2QuqApj>)



Fotografia 4. Widok modułu Wi-Fi klasy SiP typu WFM200S zamontowany na płytce uruchomieniowej (<https://bit.ly/3nlhWW5>)

Technologie antenowe w modułach Wi-Fi

Podobnie, jak w przypadku ogólnej konstrukcji i sposobu montażu modułów radiowych przeznaczonych do aplikacji IoT, także w przypadku samej anteny, elementu kluczowego dla bilansu łącza, dostępne są bardzo zróżnicowane rozwiązania:

- **Anteny mikropaskowe** to zdecydowanie najpopularniejsza odmiana anten we współczesnej technice mikrofalowej. Konstrukcja anteny mikropaskowej – jakkolwiek niebanalna pod względem projektowym – sprawia, że element ten jest niezwykle prosty i tani w produkcji, a także (co również ważne) efektywny pod względem zysku i kierunkowości. Antena typu *microstrip* to nic innego, jak odpowiednio uformowana ścieżka na odsłoniętym z meandri brzegu płytki drukowanej. Jak to zwykle bywa, diabeł tkwi w szczegółach – kluczowe znaczenie mają nie tylko kształt i wymiary zastosowanego meandra, ale także rodzaj, jakość i grubość podłoża. Odpowiednio zaprojektowana antena mikropaskowa to klucz do sukcesu, ale wiele zależy także od implementacji w docelowym urządzeniu – moduł powinien być zamontowany zgodnie z wytycznymi producenta pod względem zachowania niezbędnych odstępów i/lub wycięć w laminacie PCB, na której zamontowany jest moduł. Spełnienie wymogów noty aplikacyjnej pozwala nie tylko maksymalnie wykorzystać możliwości modułu Wi-Fi, ale także zapewnić zgodność z warunkami testów, jakim poddany był moduł podczas procesu uzyskiwania przez producenta certyfikatów zgodności z normami radiowymi/EMC. Przykłady modułów z antenami mikropaskowymi zostały pokazane już wcześniej na fotografiach 1 i 2.
- **Anteny SMD** takie, jak zastosowana w module z fotografii 5, stanowią alternatywę dla wersji mikropaskowych. Różnią się od swoich „ścieżkowych” odmian zarówno zyskiem, jak i charakterystyką kierunkowości, choć w większości przypadków pozwalają także nieco zmniejszyć wymiary zewnętrzne płytki



Fotografia 5. Moduł ESP-07 jako przykład produktu wyposażonego w antenę SMD oraz gniazdo u.FL (widoczne dwufunkcyjne pady lutownicze, zarówno wspierające montaż SMT, jak i zapewniające możliwość wlutowania goldpinów w rastrze 2 mm)



Fotografia 6. Moduł Wi-Fi z serii NINA-W13 w wersji z anteną blaszkową typu PIFA (<https://bit.ly/2QuqApj>)

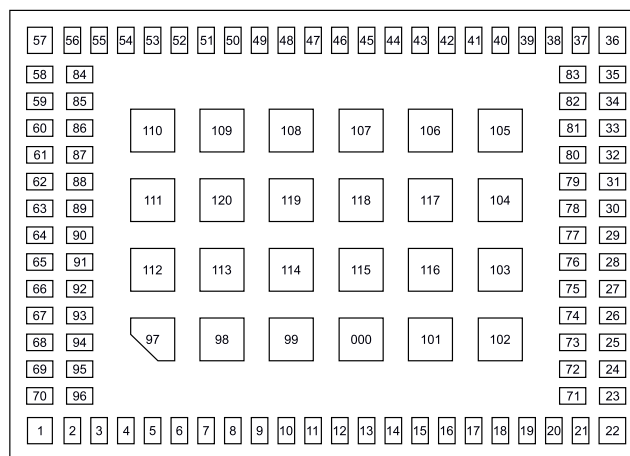
samego modułu (w porównaniu do wersji tego samego produktu, wyposażonych w anteny mikropaskowe).

- **Anteny blaszkowe typu PIFA** (planar inverted-F antenna) są znane przede wszystkim z markowych modułów firmy u-blox, w tym wspomnianej wcześniej serii NINA-W13 (a dokładniej modelu NINA-W132 – **fotografia 6**). Zaletą anteny PIFA są niewielkie wymiary, co przekłada się na kompaktową formę całego modułu.
- **Gniazda antenowe** – wiele modułów występuje w wersjach bez wbudowanej anteny, za to z zamontowanym fabrycznie, miniaturowym gniazdem koncentrycznym typu u.FL. Rozwiązanie takie jest stosowane wszędzie tam, gdzie wymagania aplikacji uniemożliwiają lub wysoce utrudniają użycie wewnętrznej anteny – najlepszym przykładem mogą być urządzenia montowane w metalowych obudowach. Szeroka oferta dostępnych na rynku anten zewnętrznych z przewodem zakończonym wtykiem u.FL umożliwia niemal swobodny dobór odpowiedniego komponentu. W wielu przypadkach konstrukcja modułu Wi-Fi umożliwia skorzystanie z anteny wbudowanej lub zewnętrznej, podłączonej przewodem koncentrycznym – przykładem takiego hybrydowego rozwiązania jest pokazany na fotografii 5 moduł ESP-07.
- **Linie antenowe wyprowadzone na pady lutownicze** – liczne moduły Wi-Fi (i nie tylko) występują w wersji, umożliwiającej podłączenie zewnętrznej anteny za pośrednictwem jednego z padów lutowniczych. Rozwiązanie takie znakomicie ułatwia wygodne wyprowadzenie dowolnego złącza (zwykle u.FL lub SMA) w dogodnym miejscu PCB (np. na krawędzi, współpracującej mechanicznie z tylnym panelem urządzenia). Podczas prowadzenia ścieżki RF w projekcie PCB należy jednak pamiętać o wszystkich podstawowych zasadach projektowania, stosowanych do obwodów dla szybkich sygnałów – konieczna jest ścisła kontrola impedancji na całym przebiegu ścieżki, zapewnienie odpowiedniego ekranowania, sposobu zmiany kierunku biegu ścieżki, itd.



Fotografia 7. Wygląd zewnętrzny modułu Murata 1YM

<TOP VIEW>



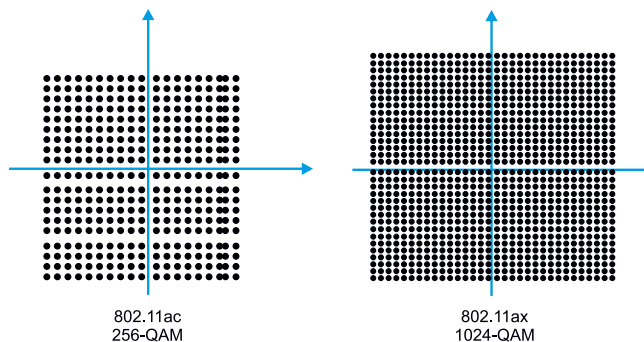
Rysunek 2. Rozmieszczenie padów lutowniczych modułu 1YM produkcji Murata z zaznaczonymi wyprowadzeniami 59 i 69 służącymi do podłączenia dwóch zewnętrznych anten wspieranych przez system 2x2 MIMO

Przykładem może być pokazany na **fotografii 7** moduł z serii 1YM marki Murata. Dwa wyprowadzenia o numerach 59 i 69 (**rysunek 2**) pozwalają na podłączenie zewnętrznych anten, obsługiwanych jednocześnie dzięki funkcjonalności 2x2 MIMO (multi input, multi output).

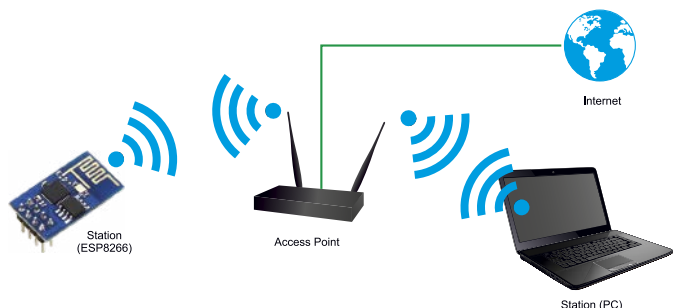
802.11n/ac/ax, czyli o standardach sieci WLAN

Przeglądając oferty producentów nowoczesnych modułów Wi-Fi można natknąć się na istne morze oznaczeń i standardów. Warto wiedzieć, że wprowadzane sukcesywnie generacje Wi-Fi oferują nie tylko coraz szersze pasmo częstotliwości, ale także korzystają z coraz bardziej zaawansowanych trybów transmisji danych, już na poziomie samej modulacji. W **tabeli 1** pokazano zestawienie trzech wiodących generacji Wi-Fi, wraz ze wskazaniem zakresów osiągalnych (teoretycznie) przepustowości. Zastosowanie coraz to bardziej rozbudowanych schematów kwadraturowej modulacji amplitudowo-fazowej QAM (**rysunek 3**) umożliwia znacznie gęstsze upakowanie danych poprzez podział na symbole o wyższej liczbie reprezentowanych

Standard IEEE	Częstotliwość nośna	Maksymalna przepustowość danych [Mbps]	Modulacja	Rok wprowadzenia standardu
Wi-Fi 6 (802.11ax)	2,4/5 GHz	600...9608	1024-QAM	2019
Wi-Fi 5 (802.11ac)	5 GHz	433...6933	256-QAM	2014
Wi-Fi 4 (802.11n)	2,4/5 GHz	72...600	64-QAM	2009



Rysunek 3. Porównanie diagramów konstelacji dla modulacji 256-QAM i 1024-QAM



Rysunek 4. Schemat przykładowej aplikacji modułu Wi-Fi w trybie STA

przez nie bitów – w ciągu zaledwie 10 lat pojedynczy symbol z 6 bitów (dla modulacji QAM-64) przeszedł do 10 bitów (QAM-1024), co samo w sobie oznacza aż 16-krotny wzrost gęstości danych w strumieniu, a należy pamiętać, że zmiana rodzaju modulacji to niejedyna droga do zwiększania prędkości przepływu danych w sieci Wi-Fi.

W zdecydowanej większości popularnych modułów Wi-Fi dostępne będą jednak nie najnowsze, superszybkie wersje standardu 802.11 (ac/ax), ale starsze, wolniejsze protokoły IEEE 802.11b/g, oferujące transfer maksymalny na poziomie (odpowiednio) 11 Mbps oraz 54 Mbps. Często spotykaną kombinacją jest 802.11b/g/n, zapewniająca w zupełności wystarczającą szybkość transferu danych dla niemal wszystkich klasycznych zastosowań IoT.

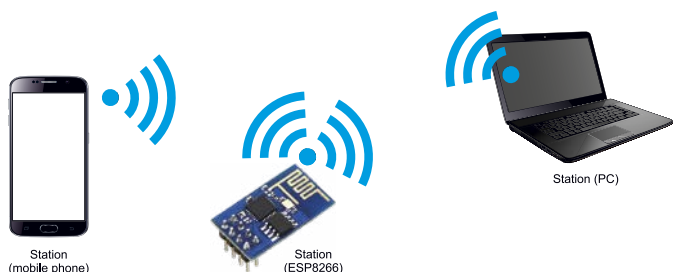
Tryby pracy modułów Wi-Fi

Kolejnym istotnym aspektem, na jaki należy zwrócić uwagę podczas wyboru modułu Wi-Fi dla aplikacji IoT, jest dostępność podstawowych trybów pracy:

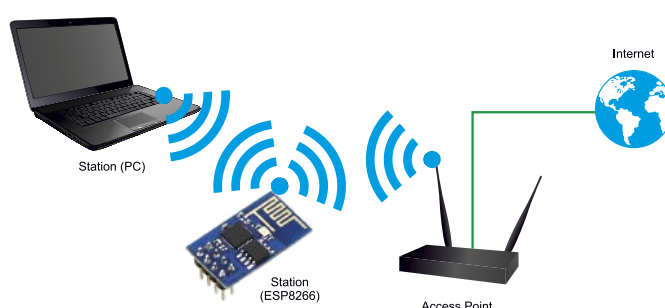
- STA,
- AP (SoftAP),
- STA + AP.

W trybie STA (station) moduł może łączyć się z istniejącą siecią Wi-Fi, tworzoną przez router bądź inny punkt dostępowy (**rysunek 4**). Moduł jest widziany przez sieć jako jedno z urządzeń końcowych, po włączeniu zasilania konieczne okazuje się zatem programowe skonfigurowanie parametrów dostępu (SSID, hasło sieci zewnętrznej) oraz odczekanie na przydzielenie adresu IP (moduły obsługują protokół DHCP, jednak zwykle możliwe jest też ustawienie stałego adresu). Ten tryb pracy jest zdecydowanie najczęściej wykorzystywany w klasycznych aplikacjach IoT, w których raz skonfigurowany moduł może dowolnie często łączyć się z serwerem aplikacyjnym w celu transmisji danych pomiarowych i odbioru komend sterujących lub informacji zwrotnych.

Tryb AP (często nazywany też SoftAP) pozwala na utworzenie przez moduł nowej sieci o zadanym SSID i hasle dostępowym (**rysunek 5**). Moduł pełni zatem rolę pełnoprawnego punktu dostępowego, do którego mogą być podłączone zewnętrzne urządzenia (stacje) – np. komputery i urządzenia mobilne. Oczywistym ograniczeniem jest liczba stacji podłączonych jednocześnie do access pointa – przykładowo, dla popularnych modułów z serii ESP32 liczba ta nie przekracza 8 urządzeń. Do cennych zastosowań trybu AP należy wstępna konfiguracja



Rysunek 5. Schemat przykładowej aplikacji modułu Wi-Fi w trybie AP



Rysunek 6. Schemat przykładowej aplikacji modułu Wi-Fi w trybie STA+AP

fabrycznie nowego urządzenia w miejscu instalacji, gdy prosty, sprzętowy interfejs użytkownika nie pozwala na wygodne wpisanie danych dostępowych do zewnętrznej sieci.

Tryb STA+AP umożliwia pracę modułu w sieciach typu mesh, w których każde urządzenie (węzeł) jest jednocześnie stacją i punktem dostępowym dla kolejnych urządzeń (**rysunek 6**). Tryb ten stosuje się rzadziej, daje on jednak sporą elastyczność w bardziej zaawansowanych aplikacjach, np. rozproszonych sieciach czujników czy też automatyce budynkowej.

Protokoły sieciowe

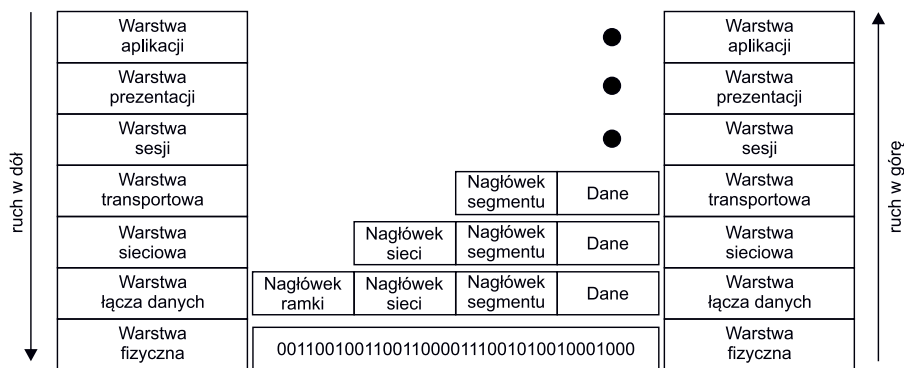
Kolejnym aspektem o pierwszorzędym znaczeniu dla projektantów i programistów urządzeń IoT jest wsparcie, jakie moduły Wi-Fi zapewniają dla najważniejszych protokołów sieciowych. Sama transmisja danych do/z Internetu to jeszcze zbyt mało – dopiero opakowanie danych aplikacyjnych odpowiednimi nagłówkami i ramkami pozwala na pełne wykorzystanie możliwości tych niewielkich płytek.

Protokoły warstwy aplikacyjnej

Istotną zaletą praktycznie wszystkich dostępnych na rynku modułów Wi-Fi jest silne wsparcie dla protokołów najwyższej warstwy modelu OSI – warstwy aplikacyjnej (**rysunek 7**). Oznacza to, że użytkownik nie musi martwić się o samodzielną implementację niuansów protokołu w oprogramowaniu wbudowanym, bowiem może ograniczyć się do użycia gotowych funkcji, za pomocą których przekaże tylko potrzebne dane (np. wyniki pomiarów, komunikaty bądź komendy sterujące, oczywiście wraz z nazwą domeny, adresem IP czy numerem portu) do modułu i odbierze z niego informacje zwrotne, otrzymane od serwera (bądź klienta, w zależności od aktualnego trybu pracy modułu).

- **HTTP** – podstawowy, choć niezabezpieczony w swojej podstawowej postaci, protokół transmisji plików hipertekstowych (głównie HTML), stosowany przede wszystkim (choć nie tylko) do obsługi ruchu pomiędzy klientami, a serwerami stron WWW.
- **HTTPS** – rozszerzenie protokołu HTTP, wykorzystujące szyfrowanie protokołem TLS (wcześniej SSL) w celu zabezpieczenia prywatności i integralności danych, przesyłanych dwukierunkowo pomiędzy serwerem, a klientem. Istotną zaletą wykorzystania TLS jest też możliwość uwierzytelnienia serwera, co ma ogromne znaczenie w aplikacjach wymagających wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Niektóre serwery WWW domyślnie wykorzystują protokół HTTPS do obsługi całego ruchu sieciowego kierowanego do/z serwera, nawet w przypadkach, które nie wymagają tego z punktu widzenia bezpieczeństwa danych.
- **FTP** – protokół dwukierunkowej transmisji plików pomiędzy serwerem plików, a klientem; w zastosowaniach IoT wykorzystywany m.in. do szybkiego składowania danych multimedialnych (obrazów i nagrań wideo) z kamer IP. Transfer plików jest też możliwy z użyciem protokołu SFTP, tj. poprzez połączenie SSH, wykorzystywane powszechnie w systemach linuksowych jako kanał dostępu administracyjnego (nie należy mylić SFTP z protokołem FTPS, będącym zabezpieczoną za pomocą TLS/SSL wersją klasycznego FTP).

- **POP3** – protokół wykorzystywany do odbioru wiadomości e-mail z serwerów pocztowych. Ograniczeniem, które skłoniło wielu dostawców usług pocztowych do odejścia od POP3, jest m.in. możliwość podłączenia tylko jednego klienta w danym momencie.
- **IMAP** – nowszy, elastyczniejszy, ale także bardziej złożony technologicznie protokół odbioru wiadomości e-mail, stosowany powszechnie m.in. przez serwery poczty Gmail. Eliminuje wiele niedogodności, z jakimi zmagali się twórcy aplikacji opartych na POP3.
- **SMTP** – protokół stosowany do wysyłania wiadomości e-mail, a dokładniej rzecz ujmując – komunikacji z zewnętrznym serwerem poczty wychodzącej. SMTP jest chętnie stosowany przez twórców urządzeń IoT do wysyłania automatycznych powiadomień e-mail o zdarzeniach alarmowych (np. w systemach zabezpieczeń) czy też okresowych raportów z pracy urządzenia.
- **DHCP** – protokół umożliwiający dynamiczne przydzielanie adresów IP nowym klientom, przyłączającym się do sieci lokalnej; jest to podstawowe narzędzie zarządzania połączeniami lokalnymi, wspierane przez niemal każde współczesne urządzenie sieciowe.
- **DNS** – zdecentralizowany (rozproszony) system nazw sieciowych, pozwalający na uzyskiwanie adresów IP według zapytań domenowych. Zastosowanie DNS jest jednak konieczne nie tylko w przypadku uzyskiwania dostępu do serwerów WWW poprzez adresy wpisywane przez użytkowników Internetu w przeglądarkach sieciowych. W powiązaniu z dynamicznymi systemami nazw domenowych (DDNS), użycie domen umożliwia odszukiwanie hostów, do których nie zostały przydzielone stałe adresy globalne (publiczne), co ma duże znaczenie dla wielu systemów IoT.



Rysunek 7. Schemat modelu OSI

Moduły Wi-Fi w ofercie czołowych producentów na rynku IoT

Uzbrojeni w podstawowe informacje o stosowanych w modułach Wi-Fi technologiach możemy przejść do skrótowego zaprezentowania oferty największych producentów modułów radiowych dla IoT. Zwracamy przy tym uwagę Czytelników na fakt, że w żadnym wypadku nie jest to lista wyczerpująca, wszak w dobie rozwoju IoT stale pojawiają się na rynku nowi gracze, którzy oferują kolejne wersje modułów o zróżnicowanych parametrach i funkcjonalnościach.

Espressif

Marka założona w 2008 roku w Szanghaju, obecnie posiadająca swoje przedstawicielstwa także w Singapurze, Indiach, Brazylii i Czechach. Ogromna popularność firmy wynika z komercyjnego sukcesu na niespotykaną wcześniej skalę, jaki osiągnął opracowany przez firmę układ ESP8266. Na bazie układu ASIC, łączącego AFE radiowe obsługujące protokoły 802.11 b/g/n i wyposażonego w 32-bitowy procesor Tensilica



Rysunek 8. Wygląd modułu Espressif ESP-WROOM-02D

L106 o taktowaniu maksymalnym 160 MHz, powstała obszerna seria modułów, produkowanych zarówno przez samego producenta, jak i markę AI-Thinker. Obecnie producent oferuje dwa moduły w wersjach różniących się rodzajem anteny: ESP-WROOM-02D (rysunek 8) z anteną mikropaskową oraz ESP-WROOM-02U z gniazdem u.FL – obydwie bazują na nowej wersji układu, oznaczonej ESP8266EX.

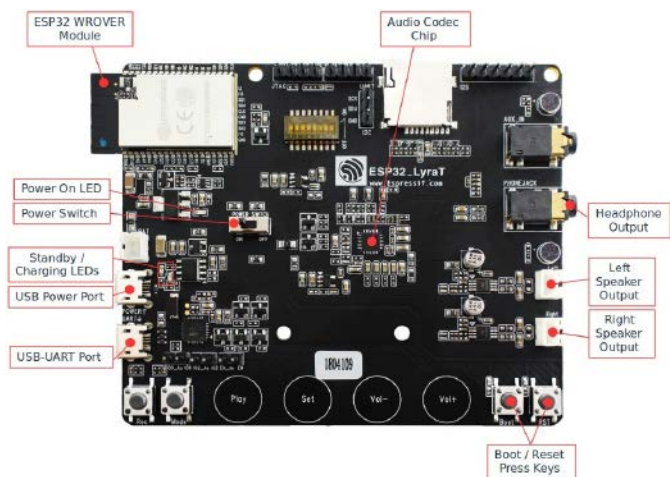
Najbardziej rozwiniętą serią produktów Espressif jest linia ESP32, korzystająca z pojedynczego lub podwójnego, 32-bitowego procesora Xtensa LX6 o taktowaniu od 80 do 240 MHz. Sztandarowy produkt z tej serii, moduł ESP32-WROVER-E oferuje nie tylko łączność Wi-Fi 802.11b/g/n (do 150 Mbps), ale także Bluetooth 4.2 i BLE. Płytką zawiera 4 MB pamięci Flash i 8 MB pamięci PSRAM, a co ciekawe, na pokładzie modułu znalazł się nawet... czujnik Halla. Podobnie, jak wiele innych współczesnych modułów Wi-Fi, także ten produkt oferuje dostęp do programowalnych linii GPIO, interfejsów UART, I²C, SDIO oraz I²S i TWAI, a nawet przetworników ADC/DAC, wyjść PWM oraz kanałów pojemnościowego kontrolera dotykowego. Co ważne, moduł silnie wspiera obsługę cyfrowego audio, co jest manifestowane w dostępności specjalnie do tego celu przeznaczonych zestawów ewaluacyjnych z serii LyraT (fotografia 8).

Do aplikacji IoT doskonale nadają się także moduły z serii ESP32-S2, zoptymalizowane pod kątem aplikacji niskomocowych i oferujące

Protokoły niższych warstw OSI

Wiedząc, że nowoczesne moduły Wi-Fi obsługują protokoły najwyższej warstwy modelu OSI, nietrudno dojść do wniosku, że powinny doskonale radzić sobie z protokołami położonymi niżej w hierarchii modelu warstwowego. Choć w większości aplikacje przydatne okażą się tak zaawansowane funkcje, jak wysyłka zapytań czy generowanie odpowiedzi HTTP(S) bądź FTP, warto pamiętać, że bezpośrednia obsługa niskopoziomych protokołów może oddać nieocenione zasługi w wielu bardziej złożonych zastosowaniach. Co ważne, moduły Wi-Fi dostępne obecnie na rynku posiadają osobne komendy do obsługi tych protokołów.

- **TCP** (*Transmission Control Protocol*) – najpowszechniejszy w Internecie protokół warstwy transportowej, na którym opiera się większość implementacji HTTP i innych protokołów najwyższego poziomu. Stąd też najczęściej mówi się o TCP/IP w celu podkreślenia niemal nieodłącznego powiązania TCP z protokołem internetowym (IP), należącym już jednak do warstwy sieciowej. Ogromną zaletą TCP jest wysoka niezawodność, wynikająca z m. in. konieczności potwierdzeń odbioru przesyłanych pakietów oraz pełnego wsparcia dla ponawiania uszkodzonych/zagubionych pakietów (detekcja błędów).
- **UDP** (*User Datagram Protocol*) – znacznie prostszy i w związku z tym, także bardziej zawodny protokół, którego konstrukcja nie gwarantuje prawidłowego dostarczenia pakietów danych do odbiorcy. Za cenę niższej odporności na błędy użytkownik zyskuje jednak znacznie wyższą przepustowość, związaną z mniejszym narzutem transmisyjnym niż w przypadku TCP. Stąd też protokół UDP dobrze sprawdza się w strumieniowaniu danych, które – jeśli dotrą do odbiorcy z okazjonalnymi uszkodzeniami – nie będą stanowiły istotnej przeszkody funkcjonalnej (np. strumieniowanie dźwięku).



Fotografia 8. Wygląd zestawu ewaluacyjnego audio LyraT V4.3, bazującego na module ESP32 WROVER (<https://bit.ly/3aBpTWM>)

szereg funkcji bezpieczeństwa (eFUSE, szyfrowanie pamięci Flash, secure boot czy też wsparcie dla algorytmów AES, SHA i RSA). Zdecydowanie najciekawszym członkiem tej linii produktów jest moduł ESP32-S2-MINI-1U o wymiarach zaledwie 15,4×15,4×2,4 mm (rysunek 9). Najnowsza rodzina modułów marki Espressif – ESP32-C3, wspiera (oprócz Wi-Fi 2,4 GHz) także Bluetooth w wersji LE 5.0. Ponadto oferuje zaawansowane funkcje bezpieczeństwa, w tym secure boot bazujący na kluczu RSA-3072 oraz szyfrowanie blokowe pamięci Flash algorytmem AES-128-XTS. W momencie publikacji niniejszego artykułu na rynku dostępne są dwa produkty z serii C3: 53-pinowy moduł RSP32-C3-MINI-1 oraz 19-pinowy ESP32-C3-WROOM-02.

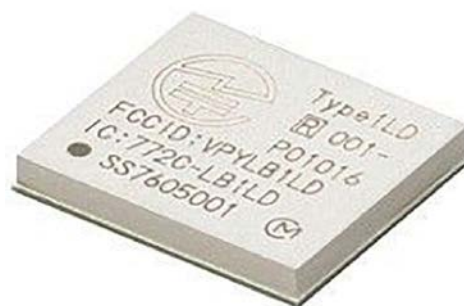


Rysunek 9. Moduł ESP32-S2-MINI-1U marki Espressif

u-blox

Marka powstała w 1997 roku jako spin-off Swiss Federal Institute of Technology w Zurychu i rozpoczęła swoją działalność od projektowania modułów GPS. Intensywny rozwój doprowadził firmę na szczyty popularności, a to za sprawą wysokiej klasy, miniaturowych i niezawodnych modułów IoT, w tym geolokalizacyjnych odbiorników GNSS (GPS, Galileo, GLONASS i BeiDou), modułów LTE/NB-IoT, Wi-Fi oraz Bluetooth. Obecnie marka oferuje następujące linie produktowe:

- **MAYA-W1** – Wi-Fi 4 + Bluetooth 5,
- **JODY W1** – dual-band Wi-Fi w trybie 2×2 MIMO 802.11a/b/g/n/ac + Bluetooth v4.2 / BLE,
- **JODY-W2** – dual-band Wi-Fi 2,4 GHz/5 GHz 802.11a/b/g/n/ac + Bluetooth 5 BR / BLE, temperatura pracy do 105°C,
- **JODY-W3** – dual-band Wi-Fi 2,4 GHz/5 GHz, 802.11ac/ax, tryb 2×2 MIMO, Bluetooth/BLE 5.1, tryby AP, STA, Wi-Fi Direct P2P,
- **NINA-W10** – miniaturowe – 10×10,6×2,2 mm, Wi-Fi 802.11b/g/n, dual-mode Bluetooth v4.2, bazujące na otwartym procesorze dostępnym dla użytkownika,
- **NINA-W13** – Wi-Fi 802.11b/g/n, wsparcie oprogramowania narzędziowego u-connect, funkcja secure boot, wymiary 10×10,6×2,2 mm, wersja dedykowana dla przemysłu,
- **NINA-W15** – jednoczesna obsługa Wi-Fi 802.11b/g/n i Bluetooth dual-mode, secure boot, trzy wersje różniące się rodzajem anteny: zewnętrzna, wbudowana PIFA lub mikropaskowa,



Fotografia 9. Miniaturowy moduł Wi-Fi 1LD-Ayla marki Murata (<https://bit.ly/2ROGxtt>)

- **LILY-W1** – Wi-Fi 802.11b/g/n, wbudowany filtr LTE, tryb AP do 8 klientów, Wi-Fi P2P,
- **EMMY-W1** – przeznaczony do aplikacji przemysłowych i motoryzacyjnych, dual band Wi-Fi 802.11ac, dual-mode Bluetooth v4.2 z obsługą BR/EDR i BLE, AP do 10 klientów, filtr LTE,
- **ODIN-W2** – dual-band Wi-Fi + dual-mode Bluetooth, tryb STA/AP, wsparcie u-connect, interfejs RMII, zaawansowane funkcje bezpieczeństwa, dostępne dwie wersje: z anteną PIFA lub dwoma gniazdami u.FL).

Nie sposób na łamach niniejszego artykułu dokładniej zaprezentować bogatej oferty firmy u-blox, warto jednak dodać, że spora część produktów jest przeznaczona do wysokiej klasy zastosowań profesjonalnych – w tym odpornych na trudne warunki pracy aplikacji przemysłowych, samochodowych, a także medycznych. Firma u-blox jest też jednym z tych producentów, którzy szczególną wagę poświęcają certyfikacji swoich produktów według różnych standardów międzynarodowych i lokalnych.

Murata

Kolejnym producentem należącym do ścisłej czołówki wytwórców modułów Wi-Fi dla IoT jest znana z rynku komponentów pasywnych firma Murata. Jej portfolio jest szerokie i obejmuje zarówno produkty jednofunkcyjne (Wi-Fi 2,4 GHz lub dual-band), jak i moduły oferujące łącze Wi-Fi oraz Bluetooth. Do wyjątkowo interesujących propozycji należy miniaturowy moduł 1LD-Ayla (fotografia 9) o wymiarach zaledwie 8,9×7,8×1,2 mm, oparty na mikrokontrolerze STM32 ze zmiennoprzecinkowym rdzeniem ARM Cortex-M4F oraz front-endzie RF CYW43438 marki Cypress. Moduł wspiera usługi chmurowe Ayla Networks, dzięki fabrycznie załadowanemu oprogramowaniu Ayla Cloud Agent.

Osiągnięciem technologicznym na miarę rozpoczętej niedawno trzeciej dekady XXI wieku jest moduł 1DX (fotografia 10), który w obudowie o niebywale małych wymiarach 6,95×5,15×1,1 mm łączy technologie Wi-Fi 802.11b/g/n oraz Bluetooth 5.1. Mamy też dobrą informację dla fanów STM32 – powstający w chwili pisania niniejszego artykułu moduł w wersji z interfejsem SPI (oryginalna wersja obsługiwana jest przez SDIO) będzie wspierał platformę szybkiego rozwoju oprogramowania wbudowanego STM32Cube. Murata współpracuje ponadto z firmami NXP i Texas Instruments, oferując moduły oparte na układach scalonych tych czołowych graczy rynku półprzewodników.

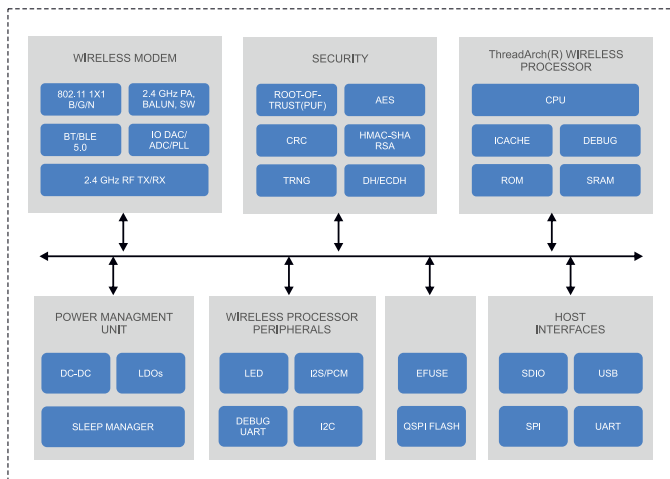


Fotografia 10. Subminiaturowy moduł Wi-Fi + Bluetooth 5.1 typu 1DX marki Murata (<https://bit.ly/3ewXrlg>)

Silicon Labs

Kolejnym liczącym się graczem na szybko rozwijającym się rynku IoT jest Silicon Labs (Silicon Laboratories). Firma oferuje kilkanaście modułów i transceiverów Wi-Fi, z czego

MODUŁY WI-FI DLA IOT



Rysunek 10. Schemat blokowy modułu RS9116 marki Silicon Labs

część obsługuje dwupasmowe łącze 2,4 GHz/5 GHz, niektóre są ponadto wyposażone we wbudowane interfejsy Ethernet, USB czy SDIO. Firma przykłada wagę do kompatybilności swoich produktów z czołowymi systemami operacyjnymi i platformami SBC, czego przejawem jest dostępność gotowych driverów linuxowych, w tym dla popularnych minikomputerów jednopłytkowych Raspberry Pi, dla których na stronie producenta można znaleźć noty aplikacyjne. Reprezentatywnym przykładem produktu z portfolio Silicon Labs jest rozbudowany moduł RS9116, obsługujący Wi-Fi 802.11a/b/g/n 2,4 GHz i 5 GHz oraz Bluetooth 5 w trybie dual mode (rysunek 10).

Lantronix

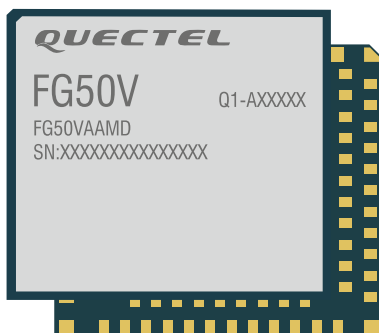
Marka Lantronix chwali się na swojej stronie trzema grupami transceiverów Wi-Fi, przeznaczonych do aplikacji IoT. Portfolio podzielone zostało na grupy modułów, wspierające standardy:

- 802.11 b/g/n,
- 802.11 a/b/g/n,
- 802.11 a/b/g/n/ac.

Do najbardziej zaawansowanych produktów firmy należą rozwiązania z rodziny PremierWave 2050 (fotografia 11). Są to wysokiej klasy moduły, przeznaczone do wydajnych i niezawodnych aplikacji przemysłowych, wspierające dwupasmowy protokół IEEE 802.11ac z prędkością do 433 Mbps i znany z najnowocześniejszych routerów Wi-Fi tryb formowania wiązki (*transmit beamforming*), wykorzystujący do tego celu dwie anteny zewnętrzne, dla których producent przewidział fabrycznie zainstalowane złącza u.FL. Moduł wspiera także Ethernet 10BaseT/100BaseT, zaawansowane funkcje bezpieczeństwa, a nawet zarządzanie poprzez SSH lub interfejsWebowy (HTTP/HTTPS). W trybie AP ten rozbudowany moduł obsługuje aż do 14 klientów jednocześnie. Wymiary modułu to 45,66×45,07×3,5 mm.



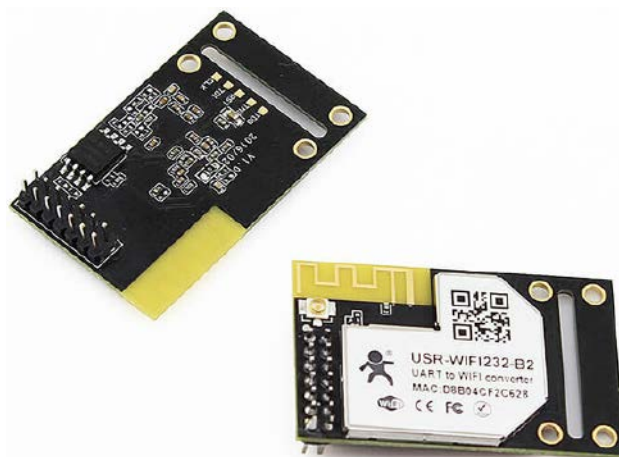
Fotografia 11. Moduł Lantronix z serii PremierWave 2050 (https://bit.ly/3vmcyVI)



Rysunek 11. Moduł FG50V firmy Quectel

Quectel

Marka znana głównie z modułów GSM pracujących



Fotografia 12. Moduł USB-WIFI232-B2 marki USR IOT (https://bit.ly/3dPNT5E)

w technologiach niemal wszystkich generacji (od 2G aż do najnowocześniejszego 5G), dobrze radzi sobie także w świecie modułów Wi-Fi. Oferta obejmuje produkty kompatybilne ze standardami Wi-Fi 5 i 6. Do tej drugiej kategorii należy godny uwagi moduł FG50V (rysunek 11) o wymiarach 19,5×21,5×2,1 mm, obsługujący ponadto Bluetooth 5.1 i osiągający zawrotną prędkość transmisji aż do 1774,5 Mbps (!). Moduł wspiera tryb 2×2 MIMO, zaś w roli interfejsu lokalnego występuje (z konieczności) szyna danych PCIe 2.0.

USR IOT

Ciekawe rozwiązanie wprowadziła do swojej oferty marka USR IOT. Moduł USB-WIFI232-B2 (fotografia 12) pełni rolę konwertera UART 3,3 V – Wi-Fi 802.11 b/g/n /Ethernet. Produkt wspiera także protokół Modbus RTU/TCP, a w trybie Soft AP może komunikować jednocześnie nawet z 32 klientami (!).

Wiznet

Znana marka Wiznet oferuje obecnie sześć modeli modułów Wi-Fi dla IoT, oznaczonych WizFi360, 310, 250, 210, 630S oraz 630A. Duże zróżnicowanie parametrów i funkcjonalności umożliwia wybór rozwiązania odpowiedniego do niemal każdego rodzaju aplikacji. Różnorodność dotyczy zarówno obsługiwanych trybów konfiguracji (komendy AT, interfejs WWW, SSH lub konsola szeregową), jak i sposobu montażu oraz połączenia z hostem (obudowy z padami krawędziowymi SMT, złącza krawędziowe typu Mini PCIe, a nawet listwy typu goldpin) czy też zakresu certyfikacji. Co ważne, do każdego produktu dostępny jest zestaw ewaluacyjny. W większości modułów czas startu wynosi zaledwie 100 ms, powolnymi wyjątkami są tutaj dwa modele wyposażone w złącze Mini PCIe (WizFi630S i WizFi630A).



Fotografia 13. Moduł SoM z serii 60 marki Laird (https://bit.ly/32KSIH4)

Larid

Marka Larid oferuje swoim odbiorcom szeroki asortyment modułów Wi-Fi, przeznaczonych zarówno do aplikacji konsumenckich, jak i rozwiązań profesjonalnych oraz klasy Enterprise. Obok prostszych modułów Wi-Fi/Bluetooth, w ofercie znajdują się też zaawansowane moduły SoM z serii 60, obsługujące Wi-Fi 2,4 GHz/5 GHz, Bluetooth 5.1 (classic + BLE) i wyposażone w procesor aplikacyjny firmy Atmel ATSAMA5D36, pracujący pod kontrolą autorskiej dystrybucji linuksowej – Laird Linux (fotografia 13).

Inni producenci

W pojedynczym artykule nie sposób zaprezentować wszystkich liczących się producentów modułów Wi-Fi dla rynku IoT. Umyślnie pominięliśmy asortyment najbardziej oczywistych i znanych producentów, takich jak Intel, Microchip, Realtek czy też PyCom – zainteresowanych Czytelników odsyłamy zatem do oficjalnych stron internetowych tych firm, zachęcamy także do dalszych poszukiwań interesujących rozwiązań na własną rękę.

Podsumowanie

Tematyka implementacji modułów Wi-Fi dla aplikacji IoT jest niezwykle szerokim zagadnieniem, zarówno od strony technologicznej (projekt PCB i obudowy, kompatybilność elektromagnetyczna czy też certyfikacja), jak i użytkowej (zakres funkcjonalności, wsparcie dla platform chmurowych IoT, możliwości łączenia za pośrednictwem innych rodzajów protokołów, np. Bluetooth lub Ethernet), czy też wreszcie programowej (implementacja komunikacji z procesorem nadrzędnym bądź programowanie wbudowanego mikrokontrolera i użycie go jako głównego procesora projektowanego urządzenia). Omówione w artykule zagadnienia ogólne – sposoby montażu, rozwiązania w zakresie podłączenia anteny czy też rodzaje wspieranych protokołów na różnych warstwach modelu OSI, pozwolą Czytelnikom sprawniej i łatwiej wejść w świat modułów Wi-Fi i ułatwią wybór właściwego modułu do konkretnej aplikacji. Mamy także nadzieję, że znajdująca się w drugiej części tekstu krótka prezentacja oferty wybranych producentów nakieruje zainteresowanych Czytelników na właściwy wybór modułu do kolejnej aplikacji IoT.

inż. Przemysław Musz, EP

KONKURS

Wygraj płytkę ewaluacyjną Microchip z układem MCP19114



Firma Microchip organizuje konkurs dla czytelników Elektroniki Praktycznej, w ramach którego można wygrać płytkę ewaluacyjną ADM00578 z samodzielnym kontrolerem impulsowej przetwornicy zasilania MCP19114 w konfiguracji Flyback (Microchip MCP19114 Flyback Standalone Evaluation Board).

Układ MCP19114 to wysoce zintegrowany kontroler PWM zawierający wszystkie niezbędne obwody kontroli napięcia i prądu umożliwiające realizację impulsowej przetwornicy zasilania, ze zintegrowanym 8-bitowym mikrokontrolerem PIC. To wyjątkowe rozwiązanie łączy rozbudowany, szybki tor analogowy, z możliwościami konfiguracyjnymi i komunikacyjnymi rozwiązania cyfrowego. Połączenie tych typów technologii tworzy nową rodzinę układów, która maksymalizuje mocne strony każdej z nich i pozwala uzyskać bardziej optymalne, konfigurowalne i wydajne rozwiązania do konwersji energii.

Kontroler jest wstępnie zaprogramowany tak, aby współpracował z interfejsem GUI, oprogramowania MPLABX IDE firmy Microchip. Dzięki temu może być łatwo dostosowany do dowolnej aplikacji, ale pozwala też na opracowanie oprogramowania układowego zdefiniowanego przez użytkownika. Płytkę ewaluacyjną zawiera złącza do komunikacji ICSPM (In-Circuit Serial Programming) oraz do komunikacji poprzez interfejs I²C. Ponadto zawiera kilka istotnych punktów testowych dla łatwego dostępu i celów rozwojowych.

Płytkę ewaluacyjną została zoptymalizowana w taki sposób, aby zminimalizować pasożytniczą indukcyjność, jednocześnie zwiększając wydajność i gęstość mocy. Ma to ogromne znaczenie w impulsowych przetwornicach zasilania i jest niezbędne dla uzyskania optymalnych parametrów pracy kontrolera MCP19114, w tym jego wysokiej wydajności i minimalizacji hałasu.

Część analogowa układu zawiera typowe obwody do budowy przetwornicy z regulacją prądu lub napięcia wyjściowego. Rdzeń mikrokontrolera służy do pełnego dostosowania parametrów pracy urządzenia, takich jak: poziomy zabezpieczeń, programowanie offsetów, czasów martwych, procedury kompensacji zbroczy i obsługi usterek. Układ MCP19114 ma wewnętrzne stabilizatory LDO z wejściem zasilanym szerokim zakresem napięć (4,5...42 V) zapewniające zasilanie dla wszystkich obwodów cyfrowych i analogowych oraz zintegrowane sterowniki po stronie low-side dla bezpośredniego sterowania kluczami tranzystorowymi. Wszystko to w oszczędzającej miejsce 24-pinowej obudowie 4x4 mm QFN.

Aby mieć szansę na wygranie płytki rozwojowej Microchip MCP19114 Flyback Standalone Evaluation Board lub aby otrzymać kupon rabatowy 20% i bezpłatną wysyłkę, należy wypełnić formularz zgłoszeniowy na stronie <https://bit.ly/3tRyKGB>

Szczegółowe informacje na temat płytki ewaluacyjnej oraz kontrolera MCP19114 można znaleźć pod adresem: <https://bit.ly/3tXZmpK>