

Obliczanie strat sygnału radiowego w paśmie o częstotliwości 2,4 GHz

Pasma na częstotliwości 2,4 GHz jest obecnie bardzo często używane, zarówno w systemach przemysłowych, jak i konsumenckich, do prowadzenia komunikacji radiowej na nieduże odległości. Większość kanałów w okolicach tej częstotliwości należy do grupy nielicencjonowanych kanałów ISM – Industrial Scientific Medical. Korzystają z nich m.in. takie standardy, jak Wi-Fi, ZigBee i Bluetooth, co prowadzi do powstania dużego „tłoku w eterze”. Wskutek tego, warto znać sposoby obliczania rzeczywistego zasięgu urządzeń radiowych, by umieć oszacować odległość, na którą można skutecznie prowadzić komunikację w paśmie 2,4 GHz.

Wi-Fi (IEEE 802.11b/g/n), Bluetooth (IEEE 802.15.1) i ZigBee (IEEE 802.15.4) to nie jedyne standardy, które korzystają z pasma ISM 2,4 GHz. Oprócz nich fale o podanej częstotliwości nadają też urządzenia pracujące w standardach: Wireless Universal Serial Bus (WUSB), w różnych standardach własnościowych (np. MiWi), a także niektóre telefony bezprzewodowe. Jest to również częstotliwość wykorzystywana w kuchenkach mikrofalowych.

Parametry łącza radiowego

Aby dobrze oszacować zasięg i poprawność pracy urządzeń radiowych, konieczne było stworzenie modeli, które pozwolą na ocenę działania nadajników i odbiorników w pomieszczeniach i na otwartym terenie. Parametry, jakie podlegają ocenie, to nie tylko zasięg, ale też straty sygnału, czułość odbiornika oraz współczynniki błędów bitów i pakietów, przy zadanym rodzaju transmisji.

Dla przykładu, posłużymy się w obliczeniach trzema modułami radiowymi firmy Microchip, różniącymi się mocą i rodzajem zastosowanej anteny: MRF24J40MA, MRF24J40MB i MRF24J40MC. Wszystkie z nich pracują w oparciu o standard ZigBee, przy czym:

- MRF24J40MA ma zintegrowaną na płycie PCB antenę i jest przeznaczony do bezprzewodowych sieci czujnikowych, automatyki domowej i budynkowej i różnych innych aplikacji konsumenckich;
- MRF24J40MB jest podobny, ale lepiej sprawdza się w aplikacjach wymagających większego zasięgu, takich jak np. automatyczne odczyty liczników mediów;

- MRF24J40MC ma natomiast zewnętrzną antenę, co zostało zilustrowane na **fotografii 1**. On również lepiej sprawdza się w aplikacjach wymagających utrzymywania połączenia na większych dystansach.

Wszystkie trzy moduły komunikują się z mikrokontrolerami poprzez 4-przewodowy interfejs SPI.

Modele utraty sygnału

Modele propagacji sygnału w dużej skali zazwyczaj prowadzą do bardzo zbliżonych rezultatów dla dużych dystansów. Wynika to z faktu, że modele te są przede wszystkim funkcjami odległości i w małym stopniu zależą np. od częstotliwości sygnału. Niestety, podejście to nie sprawdza się przy krótkich dystansach i przydaje się przede wszystkim do zgrubnego szacowania i planowania możliwości transmisji. W przypadku krótkich dystansów ważniejsze jest zanikanie sygnału w związku ze zjawiskiem wielotorowej transmisji, odbić i w konsekwencji – interferencji, które prowadzą do wygaszania sygnału. Tłumienie związane z odległością jest najczęściej traktowane jako istotnie zależne od częstotliwości.

W praktyce, dokonując szacunków oblicza się tzw. budżet łącza i uznaje za wystarczającą sytuację, gdy po uwzględnieniu przewidywanych strat, moc docierająca do odbiornika jest wystarczająco duża, w stosunku do jego czułości. Znaczenie ma też zastosowany protokół komunikacyjny, który może nakładać dodatkowe wymagania na interfejs radiowy. Różnica pomiędzy wyrażoną w dBm mocą docierającą, a czułością od-



Fotografia 1. Moduł Microchip MRF24J40MC na płycie drukowanej, z przymocowaną, zewnętrzną anteną

biornika nazywana jest marginesem budżetu łącza.

Wartość marginesu budżetu łącza

W warunkach idealnych, gdy anteny są idealnie równo ustawione, nie występuje transmisja wielotorowa ani żadne odbicia i nie ma żadnych strat mocy, wymagany margines łącza mógłby wynosić 0 dB. W praktyce wartość ta będzie znacznie zależała od oczekiwanej niezawodności połączenia, ale dobrą, często stosowaną praktyką, jest utrzymywanie go na poziomie w okolicach 22÷28 dB. Natomiast margines nie mniejszy niż 15 dB dla idealnych warunków pogodowych, pozwala z dużą dozą prawdopodobieństwa utrzymać stałość połączenia w sytuacji, gdy wystąpią bardzo trudne warunki pogodowe, lub gdy poziom zakłóceń spowodowanych aktywnością słońca znacznie wzrośnie.

Straty mocy związane z propagacją sygnału pomiędzy antenami najczęściej określane są w wartościach bez jednostek, znormalizowanych względem długości fali. Jednakże w niektórych przypadkach, warto oddzielnie rozważyć jak zmieniają się straty z dystansem, dla różnych długości fal. Wtedy też konieczne jest śledzenie jednostek, gdyż ten proces obliczeniowy wiąże się z koniecznością uwzględnienia różnych dodatkowych stałych.

Przykład na dużą odległość

Dla przykładu rozważmy możliwość utrzymania połączenia radiowego na odległości 1 km z użyciem dwóch modułów Microchip MRF24J40MB o mocy 20 dBm i czułości -102 dBm. Przyjmijmy, że są one podłączone do dookólnych anten o wzmacnieniu 1 dBi, wytrawionych na płytkach drukowanych. Przewody łączące wprowadzają w obu modułach straty na poziomie 1 dB (po każdej stronie). Ogólnie przyjęty model zakłada, że w wolnej przestrzeni, dla częstotliwości 2,4 GHz, spadek mocy na odległości 1 km wyniesie około 100 dB, co wynika z następującego, uproszczonego wzoru:

$$FSPL[dB] = 20 \log d + 20 \log f + 32,44$$

gdzie:

d – to odległość pomiędzy antenami, wyrażona w kilometrach;

f – to wyrażona w megahercach częstotliwość, na której prowadzona jest transmisja.

Sumując moc nadawczą (20 dBm), wszystkie zyski (po 1 dB ze względu na kierunkowość anten) i odejmując straty związane z przewodami i złączami (po 1 dB) oraz odejmując straty przesyłu sygnału radiowego w otwartej przestrzeni (ok. 100 dB), okazuje się, że do odbiornika dociera sygnał o mocy -80 dBm, czyli o 22 dB mocniejszy niż czułość odbiornika. Zgodnie z dokonanymi wcześniej ustaleniami, jest to wystarczający margines dla transmisji w otwartej przestrzeni. Ważne jest jednak, by zdefiniować, co dokładnie oznacza pojęcie „otwarta przestrzeń”, gdyż bynajmniej nie wystarcza, by anteny tylko znajdowały się w swoim polu widzenia.

Strefa Fresnela

Kluczowa do obliczeń okazuje się I strefa Fresnela, która przyjmuje w przekroju wzdłużnym kształt elipsy, umieszczonej pomiędzy komunikującymi się antenami. Strefa ta związana jest ze sposobem, w jaki rozchodzą się fale w przestrzeni. Oś wielka elipsy równa jest odległości pomiędzy antenami. Półoś małą można obliczyć ze wzoru:

$$r[m] = 8,65 \sqrt{\frac{d}{f}}$$

gdzie:

d – odległość pomiędzy antenami, wyrażona w kilometrach

f – częstotliwość fali nośnej, wyrażona w gigahercach.

Oznacza to, że dla częstotliwości 2,4 GHz i odległości 1 km. półoś mała wynosi 5,58 m. Dla innych punktów na dystansie pomiędzy antenami, promień okręgu będącego przekrojem poprzecznym (prostopadłym do linii

Tabela 1. Wyniki pomiarów zasięgu sprawnej transmisji za pomocą omawianych modułów firmy Microchip

Moduł	Antena	Moc [dBm]	Otoczenie	Zasięg [m]
MRF24J40MA	na PCB	0	biuro	40-45
			w otoczeniu budynków	75-80
			w otwartym terenie	135-140
MRF24J40MB	na PCB	20	biuro	120-125
			w otoczeniu budynków	190-200
			w otwartym terenie	675-700
MRF24J40MC	zewnątrzna, 2 dBi	20+2	biuro	135-140
			w otoczeniu budynków	210-220
			w otwartym terenie	750-775
MRF24J40MC	zewnątrzna, 5 dBi	20+5	biuro	140-150
			w otoczeniu budynków	220-230
			w otwartym terenie	775-800

pomiędzy antenami) strefy w punkcie na danej płaszczyźnie, można obliczyć zgodnie z następującym równaniem:

$$R[m] = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{df}}$$

gdzie:

d – odległość pomiędzy antenami, wyrażona w kilometrach,

d_1 – odległość rozważanego punktu od pierwszej anteny, wyrażona w kilometrach,

d_2 – odległość rozważanego punktu od drugiej anteny, wyrażona w kilometrach,

f – częstotliwość fali nośnej, wyrażona w gigahercach.

W praktyce, aby zapewnić transmisję zdecydowanej większości mocy sygnału pomiędzy antenami, wystarczy, by tylko 60% I strefy Fresnela było nieprzesłonięte. Oznacza to, że dla rozważanej sytuacji w paśmie 2,4 GHz, przy 1 km odległości pomiędzy antenami, najbardziej istotna z punktu widzenia transmisji jest elipsa o półosi małej równej 0,6 wcześniej obliczonej, co daje ok. 3,4 m.

Przeszkody

Jeśli na linii sygnału lub w środku I strefy Fresnela pojawiają się jakieś przeszkody, to należy uwzględnić ich wpływ na transmisję. Wprowadzają one różne straty, w zależności od swojej grubości i materiału, z którego się składają. W otwartym terenie najczęstszymi przeszkodami są drzewa. W praktyce szacuje się, że wpływ pojedynczego drzewa, które zajmuje dużą część okręgu w przekroju poprzecznym elipsy I strefy Fresnela, wynosi od 8 do 18 dB.

W miastach znacznie większe ograniczenia stawiają budynki. Typowe tłumienie dla ceglanej ściany z oknem wynosi około 2 dB. Drewniana ściana, gruba szklana ściana lub

ściana z karton-gipsu to około 6 dB strat. Ściany betonowe w budynkach mieszkalnych najczęściej powodują około 10-15 dB strat, a betonowe stropy: 12-27 dB. Mocno problematyczne są zbrojenia w ścianach oraz metalowe drzwi. Te ostatnie, w ścianie kartonowo-gipsowej mogą powodować około 12 dB strat. Trudności sprawiają też lustra na ścianach, które odbijają fale elektromagnetyczne.

Mimo wszystko obliczanie strefy Fresnela w budynkach też ma sens, choć ze względu na szybko pojawiające się przeszkody, istotne jest zapewnienie pustej przestrzeni głównie w pierwszych trzech metrach strefy. Dalej, przy częstotliwości 2,4 GHz, średnie tłumienie w biurach ze ścianami kartonowo-gipsowymi można oszacować na poziomie 30 dB na każde 30 m.

Przykładowe pomiary

Opisane zależności udało się zaobserwować inżynierom firmy Microchip, którzy przeprowadzili rzeczywiste pomiary z użyciem omawianych modułów. Pomiary wykonano w kilku lokalizacjach:

- na otwartym terenie, płaskim
- w okolicy budynków,
- w biurze.

W trakcie testów zastosowano częstotliwość 2480 Hz – kanał 26; przepustowość 250 kb/s. Czułość odbiornika wynosiła -95 dBm. Mierzono zasięg transmisji z potwierdzeniami, tj. taki, w którym na wysyłane datagramy otrzymywano odpowiedzi (komunikaty ACK). Wyniki tych pomiarów zebrano w tabeli 1. Wykonano także pomiary dla innych lokalizacji oraz sprawdzono pracę układów dla różnych kanałów transmisji, ale wyniki tych badań wykraczają poza zakres niniejszego artykułu.

**Pradeep Shamanna, Microchip,
Marcin Karbowiczek, EP**