

Dopasowanie impedancji anteny – uproszczone

Dr Anitha Govind

Menedżer ds. inżynierii – RF i łączność
Abracon, LLC



Dlaczego dopasowanie anteny jest konieczne

Anteny są obecnie tak powszechne, że wszyscy nosimy ich wiele w naszym codziennym życiu. Mówiąc o antenach, termin „dopasowanie impedancji” często pojawia się na etapie projektowania i finalnej aplikacji. Dlaczego dopasowanie impedancji jest tak ważne? Antena musi być dopasowana impedancyjnie podczas montażu w środowisku użytkownika końcowego, aby mogła pracować w pożądanym paśmie częstotliwości z maksymalną wydajnością. Optymalna wydajność zapewnia maksymalny zasięg, minimalne zużycie energii, mniejsze nagrzewanie i niezawodną przepustowość danych. Warto zrozumieć, że sama antena może być traktowana jako transformator impedancji. Antena przetwarza moc otrzymaną z obwodów RF poprzez linię nadawczą (w większości przypadków dopasowaną do impedancji 50 Ω) do wolnej przestrzeni (impedancja 377 Ω).

Dopasowanie impedancji wejściowej anteny do 50 Ω jest warunkiem koniecznym, aby zapewnić maksymalną moc przesyłaną z układu RF do anteny, przy znikomym odbiciu. Współczynnik fali stojącej (SWR) to miara określająca, jak dobrze impedancja anteny jest dopasowana do impedancji podłączonej linii nadawczej. Pożądana jest wartość poniżej 1,5. Niski, płaski współczynnik SWR umożliwia maksymalny transfer mocy z linii transmisyjnej. SWR można wyrazić jako współczynnik odbicia Γ , który odnosi się do mocy odbitej od anteny. Γ jest funkcją impedancji obciążenia, Z_L , i impedancji charakterystycznej, Z_0 .

$$SWR = 1 + \frac{|\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

(Równanie 1)

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

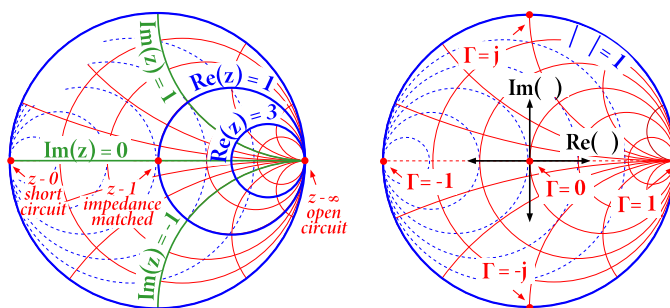
(Równanie 2)

Efektywne dopasowanie impedancji pochłaniania inżynierom mnóstwo czasu, dlatego warto poznać podstawowe techniki dopasowania impedancji.

Czym jest dopasowanie impedancji?

Dopasowanie impedancji to proces polegający na zaprojektowaniu impedancji wejściowej anteny (Z) lub dopasowaniu jej do impedancji wyjściowej odpowiadającego jej układu RF (Z_0), która w większości przypadków wynosi 50 Ω. Idealne dopasowanie uzyskuje się, gdy $Z = Z_0$ w Równaniu 2, co daje Γ wartość zero, a SWR staje się jednością w Równaniu 1. Jeśli impedancja linii zasilającej antenę i impedancja anteny nie są zgodne, wówczas źródło doświadcza impedancji złożonej, która byłaby funkcją długości linii. Nawet jeśli specyfikacja anteny mówi o impedancji 50 Ω lub dopasowanie jest osiągnięte za pomocą układu dopasowującego, długość linii zasilającej antenę ma znaczenie, zwłaszcza jeśli jest większa niż około 1/10. Długość fali o najwyższej częstotliwości roboczej. Dopasowanie na ostatecznej płycie będzie kluczowe, ponieważ impedancja anteny może się zmieniać w zależności od właściwości elektrycznych, rozmiaru i bliskości sąsiednich obiektów zamontowanych na produkcie końcowym, wszelkich obudów itp.

Wektorowy analizator sieci (VNA) może być użyty do pomiaru impedancji wejściowej anteny w środowisku użytkownika końcowego, ponieważ pomaga to zoptymalizować antenę pod kątem rzeczywistych warunków pracy. VNA powinien być skalibrowany jak najbliżej płaszczyzny pomiarowej lub w miejscu sieci dopasowania. Technika dopasowania impedancji powinna uwzględniać dowolną długość linii transmisyjnej, jeśli występuje ona między punktem kalibracji a siecią dopasowania. VNA może być użyty do pomiaru współczynnika S11, reprezentującego współczynnik odbicia. S11 jest zazwyczaj wyświetlany na diagramie Smitha.

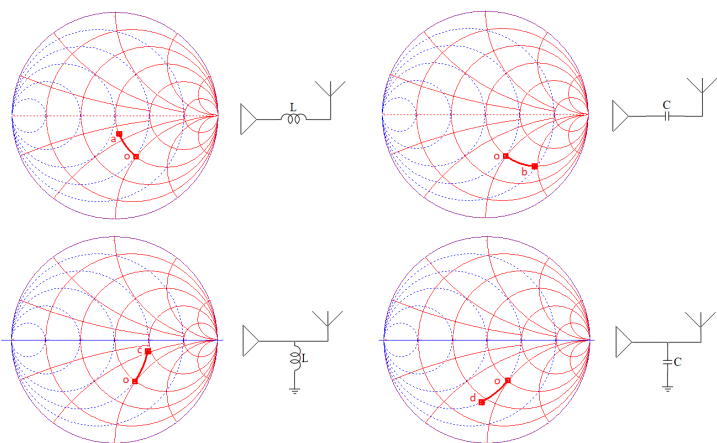


Rys. 1 Typowy widok wykresu Smitha

Diagram Smitha to doskonała pomoc graficzna do wizualizacji impedancji w dowolnym punkcie linii transmisyjnej lub na wejściu systemu antenowego dla różnych częstotliwości. Diagram Smitha składa się z okręgów o stałej rezystancji i okręgów o stałej przewodności, jak pokazano na rys. 1. Diagram Smitha można wykorzystać do dopasowania impedancji poprzez umieszczenie impedancji w środku wykresu, co odpowiada czystej rezystancji 50Ω , poprzez regulację wartości reaktancji. Osiąga się to poprzez zaprojektowanie układu dopasowującego, czyli obwodu, pomiędzy linią zasilającą a anteną. Diagram Smitha można wykorzystać do określenia wartości skupionych elementów układu dopasowującego.

Metody dopasowania impedancji

Impedancja anteny jest złożona i składa się zarówno z części rezystancyjnej, jak i reaktywnej, dlatego układ dopasowania musi zawierać elementy obu tych części, aby uzyskać dopasowanie. Jeśli impedancja źródła jest czysto rezystancyjna, a impedancja obciążenia jest typu zespolonego, to układ dopasowania wymagałby zespolonego sprzężenia impedancji obciążenia. Innymi słowy, dla impedancji obciążenia $R + jX$, impedancja układu dopasowania będzie wynosić $R - jX$ lub odwrotnie. Jeśli dowolna impedancja znajduje się w punkcie O na poniższych wykresach, wynik dodania elementów skupionych w układzie dopasowania będzie taki, jak pokazano na rys. 2.



Rysunek 2 Transformacje impedancji dla skupień elementarnych

Po podłączeniu cewki szeregowej do anteny, łączna impedancja anteny i cewki szeregowej na wyjściu będzie przesuwana się w kierunku punktu A po okręgu o stałej rezystancji. Kondensator szeregowy przesunie impedancję w kierunku punktu B po okręgu o stałej rezystancji. Cewka bocznikowa przesunie impedancję w kierunku punktu C, a kondensator bocznikowy przesunie impedancję w kierunku punktu D po okręgu o stałej przewodności.

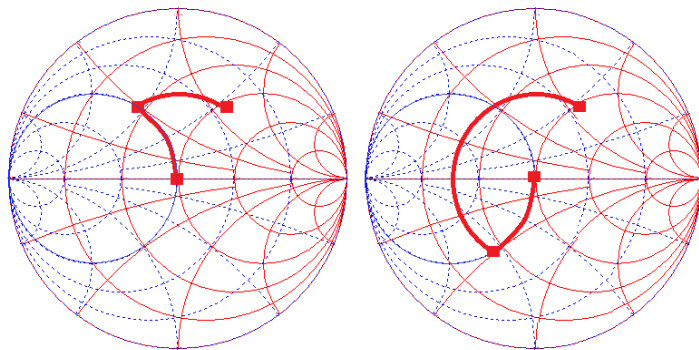
Poniżej przedstawiono kilka złotych zasad, które ułatwiają dopasowanie impedancji.

1. Wykres Smitha można podzielić na dwie połowy: górna połowa jest indukcyjna, a dolna – pojemnościowa.
2. Zawsze, gdy impedancja ma zostać zwiększona, wymagany jest induktor (L); jeśli impedancja ma zostać zmniejszona, należy użyć kondensatora (C).
3. Prawy okrąg o stałej rezystancji to okrąg bocznikowy, a lewy okrąg o stałej przewodności to okrąg szeregowy. Zatem element bocznikowy jest wymagany, jeśli impedancja musi zostać przesunięta wzdłuż lewego okręgu. W przeciwnym razie należy użyć elementu szeregowego.

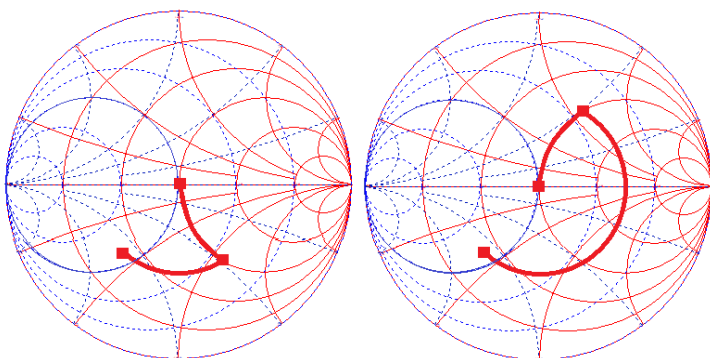
Dodanie szeregowego L lub C dopasuje jedynie impedancje leżące na okręgu o stałej rezystancji, a bocznik L lub C dopasuje impedancje leżące na okręgu o stałej przewodności. Wielokrotne kombinacje elementów sieci dopasowującej pozwalają na osiągnięcie pożądanej impedancji dopasowującej. Można również uwzględnić inne wymagania, takie jak typ filtra, współczynnik dobroci (Q-factor) i konkretne komponenty.

Łącząc dowolny z szeregowych elementów indukcyjnych, szeregowych kondensatorów, boczników indukcyjnych i kondensatorów bocznikowych, można dopasować dowolną wartość impedancji obciążenia na wykresie Smitha, z wyjątkiem punktów znajdujących się na okręgu $| \Gamma | = 1$, gdzie impedancja ma charakter czysto rezystancyjny. Linie transmisyjne są najczęściej używane do dopasowania rzeczywistych impedancji. Dopasowanie impedancji przy danej częstotliwości można uzyskać poprzez wydłużenie długości

linię transmisyjną, aby impedancja na wykresie Smitha osiągnęła okrąg przewodności jednostkowej zawierający punkt $\Gamma=0$; następnie dodaje się odpowiednią reaktancję bocznikową, aby przesunąć impedancję łączną do punktu $\Gamma=0$. (Patrz rys. 3.) Dowolną impedancję można również obracać, aż osiągnie ona okrąg 50Ω ; następnie dodaje się odpowiednią reaktancję szeregową, aby uzyskać impedancję wypadkową do punktu 50Ω . (Patrz rys. 4.)



Rysunek 3



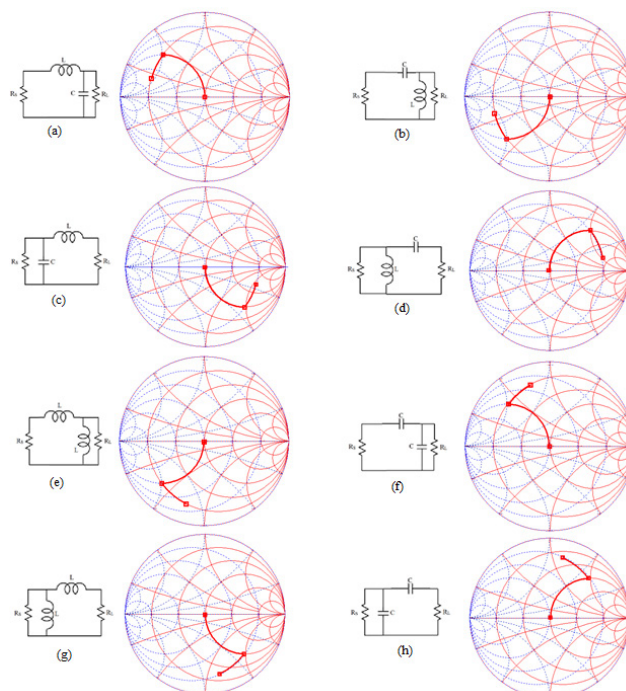
Rysunek 4

Każda sieć dopasowująca może przesunąć tylko ograniczoną część krzywej impedancji do docelowego okręgu dopasowania na diagramie Smitha, co oznacza, że dla każdej sieci dopasowującej istnieje ograniczenie szerokości pasma. Układ dopasowujący może być użyty do osiągnięcia zarówno dopasowania impedancji, jak i zwiększenia szerokości pasma, a osiąga się to poprzez odpowiednie zastosowanie powyższych zasad przy jednoczesnym ułożeniu elementów skupionych w postaci sieci L, sieci Pi i sieci T.

Prosta sieć dopasowania L składa się z dwóch połączonych komponentów, L i C, ułożonych w dowolnej z ośmiu różnych konfiguracji pokazanych na rys. 5.

Nie każda konfiguracja sieci L gwarantuje wymagane dopasowanie między zadanymi, dowolnymi impedancjami obciążenia i źródła. Każda z tych konfiguracji ma pewne obszary zabronione, w których dopasowanie nie jest możliwe. Wybierz odpowiednią topologię sekcji L na podstawie położenia R.

Reaktancja szeregową L na rys. 5(a) powoduje, że impedancja przesuwana się wzdłuż okręgu o stałej rezystancji, aż do przecięcia z okręgiem o jednostkowej przewodności; następnie bocznik C przesuwana się wzdłuż okręgu o jednostkowej przewodności do punktu dopasowania 50Ω . Ta konfiguracja będzie pasować tylko do impedancji pojemnościowych, które wypadają poza okręgiem o rezystancji przechodzącym przez początek układu współrzędnych lub impedancji indukcyjnych, które wypadają wewnątrz okręgu o przewodności przechodzącego przez początek układu współrzędnych. Podobnie, reaktancja szeregową C na rys. 5(b) powoduje, że impedancja przesuwana się wzdłuż okręgu o stałej rezystancji, aż do przecięcia z okręgiem o jednostkowej przewodności. Następnie bocznik L przesuwana się wzdłuż okręgu o jednostkowej przewodności do punktu dopasowania 50Ω . Ta konfiguracja będzie pasować tylko do impedancji indukcyjnych, które wypadają poza okręgiem o rezystancji przechodzącym przez początek układu współrzędnych lub impedancji pojemnościowych, które wypadają wewnątrz okręgu o przewodności przechodzącego przez początek układu współrzędnych.

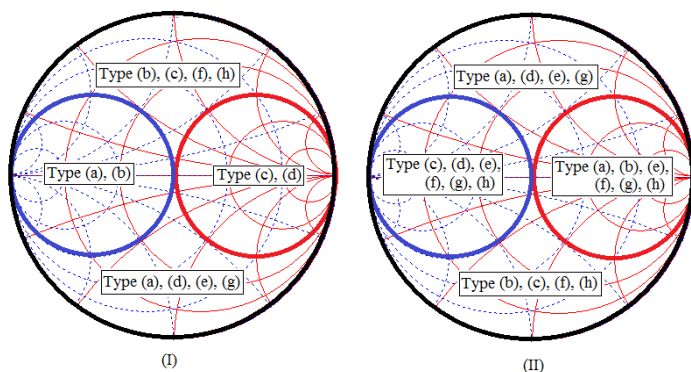


Rys. 5 Transformacje impedancji dla sieci L dopasowywanie topologii

Reaktancja boczniowa C pokazana na rys. 5(c) powoduje, że impedancja przesuwana się wzdłuż okręgu o stałą przewodności, aż do przecięcia z okręgiem o rezystancji jednostkowej. Następnie szereg L przesuwana się wzdłuż okręgu o rezystancji jednostkowej do punktu dopasowania 50 Ω. Taka konfiguracja będzie pasować tylko do impedancji indukcyjnych, które znajdują się poza okręgiem o rezystancji przechodzącym przez początek układu współrzędnych, lub do impedancji pojemnościowych, które znajdują się wewnątrz okręgu o rezystancji przechodzącego przez początek układu współrzędnych. Podobnie, reaktancja boczniowa L na rys. 5(d) powoduje, że impedancja przesuwana się wzdłuż okręgu o stałą przewodności, aż do przecięcia z okręgiem o rezystancji jednostkowej; następnie szereg C przesuwana się wzdłuż okręgu o rezystancji jednostkowej do punktu dopasowania 50 Ω.

Taka konfiguracja będzie pasować wyłącznie do impedancji pojemnościowych, które mieszczą się poza okręgiem przewodności przechodzącym przez początek układu współrzędnych, lub do impedancji indukcyjnych, które mieszczą się wewnątrz okręgu rezystancji przechodzącego przez początek układu współrzędnych.

Sieć L z reaktancjami wyłącznie indukcyjnymi może dopasować się jedynie do impedancji pojemnościowych, które leżą poza okręgami rezystancji i przewodnictwa przechodzącymi przez początek układu współrzędnych. Sieć L z reaktancjami wyłącznie pojemnościowymi może dopasować się jedynie do impedancji indukcyjnych, które leżą poza okręgami rezystancji i przewodnictwa przechodzącymi przez początek układu współrzędnych. Obszary dopuszczalne i zabronione dla różnych typów sieci L przedstawiono odpowiednio na rys. 6 (I) i (II).



Rys. 6 Obszary dozwolone i zabronione dla L dopasowanie sieciowe

Szerokość pasma dopasowania obwodu zależy od współczynnika Q i częstotliwości, gdzie współczynnik Q obwodu jest oparty na impedancjach źródła i obciążenia,

Układ bazuje na impedancji źródła i obciążenia, a sieć L nie zapewnia znaczącej kontroli nad wartością Q.

$$BW = F / Q$$

Aby zwiększyć szerokość pasma, w którym odbywa się dopasowanie impedancji, do pojedynczej sekcji można dodać dodatkową sieć L. W takich scenariuszach impedancja przekształca się w impedancję pośrednią za pomocą pierwszej sekcji. Następnie druga sekcja sieci L dopasowuje impedancję do żądanej wartości. Jeśli wymagania dotyczące szerokości pasma nadal nie są spełnione, można dodać dodatkowe sekcje, aby zagwarantować dopasowanie impedancji w szerszym paśmie. W sieciach, w których występuje więcej niż jedna sekcja sieci L, można zmniejszyć współczynniki terminacji, co zmniejsza wartość Q każdej sekcji, a tym samym zwiększa dopasowaną szerokość pasma obwodu. Sieci trójelementowe, takie jak Pi lub T, zapewniają większą elastyczność w sterowaniu wartością Q obwodu, kontrolując w ten sposób szerokość pasma przy jednoczesnym zapewnieniu dopasowania impedancji. Po wybraniu układu dopasowującego, impedancję można zmierzyć za pomocą wykresu Smitha w analizatorze wektorów sieciowych (VNA) w celu uzyskania dokładności. Niedokładna kalibracja lub rozszerzenie portu może dać błędne wyniki, które wymagają korekty i ponownej kalibracji w celu uzyskania dokładności.

Wniosek

Choć jest to skomplikowany proces, wymagający testowania i walidacji, dopasowanie anteny jest niezbędne we wszystkich projektach RF. Dopasowanie impedancji zapewnia maksymalną wydajność. Bez odpowiedniego dopasowania antena staje się wąskim gardłem ze względu na zmniejszony zasięg, zwiększone zużycie energii i utrudniony transfer danych. Dzisiejsze zaawansowane aplikacje IoT i wearable nie mogą sobie pozwolić na nieefektywną pracę. Abracon oferuje usługę optymalizacji anteny dla klientów, którzy chcą zmaksymalizować wydajność anteny w swojej aplikacji.

Informacje o autorze:

Dr Anitha Govind

Menedżer ds. inżynierii – RF i łączność

Abracon, LLC