

Strojenie anten jednopasmowych

Wstęp

Krótkofalowcy często stają przed zadaniem wykonania anteny dedykowanej na jedno konkretne pasmo według jakiegoś projektu. Często po wykonaniu takiej konstrukcji podczas pomiarów okazuje się, że antena jest nieprawidłowo dopasowana. Czasem problem daje się rozwiązać poprzez korekcję wymiarów anteny ale często proste skracanie czy wydłużanie nie rozwiązuje problemu.

Dlaczego tak się dzieje? Na impedancję anteny ma wpływ zarówno jej kształt oraz wymiary jak i wysokość zawieszenia nad ziemią, parametry elektryczne ziemi a także obiekty znajdujące się w najbliższym otoczeniu. Wpływy te powodują że w wielu przypadkach występują duże problemy z reprodukcją projektów anten w szczególności pracujących w dolnych pasmach KF gdzie formalne wymagania na wysokość zawieszenia oraz odległość innych obiektów jest trudna lub niemożliwa do spełnienia.

W następnej części niniejszego opracowania postaram się wskazać sposób rozwiązania tego problemu poprzez zastosowanie transformatora ćwierćfalowego w postaci dodatkowego odcinka fidera o dobranej impedancji charakterystycznej.

Dlaczego transformator ćwierćfalowy a nie jakiś transformator ze skupionymi indukcyjnościami (np. na rdzeniu ferrytowym) lub np. układ L-network. Otóż w większości przypadków układy ze stałymi rozłożonymi w tym wypadku transformator ćwierćfalowy wprowadza mniejsze straty. Poza tym sprawia mniej problemów przy wykonaniu do pracy z większymi mocami nadajnika.

Krok 1. Przygotowanie sprzętu pomiarowego.

Do przeprowadzenia pomiarów niezbędny będzie nam analizator antenowy pozwalający mierzyć impedancję anteny w postaci składowych rezystancyjnej (R) oraz reaktancyjnej (X lub jX). Wystarczy nam analizator mierzący impedancję na jednej częstotliwości np. MFJ-259B, RIGEXPERT AA-30 lub podobne. Jeżeli nasz analizator nie posiada możliwości kalibracji waz z kablem pomiarowym, musimy sobie przygotować odcinek kabla koncentrycznego o długości elektrycznej równej wielokrotności połowy fali pasma, w którym ma pracować nasza antena. Taki kabel charakteryzuje się tym, że zastosowany do połączenia analizatora z badaną anteną nie zmienia znacząco wyników pomiarów impedancji anteny. Mówimy, że taki kabel nie transformuje impedancji obciążenia. Wielokrotność połowy długości fali oznacza, że takie właściwości będą miały odcinki kabla o długościach $1/2 \lambda$, λ , $3/2 \lambda$, 2λ itd. Czyli możemy dopasować fizyczną długość kabla tak, aby w wygodny sposób wykonać pomiary anteny zawieszanej nawet na dużej wysokości. Należy jednak unikać zbyt dużych wielokrotności połówki λ ponieważ wiąże się z tym zawężenie szerokości pasma, w którym taki kabel pomiarowy zachowuje swoje właściwości. Ponadto przy większych długościach kabla pomiarowego zaczyna odgrywać rolę jego tłumienie, które zniekształci pomiary impedancji anteny.

W celu wykonania kabla pomiarowego najpierw szacujemy jego długość. Jeżeli będziemy pomiary wykonywać na częstotliwości F to długość fizyczną kabla L dla połowy fali możemy wyliczyć ze wzoru:

$$L[m] = k \frac{150}{F[\text{MHz}]}$$

gdzie: L – długość fizyczna kabla wyrażona w metrach, F – częstotliwość pomiarowa wyrażona w MHz, k - współczynnik skrócenia kabla. Wartość współczynnika k znajdziemy w specyfikacji parametrów kabla koncentrycznego użytego przez nas do wykonania kabla pomiarowego. Wartość współczynnika k jest zawsze mniejsza od jedności i w zależności od budowy kabla i zastosowanego wypełnienia waha się od 0.6 do wartości bliskich 1. Jeżeli nie znamy wartości współczynnika k należy przyjąć wartość 1. Konsekwencją może być konieczność odcięcia większej nadwyżki kabla w procesie strojenia kabla pomiarowego.

Po obliczeniu fizycznej długości kabla pomiarowego przycinamy odpowiedni odcinek fidera dodając do obliczonej wartości niewielki zapas (5%÷10%) który skorygujemy podczas strojenia kabla. Rzeczywista wartość współczynnika skrócenia k może nieznacznie odbiegać od wartości podanej przez producenta. Kilku procentowy zapas uchroni nas przed sytuacją gdy w skutek złych danych odcinek kabla okazałby się zbyt krótki.

Na przygotowanym kablu mocujemy wtyk antenowy i podłączamy do analizatora antenowego. Na drugim końcu kabla wykonujemy zwarcie żyły środkowej kabla i ekranu. Zwarcie powinno być wykonane możliwie krótkie (np. przez skręcenie żyły z oplotem) a nadmiar drutów należy odciąć.

W takiej konfiguracji dokonujemy pomiaru impedancji kabla na częstotliwości na której potem będziemy stroić antenę. Jeżeli pomiar wykaże że składowa reaktancyjna X równa jest 0 a składowa rzeczywista R bliska 0 to kabel ma prawidłową długość i możemy na drugim końcu zamontować wtyczkę a następnie przystąpić do strojenia anteny. Najczęściej jednak pomiar wykaże niezerową wartość reaktancji X co oznacza konieczność korekcji długości kabla. W tej sytuacji możemy poszukać analizatorem częstotliwości na której składowa X osiągnie wartość 0. Jest to częstotliwość rezonansowa tego odcinka kabla. Częstotliwość ta powinna być niższa od zaplanowanej do pomiarów. Jeżeli nie znajdziemy takiej częstotliwości poniżej naszej zaplanowanej częstotliwości pomiarowej a wypadnie ona powyżej to będzie znaczyło, że albo został przycięty zbyt krótki odcinek kabla (błąd w obliczeniach, błąd w pomiarach długości kabla, zła wartość współczynnika skrócenia k) albo została źle zarobiona wtyczka lub jest źle wykonane zwarcie na końcu kabla.

Jeżeli częstotliwość rezonansowa kabla (na której X=0) wypadła poniżej częstotliwości pomiarowej korygujemy długość odcinka fidera przycinając go, Orientacyjną długość odcinka po korekcji można obliczyć z prostej zależności:

$$L_p = L \frac{F_r}{F_p}$$

gdzie: L_p – długość kabla po korekcji, L – długość kabla podczas pomiaru, F_r – częstotliwość rezonansowa (gdzie X=0), F_p – częstotliwość na której będzie strojona antena.

Odcinając nadmiar kabla warto zostawić małą rezerwę i powtórzyć powyższą procedurę w celu precyzyjnego dobrania długości kabla.

Po zakończeniu strojenia usuwamy zwarcie na końcu fidera i montujemy wtyczkę.

Krok 2. Korekcja wymiarów anteny.

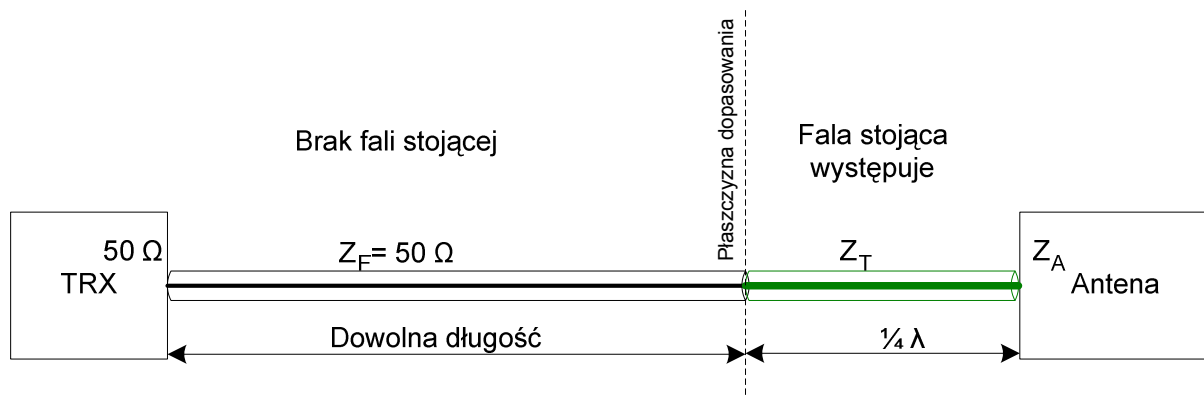
Na tym etapie prac przeprowadzimy korekcję wymiarów anteny w celu dostrojenia jej do planowanej częstotliwości pracy.

Podłączamy analizator antenowy do anteny za pomocą przygotowanego w poprzednim etapie kabla pomiarowego. Mierzmy wartość impedancji na częstotliwości planowanej pracy. Jeżeli składowa reaktancyjna impedancji anteny jest znacząco różna od zera to powinniśmy skorygować wymiary anteny. Powstaje pytanie co to znaczy „znacząco różna do zera”. Proponuje przyjąć następujące kryterium. Jeżeli w przewidzianym paśmie pracy anteny (w niektórych wypadkach może to oznaczać nawet podpasmo CW czy SSB dla pasm o dużej szerokości względnej jak 160m, 80m, 40m czy 10m) znajdziemy częstotliwość rezonansu czyli taką gdzie składowa $X=0$ to przyjmujemy, że wymiary anteny pozostawiamy bez zmian. Jeżeli nie ma takiej częstotliwości to korygujemy rozmiary anteny. W celu określenia kierunku korekcji wyznaczamy częstotliwość rezonansową anteny (taką na której składowa X impedancji będzie równa 0). Jeżeli ta częstotliwość jest niższa od planowanej częstotliwości pracy to antenę należy skrócić. Jeżeli częstotliwość rezonansowa jest wyższa od częstotliwości planowanej pracy, należy wydłużyć antenę. Korekcję długości przeprowadzamy drobnymi krokami. Po pierwszej korekcji warto obliczyć ile zmieniła się częstotliwość rezonansowa anteny przy korekcji o określoną długość. Pozwoli to nam ocenić ile powinniśmy zmienić długość anteny aby osiągnęła rezonans na pożądanej częstotliwości.

Po zakończeniu korekcji mamy antenę dostrojoną do rezonansu. Mierzmy impedancję anteny, w tym wypadku powinna to być tylko niezerowa wartość rezystancji R i zapisujemy ją. Będzie nam potrzebna do konstrukcji transformatora ćwierćfalowego.

Krok 3. Budujemy transformator ćwierćfalowy.

Budowanie odcinka ćwierćfalowego nie jest zagadnieniem skomplikowanym. Generalnie polega na wykonaniu dodatkowego odcinka linii przesyłowej (fidera) o długości elektrycznej $1/4 \lambda$ o odpowiednio dobranej impedancji charakterystycznej przewodu. Zadaniem transformatora będzie dopasowanie impedancji naszej anteny do impedancji fidera czyli 50Ω . Dzięki temu do wyjścia transformatora będziemy mogli podłączyć fider o pożądanej długości bez obawy o wystąpienie w nim dodatkowych strat związanych z obecnością fali stojącej.



Rys.1 Schemat traktu antenowego z dopasowaniem za pomocą transformatora ćwierćfalowego.

Idea dopasowania anteny za pomocą transformatora ćwierćfalowego została przedstawiona na rysunku nr 1.

Zależność między impedancją anteny Z_A , impedancją linii transformatora Z_T oraz impedancją nadajnika którą tutaj przyjmujemy równą $Z_F = 50 \Omega$ wyrażona jest wzorem

$$Z_T = \sqrt{Z_F Z_A}$$

Stąd przyjmując $Z_F = 50 \Omega$ oraz mając pomierzoną w kroku 2 wartość impedancji anteny Z_A możemy obliczyć jaką impedancję Z_T charakterystyczną powinien mieć kabel z którego wykonamy transformator ćwierćfalowy.

Przykład

Pomierzona wartość impedancji anteny wyniosła 110 Ω. Obliczamy impedancję linii transformatora ćwierćfalowego dopasowującego antenę do fidera 50 Ω.

$$Z_T = \sqrt{110 \times 50}$$

$$Z_T = 74.16 \Omega$$

Z obliczeń wynika, że powinniśmy zastosować kabel o impedancji charakterystycznej 74.16 Ω. Najbliżej tej wartości dostępne są kable o impedancji charakterystycznej 75 Ω. Przekształcając wzór na Z_T możemy wyliczyć jaka będzie impedancja układu gdy do wykonania transformatora zastosujemy dostępny kabel 75 Ω:

$$Z_d = \frac{Z_T^2}{Z_A}$$

po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy

$$Z_d = \frac{75^2}{110} = 51.14 \Omega$$

Wynika stąd, że w wyniku zastosowania kabla o przybliżonej impedancji do wykonania transformatora uzyskaliśmy transformację impedancji anteny do wartości 51.14 Ω zamiast

oczekiwanej 50 Ω. W związku z tym w fiderze 50 Ω pojawi się niedopasowanie, które w tym wypadku możemy wyliczyć z wzoru:

$$WFS = \frac{Z_d}{Z_F}$$

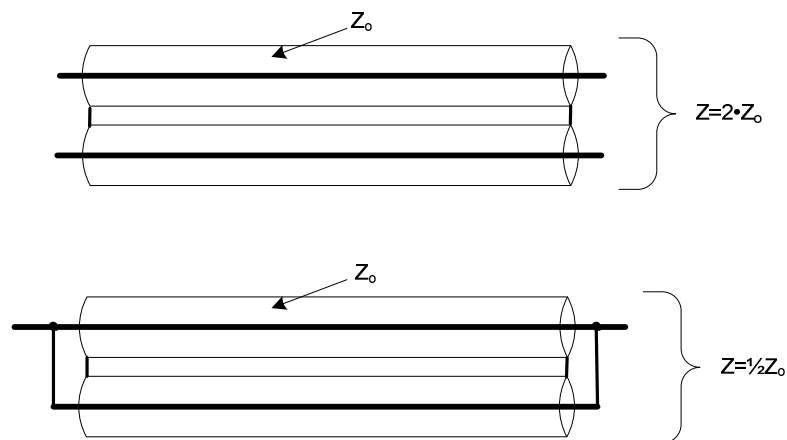
gdyby wartość Z_F była większa od Z_d należy impedancje w powyższym równaniu zamienić miejscami (wartość WFS jest zawsze większa od 1):

$$WFS = \frac{51.14}{50} = 1.02$$

Jest to wartość trudno mierzalna w warunkach amatorskich i praktycznie nie mająca wpływu na funkcjonowanie toru antenowego.

Mając obliczoną wartość charakterystyczną impedancji transformatora ćwierćfalowego Z_T staramy dobrać typ kabla o impedancji zbliżonej. W handlu dostępne są przewody koncentryczne o impedancji charakterystycznej 50 Ω (np. RG58, H155 itp.), 75 Ω (np. RG6, RG59), 93 Ω (np. RG62) i 95 Ω (np. RG22). Na bazie tych kabli można, poprzez odpowiednie połączenie można wykonać linie o impedancji charakterystycznej 25 Ω, 37.5 Ω, 46.5 Ω, 47.5 Ω, 100 Ω, 150 Ω, 186 Ω, 190 Ω.

Na rysunku nr 2 pokazano sposoby połączenia dwóch jednakowych odcinków kabla koncentrycznego w celu uzyskania innej wartości impedancji niż charakterystyczna dla danego kabla koncentrycznego.



Rys. 2. Możliwość zmiany impedancji fidera przez połączenie dwóch kabli o impedancji Z_0 .

Należy zwrócić uwagę, że układ pokazany w górnej części rysunku nr 2 tworzy ekranowaną linię symetryczną. W przypadku zasilania tak wykonaną linią anteny nie będącej typową konstrukcją z zasilaniem asymetrycznym (np. dipol, anteny pętlowe jak delta itp.) za transformatorem wykonanym z takiej linii należy umieścić choke balun w celu wytlumienia prądu wyrównawczego.

Dla szybkiej orientacji w tabeli poniżej, zestawiono wartości impedancji anteny, które można przetransformować do wartości 50 Ω przy użyciu wcześniej wspomnianych kabli oraz ich kombinacji przedstawionych na rysunku nr 2.

Impedancja kabla	Pojedynczy	Podwójny równoległy	Podwójny szeregowy (symetryczny)
50	50	12,5	200
75	112,5	28,125	450
93	172,98	43,245	691,92
95	180,5	45,125	722

Po dobraniu kabla koncentrycznego lub jego kombinacji wykonujemy transformator ćwierćfalowy postępując w sposób analogiczny jak przy wykonywaniu półfalowego kabla pomiarowego opisanego w pierwszym kroku.

Obliczamy długość linii

$$L_T[m] = k \frac{75}{F[MHz]}$$

gdzie: L_T – długość fizyczna kabla wyrażona w metrach, F – częstotliwość pomiarowa wyrażona w MHz, k - współczynnik skrócenia kabla.

Kabel przycinamy z pewnym zapasem (np. 5%). Następnie posługując się pomiarami analizatorem, przeprowadzamy korekcję długości kabla. Tu jednak występuje pewna różnica. Ze względu na problemy z dokładnością pomiarów impedancji powinniśmy pozostawić koniec kabla rozarty. Przy takiej konfiguracji na końcu do którego jest podłączony analizator na częstotliwości rezonansowej będziemy obserwować zerową wartość impedancji. Jednak jak już wcześniej wspomniano trudno jest w rzeczywistych warunkach zapewnić idealne rozwarcie co spowoduje pojawienie się pewnego błędu. Znacznie łatwiej jest zrealizować dobrej jakości zwarcie wolnego końca fidera. Jednak w tej sytuacji na końcu pomiarowym, przy częstotliwości rezonansowej będziemy obserwować wysoką wartość impedancji która prawie na pewno przekroczy zakres pomiarowy naszego analizatora. Mamy więc pewien paradoks. Jeśli będziemy mierzyć przy rozwartym końcu kabla pojawi się błąd związany z niedoskonałością rozwarcia. Z kolei przy pomiarach ze zwartym końcem w pobliżu częstotliwości rezonansowej nie będziemy mogli pomierzyć wartości impedancji i określić gdzie ona osiąga maksimum.

Rozwiązaniem tego paradoksu może być strojenie odcinka kabla na rezonans półfalowy (tak jak to robiliśmy z kablem pomiarowym) na częstotliwość dwa razy wyższej niż pożądana częstotliwość pracy tzn. przygotowując transformator ćwierćfalowy dla częstotliwości np. 3.7 MHz, stroimy odcinek pół falowy na częstotliwości 7.4 MHz. Czyli postępujemy tak jak w kroku pierwszym strojąc kabel pomiarowy ale robimy to dla częstotliwości dwa razy większej.

Po zestrojeniu transformator podłączamy pod antenę, a z drugiej strony fider 50 Ω . Całość oczywiście należy skontrolować analizatorem pod kątem wartości SWR w oczekiwanym paśmie pracy.

Uwagi końcowe

Na koniec chciałbym zwrócić uwagę na dwie sprawy.

1. Wartość SWR nie musi być równa 1 żeby system antenowy dobrze pracował. Przy wartości SWR=2 straty wynikające z odbicia wynoszą zaledwie 0.51 dB. Dla przypomnienia zmiana sygnału o 1 to 6 dB. Większym problemem może się okazać sytuacja gdy przy tej wartości SWR układy zabezpieczające nadajnik zaczną ograniczać jego moc. Drugim przypadkiem jest gdy fider w którym występuje taka wartość SWR jest długi i posiada większą stratność. W tym wypadku obecność fali stojącej spowoduje dodatkowy wzrost tego tłumienia.
2. Opisany sposób dopasowania nie rozwiązuje kwestii symetrii i asymetrii zasilania anteny tzn. nie eliminuje konieczności stosowania baluna tam gdzie powinien on być zastosowany. Uproszczeniem jest fakt że w wielu przypadkach można ten balun wykonać jako choke balun zwijając transformator ćwierćfalowy np. w dławik powietrzny lub przewijając go kilkakrotnie przez odpowiedni pierścień ferrytowy według jednego z wielu opisów zamieszczonych w internecie. Pamiętajmy: to nie niedopasowanie powoduje promieniowanie fidera i zakłócenia tylko prąd wyrównawczy (common mode current) w fiderze.

Powodzenia w konstrukcjach

Andrzej SQ5GVY

Literatura

1. Bieńkowski, Lipiński: „Amatorskie anteny KF UKF”
2. Bieńkowski: „Poradnik ultrakrótkofalowca”
3. „ARRL antenna book”