

# Charakterystyka urządzeń wielkich częstotliwości (2)

## Omówienie parametrów

*Aby dotrzymać kroku dynamicznie rozwijającym się technologiom bezprzewodowym, inżynierowie każdego szczebla muszą mieć wiedzę, w jaki sposób zaprojektować i przetestować nowe urządzenia wielkich częstotliwości (RF). Ten artykuł jest drugim spośród trzech dokumentów utworzonych, aby pomóc Czytelnikom poznać i zrozumieć zarówno podstawową, jak i zaawansowaną terminologię RF.*

W pierwszej części zostały omówione podstawowe parametry urządzeń RF (*Charakterystyka urządzeń wielkich częstotliwości (1). Zagadnienia wstępne, EP 9/2013, str. 81*), a w tym: zakres częstotliwości, pasmo chwilowe, szybkość strojenia, szum fazowy czy napięciowy współczynnik fali stojącej. Część druga skupia się na parametrach generatorów sygnałów wielkich częstotliwości, takich jak tolerancja częstotliwości, dokładność napięcia wyjściowego, zakres mocy wyjściowej, zniekształcenia intermodulacyjne oraz pasmo modulacji. W tym artykule opisano w sposób szczegółowy znaczenie każdego z wymienionych terminów. Definiując przydatność konkretnego generatora sygnałów wielkich częstotliwości do wykonania specyficznego zadania należy wziąć pod uwagę wiele parametrów, w czym pomogą informacje zamieszczone zarówno w poniższym artykule, jak i w części pierwszej.

### Tolerancja częstotliwości (dokładność oraz rozdzielczość)

*Tolerancja częstotliwości* opisuje dokładność, z jaką generowana jest częstotliwość nośna – definiuje się ją w hercach jako maksymalne, dopuszczalne odchylenie wygenerowanej częstotliwości nośnej od oczekiwanej. Ten parametr dotyczy zarówno wektorowych generatorów, jak i wektorowych analizatorów sygnałów RF. Do jego pomiarów zazwyczaj wykorzystuje się miernik częstotliwości.

Chociaż wiele elementów może wpływać na poziom tolerancji częstotliwości, oscylator lokalny (LO) odgrywa wśród nich najważniejszą rolę. Generowanie sygnału wielkiej częstotliwości jest wykonywane za pomocą pętli synchronizacji fazy (PLL), dlatego też precyzja rezonatora kwarcowego (najczęściej używanym jest rezonator kwarcowy sterowany napięciem – VCXO, albo rezonator kwarcowy o stałej temperaturze – OCXO)

jest kluczowa w utrzymaniu pożądanej częstotliwości. Dokładność sygnału odniesienia mierzy się zazwyczaj w częściach na miliard (PPB – Parts Per Billion).

W przypadku generatorów RF, które stosują przeniesienie częstotliwości w górę (ang. upconversion), tolerancja częstotliwości zależy w głównej mierze od dokładności LO. **Rysunek 1** przedstawia sposób, w jaki oscylator lokalny oraz sygnał częstotliwości pośredniej (IF) mogą wspólnie wpływać na poziom tolerancji częstotliwości generatora sygnałów RF.

W niektórych przypadkach rozdzielczość nastawy częstotliwości sygnału RF może odgrywać znacznie większą rolę niż bezwzględna dokładność częstotliwości. Na przykład, dokładność generowanej częstotliwości wielu przyrządów pomiarowych RF wynosi 100 Hz bądź więcej. Nie jest ona jednak kluczowym parametrem, gdyż urządzenia te wykorzystują cyfrowe przetwarzanie sygnałów (DSP), usuwając w ten sposób przesunięcie częstotliwości pochodzące od nośnej.

W odróżnieniu od tolerancji częstotliwości, rozdzielczość nastawy częstotliwości opisuje zdolność urządzenia do wygenerowania dokładnie zadanej częstotliwości, a nie przybliżenia do najbliższego dostępnego poziomu.

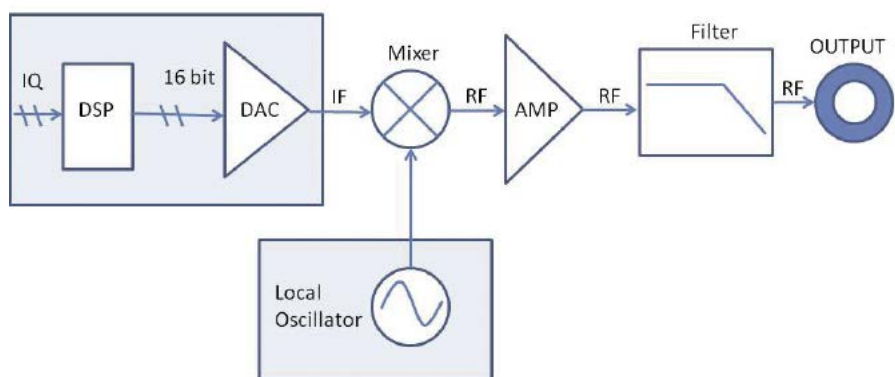
Zarówno w przypadku prostych syntezerów częstotliwości RF, jak i wektorowych generatorów sygnałów z wbudowanym przeniesieniem częstotliwości w górę, parametr ten jest całkowicie zależny od rozdzielczości LO. Wyższą rozdzielczość nastawy częstotliwości posiadają wektorowe generatory sygnałów o architekturze superheterodyny. Niektóre z nich, dzięki wykorzystaniu technik przetwarzania sygnałów takich jak bezpośrednia synteza cyfrowa, posiadają rozdzielczość nastawy częstotliwości sięgającą nawet poniżej 1  $\mu$ Hz.

### Dokładność napięcia wyjściowego

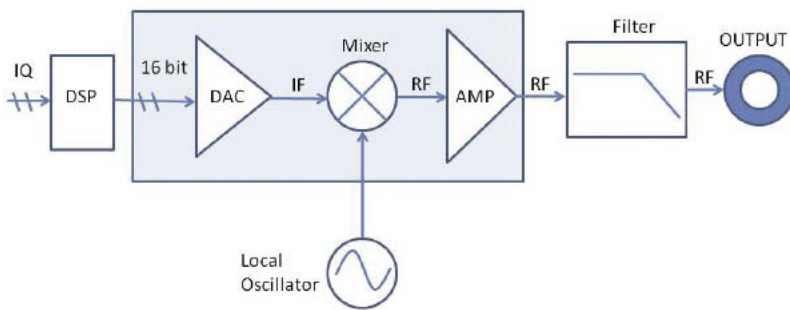
*Dokładność napięcia wyjściowego* definiuje błąd amplitudy generatora RF w całym zakresie częstotliwości pracy. Wartość ta jest mierzona w dB, jako odchylenie od zadanego poziomu sygnału. **Rysunek 2** przedstawia sposób, w jaki na dokładność napięcia wyjściowego wpływa wiele czynników, w tym: liniowość przetwornika cyfrowo – analogowego (DAC), tłumiki, mieszacze, a nawet temperatura.

Odchyłki od wartości idealnych, wprowadzane przez każdy z powyższych elementów, często można przewidzieć. Umożliwia to zastosowanie specjalistycznych metod kalibracji, które zwiększają poziom dokładności napięcia na wyjściu.

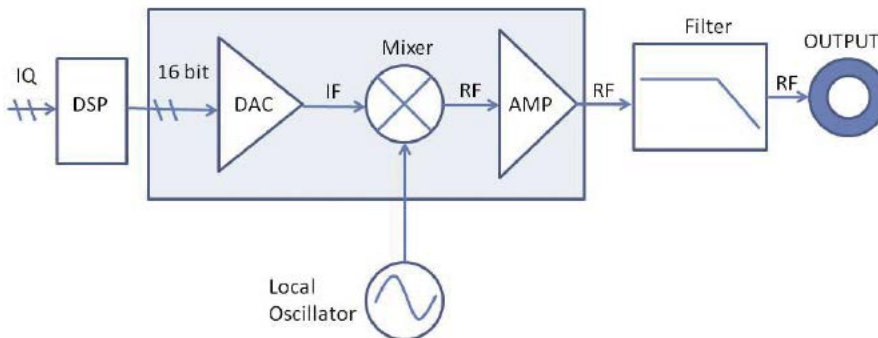
W poprzednim artykule zawarto opis parametru VSWR, który jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na dokładność napięcia wyjściowego. Napięciowy współczynnik fali stojącej wynika z niedopasowań impedancji w systemie (odchyłki od 50  $\Omega$ ), które powodują odbicia sygnału, a w konsekwencji poważne zaburzenia poziomu jego amplitudy.



Rysunek 1. Wpływ sygnału IF oraz LO na tolerancję częstotliwości



Rysunek 2. Na poziom dokładności wpływają takie komponenty, jak przetwornik C/A, mieszacz oraz filtr



Rysunek 3. Zakres mocy wyjściowej jest zdefiniowany poprzez parametry przetwornika C/A, mieszacza oraz wzmacniacza

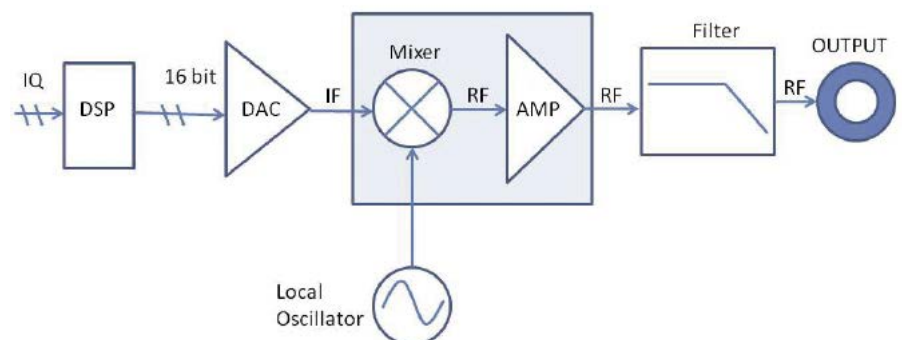
Dokładność napięcia wyjściowego jest szczególnie istotna w przypadku aplikacji działających w szerokim paśmie. Różnice poziomu mocy wzdłuż pasma częstotliwości mogą zniekształcić modulowany sygnał oraz zwiększyć poziom wektora błędu (EVM – Error Vector Magnitude). Na przykład, pracując z techniką WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) wymaga się od odbiornika pracy w paśmie 5 MHz. Jeśli na całości pasma poziom mocy ulega wahaniom, to demodulacja symboli niosących informacje może zostać poważnie przekłamana. Co więcej, im wyższy jest stopień modulacji, jak np. 256 QAM, tym większe błędy spowodują nawet niewielkie odchyłki amplitudy pojawiające się w szerokości pasma modulacji. Tak więc, wzrost poziomu EVM, w przypadku szeroko pasmowych modulacji wyższego rzędu, jest często wynikiem niskiej dokładności amplitudy sygnału na wyjściu urządzenia.

### Zakres mocy wyjściowej

Zakres mocy wyjściowej definiuje zakres mocy, z którą można generować sygnały. Moc wyjściową podaje się w dBm, jako moc wygenerowaną z urządzenia, bez uwzględniania wpływu medium transmisyjnego. W związku z powyższym, parametr ten nie uwzględnia stratności kanału. Aby obliczyć efektywną moc wypromieniowaną (ERP) należy dodatkowo wziąć pod uwagę współczynnik tłumienia linii. Jak przedstawiono na **rysunku 3**, na poziom mocy wyjściowej składa się moc sygnału IF, generowanego przez DAC oraz jakiegokolwiek inne wzmoc-

nienia wykorzystywane w trakcie przenoszenia częstotliwości w górę.

Równie ważnymi parametrami generatorów sygnałów RF jest zarówno maksymalny, jak i minimalny, dostępny poziom mocy wyjściowej. Podając minimalną moc sygnału na wyjściu należy pamiętać, że to poziom szumów urządzenia oraz zakłócenia intermodulacyjne definiują faktyczną minimalną moc sygnału transmitowanego. Na przykład, jeśli urządzenie posiada poziom szumów równy  $-140$  dBm/Hz, użytkownik jest w stanie uzyskać efektywny zakres dynamiczny rzędu 80 dB na poziomie mocy  $-60$  dBm lub wyższym. Podsumowując, definiując minimalny poziom mocy wyjściowej urządzenia należy pamiętać o jego poziomie szumów. Przykładem zastosowania, gdzie ten parametr jest niezwykle istotny, są urządzenia GPS. Ponieważ wykorzystują one sygnały o niewielkiej mocy, wymagane jest, aby testujące je przyrządy pomiarowe posiadały jak najniższy własny poziom szumów.



Rysunek 4. Mieszacze i wzmacniacze wprowadzają zniekształcenia trzeciego rzędu

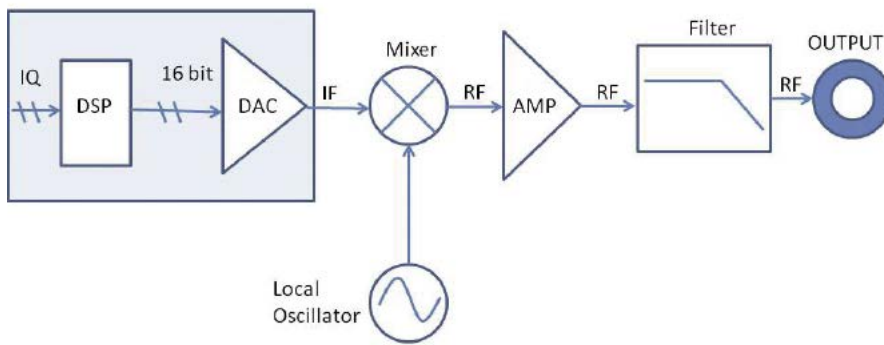
Maksymalna moc na wyjściu jest zazwyczaj zależna od liniowości wzmacniacza. Ponieważ wzmacniacze wielkich częstotliwości wprowadzają zniekształcenia sygnału tym większe, im bliżej poziomu saturacji pracują, parametr maksymalnej mocy jest w praktyce najbardziej przydatny w połączeniu ze specyfikacją zniekształceń. W większości aplikacji wymagana maksymalna moc sygnału zależy głównie od badanego urządzenia (DUT). Na przykład, urządzenia takie jak nadajniki LPD433 (Low Power Device 433 MHz) pracują w systemach o niewielkim zasięgu, generując około 10 mW. Do ich testów wymagana maksymalna moc wyjściowa to jedynie  $-20$  dBm, przy bezpośrednim połączeniu z badanym obiektem. Z drugiej strony, dokumentacja standardu EPC (Electronic Product Code) dopuszcza transmisję sygnałów radiowych z mocą do 1 wata ( $+30$  dBm). Ten poziom jest poza zakresem większości dostępnych generatorów, co wymusza wykorzystanie zewnętrznego wzmacniacza.

### Zniekształcenia intermodulacyjne

Podczas pomiarów zniekształceń sygnałów RF trzeciego rzędu otrzymujemy parametr zniekształceń intermodulacyjnych (IMD3) definiujący liniowość badanych urządzeń. Zazwyczaj w systemach wielkich częstotliwości elementy, takie jak mieszacze i wzmacniacze, wprowadzają zniekształcenia sygnału. Składowe te zyskują na sile w miarę zbliżania się do poziomów saturacji poszczególnych komponentów, choć często są zauważalne także podczas pracy na niskich poziomach mocy. Na **rysunku 4** zaznaczono elementy odpowiedzialne za IMD3.

Na **rysunku 4** można zauważyć, że zniekształcenia są najsilniejsze w przypadku wykorzystywania zarówno mieszaczy, jak i wzmacniaczy sygnału RF.

Jednym z najprostszych sposobów zdefiniowania parametru IMD3 jest pomiar zakłóceń intermodulacyjnych metodą dwutonową. Polega ona na wygenerowaniu dwóch tonów o tej samej mocy, lecz różnej częstotliwości (zazwyczaj różnica wynosi około kilkuset kiloherców) za pomocą wektorowego generatora sygnałów. Podczas tej operacji można zauważyć zarówno wygenerowane sygnały, jak i skutki zaistniałych zniekształceń. **Rysunek 5** ilustruje otrzymane wyniki testu IMD3.



Rysunek 5. Ilustracja zniekształceń drugiego i trzeciego rzędu, występujących podczas generowania sygnału dwutonowego

Jak widać na rys. 5, zniekształcenia drugiego rzędu ( $f_2-f_1$ ,  $2f_1$ ,  $f_1+f_2$ , orz  $2f_2$ ) powstają w pewnej odległości od sygnałów generowanych, dzięki czemu z łatwością można je wyfiltrować. Niestety, wytworzone zniekształcenia drugiego rzędu intermodulują z podstawowymi sygnałami, wynikiem czego powstają zniekształcenia trzeciego rzędu, które stanowią o wiele poważniejszy problem.

Rysunek 5 ilustruje zniekształcenia trzeciego rzędu występujące zarówno na częstotliwościach znajdujących się w pewnej odległości od podstawowych tonów ( $3f_1$ ,  $2f_1+f_2$ ,  $f_1+2f_2$ , orz  $3f_2$ ), jak i te zbliżone do nich ( $2f_1-f_2$ ,  $2f_2-f_1$ ). Wiele z tych częstotliwości może zostać wyfiltrowana; niestety, nie jest to możliwe w przypadku tych, które pojawiają się najbliżej pierwotnego sygnału dwutonowego. Stąd właśnie te produkty intermodulacyjne wykorzystuje się do określenia liniowości systemu, natomiast parametr IMD3 definiuje różnicę amplitudy w dB między podstawowymi sygnałami, a zniekształceniami trzeciego rzędu. Ponieważ poziom zniekształceń jest dużo bardziej obecny przy wyższych poziomach mocy, ważne jest, aby specyfikując IMD3, podać również moc wyjściową, przy której został wykonany pomiar.

IMD3 jest ważnym parametrem urządzeń RF. Zniekształceń intermodulacyjnych nie można w łatwy sposób wyfiltrować, gdyż znajdują się zbyt blisko sygnałów generowanych. Co więcej, wpływają znacznie na jakość generowanych sygnałów modulowanych. Efekt ten jest często zauważany jako degradacja parametru EVM. Dlatego też przy testach urządzeń pracujących w oparciu o modulacje wyższego stopnia (jak np. 64 QAM), należy uwzględnić wysokie wymagania jakościowe parametru EVM i, co za tym idzie, wybrać przyrządy pomiarowe cechujące się niskimi zniekształceniami intermodulacyjnymi.

**Pasma modulacji (częstotliwość próbkowania I/Q)**

Kolejnym, niezwykle istotnym parametrem w przypadku wektorowych generatorów sygnałów jest *pasmo modulacji*. Jest ono zdefiniowane poprzez maksymalną częstotliwość próbkowania pasma, bądź częstotliwość próbkowania I/Q. Szerokość pasma wynika z twier-

dzenia o próbkowaniu Shannona, które mówi, że próbki przebiegu cyfrowego danego sygnału muszą być generowane z częstotliwością co najmniej dwa razy większą niż oryginalne pasmo tego sygnału, aby go wiernie oddać w domenie dyskretniej. Pasmo modulacji urządzenia RF wynika bezpośrednio z parametrów arbitralnego generatora funkcyjnego (ARB), co oznaczono na rysunku 6. W przypadku niektórych, szczególnie starszych, przyrządów pomiarowych, pasmo przenoszenia wieloczęstotliwościowej części urządzenia może być większe, niż pasmo modulacji. W przeciwnym przypadku, mogłoby to wpłynąć na ostateczne pasmo modulacji. Należy zatem pamiętać, że faktyczne, użyteczne pasmo przenoszenia danego urządzenia jest tak szerokie, jak maksymalne pasmo modulacji tego urządzenia.

Maksymalna częstotliwość próbkowania pasma podstawowego (częstotliwość próbkowania I/Q) określa pasmo modulacji i jest w znacznej mierze zależna od mocy obliczeniowej oraz możliwości przetwarzania danego urządzenia. Na **rysunku 6** pokazano schemat blokowy wektorowego generatora sygnałów z zaznaczonym obszarem cyfrowego przetwarzania sygnałów. Maksymalne pasmo sygnału częstotliwości pośredniej IF (bądź pasma podstawowego, w zależności od architektury części przenoszącej częstotliwość w górę) jest podstawą do zdefiniowania pasma modulacji na wyjściu RF.

W przypadku wielu aplikacji pasmo modulacji jest nienegocjowanym parametrem, zdefiniowanym przez poszczególne standardy komunikacyjne. Na przykład, generacja sygnału Wi-Fi (IEEE 802.11g) wymaga pasma modulacji sięgającego 20 MHz. Dla porównania, wspomniana wcześniej technika WCDMA wymaga jedynie 5 MHz. W każdym z tych zastosowań jest dyspo-

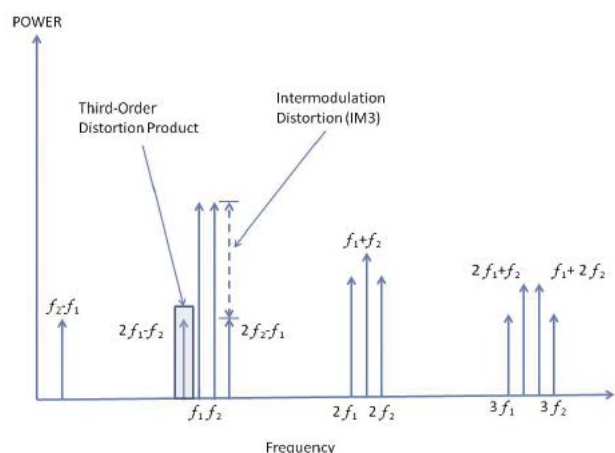
nowanie szerszym pasmem modulacji niż wymaga tego dany standard. Przetworniki DAC typu sample-and-hold generują kopie widma pierwotnego w każdej wielokrotności częstotliwości próbkowania, co oznacza, że nadpróbkowanie sygnału może przesunąć te kopie pasma podstawowego lub pasma sygnału częstotliwości pośredniej (IF) poza zakres pracy urządzenia.

Istnieje wiele potencjalnych strategii zwiększenia pasma modulacji urządzenia. Na przykład, wektorowe generatory sygnałów, wykorzystujące bezpośrednie przeniesienie częstotliwości w górę, często umożliwiają zastosowanie zewnętrznych sygnałów I oraz Q, co zwiększa pasmo modulacji urządzenia. Kolejnym przykładem jest wykorzystanie techniki przetwarzania sygnałów przez przyrządy pomiarowe celem maksymalizacji częstotliwości próbkowania pasma podstawowego lub sygnału częstotliwości pośredniej IF, bez potrzeby użycia dodatkowej pamięci dla buforowania danych. Niektóre przyrządy pomiarowe RF typu PXI oraz PXI Express wspierają odbiór strumieniowego przesyłu danych bezpośrednio z pamięci dyskowej, z szybkością zapewniającą pełne zajęcie pasma przenoszenia danego urządzenia RF.

**Podsumowanie**

Opisane parametry zostały wybrane ze względu na ich znaczenie w charakterystyce generatorów sygnałów, a także wszystkich systemów wielkich częstotliwości. Trzecia część tej serii skupi się na opisie parametrów wektorowych analizatorów sygnałów takich jak: zakres dynamiczny, chwilowa rozdzielczość pasma czy poziom szumów.

**National Instruments  
Poland Sp. z o.o.  
Salzburg Center  
ul. Grójecka 5, 02-025 Warszawa  
tel.: +48 22 328 90 10  
faks: +48 22 331 96 40  
ni.poland@ni.com, [poland.ni.com](http://poland.ni.com)  
Infolinia: 800 889 89**



Rysunek 6. Pasmo modulacji jest zdefiniowane poprzez układ cyfrowy oraz przetwornik C/A