



# Sieć telefonii komórkowej 5G (3)

## Od teorii do praktyki budowania urządzeń

*Wydaje mi się, że większość inżynierów elektroników miała do czynienia z urządzeniami radiowymi przede wszystkim jako ich użytkownicy. To znaczy, konstruowali co prawda urządzenia transmitujące dane z użyciem fal radiowych, ale korzystając z jakichś gotowych rozwiązań i co najwyżej dodając do urządzenia antenę z oferty dystrybutorów. Ale ci, którzy choćby otarli się o zagadnienia związane z antenami nadawczo-odbiorczymi przeznaczonymi do pracy przy częstotliwości rzędu kilku gigaherców lub mieli do czynienia z tzw. integralnością sygnałów przy transmisji danych przeprowadzanej z dużą prędkością, na pewno wiedzą, jak trudno jest wykonać poprawnie działający obwód w.c., gdy każdy milimetr długości ścieżki ma tak duże znaczenie. Tymczasem technologia 5G wprowadza do powszechnego użycia fale milimetrowe. Czy nie ciekawi Was, jak konstruuje się obwody dla fal o takiej długości?*

Największym wyzwaniem technicznym przy użytkowaniu zakresu fal milimetrowych są straty sygnału wynikające ze ścieżki propagacji. Są one znacząco większe i znacznie trudniejsze do przybliżenia niż przy użytkowaniu pasma 6 GHz. Przykładowe straty wynikające ze ścieżki propagacji sygnału podano w **tabeli 1**. Wyszczególniono w niej 3 zakresy częstotliwości, to jest 2,6 GHz, 28 GHz oraz 39 GHz oraz określono wpływ warunków atmosferycznych. Poszczególne używane w niej skróty są dobrze znane osobom zajmującym się sieciami telefonii komórkowej i oznaczają:

- NLOS (non-line-of-sight) – częściowo przesłonięta wiązka radiowa pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem,
- LOS (line-of-sight) – brak przeszkód pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem,
- UMa (Urban Macrocell) – komórka makro w przestrzeni zurbanizowanej,
- UMi (Urban Microcell) – komórka mikro w przestrzeni zurbanizowanej,
- Street Canyon – obszar miejski, ulica otoczona bardzo wysoką zabudową,
- Street Open – obszar miejski, ulica bez zabudowy.

Jak można zauważyć na podstawie wyników pomiarów umieszczonych w tabeli 1, znacznie większy wpływ na straty wynikające z propagacji sygnału ma zabudowa niż na przykład opady deszczu. Do takiego wniosku prowadzą wartości tłumienia dróg propagacji NLOS oraz LOS, podobnie jak UMi przy wysokiej zabudowie (UMi Street Canyon) oraz UMa przy braku zabudowy (UMa Street Open). Dodatkowo, straty sygnału są o 20 dB większe niż w paśmie LTE 41.

W tabeli nie podano strat wynikających z propagacji fal wewnątrz budynków. Można szacować, że nawet w najłatwiejszej do przewidzenia, typowej sytuacji, gdy stacja bazowa oraz urządzenie mobilne są przedzielone pojedynczą ścianą betonową, to tłumienie sygnału dla częstotliwości 28 GHz może wynosić nawet 117 dB.

Z powodu tak dużych strat organizacja FCC dopuściła stosowanie stacji bazowych pracujących z mocą 75 dBm na każde 100 MHz. Obowiązkowa wydaje się też konieczność formowania wiązki nie tylko stacji bazowych, ale również urządzeń mobilnych dla zapewnienia maksymalnej efektywności komunikacji.

Formowanie wiązki w urządzeniu mobilnym, noszonym przez użytkownika, pracującym w zakresie fal milimetrowych jest

Tabela 1. Porównanie strat wynikających ze ścieżki propagacji sygnału

Częstotliwość/odległość	Ścieżki propagacji sygnału					
	UMa-LOS [dB]	UMa-NLOS [dB]	UMi-Street Canyon-LOS [dB]	UMi-Street Canyon-N-LOS [dB]	UMi-Street Open-LOS [dB]	UMi-Street Open-NLOS [dB]
LTE 41 2,6 GHz/100 m	84,8	107,5	83,4	112,7	81,9	105,6
28 GHz/100 m	105,5	128,2	104,1	133,4	102,6	126,3
39 GHz/100 m	108,4	131,1	107	136,3	105,5	129,2
39 GHz/100 m przy silnych opadach deszczu (25 mm/godz.)	109,4	132,1	108	137,3	106,5	139,2
LTE 41 2,6 GHz/1 km	104,9	137,5	103,2	144,6	100,4	134,5
28 GHz/1 km	125,5	158,2	123,9	165,3	121,1	155,2
39 GHz/1 km	128,4	161,1	126,8	168,2	124	158,1
39 GHz/1 km przy silnych opadach deszczu (25 mm/godz.)	136,5	169,2	134,9	176,3	132,1	166,2

znacznie trudniejsze do realizacji niż w stacji bazowej. Oprócz wspomnianego w drugiej części artykułu wpływu komponentów czy samego użytkownika, muszą być też uwzględnione inne czynniki, bardziej „techniczne”, takie jak chociażby ograniczone zasoby energii dostarczanej przez baterię zasilającą, limitowana liczba warstw płytki drukowanej oraz niewielka przestrzeń fizyczna dostępna dla anteny. Typowe podejście polega na zwiększaniu stosunku sygnał/szum oraz wpływu sąsiednich kanałów na pojedynczy, konkretny kanał transmisyjny, co niestety nie zapewnia wzmocnienia dla multipleksowania przestrzennego.

Antena w urządzeniu 5G składa się z wielu elementów. Odległość między nimi nie może być dowolna, ponieważ ma ona kluczowe znaczenie dla formowania wiązki oraz bezpośredni związek z długością fali radiowej. Zbyt duże odstępstwa między elementami anteny powodują powstawanie prążków bocznych oraz spadek zysku energetycznego i sprawności energetycznej anteny. W notach aplikacyjnych opisujących budowanie takich anten wieloelementowych można znaleźć zależność podającą maksymalną odległość między poszczególnymi elementami:

$$\frac{d}{\lambda_0} \leq \frac{1}{1 + \cos(\theta_{maks})}$$

gdzie:

d – odległość pomiędzy elementami anteny,

$\lambda_0$  – długość fali,

$\theta_{maks}$  – maksymalny kąt skrętu wiązki.

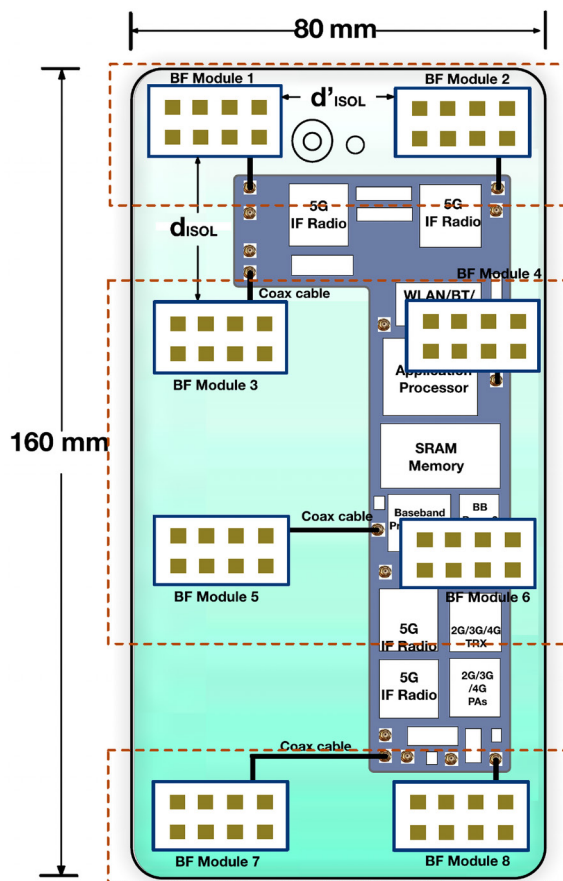
Przy budowaniu anten wieloelementowych przyjmuje się, że odległość pomiędzy elementami anteny nie może być większa od połowy długości fali, to jest  $d \leq \lambda_0/2$ .

Z drugiej strony, podczas konstruowania anten MIMO dla zapewnienia poprawnego multipleksowania przestrzennego należy zadbać o jak najlepszą separację pomiędzy poszczególnymi elementami anteny. Największa część sygnału z sąsiedniego pola antenowego (lub pół antenowych) przedostaje się przez pojemność pasożytniczą. Dlatego dla zmniejszenia wpływu pojemności przestrzeń otaczająca element anteny musi mieć szerokość co najmniej  $1,5 \times \lambda_0$  w antenie wykonanej w formie obszaru o kształcie kwadratowym lub prostokątnym.

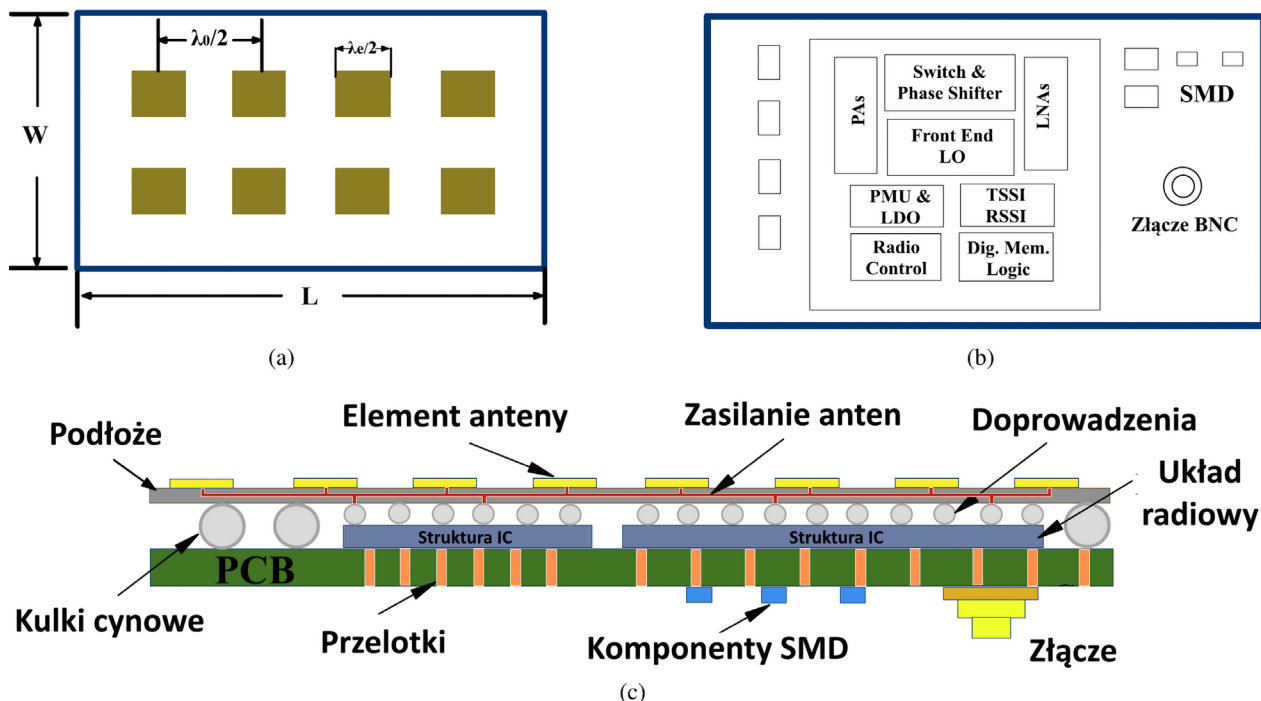
Jak można zauważyć, podstawowe zasady konstruowania anten MIMO są odmiennie niż obowiązujące dla anten formujących wiązkę. Wykonanie zespołu antenowego mającego M×N elementów, zaprojektowanego i zoptymalizowanego pod kątem wymagań odnośnie do formowania wiązki w taki sposób, aby dobrze pracował również w funkcji anteny MIMO (i odwrotnie), jest praktycznie niewykonalne. W konsekwencji, abstrahując od wyglądu zewnętrznego, aparat mobilny 5G nie może być wykonany w konwencjonalny

sposób, zbliżony do tego, w jaki buduje się aparaty 4G i dlatego zaproponowano inne rozwiązania, uwzględniające różne scenariusze funkcjonowania aplikacji.

Na rysunku 12 pokazano przykładową propozycję rozwiązania smartfonu pracującego w sieci 5G. Jego przybliżone wymiary zewnętrzne to 160 mm×80 mm×8 mm. Nie ma w nim gniazda karty SIM ze względu na zamontowany moduł identyfikujący rozmówcę eSIM lub wirtualną kartę SIM zintegrowaną w chipsecie. Technologia eSIM została już wynaleziona i zaimplementowana przez producentów smartfonów. Dzięki niej nie ma potrzeby stosowania karty SIM umieszczonej w gnieździe, jak jesteśmy przyzwyczajeni. Urządzenie ze zintegrowanym eSIM może mieć mniejsze wymiary,



Rysunek 12. Propozycja rozmieszczenia 8 modułów BF złożonych z 2×5 anten



Rysunek 13. Budowa modułu formowania wiązki BF: a) wymiary anteny MIMO, b) rozmieszczenie elementów modułu, c) przekrój poprzeczny modułu BF

kompaktową budowę, jest przyjazne użytkownikowi, co ma kluczowe znaczenie nie tylko dla technologii 5G, ale także dla IoT oraz urządzeń *wearable*.

Nowa architektura prototypu smartfonu 5G zawiera 8 identycznych modułów formowania wiązki BF. Są one rozmieszczone i zamontowane na tylnej ściance urządzenia. Ich architektura bazuje na MIMO i nosi nazwę *Distributed Phased Arrays Based MIMO* (DPA-MIMO). Ma ona szereg zalet, między innymi:

- Każdy moduł formujący wiązkę (BF), zawierający pojedyncze ogniwo łańcucha przetwarzania sygnału radiowego, pełni funkcję aktywnego obszaru antenowego, mającego  $N$  anten ( $N_{ANT}$ ). W tym przykładzie – 8 elementów antenowych ( $2 \times 4$  elementy). Tego przykładu można użyć, aby estymować efektywną, izotropową moc promieniowaną EIRP. Przykład jej obliczenia można znaleźć w materiałach źródłowych. Wspomnijmy tylko, że w praktyce może ona być od 9 do 18 dB większa, zależnie od sposobu rozmieszczenia poszczególnych elementów anteny. Oczywiście, będzie to działało się kosztem energii zasilania.
- 8 modułów zostało rozmieszczonych w sposób pozwalający na zachowanie poprawnej odległości oraz właściwego rozmieszczenia anten. Dzięki temu 8 anten MIMO współpracuje, przetwarzając 8 strumieni danych. Zapewnia to poprawne multipleksowanie przestrzenne oraz w konsekwencji wzrost prędkości transmisji.
- Topologia rozmieszczenia anten DPA-MIMO dostarcza rozwiązania w sytuacjach, w których użytkownik zasłania ręką jedną lub więcej anten, blokując dostęp fal milimetrowych. Ręka w bezpośredniej bliskości anteny, przy częstotliwości sygnału radiowego 73 GHz, tłumi sygnał o około 30...40 dB. Na rysunku 11 (patrz – część 2 artykułu) pokazano smartfon trzymany w różnych pozycjach przez użytkownika. W pozycji (1) i (2) moduły formujące wiązkę BF1 i BF2 nadal mogą pracować bez żadnych przeszkód, niezależnie lub w trybie  $2 \times 2$  MIMO. W przypadku (3) moduły BF3...BF6 mogą pracować niezależnie lub współpracując w trybie MIMO  $4 \times 4$ . W przypadku (4) wszystkie moduły mogą pracować jednocześnie w trybie MIMO  $8 \times 8$ .

Proponowane rozmieszczenie modułów formowania wiązki, to jest 2 na górze, 2 w części środkowej oraz 2 na dole obudowy,

jest optymalne z punktu widzenia interakcji z ciałem użytkownika. Liczba modułów BF jest zmienna, jednak w świetle opisanych rozwiązań powinno być ich co najmniej 5. Gwarantuje to zachowanie właściwej przestrzeni izolacyjnej, minimalizację interferencji oraz spełnienie wymagań odnośnie do liczby agregowanych wiązek radiowych.

Z punktu widzenia konstruktora smartfonu takie rozwiązanie ułatwia rozpraszanie mocy traconej w nadajniku. Najnowsze konstrukcje stopni mocy przeznaczonych do zasilania sygnałem macierzy anten 5G mają sprawność rzędu 20...30%. Dlatego większość mocy prądu stałego zasilającego wzmacniacz zostanie zamieniona w energię cieplną, która podwyższy temperaturę smartfonu i może być przyczyną jego awarii. Problem ten nabiera większego znaczenia, gdy wiele modułów wzmacniaczy jest zintegrowanych w modułach, a sam aparat działa na granicy zasięgu stacji bazowej lub przy dużym obciążeniu ruchem. Rozproszenie modułów formujących wiązkę może zredukować problem rozgrzewania się aparatu. Inaczej może być wymagane zastosowanie specjalnego chłodzenia, co raczej nie jest możliwe w telefonie komórkowym.

Na **rysunku 13** pokazano szczegóły budowy modułu formowania wiązki. Na górnej warstwie jako pierwszą zamontowano matrycę antenową. Na kolejnej warstwie umieszczono chipset. Matryca anten jest przylutowana do niego w taki sam sposób jak montuje się układy w obudowach BGA. Materiał podłoża to dielektryk o małej stałej dielektrycznej oraz niewielkich stratach. Aktualnie jest dostępnych kilka technologii integracji komponentów, które dobrze nadają się do wykonania modułu BF w sposób pokazany na rysunku. Wśród nich można wymienić: LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics), hybrydową LTCC, MLO (Multi-Layer Organics), LCP (Liquid Crystal Polymer) i inne. Rozważając całkowity koszt rozwiązania, produkcję masową oraz dojrzałość technologii, najlepsza wydaje się technologia MLO, ale nie jest to obligatoryjne.

Na rysunku 13a pokazano wymiary obszaru antenowego. Zgodnie z informacją zawartą w źródle, na jego podłożu zastosowano materiał o oznaczeniu RO4003C ze względu na dobre właściwości w zakresie fal GHz. Wymiary obliczone dla fali o częstotliwości 28 GHz wynoszą  $W=25$  mm,  $L=18$  mm z zachowaniem pewnego marginesu. Każdy moduł formowania wiązki BF jest połączony z płytą główną za pomocą przewodu ekranowanego oraz złączy



ekranowanych zamontowanych na płytce modułu i płyty głównej. Ułatwia to ewentualny serwis oraz zmianę konfiguracji anten lub rozmieszczenia modułów w razie konieczności. Należy jednak przy tym pamiętać o kilku krytycznych parametrach rozmieszczenia modułów. Po pierwsze, odstęp pomiędzy modułami ( $d_{ISOL}$ ) powinien być odpowiednio duży (powyżej  $\geq 1,5\lambda_0$  lub 16 mm). Po drugie, jeśli wspomniany odstęp pomiędzy modułami jest zachowany, to zależnie od fizycznych wymiarów urządzenia można ich zamontować więcej osiągając lepsze parametry MIMO. Zapewne nie da się tego zrobić w smartfonie, ale warto rozważyć konstruując tablet lub komputer przenośny (rysunek 14 i 15).

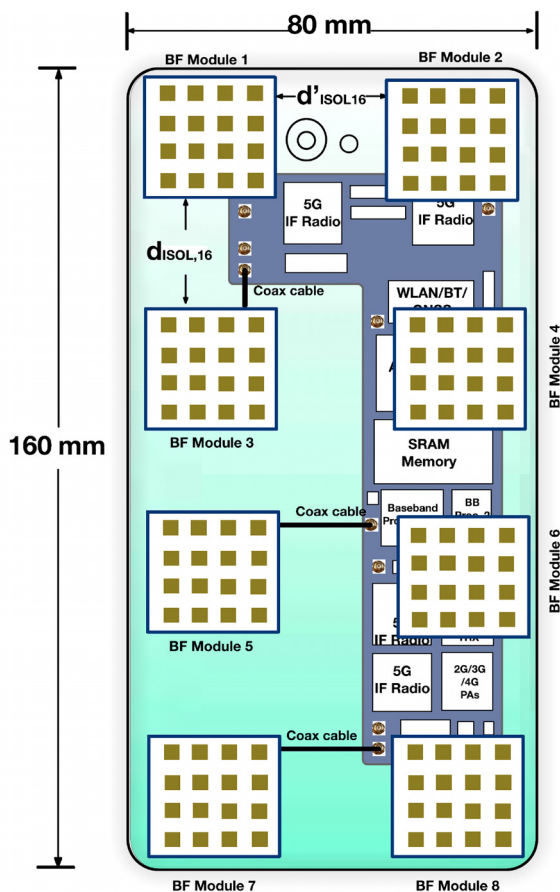
Jak wspomniano wcześniej, wiele modułów formowania wiązki musi koegzystować w obudowie urządzenia. Z tego punktu widzenia dużego znaczenia nabiera budowa urządzenia pod względem właściwości termicznych – musi ona zapewniać rozpraszanie znacznych ilości ciepła generowanego przez moduły BF oraz wzmacniacz radiowy. Złe „rozwiązania termiczne” doprowadzą do szybkiego wzrostu temperatury i obniżenia jego trwałości lub uszkodzenia w krótkim czasie.

Do wytworzenia chipsetu radiowego można użyć więcej niż jednego procesu technologicznego, a tym samym więcej niż jednej struktury półprzewodnikowej. Bazując na dostępnych obecnie technologiach produkcji układów półprzewodnikowych, należy spodziewać się, że całkowita powierzchnia zajmowana przez chipset będzie miała wymiary około 10 mm×10 mm. Grubość modułu pokazanego na rysunku 13a z uwzględnieniem miniaturowych złącz oraz grubości podłoża anteny i płytki drukowanej będzie wynosiła około 1,5 mm. Na płycie drukowanej mogą być wykonane anteny różnego rodzaju, zależnie od specyficznych wymagań aplikacji. Mogą to być anteny paskowe w formie ścieżek o kształcie zaokrąglonym lub prostokątnym, Yagi-Uda, planarne inverted-F i inne. Tak długo, jak spełniają one wymagania stawiane przez obszar antenowy, mogą być używane w architekturze DPA-MIMO.

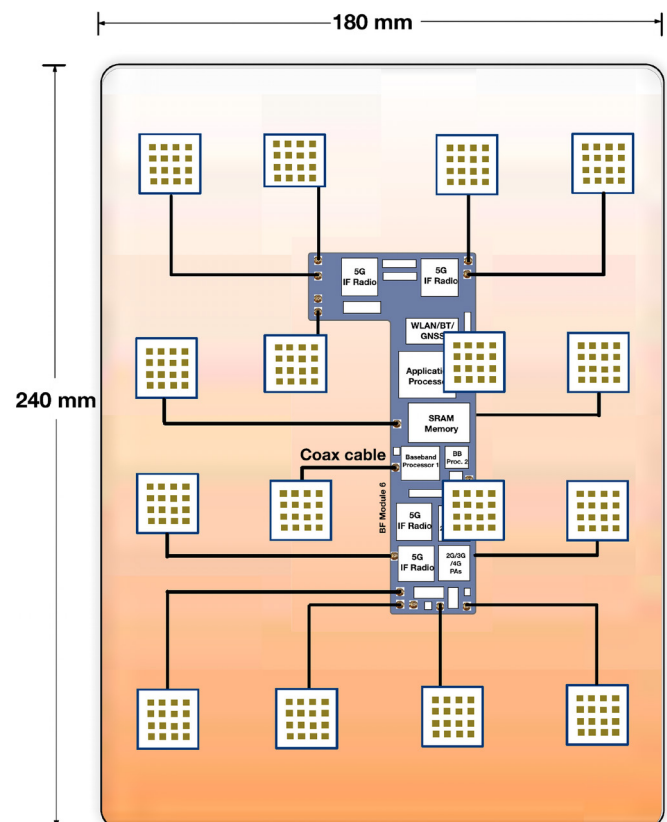
Inną ważną opcją proponowanego rozwiązania obwodu RF jest dzielona architektura urządzenia 5G. Schemat blokowy rozwiązania pokazano na **rysunku 16**. Moduł BF integruje nie tylko aktywny obszar antenowy w celu formowania wiązki, ale również umożliwia konwersję częstotliwości w kierunkach *uplink* oraz *downlink*. Pracując w kierunku *downlink*, moduł BF przekształca sygnał z górnego zakresu fal milimetrowych 5G w sygnał o częstotliwości pośredniej, a w kierunku *uplink* sygnał o częstotliwości pośredniej w fale milimetrowe. W ten sposób transmisja danych z wykorzystaniem pasm o różnej częstotliwości nie wymaga żadnych zmian na płytce bazowej.

Regulatory LDO zamontowane na płycie modułu BF dostarczają napięcia do zasilania różnych zamontowanych na niej układów. Napięcie zasilające jest dostarczane przez płytkę bazową wraz z sygnałem za pomocą kabla koncentrycznego. Każdy element anteny jest połączony z odpowiadającym mu doprowadzeniem za pomocą przełącznika SPDT, który zapewnia duplex w dziedzinie czasu. Wzmacniacz wyjściowy PA oraz małoszumowe wzmacniacze wejściowe LNA są odpowiednio włączone w torach *uplink* oraz *downlink*. Są one poprzedzane przez kontrolowane cyfrowo przesuwniki fazowe (DCPS), które określają rozdzielczość wiązki sterującej. Dla modułu radiowego IF zastosowano architekturę o konwersji bezpośredniej. Wzmacniacz o regulowanym wzmacnieniu (VGA) pełni funkcję układu automatycznej regulacji wzmacnienia (AGC), dopasowując sygnał do zakresu dynamiki konwertera ADC. Dla potrzeb multipleksowania FDD bazującego na wykorzystaniu modułu formowania wiązki, przełączniki SPDT oraz filtry pracujące w trybie TDD są zastępowane przez dipleksery, jak pokazano na **rysunku 17**.

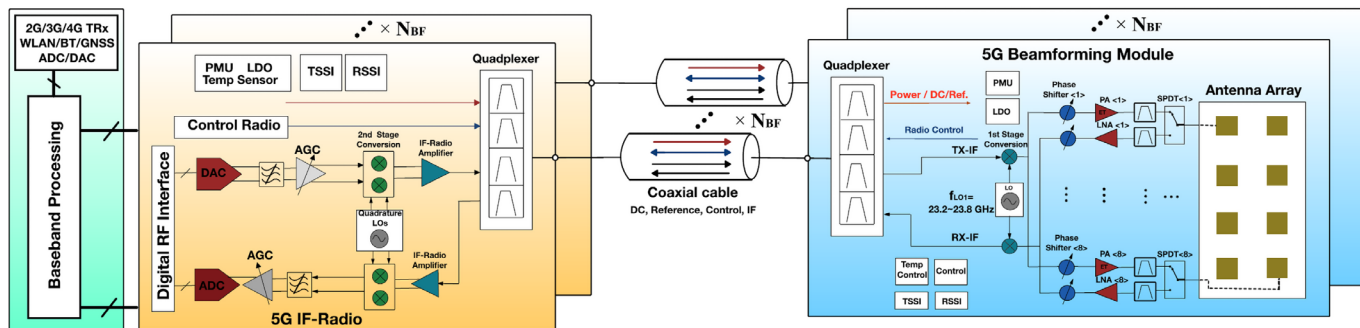
Konwerter ADC zastosowany w module umożliwia przetwarzanie sygnału o szerokim spektrum częstotliwości przy rozdzielczości zależnej od aktualnej aplikacji. W technologii 5G stosuje się modulację 256-QAM, co wymaga rozdzielczości 12-bitowej lub lepszej. Oprócz tego jest wymagany szeroki zakres dynamiki, ponieważ poziom sygnału odbiornika toru radiowego rozciąga się od -25 dBm do -110 dBm. Wymóg szerokopasmowego VGA o szerokim zakresie



Rysunek 14. Propozycja rozmieszczenia 8 modułów BF złożonych z 4×4 anten



Rysunek 15. Propozycja rozmieszczenia 16 modułów BF złożonych z 4×4 anten na tylnej ścianie tabletu



Rysunek 16. Schemat blokowy urządzenia 5G

dynamiki można złagodzić dzięki zastosowaniu przetwornika ADC o dobrej jakości. Uwzględniając wymagania jakościowe, prędkość przetwarzania, rozdzielczość, miniaturowe wymiary oraz zakres dynamiki, można dobrać konwerter o prędkości przetwarzania 1,6 GSa/s zajmujący powierzchnię 0,9 mm<sup>2</sup> (sama struktura, bez obudowy), pobierający około 37,7 mW. Innymi słowami, taki przetwornik zapewnia fizyczną przepustowość danych 10,8 Gb/s i jest idealny do demodulacji sygnału 256-QAM.

Komponenty przeznaczone do budowania aparatów 5G są już powszechnie dostępne, jednak aby zbudować takie urządzenie, trzeba zaangażować wiele sił i środków, ponieważ jego zaprojektowanie wymaga zespołu specjalistów integrującego różne umiejętności. Od obudowy, poprzez obszary antenowe i techniki multipleksowania sygnału radiowego, aż do modułu pośredniej częstotliwości i właściwego procesora aplikacji. Wydaje mi się jednak, że dla użytkownika aparatu niewiele się zmieni – obsługa transmisji będzie odbywała się na poziomie firmware'u, bez angażowania systemu operacyjnego, który jedynie będzie „klientem” transmisji, korzystając z nowych możliwości.

## Podsumowanie

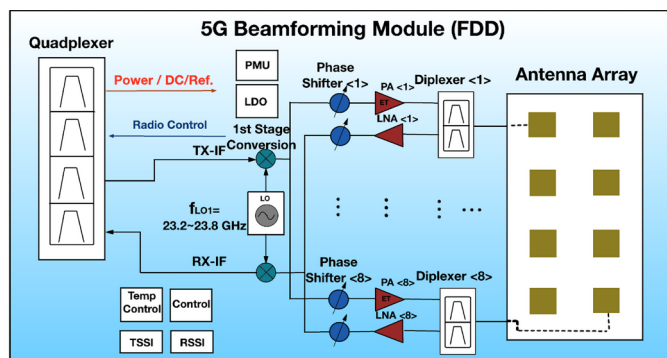
W cyklu artykułów starano się przybliżyć problematykę projektowania urządzeń mobilnych pracujących w sieci 5G. Zapewne większość

z nas, konstruktorów elektroników będzie miała do czynienia głównie z gotowymi modułami, jednak znajomość chociażby podstawowych zasad budowania urządzeń pomoże w ich poprawnym użytkowaniu i aplikowaniu. Ważną innowacją dotyczącą tych urządzeń jest sposób wykonania toru radiowego z podziałem na płytę główną oraz moduły formowania wiązki BF. Jest to całkowicie odmienne podejście niż dotychczas stosowane w aparatach 4G, gdzie na płytce głównej były zintegrowane procesor i tor radiowy. Niewykluczone, że niektórzy producenci dla obniżenia kosztów produktu nadal będą stosować tę technikę, ale montaż modułów RF na tylnej ścianie urządzenia wydaje się rozwiązaniem zoptymalizowanym pod kątem rozmieszczenia anten oraz wykorzystania dostępnych możliwości.

**Jacek Bogusz, EP**

Bibliografia:

1. „5G new radio network. Uses cases, spectrum, technologies and architecture”, 2016, Nokia white paper
2. „Opportunities in 5G: the view from eight industries”, Ericsson Survey Report, 2016
3. „5G empowering vertical industries”. the 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G-PPP) Technical Report, 2016
4. „Study on scenarios and requirements for next generation access technologies”, 3GPP Technical Report TR38.913, ver. 14.2.0, Release 14, 2017
5. A. A. Zaidi, r. Baldemair, H. Tullberg, H. Bjarkeggen, L. Sundstrom, J. Medbo, C. Kilinc, and I. D. Silva, „Waveform and numerology to support 5G services and requirements”, IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 11, 2016
6. „Phased Array Antennas & The Roadmap to 5G Wireless”, <http://bit.ly/2XFHcJj>, lipiec 2017
7. „Designing for the future: the 5G NR physical layer”, <http://bit.ly/2tTlCG>
8. Sampson Hu, David Tanner, „Building Smartphone Antennas That Play Nice Together. 3D manufacturing can defeat the interference problem inside smart devices”, <http://bit.ly/2HiqxWr>
9. Yiming Huo, Xiaodai Dong, And Wei Xu, „5G Cellular User Equipment: From Theory to Practical Hardware Design”, IEEE Access Journal, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2017.2727550



Rysunek 17. Schemat blokowy modułu BF pracującego w trybie multipleksowania TDD

REKLAMA

**ELEKTRONIKA  
PRAKTYCZNA**  
na facebook  
<https://www.facebook.com/ElektronikaPraktyczna>