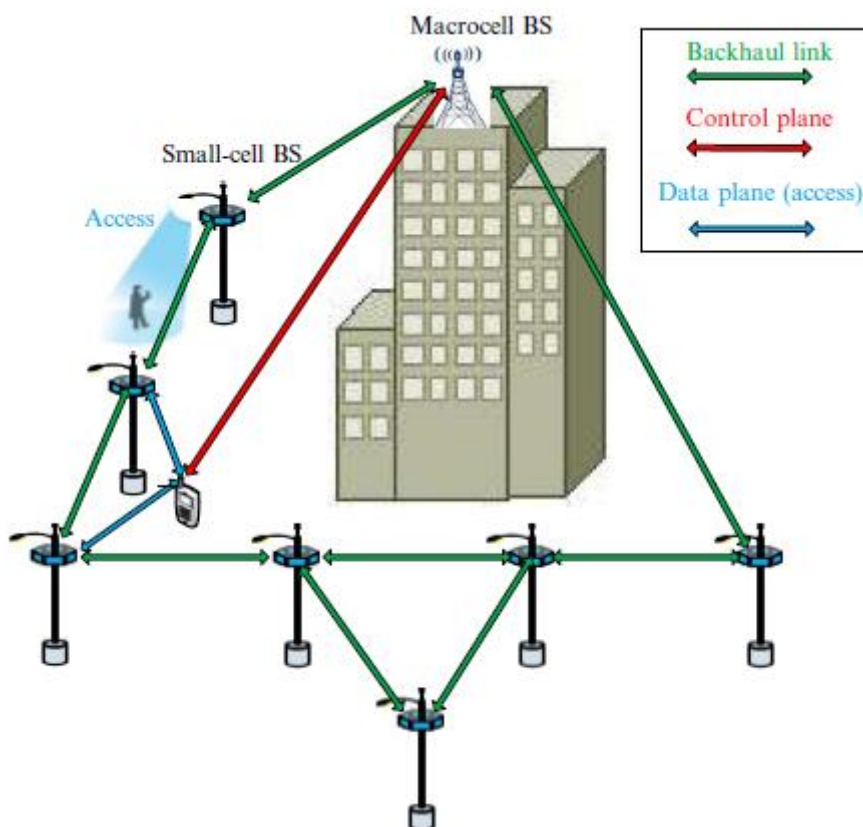


Projekt Fronthaul dla mmWave massive MIMO 12

WPROWADZENIE

Gwałtowny popyt na ruch stanowi wyzwanie dla obecnych sieci komórkowych, w tym najbardziej zaawansowana sieć czwartej generacji (4G). Panował konsensus, że przyszłe sieci 5G powinny realizować cele 1000-krotnej wydajności systemu, 100-krotnie większej wydajności energetycznej i 10-krotnie niższych opóźnień w ciągu następnych 10 lat .Aby zrealizować tak agresywną wizję 5G, masywna heterogeniczna sieć wielowejściowa (MIMO) oparta na falach milimetrowych (mmWave) (HetNet) została uznana za obiecujące rozwiązanie umożliwiające korzystanie z gigabitów na sekundę, bezproblemowe pokrycie i ekologiczną komunikację . Dla takiej sieci HetNet, jak pokazano na rysunku



stacja bazowa makrokomórki (BS) zapewnia usługę sygnalizacji kontrolnej dla dużego obszaru pokrycia przy użyciu konwencjonalnego pasma niskiej częstotliwości, podczas gdy małe stacje BS gęsto rozmieszczone w gorących punktach (np. W budynkach biurowych), centra handlowe, apartamenty mieszkalne) specjalizują się w szybkiej transmisji danych o ograniczonym zasięgu. Taka sieć HetNet może zapewnić odciążenie ruchu z makrokomórek, ponieważ znaczna większość zapotrzebowania na ruch pochodzi z tych gorących punktów. Co więcej, scentralizowana architektura sieci dostępu radiowego może być zintegrowana z HetNet w celu ulepszenia transmisji warstwy fizycznej, przekazywania, planowania itd., Gdzie ultradensowne małe komórki są uważane za zdalną głowicę współczynnika (RRH), a makrokomórka BS jest uważana za jednostka pasma podstawowego (BBU). Tutaj łącze transmisyjne między RRH i BBU jest nazywane fronthaul. Jednak fronthaul w HetNet stanowi wyzwanie dla implementacji HetNet. Oczywiście jest, że wraz ze wzrostem liczby ultradensownych małych komórek wymagana jest sieć fronthaul o dużej przepustowości i dobrej skalowalności, aby sprostać wykładniczo rosnącemu zapotrzebowaniu na dane mobilne. Co więcej,

1000-krotny wzrost wydajności sieci komórkowej 5G w przyszłej dekadzie wskazuje na prognozę wzrostu pojemności komórkowej wynoszącą około 115,44% średniej złożonej szybkości wzrostu (CAGR). W związku z tym koszt instalacji sieci fronthaul o bardzo dużej przepustowości może być nie do pominięcia. Jak dotąd światłowód był szeroko stosowany w istniejących sieciach komórkowych do fronthaul makrokomórek. Jednak instalacja i dzierżawa światłowodowej sieci fronthaul może wiązać się z wysokimi kosztami i może nie być odpowiednia dla sieci 5G HetNet. Z drugiej strony, bezprzewodowy fronthaul został uznany za podstawę dla fronthaul w HetNet. Jeśli chodzi o bezprzewodowy fronthaul, jak dotąd nie ma ujednoliconego standardu, a istniejące rozwiązania obejmują zakres od poniżej 6 GHz bez linii wzroku (NLOS) do 70 GHz w paśmie E (LOS). W przypadku bezprzewodowego fronthaulu pracującego w pasmach o niskiej częstotliwości, jego wdrożenie jest łatwe ze względu na dobrą charakterystykę propagacji kanału w pasmach niskiej częstotliwości dla sygnałów NLOS, a tym samym dłuższe łącze fronthaul. Niestety, ograniczone pasmo częstotliwości mikrofal poniżej 6 GHz wskazuje na kompromis między zasobami widma dla łącza dostępowego i dla łącza fronthaul. W przypadku pasm wysokich częstotliwości, zwłaszcza pasm częstotliwości mmWave w paśmie E i V, można wykorzystać dużą ilość niewykorzystanych zasobów widma dla łącza fronthaul, jednak bez dojrzałych rozwiązań dla fronthaul w HetNet. Dodatkowo, ze względu na małą długość fali mmWave, dużą liczbę anten można z łatwością zastosować do fronthaul mmWave, co może poprawić kierunkowość sygnału i niezawodność łącza. Na tym tle MIMO mmWave ogromnie wyłania się jako obiecujący kandydat zarówno na fronthaul, jak i dostęp w przyszłych sieciach komórkowych 5G. Dziedzicząc zalety konwencjonalnego masywnego MIMO, mmWave Masywny MIMO ma elastyczne formowanie wiązki, multipleksowanie przestrzenne i różnorodność, wciąż przy niskim koszcie sprzętu i zużyciu energii. W związku z tym mmWave Masywny MIMO zapewnia nie tylko lepszą niezawodność łącza fronthaul, ale także nową architekturę sieci fronthaul, w tym elastyczną topologię sieci i schemat harmonogramowania. Zalety masywnego fronthaul mmWave opartego na technologii MIMO dla ultradensywnie rozmieszczonych małych komórek BS są wymienione w następujący sposób:

Duża pojemność i niedroga: Duża ilość niewykorzystanych fal mmWave, w tym nielicencjonowane pasmo V (57–67 GHz) i lekko licencjonowane E pasmo (71–76 GHz i 81–86 GHz) (szczegółowe przepisy mogą się różnić w zależności od kraju), może zapewnić potencjalną szerokość pasma transmisji w paśmie gigahercowym. Na przykład, przepustowość fronthaul większa niż 1 Gb/s może być obsługiwana w kanale 250 MHz w paśmie E.

Odporność na zakłócenia: Strefa komfortu odległości transmisji dla pasma E wynosi do kilku kilometrów ze względu na tłumienie deszczu, natomiast dla pasma V wynosi około 500–700 m z powodu zarówno deszczu, jak i tłumienia tlenu. Ze względu na duże straty ścieżki, mmWave nadaje się do ultradensownego rozmieszczenia małych komórek w przyszłym HetNet, gdzie oczekuje się lepszego ponownego wykorzystania częstotliwości i zmniejszenia zakłóceń międzykomórkowych. Należy podkreślić, że tłumienie deszczu nie jest dużym problemem dla mmWave używany w fronthaul. Jeśli weźmiemy pod uwagę bardzo obfite opady deszczu, wynoszące 25 mm / h, tłumienie deszczu wynosi tylko około 2 dB w paśmie E na odcinku 200 m połączenia czołowego w typowej miejskiej sieci HetNet.

Mały rozmiar: mała długość fali mmWave oznacza, że jest masywne anteny można łatwo wyposażyć zarówno w makrokomórki BS, jak i małe komórki BS, co może poprawić kierunkowość sygnału i skompensować poważne straty ścieżki mmWave, aby z kolei uzyskać większy zasięg. W związku z tym kompaktowy sprzęt typu fronthaul firmy mmWave można łatwo wdrożyć w niedrogich lokalizacjach (np. Słupach oświetleniowych, ścianach budynków i dworcach autobusowych) i przy krótkim czasie instalacji [2]. Przestrzenne multipleksowanie przy niskim koszcie: w porównaniu z konwencjonalnymi systemami multiantenna mmWave ograniczonymi do transmisji punkt-punkt, pojawiająca się technika

mmWave Masywny MIMO może obsługiwać transmisję wielu użytkowników i transmisję wielostrumieniową dla każdego węzła, co może skutecznie realizować multipleksowanie przestrzenne. Co więcej, konstrukcja nadajnika-odbiornika ze znacznie mniejszą liczbą łańcuchów pasma podstawowego niż w przypadku anten może znacznie obniżyć koszt sprzętu i pobór mocy systemów mmWave MassMIMO.

Najpierw przedstawimy przegląd istniejących rozwiązań fronthaul, zbadamy wymagania rynkowe sieci fronthaul dla przyszłej sieci 5G HetNet, przedstawimy koncepcję sieci fronthaul z siatką mmWave, w której zostaną szczegółowo omówione niektóre zagadnienia, w tym techniki antenowe, projektowanie formowania wiązki, protokół duplexowania, in-band fronthaul i tak dalej.

PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ FRONTHAUL

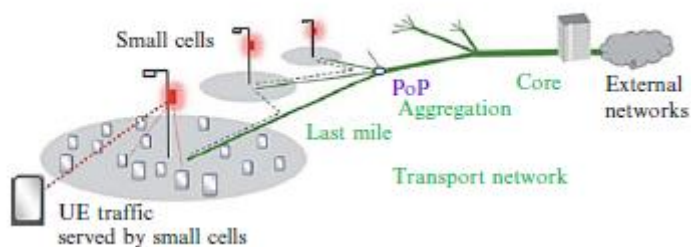
W tej sekcji przedstawimy przegląd istniejących rozwiązań fronthaul. W szczególności najpierw zbadamy kategorię istniejących rozwiązań fronthaul. Następnie omówimy topologię sieci fronthaul. Ponadto przedstawimy wady i zalety różnych zasobów widma wykorzystywanych na potrzeby fronthaul. Na koniec wyjaśnimy, dlaczego i jak wykorzystamy pasmo mmWave do fronthaul

KATEGORIA ROZWIĄZAŃ FRONTHAULOWYCH

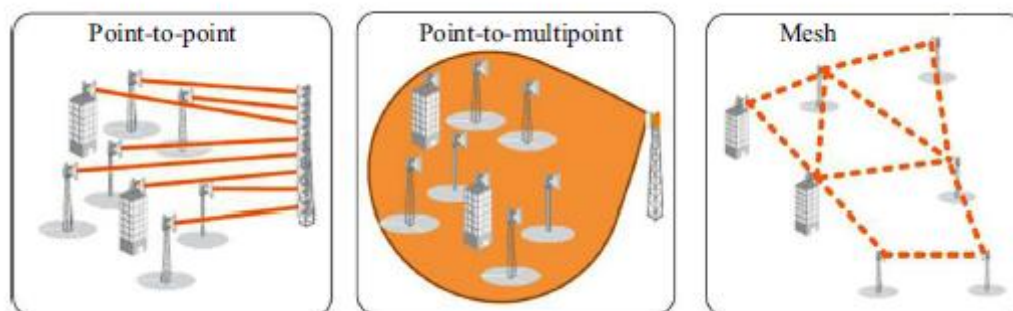
W przypadku sieci HetNets MIMO typu mmWave ultradensified małych komórek BS wykorzystują fronthaul przewodowy i / lub bezprzewodowy do przesyłania danych o ruchu do sieci rdzeniowej [9]. W przypadku przewodowej sieci fronthaul, światłowód będzie stanowił mniejszość łączy fronthaul w HetNet ze względu na kosztowną instalację i dzierżawę. Należy zwrócić uwagę, że makrokomórka i / lub mała komórka z dostępnymi światłowodami, które są zwykle opracowywane z istniejących stacji bazowych 2/3/4G, są niezbędne do rozmieszczenia ultradensified stacji BS o małych komórkach, a także do projektowania czołowych stacji bazowych sieci, ponieważ te makrokomórki i / lub małe komórki BS z dostępnością światłowodów zapewniają lokalizację punktów agregacji ruchu do sieci rdzeniowej sieci fronthaul. Z drugiej strony, bezprzewodowy fronthaul zdominuje łączy fronthaul w HetNet, na którym skupiamy się w tu. Szczególnie dla bezprzewodowej sieci fronthaul, spektrum opcji fronthaul może wahać się od mikrofal (poniżej 6 GHz) do mmWave. Zgodnie z topologią sieci fronthaul, opcje „ostatniej mili” można podzielić na punkt-punkt (PtP), punkt-wielopunkt (PtMP) i siatkę; w zależności od jakości propagacji kanałów bezprzewodowych, opcje fronthaul można podzielić na LOS i NLOS. Wśród tych rozwiązań rozwiązanie NLOS typu fronthaul poniżej 6 GHz może znacznie poprawić elastyczność wdrażania małych komórek. Ponadto fronthaul może współdzielić ten sam zasób transmisji (np. Nośną LTE) z dostępem używanym przez użytkowników, co może znacznie obniżyć koszt wdrożenia fronthaul za pomocą pojawiającego się modelu licencjonowanego, zwanego autoryzowanym dostępem współdzielonym (ASA). ASA umożliwia sieci fronthaul dostęp do niewykorzystywanego widma na zasadzie współdzielenia bez ingerencji w zasiedziały posiadaczy widma. Sieć fronthaul z ASA ma wyłączne prawa użytkownika widma tam, gdzie i kiedy widmo nie jest wykorzystywane przez operatora zasiedziały. Ramy te zapewniają przewidywalną jakość usług zarówno operatorowi zasiedziały, jak i fronthaulowi z licencjobiorcą ASA. ASA może potencjalnie uwolnić setki megaherców wysokiej jakości widma dla sieci fronthaul. Jednak przy coraz rzadszym widmie poniżej 6 GHz, sieć fronthaul oparta na mmWave może zapewnić bardziej zrównoważoną strategię dla przyszłych sieci komórkowych.

TOPOLOGIA SIECI FRONTHAUL

Całą sieć fronthaul można podzielić na architekturę drzewiastą i architekturę gałęzi, jak pokazano na rysunku



co nie jest tematem tej części. Skupiamy się na łączności „ostatniej mili” w sieci fronthaul, którą można podzielić głównie na PtP, PtMP i mesh, jak pokazano na rys. 12.3 [9].



W przypadku topologii PtP istnieje dedykowany kanał częstotliwości radiowej (RF) łączy między punktem agregacji a punktem końcowym. Natomiast w przypadku topologii PtMP kanał RF w punkcie agregacji jest współdzielony przez łączy łączące wiele punktów końcowych. Ponadto struktury topologii można rozszerzyć na topologie łańcuchowe, drzewiaste i siatkowe, które są określane przez wymagania sieci fronthaul. W przypadkach, w których nie ma bezpośredniego łączy fronthaul łączącego małą komórkę BS i punkt agregacji z powodu fizycznej blokady, można rozważyć wieloskokowe łączy fronthaul, w którym można zastosować topologie, takie jak łańcuch i siatka. Tego rodzaju topologie zazwyczaj wymagają, aby stacje BS o małych komórkach jednocześnie obsługiwały wiele łączy fronthaul i co najmniej jedną z małych stacji BS do połączenia z siecią rdzeniową, na przykład przez makrokomórkę BS, w celu dalszej łączności sieci fronthaul wśród tych małych komórek BS.

ZALETY I WADY RÓŻNYCH ZASOBÓW WIDMOWYCH DLA FRONTHAUL

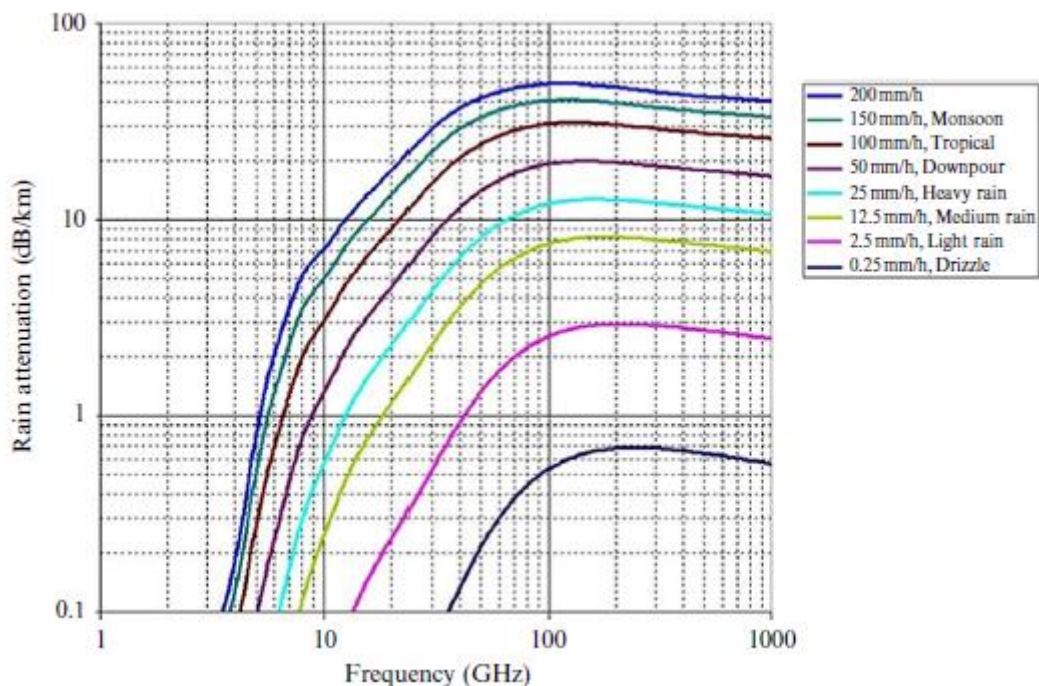
W tej sekcji przedstawimy wady i zalety różnych zasobów widma dla łączy fronthaul. Biały przestrzeń telewizyjna (TVWS) (poniżej 800 MHz) może zapewnić duży zasięg łączy ze względu na dobre właściwości propagacyjne. Dostępny kanał w TVWS maszerokość pasma 6/7/8 MHz różni się w zależności od kraju. Jednak dostępność TVWS jest dużym problemem, a przepustowość jest ograniczona, co może nie spełniać wymagań fronthaul dla ultradensownego wdrażania małych komórek. Licencjonowane widmo poniżej 6 GHz może zapewnić łączy czołowemu NLOS zarówno topologie PtP, jak i PtMP. Jednak dostępne licencjonowane widmo poniżej 6 GHz jest drogie i ograniczone. W związku z tym licencjonowane widmo poniżej 6 GHz może obsługiwać tylko ograniczoną przepustowość fronthaul z powodu wąskiej szerokości pasma. W topologii PtMP, ze względu na dobre właściwości propagacji, ograniczone ponowne wykorzystanie częstotliwości może dodatkowo zmniejszyć dostępną przepustowość łączy fronthaul. Nielicencjonowane widmo poniżej 6 GHz jest bardziej popularne w obecnych praktykach przemysłowych. W rzeczywistości było wiele rozwiązań typu fronthaul działających w paśmie 2,4 i 5 GHz przez protokół PtMP. Szczególnie rozwiązania z nielicencjonowanym widmem NLOS poniżej 6 GHz charakteryzują się dużą

skalowalnością biznesową z perspektywy krótkoterminowej. Jednak cenne nielicencjonowane widmo poniżej 6 GHz może nie wystarczyć do obsługi 1000-krotnego wzrostu przepustowości radiowych sieci dostępowych wymaganych przez przyszłe sieci komórkowe. Z jednej strony, zakłócenia w tych szeroko wykorzystywanych pasmach były bardzo duże, co wskazuje na rozczarowującą wydajność fronthaul z nielicencjonowanym widmem poniżej 6 GHz, zwłaszcza w przypadku ultradensownego rozmieszczenia małych komórek na obszarach miejskich. Na innym poziomie potencjalne nielicencjonowane widmo poniżej 6 GHz może być dopuszczone do niektórych nowatorskich technik 5G, w tym masywnego MIMO. W konsekwencji nielicencjonowane widmo poniżej 6 GHz może być wykorzystywane jako tymczasowa przerwa lub zapasowe, gdy licencjonowane widmo poniżej 6 GHz lub LOS fronthaul jest niedostępne [9]. Mikrofałe PtP / PtMP (6–57 GHz) są szeroko stosowane w istniejących sieciach komórkowych 3G i 4G, ale wymagania dotyczące fronthaul w przyszłych sieciach komórkowych 5G szybko wyczerpią dostępną pojemność. W porównaniu z widmem poniżej 6 GHz, mikrofałe PtP / PtMP wymagają NLOS jako rozwiązań pracujących w paśmie V i E. Jednak może ucierpieć z powodu większego układu antenowego, mniejszej przepustowości łącza fronthaul i droższego widma w porównaniu z tymi pracującymi w paśmie V i paśmie E. Z drugiej strony, mikrofalowe PtP / PtMP mogą zapewnić większą odległość łącza w porównaniu z pasmem V i pasmem E, co może obsługiwać dłuższe łącza fronthaul (np. W wiejskich wdrożeniach małych komórek) kosztem mniejszego ponownego wykorzystania widma, zwłaszcza w scenariuszach odbanowych. Największym zainteresowaniem cieszy się pasmo V (57–67 GHz), ponieważ jest ono nielicencjonowane. Tłumienie atmosferyczne i tlenowe ograniczają łącza czołowe obsługiwane w paśmie V [9]. Jednak ta wysoka utrata ścieżki sprawia, że jest kompatybilny z ultradensownym wdrażaniem małych komórek w przyszłych sieciach komórkowych 5G ze względu na mniej zakłóceń i lepsze ponowne wykorzystanie widma. Co więcej, nie ma wyraźnego stwierdzenia na temat podziału na kanały i konstrukcji anteny w paśmie V, co wskazuje na bardziej elastyczne rozwiązanie typu fronthaul i znacznie mniejszy współczynnik kształtu sprzętu. Jednak wymagany LOS może stanowić wyzwanie dla rozmieszczenia małych komórek BS. Ponadto, ze względu na brak licencji, sprzęt fronthaul wymaga algorytmów dynamicznego unikania zakłóceń w celu łagodzenia i tolerowania zakłóceń bez nadzoru regulatora. Pasma E (71–76 GHz i 81–86 GHz) to widmo objęte niewielką licencją o określonej kanalizacji i konstrukcji anten. Na przykład regulacja FCC wymaga, aby minimalny zysk anteny w paśmie E wynosił 43 dBi, co praktycznie określa rozmiar anteny na około 1 stopę i prowadzi do większych anten w porównaniu z antenami w paśmie V. Z drugiej strony, ponieważ jest to widmo licencjonowane, łącza fronthaul w paśmie E jest licencjonowane i rejestrowane w bazie danych, co pozwala skutecznie unikać zakłóceń i zarządzać nimi.

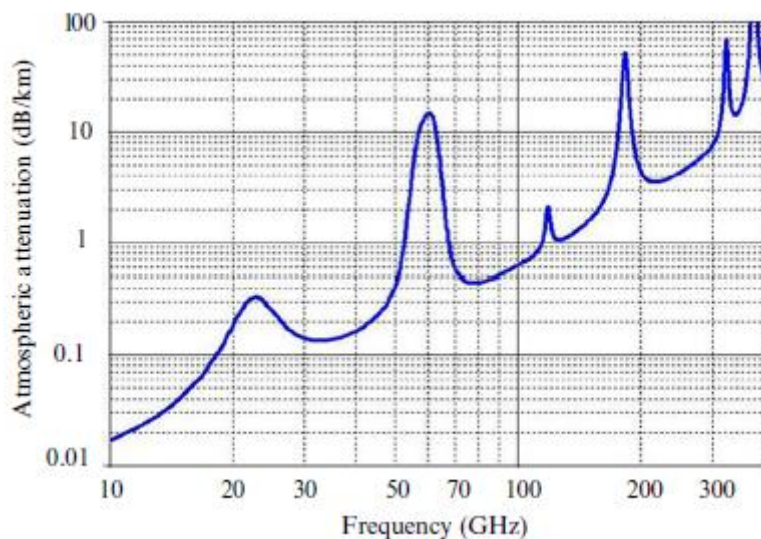
DLACZEGO I W JAKI SPOSÓB WYKORZYSTUJEMY mmWave DLA FRONTHAUL?

Wykładniczy wzrost wymagań dotyczących przepustowości 5G napędza widmo używane do fronthaul z konwencjonalnego pasma mikrofalowego do widma mmWave. Panuje zgoda co do tego, że nielicencjonowane pasmo V i lekko licencjonowane pasmo E są obiecującymi kandydatami do obsługi fronthaul dla przyszłych sieci komórkowych 5G ze względu na duże niewykorzystane nielicencjonowane lub słabo licencjonowane pasmo, łącza fronthaul LOS z ponownym wykorzystaniem wysokiej częstotliwości, a także niskie zakłócenia i małe komponenty RF. Nawet w scenariuszach NLOS, wieloskokowa sieć fronthaul lub inne cenione topologie fronthaul (łańcuch, siatka) mogą być wykorzystane do rozwiązania tego problemu z odpowiednią jakością usług (QoS). Można zauważyć, że nie ma dostępnych rozwiązań PtMP i mesh w mmWave do obsługi elastycznej sieci fronthaul. Jak dotąd mikrofałe PtP i mmWave PtP były używane do wspierania wysokiej przepustowości w makrokomórkach fronthaul od ponad 20 lat. W ostatnich latach IEEE 802.11n i powstający IEEE 802.11ac zostały wykorzystane do realizacji rozwiązania kratowego w nielicencjonowanym sub-6 GHz. W porównaniu z IEEE 802.11n wykorzystującym kanał 40 MHz, 802.11ac oferuje znaczną poprawę danych z kanałami 80 i 160 MHz. Co więcej, dzięki wprowadzeniu modulacji 256 QAM, szczytowa

szybkość uzyskiwana w standardzie 802.11ac może być wyższa niż w standardzie 802.11n. Jednak zarówno 802.11n i 802.11ac działają na częstotliwości 5 GHz, co jest wyzwaniem ze względu na coraz bardziej zatłoczone widmo i zakłócenia. W związku z tym wydajność fronthaul (np. Wykorzystanie 256 QAM) i przepustowość mogą nie być gwarantowane w nielicencjonowanym paśmie poniżej 6 GHz [9]. W przypadku rozwiązania mmWave fronthaul, zarówno pasmo V, jak i pasmo E są obiecującymi kandydatami na fronthaul. Wyjaśnimy, dlaczego pasmo V i pasmo E mogą być doceniane w przypadku bezprzewodowego fronthaulu [8]. Pasmo V jest napędzane przez dostawców usług internetowych (ISP) i Wi-Fi Alliance, którzy chcą zmodernizować istniejące urządzenia przy użyciu częstotliwości 60 GHz, aby wykorzystać możliwości biznesowe fronthaul w sieciach komórkowych. Dzięki wykorzystaniu czterech kanałów w standardzie 802.15.3c w zakresie od 57 do 67 GHz, łączna przepustowość dla fronthaul może wynosić do 17 Gb / s przy 16 QAM i 25 Gb / s przy 64 QAM [8]. Jednak regulacja pasma V w niektórych regionach ogranicza moc emitowaną na wyjściu wzmacniacza mocy do 10 dBm [równoważnie, efektywna izotropowo wypromieniowana moc 40 dBm (EIRP)], co może ograniczać najdłuższą odległość obsługiwanego łącza czołowego. Należy podkreślić, że ponieważ pasmo V jest nielicencjonowane, urządzenia fronthaul muszą polegać na algorytmach unikania dynamicznych zakłóceń w celu łagodzenia i tolerowania zakłóceń. E-band jest sugerowany przez małe i średnie przedsiębiorstwa dostarczające dyskretne komponenty high-end i ich integrację w modułach mmWave, dużych dostawców sprzętu i operatorów. Ich motywacją jest obniżenie kosztów urządzeń typu fronthaul i zapewnienie konkurencyjnego przypadku biznesowego typu fronthaul dla małych komórek. Zaletą pasma E jest jego duży, mało licencjonowany zasób widma w zakresie 71–76 GHz i 81–86 GHz dla większości regionów. Na przykład Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych (ETSI) dzieli duże pasmo w paśmie E na wiele kanałów 250 MHz z roczną opłatą za każde łącze i kanał. Donoszono, że skomercjalizowane urządzenie typu fronthaul z antenami 43,5 dBi i 64-QAM może zapewnić przepustowość większą niż 1 Gb / s na dystansie łącza wynoszącym 3,5 km [11]. Zwróć uwagę, że pasmo E jest chronione przed zakłóceniami; to znaczy, jeśli istnieją dwa łącza w tej samej lokalizacji i jedno z nich koliduje z innym, łącze, które zostało zainstalowane jako pierwsze, jest chronione, a drugie łącze zostanie ponownie skonfigurowane, aby zapobiec zakłóceniom lub usunięte. Dwie duże kwestie związane z fronthaulem mmWave to tłumienie deszczu i tłumienie atmosfery, które nie mają oczywiście negatywnego wpływu na fronthaul w scenariuszach z małymi komórkami ze względu na niewielką odległość łącza fronthaul. Przy intensywnym deszczu (25 mm / h) tłumienie ścieżki może wynosić 10 dB / km, jak pokazano na rysunku.



Jeśli weźmiemy pod uwagę bardzo obfite opady deszczu wynoszące 25 mm / h, tłumienie deszczu wynosi tylko około 2 dB w paśmie E, jeśli weźmiemy pod uwagę odległość łącza czołowego wynoszącą 200 m w typowym ultradensie small komórki. Zwykle strefa komfortu odległości transmisji dla pasma E wynosi do kilku kilometrów ze względu na tłumienie deszczu, podczas gdy dla pasma V wynosi około 500–700 m, zarówno z powodu deszczu, jak i tłumienia tlenu, jak pokazano na rysunku



W przypadku praktycznej sieci fronthaul zaprojektowanej do ultradensownego wdrażania małych komórek w przyszłych sieciach komórkowych 5G, naszym wnioskiem jest połączenie pasma V i pasma E.

WYMAGANIA RYNKOWE mmWave FRONTHAUL

W tej sekcji zbadamy wymagania rynkowe dla technologii fronthaul mmWave dla ultradensownego wdrażania małych komórek, w tym całkowity koszt posiadania (TCO), opóźnienie, szybkość transmisji danych i zasięg łącza fronthaul (odległość między lokacjami). Wymagania te wyjaśnia techniczny kierunek rozwiązywania fronthaul dla rozwiązań fronthaul mmWave masywnych opartych na MIMO w

CAŁKOWITY KOSZT WŁASNOŚCI (TCO)

W tej sekcji zbadamy główne czynniki, które mogą mieć wpływ na ostateczny całkowity koszt posiadania sieci fronthaul, a także zostaną przedstawione zalety technologii mmWave fronthaul na całkowity koszt posiadania. Przy coraz gęstszym rozmieszczaniu małych komórek PtMP jest lepszy od PtP ze względu na korzyści finansowe. Konkretnie,

- W przypadku licencjonowanego widma, widmo jest opłacane według regionu w rozwiązaniach PtMP, natomiast płatne przez łącze w rozwiązaniach PtP. Stąd opłata widmowa w roztworach PtMP nie rośnie wraz z gęstością małych komórek.
- Rozwiązania PtP wymagają łącza LOS, co może zwiększyć koszty wdrożenia i instalacji.
- Koszt urządzenia w rozwiązaniach PtP jest droższy, ponieważ dla każdego punktu końcowego wymagany jest dedykowany kanał RF.

Różne koszty TCO dla opcji NLOS i LOS w rozwiązaniach PtMP wynikają z różnych kosztów urządzeń i instalacji. W szczególności rozwiązania PtMP-LOS mają bardziej kosztowną instalację polegającą na ustawieniu anten w żądanym kierunku na obu końcach każdego łącza, gdy rozważana jest transmisja LOS. Z kolei rozwiązania PtMP-NLOS mogą ułatwić instalację dzięki dobrej charakterystyce propagacji, co może ułatwić rozmieszczenie małych komórek i obniżyć koszty instalacji. Ponadto stwierdzono, że koszt rozwiązań PtMP-LOS jest o około 35% wyższy niż koszt rozwiązań PtMP-NLOS [12]. Z drugiej strony koszt widma może nie stanowić dużego problemu, jeśli weźmie się pod uwagę widmo powyżej 3 GHz i unika się opłat za łącze [12,13]. W związku z tym, aby obniżyć całkowity koszt posiadania, sieć fronthaul powinna spełniać kilka następujących zasad:

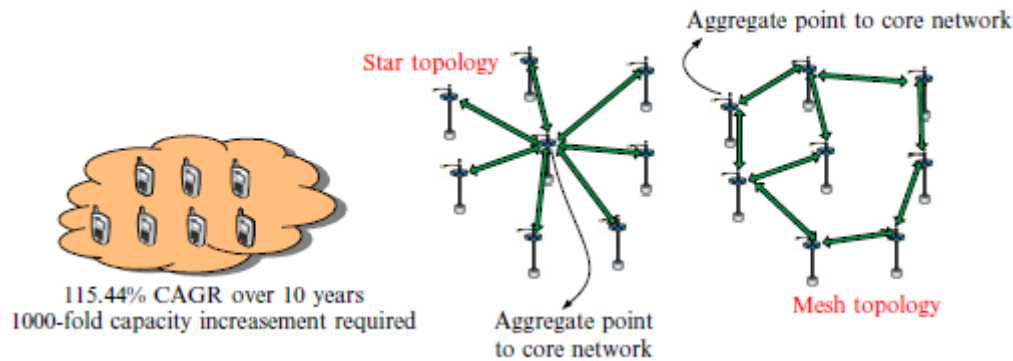
1. Łatwe wdrożenie
2. Wykorzystaj PtMP za obniżoną opłatą za licencjonowane widmo i unikaj cen za łącze
3. Unikaj światłowodu ze względu na wysoki koszt instalacji i dzierżawy

Należy zwrócić uwagę, że widmo poniżej 6 GHz było coraz bardziej zatłoczone i może być nawet przypisane do radiowych sieci dostępowych dedykowanych dla powstających technik 5G, takich jak ogromne MIMO. Jednak fronthaul mmWave, szczególnie przy pomocy nowych technik mmWavemassive MIMO, ułatwi instalację i wdrożenie. Na przykład mmWave ogromne MIMO z algorytmami adaptacyjnego kształtowania wiązki może zbudować łącze fronthaul bez interwencji człowieka, co może zmniejszyć koszt instalacji i uniknięcie nagłej blokady łącza. Co więcej, transmisja wielostrumieniowa i wielopunktowa obsługiwana przez MIMO mmWave ogromne może naturalnie spełniać wymagania rozwiązań PtMP i mesh, co może ułatwić wdrożenie w scenariuszach NLOS [1]. Podsumowując, rozwiązania fronthaul oparte na technologii MIMO firmy mmWave z wysoką przepustowością fronthaul mogą zapewnić topologie PtMP i mesh, a także mogą obniżyć koszty wdrożenia i koszty dzięki elastycznemu kształtowaniu wiązki.

WYMAGANIA PRZEZ PRZEKROTOWE SIECI FRONTHAUL

W tej sekcji zbadamy wymagania dotyczące przepustowości sieci fronthaul do ultradensownego rozmieszczenia małych komórek. Jak wspomnieliśmy, łącze bezprzewodowe zdominuje przyszłą sieć

fronthaul, a wdrożenie nowego światłowodu na potrzeby sieci fronthaul może być kosztowne ze względu na wysokie koszty instalacji i dzierżawy. W związku z tym bezprzewodowa sieć typu fronthaul będzie agregować dane z wielu małych komórek w tym samym klastrze z / do istniejącego światłowodowego punktu obecności (PoP). Na przykład rysunek przedstawia topologie gwiazdy i siatki, w których dane wszystkich małych komórek w tej samej sieci fronthaul ostatecznie wpłyną do istniejącego punktu PoP światłowodu.



Oczywiście, w przypadku takiej sieci typu fronthaul, węzły bliżej punktu PoP światłowodu powinny obsługiwać większą przepustowość typu fronthaul ze względu na skumulowane dane z innych małych komórek. Z drugiej strony liczba istniejących PoP włókien nie wzrośnie, podczas gdy rozmieszczenie małych komórek stanie się gęstsze i gęstsze; to znaczy, gęstość PoP na obszar nie wzrośnie, podczas gdy gęstość przepustowości fronthaul na obszar wzrośnie. W rezultacie przepustowość sieci fronthaul będzie również uwzględniać przewidywany wzrost pojemności komórkowej o około 105,98% CAGR lub 1000 wzrost w ciągu najbliższych 10 lat. Obecnie średnia przepustowość fronthaul wynosi około 35 Mb / s. dla aktualnych przypadków biznesowych dotyczących małych komórek. Zgodnie z 1000-krotnym wzrostem przepustowości w ciągu następných 10 lat, fronthaul powinien sięgać wielu Gb / s. Należy zauważyć, że chociaż istnieje kilka rozwiązań bezprzewodowych, które mogą sprostać przepustowości fronthaul na tym poziomie, rozwiązania te są zwykle ograniczone do fronthaul montowanego na wieży z długimi cyklami planowania i wdrażania. W przypadku przyszłego ultradensownego wdrażania małych komórek oczekujemy ekonomicznego rozwiązania PtMP z przepustowością fronthaul wielu Gpbs i dużą skalowalnością biznesową.

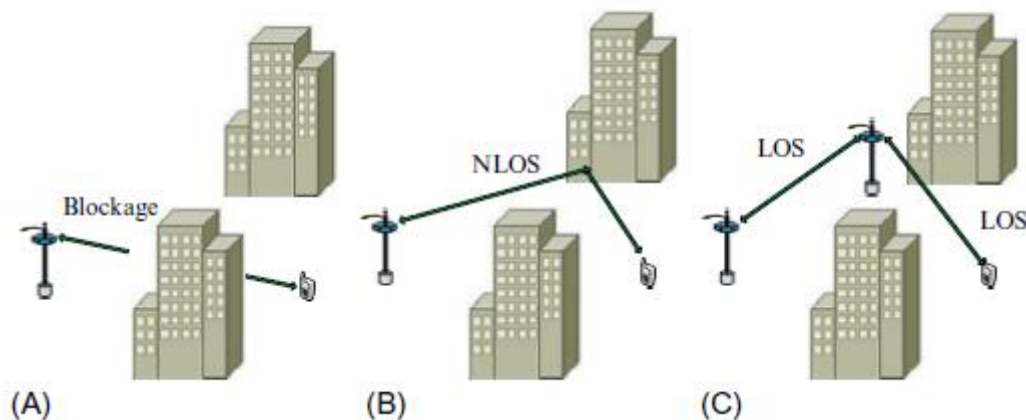
KLASY RUCHU I OPÓŹNIENIE

W tej sekcji zbadamy opóźnienie wymagane przez sieć fronthaul do ultradensownego rozmieszczenia małych komórek. Opóźnienie jest istotnym parametrem, który określa jakość doświadczenia (QoE) dla usług typu end-to-end. Oczywiście jest, że sieć fronthaul doda dodatkowe opóźnienie, które należy wziąć pod uwagę przy projektowaniu sieci fronthaul. W tej sekcji ocenimy opóźnienie wymagane przez sieć fronthaul zgodnie z wymaganiami dotyczącymi opóźnień w najczęstszych scenariuszach i najbardziej rygorystycznych scenariuszach. W szczególności dostarczamy tabelę budżetów opóźnień pakietów dla różnych usług, gdzie opóźnienie uwzględnia pojedyncze łącze od zakończenia użytkownika do bramy pakietów zgodnie z 3GPP TS 23.203, które obejmuje opóźnienie pojedynczego przejścia wynoszące 20 ms przyjęta dla opóźnienia między segmentem radia BS a bramą pakietów. Tutaj rozważymy najbardziej rygorystyczne scenariusze gier jako przykład; typowe opóźnienie dla segmentów opóźnienia od sprzętu użytkownika do sieci szkieletowej może wynosić 20 ms, gdy warunki interfejsu radiowego są dobre. Oznacza to, że dostępne jest tylko 10 ms dla dodatkowego opóźnienia dla sieci fronthaul, które mieści się w rozsądnym zakresie z 20 ms bez ograniczeń sugerowanym przez sojusz najnowszej generacji sieci mobilnych (NGMN), że „Ogólny budżet opóźnień fronthaul w jednym

kierunku od punkt połączenia małej komórki ze sprzętem sieci szkieletowej nie powinien przekraczać 20 ms, dla pakietów 98% dla klas usług o wysokim priorytecie lub w warunkach niezakłóconych. Zwracamy uwagę, że opóźnienie typu fronthaul musi pasować do ogólnego opóźnienia typu end-to-end (E2E) operatora budżet na oferowane usługi”. Zwykle jest to możliwe w przypadku pojedynczego połączenia fronthaul z RAN do sieci szkieletowej wynosi 5 ms, co daje tylko dodatkowe 5–10 ms na pojedynczy przejazd na trasie „ostatniej mili” w najbardziej rygorystycznych scenariuszach. Stąd nasz wniosek jest taki, że opóźnienie „ostatniej mili” powinno być jak najmniejsze i poniżej 5 ms dla pojedynczego przejazdu.

INTERCELL / INTERSITE DISTANCE (ISD)

Tendencja do wdrażania małych komórek jest coraz mniejsza i mniejsza ISD ze względu na ograniczone spektrum dla lepszego ponownego wykorzystania przestrzennego w fronthaul i dostępie. Z perspektywy łącza dostępowego mmWave, jak pokazano na rysunku



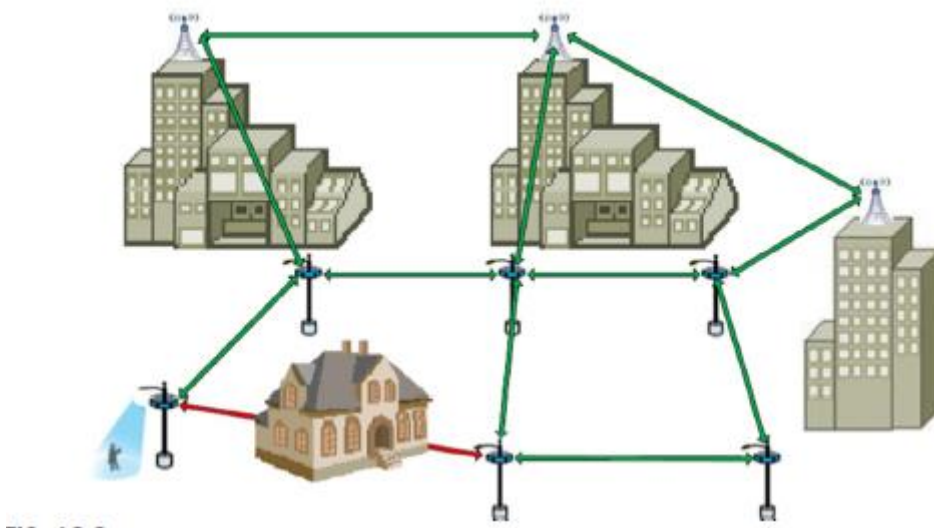
ultradensowne rozmieszczenie małych komórek powinno rozwiązać problem efektu blokowania w łączy dostępowym. Ponieważ każda mała komórka jest wyposażona w urządzenie typu fronthaul do łączenia sieci szkieletowej, efekt blokady w łączy dostępowym mmWave ma również znaczący wpływ na projekt sieci fronthaul. Wykazano, że siła sygnału ścieżek LOS może być o dziesiątki decybeli silniejsza niż w przypadku ścieżek NLOS. Aby rozwiązać problem blokowania, małe komórki powinny być rozmieszczone ultradensownie, aby zagwarantować, że co najmniej jedno łącze komunikacyjne LOS między użytkownikiem a małą komórką lub zbiór wielu łączy dostępowych NLOS może zapewnić zadowalającą jakość kanału. Z drugiej strony, z punktu widzenia niezawodnego ogniwa fronthaul, wysokie tłumienie ścieżki i łącze LOS wymagane w milimetrowej fali fronthaul również ograniczają odległość połączenia fronthaul. Jak wspomnieliśmy, strefa komfortu odległości fronthaul dla pasma E wynosi do kilku kilometrów, a dla pasma V do 500–700 m. Podsumowując, dzięki kompleksowemu uwzględnieniu niezawodności łącza, przestrzennego ponownego wykorzystania zasobów widma i opóźnienia dostępu mmWave w ultradensownym rozmieszczeniu małych komórek, ISD małych komórek w przyszłych sieciach komórkowych może wynosić 50–200 m.

Fala 12,4 mm MASYWNE ROZWIĄZANIE FRONTALNE NA BAZIE MIMO

W tej sekcji opisujemy masywne rozwiązanie fronthaul mmWave oparte na technologii MIMO. Ponadto jego wykonalność w oparciu o wymagania omówione wcześniej i niektóre kluczowe kwestie, w tym techniki antenowe, estymacja kanału, wstępne kodowanie i tak dalej, również zostaną omówione.

KONCEPCJA FRONTHAULU MASYWNEGO MMWave opartego na MIMO

Masywny fronthaul mmWave oparty na MIMO można zilustrować na rysunku, który ma kilka charakterystycznych cech i przepisów:



- W porównaniu z konwencjonalnymi systemami multiantenna mmWave ograniczonymi do komunikacji PtP, pojawiająca się technika mmWave MIMO może obsługiwać transmisję wielu użytkowników, co umożliwi tworzenie topologii kratowej sieci fronthaul. Co więcej, masywny MIMO mmWave, taki jak anteny soczewkowe, może zapewnić wysoce kierunkową transmisję, aby złagodzić utratę ścieżki przy niskich zakłóceniach.

- Topologia mesh fronthaul może zapewnić elastyczną architekturę sieci fronthaul, która może efektywnie przystosować się do różnych wdrożeń ultradensownych małych komórek. Ponadto sugerujemy mniej niż pół godziny czasu instalacji na meblach ulicznych z minimalnie przeszkolonym instalatorem, a urządzenie fronthaul jest samokonfigurujące się do budowy sieci fronthaul obsługującej plug-and-pull.

W związku z tym fronthaul z siatki mmWave ma wysoką skalowalność biznesową, ponieważ można dodać nowe małe komórki przy niskim koszcie planowania fronthaul.

- Topologia siatki typu fronthaul może oferować łącza typu multi-hop typu fronthaul. W rezultacie długie ogniwa typu fronthaul nie są konieczne przy zmniejszonym całkowitym koszcie posiadania, można zagwarantować niezawodne ogniwo typu fronthaul LOS, a dzięki różnym opcjom tras można zagwarantować solidne ogniwa typu fronthaul.

- Wykorzystując adaptacyjne algorytmy formowania wiązki i techniki samokonfiguracji, w przypadkach, w których istniejące łącza typu fronthaul są przeciążone lub niektóre łącza są zablokowane, każdy węzeł może automatycznie budować optymalne łącza do swoich sąsiadów i dalej ustalać optymalną trasę do punktu PoP na wymagania QoS, w tym przepustowość fronthaul, opóźnienia i współczynnik błędów pakietów. Themesh fronthaul jest inteligentny i może samoorganizować się w czasie rzeczywistym, bez interwencji człowieka.

- Wykorzystanie pasma V i pasma E może zapewnić odporność na zakłócenia. Ponadto konieczne jest automatyczne zarządzanie kolizjami, aby przewyższyć nakładanie się wiązek kierunkowych i przenikanie zewnętrzne.
- Pełny duplex jest przeznaczony dla fronthaul mesh, aby jednocześnie obsługiwać nadawanie i odbieranie dla każdego węzła.

TECHNIKI ANTENOWE

Koszt masywnej siatki fronthaul mmWave opartej na technologii MIMO zależy głównie od urządzeń typu fronthaul mmWave, ponieważ koszt licencjonowanego widma może być znikomy. Do tej pory anteny 30 dBi zostały skomercjalizowane zarówno w paśmie V, jak i w paśmie E przy użyciu tuby i / lub soczewek dielektrycznych. Jednak rozwiązania te mogą być obciążone wysokim kosztem i nieporęcznym sprzętem. Aby rozwiązać ten problem, przeprowadzono szeroko zakrojone badania konkurencyjnych kosztowo alternatyw, takich jak dyskretne soczewki, anteny Fabry-Perot i planarne układy anten oparte na falowodach zintegrowanych z podłożem. Z drugiej strony, ścisła integracja nadajnika-odbiornika i anteny jest wymagana w celu uproszczenia interfejsów i dalszego zmniejszenia strat i kosztów. Elektroniczne anteny sterujące / przełączające mogą zapewnić wąski sektor kątowy i umożliwić wyrównanie wiązki na etapie instalacji. Ponadto może kompensować niewielkie niewspółosiowość podczas operacji spowodowaną wiatrem lub innymi przyczynami. W dłuższej perspektywie anteny sterujące lub przełączające wiązki w dużym sektorze kątowym umożliwiłyby tworzenie sieci typu fronthaul typu mesh. Obecnie większość systemów multiantenna mmWave jest ograniczona do pojedynczego łańcucha RF, w którym jednocześnie może być obsługiwana tylko transmisja jednostrumieniowa. Aby umożliwić topologię typu fronthaul typu mesh, zaproponowano schemat multipleksowania z podziałem czasu (TDM) do obsługi rozwiązań PtMP i mesh. Jednak sieć typu mesh typu fronthaul, w której każdy węzeł wykorzystuje urządzenie z pojedynczym łańcuchem RF, wykorzystując tylko schemat TDM, może cierpieć z powodu dużych opóźnień systemowych. Aby rozwiązać ten problem, sugerowane jest urządzenie fronthaul z łańcuchami multi-RF, tak aby każdy węzeł mógł jednocześnie łączyć wiele węzłów za pomocą różnych wiązek. W [1] proponowana sieć fronthaul oparta na technologii MIMO typu mmWave może realizować planowanie w oparciu o multipleksowanie z podziałem wiązki (BDM) dzięki elastycznemu multipleksowaniu przestrzennemu i hybrydowemu kształtowaniu wiązki. W praktycznej sieci fronthaul, w zależności od obciążenia fronthaul, każdy węzeł może elastycznie łączyć TDM i BDM, aby obsługiwać siatkową sieć fronthaul. Na przykład łączom o dużym obciążeniu lub bez ścieżek LOS można przypisać więcej zasobów wiązki, podczas gdy wiele łączy z niewielkim obciążeniem może multipleksować w dziedzinie czasu.

NIEZAWODNE SCHEMATY SZACOWANIA KANAŁÓW

W tej sekcji pokrótce przedstawimy szacowanie kanału dla MIMO masywnego mmWave. Konwencjonalnie, mmWave łączy się z pojedynczym łańcuchem RF i systemami z wieloma antenami używanymi do fronthaulingu, gdzie wyrównanie wiązki jest zakończone podczas instalacji, a oszacowanie kanału nie jest wymagane, jak w konwencjonalnej sieci komórkowej. Co więcej, konwencjonalne łącze typu fronthaul jest długie, a stosunek sygnału do szumu (SNR) przed formowaniem wiązki jest tradycyjnie uważany za niski ze względu na duże straty ścieżki, co prowadzi do trudnego oszacowania kanału w komunikacji mmWave. Aby rozwiązać problem niskiego SNR przed formowaniem wiązki, w wielu standardach szeroko przyjęto schematy szacowania kanału oparte na skanowaniu wiązki, w tym IEEE 802.15.3c (TG3c) dla WPAN i IEEE 802.11.ad dla WLAN [1]. Na przykład, w IEEE 802.15.3c, książka kodowa, która wstępnie definiuje zestaw potencjalnych przestrzeni formowania wiązki z różnymi kierunkami i szerokościami wiązki, jest projektowana wraz ze schematem wyszukiwania interakcji. Podstawową koncepcją tego schematu jest podzielenie całej przestrzeni

wiązki na kilka par zarówno dla nadajnika, jak i odbiornika, najpierw z niską rozdzielczością, a następnie stosuje się iteracyjny schemat wyszukiwania ping-ponga, aby znaleźć najlepszą parę przestrzeni wiązek. Następnie wyszukana najlepsza para przestrzeni wiązek zostanie ponownie podzielona z wyższą rozdzielczością na następną rundę wyszukiwania. Taka procedura będzie kontynuowana do czasu spełnienia niektórych kryteriów. W IEEE 802.11.ad przyjęto jednostronny schemat wyszukiwania w celu znalezienia optymalnej wiązki w dwóch etapach: sumator jest ustawiony tak, aby najpierw wyczerpująco wyszukiwał najlepszy prekoder, a następnie ten najlepszy prekoder jest ustalany w celu wyczerpującego wyszukiwania najlepszego sumatora. W przypadku estymacji kanału opartej na skanowaniu z kształtowaniem wiązki, szacowany kanał jest niejawny. Ponadto, po zakończeniu szacowania kanału w oparciu o książkę kodową, zarówno nadajnik, jak i odbiornik również kończą formowanie wiązki i łączenie. Jednak oszacowanie kanału oparte na formowaniu wiązki jest zwykle uwzględniane w systemach z pojedynczą anteną radiową, które mogą nie być odpowiednie dla pojawiających się systemów MIMO typu mmWave z wieloma łańcuchami RF. Co więcej, w przypadku masywnych kanałów MIMO mmWave obsługujących transmisję wielu strumieni wymagana jest jawna estymacja kanału dla dalszego kształtowania wiązki z lepszą wydajnością. Dodatkowo, w przypadku ultradensownego wdrażania scenariuszy małych komórek, wyjaśnimy również nieporozumienie niskiego SNR przed formowaniem wiązki w sieci fronthaul mmWave, porównując utratę ścieżki w ultradensownej sieci działającej na 30 GHz oraz w konwencjonalnych sieciach komórkowych pracujących na 3. GHz. W szczególności, biorąc pod uwagę zanikanie wielościeżkowe, dyspersję sygnału i inne współczynniki strat, składnik tłumienia ścieżki równania Friisa w decybelach (dBs) można podać jako

$$\eta = 32.5 + 20 \log_{10}(f_c) + 10 \alpha \log_{10}(d) + (\alpha_o + \alpha_r) d \quad (1)$$

gdzie f_c (MHz) to częstotliwość nośna, α (dB / km) to wykładnik strat na ścieżce, d (km) to odległość łącza, α_o (dB / km) to współczynnik tłumienia atmosferycznego, a α_r (dB / km) jest współczynnikiem tłumienia deszczu. Na przykład dla konwencjonalnych systemów komórkowych z $f_c=3$ GHz i $d=1$ km mamy $\eta=192,62$ dB, gdzie $\alpha=2,2$ dB / km jest brane pod uwagę w scenariuszach miejskich], a tłumienie atmosferyczne i deszcz jest pomijane. Dla kontrastu, dla ultradensownego rozmieszczenia małych komórek z $f_c=30$ GHz, mamy $\eta=188,27$ dB przy $d=100$ m dla łącza fronthaul i $\eta=161,78$ dB z $d=30$ m dla łącza dostępowego, gdzie $\alpha=2,2$ dB / km, $\alpha_o=0.1$ dB / km i $\alpha_r=5$ dB / km przy ulewnym deszczu 25 mm / h. Ze względu na krótką odległość łącza fronthaul, utrata ścieżki w mmWave jest nawet mniejsza niż w konwencjonalnych sieciach komórkowych, co wskazuje na odpowiedni SNR do oszacowania kanału w milimetrowej fali fronthaul nawet przed formowaniem wiązki. Jak dotąd, istniejące schematy szacowania kanałów dla masywnego fronthaulingu opartego na MIMO mmWave są przedstawione w następujący sposób, a ich odpowiednie cechy i kierunki badań są również podsumowane: Estymacja kanału oparta na skanowaniu wiązką jest szeroko stosowana w istniejących systemach mmWave z pojedynczym RF, w tym IEEE 802.15.3c (TG3c) dla WPAN i IEEE 802.11.ad dla WLAN. Jednak schematy te zazwyczaj uwzględniają pojedynczy nadajnik-odbiornik RF. Projekt książki kodowej wielorozdzielczej i jego rozszerzenie należy dokładniej zbadać urządzenie nadawczo-odbiorcze multi-RF. Estymacja kanału oparta na wykrywaniu kompresyjnym (CS) wykorzystuje rzadkość w domenie kątowej masywnych kanałów MIMO mmWave [6], gdzie tylko niewielka liczba pomiarów może być wykorzystana do oszacowania kanałów mmWave o dużych wymiarach. Jednak schematy estymacji kanału oparte na CS zazwyczaj zakładają skwantowany kąt nadejścia (AoA) lub kąt wyjścia (AoD), co może prowadzić do pewnej utraty wydajności. Co więcej, wymaga, aby różnorodność tablicowa była informacją a priori. Stąd, sposób projektowania książki kodów (książka kodów jest związana z macierzą pomiaru w teorii CS) i oparty na CS algorytm estymacji kanału w celu oszacowania ciągłych AoA i AoD może być ważnym kierunkiem badawczym dla fronthaulu opartego na masywnej fali mm MIMO.

Estymacja kanału oparta na skończonym tempie innowacji (FRI) może uzyskać estymację super rozdzielczości AoA / AoD kanałów MIMO o masie mmWave, dzięki czemu można wykorzystać rzadkość AoA / AoD w domenie kątowej [1]. W porównaniu z klasyczną teorią CS, teorię FRI można uznać za analogową teorię CS, w której wsparcie rzadkich sygnałów może być ciągłe, inne niż dyskretne wymagane przez teorię CS. Jednak ten schemat nadal wymaga, aby kolektor tablicowy był informacją a priori. Estymacja kanału oparta na estymacji podprzestrzeni i dekompozycji (SED) może bezpośrednio pozyskiwać zdominowane tryby własne używane do formowania wiązki zamiast całego kanału [19], przy czym właściwość niskiego rzędu macierzy kanałowej MIMO o masywnej fali mm ze względu na rzadkość kanałów mmWave jest eksploatowany. Jednak oszacowanie kanału w oparciu o SED wymaga wielu operacji ping-pong między BS a użytkownikami w celu uzyskania zdominowanych trybów własnych, co może wprowadzić zbyt dużo szumu i pogorszyć ostateczną wydajność oszacowania, szczególnie w falach mm z niskim SNR przed formowaniem wiązki. Należy zauważyć, że schemat szacowania kanału oparty na SED nie wymaga, aby kolektor tablicowy był informacją a priori, co wskazuje, że schemat ten może być szeroko stosowany w masywnych systemach MIMO mmWave z dowolnym kolektorem tablicowym

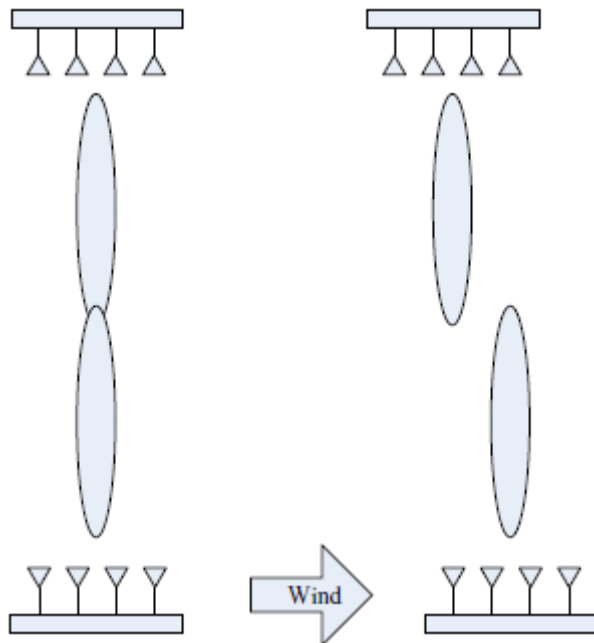
ELASTYCZNA KONSTRUKCJA PROJEKTOWA

Niezawodny i dokładny projekt formowania wiązki może zmaksymalizować przepustowość łącza. Algorytmy kształtowania wiązki MIMO mmWave Masywne dla fronthaul siatki powinny spełniać kilka następujących aspektów:

- Formowanie wiązki może sprostać wymaganiom samodzielnej konfiguracji i „plug-the-pull” dla początkowej budowy i przyszłej rozbudowy sieci fronthaul bez interwencji człowieka.
- Formowanie wiązki może przyspieszyć śledzenie wiązek, gdy wiązka jest niewspółosiowa z powodu wiatru lub innych przyczyn.
- Kształtowanie wiązki może obsługiwać transmisję wielostrumieniową dla elastycznego schematu BDM.

Jak dotąd istnieje kilka prac nad formowaniem wiązki dla fronthaulingu opartego na mWavemassive MIMO. ElAyach i inni zaproponowali przestrzennie rzadkie kodowanie wstępne dla systemów mmWavemassiveMIMO, w których wykorzystuje się rzadkość technologii mmWavechannels. Jednak schemat ten uwzględnia tylko transmisję wielostrumieniową PtP. Ghauch zaproponował iteracyjny algorytm do uzyskiwania analogowego i cyfrowego kształtowania wiązki zbliżonego do dominujących trybów własnych, przy czym wykorzystuje się niską rangę właściwość macierzy MIMOchannel mmWavemassive. Jednak schemat ten uwzględnia również transmisję dla jednego użytkownika i nie może być bezpośrednio stosowany w sieci czołowej PtMP. Han oraz Chiu zaproponowali wieloużytkownikowe schematy kodowania wstępnego dla mmWave Masywne MIMO. Jednak schematy te uwzględniają tylko transmisję jednostrumieniową dla każdego użytkownika, co może nie być odpowiednie dla sieci fronthaul PtMP. W naszej pracy [1], opartej na fazowanym układzie anten z wieloma łańcuchami RF, zaproponowaliśmy skuteczny hybrydowy schemat wstępnego kodowania / łączenia i powiązany schemat szacowania kanału oparty na wykrywaniu kompresyjnym. Proponowany schemat może zagwarantować, że każdy węzeł jednocześnie łączy wiele węzłów z wieloma strumieniami dla każdego węzła. Różni się to zasadniczo od konwencjonalnego hybrydowego wstępnego kodowania / łączenia używane w radiowych sieciach dostępowych. Proponowany schemat może zapewnić realne podejście do realizacji pożądanej topologii sieci typu fronthaul i nowatorskiego planowania opartego na BDM, a także może ułatwić przesyłanie w paśmie w falach mm. Poza tym masywne systemy MIMO mmWave stosowane w fronthaul zwykle wymagają wąskich belek, które

zwiększają wrażliwość na ruchy spowodowane kołysaniem tyczki i innymi problemami środowiskowymi. Mówiąc konkretnie, jak pokazano na rysunku



ponieważ urządzenia typu fronthaul będą wyposażone w konstrukcje zewnętrzne, takie jak słupy, wibracje i ruch wywołany przepływem wiatru i podmuchami mogą powodować niedopuszczalne prawdopodobieństwo wyłączenia, jeśli wyrównanie wiązki nie jest często wykonywane. Aby przezwyciężyć ten problem, Hur i wsp. [18] zaproponowali wydajną technikę wyrównywania wiązek z adaptacyjnym próbkowaniem podprzestrzennym, jak również hierarchicznymi książkami kodowymi. W związku z tym skuteczny algorytm wyrównywania wiązek ze zmniejszonym narzutem w celu przezwyciężenia ruchu spowodowanego kołysaniem biegunów i innymi problemami środowiskowymi jest praktycznym kierunkiem badań, który należy dalej zbadać.

DUPLEKS PODZIAŁU CZASU (TDD), DUPLEKS PODZIAŁU CZĘSTOTLIWOŚCI (FDD) CZY PEŁNY DUPLEKS?

Praca w trybie pełnego dupleksu jest optymalną opcją dupleksu umożliwiającą łączenie typu mesh typu fronthaul, w którym nadawanie i odbiór są osiągnięte jednocześnie, zapewniając wystarczającą separację między antenami nadajnika i odbiornika. Jednak pełny dupleks jest nadal w fazie badań i testów, zwłaszcza dla pełnego dupleksu w mmWave. Tak jak rozważane są alternatywne opcje, FDD i TDD. W przypadku fronthaul mmWave opartego na FDD, łącze w górę i łącze w dół muszą używać różnych pasm. Jednak regulacja w mmWave może być różna w różnych krajach. Oznacza to, że jedno urządzenie może nie być odpowiednie w różnych krajach. Natomiast łącze w górę i łącze w dół w TDD współdzielą to samo pasmo. W związku z tym można zastosować jedno urządzenie w różnych krajach. Ponadto, ponieważ różni operatorzy będą wykorzystywać ultradensowne małe komórki na tych samych obszarach, należy wziąć pod uwagę wzajemne zakłócenia sieci fronthaul. W porównaniu do FDD z różnymi kanałami uplink / downlink, TDD ułatwia znalezienie czystego widma i uniknięcie zakłóceń. Ponadto, ponieważ w sieci fronthaul dominuje ruch asymetryczny, TDD może elastycznie dostosowywać stosunek szczelin czasowych w łączu w górę i w dół zgodnie z wymaganiami ruchu [1]. W przypadku praktycznego fronthaul TDD mmWave masywnego opartego na MIMO, pożądane jest adaptacyjne zarządzanie zakłóceniami, aby uniknąć wzajemnych zakłóceń małych komórek różnych operatorów, a zautomatyzowane rozwiązania konfiguracyjne są oczekiwane dla sieci fronthaul typu plug-and-play, zwłaszcza dla nielicencjonowanego pasma V.

PASMO WEWNĘTRZNE, PASMO WYJŚCIOWE LUB PASMO HYBRYDOWE

Jak wykazaliśmy, bezprzewodowy fronthaul mmWave może zapewnić najbardziej opłacalne rozwiązanie wspierające przyszły fronthaul o dużej pojemności w ultradensownym wdrażaniu małych komórek. W międzyczasie, wraz z wykładniczo rosnącym zapotrzebowaniem na przepustowość w radiowych sieciach dostępowych, mmWave zwraca również większą uwagę na łącze dostępowe. Multipleksowanie fronthaul i dostęp w tym samym paśmie częstotliwości, zwane również fronthaulem bezprzewodowym wewnątrz pasma, ma oczywiste korzyści finansowe z perspektywy ponownego wykorzystania sprzętu i częstotliwości, ale stwarza poważne wyzwania technologiczne. Rysunek powyższy przedstawia przyszłą masywną sieć komórkową mmWave opartą na technologii MIMO, w której małe komórki BS używają mmWave do obsługi zarówno fronthaul, jak i dostępu, współdzieląc te same zasoby częstotliwości i sprzęt. W przypadku fronthaulu w paśmie istnieją dwa wyzwania. Pierwszą kwestią są zakłócenia między łączem dostępowym a łączem typu fronthaul, gdzie zakłócenia pochodzące z łącza dostępowego / łącza typu fronthaul mogą znacząco obniżyć stosunek sygnału do zakłóceń (SIR) łącza fronthaul / łącza dostępowego. Drugą kwestią jest interferencja własna, w której sygnały nadawcze / odbiorcze będą zakłócać sygnały odbioru / nadawania z tego samego węzła. Aby rozwiązać ten problem, w artykule zaproponowano oparty na TDM schemat wewnątrzpasmowy, aby uniknąć obu rodzajów zakłóceń. Jednak TDM między różnymi łączami typu fronthaul może cierpieć z powodu dużych opóźnień systemowych, a TDM między łączem dostępowym a łączem typu fronthaul może wymagać dużej pamięci w każdym węźle do buforowania danych dostępowych. Zaproponowaliśmy elastyczny hybrydowy projekt formowania wiązki z koncepcją BDM. Oczywiście, z proponowanym schematem MIMO mmWave Masywny harmonogram oparty na BDM może być kolejnym konkurencyjnym rozwiązaniem dla fronthaul w paśmie mmWave z mniejszym opóźnieniem.

PODSUMOWANIE

Gęste wdrażanie małych komórek wymaga opłacalnego fronthaulu o dużej pojemności, aby pomieścić 1000-krotny wzrost przepustowości komórkowej w ciągu najbliższych 10 lat. Rozwiązanie światłowodowe typu fronthaul jest kosztowne ze względu na kosztowną instalację i dzierżawę. Istniejące bezprzewodowe rozwiązania typu fronthaul są zoptymalizowane pod kątem obecnych makrokomórek 3G / 4G, które nie spełniają wymagań sieci 5G typu fronthaul. Na tym tle, MIMO mmWave ogromne stanowi obiecujące rozwiązanie dla bezprzewodowego fronthaul, które jest bardzo kompatybilne z ultradensownym rozmieszczeniem małych komórek, ponieważ łącze fronthaul może być krótkie (zwykle 50-200 m), aby złagodzić duże straty ścieżki i zagwarantować łącze LOS. Co więcej, wykorzystując najnowocześniejszą technikę mmWave Masywny MIMO obsługujący transmisję wielostrumieniową, możemy z łatwością zrealizować topologię fronthaul mesh, co może ułatwić instalację i skrócić krąg rozłożenia. Dodatkowo, techniki kształtowania wiązki mmWave MIMO mogą uczynić fronthaul bardziej elastycznym i inteligentnym. Mówiąc konkretnie, samokonfiguracja z zaawansowanym harmonogramem kontroli dostępu do mediów (MAC) może zapewnić elastyczną trasę fronthaul spełniającą wymagania fronthaul bez interwencji człowieka, a fronthaul wewnątrz pasma może być możliwy w celu dalszego obniżenia kosztów operacyjnych. W konsekwencji, dzięki obiecującej technice MIMO mmWave, mesh fronthaul mmWave ma wysoką skalowalność i jest atrakcyjny do projektowania przyszłych sieci fronthaul 5G.