

5G方式の現状と 新展開

～ 3GPPリリース18 で始まる 5G-Advanced など～



2023年6月
A2A研究所 田代 務

目次

1 5Gの現状と新展開

- (1) モバイル通信サービス用の周波数帯
- (2) 日本での5Gトラヒックの現状
- (3) アジア主要都市での5G速度
- (4) iPhoneの周波数帯対応状況
- (5) UE送信電力に関する技術的条件見直し
- (6) ドローン
- (7) スマートドローン
- (8) ローカル5G方式の海上利用
- (9) LEO経由地上携帯網バックホール(1/2)
- (10) LEO経由地上携帯網バックホール(2/2)
- (11) スマホから衛星経由のSOS送信
- (12) インフラシェアリング
- (13) 世界の通信タワー会社
- (14) 信号機でのインフラシェアリング
- (15) 基地局電力の削減
- (16) デュアルSIMとeSIM
- (17) 5G NR基地局の構成
- (18) 米国DishとAWS
- (19) 米国AT&TとMS Azure
- (20) Wi-Fiによるオフロード

2 5G-Advanced 仕様の動向

- (1) 3GPPリリース18
- (2) リリース18で検討中の主な機能
- (3) 無線周波数帯の拡張
- (4) アップリンクカバレッジの改善
- (5) XDD(Xross Division Duplex)
- (6) スマートレピータ
- (7) タイプIIコードブック
- (8) MU-MIMOによる空間多重(1/2)
- (9) MU-MIMOによる空間多重(2/2)

- (10) V2X
- (11) 日本でのITS関係電波割り当て状況
- (12) C-V2Xのサービス例と諸元
- (13) サイドリンク
- (14) XR(eXtended Reality)
- (15) XRユースケースと要求条件
- (16) NR-Light
- (17) AI/ML
- (18) NEF (Network Exposure Function)

付録 第5世代無線通信方式の概要

- (1) OFDM/OFDMA方式
- (2) フレーム構造
- (3) 物理層チャンネル
- (4) 参照信号
- (5) DM-RS
- (6) Zadoff-Chu系列
- (7) セルサーチからシステム情報取得まで
- (8) CORESET
- (9) BWP (Band-Width Part)
- (10) ビーム・スweepingとUEの初期アクセス
- (11) 非同期ランダムアクセス(NSRA)
- (12) OFDMの処理
- (13) MIMOとチャンネル行列
- (14) チャンネル行列の分解
- (15) MIMO機能の拡張 (Rel-16まで)
- (16) コードワード



1. 5Gの現状と新展開

(1) モバイル通信サービス用の周波数帯

条件付きオークションの導入も検討

5G方式普及のため、総務省はサブ6ギガ帯や準ミリ波帯での周波数割当を順次行なってきた。3.4GHz, 3.5GHz帯での40MHz幅を1単位とした割当に続いて、3.7GHz, 4.5GHz帯では100MHz幅、28GHz帯では400MHz幅を単位とした割当が既存3社と新規に市場参入した楽天に対して行われた。

その後、次のような電波割当の実施や今後の割当方針検討が行われている。2.33-2.37GHzの2.3GHz帯は既存の放送業務及び公共業務に混信を与えないようにダイナミック周波数共用が必要である。そこで、当該条件付きの2022年春の割当募集では1社のみ申請したKDDIに割当が行われた。

1GHz以下の帯域(通称プラチナバンド)では楽天向けに他の3社が使用する帯域の一部を割譲する案や、既存割当帯域の間隙に3MHz幅の狭帯域を割り当てる案などが議論されている。

また、条件付きオークションを2025年末頃に導入することが検討されている。

モバイル通信事業者に割り当て済みの周波数帯

【単位: MHz】

2022年9月現在

MNO グループ	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1.5 GHz	1.7 GHz	2 GHz	2.3 GHz	2.5 GHz	3.4 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.5 GHz	28 GHz
	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD/ TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD
DoCoMo	20	30		30	40 ¹⁾	40			40	40	100	100	400
KDDI	20	30		20	40	40	40	50 ³⁾		40	200		400
Softbank	20		30	20	30	40		30 ⁴⁾	40	40	100		400
Rakuten					80 ²⁾						100		400

1) 東名阪のみ

3) UQ

2) 東名阪以外は40MHz

4) WCP

総務省では、2025年頃に5G用の新規周波数帯(26GHz, 40GHz帯)の割り当てに条件付きオークションを導入することを検討している。



1. 5Gの現状と新展開

(2) 日本での5Gトラフィック現状

5Gトラフィック総量は4Gの1/10以下

総務省が公表している電波利用状況調査結果によると2022年央におけるMNO各社の5G/4Gトラフィックは概ね次のようである。

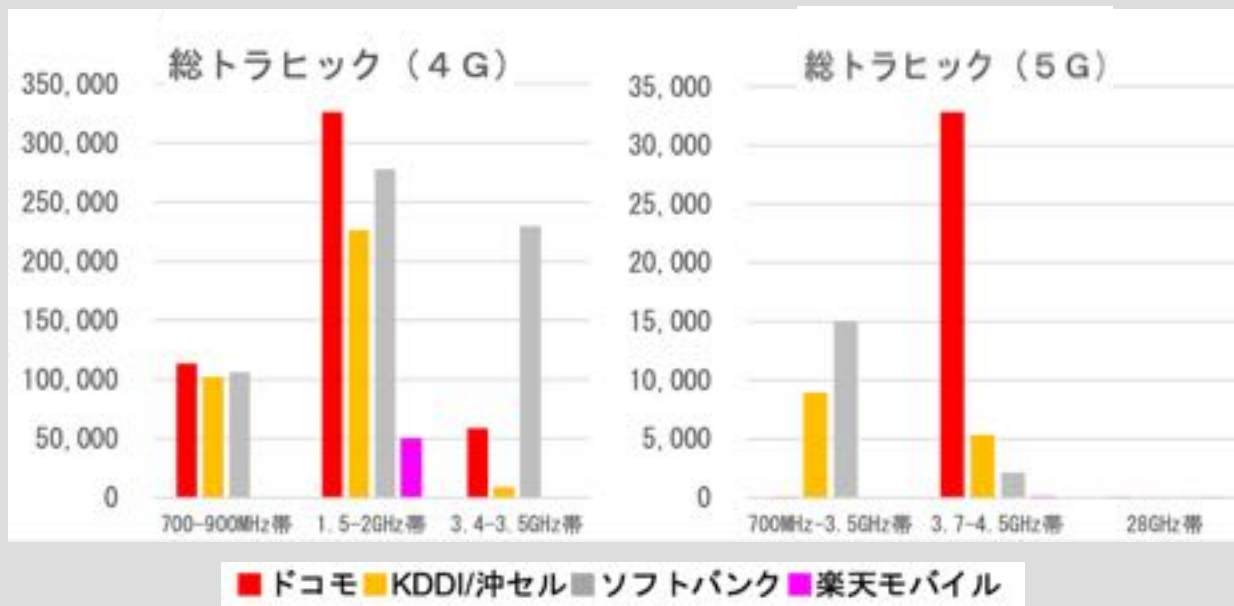
- ・5Gトラフィック総量は4Gより一桁あるいはそれ以上低い値に止まっている。
- ・4Gトラフィック量は各社とも1.5-2GHz帯が最も多い。同帯域及び700-900MHzの3社トラフィック量はほぼ拮抗する。3.4-3.5GHz帯ではソフトバンクが多い。
- ・5Gトラフィック量では3.7-4.5GHz帯でのドコモが他を圧倒するが同社1.5-2GHz帯の1/10程度である。28GHz帯は比較に足る数値として表れていない。

私見では、5G利用が進まない理由には次があるように思われる。

- ・政府からの料金値下げ圧力もあり、設備投資を抑えた。
- ・耐震性や重量の問題で都市部でのマッシブMIMOの設置が遅れている。
- ・28GHz帯は対応できる機種は僅かで、4Gでも十分速いため置換が進まない。
- ・コロナ禍で在宅勤務が広がり、自宅ではWi-Fi経由の固定にオフロードされる。

月間総トラフィック（単位: TB）

R4年度 電波利用状況調査結果の概要（総務省）より



5G総トラフィックは4Gの10分の1以下に止まっており、28GHz帯は極く僅か。



1. 5Gの現状と新展開

(3) アジア主要都市での5G速度

東京のダウンロード速度はソウルの1/3程度

調査会社Opensignalは、世界主要都市でのMNOの通信速度を4G/5G、ダウンロード/アップロード、ビデオや音声のアプリ別等について比較している。

同社による2022年6月の測定によると、アジア地域主要都市での5G速度は欧米等の他地域を概ね凌いでいるものの、東京での5G速度は首位のソウル等より相当劣った結果となっている。

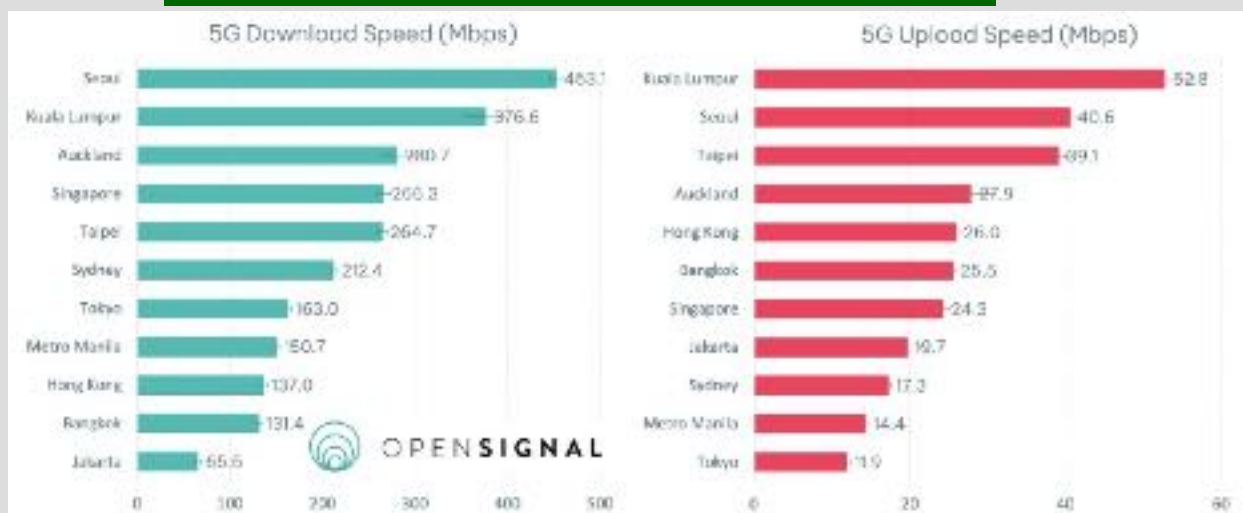
例えば5Gダウンロード速度では、1位ソウルが453Mbpsに対して東京は163Mbpsの7位であり、アップロード速度では1位クアラルンプールの53Mbpsに対して東京は12Mbpsの11位になっている。

一方、4Gと比べた5Gのダウンロード速度比は東京3.5倍、ソウル6.6倍、クアラルンプール19倍であり、東京は他と比較すると4Gの速度が速い。

また、通信時に5Gを使用する割合(頻度)はソウル43%に対して東京は7.4%と僅かであり、大多数のユーザは5Gでなく4Gを利用している。

アジア主要都市での5G速度 (2022.6月測定)

OPENSIGNAL社より



【ダウンロード速度 (単位: Mbps)】

1位ソウル(453Mbps)、2位クアラルンプール、東京は7位(163Mbps)

【アップロード速度 (単位: Mbps)】

1位クアラルンプール(53Mbps)、2位ソウル、東京は11位(12Mbps)

4G速度は日本が他国を上回っているが、5G速度では劣っている。



1. 5Gの現状と新展開

(4) iPhoneの周波数帯対応状況

最新モデルでも28GHz帯は未対応

日本で準ミリ波帯(28GHz帯)の利用が進んでいないのは基地局サービスエリアが狭いことに加えて、そもそも対応端末の数が少ない影響が大きいとみられる。

例えば、日本で利用者が多いiPhoneの最新モデルであるiPhone14は3.7GHz帯と4.5GHz帯には対応しているが、28GHz帯/n257には iPhone SE, iPhone12, iPhone13と同様に依然、未対応となっている。

なお、米国向けには米国の26GHz帯/n258, 28GHz帯/n261にも対応したiPhone機種が販売されている。

なお、2022年夏時点で28GHz帯/n257に対応している機種には次がある。
(詳細モデル名はドコモ、au、ソフトバンク向けでそれぞれ異なる。)

- ・サムスン電子製 Galaxy S22
- ・シャープ製 AQUOS R7
- ・ソニー製 Xperia 1 IV

iPhone 14(日本向けモデル)のSub6帯と準ミリ波帯への対応状況

バンド名称	周波数帯	iPhone14	ドコモ	au	ソフトバンク	楽天モバイル
n77	3.7GHz	対応	-	○	○	○
n78		対応	○	○	-	-
n79	4.5GHz	対応	○	-	-	-
n257	28GHz	非対応	○	○	○	○

2022年6月時点

【スマホOSシェア】

iOS(iPhone)

日本 65%, グローバル 27%

Android

日本 27%, グローバル 72%

日本でのiOS(iPhone)のシェアは2022年6月時点で65%と高く、iPhoneでの周波数対応状況がMNOのサービス展開に大きく影響している。



1. 5Gの現状と新展開

(5) UE送信電力に関する技術的条件の見直し

5GNR仕様に沿って高出力のUE等を許容

産業面を含む多様なアプリケーションへの対応が期待される5Gシステムでは屋内外の広いエリアを効率的にカバーする必要がある。

そこで、3GPPでの関連規定の改訂に伴い、UE最大空中線電力23dBm(200mW)の見直しや、ビル陰等もサービスエリアにできるようにする中継器の導入に関して要望があった。

このため総務省研究会では同じ帯域や隣接帯域を使用する次の無線局に関して他システムとの共用検討等が実施され、2023年に技術的条件が策定された。

- ・高出力陸上移動局 (HPUE: High Power User Equipment)
- ・5Gレピータ(陸上移動中継局と小電力レピータ)
- ・5Gフェムトセル基地局

また、あわせて700MHz～3.5GHz帯のLTE-A無線局, 2.5GHz帯のWiMAX・XGP無線局, 4.8GHz/28GHz帯のローカル5G無線局の技術的条件見直しも行われた。

改訂された5GNR無線局の主な諸元(電力、利得は最大値)

総務省 新世代モバイル通信システム委員会資料25-1を元に作成

無線局	項目(最大値)	2.3GHz	3.5GHz	3.7GHz	4.5GHz	28GHz
TDD HPUE	空中線電力	23dBm	29dBm			35dBm
	空中線利得	3dBi				20dBi
TDD 小電力レピータ	空中線電力	N/A	24dBm ¹⁾			23dBm ¹⁾
	空中線利得	N/A	9dBi ²⁾ / 0dBi ³⁾			20dBi ¹⁾
フェムトセル 基地局	空中線電力	N/A	20dBm			26dBm

1) BS対向、UE対向とも 2) BS対向 3) UE対向

ULで異なる周波数帯域を束ねるCAでは、各々の周波数帯ごとに記載の規定値以下とする。

なお、周波数共用の観点で重要な帯域幅や不要発射の強度、最大空中線電力等は規定されていることから変調方式については規定しないことになった。

HPUE空中線電力は従来の23dBmからSub6帯域では29dBm, 28GHz帯では35dBmまで増加できるため、エリア端でも安定した通信が可能になる。

宅配便やインフラ点検等での利用拡大へ

これまで携帯電話の周波数帯を使用するドローンは、上空150m以下の高度で地上携帯電話システムに影響を及ぼさない実用化試験局としての使用が認められていた。

しかし、無線局手続の簡素化に加え、高度150m以上での次のような利用ニーズにも対応できるように制度改善の要望があった。

- ・ドローンを利用したインフラ設備の点検
- ・ヘリコプターの動態管理
- ・気象情報や上空映像のリアルタイム伝送
- ・空飛ぶクルマの技術検証

そこで、総務省は高度150m以上における地上携帯電話網との共用検討を関係研究会で実施し、ドローンの上空利用に関する概略次のような技術的条件を2022年にとりまとめた。

- ・800MHz帯, 900MHz帯, 1.7GHz帯及び2GHz帯を使用したLTE-A(FDD)及びFDD-NR(5G)準拠方式の場合、150m以上の上空でも利用可とする。
- ・ドローンには最適な送信電力制御機能を有すること。

ドローンの上空利用

総務省 情報通信審議会 新世代モバイル通信システム委員会報告概要より



上空150m以下は商用局、150m以上は実用化試験局としての利用が可能に



1. 5Gの現状と新展開

(7) スマートドローン

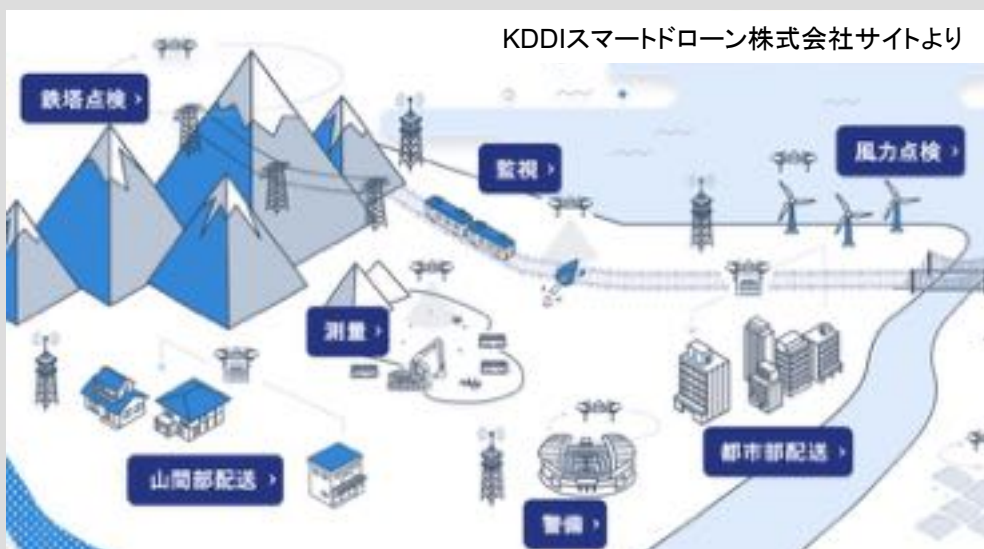
宅配便やインフラ点検等での利用拡大へ

2022年12月には国土交通省による航空法の改正によって、有人地帯での目視外飛行(レベル4)も可能となった。

そこでKDDIスマートドローン株式会社は、LTEや5Gのモバイル通信機能を搭載して長距離の自律飛行を行うドローンをスマートドローンと称し、物流やインフラ点検等での利活用を目指した次のような活動を行なっている。

- ・ドローン・ロボット配送: レベル4飛行での医療検体や食料品配達を模擬実験
- ・橋梁や洋上風力発電所の点検: 橋梁では点検業務の大幅効率化を期待
- ・ダム建設現場での無人測量と無人監視: Starlink衛星地球局との連携
- ・自然災害被災集落への物資配送実験: 同上
- ・中央運用センターでの集中制御監視: 全国十数か所の合計50機以上
- ・水空合体ドローンによる水中インフラの点検実験
- ・ドローン操縦者のスキル習得のため「KDDIスマートドローンアカデミー」を開校

スマートドローンの活用シーン



全国に約72万ある橋梁のうち半数は10年後に建設後50年を経過する。そこでドローンによる点検業務の効率化や安全性の確保への期待が大きい。

洋上風力発電所での通信ニーズに対応

従来のローカル5Gは陸上利用を基本に制度化されたが、近年、洋上風力発電など海上においてもローカル5G活用のニーズがある。

そこで、総務省は2022年に次のような制度化を行なった。

12海里(約22km)以内の領海内にて、次の2つの電波発射形態を想定する。

- ・ 陸上の基地局から電波を発射して沿岸をカバーする形態
- ・ 海上の構造物に設置する基地局から電波を発射する形態

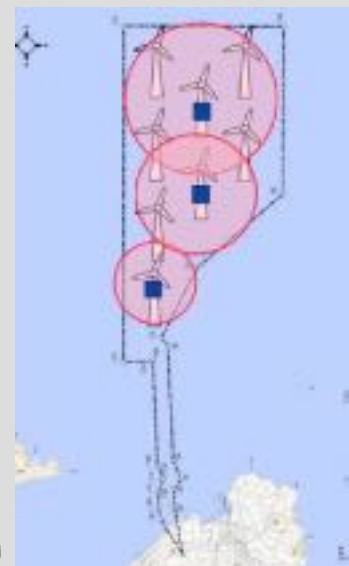
使用周波数は海上で一定の面積をカバーできるように、ある程度の回折性がある4.6GHz帯を対象とする。

海面は陸上における他者土地相当、特定の者の海上構造物は自己土地相当とする。(ワイヤー等で海底に係留の場合、それが移動しうる範囲は自己土地相当とみなす)

洋上風力発電所向けローカル5G



【左図: 着床型洋上風力発電】
沿岸に設置した基地局から
沿岸から5km程度のエリアにある
着床式洋上発電装置をカバーする
と想定



【右図: 浮体式洋上風力発電】
沿岸から20km程度のエリア
にある浮体式洋上発電装置の
風車自体に基地局を設置して
カバーすると想定

第17回ローカル5G検討作業班ノキア社資料より

基地局は沿岸設置と風車自体に設置する2つのケースを想定している。

KDDIはau網バックホールにStarlink衛星利用を開始

世界各国のMNOは端末(UE)と基地局間で送受される信号をバックホールと呼ぶ高速回線を介してコアネットワークに接続している。

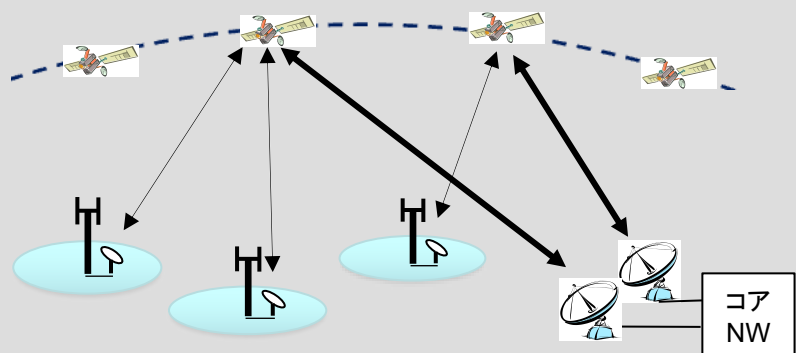
バックホール回線は光ファイバーや同軸ケーブルが多いが、地上回線の設置が地理的に困難あるいは経済的でない地域では衛星回線が用いられている。日本でも、島嶼等の一部地域では静止衛星経由のバックホール回線が利用されているほか、その他の基地局でも大規模自然災害等で地上回線設備が被災した場合のバックアップ用として衛星バックホール回線を確保している。

KDDIでは、2022年より日本国内の約1200の基地局向けに低軌道周回衛星であるSpaceX社Starlink衛星経由のバックホール回線を順次開設している。高度550kmを周回するStarlink衛星では子局と親局間の片方向遅延時間は20~40msと短いことから高速伝送には有利である。一方、地球局アンテナは送受信ビームの指向方向を衛星間で切り替える動作(ハンドオーバー)を頻繁に行う必要がある。

Starlink衛星回線を用いた地上携帯網のバックホール



Starlink地球局アンテナを設置した基地局タワー (KDDI発表資料より)



地球局アンテナは移動する衛星にビームを指向させ、一定時間ごとに後続衛星に指向方向を切り替える。

KDDIは、企業や自治体の特定エリア内でも上記形態での4G通信を提供するサービス(Satellite Mobile Link)を、Starlink基地局費用の一部を負担してもらうことで開始している。



1. 5Gの現状と新展開

(10) LEO衛星を用いた地上携帯網のバックホール(2/2)

Starlink子局とのWi-Fi接続

Starlink子局ではWi-Fi接続機能が標準搭載されている。

そこで、KDDIとワイヤアンドワイヤレスは次のような場所にStarlink子局と屋外用Wi-Fiアクセスポイントを設置して携帯電話端末での通信を可能にしている。

1. 山小屋

登山者の宿泊や休憩、避難に設置されている山小屋は地形や積雪のため通信環境整備が遅れていた。当該設備の設置により、家族への安否連絡や気象情報の確認、SNS投稿のほか、山小屋オーナーにはキャッシュレス決済などによる業務効率化が可能になる。

2. 大規模野外イベント

野外音楽フェスティバル等の大規模イベントでは多人数が局所的に集中することで通信環境が不安定になることがある。当該装置は従来の車載型基地局に比べて簡便であり、利用者は同行者との連絡や電子決済の利用が可能になるとともにモバイル通信回線の混雑緩和の効果もある。

Starlink衛星回線を用いた地上携帯網のバックホール



白馬村 八方池山荘
businessnetwork サイトより



JAPAN JAM2023
KDDI サイトより

山岳部のような携帯網カバレッジ外のエリアや、一時的、局所的にトラフィックが集中する野外イベント等では衛星バックホールとWi-Fiの組合せは大いに有効だろう。



1. 5Gの現状と新展開

(11) スマホから衛星経由のSOS送信

iPhoneとGlobalStar衛星で

Apple社は2022年9月、交通事故等の緊急時に衛星経由でSOS送信できる機能をiPhone14シリーズに搭載し、米国とカナダでサービスを開始すると発表した。衛星には次の諸元を有するGlobalStar衛星システムを用いる。

- ・ 衛星軌道：傾斜周回軌道、高度1414km
- ・ 軌道上衛星個数：32機
- ・ 使用周波数帯： アップリンク 1.6GHz帯（1,610～1,626.5MHz）
 ダウンリンク 2.4GHz帯（2,483.5～2,500MHz）

送信データ容量削減や事後対応円滑化のため、利用者はスマホ画面にて緊急事態の種類(交通事故、急病、犯罪、遭難、火災)を選択する形式にしている。発報された当該情報は米国内の地球局を経由して予め決められた救急センターに送られる。日本でも緊急センターの準備等が行われ次第、利用可能になることが期待される。

iPhone14による衛星経由SOS送信

グローバルスター衛星網

iPhone GW地球局 中継局 救急センター

iPhone14では1.6GHz帯のSOS信号をグローバルスター衛星に送信できる。

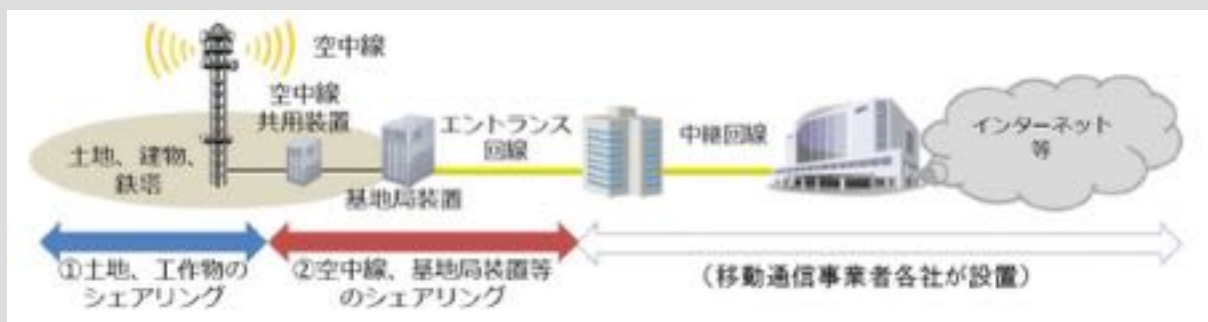
通信事業者の競争の場はインフラ面からサービス面へ

これまで基地局を始めとする通信インフラ設備は、通信事業者がそれぞれ単独で建設し運用しており、その性能機能は他社との差別化要因だった。そこで、互いのインフラ設備を共有するインフラシェアリングには消極的だったが、5G方式導入に伴って、各社の対応は大きく変化している。

従来より高い周波数帯を使用する5G方式では各基地局のカバーエリアは小さいため、極めて多数の基地局配置が必要となる。都市部では屋上設置できる建物は限られる一方、人口密度が低い過疎地域では経済性が問題になる。そこで、解決策としてインフラシェアリングが注目されている。景観の保護といった環境面でも、その効果は高いと言えるだろう。

総務省でも、ビルや地下街などの屋内や屋上、ルーラル地域等での鉄塔などでの5Gインフラ共有を推進するために、電気通信事業法や電波法の適用解釈を明確にするガイドラインを作成している。また、基地局設置可能な国有財産のDB化を推進し、自治体等にも同じようなインフラ共有促進を図るとしている。

インフラシェアリングの範囲(イメージ図)



「移動通信分野におけるインフラシェアリングに係る電気通信事業法及び電波法の適用関係に関するガイドライン」, (R4.8改正, 総務省) より

ガイドラインでは、土地や鉄塔だけでなくアンテナや通信機器も複数事業者で共有するケースも想定している。



1. 5Gの現状と新展開

(13) 世界の通信タワー会社

世界の通信タワーの約7割をインフラシェアリング

日本での本格的なインフラシェアリングは緒についたばかりだが、世界では以前より屋外タワーの共有が進んでいる。

現在、世界全体の通信タワーは約5百万あるが、その約70%がインフラシェアリング専門のタワー会社によって運営されている。新規タワーの建設も活発であり、2020年の1年間に25万超のタワーが主に中国やインドで建設されたとのこと。

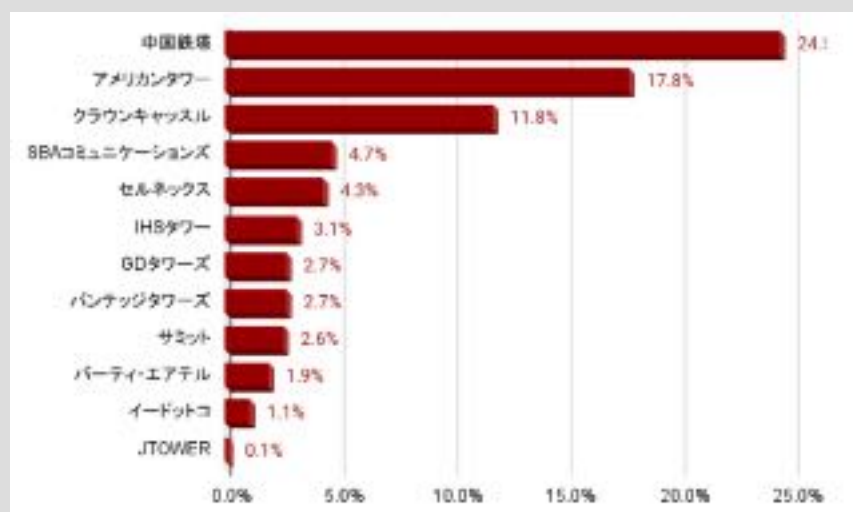
世界シェア1位の中国鉄塔は2015年にチャイナモバイル等の携帯電話大手3社の設備を移管して設立された後、2018年に香港に株式上場している。

2位のアメリカンタワーは米国ラジオ会社の1部門が1995年に分離し、独立系タワー会社として世界中にマルチテナント型リースサービスを提供している。

日本では、2022年にJTOWERがNTTドコモから約6千の基地局用鉄塔を約1千億円で購入してインフラシェアリング事業を本格化させている。

一方、KDDIとソフトバンクはルーラルエリア構築のためインフラシェアリング会社「5G JAPAN」を2020年に共同で設立している。

売上高から見た通信タワー会社の世界シェア（2020年時点）



Deallab社サイト <https://deallab.info/telecom-tower/> より

3位のクラウンキャッスル、4位のSBAコミュニケーションズも米国本拠企業

V2Xから防災やまちづくりの中核に

インフラシェアリングの適用場所としては、物理的制約のある信号機への基地局の設置が注目されている。

特に、交差点の信号機に5G通信機能を具備することで、V2X通信の適用による交通管制システム高度化が図られ、事故防止や渋滞解消の効果が期待される。

デジタル庁、総務省、警察庁では、官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）にて、交通信号機を活用した5G網の構築に向けた検討を進めている。

2022年8月には、交通信号機を活用した5G網の構築や技術開発を推進する産官学の連携組織「交通インフラDX推進コンソーシアム」が始動している。当該コンソーシアムでは、信号機に設置されるカメラや各種センサーから取得したデータを交通管制だけでなく、防災やまちづくり等の種々の分野で活用することを考えている。

信号機でのインフラシェアリングとデータ活用



信号機でのインフラシェアリングのイメージ
(JTOWERサイトより)

【交通インフラDX推進コンソーシアム】

- 設立 2022年8月
- 主な活動:
 - ・(信号)柱の高度化
 - ・交通管制・信号情報配信
 - ・データ利活用ニーズへの対応
- 会員
 - ・幹事会員: JTOWER, 住友商事, 住友電工
日本信号, NEC, 本多技研
 - ・正会員: アンリツ, クアルコムジャパン, 三菱商事等 18社
 - ・準会員: 製造会社、通信会社等 約50社（通信会社ではドコモ、KDDI、ソフトバンク、楽天モバイルが参加）

信号機にインフラシェアリングする5G基地局を設置することで、交通管制に加え、防災等の種々の分野への活用が考えられる。

ソーラー発電や液体冷媒による装置冷却等を適用

基地局の消費電力低減は通信事業者の重要な経営課題である。例えば、KDDIでは総消費電力量の約6割をau基地局が占めるため、次の対策を進めている。

1. トライブリッド電力供給

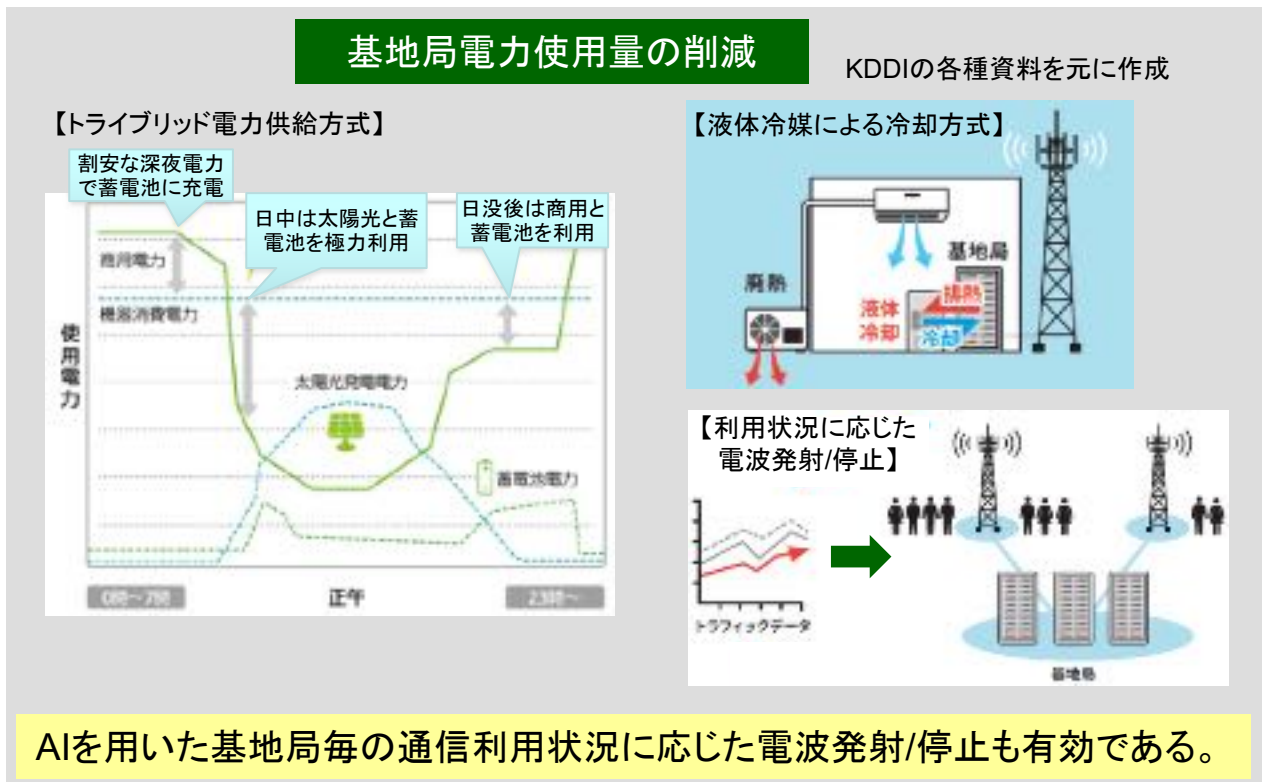
商用電力、太陽光発電、蓄電池からの給電の3つを時間帯や天候変化に応じて組合せ使用する方式である。(2022年3月現在、約100の基地局に設置)

2. 液体冷媒による装置の冷却

基地局では空調装置の電力消費が大きい。冷却効率の高い液体冷媒で装置を冷却する方式が有望である。メンテナンスが容易で無音のため他への展開も可能であり、データセンターでも同様の試みが行われている。

3. トラフィック量に応じた電波発射と停止

基地局トラフィック量の変化に応じて、AIを用いて動的に電波を停波/発射させることで電力量を削減する。実証実験では時間帯によって最大50%の電力削減も。





1. 5Gの現状と新展開

(16) デュアルSIMとeSIM

複数のSIMで多様な使い分けが可能

SIM(Subscriber Identity Module)は契約者情報を記録した小型カードであり、電話番号と結びつけることで通信を可能にする。2個のSIMを搭載したデュアルSIM端末は次のような使い方ができる。

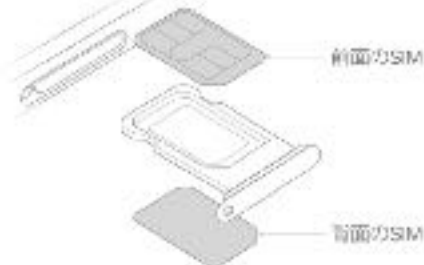
- ・1つの電話番号を仕事用に、別の電話番号を個人用の通話に使う。
- ・音声通話プランとデータプランを別々のキャリアにする。
- ・海外旅行の際に現地のデータプランを追加する。

eSIM(embedded SIM)は端末内に組み込まれているSIMであり、物理的なSIMカードを用いずに通信事業者のサービスを利用可能に(アクティベート)できる。

eSIMは主にプリペイド通信プランやMVNOの格安プランに多く用いられたが2021年にはKDDIやソフトバンクの大手キャリアもeSIMによるサービスを開始した。デュアルSIMやeSIMを用いることで、特定キャリアで長時間に亘る通信障害が発生した場合でも、他のキャリア経由で通信できる。

デュアルSIM端末のカードトレイやeSIMの例

【iPhone のnano-SIMカードトレイ】



アップル社サポートサイトより

SIMカードトレイ上下段にnano-SIMカードを装着。
SIMカードはサービス提供用データと付加価値用アプレットを収容するストレージと、認証や暗号鍵生成等を行うプロセッサとで構成。

【eSIM プロファイルのダウンロード手順例】

1. SIMロック解除をする。
2. Wi-Fi接続を設定する。
3. eSIMプロファイルのダウンロードサイトのQRコードを読み込む。
4. 「有効化」と「完了」
5. 場合により、APN(Access Point Name)を設定する。

eSIMでは、データとアプレットから構成されるプロファイルを専用サーバから通常はWi-Fi経由でeSIMに書き込む。

KDDIとソフトバンクは2023年春、複数SIMやeSIMを用いて、通信障害時に他方の回線を互いに使用できる副回線サービスを開始した。



1. 5Gの現状と新展開

(17) 5G NR基地局の構成

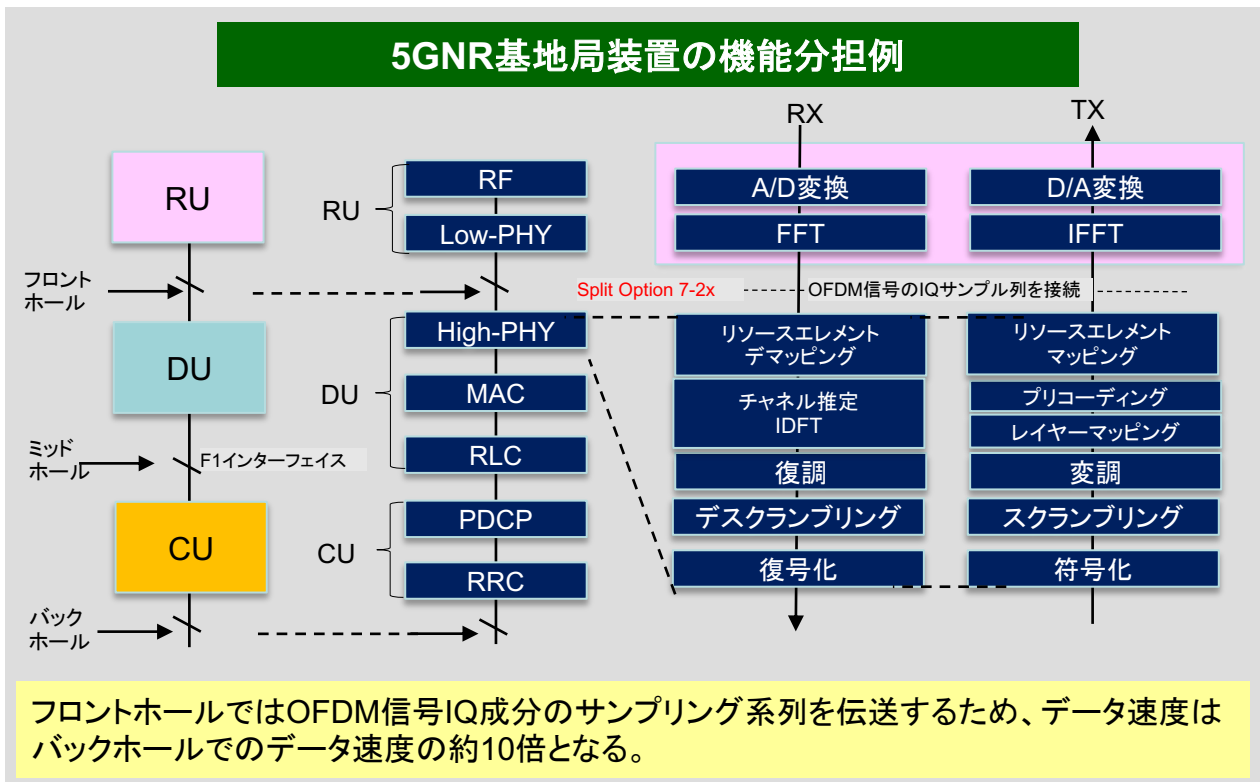
CU, DU, RUの3装置で機能分担

5G NRの基地局装置はRU (Radio Unit), DU (Distribute Unit), CU (Central Unit) の3つの機能ユニットで構成される。

これらのうち、通常、1つのDUに複数RUが接続されるDU-RU間(フロントホール)のインターフェイス条件(Split Option 7-2x)はO-RAN ALLIANCEにて整備され、異なるベンダー間での装置接続が可能になっている。

フロントホールでは、周波数領域でのOFDM信号の同相(I)および直交(Q)成分のサンプリング系列に加え、アンテナでのビームフォーミングに用いる情報や時刻同期信号が送受される。DU-RU間インターフェイスでは、これらに加えてRUの運用保守に用いるメッセージや動作の規定なども定めている。

一方、DUとCU間はミッドホールと呼称され、接続条件はF1インターフェイスと呼称される。





1. 5Gの現状と新展開

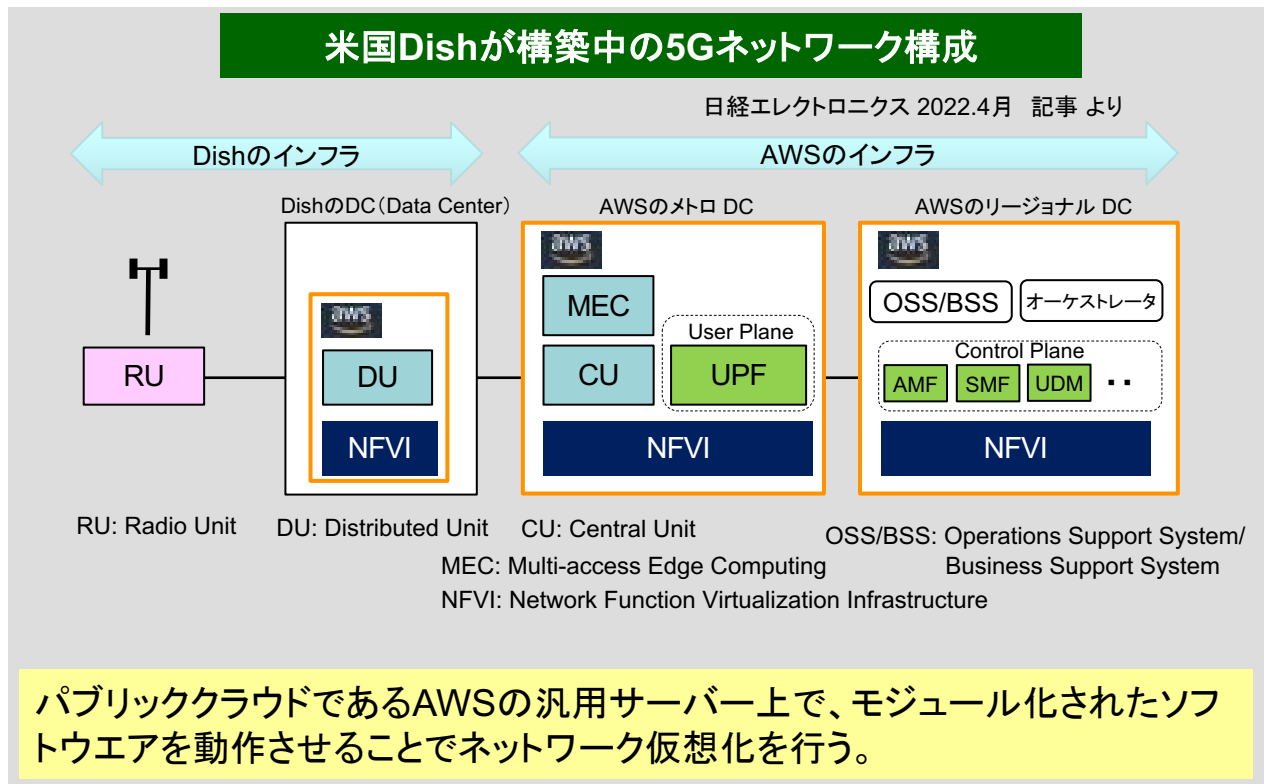
(18) 米国DishとAWS

AWSクラウド上にDishコア網を構築

米国の新興通信事業者であるDishは5G網の構築にAWSを最大限に活用したネットワークの仮想化を進めている。
従来の通信事業者は、自社のサイトに通信専用の各種ハードウェア装置を設置してきたが、同社5G網では、基地局からコア網までの機能の多くをAWS (Amazon Web Service) パブリッククラウド上のソフトウェアで実行する。

5Gでのユーザーニーズに即応したサービス提供にはネットワークスライシングやNEF機能の活用やカスタマイズがあるが、それらは網の仮想化と相性が良い。
5Gコア網では、制御信号を扱うコントロールプレーンとユーザデータを運ぶユーザプレーンが分離しているためクラウド上のソフトウェアで扱い易くなっている。

一方で、通信事業者の生命線である高い信頼性の確保は今後の課題である。
また、日本では電気通信事業法や安全保障確保等の観点から、自社外のインフラ上に重要機能を構築・運用するには一定の制限が課されるだろう。





1. 5Gの現状と新展開

(19) 米国AT&TとMS Azure

AT&TのコアNWをAzureクラウドに段階的に移管

マイクロソフト(MS)も5Gコア網の構築やサービス提供に本腰を入れている。

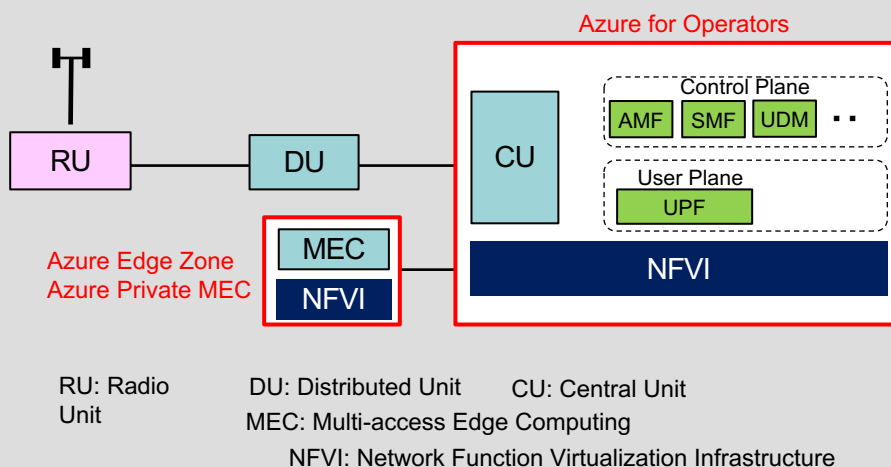
2021年6月、米国の大手通信事業者AT&Tは自社携帯網のコアNWをMSに売却し、2024年からはMSのクラウド(Azure)上に構築されるコアNWを借りてAT&Tの携帯サービスを提供するとの計画を発表した。2021年から約3年かけて自社内の通信設備/機能を順次Azure側に移設するとともに、AT&Tの知的財産やエンジニアをMSに引き継いでいく。

約1.8億もの顧客を抱えるAT&Tが全顧客のサービスを自前設備でなく外部クラウドで処理するとの決断を行なった背景には、5G網での仮想化技術の進歩に加えて同社の厳しい財務状況があるようだ。

なお、MSはプライベート5G^(注)基地局近傍にMECを設置するサービスも開始している。(注)MNOが企業や自治体敷地内に展開する5G網
こうした動きが続くと、「通信事業者とは何か」が問われるようになるかもしれない。

マイクロソフトのAzure for Operators

日経エレクトロニクス 2022.4月 記事 より



マイクロソフトは同社クラウドAzure上にて通信事業者のコア網を構築するサービスに続き、基地局近傍でのエッジソリューション提供も開始した。



1. 5Gの現状と新展開

(20) Wi-Fiによるオフロード

Wi-Fi6の普及が始まっている

Wi-Fi5までの従来規格では、1つのアクセスポイントに複数端末が同時接続した場合には、時分割で1端末ずつ順番に通信割り当てを行うため遅延が生じていた。

Wi-Fi6では複数端末が同時接続した場合、それぞれ別々の通信帯域を割り当てて同時伝送ができるので遅延が少なくなる。

変調方式は1024QAMまでとすることで、Wi-Fi5の256QAMに比べて1シンボルあたり8ビットから10ビットの25%増加となる。また、160MHz帯のチャネルと8x8MIMOを合わせて用いることで最大9.6Gbpsの伝送速度が達成できる。MIMOではMU-MIMOを下りリンクだけでなく上りリンクにも適用可能としている。

ただし、UEによってWi-Fi方式への対応状況は異なっている。

iPhoneではモデル11以降がWi-Fi6対応であり、5GHz帯の80MHzチャネル帯域幅で2つのMIMO空間ストリームを使用した場合の伝送速度は最大1.2Gbpsとしている。

Wi-Fi方式の変遷

無線LAN規格	通信速度(最大)	周波数帯	変調方式	MIMO
IEEE802.11ax (Wi-Fi 6*)	9.6 Gbps	2.4GHz/5GHz帯	1024QAM OFDMA	8x8 MIMO (MU-MIMO)
IEEE802.11ac (Wi-Fi 5)	3.5 Gbps	5GHz帯	256QAM OFDM	4x4 MIMO (DL:MU-MIMO)
IEEE802.11n (Wi-Fi 4)	1.2 Gbps	2.4GHz/5GHz帯	64QAM OFDM	4x4 MIMO
IEEE802.11a	54 Mbps	5GHz帯	64QAM OFDM	-
IEEE802.11g	54 Mbps	2.4GHz帯	DSSS/OFDM	-
IEEE802.11b	11 Mbps	2.4GHz帯	DSSS**	-

*) Wi-Fi 6の拡張版であるWi-Fi 6Eでは周波数帯に6GHz帯を使用する。

***) DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum

2024年に策定見込みのWi-Fi7では最大320MHz幅で4096QAMの変調方式と16x16 MIMOを使用して最大46Gbpsの伝送速度を目指している。



2. 5G Advanced 仕様の動向

(1) 3GPPリリース18の策定

リリース18以降を5G-Advancedと定義

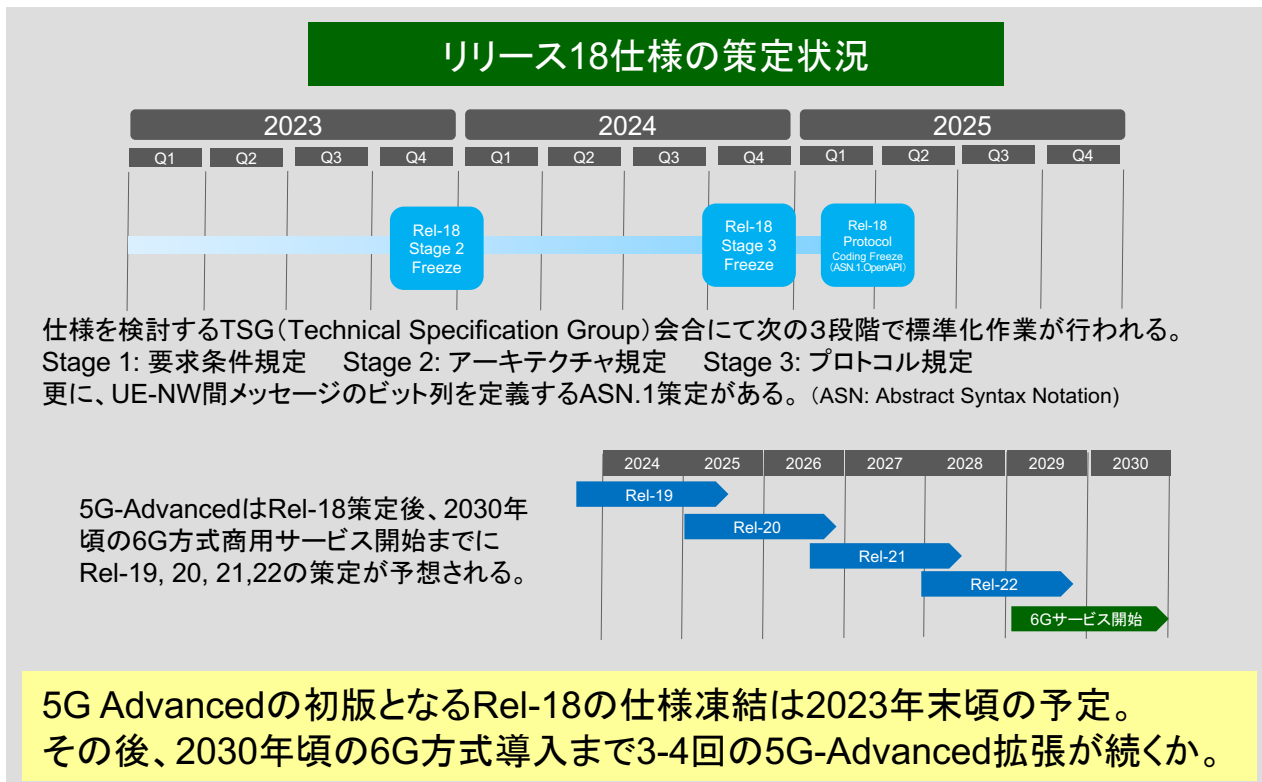
3GPP(3rd Generation Partnership Project)は、5G方式仕様での機能拡張に取り組んでいる。5Gの無線方式は、NR(New Radio)やNew RAT(Radio Access Technology)とも呼称されている。

2019年に制定された5G方式の最初の仕様であるリリース15(以下,Rel-15)に続き、2020年にはRel-14までのLTE機能の拡張も含んだNR仕様フェーズ2とも言えるRel-16を策定した。

その後、2022年のRel-17策定に続き、2023年末の仕様化完了を目途に現在はRel-18の策定作業が行われている。

なお、3GPPではRel-18以降を5G-Advancedと呼称することとした。

以下では、端末の略語をUE, 5G NR基地局をgNBまたはBS, コアネットワークを含む網をNWで表す。





2. 5G Advanced 仕様の動向

(2) リリース18で検討中の主な機能

アップリンクでのセル半径拡大など

Rel-18では、Rel-17までの仕様をもとに多方面での機能拡張を検討している。

このうち、超高速通信(MBB)関係では、MU-MIMOの拡張、IABの拡張、TDDとFDDの組合せによるXDD複信方式などがある。また、1GHz以下の周波数にて5MHz未満の帯域幅を利用可能とする模様である。

MIMOでは移動中UEでのチャネル状態情報(CSI)の速い時間変化に対応するための方策などがある。

また、Rel-17に引き続いて、高い周波数でのアップリンクでのセル半径縮小の補償策としてUE電力の増加等がある。

ユースケース拡大の観点ではAIやMLの適用や網機能の一部を外部に公開するNEF(Network Exposure Function)の活用がある。これらを通じて車両の自動運転、ER/VR、同報・放送、測位などの多様なサービス提供を目論んでいる。また、NW管理面においてもAIやMLを活用することで網運用の省力化や省電力化を目指している。

リリース18で検討中の主な機能拡張

分野	項目	概要
超高速通信(MBB)	MIMOの拡張	DL/UL MIMO
	IAB機能の拡張	モバイルIAB, スマートレピーター
	無線リソース有効利用	XDDなどの複信方式、5MHz幅未満の帯域利用
ユースケース拡大	NR-Light (RedCap)	ウェアラブルUEなど(低速度、省電力UE)
	利用空間の拡大	衛星やドローンの利用
	車両の自動運転	サイドリンクの拡張
	ER/VR	クラウドゲーミング等での要求条件整理など
	同報・放送	マルチキャスト機能拡張など
NW管理	測位	更なる測位精度向上や消費電力低減など
	NW運用の効率化	AI/MLの適用による自動化や省電力化
	NWスライスの拡張	NWスライス管理のNEF化

リリース18では、5G技術を産業面での多様な利用シーンに活用できるように機能改善/拡張を検討している。



2. 5G Advanced 仕様の動向

(3) 無線周波数帯の拡張

サブ6GHz帯と準ミリ波帯の割り当てが進む

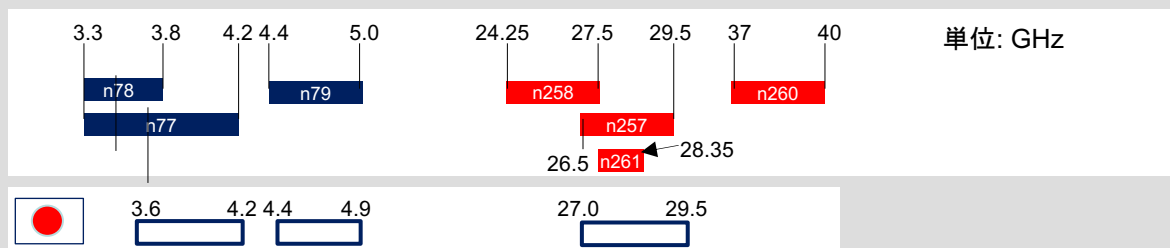
5Gでは、高い周波数への拡張に対応した周波数割当てが進んでいる。
3GPPの Rel-17までの仕様では、各国での今後の割当てを想定してサブ6GHz帯域FR1 (FR: Frequency Range)と準ミリ波帯FR2を次のように規定した。

FR1: 450 MHz – 7125 MHz FR2: 24.25 GHz – 71.0 GHz

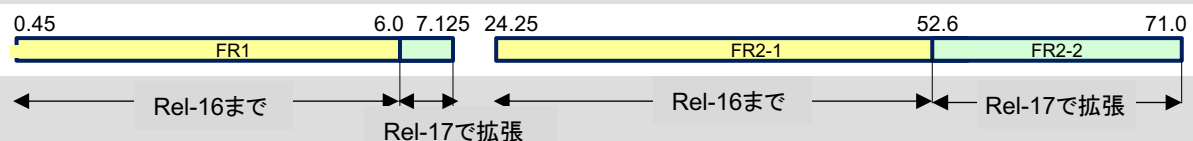
Rel-17では、FR2-2(52.6–71GHz)にてアンライセンス帯使用時のLBT(Listen Before Talk)要件が各国の規制で異なるためType-1～3のチャネルアクセス規定が設けられた。日本ではLBT期間をランダム可変とするType-1でなく、リソース利用効率維持と他システムとの共存の両者に配慮して固定のLBT期間を設けるType-2である。

Rel-18からの5G-Advancedでは、新たなアプリケーション導入や既存サービス拡張に対応するための新規帯域として、FR1とFR2の間の7GHzから24GHzまでの帯域(仮にFR3)の追加が検討されている。当該帯域は帯域幅が広いことに加えFR2に比較してセルのカバレッジも広い。

リリース18で検討中の新帯域



【Rel-16,17での拡張帯域】



【Rel-18での拡張帯域の候補】



Rel-18では、FR1とFR2の間の帯域を追加することが注目される。



2. 5G Advanced 仕様の動向

(4) アップリンクカバレッジの改善

データの繰り返し送信などで伝送能力を維持

UEでは送信機出力が制限されるため従来より高い周波数を利用する5G NRでは距離による減衰が大きく、アップリンクでのカバレッジ縮小が大問題である。

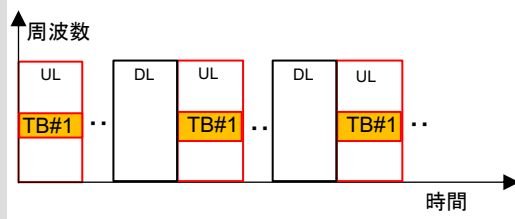
そこで、Rel-15~17ではアップリンクチャンネルに次のような改善策を仕様化した。

- ・ PUSCHにて、TB(Transport Block)の最大繰り返し送信回数を増加
Rel-15では8回まで、Rel-16では16回まで、Rel-17では32回までが可能に
- ・ 1つのTBを複数PUSCHスロットにて分割送信することで、セル境界付近にて小サイズデータが細切れ送信になることを防止
- ・ 信号復調を支援するDM-RS信号をリソースブロック内に多く配置
- ・ PUCCHではUEチャンネル品質に応じてTBの繰り返し送信回数を可変設定
- ・ RACHシーケンスのMsg3 PUSCHでは最大8回までの繰り返し送信が可能に

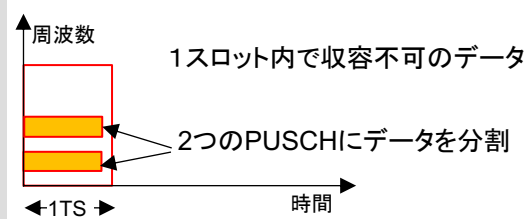
Rel-18では、特にPRACHでの改善を目指して、ピーク電力の増加などの検討が行われている。

上りリンクカバレッジ改善対策

【PUSCHでの繰り返し送信】

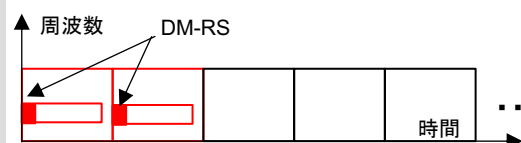


【複数PUSCHスロットでのTB送信】



【DM-RSのバンドリング】

UEの複数スロットでのDM-RS送信でチャンネル推定精度を向上



また、Rel-17では、UEの環境に応じたPUCCHの繰り返し送信回数をDCI*のPRI**フィールドにて動的に通知する設定を可能にした。

*) Downlink Control Information

***) PUCCH Resource Indicator

アップリンク品質改善は基地局配置数に関する重要課題である。

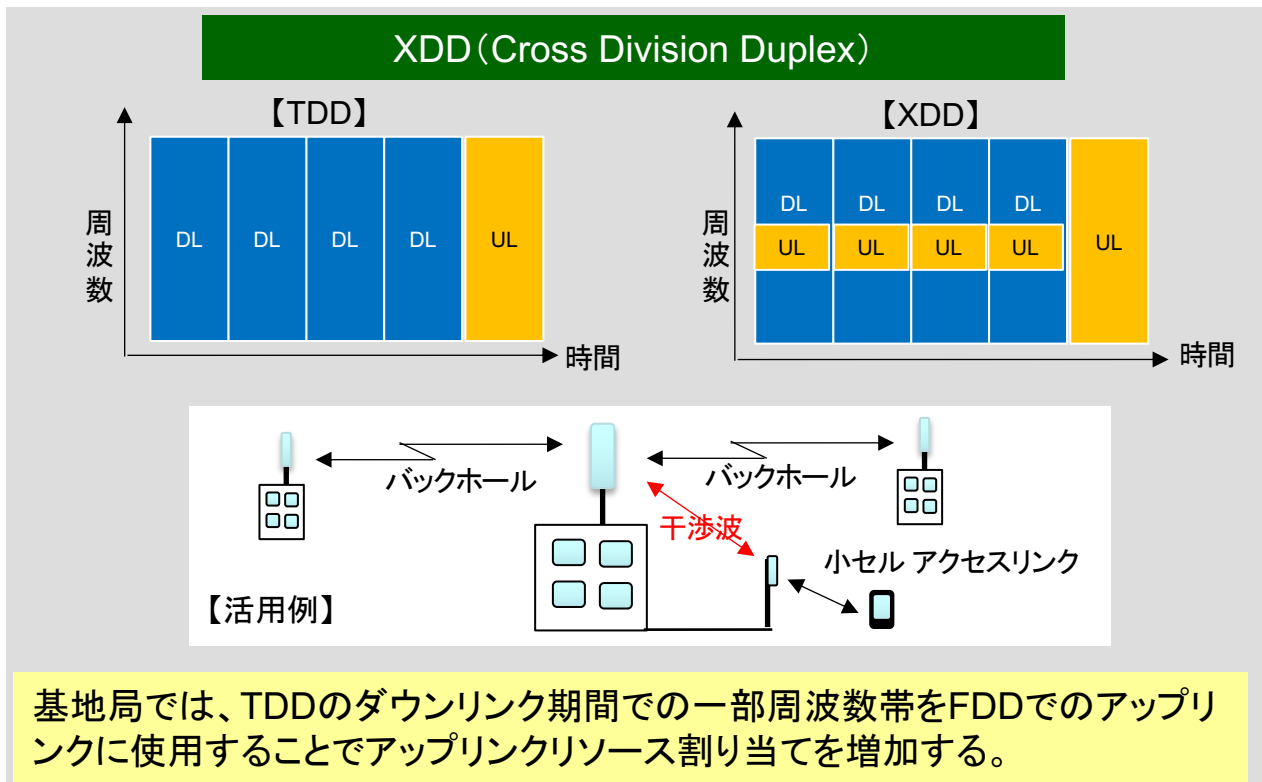
アップリンクの通信容量を拡大

XDD(cross division duplex: 交差分割複信方式)は、TDDのダウンリンクタイムスロットにて、周波数分割した一部帯域をアップリンクに割り当てることで低遅延化やカバレッジ改善を図る方法である。

その場合、基地局側ではFDD利用する時間タイミングにてガードバンドなしで周波数利用が可能となるように、上下リンク間の自己干渉を抑圧するSIC (Self Interference Cancellation) 機能が必要である。

XDDは5G NRにおいて小セルやバックホールリンクでの利用でも効果的である。例えば、隣接帯域の信号を送受するバックホールリンクと小セル基地局間の干渉に対しては、

バックホールリンクの送信信号を小セル基地局の受信機でキャンセルし、一方小セル基地局の送信信号をバックホールリンクの受信機でキャンセルすることで周波数の有効利用を図ることができる。



ビル陰やユーザ密集エリアでの通信状況を改善

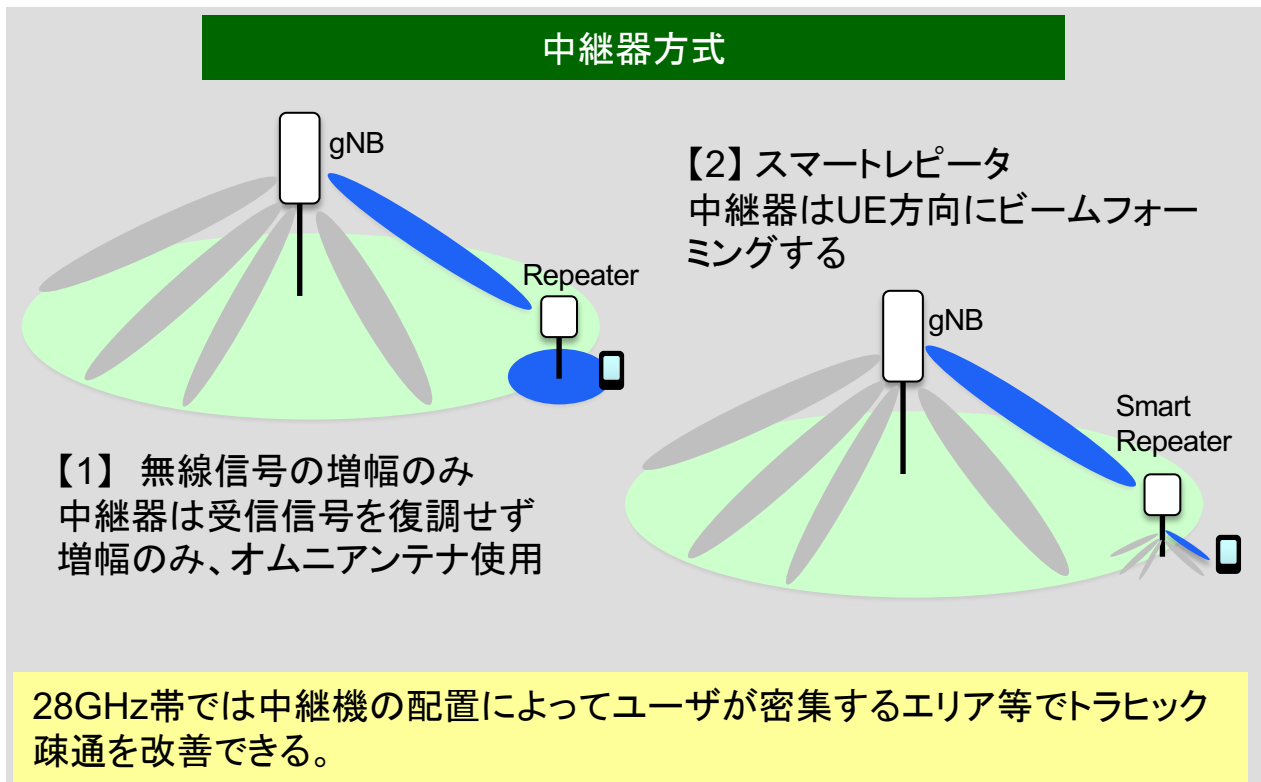
ユーザが密集する場所やビル陰等で中継装置を機動的に配置することで高速通信、映像ストリーミング、ゲーム等を多くのユーザにストレスなく提供できる。その際、基地局(gNB)とUE間の中継器には次のような形態がある。Rel-18ではスマートレピータを検討している。

1. 単純な増幅装置

gNB-UE間の双方向受信信号を復調せず単に増幅して中継する。
中継器アンテナは全方位(オムニ)型となる。

2. スマートレピータ

- a. 中継器はgNBと同じセルIDを使用し、基地局からの制御信号に基づきUE方向にビームフォーミングすることでセルカバレッジを拡大する方式
- b. 中継器はgNBと異なるセルIDを持ち、中継器内DUではgNBから独立したスケジューラにより小セル内UEへのリソース割り当てを行う方式



送信ビーム利得や方向を高精度で指定

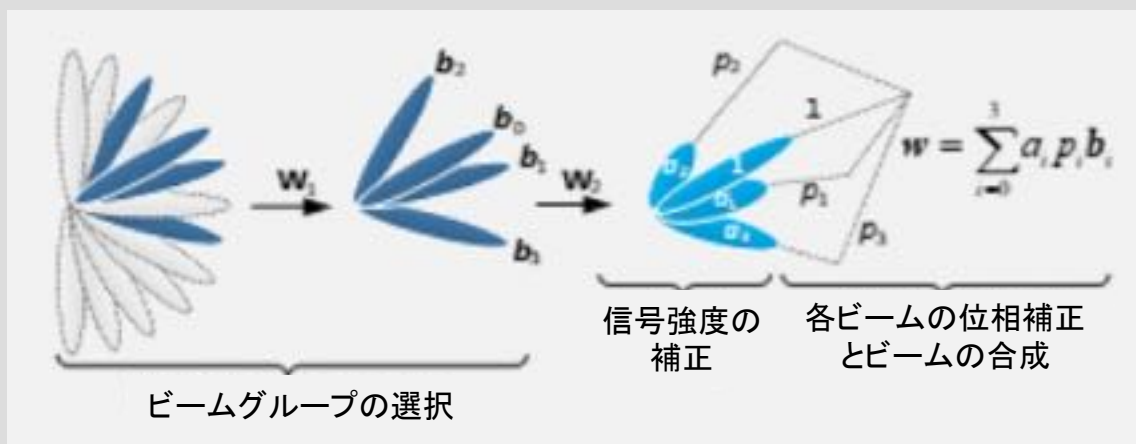
高い周波数の無線環境下の移動UEでは速い伝搬状態変化に追従したMIMO制御が必要となる。幸いTDDでは送受リンク双対性を用いてCSI-RSの受信品質測定をもとに送信リンクのプリコーディング行列を選択する制御が可能である。

このプリコーディング行列では、予め決められた数値の組を用いるタイプIコードブックがあるが、Rel-17では各UE向けの送信ビームの利得や方向をより高い精度で指定できるタイプIIコードブックを規定している。

タイプIIでは、基地局アンテナの縦横両方向にてDFTオーバーサンプリングしたビームの中からいくつかのビームを選択し、それらの振幅とPSK信号位相差を考慮して合成(線形結合)したビームを当該UE向けの送信ビームとしている。

例えば、基地局アンテナが4x3の素子で構成される場合、4倍のオーバーサンプリングを適用して得られる16x12のビームの中から4つのDFTビームを選び、それらを線形結合した合成ビームを水平・垂直方向で求め、その積を送信ビームとすることになる。

タイプ-IIコードブックの概念



水平・垂直方向に4x3の素子をもつ場合、垂直方向では3素子に対して4倍のDFTオーバーサンプリングで得られた合計12ビームから選んだ4つのビームから振幅と位相を考慮して合成ビーム w_v を得る。同様に合計16ビーム内の4ビーム合成にて得られるビーム w_h との積 $w_v w_h$ を送信ビームに指定する。

DFTオーバーサンプリングによる複数ビームを合成して方向と利得を調整。

各UEに対する伝搬チャネル行列は別々

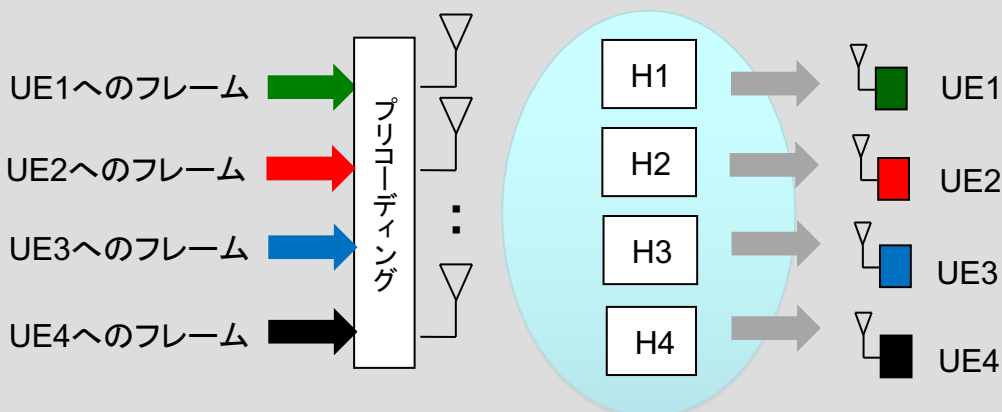
5G NRでの基地局からUE向けのダウンリンク伝送では、複数UEに同じ時刻、同じ周波数で空間多重による同時伝送を行うMU-MIMOを可能にしている。

MU-MIMOでは、BSとUE間の伝搬チャネル行列 (H) は各UE毎に異なる。その行列成分の決定には、各レイヤー内の特定RSの受信品質測定結果を利用するが、MU-MIMOでは受信S/Nの確保(できれば最大化)に加え、他UEとの相互干渉を低減(できればヌルに)するUEグループを短時間で見出すアルゴリズムが必要である。

ただし、一般に他UEへの指向性をヌルにするプリコーディング行列では、次ページのように目的UE方向の指向性最大化はできない。そこで、目的UE方向の指向性を最大化しつつ他UEへの指向性を一定値以下に抑えられるUEグループを選択する方策が考えられる。

その際には各UEへのサービス提供レベルの公平性(フェアネス)確保といった運用課題があるかもしれない。

MU-MIMOでの空間多重



各UE向けプリコーディング行列では目的UEへの送信電力は十分大きく、他UEへの干渉は十分小さくなるように、UEの組を短時間で見出すアルゴリズムが必要である。

伝搬チャネル行列をブロック対角化するBD法

合計 n 個の UE_k に送信する基地局の送信ベクトルを $\mathbf{S}(S_k)$ 、 UE_k の受信ベクトルを $\mathbf{R}(R_k)$ とし、基地局と UE_k 間の伝搬チャネル行列を $\mathbf{H}(H^k)$ 、 UE_k 向け送信ウェイト行列を $\mathbf{W}(W^k)$ とすると、 $\mathbf{R} = \mathbf{H} \mathbf{W} \mathbf{S}$ と表される。この時、目的UE以外のUEへの指向性が全てヌルになる際の \mathbf{R} は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H^1 W^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & H^2 W^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & H^n W^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{pmatrix}$$

すなわち、伝搬チャネル行列 \mathbf{H} はウェイト行列 \mathbf{W} との乗算によりブロック対角化(BD: Block Diagonalization)される。ただし、この場合、各UEへの最大指向性は下図Aのように保証されない。一方、下図Bは目的UE方向の指向性は最大となるように制御した場合であり、目的UE以外のUE方向はヌルにならない。

MU-MIMOでのアンテナ指向性制御法

図A 他UEへの指向性ヌルの場合

図B 目的UEへの指向性最大の場合

目的UE以外のUEへの指向性を一定値以下に抑えつつ、ビームを目的UE方向に高精度で指向させるように制御するのが有効と考えられる。

Rel-17では主にサイドリンク機能を拡張

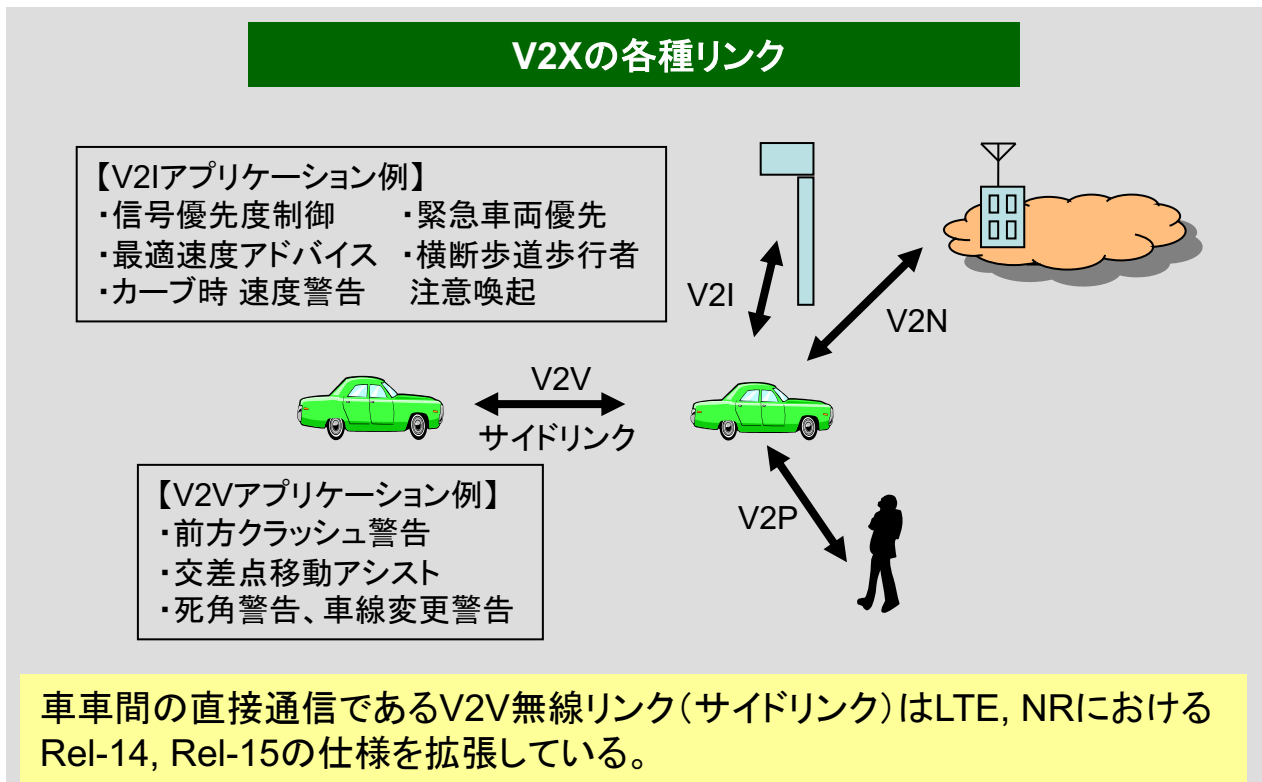
5G NRでは自動車(V)向け無線通信であるV2Xの仕様制定が重要である。ここでのXには車車間通信におけるV、路側機のI、歩行者のP、網のNがある。携帯電話網を利用するC-V2Xではこのうち基地局との通信V2Nと車車間のV2Vが特に重要であり、V2Vの無線リンクはサイドリンクと呼称される。

Rel-17では、主に次のようなサイドリンクの機能拡張が行われた。

- ・リソース割当の改善(デバイス遅延時間と消費電力の低減、信頼性の向上)
- ・DRX(Discontinuous Reception)導入による消費電力低減
- ・サイドリンク用の新周波数帯の設定
- ・デバイス間リレーによるサイドリンクカバレッジの拡大

Rel-18でもV2Xのうちサイドリンク通信が主に検討されている。

なお、世界各国ではC-V2X向けに5.9GHz帯の割り当てが進行中である。



車車間の直接通信であるV2V無線リンク(サイドリンク)はLTE, NRにおけるRel-14, Rel-15の仕様を拡張している。



2. 5G Advanced 仕様の動向

(11) 日本でのITS関係の電波割り当て状況

C-V2X通信用に5.9GHz帯の割り当てを検討中

日本では、以前よりAM帯(1620kHz)でのハイウェイラジオ、FM帯(76-90MHz)やS帯(2.5GHz)での渋滞や通行止め等の交通情報提供に加え、5.8GHz帯を用いた自動料金収納(ETC)サービスが普及している。

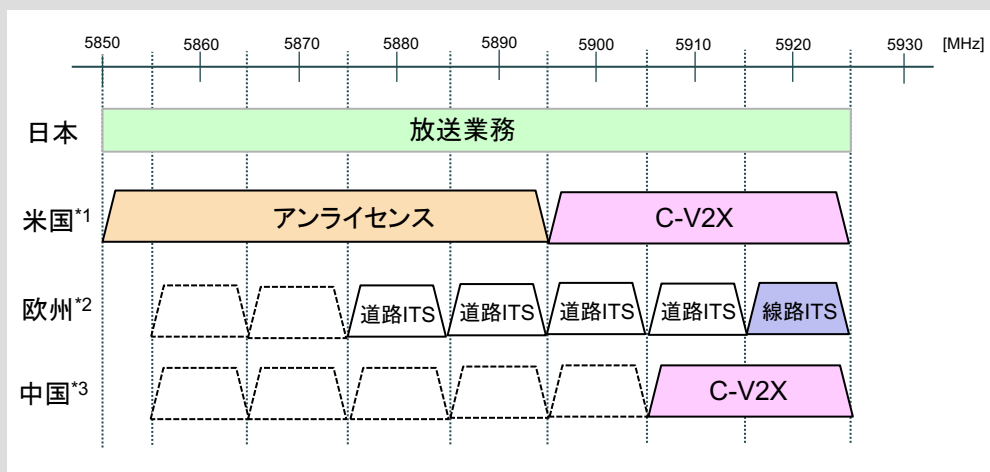
今後は、C-V2Xを通じた高度な運転支援や自動走行に向けた協調型運転支援システムの導入を目指すため、総務省では5.9GHz帯でのC-V2X通信への新規割当の検討を2023年度中に行う予定である。

当該帯域では、放送事業者が番組中継用に固定局や移動局を運用していることから、周波数共用の可否や既存システムの移行方策の検討が必要である。また、次についても検討が行われる模様である。

- ・自動運転時代のユースケース
- ・V2X通信とV2N通信との連携方策 等

各国の5.9GHz帯電波の割り当て状況

総務省資料を元に作成



*1) FCCは2020年にITS(DSRC)に割り当て済み70MHz幅のうち30MHz幅をC-V2Xに割り当てると発表。

*2) ECは2020年に50MHz幅をITSへ割り当てるべきと決定。

*3) 中国では2018年にC-V2Xの導入を決定。

近年、各国ではC-V2X通信用に5.9GHz帯の新規割り当てを行っている。



2. 5G Advanced 仕様の動向

(12) C-V2Xのサービス例と諸元

自動運転から交通流制御や車内娯楽提供まで

C-V2Xでは、様々なサービスの提供が想定されている。

その中で最も基本的な要件は安全であり、車線変更や交差点通過時などでは運転者や歩行者に適切な情報をタイムリーに提供することが重要である。

そこで5GAA(5G Automotive Association)では、C-V2Xでの様々なユースケースにおけるデータ速度、エンドツーエンド遅延時間、信頼性を掲げている。

自動運転車が安全快適に走行するためには、信号の灯色やサイクル、ブラインドエリアの車両や歩行者の存在、緊急車両の接近、道路の規制情報などを先読みしたり、車線変更時に車同士の情報交換の通信が必要となる。

例えば、交差点横断時の車両と信号機間データ速度は64kbpsと低速だが遅延時間は10ms以下、信頼性は99.9999%以上という厳しい値が課されている。

このほか、交通流の状況に応じた信号機の制御、車群の走行開始タイミングの指示などによる交通流の効率化や、車内エンターテインメント等の便益提供、運用管理のためのソフトウェア更新に関する要求条件も規定している。

C-V2Xのサービスと諸元

サービス	主なユースケース	C-V2X	E2E遅延時間	信頼性	データ速度
安全	車間距離	V2V	50 ms	99.9%	2 Mbps
	歩行者横断注意	V2P	100 ms	99.9%	64 kbps
自動運転	車線変更 (Lane merge)	V2V	20 ms	99.9%	12 kbps
	緊急状況での運転	V2V	10 ms	95%	48 kbps
	車車協調による自動運転	V2V	20 ms (4ラウンドトリップの各回で)	99.9%	64 Mbps (システムレベル)
	隊列走行	V2V	50 ms	99%	24 kbps
	交差点横断 (crossing)	V2I	10 ms	99.9999%	64 kbps
	地図情報取得	V2N, V2I	100 ms	99%	16 Mbps
	周囲環境の把握	V2N, V2I	100 ms	99.99 %	4-80 Mbps
	遠隔操縦 (ToD)	V2N	100ms (UL)/20ms (DL)	99.999%	36M (UL) /400k (DL)
交通流 効率化	バスレーン設定/解除	V2I, V2N	200 ms	99%	40 kbps
	信号機制御による交通流調整	V2I, V2N	100 ms	95%	20 kbps
	車群の走行開始	V2I	10 ms	99.999%	20 kbps
便益	自動バレーパーキング	V2I	500 ms	99%	16 kbps
	注意確認	V2V, V2N	20 ms	99.9%	40 kbps
	車内娯楽	V2N	20 ms	99%	最大250 Mbps
	死角エリアの確認支援	V2I, V2V	50 ms	99%	5 Mbps
運用管理	無線システムのソフトウェア更新	V2N	遅延許容	99%	200 Mbps (遅延許容)

(出典) "C-V2X & 5G", 3G Americas White Paper, Sept. 2021 p.12より

ユースケース中、交差点横断での遅延時間や信頼性への要求は最も厳しい。

隊列走行などでの車車間通信

Rel-17での車両間(サイドリンク)通信では、リソース割当機能の改善としてセルラ網内での通常のスケジューリング(モード1)に加え、セルラ網外などにて車両自身がサイドリンク用リソース割当を行う(モード2)が追加された。

また、DRXなどによるUE消費電力削減やリレー機能によるカバレッジ改善が行われた。

Rel-18では次のような機能追加による通信速度の改善が検討されており、これによって、前方車両の視界映像を後続車両に伝送することによる自動運転機能の向上や、データオフロードなどの新たなユースケース実現を期待している。

- ・アンライセンス帯域の利用: サブ6GHz
- ・キャリアアグリゲーション(CA)の利用: アンライセンス帯域とのCAも含む
- ・サイドリンクリレー機能の拡充: セルラエリア外にいる通報者から車両間サイドリンクのマルチホップで警察や消防署に連絡するなど

サイドリンク伝送のシナリオ



サイドリンクでは特定グループ向け通信が可能である。サイドリンク通信用無線リソースの割り当てをセルラ網でなく車両自身が行うことも可能となる。

VRやARなどの総称

XR(eXtended Reality又はCross Reality)は、VR(Virtual Reality: 仮想現実), AR (Augmented Reality: 拡張現実), MR(Mixed Reality: 複合現実)などの現実世界と仮想世界を融合して新しい体験を作り出す技術の総称である。

XRは5Gなどの通信とクラウド機能をヘッドマウントディスプレイ等の高機能端末と組み合わせることで、その応用はゲーム等の娯楽から、医療、防災、ビジネス、教育、芸術など日常生活のあらゆる分野に広がる可能性がある。


3GPPではRel-17にて、5G-Advanced以降におけるXRの主要なユースケースを考慮して、データ速度や遅延時間等の通信サービス提供上の要求条件を整理した。

今後、応用分野に適合した使い勝手の良い端末(UE)とソフトウェアの登場が期待される。そこでは、UE側とクラウドやエッジを含む網側でのデータ処理との連携が重要になるだろう。

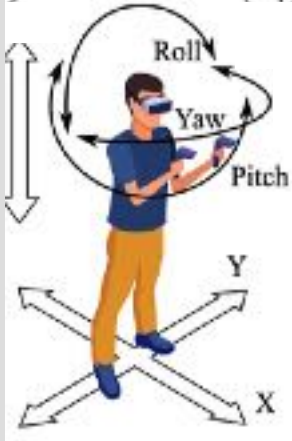
XRのユースケース例

【VR】

低品質 中品質 高品質

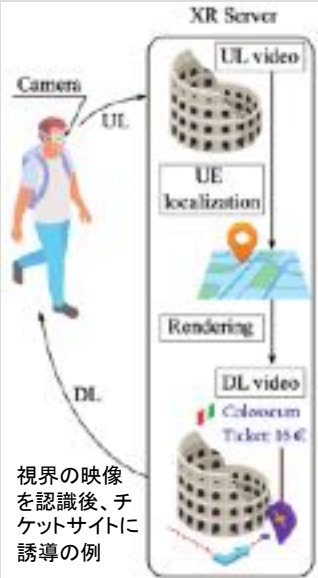


【クラウドゲーム】



6DoF:6軸自由度

【AR】



視界の映像を認識後、チケットサイトに誘導の例

“Standardization of XR over 5G and 5G-Advanced 3GPP New Radio”, Gapeyenko, et al, May 2023”

インターネット上のユーザ同士の交流の「場」メタバースでの活用もあるか。



2. 5G Advanced 仕様の動向

(15)XRユースケースでの要求条件

ULでの超低遅延・高速伝送やUE消費電力低減が必要

VRでは没入感のある仮想世界を生成できるように、ユーザの視点を追跡して、視野中心部の解像度は高め、周辺部は解像度を落としたストリーミング映像 (VDS: Viewport-Dependent Streaming) を提供する。

ARでは、現実世界の3Dシーン上に、ユーザ自身がカスタマイズした仮想オブジェクトを表示する。そのためにはユーザの位置や動きを検出するセンサ情報やカメラ映像の送信が必要である。

5G-Advancedでは、XR利用を促進する次のような機能向上が求められる。

- ・MIMOやビームフォーミングによる、主にULでの帯域利用改善
- ・柔軟な複信方式による遅延時間短縮
- ・XRトラヒックに見合った適応DRXなどによるUE消費電力の低減
- ・移動中のセルハンドオーバー時間短縮やCA/DCの適用
- ・NWエッジでのAI/MLの適用やXRアプリ向けスライシングの適用 など

XRユースケースでの要求条件

トラヒック	DL/UL	ユースケース	パケット速度 (fps)	平均データ速度 (Mbit/s)	パケット遅延 (ms)
映像	DL	AR	60, [30,90,120]	30, 45, [60]	10
		VR			
		CG		8, 30, [45]	15
動き制御	UL	AR	60	10, [20]	30
		VR	250	0.2	10
		CG			
音声, データ	DL/UL	DL: AR/VR/CG UL: AR	100	0.756, 1.12	30

出典: Standardization of XR over 5G and 5G-Advanced 3GPP New Radio”, Gapeyenko, et al, May 2023

ユーザの位置や動きに連動して、視野方向別の映像解像度を変化させたり、新たなXRコンテンツを配信する視野依存型ストリーミング (VDS: Viewport-dependent streaming) の最適化が必要となる。

eMBB/URLLCよりNR機能を削減

Rel-17ではセンサー等の用途のため、次のような諸元を有するUE標準であるRedCap (Reduced Capability) を新たに規定した。

- 最大帯域幅：サブミリ波では20MHz, ミリ波では100MHz
- 受信アンテナ素子数：1または2
- 通信モード：半2重通信に限定
- 送信電力低減、低消費電力モード、移動性能やハンドオーバー機能の制限
- 高次変調方式の使用制限(256QAMはオプション)、データの繰り返し伝送等

Rel-18では、サブ6GHz帯 (FR1) の5MHz帯域幅にて上下リンク最大伝送速度を10Mbpsとすることで、LTE-M (Cat M1) やNB-IoTでは困難な監視カメラ、産業用センサー、スマートグリッド等の幅広い用途にも対応できるようにする。

また、産業用センサーやウェアラブル端末向けに、起動 (Wake-up) 信号検出用の別受信機でUEを起動する方法や、RRC inactiveモードでの小容量データ送信をUE送信だけでなくUE受信方向にも適用可能にするなどを検討している。

NR-Lightの位置付け



NR-Lightでは eMBB/URLLC対応UEとeMTC/NB-IoT対応UEの中間的なアプリケーションである監視カメラや産業用センサー等への応用を想定。

サービス要求条件に対応したネットワーク機能を柔軟に構成

Rel-18では、消費電力の節減、基地局負荷の平均化、UE移動管理の最適化などの重要課題の解決にAIやMLの活用が期待されている。

消費電力削減では、基地局設備に加えてUE電池の長持ち化も対象である。

隣接基地局はセル内のUE数や通信量をもとに隣接基地局との間で分担する負荷を調節することで電力消費の大きい装置の運転休止/再開を行う。

UE移動管理では、基地局ビーム制御やセル間ハンドオーバーの支援など。

5GコアでのAI/ML向けデータ解析には、NWDAF (Network Data Analytics Function) や、NEF (Network Exposure Function) が利用される。

アプリケーションによってはAIのディープラーニング処理をUEとコアNW(及び外部アプリ事業者)が分担することで効率化する方法も考えられる。

その場合には、UEやコアNW装置等の間でディープラーニング中間層のデータが伝送されることになる。

AI処理の分担イメージ

各種資料を元に作成



AIの急速な進歩に伴い、6G時代には多方面でAI/ML活用が広がるだろう。



2. 5G Advanced 仕様の動向

(18) NEF (Network Exposure Function)

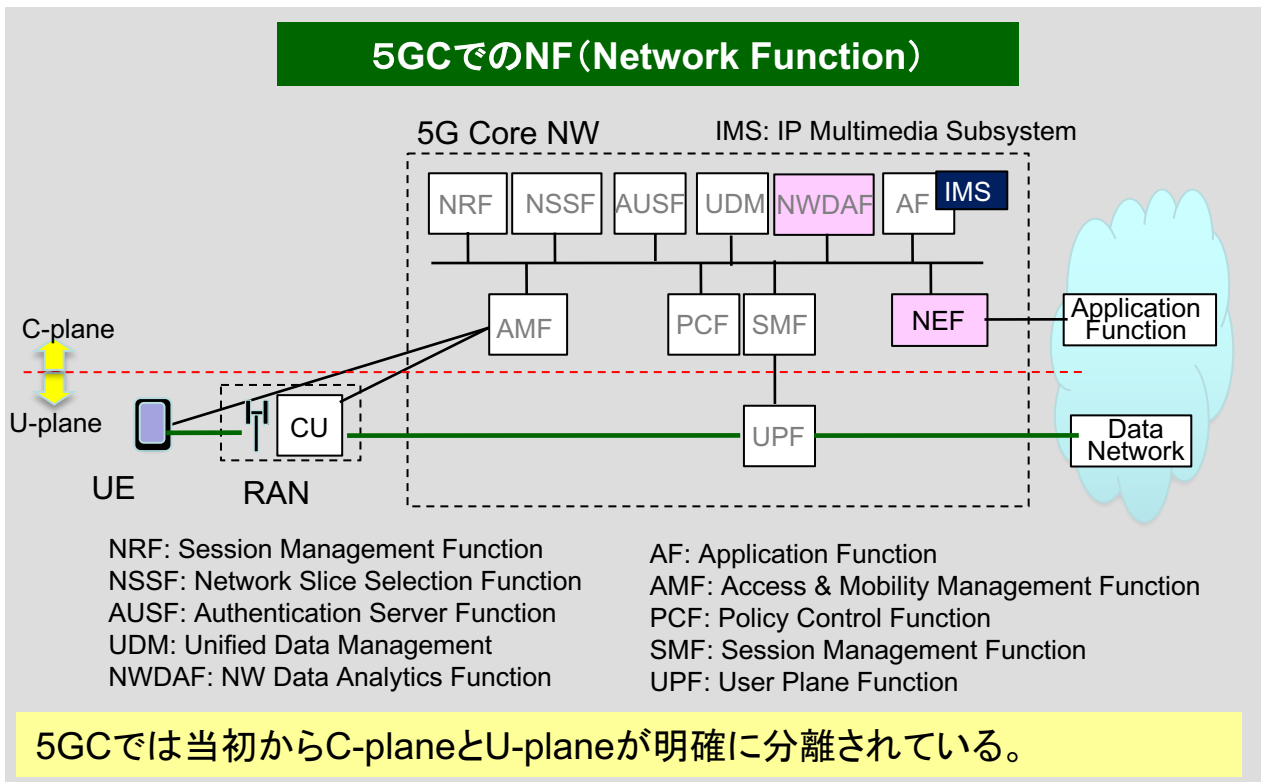
ネットワークの一部機能を外部に開放してアプリ開発を促進

5Gコア網(5GC)では、多様なアプリケーションの開発や利用が可能になるように網機能の一部をAPIを通じて外部に開放できるようにした。このAPI提供機能はNEFと呼称される。

5GCは下図のようにNF (Network Function) と呼ばれるノードで構成される。ここで、サービス事業者とUE間のU-planeでのデータ伝送はUPFを経由するが、外部アプリ事業者等はNEFを介してC-plane上の加入者情報やネットワークの状態変化などを把握したり、一部の網機能の制御ができるようになる。

例えば、車との通信では次のようなユースケースでのNEF活用が想定される。

- ・車への動的地図情報(大容量)の提供
- ・車からのCANデータ(低遅延)の取得
- ・統計情報分析機能の公開による交通流制御や車の経路選択支援
- ・4G エリアから5Gエリア移動時に利用可能なNEF APIの通知
- ・トラヒック閑散時(すき間時間)を利用したデータ通信 など





【著者略歴】

田代 務

KDDIにて、衛星通信設備の設計や設備導入、研究開発計画の策定、人材育成、海外事業等に従事。ワシントン事務所長、KDDアメリカ副社長、IP事業企画部部長の後にKDDIを退職し、2003年に同僚と株式会社A2A研究所を設立。現在は、主に衛星通信やモバイル通信関係の調査や技術支援を行っている。東大工学部電子工学修士修了。静岡県出身。

主な著書 「どこでもワーク、いつでもラーニング」、「携帯電話の仕組み」、「衛星通信のしくみ」など。
(以上、A2A研究所ウェブサイト www.a2a.jp にて公開中)



サブキャリア同士が直交する

LTE以降ではチャンネル多重方式にOFDM(上りはOFDMA)が用いられている。

直交する(Orthogonal)FDMを意味するOFDMは、チャンネル毎に異なる周波数の電波を使用するFDM方式での周波数間隔を極限まで狭めた方式であり、地上デジタル放送や無線LAN等でも広く利用されている。

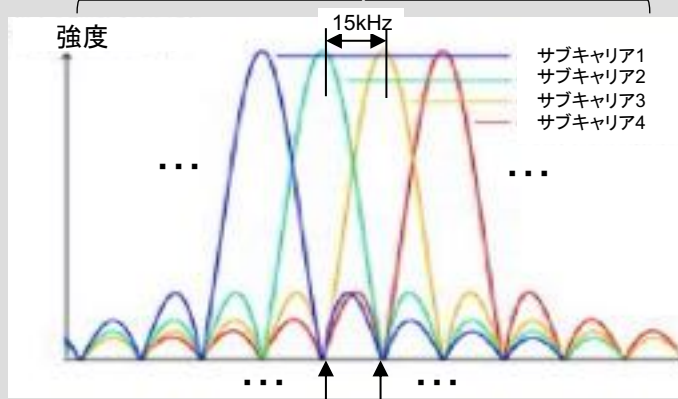
OFDMにはサブキャリア数を連続的に増やすことで順次高速化できる拡張性(スケーラビリティ)や、MIMOアンテナとの相性が良いなどの長所がある。

デジタル信号変調波スペクトラムには山と谷が交互にあり、信号強度がゼロとなる周波数が等間隔に並んでいる。そこで、この谷の周波数に、別のサブキャリアの中心を配置することで互いのサブキャリアは混じり合わずに伝送できる。

OFDM波の受信や送信には、複雑な時間波形を多数の正弦波の周波数成分に分解する離散フーリエ変換/逆変換(DFT/IDFT)が必要となるが、その高速演算法(FFT:Fast Fourier Transform)と集積回路の高速化によって可能となった。

OFDM変調波スペクトラムとサブキャリア間の直交性

12個のサブキャリアの組(サブキャリア間隔が15kHzの場合、180kHz幅)がリソースブロックの周波数軸での単位



各サブキャリアの中心周波数では他のサブキャリアのスペクトラムの谷になっている。

NサブキャリアによるOFDM信号は次になる。ここで X_k は第kサブキャリアの変調シンボル。

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k t/T}, 0 \leq t < T$$

各サブキャリアの直交性は次式で示される。 $\delta_{k_1 k_2}$ は $k_1=k_2$ の時のみ1, それ以外は0。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{T} \int_0^T (e^{j2\pi k_1 t/T}) * (e^{j2\pi k_2 t/T}) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi (k_1 - k_2) t/T} dt \\ &= \delta_{k_1 k_2} \end{aligned}$$

サブキャリアの谷に他のサブキャリアを配置すると互いに干渉なく通信できる。



(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(2) フレーム構造

1無線フレームはLTEと同じ10ms

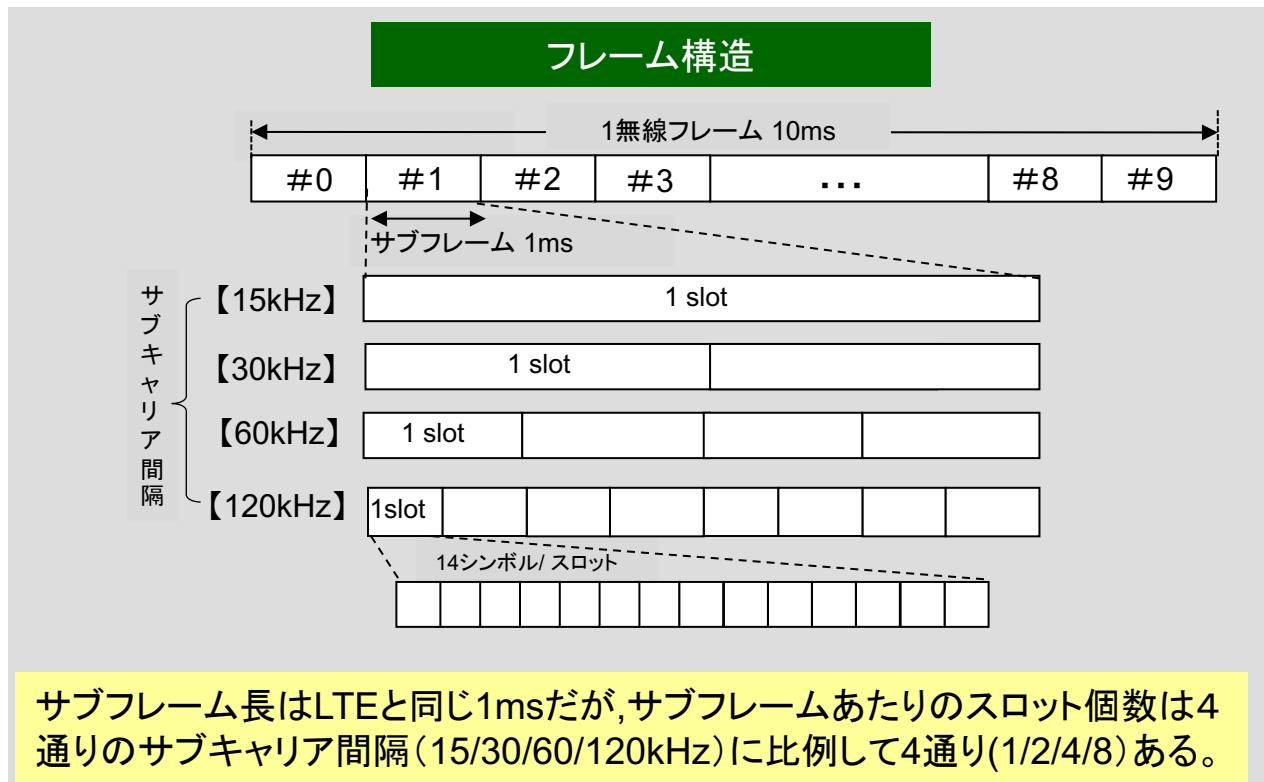
時間軸では、NRの1無線フレームはLTEと同じく、1ms長のサブフレーム10個を有する10ms長である。(注)

サブキャリア間隔が15kHz固定であるLTEでは1サブフレーム内に14シンボルの組であるスロット1個が対応する。

一方、NRでのサブキャリア間隔は無線キャリア帯域幅に応じ15,30,60,120kHzの4種類があるので、1サブフレーム内でのスロット数は、それぞれ1,2,4,8個となる。

なお、Rel-17ではFR2-2(52.6~71GHz)のサブキャリア間隔として新たに480kHz, 960kHzをサポートすることとしている。

(注) URLLCのため、遅延時間を抑える必要がある場合は、2ms長のTDD無線フレームの使用が可能である。





(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(3) 物理層チャネル

データチャネルのFECはLDPC,制御チャネルにはPolar符号を使用

上下リンクの物理層チャネルは次の目的に使用される。

PBCH: システム基本情報(MIB: Master Information Block)を常時放送

PRACH: UEから通信開始やセル間移動時にランダムアクセス信号を送信

PDCCH: UEに上下回線リソースの割当やページング等の情報を通知

PUCCH: 割当要求とその確認応答やチャネル品質情報(CSI)を伝送

PDSCH: 下りデータトラフィックを伝送

PUSCH: 上りデータトラフィックを伝送

伝送ブロック毎に誤り訂正を行うために次の符号化を行う。

データチャネル(PUSCH/PDSCH)にはLDPC(Low Density Parity-Check)符号

制御チャネル(PUCCH/PDCCH)には Polar符号

データ伝送の変調方式では、下り(PDSCH)はQPSKから1024QAMまで、上り(PUSCH)は $\pi/2$ -BPSKから256QAMまでがUE性能や伝搬路の状態に応じて使用される。

5G NRの物理層チャネル

送信	略称	用途	符号化	1次変調	2次変調
BS	PBCH	システム報知情報	Polar	QPSK	CP-OFDM
	PDCCH	制御信号	Polar	QPSK	
	PDSCH	ユーザデータ	LDPC	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM	
UE	PRACH	初期ランダムアクセス	Zadoff-Chu系列		CP-OFDM 又は、 DFTS-OFDM
	PUCCH	制御情報	Polar*	$\pi/2$ -BPSK, QPSK	
	PUSCH	ユーザデータ	LDPC	$\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	

*) ペイロードサイズ12未満ではLTEと同様のブロック符号を使用

PRACH符号にはCAZAC系列の1種であるZadoff-Chu系列を使用している。



(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(4) 参照信号

高い周波数での信号強度低下や位相雑音増加を考慮

5G NRでもLTE同様、多くの参照信号(RS: Reference Signal)が使用される。両者間での大きな相違は、LTEにて各セル固定位置に挿入されるセル固有RS (CRS: Cell Specific RS)を5G NRでは用いない点である。全セルでの常時RS送信はリソース利用効率を低下させる一方、そもそもUEは5G基地局が送信する鋭いビーム上の殆どのRSは受信限界以下となる。

そこで5G NRでは、信号復調を助けるDM-RS(DeModulation RS)を上下のデータチャネル、制御チャネルや報知チャネル内に配置している。一定振幅で優れた自己及び相互相関特性を有するDM-RSのリソースグリッド位置やシンボル数は上位レイヤで設定できるため自由度が大きい。

このほか、下りリンクではチャネル状態の取得にCSI-RS, 高い周波数で顕著になる位相雑音の推定にPT-RS, 時間及び周波数変動の追跡にTRS、上りリンクではチャネル品質や受信タイミング測定にSRSが用いられる。

5G NRでの参照信号

RS	送信	機能
CSI-RS	BS	CSIの取得とビーム管理, PDSCHが送信されるRB内で送信
PDSCH DM-RS		PDSCHの復調, PDSCH内に収容
PDCCH DM-RS		PDCCHの復調, PDCCH内に収容
PBCH DM-RS		PBCHの復調, PBCH内に収容
PT-RS		PDSCHの位相追跡, PDSCHのDMRSと同じRB内で送信
TRS		下りリンクでの時間及び周波数の変動を追跡
SRS	UE	基地局での上りリンクチャネル品質や受信タイミングの測定用
PUSCH DM-RS		PUSCHの復調, PUSCH内に収容
PUCCH DM-RS		PUCCHの復調, PUCCH内に収容

CSI: Channel State Information DM-RS: DeModulation Reference Signal
 PT-RS: Phase Tracking Reference Signal
 TRS: Tracking Reference Signal, SRS: Sounding Reference Signal

DM-RSは上下データ伝送、制御チャネルや報知チャネル内に配置される。



(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(5) DM-RS

リソース使用効率や耐干渉性が高い

5G NRのデータチャネルや制御チャネル、システム報知チャネルに使用されるDM-RSはこれらチャネルの同期検波と復号を支援する参照信号である。

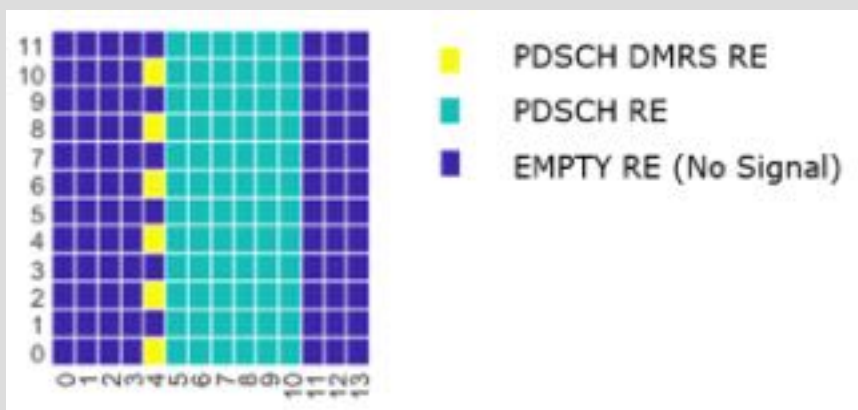
LTEでセル毎に常時送信するCell specific RSはリソース使用効率が劣るのに加え、セル端ではセル間干渉雑音の原因にもなる。

一方、DM-RSは次の観点からこれらの問題が少なく、利用の自由度も大きい。

- ・ 使用チャネルのリソースブロック内にのみ配置される。
- ・ 一定振幅のためPAPRが低く、巡回シフトを用いた相互相関ゼロの符号系列を異なるUE向けに使用することで、複数UE間でのDMRS直交化が可能。
- ・ リソースブロック内の位置やシンボル数を上位レイヤで設定できる。

また、DM-RSは送信側ではプリコーディング前に挿入されるので、受信側でのDM-RS信号復調動作を通じてプリコーダ行列を知ることができる。このためプリコーディング行列コードを予め伝送しておく必要がない。

PDSCHのリソースブロックにおけるDM-RSの配置例



DM-RSシンボルは1つのRE内に最低1個、最大4個まで収容できる。

このRB例では、下り伝送データを挿入するRE (Resource Element) の直前時間位置に合計6個のREにDM-RSが挿入されている。

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_PDSCH_DMRS.html#Parameters_DMRS_Configuration_Type1

DM-RSはデータや制御チャネルのRB内に配置され、そのスロット位置やシンボル個数は上位レイヤで指定できる。



(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(6) Zadoff-Chu系列

一定振幅であり、優れた相関特性を有する

DM-RSなど5G NRでの参照信号の多くに使用されているZadoff-Chu信号系列は、振幅が一定で自己及び相互相関特性が優れるCAZAC(Constant Amplitude Zero Auto Correlation)系列の一種である。

Zadoff-Chu信号点を複素平面で表すと半径1の円周上にあり、各信号点の位相は巡回シフトする整数列に比例した角度となる。

一定振幅のため瞬時最大電力値と平均電力値の比であるPAPRが小さい。また、例えば系列符号長を12等分した各ポイントのいずれかを開始点とする12個の巡回シフト系列では互いの相関はゼロとなる。

BSでは各UEのDM-RS信号に異なる巡回シフト系列を割り当てて複数UE間でのDM-RS直交化ができるのでUE間の信号分離処理が高精度に行える。

Zadoff-Chu系列は、UEの初期アクセス時に送信するPRACHプリアンブル信号やBSが常時送信するプライマリ同期信号(PSS)でも使用されている。

Zadoff-Chu系列符号

周期Nの循環シフト符号である Zadoff-Chu系列 $x(n)$ は次式で表される。

$$x(n) = \begin{cases} \exp(-j \frac{\pi \mu n^2}{N}) & : N \text{ が偶数} \\ \exp(-j \frac{\pi \mu n(n+1)}{N}) & : N \text{ が奇数} \end{cases}$$

$n = 0 \sim N-1$ であり、 N と μ は互いに素である。

Zadoff-Chu系列の自己相関関数 $X_Z(k)$ は次式となる。[*] は複素共役を示す。

$$X_Z(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot x(n+k)^* \right| = \begin{cases} 1 & : k = KN \\ 0 & : k \neq KN \end{cases}$$

Zadoff-Chu系列符号はDM-RSやPRACHプリアンブル信号で使われている。



(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(7) セルサーチからシステム情報取得まで

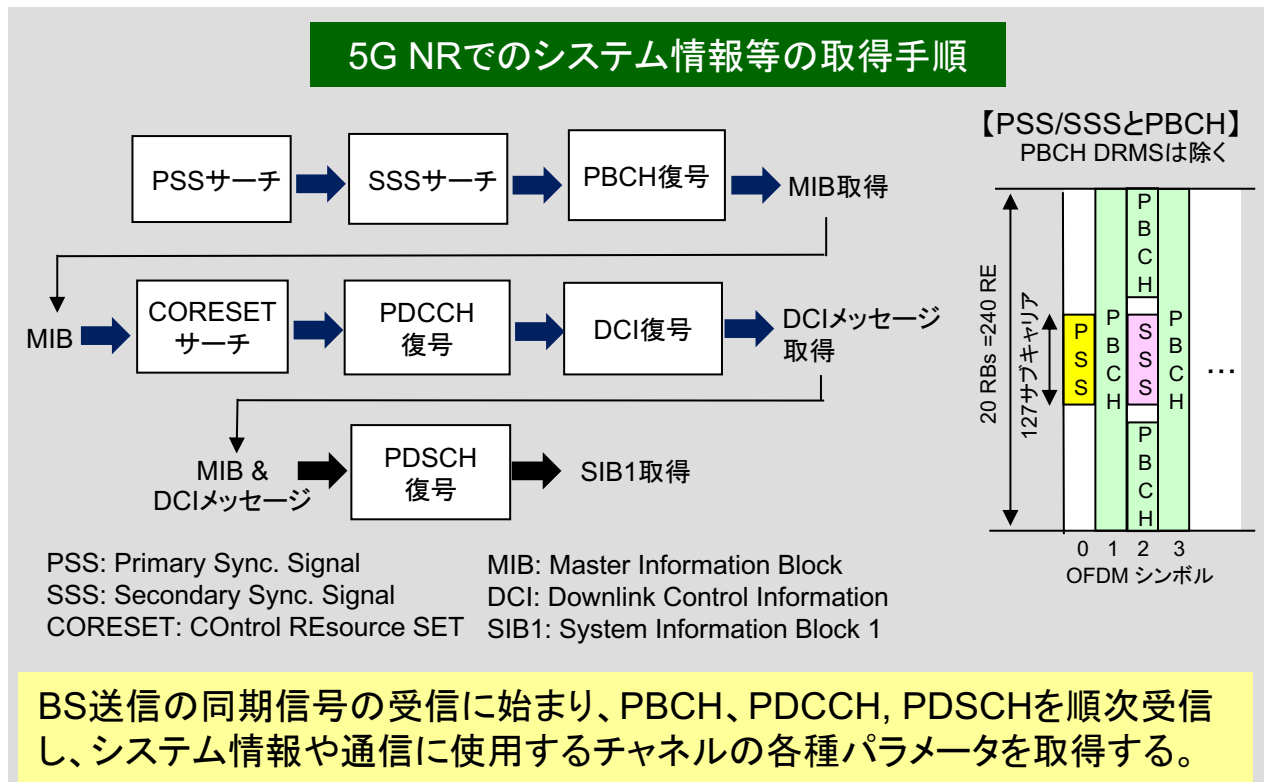
UEは通信開始時に先ずBS送信の各種システム情報を取得

5G NRでのシステム情報のうち、最も基本的なMIB (Master Information Block)はPBCHにて絶えず周期的に報知されている。

他のシステム情報であるSIB (System Information Block)は、NWやUEから要求がある場合にPDSCHにて伝送される。その際、SIB1 (SIB#1)は単独で、他のSIBであるSIB#2～#9は1つにまとめられて伝送される。SIB1にはUEの初期アクセスに必要なULキャリア情報やランダムアクセス信号の構成情報が含まれる。

UEは通信開始時に、BSが送信する2つの同期信号(PSSとSSS)を順次受信して在圏セル番号を知るとともに、MIBを取得する。その後、UEは当該MIBを用いて制御情報の復号エリア(CORESET)をサーチして、PDCCH/DCI、続いてPDSCHを受信復号してSIB1を取得する。

5GNRでは、LTEと異なりPDCCH/DCIのリソース範囲などのCORESET情報をRRC(Radio Resource Control)手順にて各UEが取得できるようにしている。



(8) CORESET

基地局の制御が可能なリソースエリア

5G NRでの新たに定義されたCORESET(Control Resource SET)は、LTEでのControl Regionと同義であり、PDCCH/DCIを送信するためのリソース要素をいう。

LTEではPDCCHが管理制御するリソースグリッドはキャリア帯域(CBW)全体に亘っているのに対して、5G NRではUEが使用するエリアであるBWP (Band WidthPart) のみに限定して指定できる点にある。

多数の周波数帯や極めて広い帯域がある5G NRにて、多種多様なUEが使用する無線リソースを個別に限定できるようにすることで、UEの簡単化や消費電力削減を意図している。

BWPではパラメータとして帯域幅、周波数位置、サブキャリア間隔があり、各UEは最大4個の異なるBWPを基地局からのRRCにて設定できる。

CORESET (Control Resource SET)

LTE

NR

CORESET ユーザ定義パラメータ
連続OFDMシンボル数, CORESET時間, $m(=1,2,3)$
スロット内CORESET送信回数
フレーム内のCORESETスロット数
CORESETシンボル毎のREG数

CBW: Carrier BandWidth
 BWP: BandWidth Part
 REG: Resource Element Group

CORESETは5G NRにおけるPDCCHリソース要素の名前である。LTEと異なりPDCCHは周波数帯域全体には送信されない。



異なるサブキャリア間隔を持つCAもBWPで指定可能

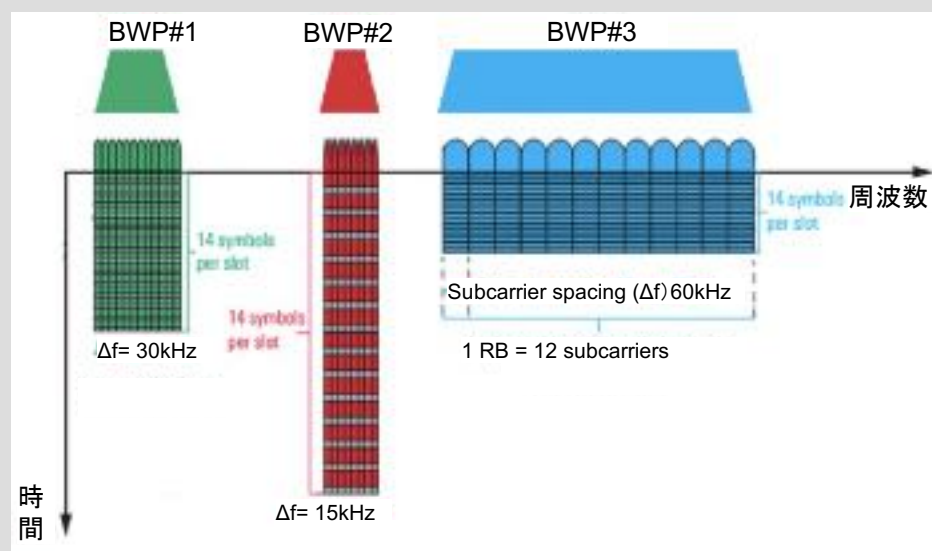
5G NRではキャリア帯域幅の最大値が数百MHzというようにLTEに比べて大幅に増加することから、UEが使用する帯域幅等の情報であるBWP (Band-Width Part)を基地局が上位レイヤシグナリングにてUEに対し設定している。

BWP情報には帯域幅、周波数位置、サブキャリア間隔があり、各UEには最大4個のBWPが設定できるが、UEは特定の1時点ではULで1つ、DLで1つのBWPを使用する。

このBWP情報はRRCシグナリングによって変更できるので、広帯域をサポートするUEでもトラヒックが(少)ない場合は、狭い帯域幅のBWPを設定することで消費電力を低減できる。

また、CA (Carrier Aggregation) の場合には、CC (Component Carrier) 毎にBWPを設定する。その際、BWP情報によってサブキャリア間隔の異なるCCを束ねることも可能である。

複数のBWPの例



通信に使用する帯域や周波数位置等のBWP情報はRRCシグナリングによって変更できる。

同期信号と報知情報の組を含むビームを掃引

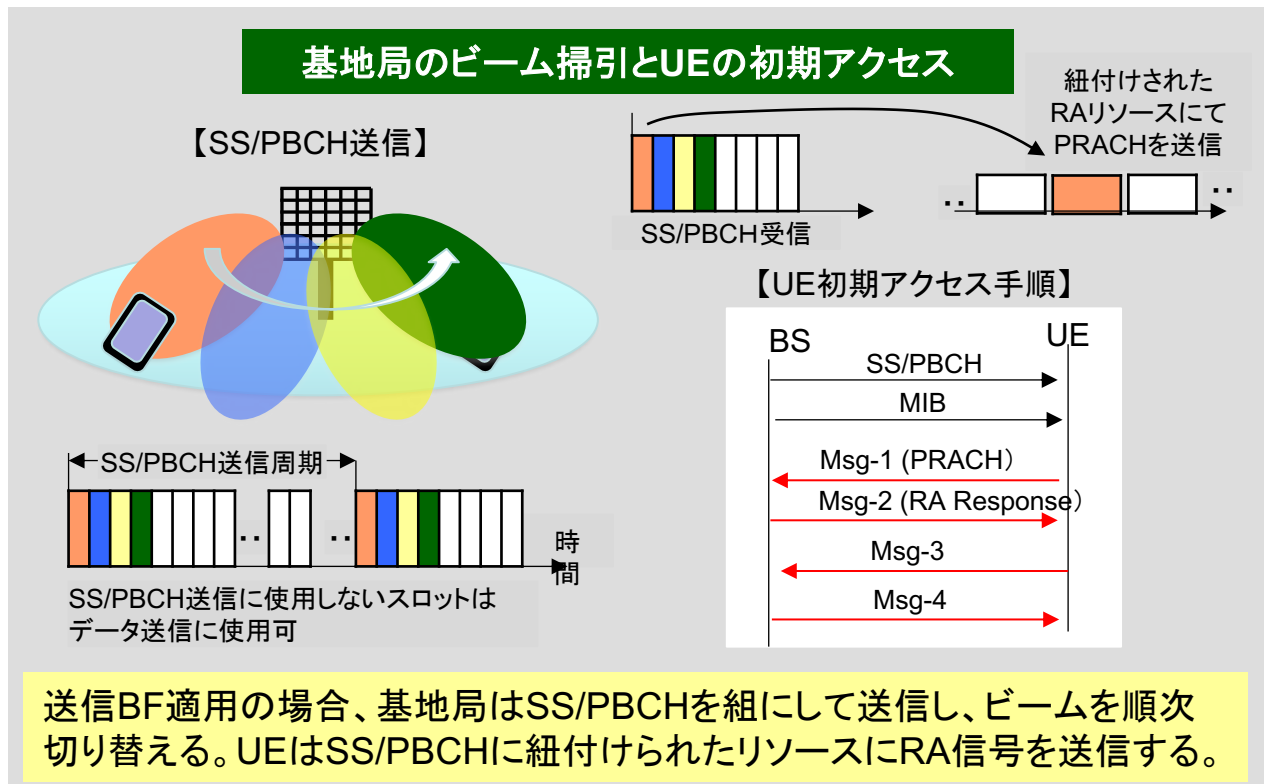
NRの初期アクセスは概ねLTEと同様に、①同期信号(SS)の検出 ②PBCHからの報知情報の取得 ③ランダムアクセス(RA)による接続確立 の3手順をとる。

ただし、5GNRにてセル拡大のため基地局アンテナに送信BFを適用する場合には、ビームが細くなるためUEにてSS/PBCHが受信不能になる恐れがある。そこで、SSとPBCHを組にして同一ビーム内に送信し、当該ビーム方向を順次切り替え送信するビーム・スイーピング機能が追加された。

UEでは受信可能なビーム内のSS/PBCHブロック情報をもとに、無線フレームやスロットの時刻同期をとるとともに、SS/PBCHブロックに紐づけられたRAリソースにて次の4ステップで初期アクセスを確立する。

- Step-1 UEからPRACHチャネルにてRAプリアンブル信号を送信
- Step-2 BSは受信応答としてTA情報、初期UL許可、C-RNTIをPDSCHで送信
- Step-3 UEはPUSCHにてULの割り当て情報を送信
- Step-4 BSはUEに上記の受信確認応答を送信

TA: Timing Advanced C-RNTI: Cell-Radio Network Temporary Identifier





(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(11) 非同期ランダムアクセス(NSRA)

長短2種類のプリアンブルシーケンスを規定

5G NRでは、キャリア周波数としてサブギガから準ミリ波までの多様な周波数帯にて、複数のサブキャリア周波数間隔が使用される。そこで、UEの初期アクセスに用いるRACHプリアンブル信号にはこれらに応じて使用する複数のフォーマットが規定されている。

RACHプリアンブル信号にはLTE同様、振幅一定で自己相関ゼロのCAZAC (Constant Amplitude Zero Auto-Correlation) 系列が用いられるが、5G NRでは信号長839と139シンボルの2種類がある。前者の長いプリアンブルは、セル半径が大きく伝搬遅延が長いサブ6ギガの場合に有用である。一方、短いプリアンブルはFR1, FR2のいずれにも適用できる。

LTEと異なり、NRではプリアンブル信号長に加え、先頭のサイクリックプレフィックス長(T_{cp})、最後尾のガードタイミング長(T_{gp})の組合せも複数ある。

UEが使用するこれらのパラメータは初期アクセス時にBSからSIB1にて報知される。

RACH(Random Access Channel)

プリアンブルシーケンス長	サブキャリア間隔 (kHz)	キャリア周波数
839	1.25, 5	FR1
139	15, 30	FR1
	60, 120	FR2



プリアンブル信号に使用されるCAZAC系列は、5G NRの制御チャネル、ユーザデータチャネル、システム報知チャネルに挿入される参照信号DM-RSでも使用されている。

各種の周波数帯やサブキャリア周波数間隔を使用する5G NRでは、それらに応じて長短2種類のプリアンブルシーケンスを使用する。

送信側はIFFT, 受信側はFFTで一括変換

下り回線のOFDM変調信号は次の順序で生成される。

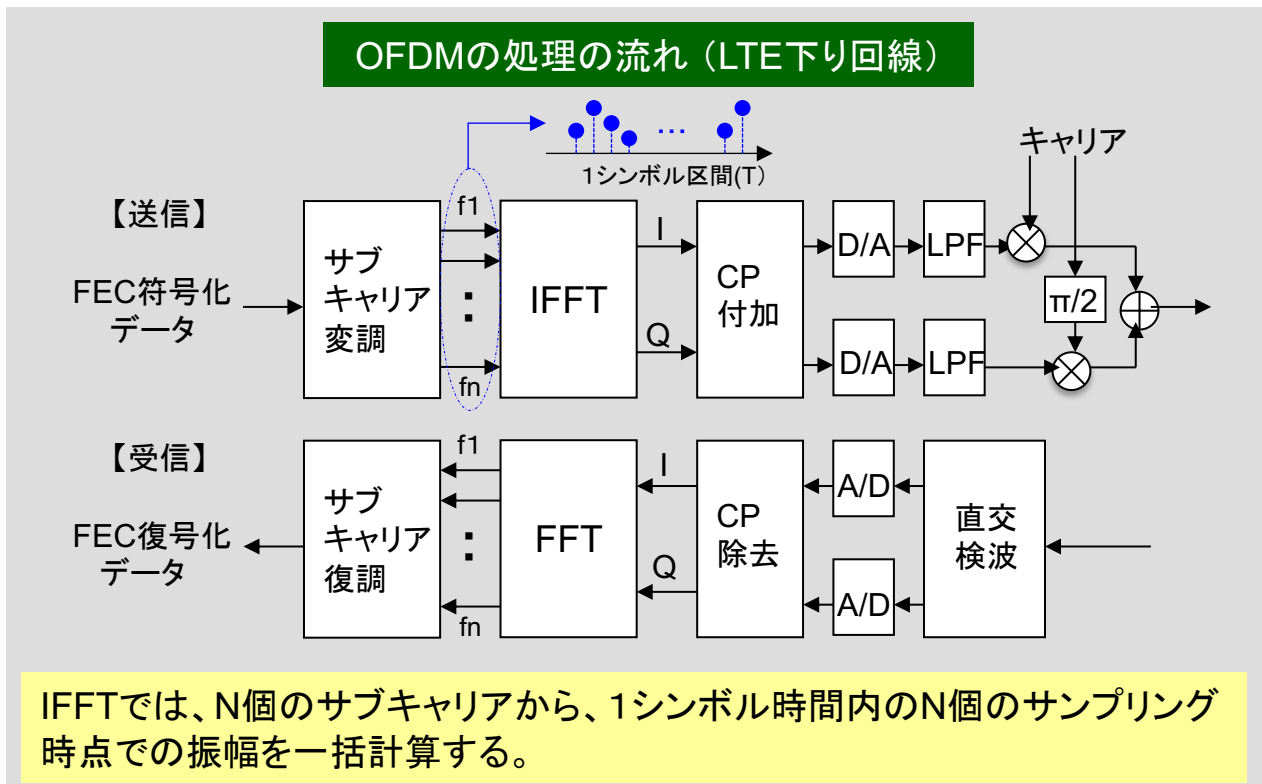
- ・ シリアルデータストリームはサブキャリア変調(QPSK~1024QAM)の後、1シンボル時間にあたるN個の並列な周波数成分に直並列変換される。
- ・ IFFTにて1シンボル時間内のN個の時間領域成分に変換される。
- ・ 並一直列変換された実数部(コサイン成分)と、虚数部(サイン成分)にサイクリック・プレフィクス(CP)が付加される。

一方、受信側であるUEでは、FFTを用いて送信側と逆の順序で復調される。

なお、上り回線では、上記OFDM(別名CP*-OFDM方式に加え、オプションとしてDFTS**-OFDM方式も規定されている。

後者ではサブキャリアの組の信号をシングルキャリアの性質を持つ波形に変換処理することでPAPRを抑えることができる。

*) Cyclic Prefix **) Discrete Fourier Transform Spread



MIMO構成の表現

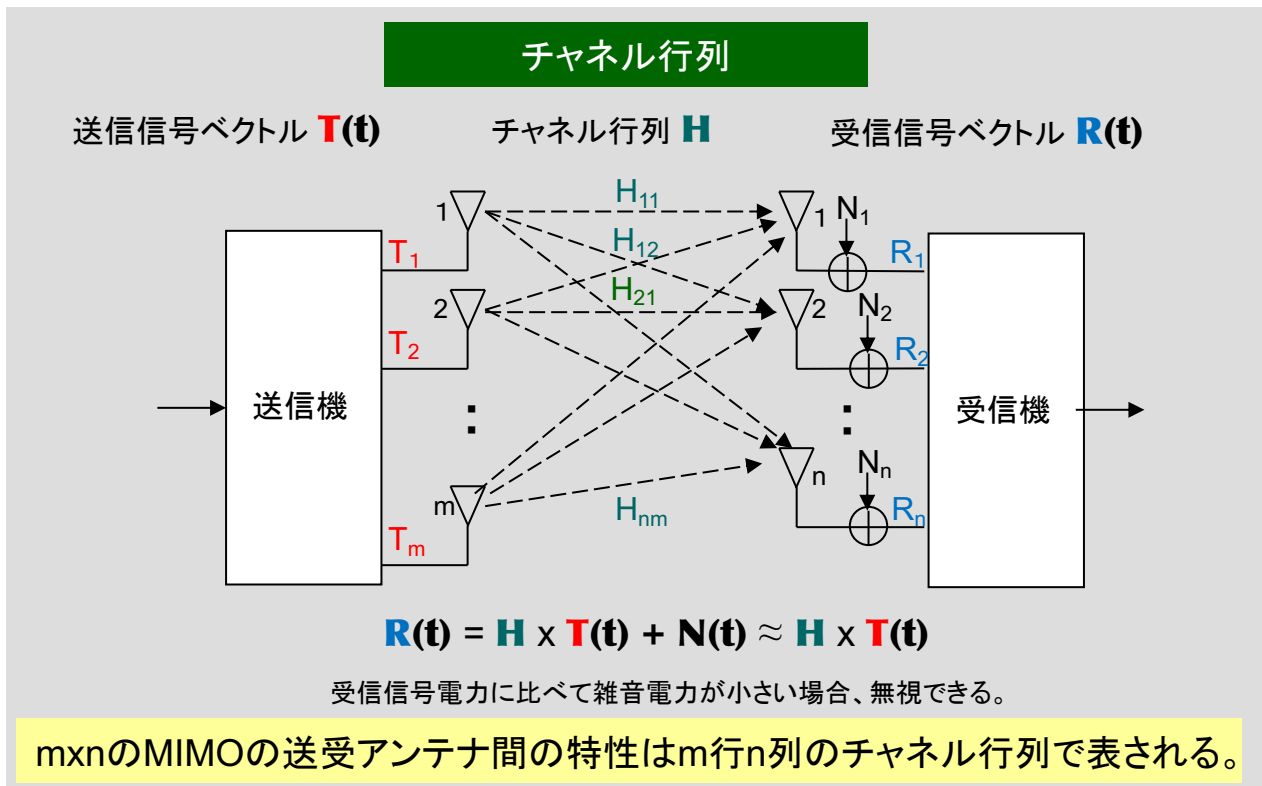
送受とも複数のアンテナを有するMIMOの各受信アンテナでは、複数の送信アンテナからの信号が混じり合って受信される。その際、送受アンテナ間の伝搬状態を考慮した適切な信号処理を両局で行うことで通信容量が増加できる。

送信 m 個、受信 n 個のアンテナによるMIMOにて、信号ストリームを m , n 個の成分をもつベクトル \mathbf{T} , \mathbf{R} 、MIMO伝送路を n 行 m 列の行列 \mathbf{H} で表すと \mathbf{R} は次になる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{H} \times \mathbf{T}$$

通信容量の最大化や安定した通信を行うため両局では次の操作を行う。

- ・ \mathbf{H} の各成分を知るために、送信の各アンテナから送信される参照信号を受信側の各アンテナにて品質測定し、その結果を送信側に返送する。
- ・ 送信側はそのデータをもとに \mathbf{T} に適切なプリコーディングを行った後、送信する。
- ・ 受信側ではアンテナ出力信号に上記プリコーディングの逆操作を行い \mathbf{R} を得る。





仮想的な複数伝送路を作る

n行m列(ランクr)のチャネル行列Hは、適当な行列E_t, E_rを用いることで、r行r列の正方行列で対角成分のみに正の値を有する対角行列Dとの次の積に分解できる。下の括弧は各行列の行と列の数を示す。

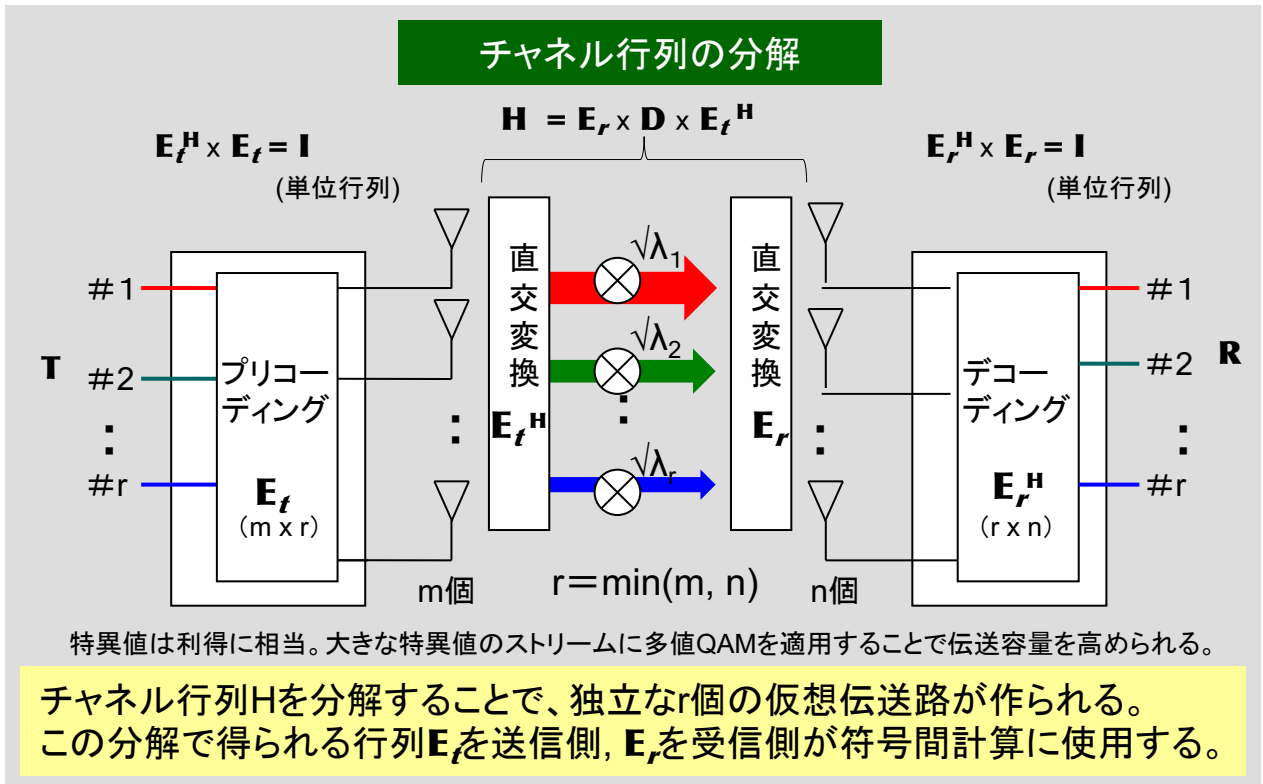
行列の添字Hは共役転置を意味し、E_t^H × E_t = E_r^H × E_r = I(単位行列)となる。また、Dの対角成分は特異値と称する√λ₁, √λ₂, ..., √λ_rで表す。

$$\begin{matrix}
 \mathbf{H} & = & \mathbf{E}_r & \times & \mathbf{D} & \times & \mathbf{E}_t^H \\
 (n \times m) & & (n \times r) & & (r \times r) & & (r \times m)
 \end{matrix}$$

送信側ではr個の送信ストリームを表すベクトルTをE_tによりプリコーディングして、m個のアンテナに入力する。

受信側では、n個のアンテナからの信号にE_r^Hを乗算して得られる受信信号ベクトルRのi成分r_iは、下式よりTのi成分t_iに特異値√λ_iを乗じたものになる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{E}_r^H \mathbf{H} \mathbf{E}_t \mathbf{T} = \mathbf{E}_r^H \mathbf{E}_r \mathbf{D} \mathbf{E}_t^H \mathbf{E}_t \mathbf{T} = \mathbf{I} \mathbf{D} \mathbf{I} \mathbf{T} = \mathbf{D} \mathbf{T}$$



閉ループ制御機能の高速化など

5G NRでは多数のアンテナ素子によるMIMOが有効である。また、上下リンクに同じ帯域を使用するTDDではチャネル双対性によって制御を簡単化できる。

Rel-15では基地局で最大256, UEで最大32のアンテナ素子を用いたMIMOと空間多重の組合せを想定した。

DLでは閉ループ型制御により、CSIタイプIコードブックによる最大8レイヤのシングルユーザMIMO、CSIタイプIIコードブックによる最大12レイヤ(各UEに2レイヤ, Rel-16では4レイヤまで)のマルチユーザMIMOが規定された。

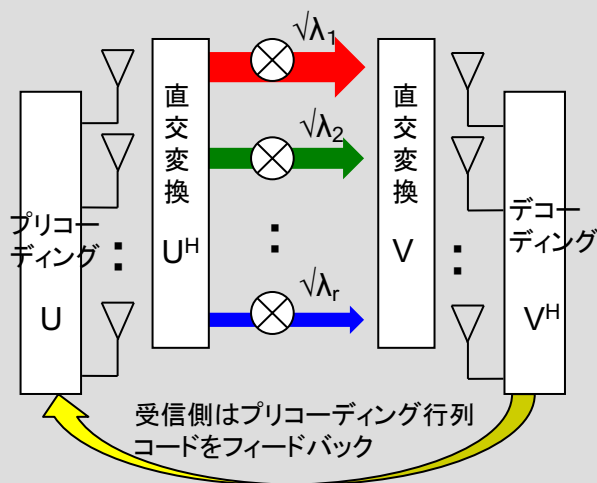
一方、ULでは最大4レイヤのシングルユーザMIMOが送信できる。

ULではチャネル双対性を利用して、DLでの受信品質測定結果をもとにULプリコーディング行列を決定するコードブック不使用の方法も規定された。

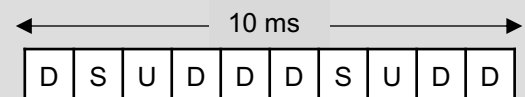
Rel-15ではUL送信ビームに関する指示をRRCメッセージで行なっていたが、Rel-16では下位レイヤ(レイヤ2)で行うことで制御を高速化した。また、制御可能なレイヤ数を8から64へ増加させた。

閉ループMIMO制御の改善

【閉ループによるMIMO制御】



【TDDのスロット配置例】



上下リンクに同じ周波数帯を使うTDDでは、双方の伝搬特性を同一とみなせる。そこで、DLでの受信品質測定結果をもとにULのプリコーディング行列を選択する。

Rel-15では、随時SRSの受信品質測定結果の更新に基づく閉ループ制御をRRCシグナリングで行なっていたが、Rel-16ではMACレイヤで行う手順を規定した。

Rel-16ではTDDでのチャネル双対性利用やMACレイヤでの制御情報伝送によって、閉ループ制御の高速化を図っている。



(付録) 第5世代無線通信方式の概要

(16) コードワード

同時伝送されるデータブロックの単位

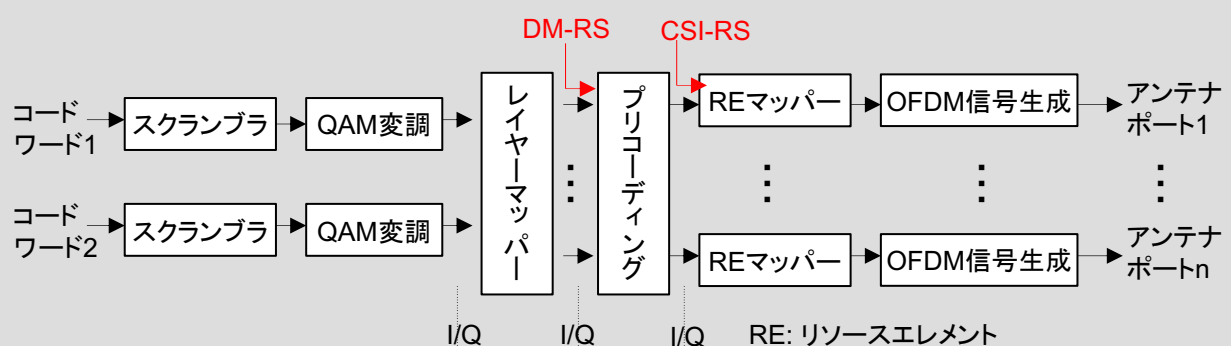
コードワードは誤り訂正符号化を施した伝送データブロックの単位であり、ハイブリッドARQ (HARQ)での再送単位でもある。LTE, LTE-Aと同様に5G NRでも最大2個のコードワードが使用される。

各コードワードはスクランブリングに続いて、QAMデータ変調によりI/Qシンボルに変換された後、1つまたは複数のレイヤーにマッピングされる。

続いて、各アンテナポートへの入力のためにプリコーダー行列が乗算された後、スケジューラによって割当てられたリソースエレメント上にマッピングされる。プリコーディングの前後では、DM-RSとCSI-RSがそれぞれ挿入される。

最後に、逆高速フーリエ変換(IFFT: Inverse Fast Fourier Transform)によって時間領域のOFDM信号に変換され、CPが付加されて、各アンテナからの送信信号となる。

コードワードの処理の流れ



LTE-Aの最大レイヤー数は8。例えばレイヤー数8の場合、コードワード1は第1～4レイヤーに、コードワード2は第5～8レイヤーに、(コードワード1の第1,5,9シンボルが第1レイヤー上に) 1シンボルずつ順番に分配される。

DLSCHでのデータはFECを施したデータブロック(コードワード)単位で1次変調された後、複数レイヤーへのマッピング、プリコーディングが行われる。