

進化を続ける携帯電話の通信方式

1970大阪万博の「未来電話機」から第5、第6世代へ



2025年5月改訂
A2A研究所 田代 務

目次

1	携帯電話方式の変遷		4	LTEとNR	
(1)	1970大阪万博での未来電話	3	(1)	信号の流れ	46
(2)	世代交代	4	(2)	サブキャリア周波数間隔	47
(3)	第1世代	5	(3)	第5世代のリソースブロック	48
(4)	第2世代	6	(4)	フレーム構造	49
(5)	第3世代	7	(5)	下りリンクの物理チャネルと信号	50
(6)	第3.9世代	8	(6)	上りリンクの物理チャネルと信号	51
(7)	第4世代	9	(7)	参照信号の配置例	52
(8)	第5世代	10	(8)	BWP (Band-Width Part)	53
(9)	第5世代のアプリケーション	11	(9)	システム情報の伝送	54
(10)	第6世代の性能と利用シーン	12	(10)	ネットワークに繋がるまで	55
2	電波伝搬とアンテナ		(11)	非同期ランダムアクセス	56
(1)	電波の分類	13	(12)	ビーム・スweeping	57
(2)	日本でのMNOへの周波数割当状況	14	(13)	NWスライス等の網機能の利用設定	58
(3)	FDDとTDD	15	(14)	AMCとTPC	59
(4)	電波の特性	16	(15)	スケジューリング	60
(5)	伝送レベルダイヤ	17	(16)	ネットワーク・スライシング	61
(6)	セルラーコンセプト	18	(17)	NSAからSAへの移行	62
(7)	基地局アンテナ	19	5	5Gが拡げる新分野	
(8)	フェージング	20	(1)	IoT: RedCap/eRedCap	63
(9)	遅延スプレッド	21	(2)	IoT: 超低消費電力無線機	64
(10)	ビームフォーミング	22	(3)	IoT: アンビエントIoT	65
(11)	MIMOアンテナ	23	(4)	NTN: Starlink衛星ダイレクト通信	66
(12)	マルチユーザ-MIMO	24	(5)	NTN: Starlink SCSリンクバジェット	67
(13)	マッシュMIMO	25	(6)	NTN: 3GPPでの検討課題	68
3	信号処理と変調		(7)	NTN: 無線チャネルの構成	69
(1)	UEの機能ブロック	26	(8)	NTN: システム情報	70
(2)	デジタル通信の長所	27	(9)	NTN: UE送信タイミングの制御	71
(3)	音声符号化	28	(10)	NTN: HARQ機能の一部変更	72
(4)	VoLTEとVoNR	29	(11)	NTN: ストアアヘッドシステム	73
(5)	H265動画圧縮方式	30	(12)	NTN: GEO衛星でのNB-IoT	74
(6)	変調とは	31	(13)	V2X: Vehicle to Everything	75
(7)	変調波の時間波形	32	(14)	V2X: C-V2Xのサービス例と諸元	76
(8)	信号点の2次元ベクトル表現	33	(15)	V2X: サイドリンク(V2V)	77
(9)	信号点の複素数表現	34	(16)	AI: ビーム管理や負荷最適化など	78
(10)	信号の復調	35	(17)	AI: AI-RANアライアンス	79
(11)	符号誤り率特性	36	(18)	AI: 自動運用網(AN)	80
(12)	符号誤りの検出と訂正	37			
(13)	FECの効果	38	参考	OFDMとMIMO	
(14)	シャノンの定理	39	(1)	OFDM信号の複素表現	81
(15)	主なFECの種類	40	(2)	IDFTとDFTの計算例	82
(16)	多元接続方式 - 第1世代と第2世代	41	(3)	チャネル行列	83
(17)	多元接続方式 - 第3世代(1/2)	42	(4)	チャネル行列の分解	84
(18)	多元接続方式 - 第3世代(2/2)	43	(5)	チャネル行列Hの特異値分解	85
(19)	多元接続方式 - 第4/5世代(1/2)	44	(6)	閉ループMIMO制御	86
(20)	多元接続方式 - 第4/5世代(2/2)	45	(7)	アンテナ素子増加の効果	87

1. 携帯電話方式の変遷

(1) 1970大阪万博での未来電話

電気通信館で展示されたワイヤレステレホン

第1世代携帯電話が登場する約10年前の1970年に開催された大阪万博ではアメリカ館の「月の石」などと共に各展示館にて近未来機器が多数紹介された。その中には「自動改札機」や「動く歩道」のように今では当たり前となるものから「人間洗濯機」のように注目を集めたが実用に至らなかったものもあった。

日本電信電話(現NTT)の電気通信館で人気を集めた展示の一つがワイヤレステレホン、後の携帯電話である。館内百箇所のブースにて30分間無料で重さ660グラムの端末から全国への通話を楽しめた。館内の電波は屋内アンテナから隣室の交換機経由で全国の電話網につながる仕組みだったという。半年の会期中に延べ約60万人が体験したというこの万博未来電話は、一般人による世界初の大規模な携帯電話実験でもあった。

2025年の大阪万博では、果たしてどんな未来が見えているだろうか。

1970年 大阪万博での人気展示物より



NTT技術資料館写真より



人間洗濯機

今から約50年前には、携帯電話は近未来の生活を象徴する「夢の電話機」だった。以下では携帯電話端末をUE (User Equipment) と記述する。

1. 携帯電話方式の変遷

(2) 世代交代

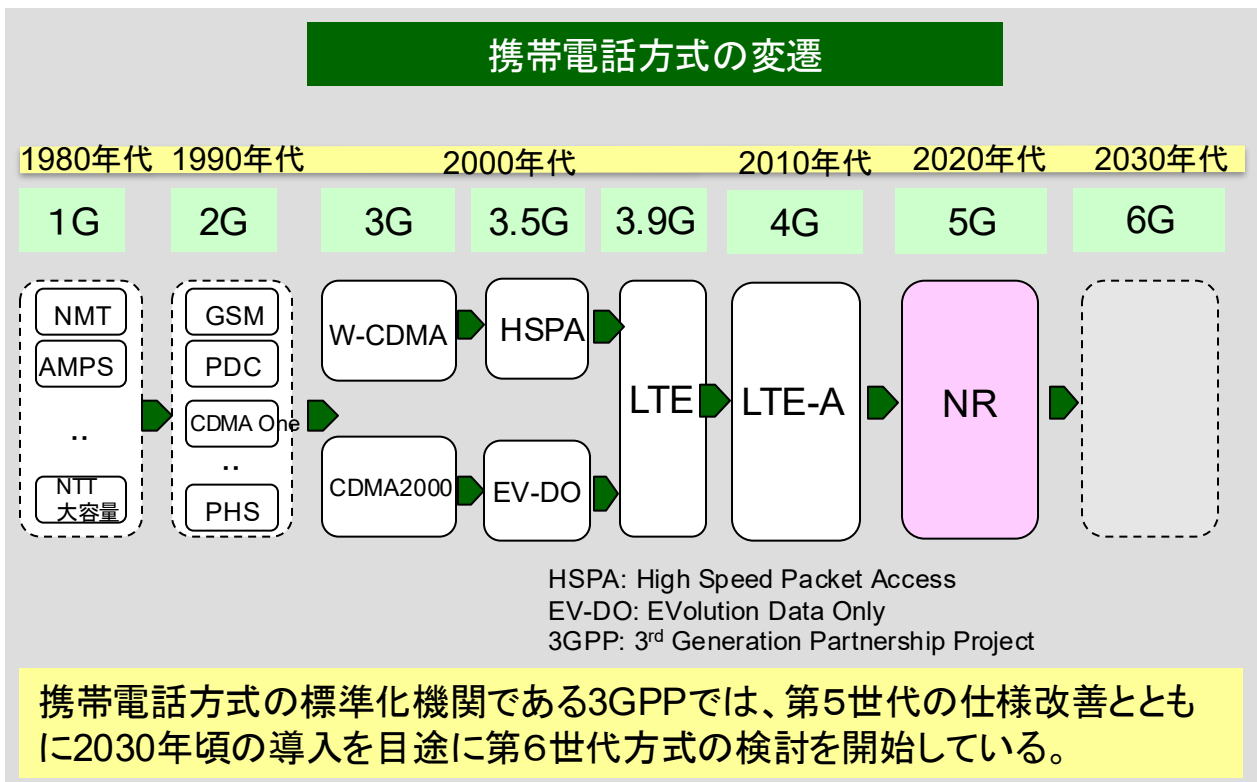
約10年ごとに進化するモバイル通信方式

1980年代前半にアナログ通信方式の第1世代から始まった携帯電話は、1990年代にデジタル化される第2世代を経て、2000年代には、別名IMT2000方式と呼ばれる第3世代に移行する。

IMT2000では世界統一規格を目指すもののW-CDMAとCDMA2000の2方式に分かれてしまった。

第3世代後期にW-CDMAの後継方式とされたLTE (Long Term Evolution) は、第3世代でCDMA2000方式を採用した事業者もこぞって当該方式を導入したため、LTEは事実上の世界統一規格になった。その後、LTEと互換性をもちつつ機能拡張したLTE-A (Advanced) が第4世代である。

2019年から各国で導入が始まった第5世代(5G)無線方式は、NR (New Radio) や New RAT (Radio Access Technology) とも呼称され、4G方式との互換性に留意する一方で多くの新規機能を盛り込んでいる。携帯電話方式の標準化機関である3GPPでは、次の第6世代方式を2030年頃に導入すべく検討を開始している。



1. 携帯電話方式の変遷

(3) 第1世代

アナログ変調方式の自動車電話から始まる

日本での初の公衆移動通信システムは、1979年に電電公社(旧NTT)が東京23区内でサービスを開始した自動車電話だった。NTTが民営化される1985年には、肩掛け式のショルダーホン(重量3kg)が登場する。

セルラー方式を用いる移動通信システムでは、移動しながら通信ができるように位置登録やハンドオーバーの技術が導入された。

この第1世代では、固定電話網の加入者交換局のかわりに携帯基地局と通信制御局等を設置し、利用できるサービスは電話のみ、移動局(UE)は専らビジネス利用向けで全てレンタル制だった。

基地局とUE間の無線チャンネルにはアナログ変調(位相変調)によるFDMA(周波数多重アクセス)方式が使われた。

この第1世代には、NTT方式、米国AMPS方式、欧州TACS方式などがあった。

主な第1世代セルラー方式の無線諸元

項目		NTT	NTT	米国	欧州
			大容量	AMPS	TACS
送信 周波数帯	基地局	800MHz帯			
	移動局	900MHz帯			
無線 チャンネル	キャリア 間隔	55kHz	12.5kHz	60kHz インターリーブ	25kHz インターリーブ
変調方式		PM(位相変調)			
多重アクセス方式		FDMA			
送信 出力	基地局	25W	5W	45W	最大100W
	移動局	5W	1W	3W	7W



ショルダーホン100型
(出力5W, 3kg, 1985年, NTT)

第1世代はアナログ変調方式で、移動局はビジネス専用で携帯とは言い難い形状重量だった。

1. 携帯電話方式の変遷

(4) 第2世代

デジタル変調へ

1990年代に入ると、米国Digital AMPS方式、欧州GSM方式、日本のPDC方式などのデジタル・セルラー方式が実用化される。

この第2世代では、電話の音声信号をデジタル符号化することで、第1世代のアナログ方式よりもUEの送信電力を大幅に低減するとともに、多数の基地局を配置しTDMA(時分割多元接続)を用いることで周波数利用の効率化も図られた。その結果、UEは小型軽量となるとともにシステム容量は大きく増加した。

また、このデジタル化を契機に従来は固定電話網の多重回線上で専ら監視制御に用いてきた特定スロットを転用することで携帯電話宛てのショートメッセージ送信ができるようになった。更に、UEに接続された外部装置と地上パケット網との間のデータ伝送も可能になるなど、後のインターネット時代の萌芽とも言えるサービスが開始された。

特に欧州GSM方式は、日本や韓国を除くほぼ全世界にて廉価な小型UEが使用できるようになり大きな成功を収めた。

主な第2世代セルラー方式の無線諸元

項目	日本	米国	米国	欧州
	PDC	Digital AMPS	cdmaOne	GSM
周波数帯	800MHz, 1.5GHz	800MHz	800MHz	800MHz
無線チャネル キャリア間隔	25kHz インターリーブ	30kHz インターリーブ	1.25MHz	200kHz インターリーブ
変調方式	$\pi/4$ シフトQPSK	$\pi/4$ シフトQPSK	BPSK	GMSK
多重アクセス方式	3/6ch TDMA	3ch TDMA	CDMA	8ch TDMA
信号速度	42kbps	48.6kbps	1.2233Mbps	270kbps
音声符号化	11.2kbps VSELP 5.6kbps PSI-CELP	13kbps VSELP	8/13kbps Q-CELP/EVRC	22.8kbps RPE-LTP

PDC: Personal Digital Cellular
AMPS: Advanced Mobile Phone System

GSM: Global System for Mobile communications

第2世代のGSMはアジアアフリカなどでも長く広く利用されていた。

1. 携帯電話方式の変遷

(5) 第3世代

IMT2000 (International Mobile Telecommunications 2000)

1990年代に普及が始まったインターネットの追い風を受け、第3世代ではデータ利用が急速に増加することになる。

当初は携帯事業者独自仕様だった電子メールやWebアクセスはiPhoneやアンドロイドOS搭載スマートフォンの登場を契機にPC同様に地上インターネットに接続可能になった。更に、画面の大型化やカメラの高精細化が進行する中で写真や動画の通信トラフィックが爆発的に増加する。

この第3世代システムは国際電気通信連合 (ITU) が標準化したIMT2000システムであり、これには① 西暦2000年頃に導入, ②主に2000MHz帯を使用, ③ 最大2000Kbpsの伝送が可能 との3つの意味が込められていた。

ITUは世界統一規格を目指したが、いずれも次の特性を持つと認定されたW-CDMAとCDMA2000などの複数方式に分かれることになった。

- ・異なる符号を用いることで、同じ周波数帯域幅に多くのユーザを収容できる。
- ・近接セル間で同一周波数を使用できるので管理が簡単になる。

W-CDMAとCDMA2000方式の比較

項目	W (Wideband)-CDMA	CDMA2000 1x
多元接続方式	CDMA	CDMA
帯域幅	5MHz	1.25MHz
チップレート	3.84Mcps	1.2288Mcps
フレーム長	10 ms	20 ms
音声速度	4.75k~12.2kbps	1k~8kbps
データ速度	~384kbps	~144kbps
ハンドオーバー	ソフトハンドオーバー	ソフトハンドオーバー
基地局間同期	非同期	同期

CDMA: Code Division Multiple Access 符号分割多重アクセス方式

なお、IMT-2000方式には上記に加え、TD-TDMA, SC-TDMA, MC-TDMA, OFDMA (WiMAX) の合計6方式が認定された。

W-CDMAとCDMA2000用の半導体チップは米国クアルコム社がほぼ独占的な市場シェアを有していた。

1. 携帯電話方式の変遷

(6) 第3.9世代

LTE (Long Term Evolution)

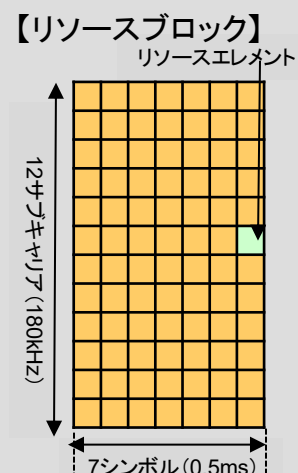
LTEはW-CDMAの後継として、下り100Mbps, 上り50Mbpsを達成する方式として3GPPが定めた規格である。(通称3.9G) 無線区間では、下りにOFDMが採用されるなどにより、3G(W-CDMA)や3.5G(HSPA)方式とは互換性がない。

第3世代ではCDMA2000方式を採用した事業者もLTEを導入したことにより、事実上の世界統一規格となった。LTEと互換性をもち、高速化させたものがLTE-Advancedであり、ITUが第4世代と定義した、低速移動時(歩行中)に最大で下り1Gbps, 上り500Mbpsの通信が可能となった。

LTEではデータ需要急増に柔軟に対応できる拡張性(スケーラビリティ)を重視して、多重方式には地デジ放送やWi-Fi等で実績があるOFDM(直交周波数分割多重)を採用するとともに、マルチパスによる符号間干渉やUE送信機の非直線性などのモバイル環境を考慮した信号形式や回路構成としている。
また、LTEネットワークでは全信号をIPパケット伝送するオールIP方式のシンプルな網構成とすることでパケット遅延時間の大幅短縮を図っている。

LTEの無線パラメータとリソースブロック

項目	諸元
変調・アクセス方式	上り SC-OFDMA 下り OFDM
帯域幅	1.4, 3, 5, 10, 15, 20MHz
最小TTI	1ms
サブキャリア周波数間隔	15kHz
サイクリック・プレフィクス長	4.7μs(第1シンボルのみ5.2μs), 又は 16.7μs(注)
サブキャリア変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM



OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex SC-OFDMA: Single Carrier OFDM Access
TTI: Transmission Time Interval (注) 16.7μsは広いセルエリアを用いるMBMS用

LTEでは 0.5msx180kHzの区画(リソースブロック) 2個(1ms x 180kHz)を単位にリソース割り当てが行われる。

1. 携帯電話方式の変遷

(7) 第4世代

LTE-A (Long Term Evolution Advanced)

第4世代となるLTE-Aでは、LTEをベースに複数帯域や複数基地局との電波を同時に組合せて使用することができる次のような技術の導入や拡充を図っている。

・キャリアアグリゲーション(CA: Carrier Aggregation)

LTEではUEが送受信できるのは最大帯域幅20MHzの1波のみだが、LTE-Aでは、最大5波までの複数キャリアを束ねて同時使用できるようにした。このCAでは、隣接キャリア同士だけでなく、2GHz帯と800MHz帯のような異なった周波数帯域間での合成も可能となっている。

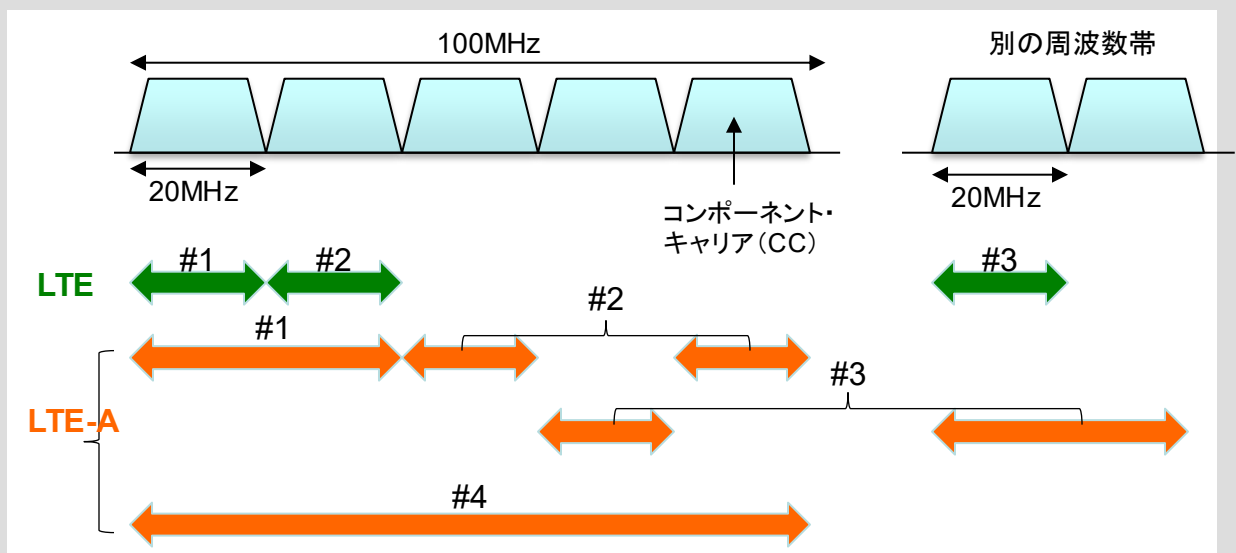
・MIMO (Multi Input Multi Output)

基地局、UEのアンテナ数として、それぞれ最大8, 4までを規定した。

・DC (Dual Connectivity)

マクロセル基地局とスモールセル基地局のような複数基地局が協調することで1つのUEが複数基地局との同時通信を可能にするもの。

LTE-Aでのキャリアアグリゲーション適用例



LTE-Aでは最大20MHz幅のコンポーネントキャリア(CC)5波を合成して最大100MHzの帯域幅も。飛び飛びの帯域や別の周波数帯とも合成可能に。

1. 携帯電話方式の変遷

(8) 第5世代

NR (New Radio)

5G無線方式のNRではモバイルブロードバンド(MBB)サービスの高度化に加え、あらゆるモノが無線でインターネットにつながるIoT(Internet of Things)や、車の自動運転等を支援する低遅延・高信頼の機能に関して次の数値を目標とした。

- ・enhanced Mobile BroadBand (eMBB)
ユーザ体感速度を最大で下り100Mbps, 上り10Mbpsとする。
- ・massive Machine-Type Communications (mMTC)
センサーや機械などの多数UEからの同時接続数を百倍にする。
- ・Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC)
無線区間の伝送遅延時間を1ミリ秒以下にする。

5Gではサブ6GHzや24GHzを超えるミリ波帯にて最大400MHzまでの帯域幅をTDDにて利用可能としている。また、LTEでは15kHz固定であったサブキャリア間隔を最大120kHzまで拡大可能にし、タイムスロット長はその拡大に伴って比例的に減少させることによって遅延時間の短縮や消費電力の削減を図っている。

ITUによる4G, 5G方式の主要特性

カテゴリー	4G (IMT-Advanced)	5G (IMT-2020)
最高データ速度	DL:1Gbps UL:50Mbps	DL:20Gbps UL:10Gbps
ユーザ体感速度	10Mbps	100Mbps
最大帯域利用効率	DL:15bps/Hz UL:6.75bps/Hz	DL:30bps/Hz UL:15bps/Hz
UE移動速度	350 km/h	500 km/h
遅延時間	10 msec	1 msec
接続UE密度	10万台/平方マイル	1千万台/平方マイル
最大帯域幅	20MHz/無線チャネル (チャネル合成で100MHz)	1GHz

DL (DownLink) : 基地局→UEの下りリンク, UL (UpLink) : UE→基地局の上りリンク

5Gでは新たな周波数帯の使用などによるデータ高速化とともに、遅延時間の短縮や接続UE密度の増大によって多様なサービス提供が可能に。

1. 携帯電話方式の変遷

(9) 第5世代のアプリケーション

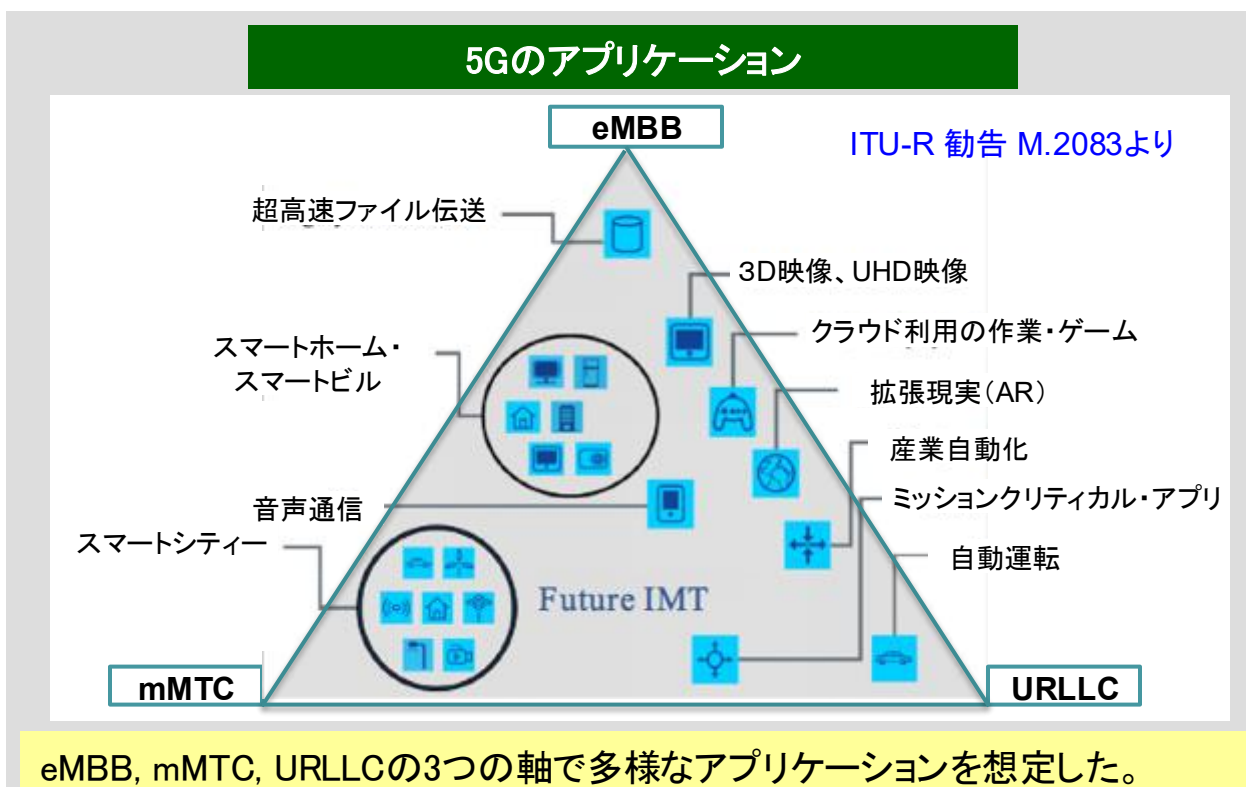
超高速、大量・低速、低遅延・高信頼の3つの軸

5G NRでは、超高速伝送のeMBB, 大量のセンサや機械とのmMTC, 低遅延で高信頼なURLLCの3つの軸のうえで、新しいサービスや多様なアプリケーションが発展することを期待している。

eMBBでは、ギガビット級での速度でのファイル転送や、4K映像や3D映像の増加を見込んでいる。例えば、野球場や大規模音楽施設での多視点ハイビジョン映像やマラソン中継、ドローン撮影映像などがある。

mMTCでは、簡易で長寿命のセンサー機器への応用としてスマートメータによる自動検針、見守りや街灯監視等のスマートシティ、インフラの老朽化監視、自然環境監視等がある。

URLLCでは、自動運転支援、ロボットへの応用、遠隔からの建設機械制御や遠隔手術などがある。



1. 携帯電話方式の変遷

(10) 第6世代の性能と利用シーン

6G方式導入に向けて電波割当や勧告策定の準備を開始

国際電気通信連合の無線通信部門 (ITU-R) は、3GPPが2030年導入を目途に仕様策定中の6G方式を国際標準方式 (IMT-2030) として認定し、対応する新周波数帯域の割当や利用に関わる各種勧告及び規則策定の準備を進めている。その際、ITU-RはIMT-2030の性能を次のように定義している。

■ IMT-2030の利用シーン

(カッコ内はIMT-2020での呼称)

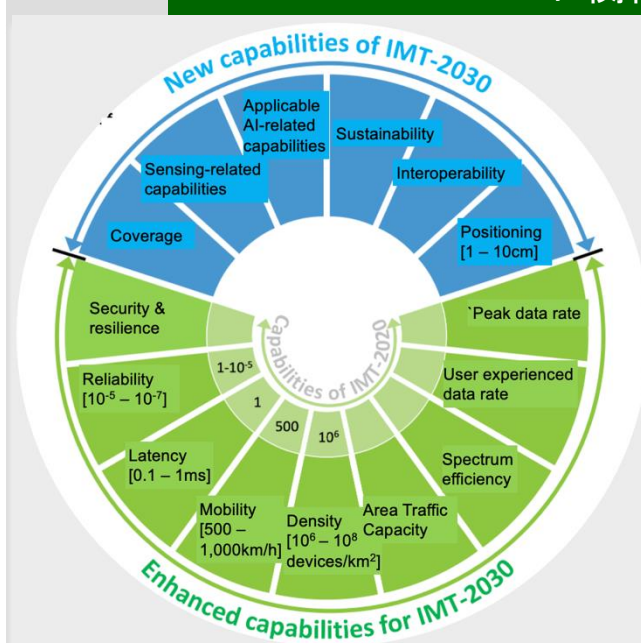
- ・Immersive (← eMBB)
- ・AI
- ・Hyper Reliable&Low-Latency (← URLLC)
- ・Ubiquitous Connectivity
- ・Massive (← mMTC)
- ・Integrated Sensing

出典:ITU-R勧告 M.2160

■ IMT-2030の性能(カッコ内は数値)

- ・遅延時間 (0.1 – 1ms)
- ・移動速度 (500 – 1,000 km/h)
- ・デバイス密度 ($10^6 - 10^8$ 個/km²)
- ・信頼性 ($10^{-5} - 10^{-7}$)
- ・最大データ速度
- ・ユーザ体感データ速度
- ・周波数帯域利用効率
- ・面積あたりのトラフィック容量
- ・セキュリティや障害回復性能

IMT-2030に関わるITU-Rの活動



【IMT-2030関係の会合予定】 (ITUサイトを元に作成)

2024	2025	2026
技術特性要求条件整理		
要求条件, 評価基準, 提案テンプレート作成		

2027	2028	2029	2030
WRC-27			
IMT-2030の技術提案			
評価→合意形成→決議			
IMT-2030 規定			

超高速通信やIoT等の需要増に備え新規帯域の割当や規則制定が必要に

2. 電波伝搬とアンテナ

(1) 電波の分類

UHF帯からSHF帯に利用が拡大

電波や光を含む電磁波は周波数が3テラヘルツ以下が電波に分類される。電波では右下図のように10倍ごとの周波数区分で個別呼称があり、移動通信が使用する電波は極超短波(UHF)帯とマイクロ波(SHF)帯に含まれる。

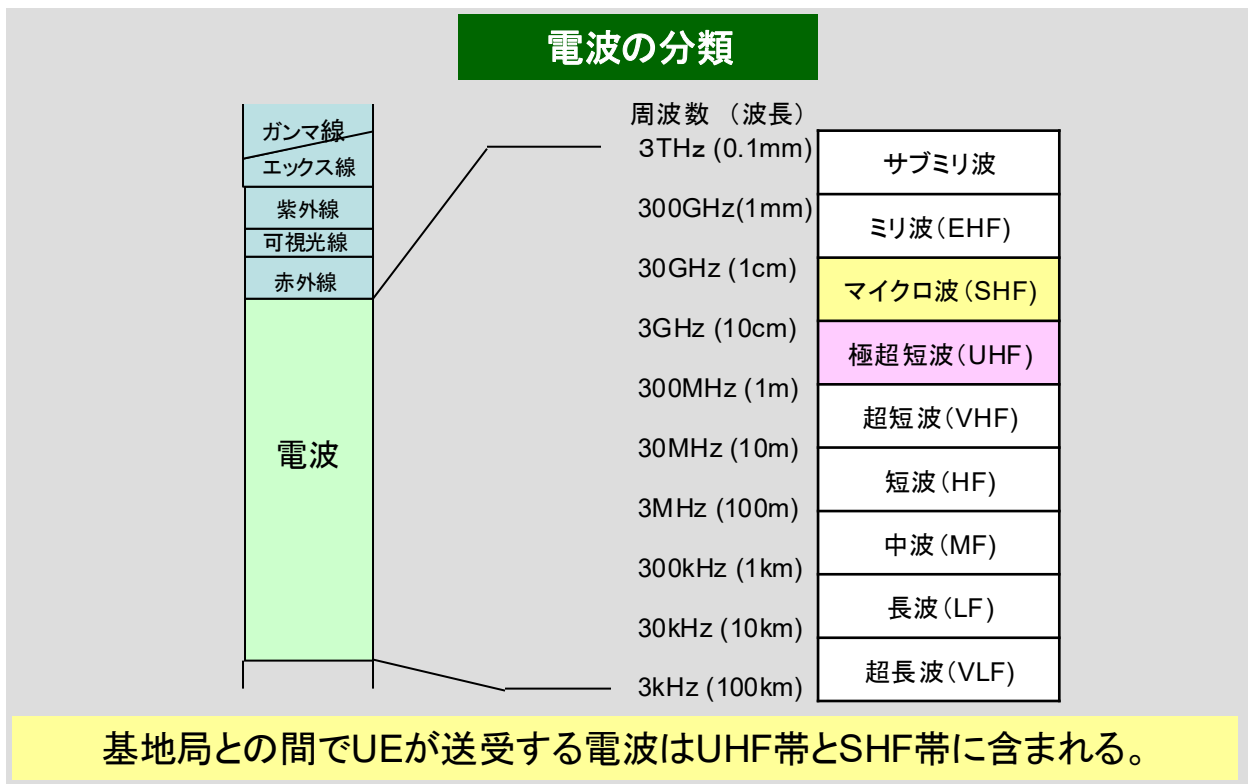
UHF帯は次の特徴があるので広いエリアカバーに適している。

- ・より高い周波数に比べて遠くまで届く(距離による減衰が少ない)
- ・見通し外でも電波が回りこんで届く。
- ・アンテナ等の装置はSHF帯装置より大型になる。

一方、次の特徴をもつSHF帯は通信需要が多い都市部等での展開に適する。

- ・広い帯域を有するので超高速通信や多数ユーザの収容が可能。
- ・アンテナでは小型化や多数素子搭載が可能になる。
- ・距離による減衰が大きく電波の直進性が高いのでセル径が小さくなりUHF帯に比べて多数の基地局配置が必要となる。

5G NRが使用する3.5-4.9GHzはサブ6ギガ帯、28GHzは準ミリ波帯とも呼称される。



2. 電波伝搬とアンテナ

(2) 日本でのMNOへの周波数割当状況

5G NR向けの周波数割り当てが進む

5G方式普及のため総務省はMNO(Mobile Network Operator)に対して、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いる。

3.4, 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、2024年末までに次のような周波数の割当が実施されている。

2022年5月、2.3GHz帯の40MHzをKDDIの5G用に、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を行う条件で割当てた。

2023年10月、700MHz帯の既存割当帯域の間隙に上下とも3MHz幅(合計6MHz幅)を楽天に割り当てた。

2024年12月、4.9GHz帯の合計100MHz幅をソフトバンクの5G用に割り当てた。(既存の無線アクセスシステム無線局の移行措置を行うこと等が条件)

MNOに割り当て済みの周波数帯

【単位:MHz】

2024年12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	4.9 GHz	28 GHz
	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD	TDD
ドコモ	20	30		30	40 ¹⁾	40			40	40	100	100		400
KDDI	20	30		20	40	40	40	50 ³⁾		40	200			400
SB	20		30	20	30	40		30 ⁴⁾	40	40	100		100	400
楽天	6				80 ²⁾						100			400

1) 東名阪のみ

2) 東名阪以外は40MHz

3) UQ

4) WCP

広い周波数帯域を必要とする5G NR導入に対応するためサブ6ギガ帯や準ミリ波帯での周波数割り当てが楽天を含む4つのMNOに行われてきた。

2. 電波伝搬とアンテナ

(3) FDDとTDD

チャネルの双方化

無線通信において相手と双方向通信ができるように送信と受信のチャネルを設ける方式にはFDD(周波数分割複信)とTDD(時分割複信)がある。

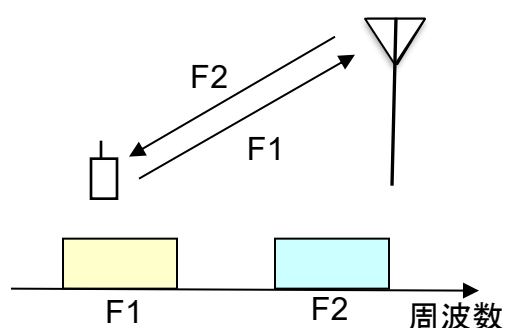
FDDは、上りと下りに別々の周波数帯を使用する方式であり、上下方向の互いの電波が干渉なく使い簡単に実現できるので広く用いられている。その際、上下回線用には、同じ帯域幅(例:上り10MHz, 下り10MHz)が割り当てられる。

TDDは、同じ周波数帯を上下方向の回線が一定時間毎に交互に切り替え使用する方式であり、PHSやWiMAX等で使用されてきた。また、第5世代方式用に割り当てられた3.4GHz以上の帯域では専らTDDが使用される。

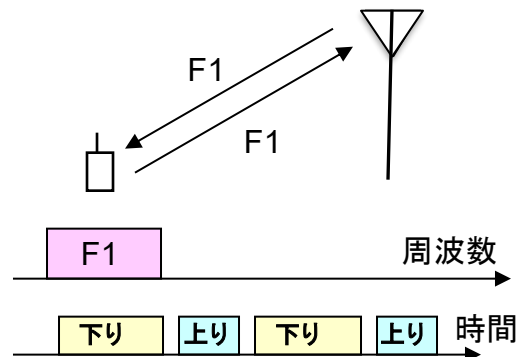
TDDでは上下の通信需要に応じた切替時間の設定で電波利用効率が高まるが、干渉防止のため全局が送受切替タイミングを合わせるなどFDDより高度な設計・管理が必要となる。一方、電波伝搬特性は周波数によって異なることから、送信電力やアンテナビームの制御の場合には上下双方向で同じ周波数帯を用いるTDDの方がFDDより制御が容易になる利点がある。

FDD と TDD

FDD: Frequency Division Duplex



TDD: Time Division Duplex



TDDでは、一定の短い時間間隔でウォークトーカーのように同じ周波数の電波を送受切り替えて使用する。

5G用に割り当てられた3.4GHz以上の周波数帯では、専らTDDが使用される。

2. 電波伝搬とアンテナ

(4) 電波の特性

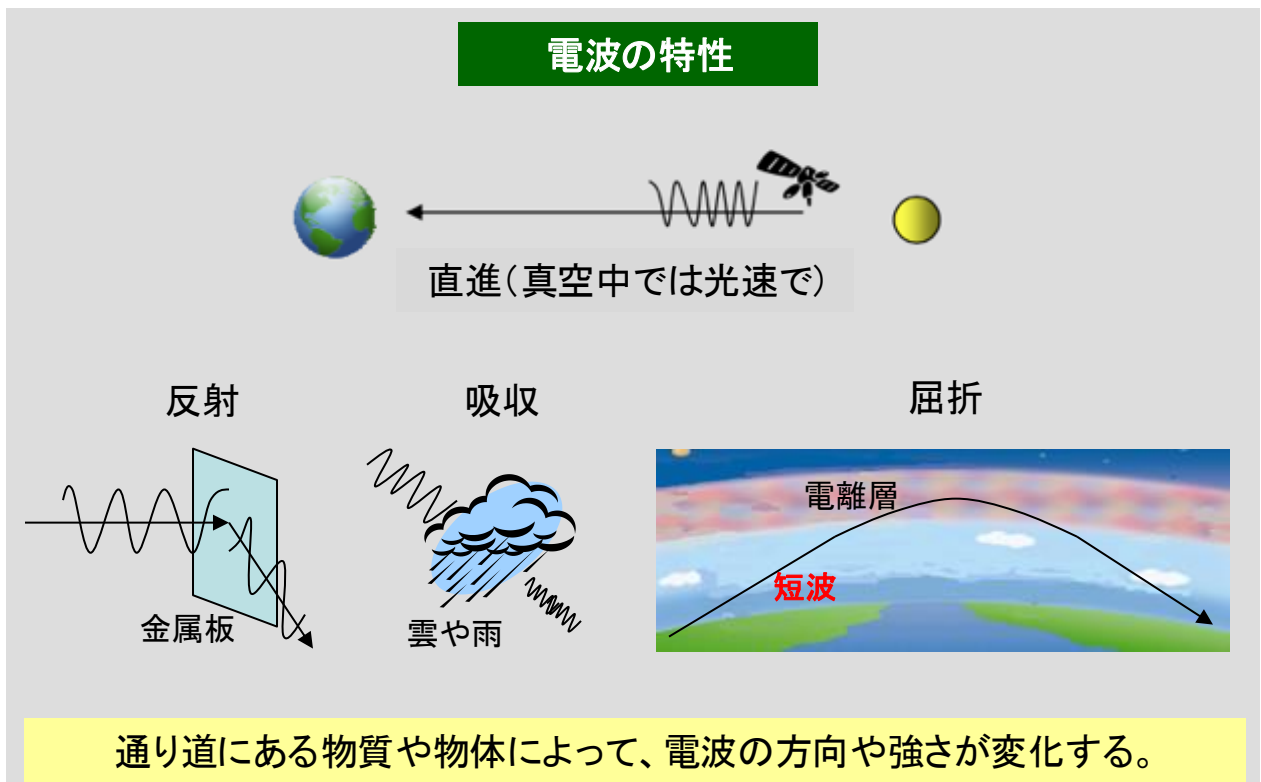
媒体によって強さや方向が変化

電波(電磁波)には、通信の使用に適した次のような特性がある。

- ・光速(毎秒30万km)という超高速で遠方まで届く。
- ・媒体の振動で伝わる音波と異なり、真空中でも空間を伝搬する。

そこで、衛星や深宇宙探査ロケットとの通信も可能になるが、気体や液体中や、途中で物体があると反射、屈折、吸収、散乱等が起こり、電波の強さや方向が変化する。例えば、

- ・金属板に当たると、鏡のように反射する。
- ・上空にある電離層の中を通ると屈折する。これは、電子や電気を帯びた粒子の密度が地上高によって異なるため、電波の速度が異なるためである。
- ・雨や雪の粒子により吸収される。
- ・周波数が低くなると波の性質が顕著になり、回りこみや障害物を透過して建物内部などにも届く。



2. 電波伝搬とアンテナ

(5) 伝送レベルダイヤ

伝搬損失は距離と波長に依存

無線通信システムは、送信機、伝播路、受信機の3つで構成される。

送信機には、電気回路上の電圧・電流の変化を、空間を伝搬する電磁波に変換する送信アンテナが接続されている。（一方、受信機はその逆の働きをする。）

送信機のアンテナ入力点での送信電力(P_t)、送信アンテナの利得(G_t)、受信アンテナの利得(G_r)、受信機入力での受信電力(P_r)には次の関係がある。

$$P_r = (P_t \times G_t \times G_r) / L_p$$

$$L_p = (4\pi)^2 (d / \lambda)^k$$

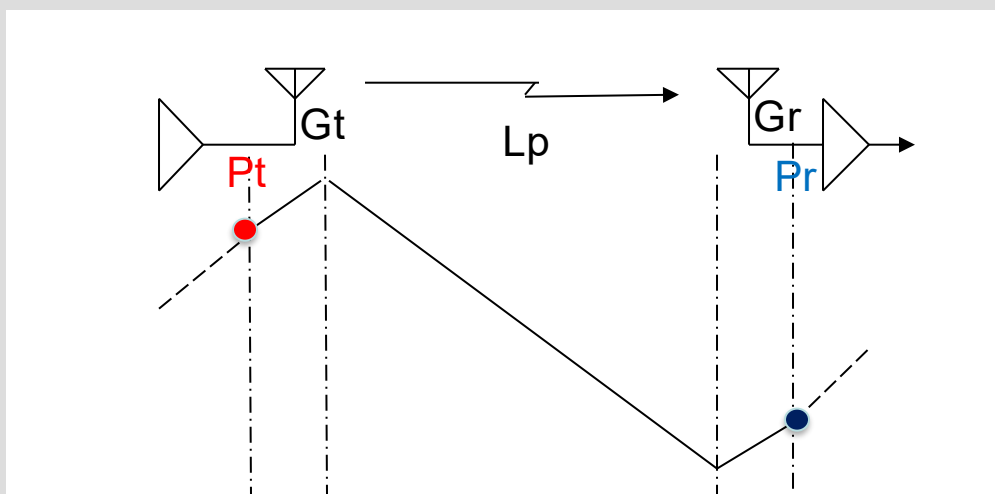
上式の L_p は伝播損失であり、送受信機間の距離(d)と波長(λ)で決まる。

衛星通信のような自由空間伝搬では、同式中の指数 k は2であるが、減衰が大きい都市部では経験的に3.5で近似できる。各項をデシベルで表し、波長 λ のかわりに周波数 f (MHz)、UEと基地局間の距離 d (km)で表すと次になる。

$$P_r = P_t + G_t - L_p + G_r \quad \text{ここでの } L_p \text{ は}$$

自由空間: $L_p = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$ 都市部: $L_p = 40.3 + 35 \log(f) + 35 \log(d)$

伝送路レベルダイヤ



送信10mW, アンテナ利得(送信0dB, 受信10dB), 周波数2GHz, 局間距離を1km とすると、受信電力は-78dBm (都市部 -136dBm) と小さくなる。

2. 電波伝搬とアンテナ

(6) セルラーコンセプト

セルは基地局のカバーエリア

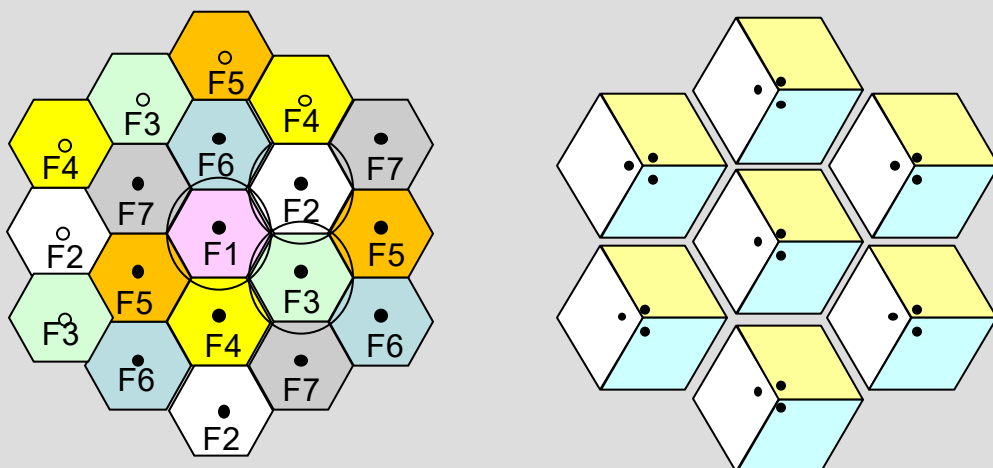
一つの基地局のカバーエリアを小区画を意味するセルという。
一つの基地局で同時通信できるUE数は限られるが、セルを多数配置することでサービスエリア全体では極めて多数のUEが同時通信できる。電波減衰を逆手にとったとも言えるだろう。

基地局を等間隔に設置して平面を隙間なくカバーするには、セル形状が六角形になるようにすると、4角形などに比べ互いのセルの重なりが最も小さくてすむ。

このセルラー方式は、同じ周波数を地理的に離れた空間で繰り返し(多重)利用するので空間分割多重と称している。左下図のように全周波数帯を7分割して繰り返し使用する場合などがある。

都市部では、多数の基地局の設置場所確保が難しいので、互いに異なる方向に向けた複数のアンテナを1箇所にとめて設置する。この場合、1つのアンテナがカバーするエリアをセクターという。3本のアンテナにより、 120° ずつカバーする方式や、4本により 90° ずつカバーする方式が広く用いられている。

セルとセクター



隣接セルでは別の周波数を使うことにより、相互の干渉を避ける。セルを小さくすると、システム全体の同時利用者数を増加でき、UEの送信電力が少なくてできるので電池が長持ちする。

2. 電波伝搬とアンテナ

(7) 基地局アンテナ

水平面では広角、垂直面では鋭い指向性

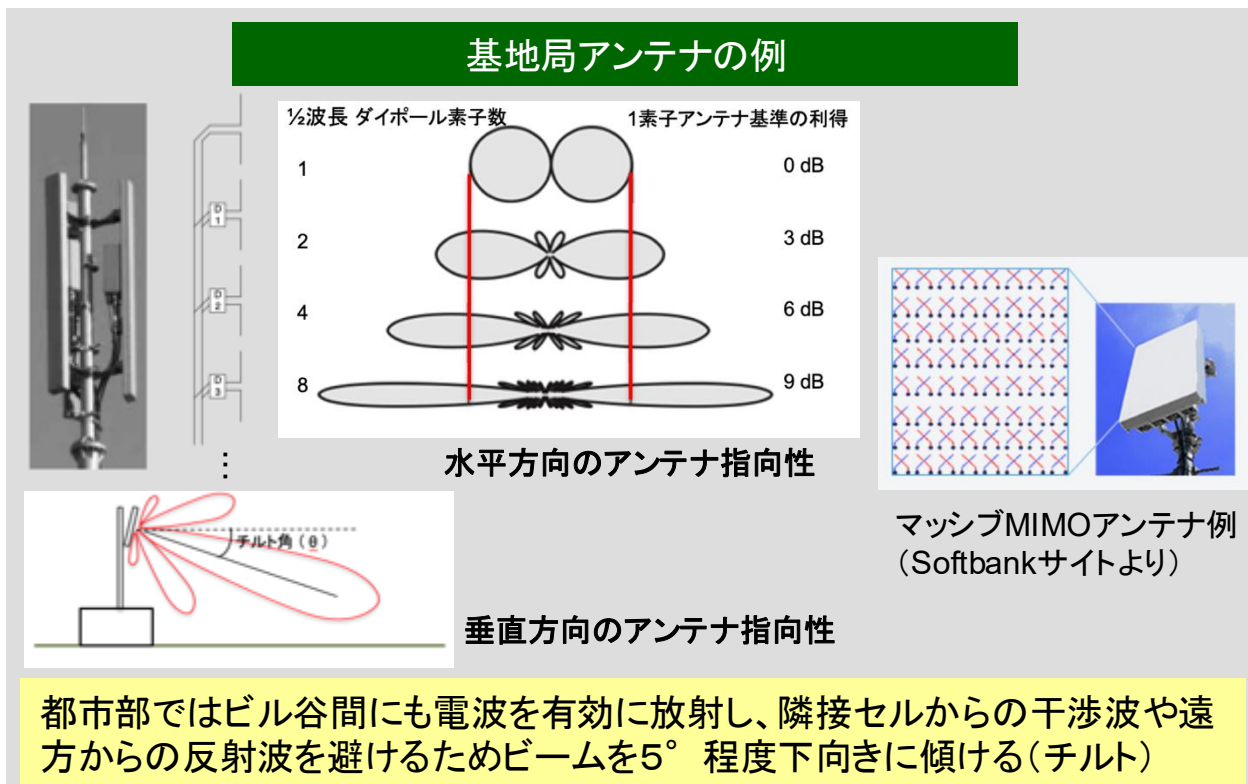
空間の各方向への電波送信（あるいは受信）強度を指向性と呼び、通常、水平面と垂直面内での全方向の指向性をデシベル単位のグラフで表す。UEアンテナのように全方向で（ほぼ）同じ指向性のアンテナを無指向性アンテナという。

数GHz以下の周波数帯の基地局アンテナは水平面内は円形（無指向性）あるいは120, 60°といった広い角度をカバーする指向性を有し、垂直面内では地表沿いに遠くまで届くように鋭い指向性としてセル/セクター面積を大きくする。

下図では垂直方向に並べた半波長ダイポールアンテナの入出力を合成しており、素子数を2, 4, 8と増加すると利得は1素子に比べて+3, 6, 9dBと増加する。

なお都市部では、ビル谷間にも電波を有効に放射し、隣接セルからの干渉波や遠方からの反射波を避けるため、ビームを下方に傾けるチルトを行なっている。

サブ6ギガ帯や準ミリ波帯の5G NRでは半波長ダイポール素子長は4～0.5cm程度のため、マッシュMIMOアンテナでは平面上に数百のクロスダイポール素子を配置している例がある。



2. 電波伝搬とアンテナ

(8) フェージング

マルチパスによる受信強度の時間的変動

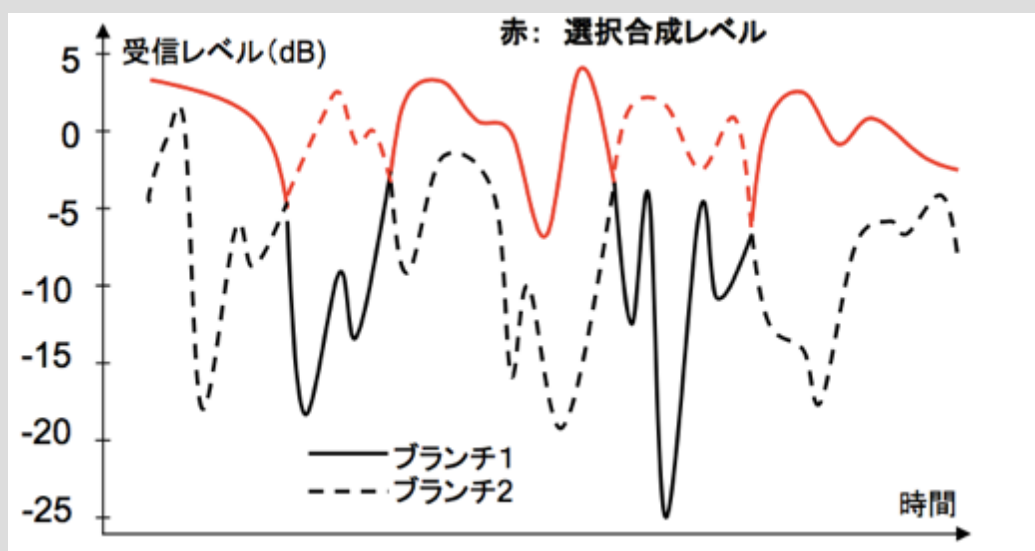
モバイル無線では直接波だけでなく、建物等による反射による複数の経路を経た電波が重なって受信側に到達する。その電波の波長は数センチから数十センチと短いので、UEの移動などに伴って、受信レベルが細かく変動するフェージング(Fading)が生じる。

それぞれの電波が相互に打ち消すような形で合成されると、受信レベルは瞬間的に20dB(百分の1)や 30dB(千分の1)にまで低下することもある。

そこで、フェージング対策として、2本のアンテナ素子を用い、受信状態の良いアンテナを選択あるいは合成するダイバーシティを使用することが多い。ダイバーシティは2つの素子を一定間隔(波長の1/2)以上の距離だけ離すと、それぞれの受信信号はほぼ無相関になることを利用している。

携帯電話やPHSでは基地局とUEの双方でアンテナダイバーシティが使われてきたが、4G LTE以降は複数アンテナ素子を用いるMIMOに進化している。

フェージングとダイバーシティ



2つのアンテナ素子を一定距離以上離すと両素子での受信強度は同じように変化しないので、受信強度の高い方を選択すると安定した受信ができる。

2. 電波伝搬とアンテナ

(9) 遅延スプレッド

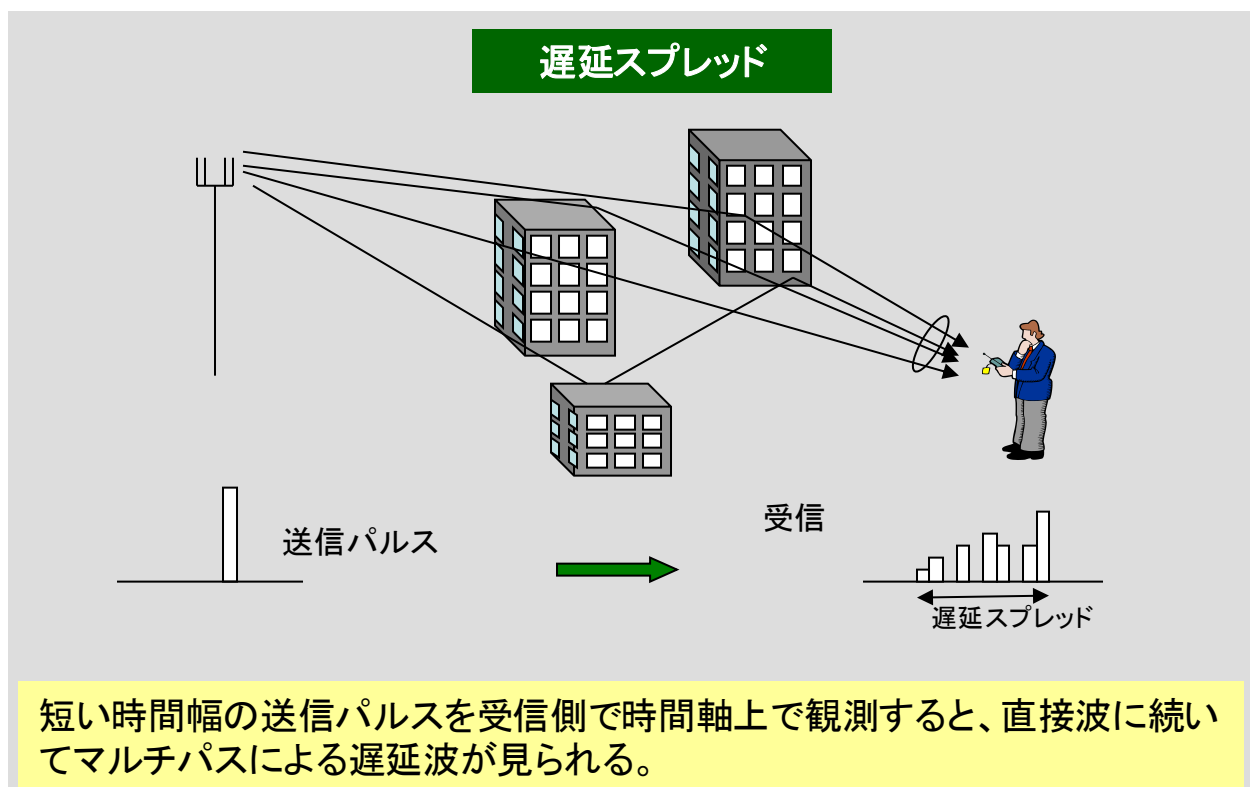
マルチパスによる受信信号の広がり

送信機から送信された短い時間幅のパルスを受信側で観測すると、マルチパスがある場合には、反射波や屈折波は最も早く受信される直接波より遅れて到達するため、受信信号は一定の広がりを持つようになる。

これを遅延スプレッドと言い、都心部での典型例では1マイクロ秒程度、伝播距離に換算すると300m程度の時間差に対応する広がりとなる。

そこで、信号をシングルキャリアにて送信し、その伝送速度を増加させていくと、シンボル間の間隔が次第に短くなり、マルチパスによる遅延波が後続シンボルと重なるようになって品質劣化(符号間干渉)が大きくなる。

一方、多数の低速サブキャリアを多重する第4世代のOFDM/OFDMAでは、各サブキャリア周波数(注)は15kHzと低速固定であり、1シンボル長は67マイクロ秒とマルチパスでの遅延スプレッドに比べて十分長いので符号間干渉が生じることはない。(注)第5世代のサブキャリア周波数は最大120kHzまで可能になっている。



2. 電波伝搬とアンテナ

(10) ビームフォーミング

電子制御により通信相手方向にビームを指向

多くのアンテナ素子をもつ無線局では、各アンテナへの送信信号あるいは受信信号の位相や利得(振幅)を変えることで、これらの信号の合成であるビームの方向や形状を変化させ、受信側でのS/N改善を図ることができる。これを、ビーム形成の意味でビームフォーミング(Beamforming)と言う。

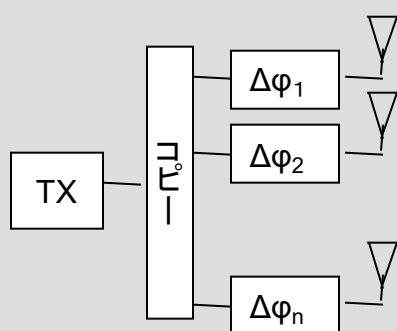
ビームフォーミングには大別して、2つの手法がある。

その一つは、特定UE方向への電力を最大化する手法(ビームステアリング)である。

他の一つは、複数UE間の干渉を最小化する手法(ヌルステアリング)であり、他のUE方向からの電波の受信を抑えるとともに、その方向への送信を抑圧するように制御する。

ビームフォーミングを行うアンテナはアダプティブアレイ、あるいはスマートアンテナと呼ばれることがある。

ビームフォーミング



TDDのように送受周波数が同じ場合は、UE送信パイロットを用いて高精度のビームステアリングができる。

アンテナ素子の位相を変化させて、UEが送信するパイロット信号強度を最大化するなどにより、UE方向にビームを向ける。

送受ともに複数アンテナを用いる

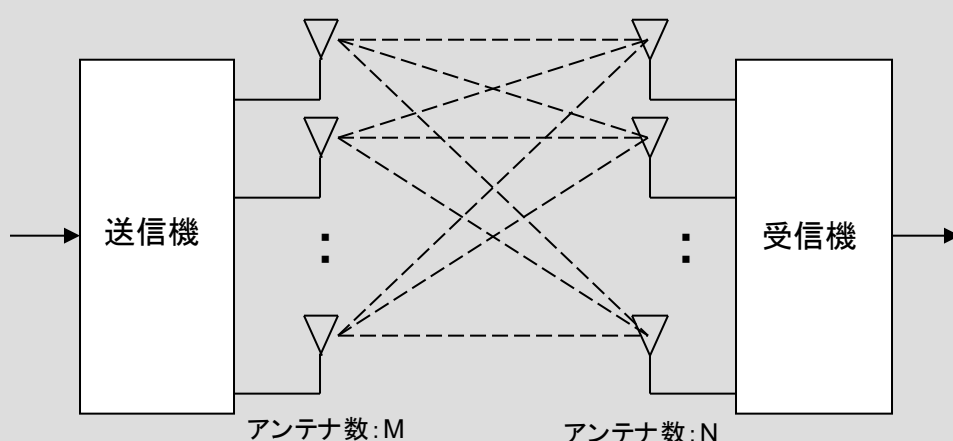
MIMO (Multiple Input Multiple Output) は送受側のそれぞれに複数のアンテナと送受信回路を備えたもの。各アンテナ間のチャネル状態(利得と相対位相)を知ることによって複数の独立した伝送路を作り、高速化する(空間多重)技術である。

MIMOで同時伝送できる最大ストリーム(レイヤ)数は、送受信アンテナの数のうち少ない方に等しい。例えば、MIMOを利用しない場合の通信速度を50Mbpsとすると、送信が4素子、受信2素子のMIMO利用では最大100Mbpsとなる。

ただし、MIMOの各ストリームのS/Nは単一アンテナでのS/Nより悪くなる。そこで、電波状態が悪い場合はアンテナダイバーシティやビームフォーミングの方が勝るためMIMOとこれらの技術を電波状態により切り替えて使うのがいい。

第4世代では基地局側で最大8個、UE側で最大4個までの8x4 MIMOを規定した。第5世代では数百ものアンテナ素子を有する基地局と複数のUE間で空間多重にて同時伝送するMU-MIMOの場合、合計24迄のレイヤが使用できるようにした。

MIMO (Multiple Input Multiple Output)



MIMOで同時伝送できる最大ストリーム(レイヤ)数は、送受信アンテナの数のうち少ない方に等しい。

5G仕様では最大24レイヤまでが生成できるようになっている。

2. 電波伝搬とアンテナ

(12) マルチユーザMIMO (MU-MIMO)

MU-MIMOは空間多重の1種

マルチユーザMIMO (MU-MIMO) は、複数のレイヤを空間的に分離し、時間と周波数位置が同じであるリソースブロックの各々を別々のUEに割当て、同時並列に伝送するものであり、空間多重アクセスの一種である。いわば、基地局と各UEとの間で、別々のホースで水を供給するようなもの。

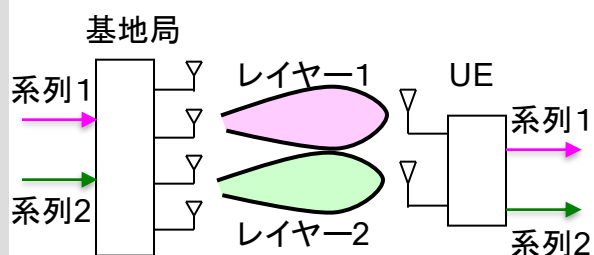
これに対して、送受信局が1対1のMIMO、即ち、1つのUEが複数レイヤを同時使用する形態がシングルユーザMIMO (SU-MIMO) である。いわば、基地局と単一ユーザの間で複数のホースにて水を送るようなもの。

ここで各ホースの太さ(あるいは流量)に相当する伝送速度は、MIMOアンテナ特性と伝搬路の状態に依存し、条件の良いホースは太く、悪い場合は細くなる。

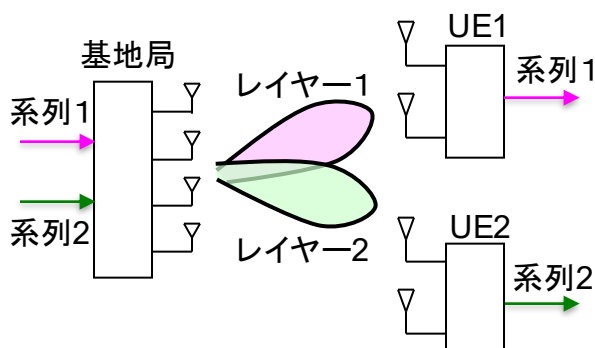
5G NR (の3GPP Rel-18) では最大24レイヤが使用できるMU-MIMOが規定された。

SU-MIMOとMU-MIMO

シングルユーザMIMO



マルチユーザMIMO



MU-MIMOは、SU-MIMOにて1つのUEが占有する複数のレイヤを分離し、複数UEがそれぞれのレイヤを使用するもの。

基地局アンテナでは数百ものアンテナ素子を搭載

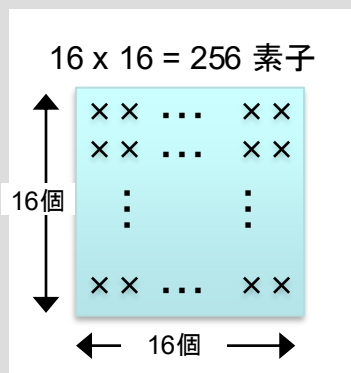
高い周波数を用いるNRでは伝搬距離増加に伴い減衰が大きくなるが、アンテナを小型にできるので多数アンテナ素子の入出力を合成して鋭いビームを形成するビームフォーミング(BF)や、基地局と複数UEとの間でMIMO空間多重による同時伝送が可能になる。

例えば28GHzの場合には基地局/UEアンテナ素子数が最大256/32のような多数となるマッシブ(大規模)MIMOが開発されている。
しかし、NRでのマッシブMIMOアンテナは帯域が広いためLTEでのMIMOのようにアンテナ入出力信号を全デジタル処理するのは難しい。

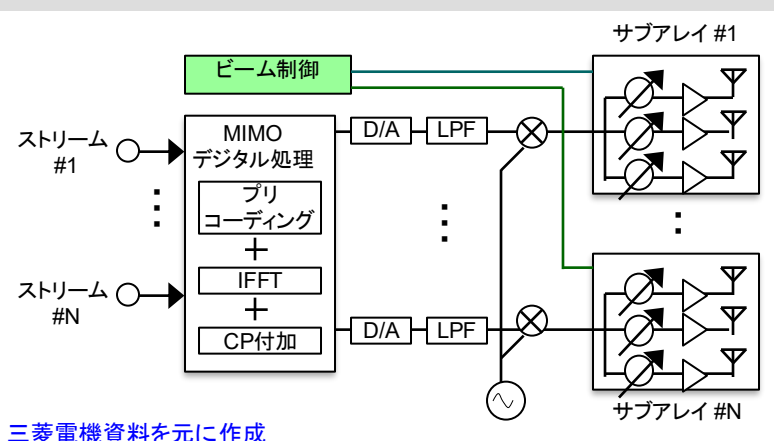
そこで、NRでは個々のアンテナ素子へのアナログ入出力信号の位相・振幅を変えて鋭いビームを生成するアナログBFや、下図のように一定数のアンテナ素子の組(サブアレイ)に対してアナログBFを適用して形成したビームを、複数ストリームのそれぞれに対応させるようなハイブリッドBF方式が採用されている。

マッシブMIMOアンテナの例 (28GHz)

【アンテナ素子の配置例】



【ハイブリッドBF送信機回路の構成】



マッシブMIMOアンテナでは多数のアンテナ素子の広帯域信号を全デジタル処理するのは難しいためアナログ方式が組合わされる。

3. 信号処理と変調

(1) UEの機能ブロック

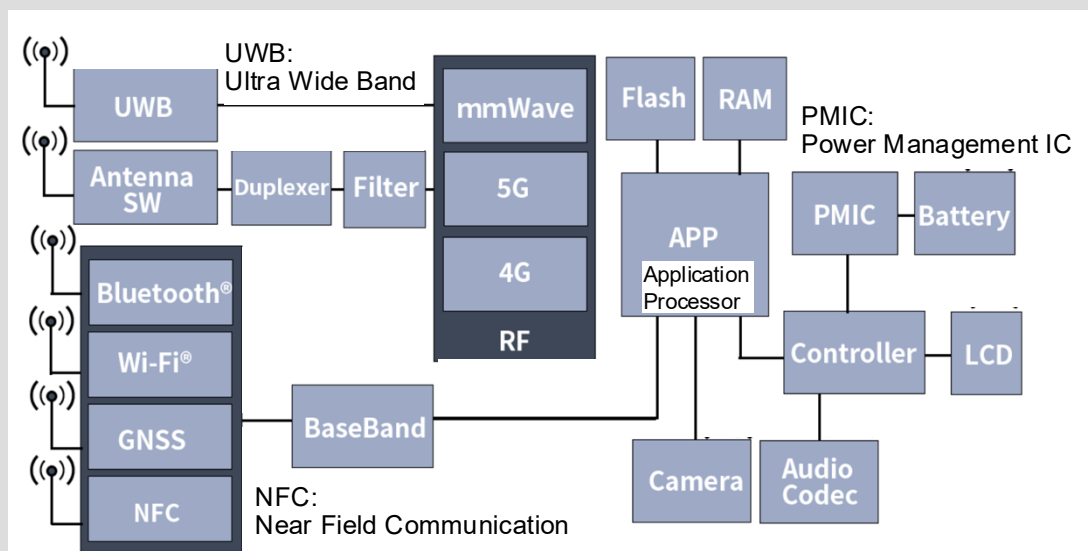
UEは無線局

UEは送信機と受信機を小型ケースに詰め込んだ電波管理対象無線局である。その送信機出力は最大数百ミリワットであり、電池容量が限られているため、電力効率が高いGaAs(ガリウムヒ素)やGaN(窒化ガリウム)電力増幅器が用いられている。

下は典型的なスマートフォンのブロック図であり、中心部の無線(RF)ブロックには送受信機、5G,4G用の変復調部やベースバンド信号処理部があり、干渉防止用の帯域フィルタや送受信信号を分離するデュプレクサ(分波器)経由でアンテナ部に接続されている。使用する通信チャンネルの周波数に応じて異なる周波数帯に対応したアンテナが選択接続される。

アプリケーション処理部(APP)は、①音声コーデック、カメラ、液晶画面等の入出力機器 ②ストレージ用フラッシュメモリと演算用RAM ③Wi-Fi, Bluetooth, GNSS, NFCの無線機ベースバンド部 と接続され各種データが送受される。

スマートフォンのブロック図 (京セラ サイトより)



UEの内部には多種のアンテナ、送受信機、信号処理回路やヒューマンインターフェイスなどの部品が詰め込まれている。

すべての情報を0と1にして送るデジタル通信

第1世代方式では電話音声信号の連続的な波形を、そのままの形で送るアナログ通信だったが、第2世代からは音声信号を含む全ての情報を0と1のビット列に変換して伝送するデジタル通信方式となっている。

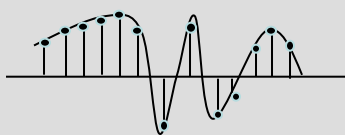
デジタル通信が優れているのは、

1. 受信側では、0か1のいずれかが送られたかを判定すればいいので、ノイズ(雑音)の影響を受けにくい。
2. 文字や画像などのあらゆる情報を送ることができる。
3. コンピュータや半導体技術を使って、ハードやソフトによる複雑な演算、高速処理、大容量記憶が可能となる。

デジタル通信を行うために、本来はアナログ信号である音声や画像を0と1のビット列に変換したり、漢字などの文字は2進数コードに対応させる情報源符号化が行われる。

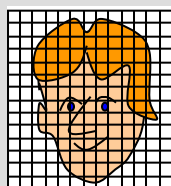
情報源の符号化

【音声】



一定間隔時点での信号レベルを2進数値で表す。(サンプリング処理)

【画像】



たて横のマス目(画素)ごとの色や明るさを2進数値で表す。

【文字】

「A」 → 「1000001」 2進数の文字コードで表す。

文字も音声も画像もサンプリング処理などにより0と1のビット列に変換する。

3. 信号処理と変調

(3) 音声符号化

携帯電話は固定電話と符号化方式が異なる

固定電話では、音声レベルを8KHzの周期で各8ビットにデジタル化するので、そのビットレートは、64Kbps (8bit x 8KHz)になる。

一方、無線チャネルの伝送容量が限られているモバイル無線方式では、人間の声の特徴や耳の特性を利用し、高度なデジタル処理を行うことで、大幅にビットレートを落とすことのできる符号化を行っている。

PHSでは、波形符号化の一種であるADPCM方式を用いてサンプリング時点での音声レベル変化を符号化している。一般に波形符号化方式の音質は高いが、大幅な低レート化は困難である。

LPCは音素ごとのコードを送り、受信側で音素を復元・合成する方法であり、自動アナウンスや読み上げソフト等での技術に近い。

現在の多くのモバイル無線では、音声波形のエンベロープ(包絡線)と音素コードの両方を用いるハイブリッド方式を用い、通信環境や発声状況に応じて、そのビットレートを変化させている。

音声符号化方式

方式	分類	ビットレート(Kbps)	主な用途
PCM	波形符号化	64	固定電話
ADPCM		32	PHS
LPC	分析合成符号化	2.4-4.8	初期の軍用暗号通信
VSELP	ハイブリッド 符号化	11.2	PDC
EVR (SMV)		8 (1~8)	CDMA One (CDMA2000)
AMR		12.2 (4.75 ~ 12.2)	GSM, W-CDMA
EVS, EVS-SWB		5.9~128	LTE, 5G NR

EVS: Enhanced Voice Service, EVS-SWB: EVS Super WideBand

近年はハイブリッド方式を用いて符号化速度を通信環境に応じて変化させる方式が多い。iPhone11等では最高128kbpsまでのEVS-SWBに対応。

3. 信号処理と変調

(4) VoLTEとVoNR

VoLTEでは通話しながらデータ伝送も可能

4G網での音声通信方式VoLTE (Voice over LTE)では、以下の技術による音声品質改善や通話中の同時データ通信、呼出時間短縮が行われている。また、スタンドアローン構成の5G網ではVoLTEよりも更に高音質のVoNR (Voice over NR)での通話が可能になっている。

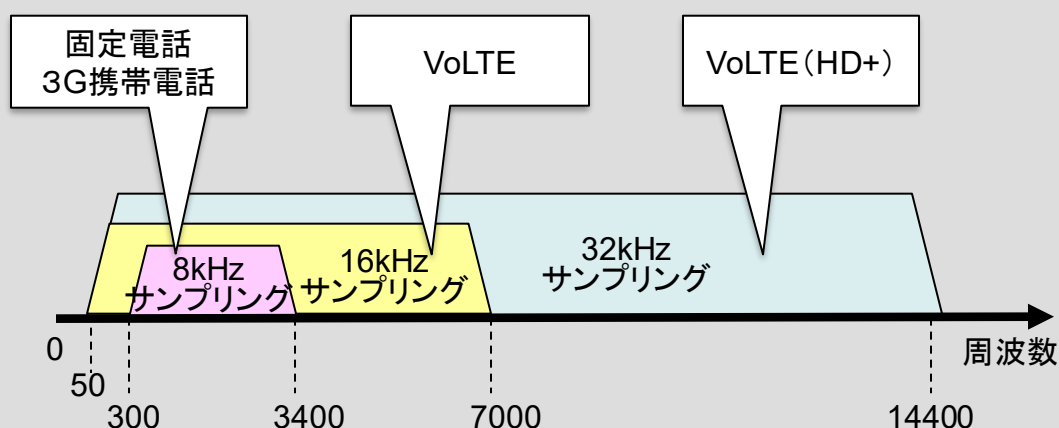
1. サンプリングレート

3Gでは従来の固定電話網と同じく8kHzのサンプリングレートを用いて、300Hz～3400Hzの音声を伝送していた。UEとコアネットワーク間をIPパケット伝送するVoLTEでは16kHzサンプリングで50～7kHzの音声信号を伝送する。この他、最高32kHzでサンプリングするVoLTE (HD+)方式もある。

2. 音声符号化

3Gまでの無線区間では低ビットレート符号化が用いられたが、VoLTEではEVS (Enhanced Voice Service) 符号化により、背景雑音や背景音楽を含んだ音声を高品質で伝送する。5.9～128kbit/sの幅広いビットレートに対応し、20msの1フレーム単位で任意レートに切替可能などの柔軟性もある。

VoLTEのサンプリングレート



VoLTEでは16kHzサンプリングにより7kHzまでの高音をクリアに伝送できる。EVSコーデックは20msフレーム信号を32ms以下の処理遅延で符復号する。

H264方式の2倍の圧縮効率

H.265 別称HEVC(High Efficiency Video Coding)は、ITU-Tが2013年にH.264(別称MPEG4 AVC)を引き継ぐ動画圧縮方式として定めた規格である。

Windows、macOS、Android、iOSがデフォルトでサポートしており、UE向けの映像配信や4K,8Kの高精細映像に使用されている。

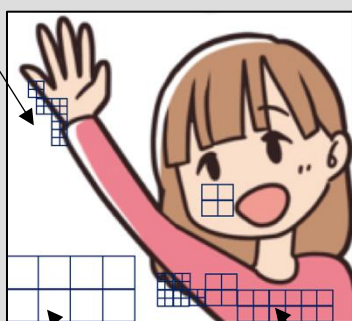
動画像の場合、符号化する画素は空間的に隣接する画素や時間的に近い画素との相関が高いため、フレーム(画面)内予測とフレーム間予測という2つの予測が用いられる。このうち後者では、複数画素のブロック単位でシーンや物体の動きをベクトル情報として抽出し送信する。

受信側ではブロック毎にベクトル情報を適用して最新フレームを構成する。

H265の基本方式はH.264と同じであるが、予測ブロックサイズの大型化や予測精度の向上などにより圧縮効率をH.264の約2倍、即ち、同等品質の動画像を1/2のビット数で送信可能としている。

フレーム間予測でのブロックサイズ最適化

変化:大



拡大



変化:小

変化:中

変化の少ないブロックは大きいブロックで、変化が大きいブロックは小さいブロックとして符号化する「変化量に応じたブロックサイズの最適化」を行なっている。

ブロックごとに、動きの大きさと方向をベクトル情報として抽出し、送信する。H.265では、H264より大きなブロックサイズの選択が可能になっている。

3. 信号処理と変調

(6) 変調とは

情報を電気信号に乗せる

通信分野で「変調」とは、情報の伝送や記録のために、媒体（メディア）の電気的特性の一部を、情報に対応させて変化させることを言う。

例えば、「のろし」や手旗信号も、遠くに情報を伝えるという意味では広義の通信であり、煙のありなし、手旗の方向を情報に対応させて「変調」しているといえる。

アナログの電気通信では、正弦（サイン）波の3つの成分（振幅、周波数、位相）のいずれかを、情報に対応させ連続的に変化させるので、それぞれを振幅変調（AM）、周波数変調（FM）、位相変調（PM）という。

デジタル通信では、振幅、周波数、位相を、0か1かの2値に対応させて変化させるので、電鍵を叩くことに由来するキーイングという言葉を用いて、それぞれASK, FSK, PSKと呼んでいる。

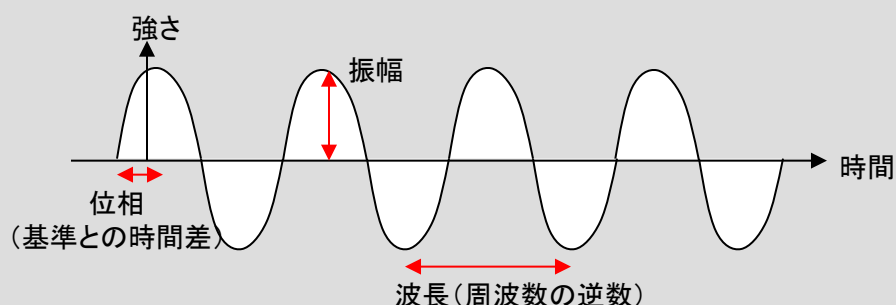
アナログ変調とデジタル変調

アナログ変調方式

AM: Amplitude Modulation (振幅変調)
FM: Frequency Modulation (周波数変調)
PM: Phase Modulation (位相変調)

デジタル変調方式

ASK: Amplitude Shift Keying (振幅偏移変調)
FSK: Frequency Shift Keying (周波数偏移変調)
PSK: Phase Shift Keying (位相偏移変調)



送信したい情報に合わせて電流や電波の振幅、周波数、位相のいずれかを变化させる。

PSK変調の波形

変調される高周波のことを情報を乗せて運ぶ波という意味で、搬送波（キャリア）と呼んでいる。

デジタル変調方式のうち、最も基本的で広く使われているのがBPSK(2相PSK)であり、情報の"0"には搬送波の位相を0度変化(変化なし)、“1”には180度だけ変化させる。ここで位相とは、基準となる搬送波に対する時間軸上のずれである。

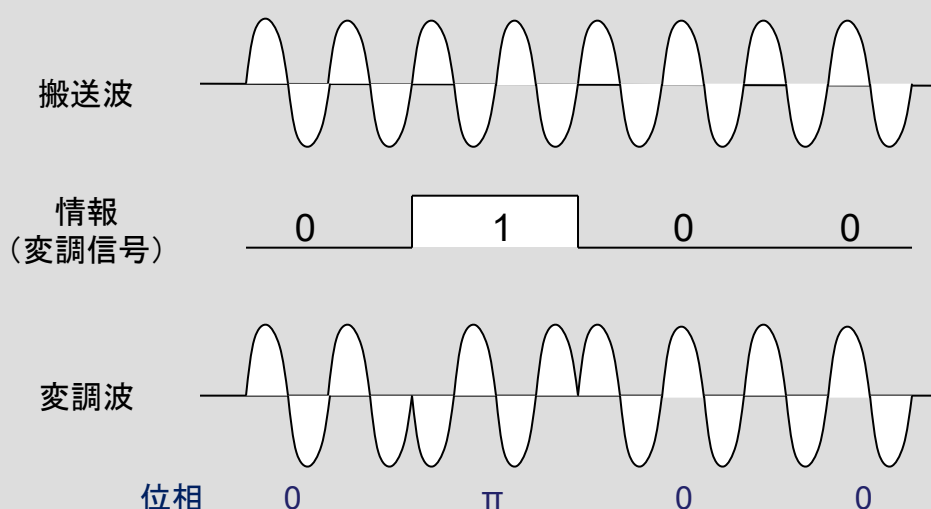
電気回路上にて搬送波(の電流や電圧)は次のように表される。

$$A(t) = A \sin(\omega_c t + \Phi)$$

ここで、 A は振幅、 ω_c は角周波数($2\pi \times f_c$)、 Φ は位相を示し、BPSKで変調された Φ は0または π (180°)の2つのいずれかの値をとる。

また、QPSK(4相PSK)での Φ は0, $\pi/4$ (45°), $\pi/2$ (90°), $3\pi/4$ (135°)のいずれかの値をとる。

BPSK(Binary Shift Keying) の時間波形



BPSKは、0/1の信号に対応させて、搬送波の位相を 0° (変化なし)、または 180° 変化(波形を反転)させる。

コンステレーション

ω_c の角周波数をもつ正弦波は、互いに90度位相のずれを持つsinとcosの2つの成分に分離できる。(三角関数の加法定理)

$$A(t) = A \sin(\omega_c t + \Phi) = A \cos\Phi \sin \omega_c t + A \sin\Phi \cos \omega_c t$$

通信では、高周波の搬送波 $\sin \omega_c t$, $\cos \omega_c t$ の係数にあたる $A \cos\Phi$, $A \sin\Phi$ が送信する情報によって変化する部分となる。そこで、より一般的に、

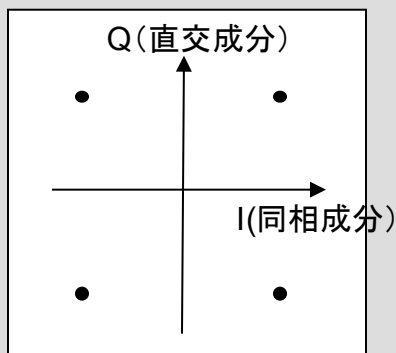
$$A(t) = I(t) \cos \omega_c t + Q(t) \sin \omega_c t$$

とし、 $I(t), Q(t)$ の組を $\cos \omega_c t$, $\sin \omega_c t$ をxy軸とする空間上に表すと、変調信号が「止まって見える」ようになる。これを星状配置(コンステレーション)という。

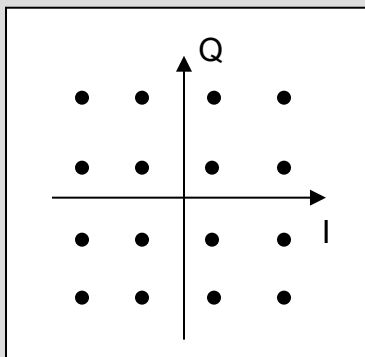
(I, Q)として(1,1),(1,-1),(-1,-1), (-1,1)の4つの信号点をもつのがQPSKである。また、16(64,256,1024)QAM変調では16(64,256,1024)個の信号点を有するコンステレーションになる。
QAM: Quadrature Amplitude Modulation

コンステレーション

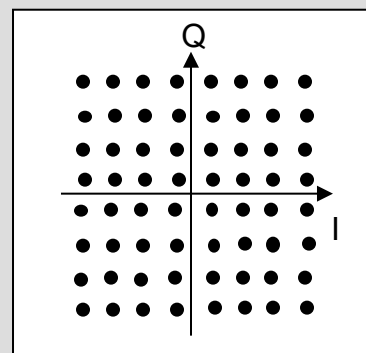
QPSK



16QAM



64QAM



5G方式仕様ではダウンリンクにて256QAMや1024QAMの使用も可能になっている。

コンステレーションは、あたかも、「搬送波という乗り物」上にて、乗り物状態の時間変化(情報)を見るようなもの。シグナルアナライザ画面で観測できる。

位相回転は $e^{j\theta}$ で表される

シンボル点の振幅、位相を示すIQ平面にて、直交成分を表すQ軸を虚数軸とすることで、シンボル点の座標は次の複素数で表わされる。

$$Z = I + jQ = A \cos \theta + jA \sin \theta = A e^{j\theta}$$

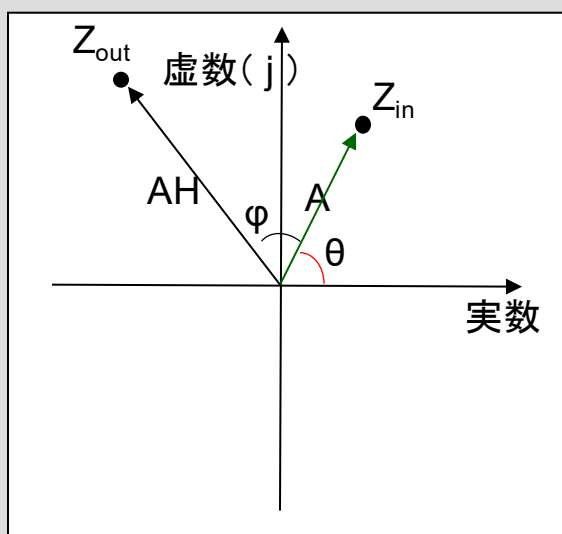
Aは振幅、 θ は位相角である。 j は $j^2 = -1$ となる虚数であり、これを i としないのは、電気工学で i は専ら「電流」を表すので紛らわしいため。 e は自然対数の底であるネイピア数(=2.718...)である。

$$e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$$

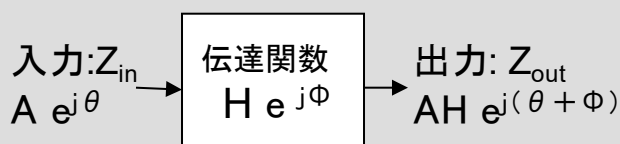
は、オイラーの公式であり $e^{j\theta}$ の乗算は複素平面上で原点を中心とした角度 θ の回転にあたる。

電気回路や伝搬路にて入力信号($A e^{j\theta}$)の振幅がH倍に、その位相が ϕ だけ遷移したとすると、出力信号は $AH e^{j(\theta + \phi)}$ となる。

変調信号点の複素表現



$$Z = A \cos \theta + j A \sin \theta = A e^{j\theta}$$



オイラーの公式にて、 $\theta = \pi$ として得られる $e^{j\pi} + 1 = 0$ はオイラーの等式であり、「博士の愛した数式」(小川洋子著)にも登場する美しい数式。

伝達関数が $H e^{j\phi}$ の回路を通すとシンボル点の振幅はH倍になり、位相は ϕ の回転を受ける。

3. 信号処理と変調

(10) 信号の復調

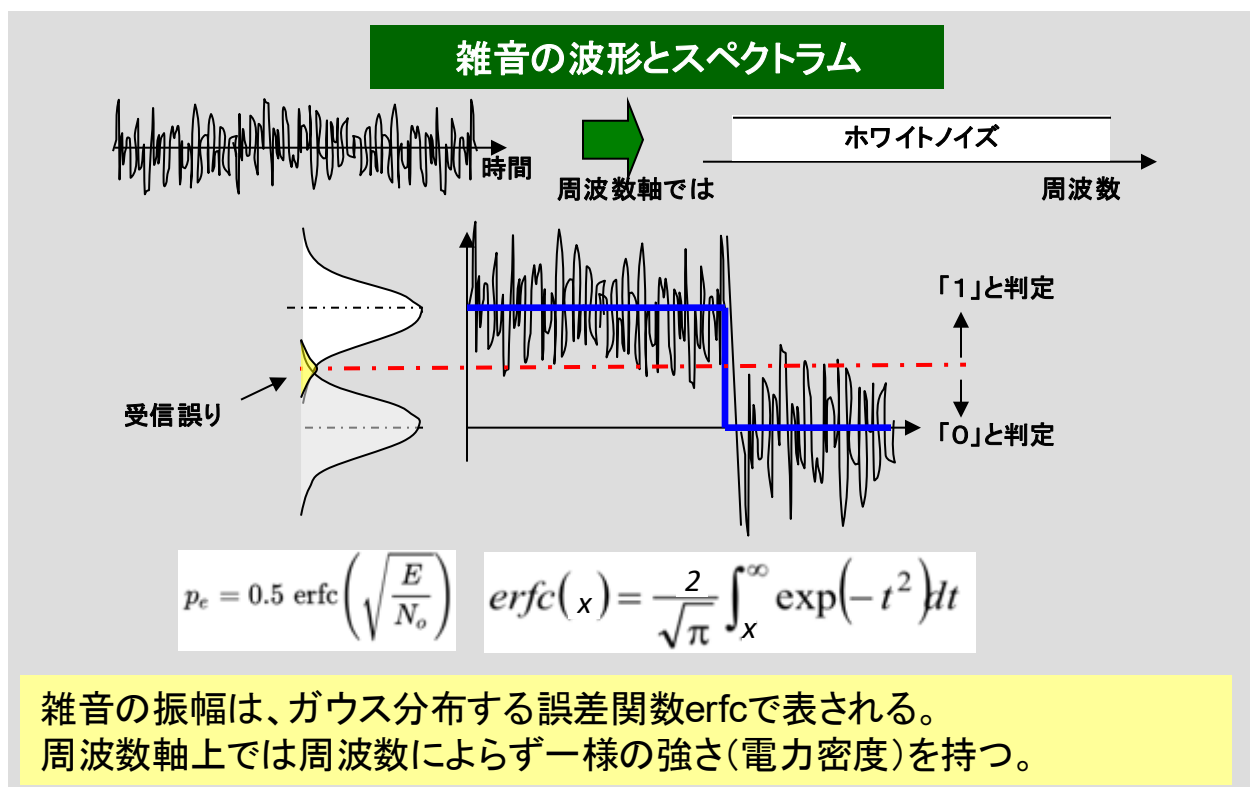
符号誤り

受信機でなぜ誤りが起こるのだろうか。

それは、送信機や受信機内部で信号波形が歪んだり、マルチパス伝播の結果、隣同士の符号が重なり合うことでも発生するが、一般には、様々な雑音(ノイズ)が混入するからである。

自然界では地上の物体や外部の天体が極めて微弱な電波を出している。また、受信機自身も熱を持つので、熱雑音と呼ばれる雑音が発生する。

受信機入力では、それらの雑音が信号の位相や振幅に重畳する。色々な光が交じり合うと白色になることに例えて、このような雑音は白色雑音(ホワイトノイズ)と呼ばれる。白色雑音の瞬時の振幅は、ガウス分布で表される確率分布となるので、復調器は、誤差関数の確率で誤った判定を下すことで符号誤りが発生する。



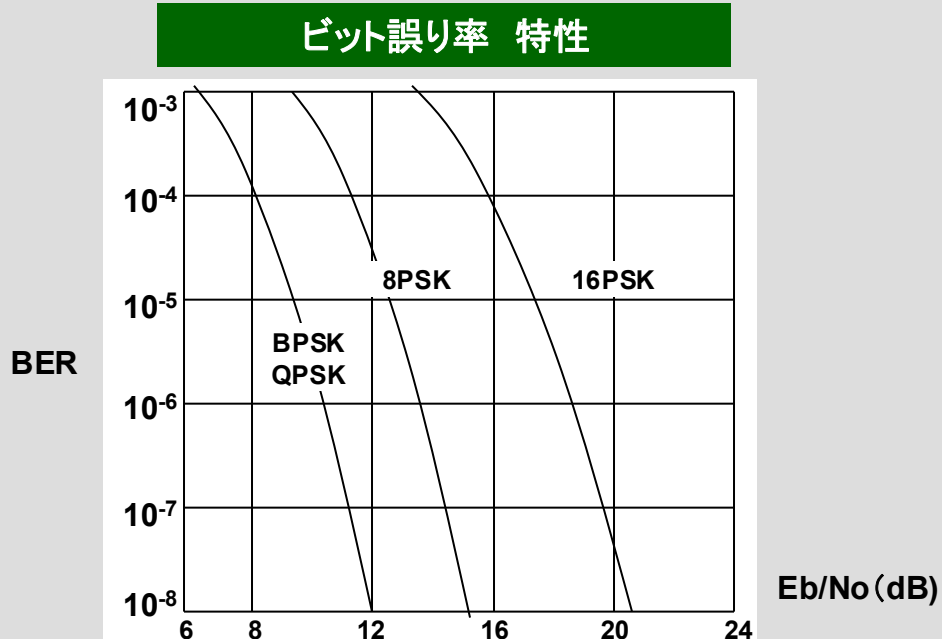
BPSKとQPSKが最も優れた特性をもつ

全ビット数に対する符号誤りビットの割合をBER(bit error rate:ビット誤り率)といい、通常、10の指数を用いて表す。例えば、伝送路のBERが 10^{-6} とは、 10^6 ビット、すなわち100万個のうち1個の割合でビット誤りがあることをいう。

各種デジタル変調方式のBERは、変調された信号の電力と、雑音電力の比で決定され、信号電力を増加するとBERは減少する。

BER特性(下図)では、普通、横軸を1ビットあたりの信号電力と1Hzあたりの雑音電力の比(E_b/N_0)に対して表す。

BPSKとQPSKは、最も優れたBER特性を有するので、携帯電話の上り回線のように、送信電力が限られる場合などに適している。一方、多値変調はBER特性は劣るが、信号電力の増加によりBERが改善できるので、下り回線に向けた方式といえる。



QPSKは正弦波と余弦波という互いに独立した2つの搬送波にBPSK変調を行うとみなせるので、BPSKと同じBER特性をもつ。

パリティビット付与方式はFECの最も単純な例

デジタル通信では通信中の符号誤りをゼロ、又は極力少なくする必要がある。しかし、伝送路では符号誤りが生じるので、これを検出・訂正するFEC(Forward Error Correction)やARQ(Automatic Repeat Request)の処理が行われる。

FECは符号誤り検出訂正用のビットを情報ビットに付加して伝送する方式であり、双方向通信が必要なARQと異なり片方向のみの通信で動作する。

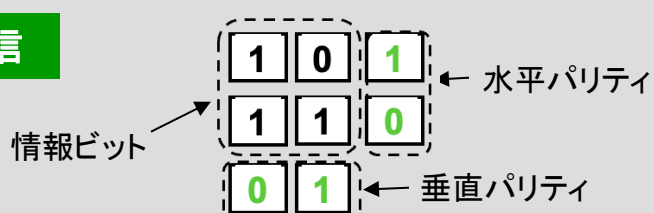
FECの単純な例には記憶装置への記録の際などに用いられるパリティがある。

ここでは、一組の情報ビット中の「1」の個数の奇偶によって1または0とする検査ビット(パリティビット)を付加して送信する。受信側でも同じように情報ビット中の「1」の個数の奇偶を調べ検査ビットと比較する。これが合っていれば「誤りなし」、合っていなければ「誤りあり」と判定する。

この方法では1ビット誤りが検出できる。更に、情報ビットを下図のように2次元に並べ、各行と各列のパリティを付加すると、1ビットの誤りであれば受信側では誤りの位置がわかるので訂正することができる。

誤り検出・訂正の方式例 (水平垂直パリティ)

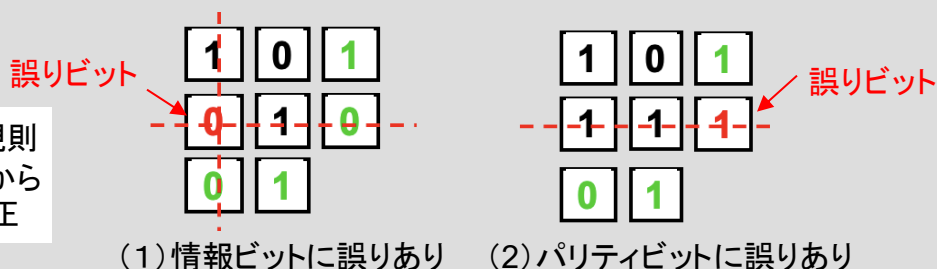
送信



情報ビットの水平垂直方向で情報[1]の個数の奇偶を計算してパリティを付加

受信

受信側ではパリティ規則が崩れている行と列から誤りビットを検出し訂正



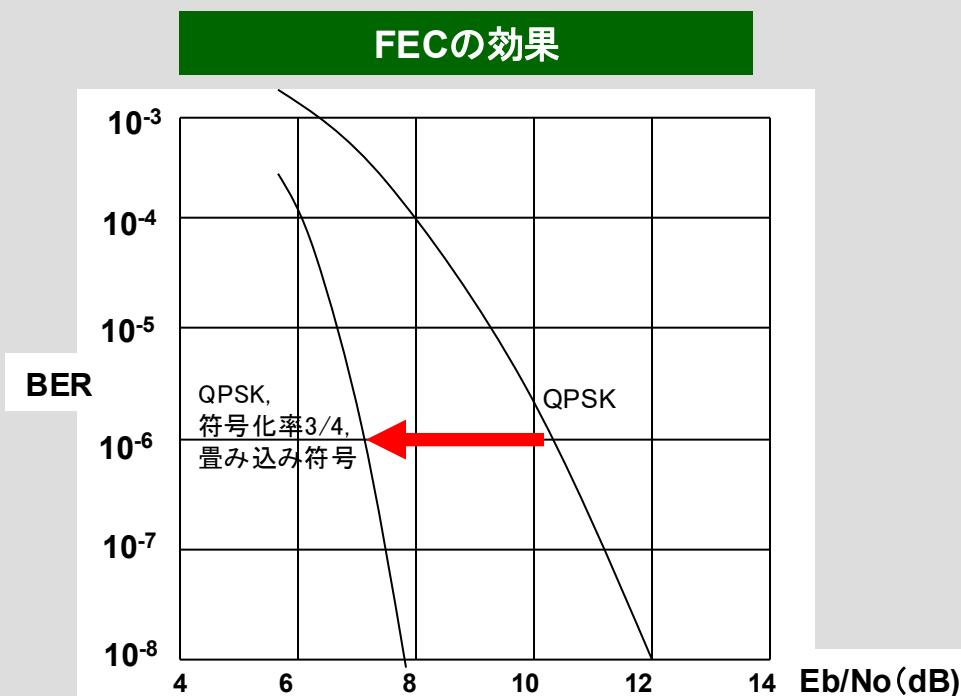
誤りが1ビットのみの場合、パリティビットが誤った場合でも誤り訂正できる。

BER特性を大幅に改善

FECによる改善効果をBER特性例でみると下図になる。

これは、畳み込み符号という符号を用い、情報ビット3ビットに誤り訂正用ビットを1ビットの割合で付加した例であり、FECを使用しない場合に比べ、 10^{-6} のBER付近では約4dBの改善効果、つまり、送信電力を4dB下げられることを示している。同じ情報量を送る場合、誤り訂正用ビットの付加により、3割ほど余分な周波数帯域が必要になるが、送信電力を約半分にできるという大きな効果がある。

通常、FECは、最悪でもBERが 10^{-4} 程度の伝送路で使われる。これは100ビットを1パケットにする場合、100個のパケットあたり1ビットの誤りが起こる頻度に相当する。1パケット内に2ビット以上の誤りを含むパケットの数は、1ビット誤りを持つものに比べて格段に少ない。パリティの例でみたように、1ビット誤りは簡単に訂正できるので、FECの適用により劇的にBERが改善できるわけである。



FECを用いることにより、低い送信電力で同じBERを達成できる。

3. 信号処理と変調

(14) シャノンの定理

伝送速度の理論上の上限値

シャノン・ハートレーの定理ともいう。

帯域幅が B (Hz)、信号電力と雑音電力の比が S/N (真数)の伝送路にて、誤りなく伝送できるビット数の上限値である通信容量 C (bit) は次式で表される。

$$C = B \times \log_2 (1 + S/N)$$

帯域に制限が有る場合でも、信号電力を増やすことで、際限なく通信容量が増加できることになる。

一方、逆に信号が雑音に埋もれてしまうような条件下、すなわち、 S/N が1以下でも情報伝達が可能なことも示している。

S/N が悪い場合には、受信側で受信誤りを訂正するための余分の情報を付加することで、伝送速度は落ちるものの情報伝達が可能になる。通信容量は、 B を大きくして、信号を広い帯域に拡散させることでも確保できる。

シャノンの定理による通信容量の上限

S/N (dB)	1Hzあたりの通信容量上限(ビット)
10^{10} (100dB)	33.2
10^5 (50dB)	16.6
10 (10dB)	3.46
1 (0dB)	1
10^{-1} (-10dB)	0.14
10^{-2} (-20dB)	0.014

【近似式による計算】

$S/N \gg 1$ の場合、 $C \approx 0.332 \cdot B \cdot (S/N)$ (S/N)としてdBの数値を代入する。

$S/N \ll 1$ の場合、 $C \approx 1.44 \cdot B \cdot (S/N)$ (S/N)として実数を代入する。

B と N が決まっている場合、信号電力の増加に対する通信容量の増加は、直線(比例)的でなく、対数的な増加にとどまる。

3. 信号処理と変調

(15) 主なFECの種類

ブロック符号と畳み込み符号

FECでは送信側は情報系列から計算される冗長ビット系列を情報系列に付加して送信する。一方、受信側では、受信した情報からの代数演算、あるいは、確率（尤度）計算によって伝送路で生じた符号誤りを訂正する。

FEC方式には、大別して固定長のブロックごとに符号化を行うブロック符号と、任意の長さのビット系列に適用する畳込み符号がある。また、2種類の符号を連結使用すると、誤り訂正能力が更に向上する。

4G/5Gのユーザデータチャネル（PUSCHとPDSCH）では、4GにTurbo、5GにLDPCがそれぞれ使用される。一方、制御チャネル（PUCCHとPDCCH）には、畳み込み符号の一種のTBCC（Tail-Baiting Convolutional Code）、ブロック符号の一種のPolarが4G、5Gのそれぞれにて使用される。

2つの畳込み符号を組合せたTurbo符号や、疎行列パリティ検査符号を用いたLDPC（Low Density Parity Check）符号はシャノン限界に迫る優れた特性を有するFEC方式として、Wi-Fi等でも使用されている。

主なFECの方式

種類	符号	特徴	衛星通信以外での利用
ブロック符号	BCH	ガロア有限体を元に最も研究されてきた巡回符号	（初期の）移動通信の制御回線
	RS	BCHの拡張。8ビット（バイト）単位で訂正する方式が多い	地上デジタル放送、CD、DVD、QRコード
	Golay	12ビットを24ビットに符号化	（初期の）移動通信制御回線
ブロック符号の変形	LDPC	シャノン限界に迫る特性	携帯電話、Wi-Fi、WiMAX
畳込み符号	CC	ビタービ復号法を適用	携帯電話、Wi-Fi、WiMAX
畳込み符号と多値変調	TC8PSK	トレリス符号化8PSK	デジタルTV放送
2つの畳込み符号	Turbo	シャノン限界に迫る特性	携帯電話、WiMAX
連結符号	CC-RS	CCとRSの連結	デジタルTV放送
	CTC	畳込み符号とターボ符号	携帯電話、WiMAX
	LDPC-BCH	LDPCとBCH符号の連結	欧州地上デジタル放送

近年は、TurboやLDPC、連結符号が広く使われるようになった。

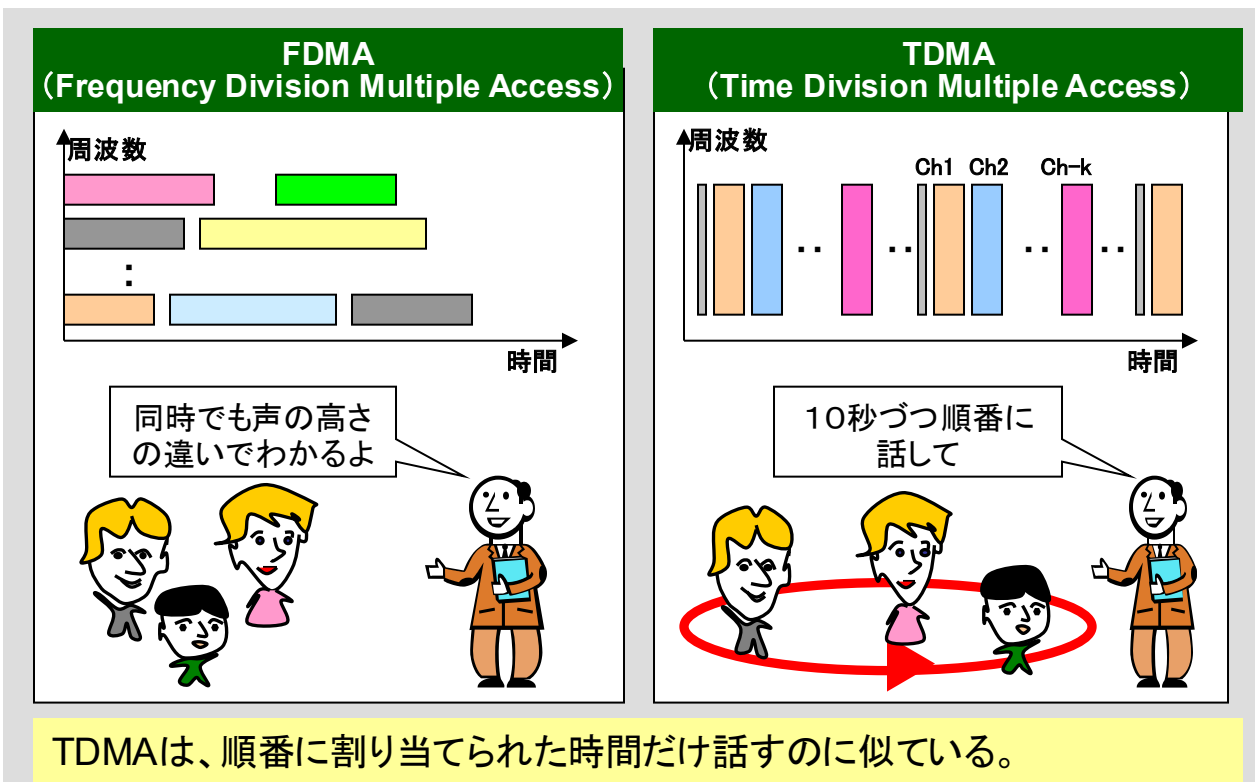
FDMAとTDMA

多元接続(マルチプルアクセス)は同時に複数UEとの通信ができることを言う。

第1世代のアナログ方式では多元接続方式としてFDMAが使用された。FDMAの基地局は各UEの通信に異なる周波数スロットを割り当てる。FDMAでは基地局側でチャンネル毎に多数の変復調器が必要であること、(デジタル化も可能だが、)多様なチャンネルの柔軟な収容が困難であり、周波数利用効率が悪いのが欠点だった。

これに対して第2世代では個々の通信に短い時間(タイムスロット)の単位で通信チャンネルを順番に繰り返し割り当てるTDMAが使用された。TDMAでは、基地局の変復調器を1つにできること、音声・データの両方を多重できるのでデジタル通信と相性がいいことから日本以外の殆どの国で標準となったGSMの多元接続方式として長く使用されてきた。

続く第3世代、第4/第5世代にはCDMA、OFDMAの多元接続が用いられている。



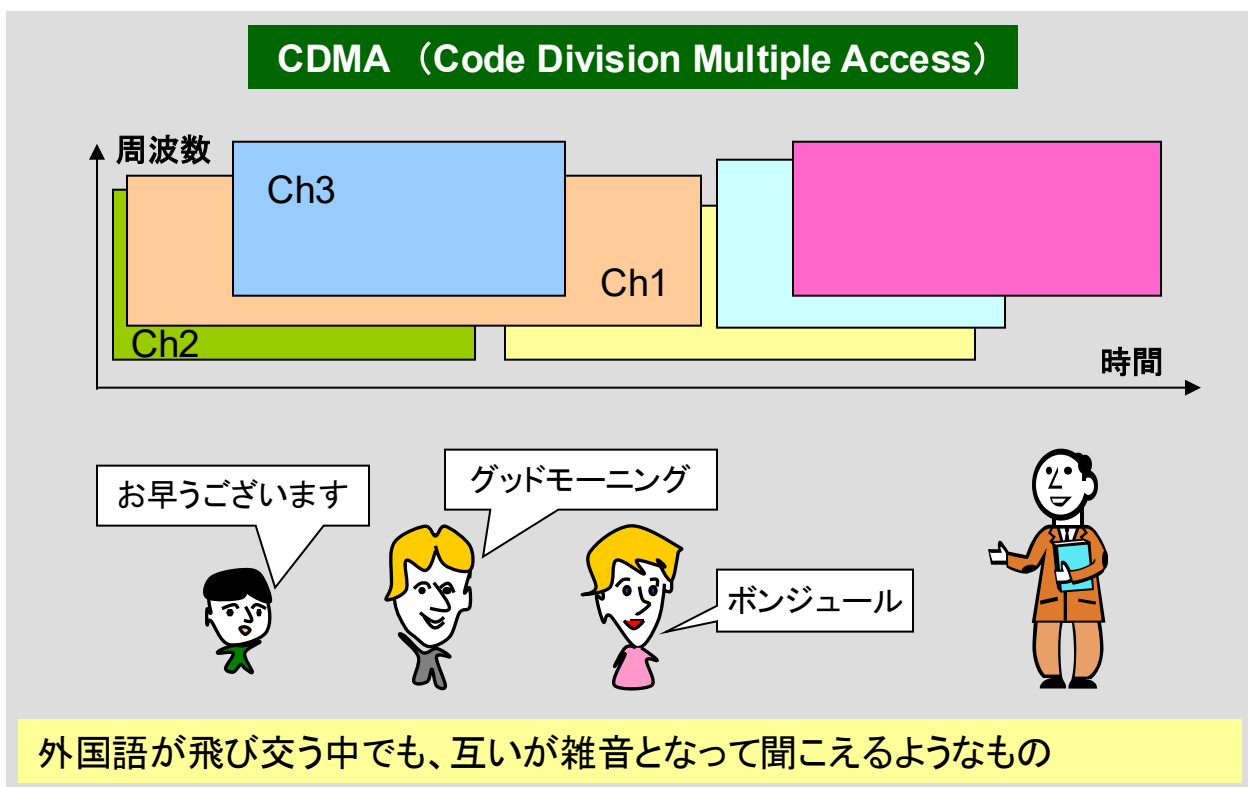
CDMA

第3世代では、W-CDMAとCDMA2000の多元接続方式としてCDMAが利用された。

CDMAの変調方式はスペクトラム拡散方式と呼ばれ、軍事用暗号通信から民生用に発展した技術である。回路が複雑なため実用化が難しかったが、デジタル信号処理技術の進歩により実現可能になった。

CDMA方式では個々の通信に異なるコード(拡散コード)を割り当て、これを送信情報に掛け合わせて広い帯域にスペクトラムを拡散させて送信する。複数のユーザは同時に時間と周波数の両者を共有するが、各々の拡散コードが異なるため相互は雑音のように扱われる。

CDMAには、①周波数利用効率の改善、②近接セル間で同一周波数の利用が可能 ③レイク受信やソフトハンドオーバーが可能などの長所がある。



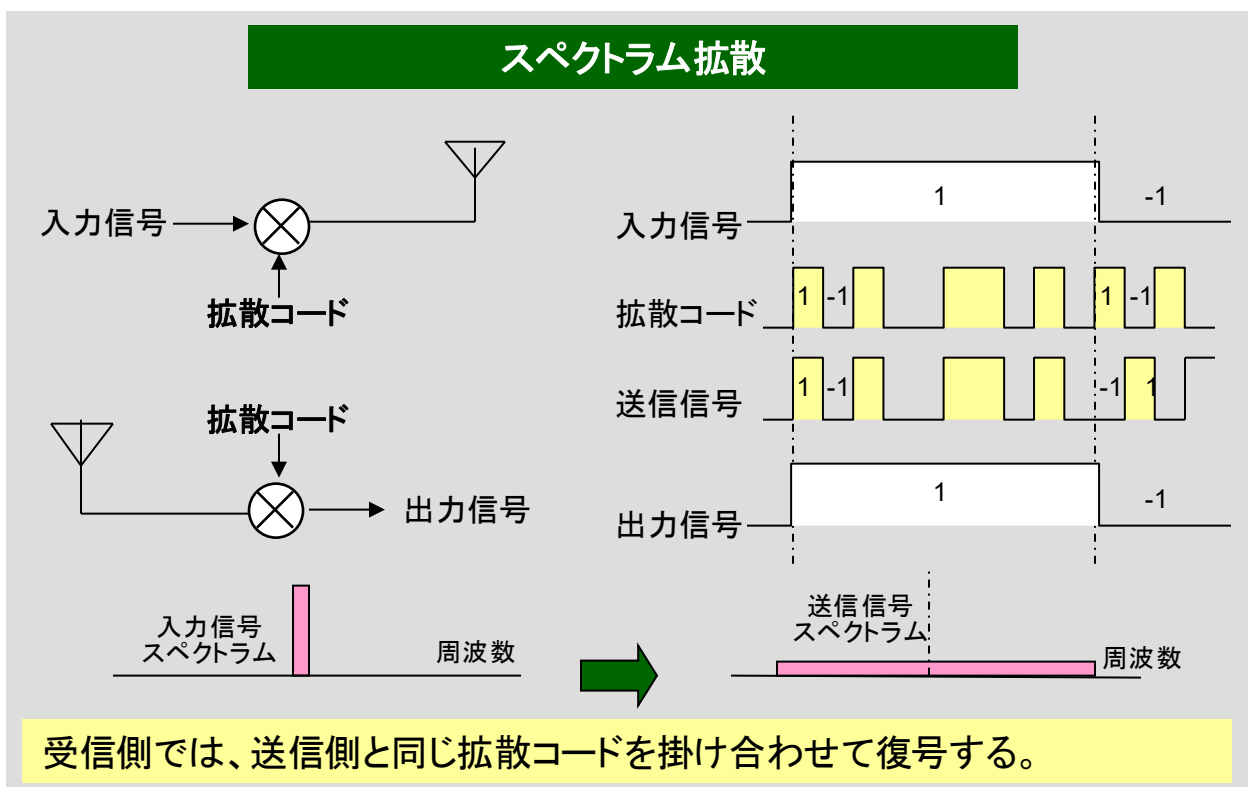
スペクトラム拡散

第3世代の多元接続方式であるCDMAでは、送信符号に送信符号のパルス周期に比べて非常に短いパルス周期をもつ拡散コードを掛け合わせて送信する。

一方、受信側は、同じ拡散コードを掛け合わせる逆拡散を行うことで元の信号が復元される。それは、 $1 \times 1, (-1) \times (-1)$ はいずれも1になるからである。

拡散コードは、異なる通信チャネル毎に別のコードが割り当てられ、互いの拡散コード間の相関は非常に少ないので、互いの拡散コードを掛け合わせるとほぼゼロとなることから、別の拡散コードで拡散された信号が重畳しても雑音のように扱われる。

このように、微小電力を広い周波数帯域に拡散するので、CDMAの変調方式は別名、スペクトラム拡散方式とも呼称される。



FDMA方式の変形に先祖返り

LTEや5G NRでは多元接続方式にOFDMA方式を採用している。

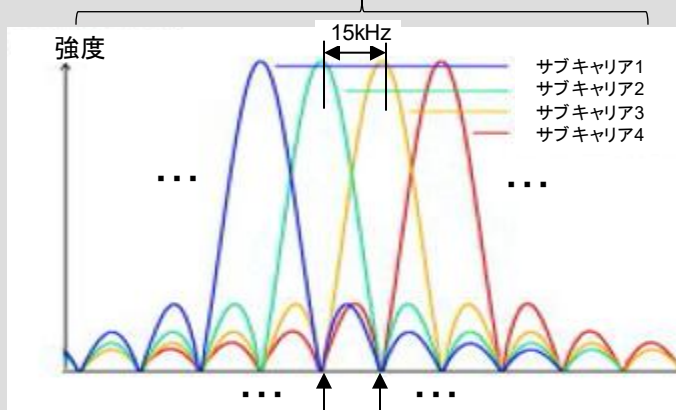
直交(Orthogonal)を頭文字とするOFDMは、チャンネル毎に異なる周波数の電波を使用するFDM方式の周波数間隔を極限まで狭めることで利用効率を改善した方式であり、地上デジタル放送や無線LAN等で広く利用されていた。サブキャリア数を連続的に増やすことで順次高速化できる拡張性があるのに加え、MIMOアンテナとの相性が良いこともOFDMの大きな長所である。

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

LTEでは15kHz間隔で連続する12個のサブキャリアの組が周波数軸上でのリソース割り当て単位



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。

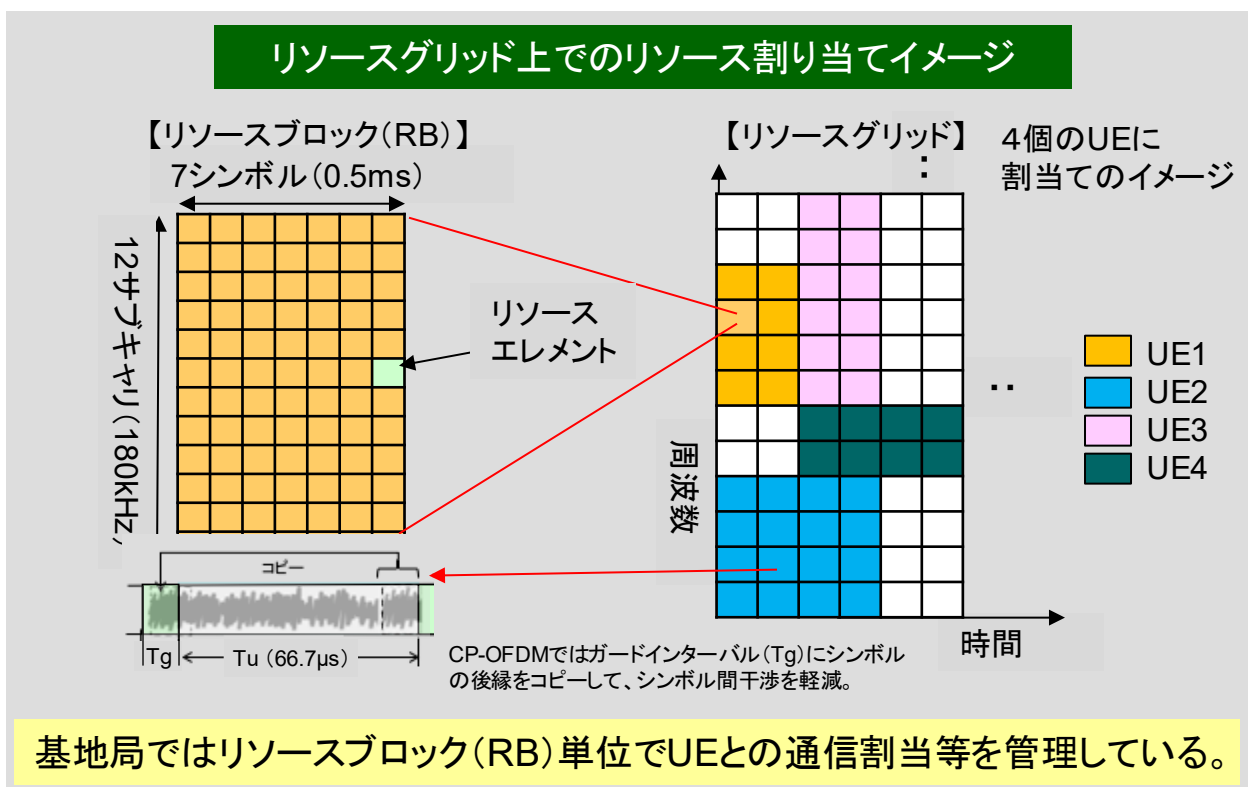
リソースブロック

サブキャリア間隔が15kHzのLTEでは、周波数軸上では連続する12個のサブキャリアの組(帯域180kHz)をリソース管理の単位としている。

一方、時間軸上では、連続する7個のシンボルを含む0.5msを1タイムスロットとして、リソース管理の最小単位としている。なお、LTEでは、サブキャリア間隔15kHzの逆数にあたる1シンボル区間(66.7 μ s)に、4.7 μ s(第1シンボルのみ5.2 μ s)のガードインターバルを付加している。

周波数軸上の180kHz幅と時間軸上の0.5msが占める区画をリソースブロック(RB: Resource Block)と呼ぶ。基地局がUEとの間で通信要求の都度行うリソース割当ては時間軸上で連続する2個のRB(1ms長:サブフレーム)の単位で行っている。

なお、リソースブロック内の1個のシンボルをリソースエレメント、格子状のリソースブロックが構成する無線リソース全体をリソースグリッドと呼んでいる。



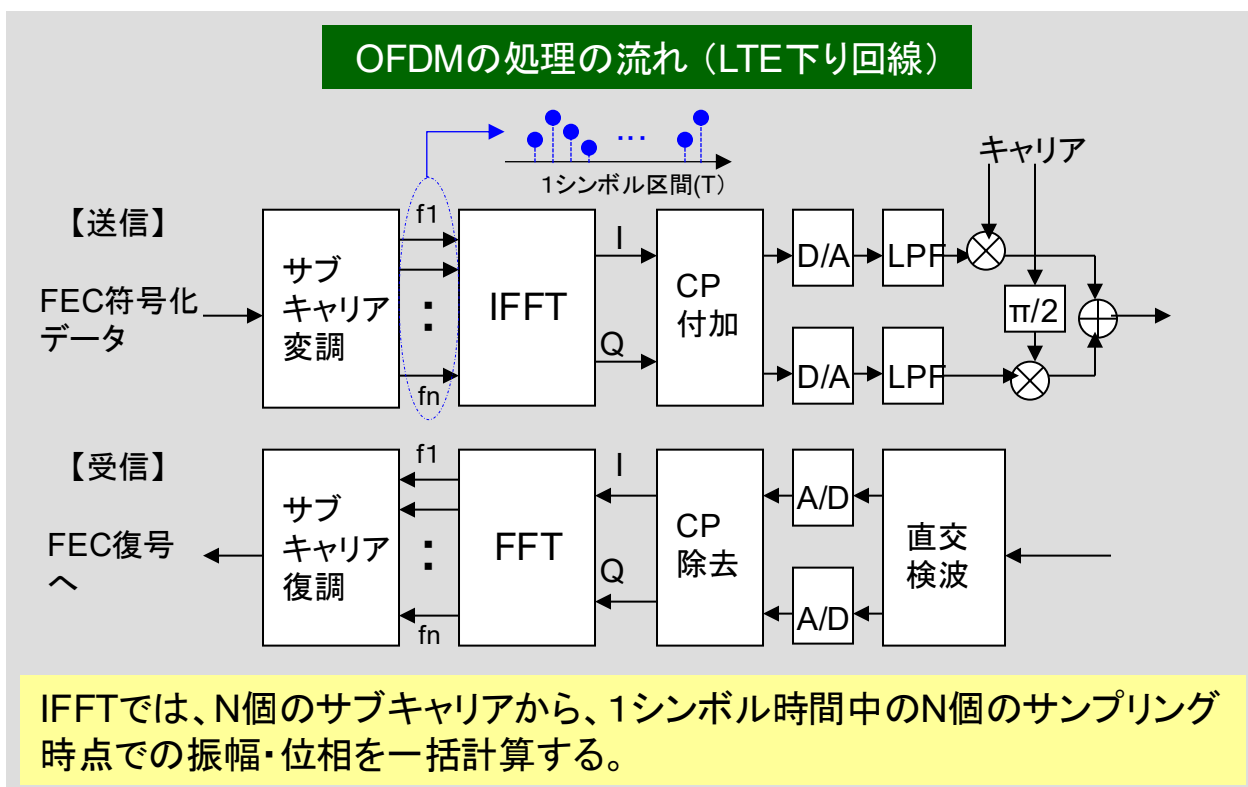
送信側はIFFT, 受信側はFFTで一括変換

下り回線(基地局→端末)のOFDM変調信号は概略、次の順序で生成される。

- ・ 送信データ系列はサブキャリア変調(QPSK/16QAM/64QAM/256QAM/..)された後、N個のシンボルをN個のサブキャリアに直並列変換する。
- ・ IFFTにより、1シンボル区間にあたるN個の時間領域信号に変換する。
- ・ 時間領域となった実部(I), 虚部(Q)の信号系列にて、シンボル間ガード・インターバル部分に、受信側でのチャネル推定(等化器)簡略化のため、直前OFDMシンボルの最終部分のコピー(CP: サイクリック・プレフィクス)を付加する。

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信号処理する。

なお、上り回線(UE→基地局)では、UE送信機の入出力非直線性に起因する信号歪み雑音を抑えるため、OFDM変調信号のスペクトラムを単一キャリアのそれのように変換する機能を加えている。



4. LTEとNR

(2) サブキャリア周波数間隔

帯域幅200MHz以上の無線キャリアでは120kHzまでに拡大

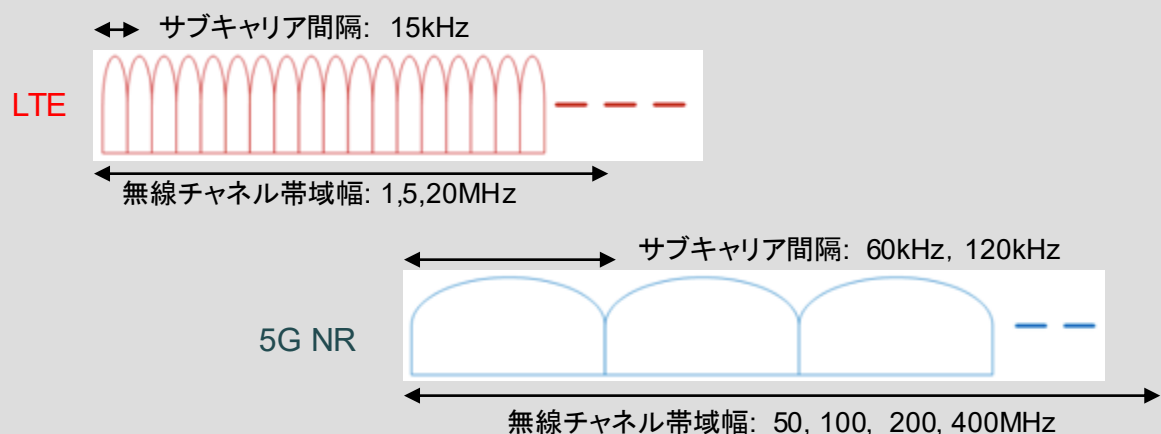
1つの無線キャリアで最大20MHzまでの帯域幅を使用する4G LTEでは、無線キャリアの帯域幅に関らずサブキャリア間隔を15kHz固定としている。

サブキャリア間隔を15kHzと低く抑えることで1シンボル時間が長くなるためマルチパスによる影響を抑えることができる。

しかし、無線周波数が高くなるにつれ、電波の直進性が高まるためマルチパスが少なくなる一方で、サブキャリア間隔が狭いと搬送波周辺に発生する局部発信器からの位相雑音の影響が無視できなくなる。

そこで、サブ6ギガ帯や準ミリ波帯を利用する5G NRでは、60kHzや120kHzの広いサブキャリア間隔を使用できるようにするとともに、最大400MHzまでの帯域幅をもつ同じ周波数帯の信号を上下方向の通信の都度、時間的に切り替えるTDD (Time Division Duplex: 時分割複信) モードで使用している。

サブキャリア間隔の比較



24GHzを超える周波数での無線チャンネルでは、サブキャリア間隔をLTEでの15kHzの4, 8倍となる60kHz, 120kHzが使用できる。

サブキャリア間隔の増加に応じてタイムスロット長を短縮

5G NRでのリソース割り当ての単位であるリソースブロックは4G LTEの場合と同様、周波数軸では連続するサブキャリア12波、時間軸では連続する7個のOFDMシンボルで構成される区画(計84シンボル)を1単位としている。

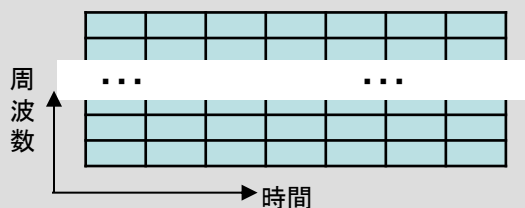
LTEでは無線キャリア帯域幅に関わらず、サブキャリア間隔は15kHz固定であるため、1リソースブロックは180kHz x 0.5msの区画で固定であるが、5G NRでは15,30,60,120kHzの4種類のサブキャリア間隔が設定可能なため、これに比例してタイムスロット長が短縮する。

例えば、サブキャリア間隔が30kHzとLTEでの15kHzの2倍に増加すると、1タイムスロット長はLTEでの0.5msの1/2である0.25msになる。

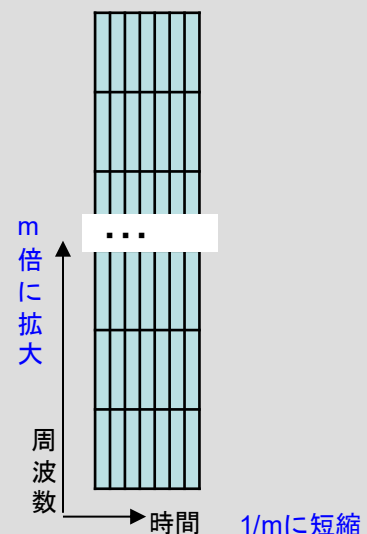
このように、5GNRではLTEに比べて同量のデータ伝送に要する時間が短縮されるため、遅延時間短縮や消費電力の削減となる。

5GNRのリソースブロック

LTEではLTEの1RBは180kHz x 0.5msで固定



NRでは、サブキャリア間隔が15kHzのm倍になると、RBは周波数軸で180kHz x m に、時間軸では0.5ms x 1/m になる。



5GNRのリソースブロックはLTEのそれと比較して周波数軸で拡大する分、時間軸で短縮される。

4. LTEとNR

(4) フレーム構造

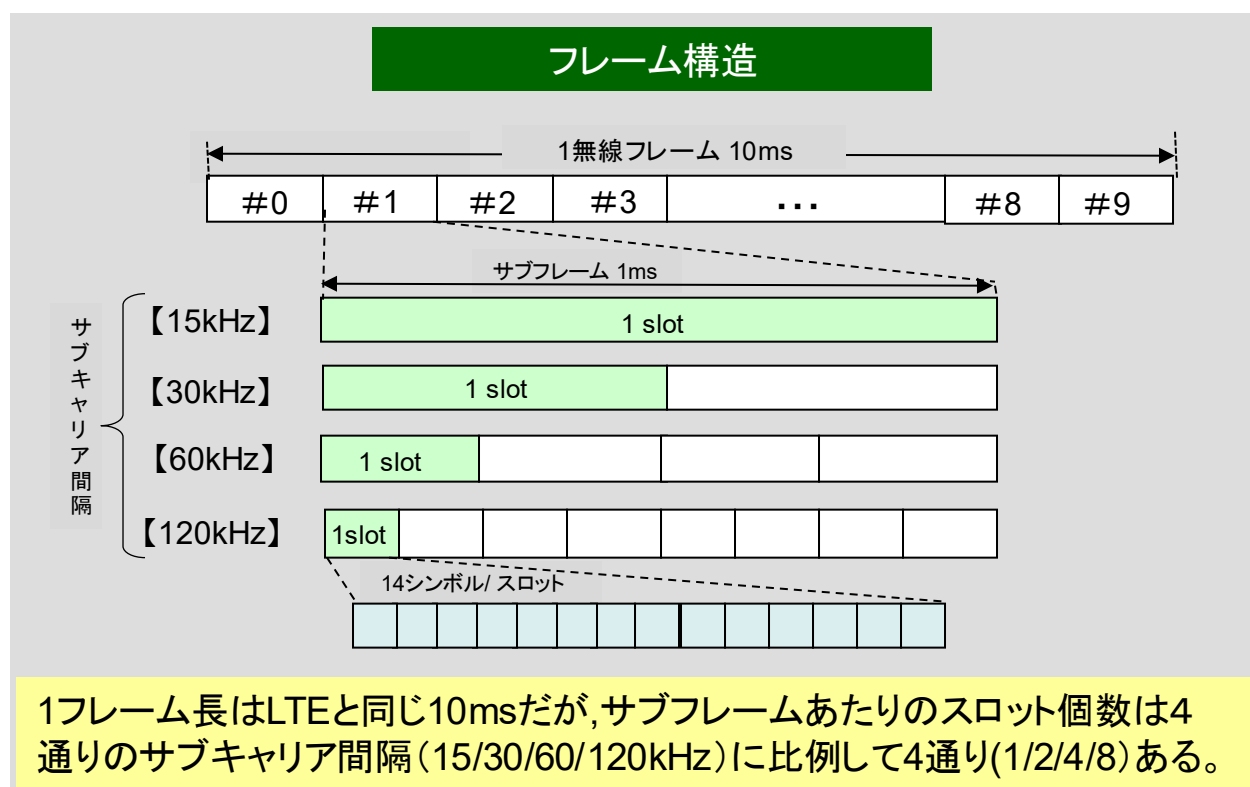
5G NRの1無線フレームはLTEと同じ10ms

時間軸では5G NRの1無線フレームは4G 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/LTE-A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、5G NRでのサブキャリア間隔は無線キャリアの帯域幅に応じて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。

(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。



4. LTEとNR

(5) 下りリンクの物理チャネルと信号

5G NRでは4G方式の一部仕様を変更・拡張

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

PDCCH: UEに上下回線リソースの割り当てやページング等の情報を通知

PDSCH: 下りデータトラフィックを伝送

なお、5G NRではPDSCH, PDCCHの符号化にそれぞれLDPC, Polar符号を使用するため、LTEでのTurbo, TBCCとは異なる。

PSS, SSSは、階層型セルサーチにより、UEでのセル固有の物理識別番号(PCID^{*1})の取得に用いる。LTEではPCIDは504通りだが、NRでは更に高密度の基地局配置も想定し、2倍(1008通り)としている。

RS(Reference Signal: 参照信号)は受信信号の復調支援やアンテナビームの形成のために挿入されるが、5G NRでのリソースグリッド上での挿入位置や利用目的はLTEと異なる。5G NRではDM-RSが上下リンクで幅広く利用されている。PT-RSは高い周波数での位相雑音の影響軽減のために導入された信号である。

下りチャネル

2次変調方式	1次変調方式
CP-OFDM (CP: Cyclic Prefix)	PDSCH: QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024QAM PDCCH/PBCH: QPSK

【物理層チャネル】

略称	符号化	用途
PDSCH	LDPC	ユーザデータ
PDCCH	Polar	制御信号
PBCH	Polar	報知情報

*1) PCID: Physical Cell ID

【参照/同期信号】

名称	用途
DM-RS	PDSCH/PBCHの復調
PT-RS	PDSCHの位相追跡
CSI-RS	チャネル品質情報
TRS	主に同期信号の処理
PSS/SSS	Primary/Secondary 同期信号

UEでの処理簡単化に加え、チャネル間干渉低減や電力削減のため各RSは同一ビーム内にて局所的に集中配置される。

4. LTEとNR

(6) 上りリンクの物理チャネルと信号

4G方式の一部仕様を変更・拡張

5G NRの物理層チャネルは4G方式と比較すると、主に次の変更がある。

- ・データチャネル変調方式に256QAM, $\pi/2$ -BPSKを追加
前者は主に高速通信、後者はM2M/IoT等の低速通信向け
- ・PUSCH, PUCCHの符号化にそれぞれLDPC, Polar符号を使用

物理チャネルは次の目的で使用される。

PUSCH: 上りデータトラフィックを伝送

PUCCH: 割当要求などの制御信号を伝送

PRACH: ランダムアクセス用のプリアンプル信号を送信

なお、NRのPUSCHの符号化はLDPCであり、LTEでのTurboとは異なる。

一方、RS(参照信号)のうち基地局でのUE信号復調に用いるDM-RSはUEデータ送信時のPUSCHでのリソースユニット(RU)内に挿入される。また、SRSは基地局側で上りリンクのチャネル品質や受信タイミング測定に使用される。

上りチャネル

2次変調方式	1次変調方式
CP-OFDM (SC-OFDMも可能)	$\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM (PUCCHは $\pi/2$ -BPSK, QPSK)

【物理層チャネル】

略称	符号化	用途
PUSCH	LDPC	ユーザデータ
PUCCH	Polar	制御信号 (ハードACK, CSI, スケジュール要求)
PRACH	N/A	ランダムアクセス

【参照信号】

名称	用途
DM-RS	PUSCH/PUCCHの復調
PT-RS	PUSCHの位相追跡
SRS	品質やタイミング測定用

データチャネルに256QAM, $\pi/2$ -BPSKを追加。PT-RSは6GHz以上の周波数での位相雑音の影響軽減のため新たに追加された参照信号である。

5G NRではDM-RSを広く活用するとともに新たにPT-RSを導入

RS (Reference Signal: 参照信号)は受信信号の復調やMIMO等での受信品質測定のために用いるが、5GNRでのリソースグリッド上の挿入位置はLTEでのそれと異なる。

例えば、LTEでは基地局アンテナビーム毎にセル固有のCRS (Cell-specific RS)を常時送信しているが、常時送信には数々の制約が生じるため5GNRではCRSを使用せず、代わりに複数RSの組合せで同じ機能を実現している。

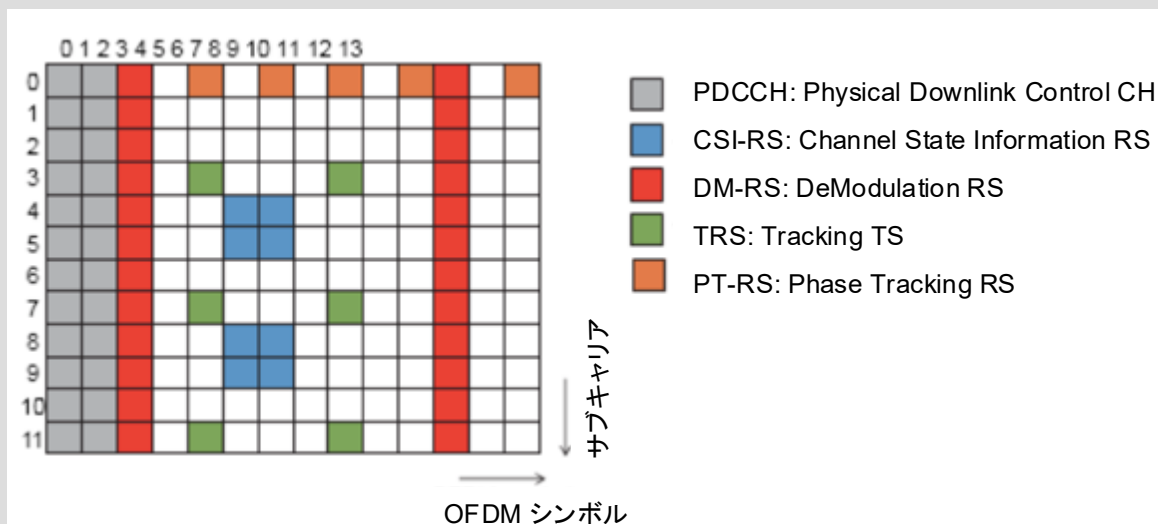
RSのうち、CSI-RSはチャネル状態情報推定用の参照信号である。

DM-RSは、チャネル特性の変動速度に追従したUEでのデータ復調を助けるもので、データチャネル先頭部分に加え追加のマッピングも規定されている。

TRSは周波数の追従を助けるRSであり、4サブキャリア、4OFDMシンボル間隔で挿入される。

PT-RSは高い周波数での位相雑音影響軽減のため新たに導入した信号であり、UE個別(UE-specific)のRSとして感度を有する時間軸上に繰り返し挿入される。

参照信号(RS)の配置例



5GNRではUEでの処理簡単化に加え、チャネル間干渉低減や電力削減のため各RSは同一ビーム内にて局所的に集中配置する。

4. LTEとNR

(8) BWP (Band-Width Part)

異なるサブキャリア間隔を持つCAもBWPで指定可能

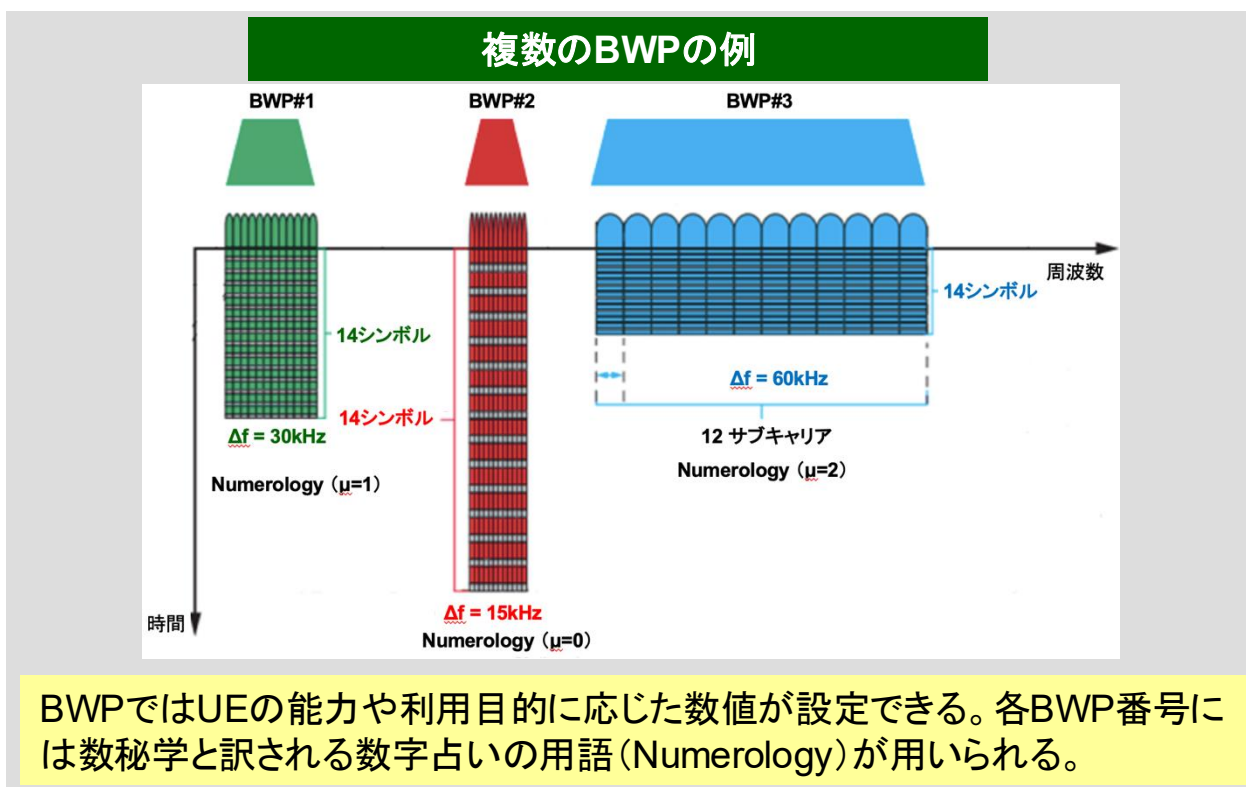
5G NRではキャリア帯域幅の最大値が数百MHzというようにLTEに比べて大幅に増加している。一方でUEが使用する帯域幅はその一部である。

そこでUEが使用する周波数や帯域幅などの情報であるBWP(Band-Width Part)を基地局が上位レイヤシグナリングにてUEに対し設定できるようにした。

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に最大4個のBWPが設定できる。但し、UEは任意の1時点ではUL/DLで各1つのBWPを使用する。

このBWP情報は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でも送受データ量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、下図のように複数のBWPを用いることでサブキャリア間隔の異なる複数CCを束ねることも可能である。



PBCHでの周期的報知とPDSCHでの随時伝送がある

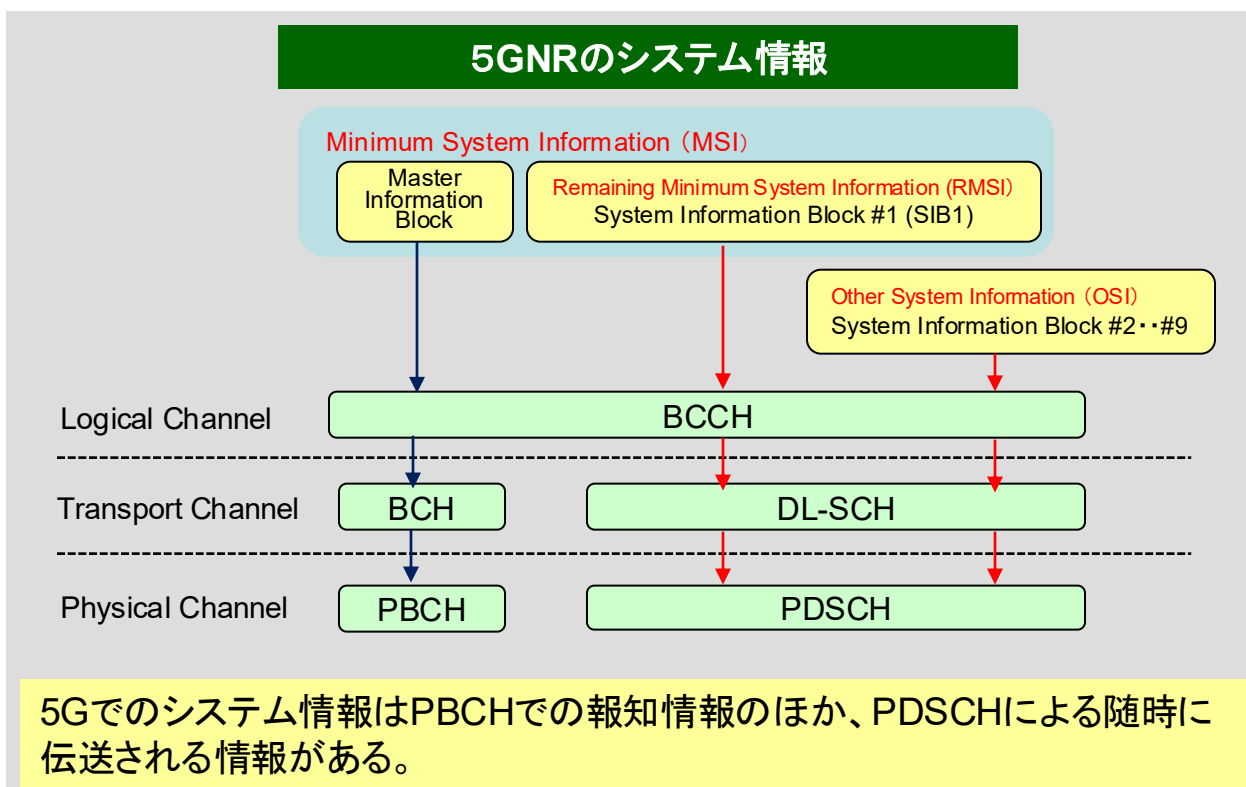
5G NRでのシステム情報は次の3つに分類される。

- ・MSI (Minimum System Information)
- ・RMSI (Remaining Minimum System Information)
- ・OSI (Other System Information)

これらにはMIB (Master Information Block) や9個のSIB (System Information Block) が含まれている。この中でMIBはPBCHにて絶えず周期的に報知されるが、SIBはPDSCHにてNWあるいはUEからの要求がある場合に伝送される。下図のように、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。

UEはMIBの受信によって制御情報セット (CORESET: Control Resource Set) と PDSCH内サーチエリアの情報を復号する。

SIB1にはUEの初期アクセスに必要なULのキャリア情報やランダムアクセス信号構成情報が含まれており、NRセル内のUEに報知される。



電源投入後の手順

UEの電源を入れた後には、次の手順でUEがネットワークに登録され通信可能な待ち受け状態になる。

- (1) 加入者情報の読み出し: UEはUSIMカードから加入者情報を読み出す。
- (2) セルサーチとアタッチ: 基地局の電波を受信し、セルの選択を行う。
5GNRでも概ねLTE同様に、①同期信号(SS)の検出 ②報知チャネル(PBCH)から報知情報を取得 ③非同期ランダムアクセス(RA)による接続確立の手順をとる。
- (3) 認証: ネットワークは加入者情報等を用いて正当な端末であることをチャレンジレスポンス方式で確認する。
- (4) 位置登録: UEの現在位置を位置登録エリアの単位でネットワークに登録することで呼び出しなどに対応できるようにする。

チャレンジレスポンスによる認証



盗まれる恐れがあるので加入者情報自身は送らない。この認証は電源on時や位置登録、各種サービス利用要求時の都度行われる。

UEの初期同期確立などに使われる

NSRA(Non-Synchronized Random Access)信号は72サブキャリア(1.08MHz幅)と1サブフレーム(1ms長)からなり、UE通信開始時の初期同期確立やハンドオーバー後の再同期に使用される。

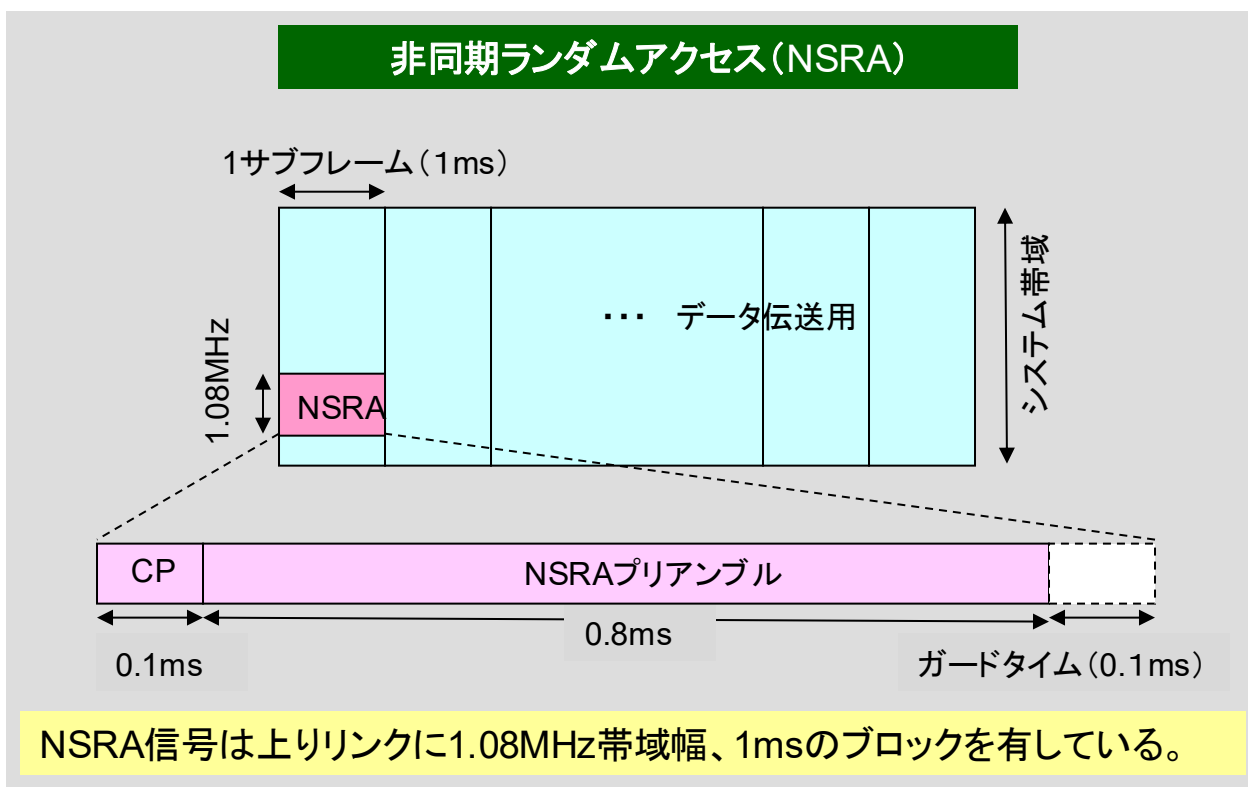
物理層チャネルはPRACH(Physical RA Channel)と呼称される。

0.9ms長のバースト波内NSRAプリアンブルには64種類のCAZAC(*)符号がある。UEは、このうちの一つをランダムに選択して符号多重アクセスする。

(*) CAZAC (Constant Amplitude Zero Auto-Correlation): 高い自己相関特性を持つ符号系列

プリアンブル送信から初期同期確立までは次の手順となる。

1. プリアンブル送信後、一定時間以内に基地局から受信応答が得られない場合、送信電力を増加させて再送信する。
一定量増加させても受信応答がない場合、符号を変え再度ランピングする。
2. 基地局からの応答受信後は、基地局より下り制御チャネルで報知される送信タイミング補正情報に基づきズレを補正して同期確立する。



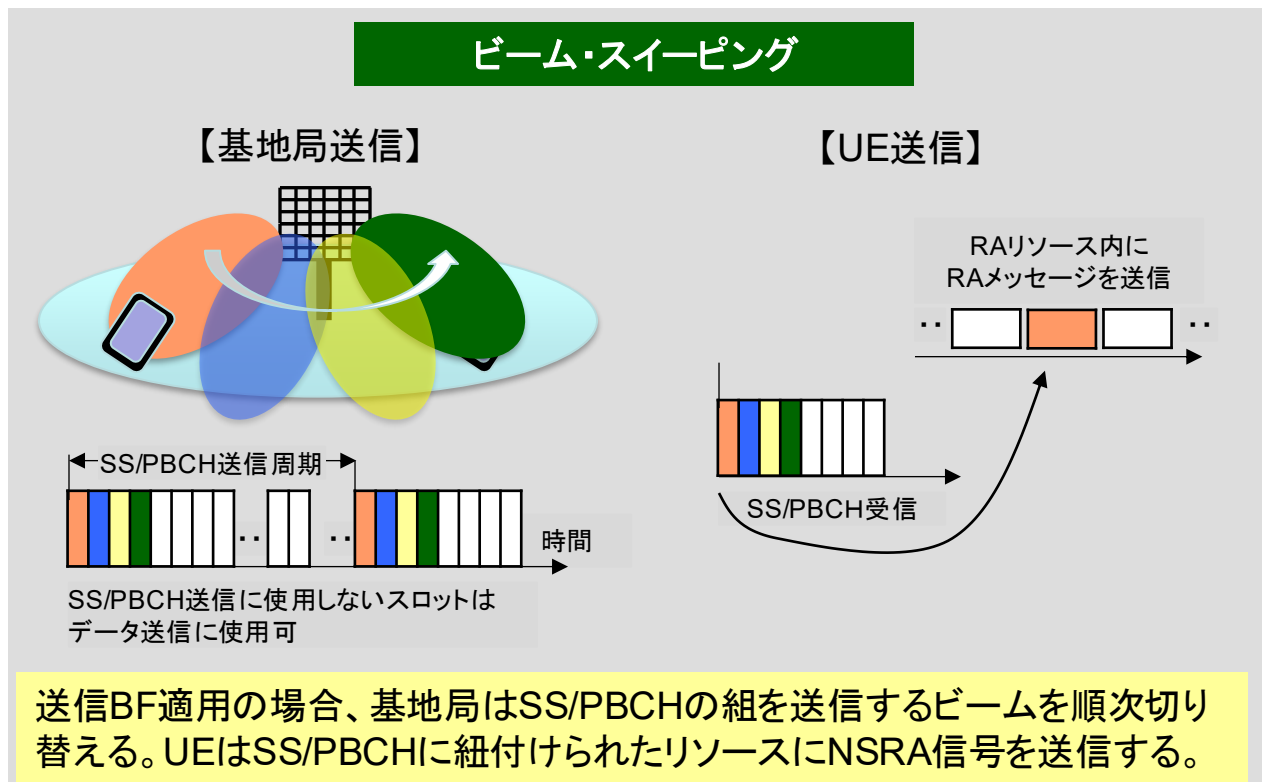
同期信号と報知情報の組を含むビームを掃引

5G NRで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つの手順をとる。

ただし、5G NRにてセル拡大のため基地局アンテナに送信ビームフォーミング(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、基地局はSSとPBCHの組を同一ビーム内に送信するとともに、そのビーム方向を一定周期(例: 20ms)で順次変化させるBeam Sweeping機能が追加された。

UEでは受信可能なビーム内にてSS/PBCHブロック情報を取得して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リソースブロック内にRA信号を送信して初期アクセスを確立する。



コア網との間でUEの登録やPDUセッションを確立

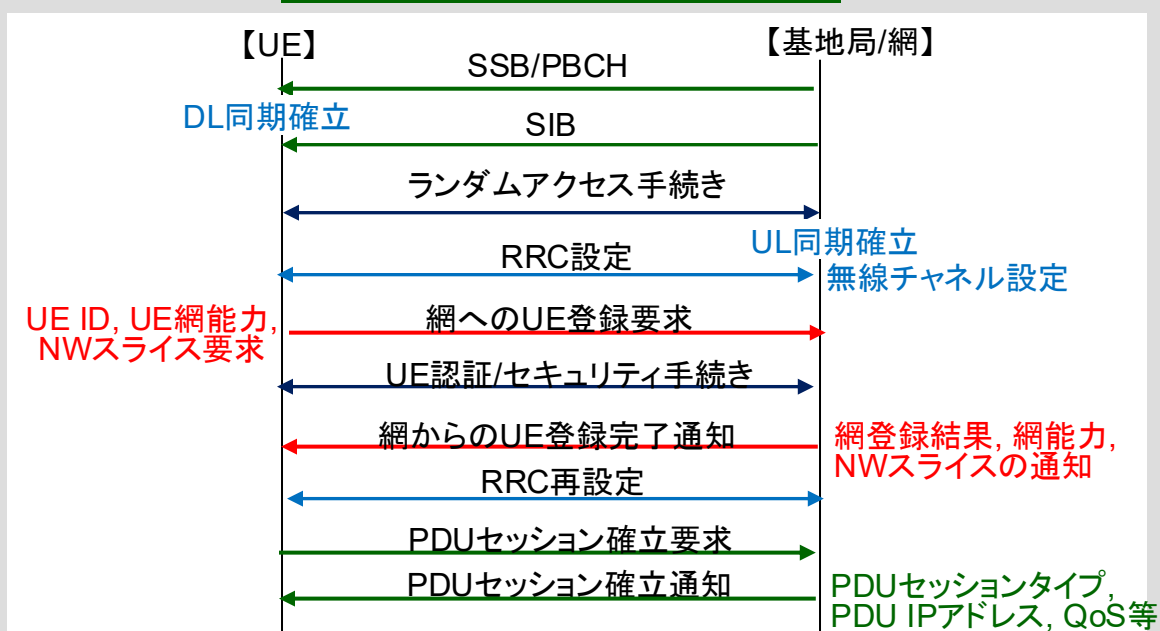
UEからのランダムアクセスに続くコア網への登録手続では、UEの能力やネットワークスライス等の情報が次の手順で送受される。

1. RRC(Radio Resource Control)による無線チャネルの設定
2. UEからコア網へ登録要求(UEの網能力を通知、NWスライスを要求)
3. チャレンジレスポンス方式による網でのUE認証
4. 網からの登録完了通知(網能力サポートやNWスライスの通知)

続いて、PDU(Packet Data Unit)セッションを確立する次の手順に移る。

5. UEからPDUセッションの確立を要求
6. 網からPDUセッション確立の通知
(PDUのIPアドレス, QoS, NWスライスのDNN: Data Network Name)

UEデータの送信開始まで



UEと網間のデータ伝送に用いるIPアドレスやスライス等の情報を送受する。

伝送路状態に応じて変調方式とFECに加え送信電力を制御

5G NRでは4G LTE同様、伝送路状態によって最適な変調方式とFECの組合せを選択するAMC (Adaptive Modulation and channel Coding)と送信電力を増減する送信電力制御 (TPC: Transmit Power Control)を行っている。

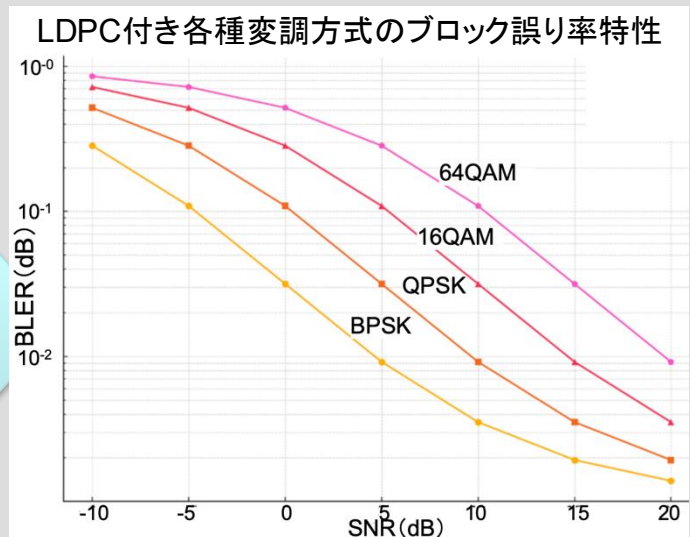
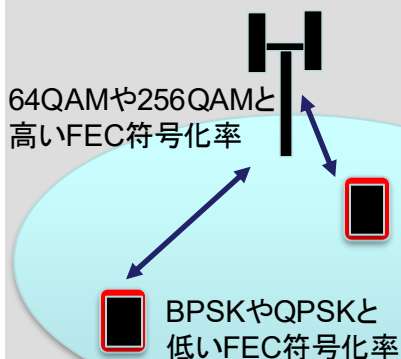
下りデータ回線(PDSCH)での変調方式はQPSKから1024QAMまで、上りデータ回線(PUSCH)ではBPSKから256QAMが選択される。

FECには上下のデータリンクとも、並列処理により復号処理遅延が小さくシャノン限界に近い誤り率特性を有するLDPC方式が用いられる。

NRでは基地局・UE双方で送受信ビームの切替に伴いビーム利得が変動する。そこで、ビーム切替前後の受信電力比較をCSI-RSの受信電力測定により行うことで伝搬損失変動を推定し送信ビームの電力を増減する。

上りリンクでは基地局との距離が遠くなるにつれUE送信電力を高めるが、セル端では隣接セルとの干渉を避けるため送信電力を下げるフラクショナル送信電力制御を実施できることも規定されている。

AMC (Adaptive Modulation and channel Coding)



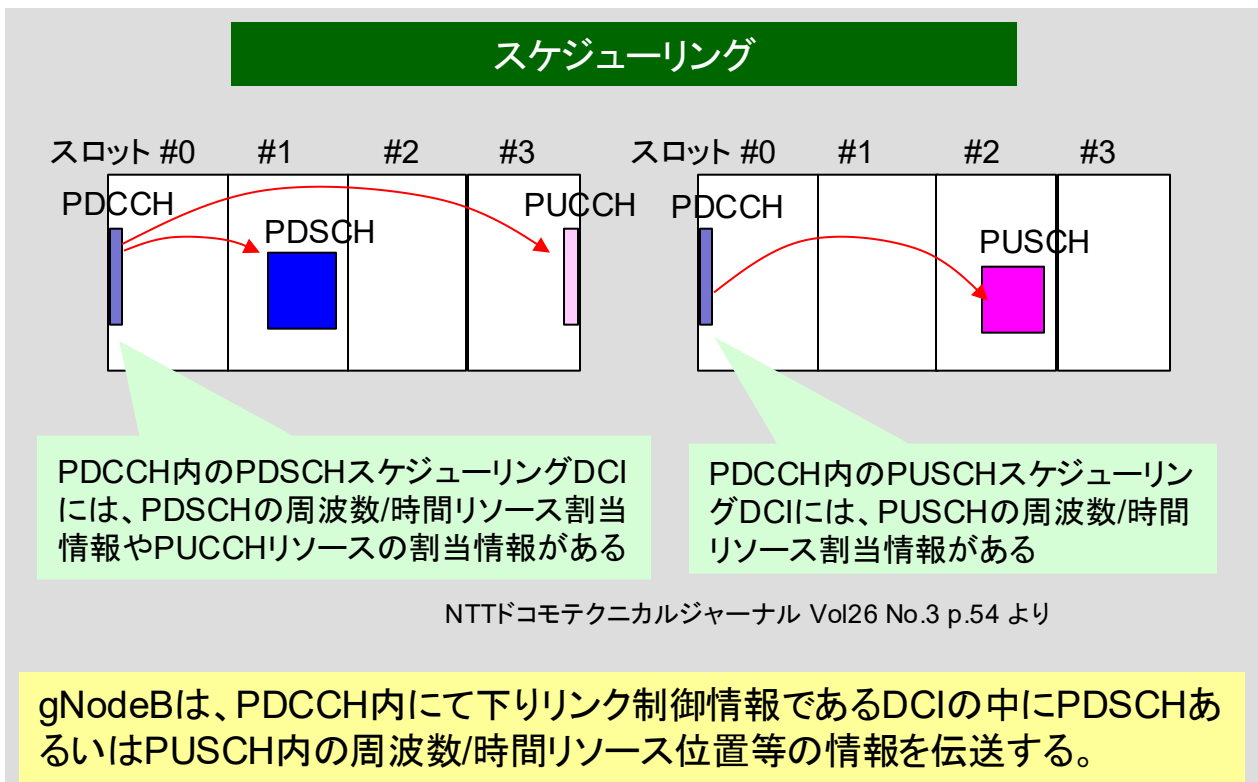
伝送路の状態に応じて、変調方式とFEC符号化率の組合せを選択するAMCはキャリアアグリゲーションを行う場合、各CCに対して独立に行う。

UEへのデータ伝送用送受信リソースブロックの割り当て

NRではLTE同様に基地局 (gNodeB) がUEとの間でデータ伝送を行えるように、上下物理チャネル (PUSCH/PDSCH) に特定のリソースブロックを割り当てるスケジューリングを行う。

このために、gNodeBはスロット先頭 (#0) にある下り制御チャネル (PDCCH) 内のDCI (Downlink Control Information) にて、各UEがデータ伝送を行うためのPDSCHあるいはPUSCH内のリソース位置等の情報を入力し送信する。

なお、PUSCHのスケジューリングでは、通常はUEからのリソース割当要求に基づき基地局が割当を行う手順であるが、NRでは予めUE毎にPUSCHに割当てられた小容量リソースを用いて上りデータ通信を行う手順が追加された。これによってリソース割当要求及びリソース割当の手順が省略されるので遅延時間が短縮できる。

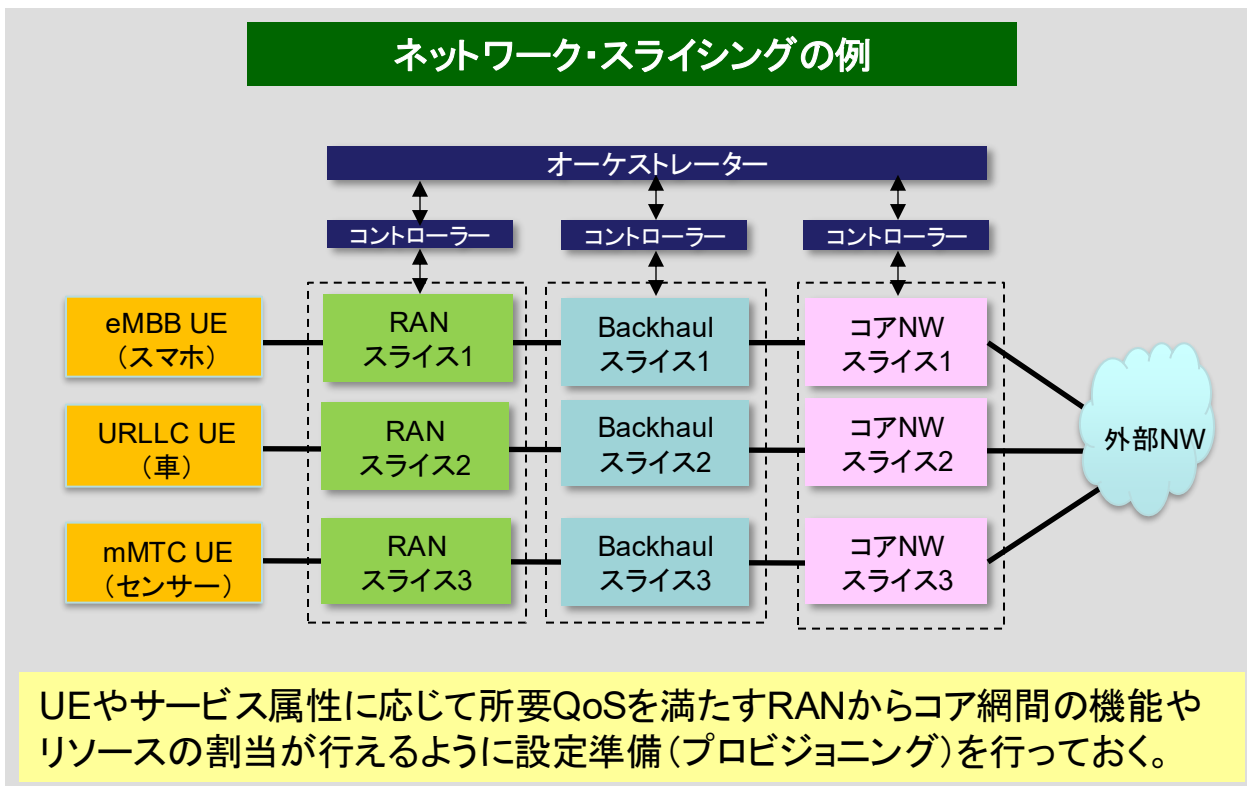


サービス要求条件に対応したネットワーク機能を柔軟に構成

5G NRではモノや機械との通信が多くなる一方で超高速通信が必要なアプリが増加するなど、網が同時に扱うサービスの要求条件は極めて異なる。基地局やコア網では、各UEやサービス属性に応じた一連の処理を要求QoSに応じて効率的に実行する必要がある。

そこで5G NRでは、UEからの通信要求時にUEやサービスの属性を基に所要QoSを満足するRANからコアNW間の仮想的な専用通信路を設定するネットワークスライシングの機能を導入し、アプリ・サービス毎に処理を分離するようにした。

その際に重要な役割を果たすのが網全体の設備や運用状況を把握・管理するオーケストレーターである。オーケストレータは各々の通信に必要なデータ速度、遅延などのQoS条件をもとにRANからコアNWまでのリソース割り当てを行う。スライスの総数は数千といった規模に達することがあるため、スライスの設定準備（プロビジョニング）や運用監視制御の自動化や省力化が鍵となる。



4. LTEとNR

(17) NSAからSAへの移行

SA方式では4G基地局や4Gコア装置を経由せず全て5G設備で運用

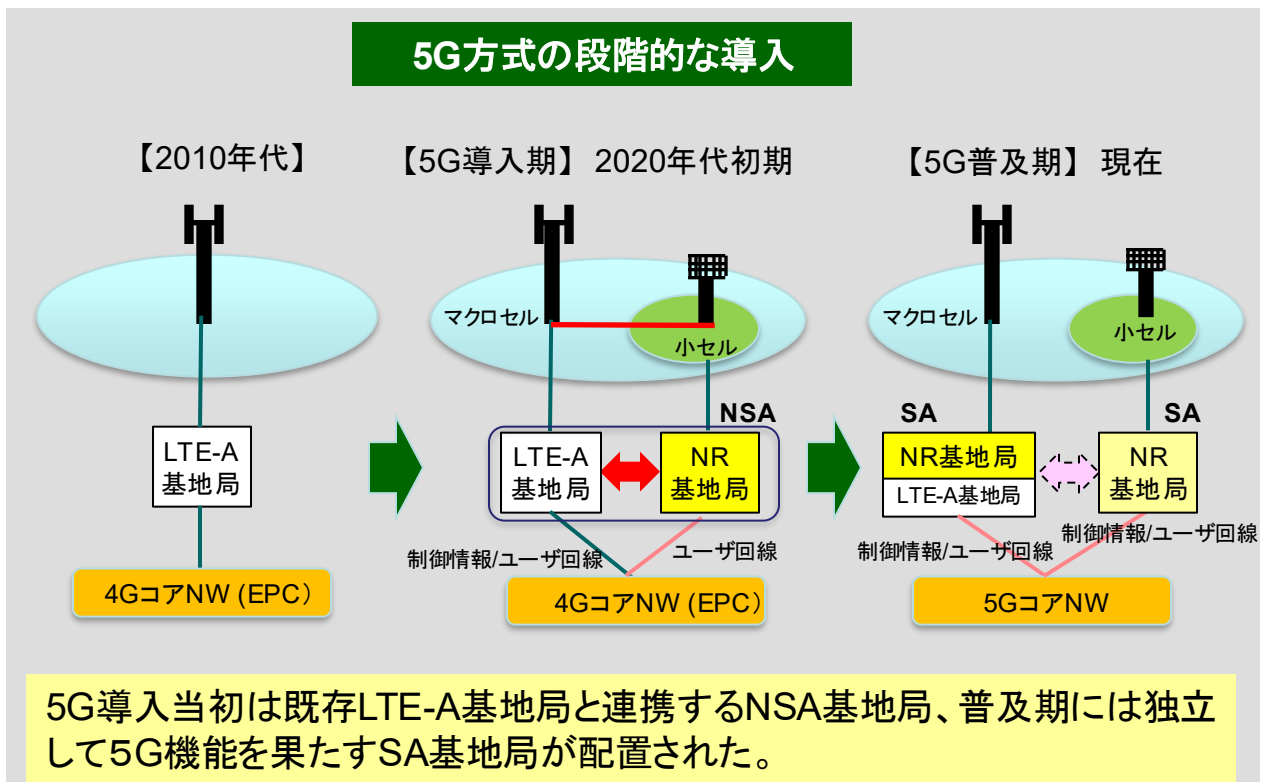
LTE-A方式で全国的にカバーしている各々の4Gセル内に、これより狭いセル径のNR基地局(gNB)を順次開設していく5G導入の初期はLTE-A基地局(eNB)と連携したNSA(Non-Stand Alone)方式でのネットワーク運用を行ってきた。その後、5G普及期の現在は各gNBが独立してネットワーク運用を行うSA(Stand Alone)方式で運用されている。

【5G導入期】

通信需要の多いエリアから5G用の新周波数帯を用いた超高速通信を提供。5GNR基地局は5G UEとユーザデータを送受する一方、UE認証、無線リソース割当、セル間ハンドオーバー等の制御情報はLTE-A基地局経由で伝送する。

【5G普及期】

NWスライシク等に対応した5Gコア網が導入されるとともに、ユーザデータと制御情報をともに伝送するSA構成の基地局運用が開始され、既存周波数帯域でのNR導入も進展する。



5. 5Gが拡げる新分野

(1) IoT: RedCap/eRedCap

3GPPリリース17,18（以下, Rel-17, 18）にて技術的条件を制定

5Gでの移動性能や中速データ通信が可能なIoT機器向けに、スマホ等の高度なUEに比べて消費電力や機能を抑えたRedCap (Reduced Capability) 及び、その拡張版のeRedCap (e: enhanced) がRel-17,18で規定された。これらは小型センサ等向け超低速通信用方式であるNB-IoTと、高速通信方式の5G NRの間を埋める方式であり次の特徴・性能がある。

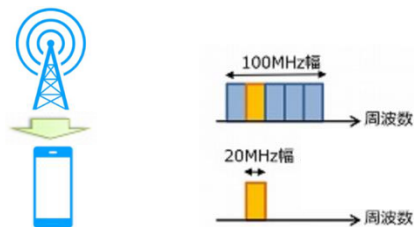
- ・eDRX (enhanced Discontinuous RX)：受信間隔を最長で約3時間まで拡大
- ・通信帯域幅の制限：RedCapでは20MHzまで、eRedCapでは5MHzまで可能
- ・半2重 (Half Duplex)：UEでの送受信タイミングを分離
- ・アンテナ素子数：1個のみ

日本ではRel-17,18での定義に基づき2024年に総務省が技術的条件を定めたことで国内利用が可能になった。

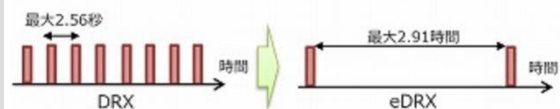
産業向け各種センサ、監視カメラ、ウェアラブルデバイス、電力・ガス・水道等のスマートメーター等への応用が見込まれる。

RedCap/eRedCapの主要技術

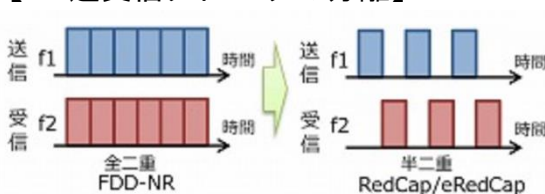
【UE最大帯域の低減】



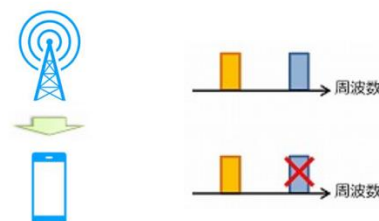
【UE最大受信間隔の拡大】



【UE送受信タイミングの分離】



【UE受信アンテナ数の制限】



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 (2024.12) より

産業向け無線センサやスマートグリッドでの利用が期待される。

5. 5Gが拓ける新分野

(2) IoT: 超低消費電力無線機

IoT UE待受時での節電性能を改善

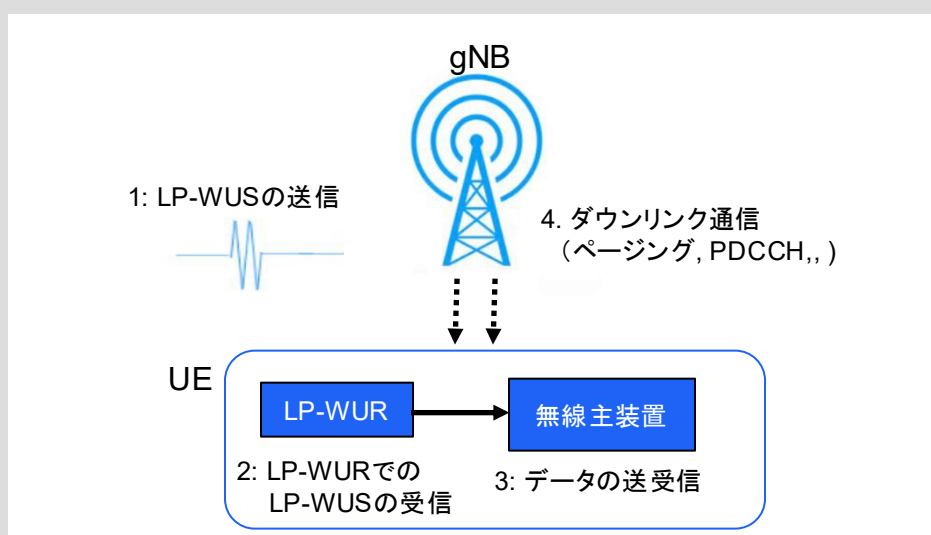
UEの節電方式であるDRX(Discontinuous RX)は、UEが一定周期で起動してダウンリンク信号をモニタする方式だが、当該UEとの間でデータ伝送がない場合には短時間とはいえ受信機起動による無駄な電力消費が生ずる。

そこで、UE向けデータ伝送がある場合は、基地局(gNB)が明示的に起動信号(WUS: Wake-Up Signal)を送信して、これによってUEの送受信機能が起動できればUE節電効果が大きくなる。

Rel-19ではgNBがLP-WUR(Low Power Wake-Up Receiver)を起動する信号(LP-WUS)を送信できるようにする。

LP-WURは無線リソース割当が行われない(アイドル又は非接続)状態では無線主装置を起動せず、UEを呼び出すページング信号の受信のみを継続する。その後、接続状態に移行後は無線主装置を起動してPDCCHでのリソース割り当て情報を取得し、PDSCHやPUSCHによるデータ送受信を行う。

LP-WUS & WUR



UEの簡易受信機はgNBからのLP-WUS信号で起動後、ページングCHにて自身へのデータ送受信があるかを判断し、送受信がある場合に限り無線主装置を起動する。

5. 5Gが拡げる新分野

(3) IoT: アンビエントIoT

電源を持たずバックスキッタ方式でIoTデータをアップリンク

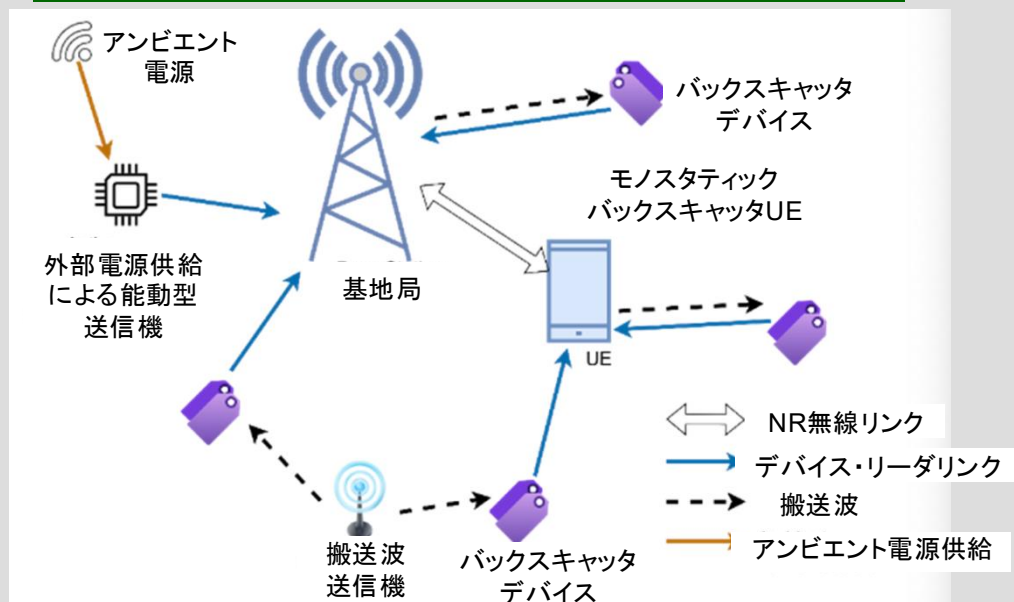
アンビエントIoTは電波、光、熱などの周囲環境エネルギー源からエネルギーを取り込んで電力を得るIoTデバイスである。

アンビエントIoTのうち受信電波のバックスキッタ(後方散乱)にてIoTデータをアップリンクする方式がRel-19で初めて定義された。
このバックスキッタ通信では受信電波の微弱なエネルギーでチップを起動後、反射波に情報を乗せる変調を行って送信する。

バックスキッタ方式の通信距離は極めて短いことから、5G NR網ではリーダー機能を備えた各種UEにて中継する構成や基地局(gNB)自身がリーダー機能を有する構成も想定されている。

アンビエントIoTはUHF RFIDの進化形とも言えるだろう。
ユニクロのセルフレジはUHF RFIDの一例であり、リーダー送信のUHF帯電波によって商品に装着されたRFIDタグを給電した後、商品ID等の情報を反射波に乗せ送信しリーダーが読み取っている。

アンビエントIoTネットワーク(3GPPサイトより)



アンビエントIoTではリーダー機能を備えたUEを中継ノードとしてIoT情報を中継する構成もある。アンビエント(ambient)は英語で「周囲の」意味。

5. 5Gが拓ける新分野

(4) NTN: Starlink衛星ダイレクト通信

NTN (Non-Terrestrial Network: 非地上系通信網)

衛星にはSCS向けにeNodeB機能やISL機能を搭載

SpaceX社はスマホ等との衛星経由通信であるSCS(Supplemental Coverage from Space)機能を搭載したStarlink v2-Mini-D2C* 衛星840基を高度525kmや340kmなどの軌道に配置すべく、2024年から打ち上げを開始している。

*) D2C: Direct to Cell, SCSの別名

SCS用の無線周波数は各国MNOが4G(LTE)方式の地上携帯網に使用中の帯域のうち上下リンクに各5MHz幅を使用する。

日本では2GHz帯のMNO割当内周波数を使用するなどの条件で認可され、2025年4月よりKDDIの4G網を利用するiPhone等のスマホからの通信がショートメッセージ通信を皮切りに地上網の圏外エリアにて可能になった。

1衛星のSCSサービスリンクカバレッジには最大256個のビームが収容され、各ビームの直径は約50kmと地上携帯網のセル直径に比較して約10倍も大きい。

衛星内にはLTE方式の基地局(eNode-B)相当機器を搭載した再生中継機能に加え、光通信方式の衛星間リンク(ISL)も搭載する。

第2世代Starlink衛星のSCS関係諸元概要

項目	衛星高度(km)
衛星高度	525km, 340kmなど
サービスリンク周波数	上り: 1920-1980MHz内の最大5MHz幅 下り: 2110-2170MHz内の最大5MHz幅
サービスリンクビーム径	直径50km程度
サービスリンクビーム数	最大256
アンテナ利得(衛星局)	最大38dBi
アンテナ利得(UE)	0dBi (EIRP: 23dBm)
中継方式	再生中継(衛星内にeNodeB機能搭載) 光ISL (Inter-Satellite Link) 搭載

【カバレッジイメージ】



総務省衛星通信システム委員会作業班資料 29-3-2などを元に作成

eNodeB機能による再生中継やISL機能を搭載することにより、通信品質向上や携帯電話端末によるアクセスを可能にするとともに、地上基地局設置数を削減できる。

5. 5Gが拡げる新分野

(5) NTN: Starlink SCSのリンクバジェット

4GのUE規格で相当大きなリンクマージンが得られる

Starlink 第2世代衛星のSCSでは4G(LTE)方式を使用する。
電話や中低速データの場合、周波数軸上では15kHzのOFDM(A)キャリア12個で構成する180kHz幅の1リソースブロックを使用するようである。

Starlink衛星の周回軌道が高度525kmの場合、条件が厳しい上りリンク(UE送信、衛星受信)でのリンクバジェットを概算すると下表になり、衛星への直接見通しの場合は20dB以上のC/Nが得られる。

(高度340kmを周回する場合には更に大きなC/Nとなる。)

そこでFEC付きQPSK変調方式等では十分大きなリンクマージンで通信できる。

衛星には基地局(eNodeB)機能と衛星間中継(ISL)機能があり、共に再生中継を行うのでベントパイプ型通信のようなリンクの多段接続による雑音加算がないのに加え、地上でのGW局設置が少なく済む。

Starlink衛星 SCSチャネルのアップリンク リンクバジェット試算

項目	単位	数値	備考
周波数	MHz	2000	
UE EIRP ①	W (dBW)	0.2 (-7)	200mW, アンテナ利得0dBi
伝搬距離	km	525/600	高度525km周回衛星の場合
伝搬損失 ②	dB	152.8/154	
衛星受信アンテナ利得 ③	dBi	38/34	ビーム中心/ビーム端
受信雑音温度 ④	K (dBK)	500 (27)	
受信雑音帯域幅 ⑤	kHz (dBHz)	180 (52.6)	
ホルツマン定数 ⑥		-228.6	
C/N = ① - ② + ③ - ④ - ⑤ - ⑥	dB	27 - 22	

上記はUEと衛星間の伝搬路には樹木や建物等の障害物のない直接見通し(LOS:Line Of Sight)の条件においては十分なリンクマージンがある。

5. 5Gが拓げる新分野

(6) NTN: 3GPPでの検討課題

遅延時間の増加やセルの移動などの影響への考慮が必要

3GPPでは現在の地上網LTEの通信方式をベースに、衛星回線特性を考慮したNTNでの次のような機能追加や変更を検討している。

- ・物理層 多重化方式: OFDM/OFDMA多重化とRUベースのリソース割り当て
物理チャネル: 放送、RA、制御、データ伝送用の各チャネル
同期信号と参照信号(RS) (但し、RSの多くは省略又は簡略化)
- ・MAC層/リンク層
リソース割当要求からリソース割当までの手順
RS受信測定結果の返送を通じた変調方式・符号化率の適用制御
HARQによるパケット再送制御、ハンドオーバー処理 など

衛星回線では大きな遅延時間によるコマンドに対するレスポンス遅れ等を考慮した受信ウィンドウ拡大や手順変更が必要となる。特に、LEOでは衛星の移動に伴う衛星内セル間や衛星間のハンドオーバー手順が重要課題である。

3GPPでのNTN仕様の検討

3GPP Technical Report 38.811 Table 8.4.2-1 を元に作成

NTNの特徴	効果	影響のある仕様
衛星/端末の移動	セルの移動	ハンドオーバー/ページング
	遅延時間変動	TA
高度: 大	ドップラー	ダウンリンクでの初期同期
	遅延時間: 大	HARQ
セルサイズ: 大	遅延時間の変動	物理層手順 (ACM, TPC)
	送信機の非直線性	MAC/RLC手順
衛星中継器の特性	位相雑音	ランダムアクセス応答でのTA
		PAPR
		PT-RS

TA: Timing Advance ACM: Adaptive Code & Modulation PAPR: Peak to Average Power Ratio
HARQ: Hybrid ARQ TPC: Transmit Power Control PT-RS: Phase Tracking RS

NTNの物理層やMAC層ではLTE方式とは異なる手順や特性が必要となる。

5. 5Gが拡げる新分野

(7) NTN: 無線チャネルの構成

第4世代の地上網の無線方式であるLTEに準拠

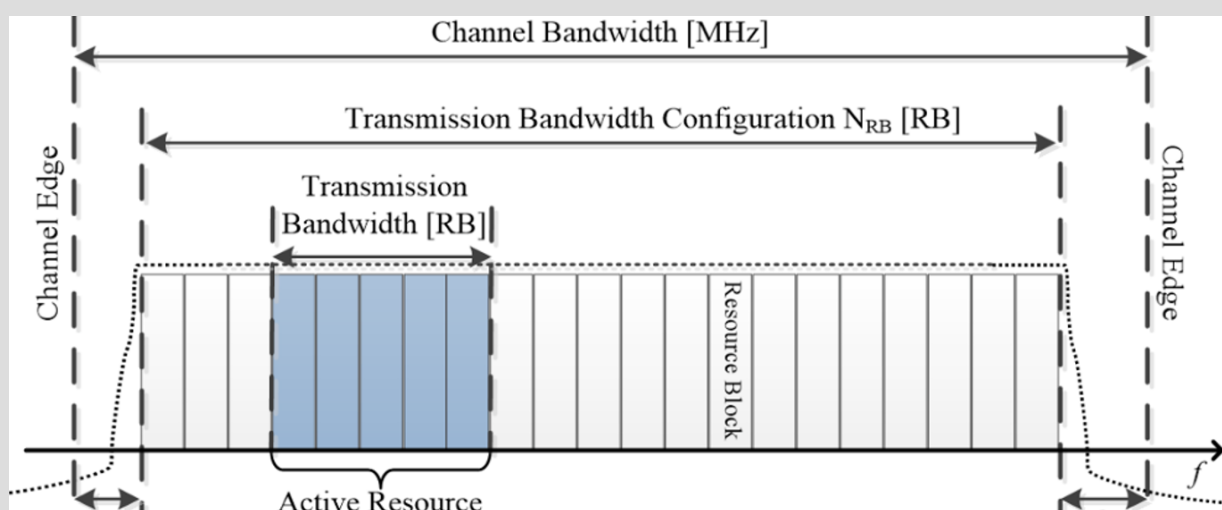
3GPP NTNでの無線チャネル方式は地上携帯網のLTEをベースに衛星送信/UE受信の下リリンクはOFDM、UE送信/衛星受信の上リリンクにはOFDMAの信号多重化と多重アクセス方式を規定している。

上下リンクでのチャネル帯域幅は5, 10, 15, 20MHzの4つ、サブキャリア間隔 (SCS)は15kHz, 30kHz, 60kHzの3種類を定義している。

リソース割り当て単位である1RB (Resource Block)は、SCSの間隔で並ぶ合計12のOFDM (A)搬送波で構成される。帯域幅5～20MHzの無線チャネルにおける最大リソースブロック数 N_{RB} は次になる。

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106
30	11	24	38	51
60	N/A	11	18	24

OFDMチャネルの帯域



3GPP Technical Report 38.811 Table 8.4.2-1 より

例えば、15kHzのSCSでは1個のRBの帯域幅は180kHz (15x12)であり、チャネル帯域幅が5MHzの場合、周波数軸上では最大25個のRBによる伝送帯域幅は4.5MHzとなる。

5. 5Gが拡げる新分野

(8) NTN: システム情報

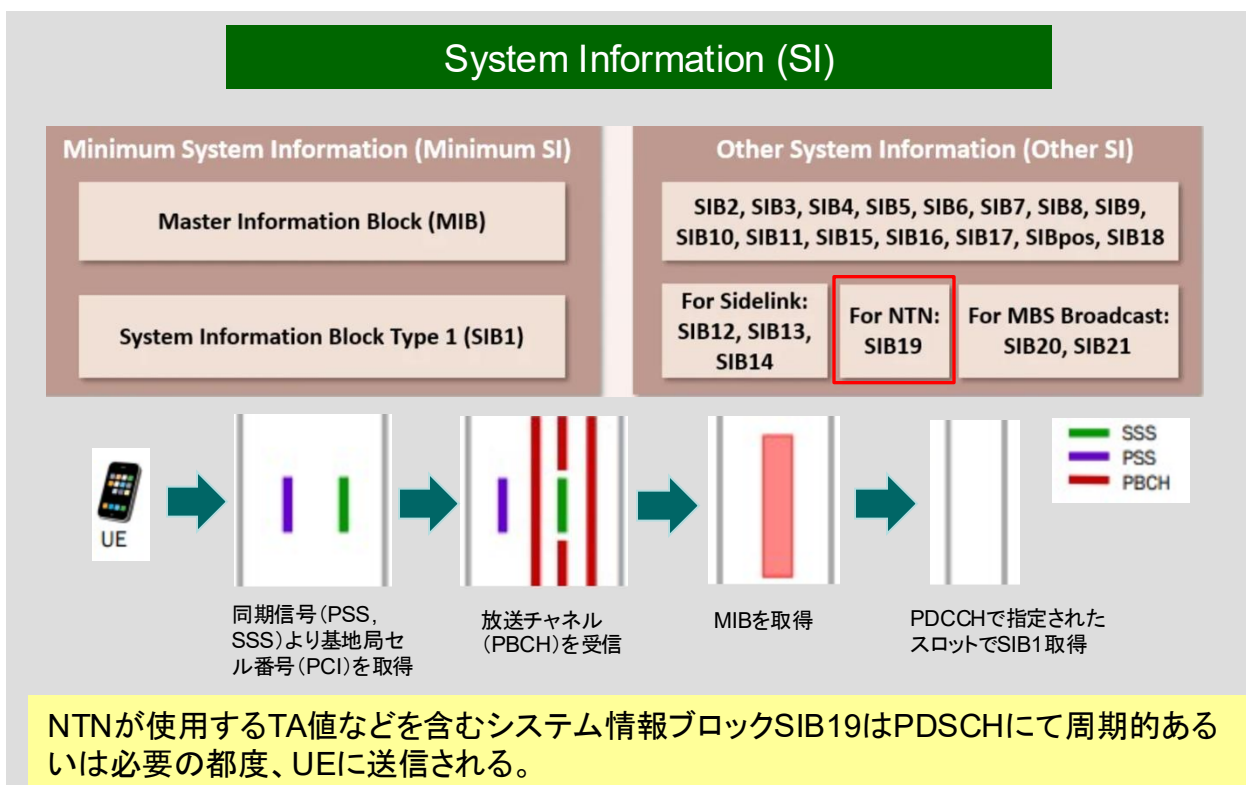
NTN向けにSIB19を定義

NTNのUEの初期アクセス時には地上網同様に下りリンクで放送されるシステム情報を取得する。このシステム情報には、Minimum SIとOther SIがある。(SI: System Information)

Minimum SIには使用するチャネル帯域幅などの基本的なシステム情報を含んだMIB(Master Information Block)とSIB1(System Information Block-1)があり、基地局送信の報知チャネル(BCH)にて固定周期で常時放送されている。

一方、現時点でSIB2からSIB21までが定義済みのOther SIは下りユーザデータチャネルDLSCHにて周期的に放送されるか、あるいは必要な都度DLSCHでのRRC CONNECTEDモードを介してUEに送信される。その場合、DLSCH内のRU(Resource Unit)位置はPDCCHにて指定される。

NTNが使用するTA(Timing Advance)値などはOther SIの19番目ブロック(SIB19)にて報知される。(なお、車両向けサイドリンク用にSIB12,13,14、MBS放送用にSIB20,21が確保されている。)



5. 5Gが拡げる新分野

(9) NTN: UE送信タイミングの制御

TA (Timing Advance) 値など

NTNでは伝搬遅延対策のためUE送信タイミングを次の数値で規定している。

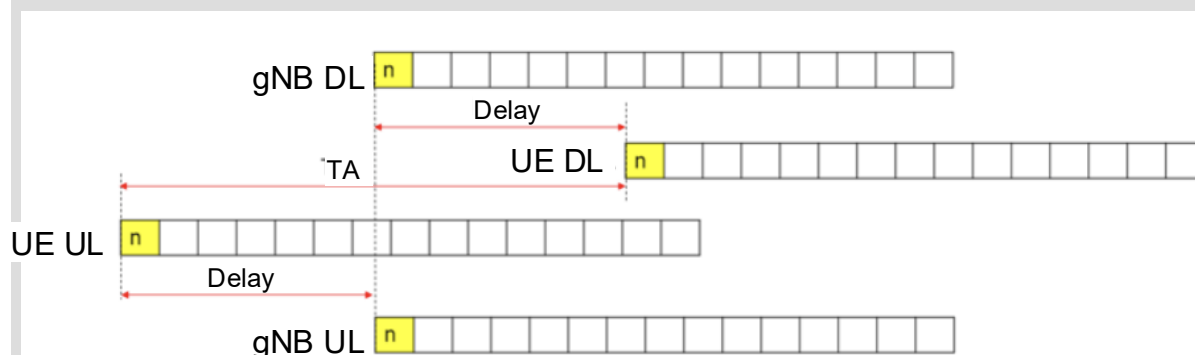
■ 共通TA (Timing Advance)

下りリンク(DL)ではgNB送信信号がDelay時間後にUEにて受信される。
上りリンク(UL)ではUE送信信号が同じDelay時間後にgNBに届くので、
UEはDelayの2倍であるTAだけ前のタイミングでUL送信することによりgNB
ではUEへの送信フレームとUEからの受信フレームタイミングが一致する。

共通TAはgNBでの送受信フレームタイミングを合わせるため全UEに共通に適用するオフセットである。この共通TAに加え、Delay値がUEのセル内位置などによって異なることを考慮した2種類の補正值(K offset, K mac)を合わせて使用することが考えられている。

なお、3GPP NTNでは全UEは全てGNSSのサポートを前提としており、NTNセル接続前にGNSSによる自身の位置情報を取得する。

TA (Timing Advance)による送信タイミングの補正



3GPP TS38.300 より

UE-基地局間の大きな伝搬時間差を考慮して、UE送信タイミングをTA値だけ前倒しすることでUEに対する基地局での送受信信号タイミングを揃える。

5. 5Gが拓げる新分野

(10) NTN: HARQ機能の一部変更

伝搬遅延時間の増大を考慮してHARQプロセス数を増加

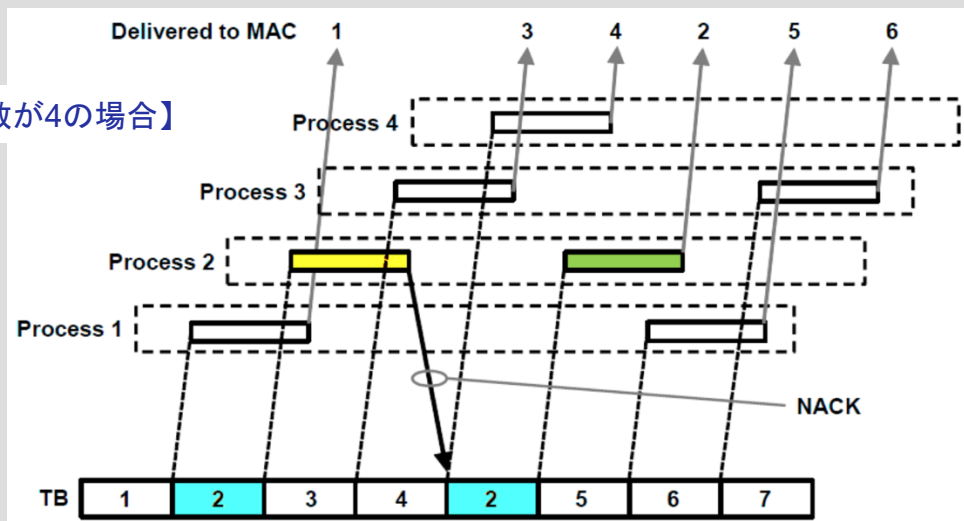
5G NRではデータの誤り訂正にFECとARQを組合せたHARQ(Hybrid ARQ)を使用している。HARQではFECによる誤り訂正が失敗の場合、受信側はそのデータを保存しておき、送信側は送るべきデータの一部のみを再送する。その後、受信側は保存データと再送された一部データを組合せてデータ訂正を試みる。更にデータ訂正に失敗すると送信側はデータの別の一部を送り、データが正しく訂正されるまで当該プロセスを繰り返す。HARQでは送信データの各スロットに対するプロセスが同時並行して行われる。

地上網のNR仕様での最大HARQプロセス数16を遅延時間の大きい衛星網に用いるとプロセス数制限のため連続送信可能なデータ数に限界が生じる。そこで、NTNでは次の対応を行うこととした。

- 1) 最大HARQプロセス数を16から32に増加する、あるいは、
 - 2) 正常データ受信復号の正否を通知するARQ返送機能を無効化する。
- このARQ返送機能無効化はHARQプロセスごとに設定可能であるので重要通信の場合はこれを有効にできる。

HARQプロセスの並行処理

【プロセス数が4の場合】



出典) <https://devopedia.org/5g-nr-hybrid-arq>

HARQプロセス数の制限のため、遅延時間が長いと送信側では送信データの待ち合わせが生じ、伝送速度が制限される。

海洋等でのIoTセンサ情報収集に効果的

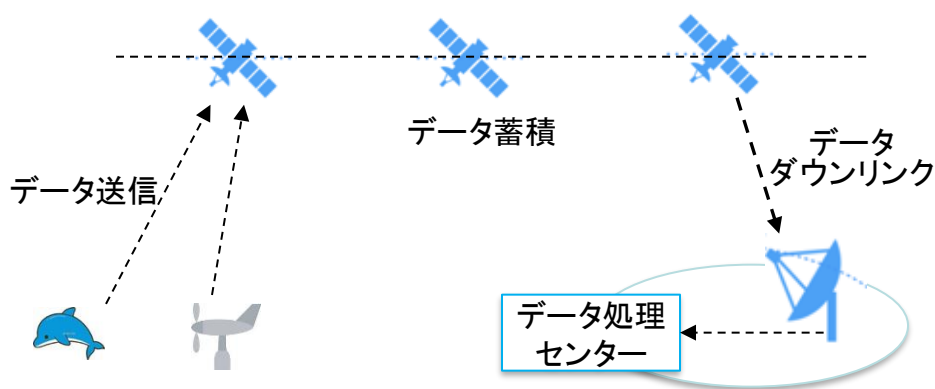
IoT向けNTNでは地球上の広大なサービスエリアを少数の衛星でカバーすることが重要である一方、リアルタイム伝送の必要性はそれほど高くない。とりわけ、海洋上ではリアルタイム受信できるハブ局の設置が困難な場合が多い。

そこで、LEO衛星による気象や地球環境等の観測ではUE送信のIoTデータを中継器内で復号後に一時記憶し、ハブ局サービスエリアに入った時点で当該データを一挙にダウンリンクするストアアンドフォワード(S&F)方式のデータ収集衛星が利用されている。

例えば、アルゴスシステムでは高度約800kmの極軌道衛星が受信したデータは仏、米国の地球局にダウンリンク後、データ処理センターにて処理される。海洋生物等に装着の送信機は401MHz帯にて数百ビット程度のデータを送信する。アルゴスシステムの一部を担うNOAA衛星は可視光及び赤外の気象データをリアルタイム送信するモードと衛星内に蓄積後ダウンリンクするモードがある。

3GPPではRel-18以降でS&Fシステムでの各種要件を検討している。

ストアアンドフォワード方式のIoT



気象等の地球環境や生物など地球上に広く分布する各種IoTセンサからの情報収集に適している。

5. 5Gが拡げる新分野

(12) NTN: GEO衛星でのNB-IoT

地上網のNB-IoT方式を踏襲

3GPPでは地上網NB-IoT方式のNTNへの適用を検討しており、インマルサット衛星等のGEO衛星へのUE送受リンクでは次の諸元等が議論されている。

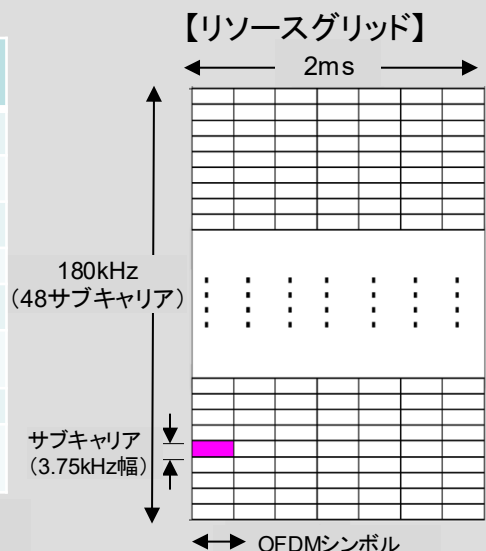
- ・信号多重方式: UL: SC-FDMA DL: OFDM
- ・サブキャリア周波数間隔: UL: 3.75kHz DL: 15kHz
- ・フレーム時間: 10 ms
- ・(7 OFDMシンボルの)タイムスロット長: UL: 2ms DL: 0.5ms
- ・上り物理層チャネル信号: NPRACH, NPUSCH,
- ・下り物理層チャネル信号: NPBCH, NPDCCH, NPDSCH
- ・上りNPUSCHの一次変調方式: QPSK, $\pi/2$ シフトBPSK

上りデータチャネル(NPUSCH)では3.75kHzサブキャリア1波(1トーン)のほか3, 6トーンのチャネルも可能。一方、NPRACHでは1トーンのみ。
下りリンクでは、連続する15kHzサブキャリア12波の固定ブロックを全UEが共通受信して基地局でのリソース割当は時間単位でのみで行うこととしている。

GEO衛星でのNB-IoT UE送信回線 リンクバジェット試算

項目	単位	衛星直下、 ビーム中心	ビーム端
周波数	MHz	2000	
UE EIRP ①	dBW	-7	
自由空間伝搬損失 ②	dB	154	155.4
追加損失 ③	dB	8	
衛星アンテナG/T ④	dB/K	-18	-21
ボルツマン定数 ⑤	dB/Hz	-228.6	
キャリア帯域幅 ⑥	kHz	3.75 (= 35.7dBHz)	
C/N (= ① - ② - ③ + ④ - ⑤ - ⑥)	dB	6	3

3GPP 資料等を元に作成



狭帯域キャリアを使用することでGEO衛星経由でのIoTデータ送信が可能に

5. 5Gが拓ける新分野

(13) V2X: Vehicle to Everything

V(車)の通信相手(X)にはV(車), I(路側機), P(人), N(網)がある

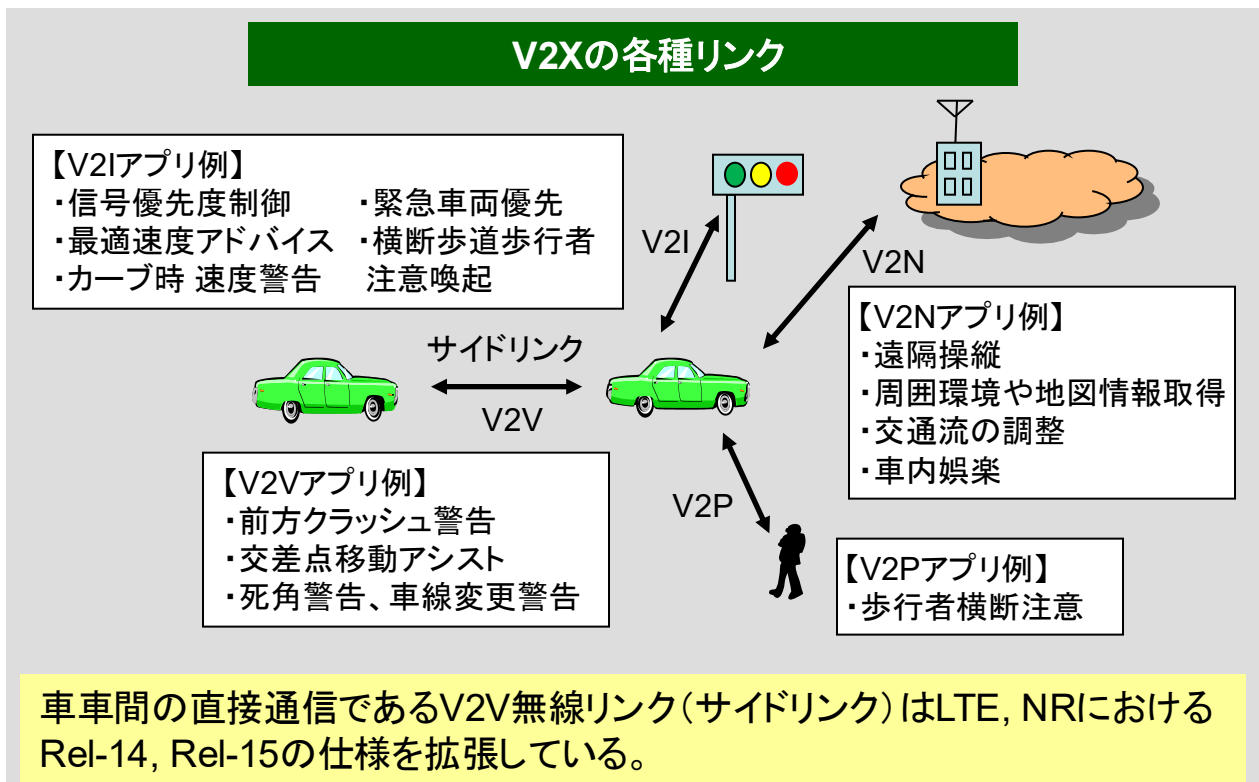
5G NRでは自動車(V)向け無線通信であるV2Xの仕様制定が重要である。ここでのXには車を意味するV、路側機のI、歩行者のP、網を意味するNがある。携帯電話網を利用するC-V2Xではこのうち基地局との通信V2Nと車車間通信のV2Vが特に重要である。なお、V2Vの無線リンクはサイドリンクと呼称される。

Rel-17では、次のようなサイドリンクの機能拡張が主に行われた。

- ・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の低減
- ・サイドリンク用の新周波数帯を特定
- ・車載UE間の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た。

なお、世界各国ではC-V2X向けに5.9GHz帯の割当が進行中であり、我が国でも2026年度中にC-V2Xへの5.9GHz帯 割当が行われる見込みである。



5. 5Gが拡げる新分野

(14) V2X: 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

5. 5Gが拓げる新分野

(15) V2X: サイドリンク(V2V)

セルラ網外でも車両間のマルチホップリレーが可能に

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。

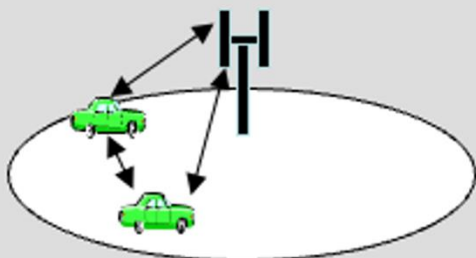
また、DRXなどによるUE消費電力削減やリレー機能によるカバレッジ改善が行われた。

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。

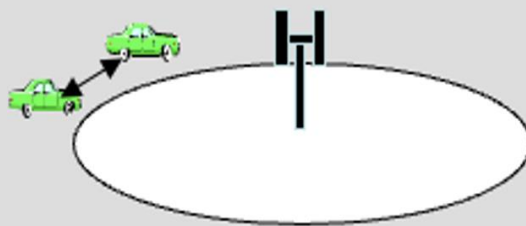
- ・アンライセンス帯域の利用: サブ6GHz
- ・キャリアアグリゲーション(CA)の利用: アンライセンス帯域とのCAも含む
- ・サイドリンクリレー機能の拡充: セルラエリア外にいる通報者から車両間サイドリンクのマルチホップで警察や消防署に連絡するなど

サイドリンク適用領域の拡大

セルラ網外では車両自身がサイドリンク用リソース割当を行う機能を仕様化



A) セルラ網内でのモード1



B) セルラ網外でのモード2

Rel-18では (アンライセンス帯域を含む) キャリアアグリゲーション適用等によるサイドリンク伝送速度の向上や、車両前方視界映像の後続車両への伝送による自動運転機能向上等のサイドリンク適用領域拡大を図っている。

5. 5Gが拡げる新分野

(16) AI: 基地局ビーム管理や負荷最適化など

ビーム管理や基地局カバレッジ/負荷容量の最適化などに応用

Rel-19ではRel-18から引き続いてAI/ML適用によるビーム管理、位置情報取得（ポジショニング）、CSIフィードバック効率化などを検討している。

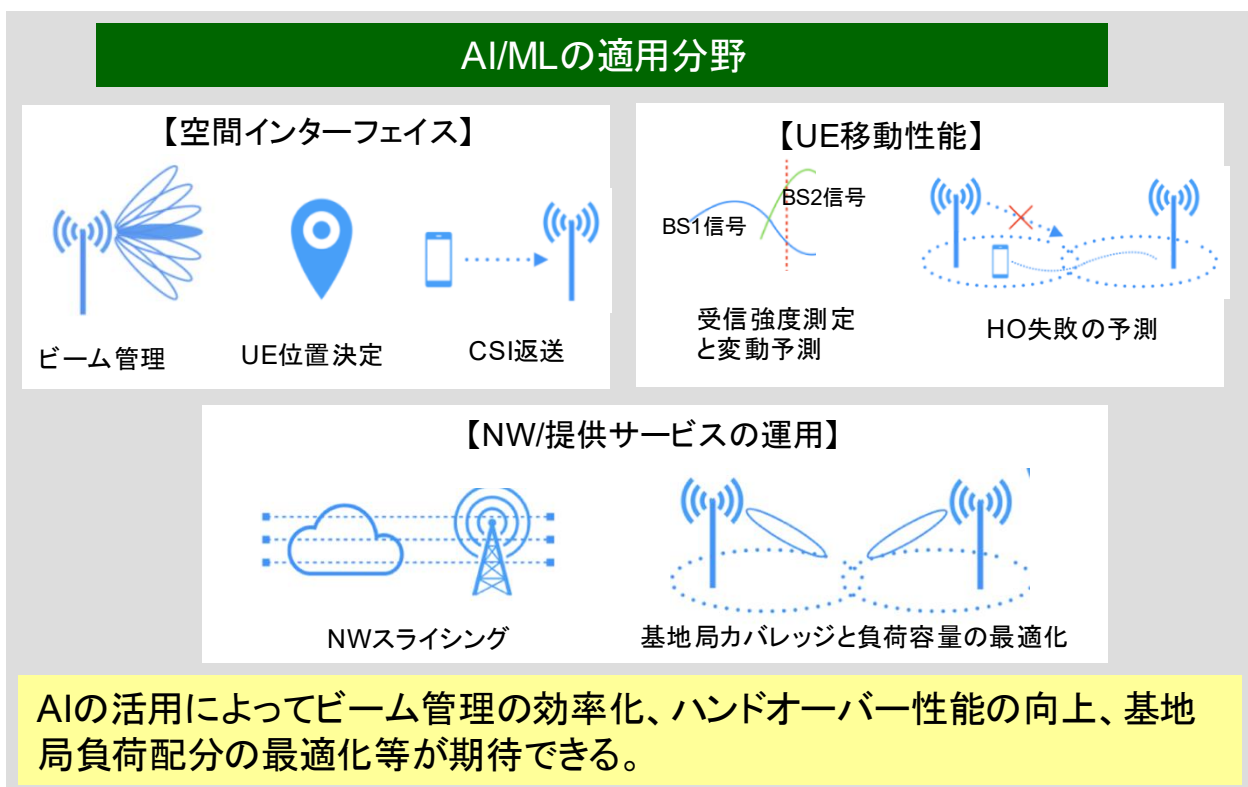
ビーム管理やポジショニングでは、UE側あるいはNW側の一方のみにAI機能を搭載する場合のシグナリング等の仕様である。

CSIフィードバック関係では、空間・周波数領域でのCSI返送情報圧縮、およびUE側での時間領域のCSI予測がある。

UE移動時のハンドオーバー（HO）関係では、HO元およびHO先基地局との伝搬特性変動の先行予測によって最適時点でHOする手順などがある。

更に、次のような課題解決のためAI/MLを適用した最適化が検討されている。

- ・NWスライシングでのリソース割り当て
- ・隣接セル間でのカバレッジやリソース割り当て（容量分担）の調整



5. 5Gが拡げる新分野

(17) AI: AI-RANアライアンス

Softbank, Ericsson等はAI-RANアライアンスを設立

2024年2月にソフトバンク等はAI活用によって既存インフラやサービスの改善を目指すAI-RANアライアンスを設立した。

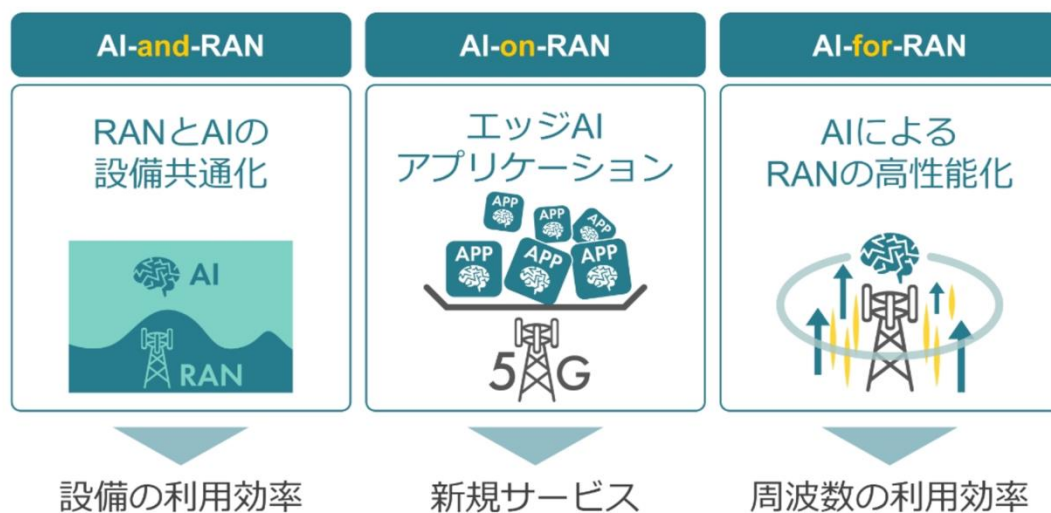
創設メンバーは通信事業者のソフトバンク、T-Mobile、ベンダーのノキア、エリクソン、マイクロソフト、サムソン、AWS(Amazon Web Services), ARM, NVIDIA等、大学では米国ノースイスタン大学や東京大学である。

AI-RANアライアンスは次の3テーマに関する研究開発を行うとしている。

- ・AI and RAN: AIとRANの処理を統合して装置の利用効率を向上
- ・AI for RAN: AIの活用によりRANの周波数利用効率や性能を向上
- ・AI on RAN: 基地局装置へのAI搭載でユーザに新規サービスを提供

なお、ソフトバンクは2024年秋に慶大SFCと共同で20基の基地局アンテナと100台のUEにて4.8-4.9GHz帯TDD方式でのAI-RAN実証実験を慶大湘南藤沢キャンパス内で実施している。

AI-RANアライアンスの重点検討領域



ソフトバンクプレスリリースより <https://www.softbank.jp/corp/technology/research/story-event/041/>

基地局のAI機能活用で設備や周波数利用効率化に加え新規サービス創出も図られる。

5. 5Gが拡げる新分野

(18) AI: 自律運用網(AN)

ITU, 3GPP等はAI活用による通信設備運用の自律自動化を検討中

高度化複雑化が進む通信設備において運用管理の生産性向上を高めるとともに、高品質で多様な通信サービスを顧客に提供するため、通信業界全体が協力して運用モデル再考が必要がある。その際にはLLM/GenAIを活用した自律運用網(AN: Autonomous Network)の構築が鍵になる。

LLM(Large Language Model): 大規模言語モデル, GenAI: 生成(Generative) AI

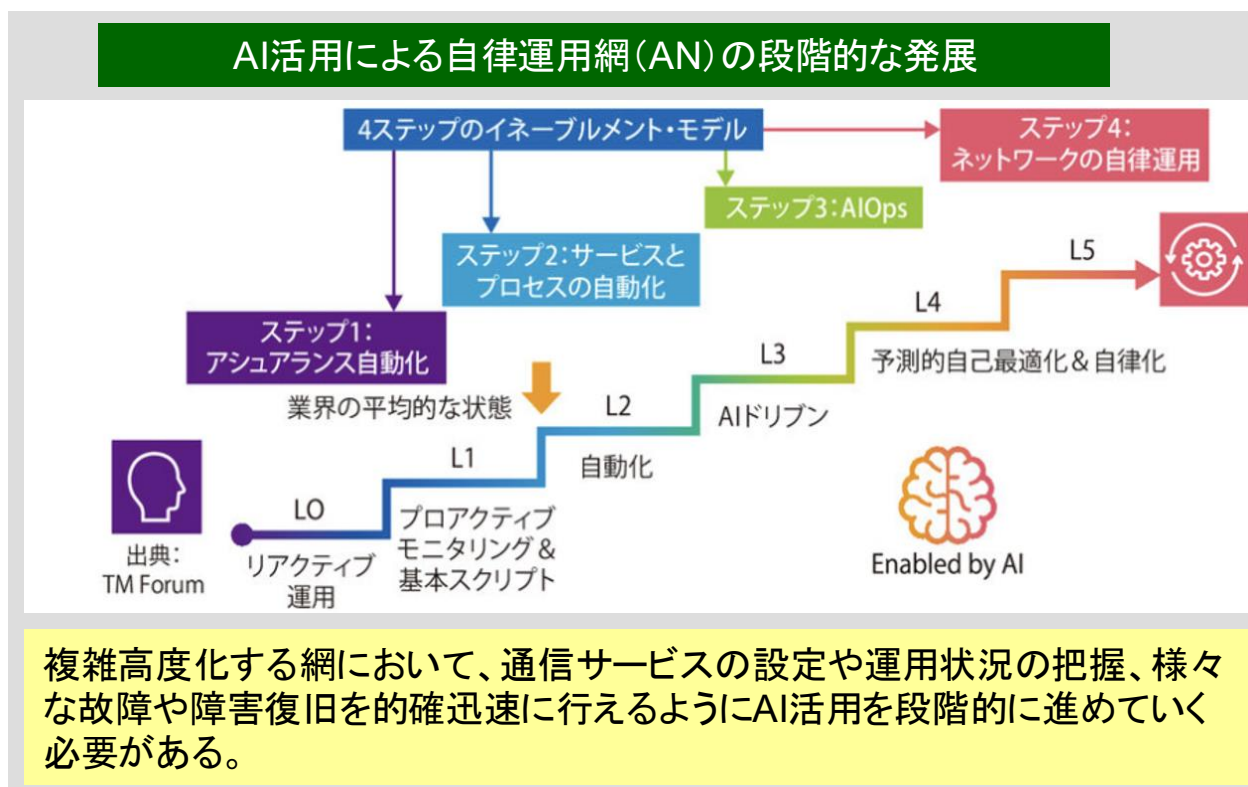
ITUや3GPP等の標準化団体は連携してAN実現の取り組みを行なっている。

そこではANの達成レベル(L1からL5の5段階)をサービス対象(個人, 家庭, 企業)とネットワーク種別(RAN, コア網, 固定アクセス, 伝送路, IP網,,)や運用項目(計画, 構築, 故障対応, 品質最適化,,)毎に判定するとしている。

ここで、L0: 手動, L1: 一部支援, L2: 部分的自動化, L3: 条件付き自律網,

L4: 高度な自律網, L5: 完全自律網

現在、殆どの事業者はL2～3の段階にあり、2026年～28年にL4を目指している。



回転子を用いた行列表現

N個のサブキャリアを合成したOFDM時間軸信号を複素表現すると次のようになる。ここで、 X_k は第kサブキャリアの変調シンボルである。

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

$t = n \times (T/N)$, $n=0 \sim (N-1)$ の標本点では次のIDFTで表される。

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk/N}$$

回転子
↓

一方、その逆変換であるDFTは周波数軸上の $n=0 \sim (N-1)$ の標本点にて右式で表される。

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi nk/N}$$

回転子
↓

離散フーリエ変換(DFT)と逆変換(IDFT)

時間波形 $x(t)$ → フーリエ変換 周波数波形 $X(f)$
← フーリエ逆変換

【DFT】

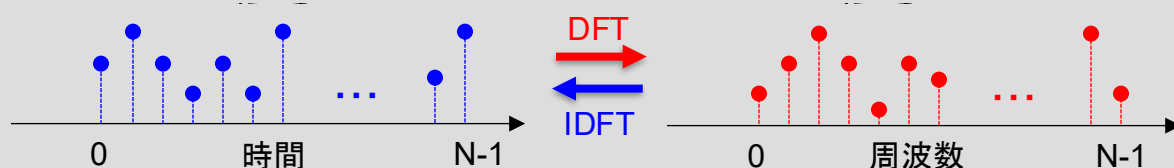
$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j2\pi nk/N}$$

回転子
↓

【IDFT】

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk/N}$$

回転子
↓



離散点でのフーリエ変換であるDFT(時間領域⇒周波数領域)とIDFT(周波数領域⇒時間領域)は回転子の符号を逆にすることで同様の計算になる。

送信IDFT行列と受信DFT行列の積は単位行列のN倍に

1Hz間隔の4周波数に変調信号 x がOFDM多重され、IDFTで時間軸上信号 X に変換される例を考える。この時、回転子($N=4, T=1$)は $W = e^{j2\pi/4} = j$ となる。

$$X_n = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^3 x_k (j)^{nk} \quad n=0,1,2,3$$

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & j & -1 & -j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

上式を行列表現であらわすと右になる。

一方、DFTでは、回転子 $W = e^{-j2\pi/4} = -j$ となる。

$$x_n = \sum_{k=0}^3 X_k (-j)^{nk} \quad n=0,1,2,3$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & j & -1 & -j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -j & -1 & j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix}$$

上式を行列表現であらわすと右になる。

IDFTとDFTの例

上にて、送信ベクトル x からIDFTによる時間軸上ベクトル X への変換を行列 T との積で表すと

$$X = 1/4 \cdot T x$$

また、受信側での時間軸上ベクトル x から周波数軸上ベクトル X への変換を行列 R との積で表すと

$$x = R X \quad \text{この時、}$$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & j & -1 & -j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -j & -1 & j \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -j & -1 & j \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & j & -1 & -j \end{pmatrix} \quad \text{より} \quad R T = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

T と R は、ランク数(N)を無視すれば互いに逆行列の関係にある。

MIMO構成の表現

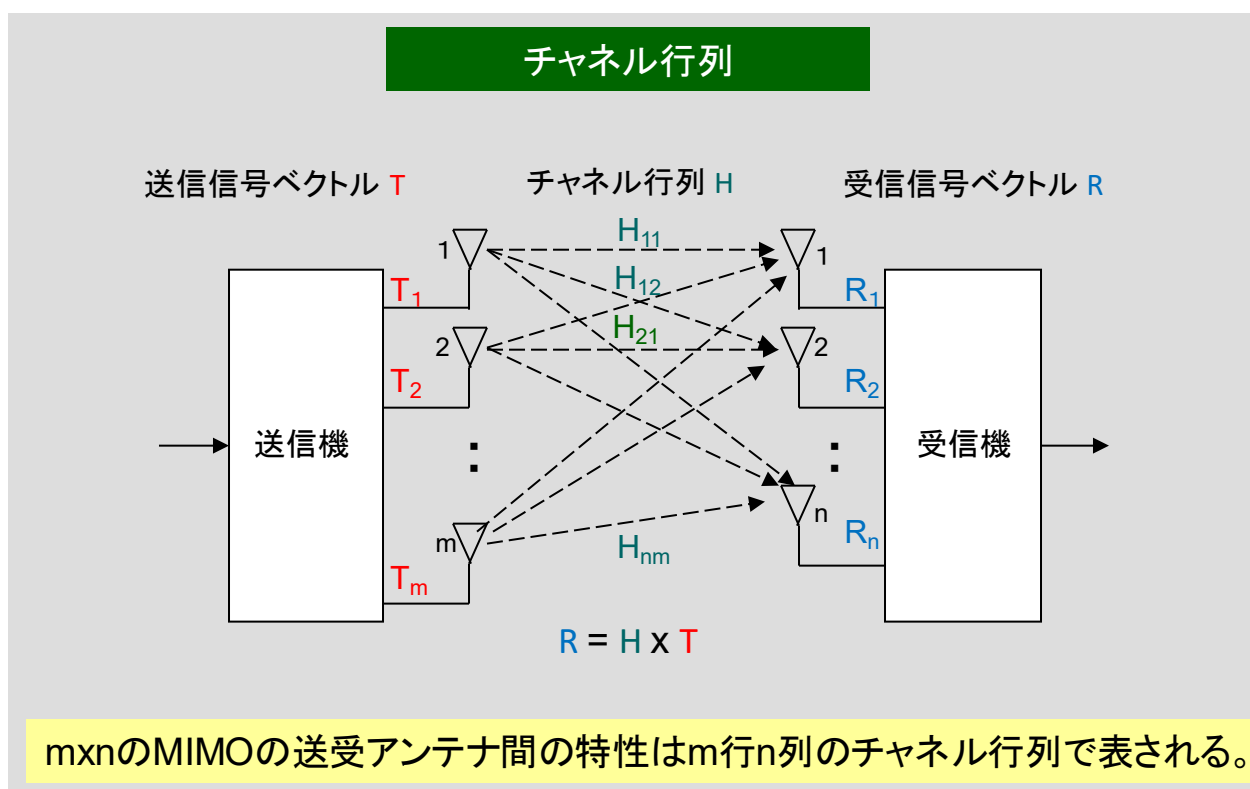
無線では複数の送信アンテナからの信号が混じり合って受信され、伝搬路の状態も絶えず変動するため単純ではない。しかし、複数アンテナ間での伝送状態を考慮した適切な信号処理を双方の局で行うことにより通信容量が増加できる。

送信 m 個、受信 n 個のアンテナで構成されるMIMOでは、送受の信号ストリームをそれぞれ m , n 個の成分をもつベクトル T , R 、MIMO伝送路を n 行 m 列の行列 H で表すと次になる。

$$R = H \times T$$

通信容量の最大化や安定した通信を行うため次の操作を行う。

- ・両局にて H の各成分を知るために、送信の各アンテナから常時送信中の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 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 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。

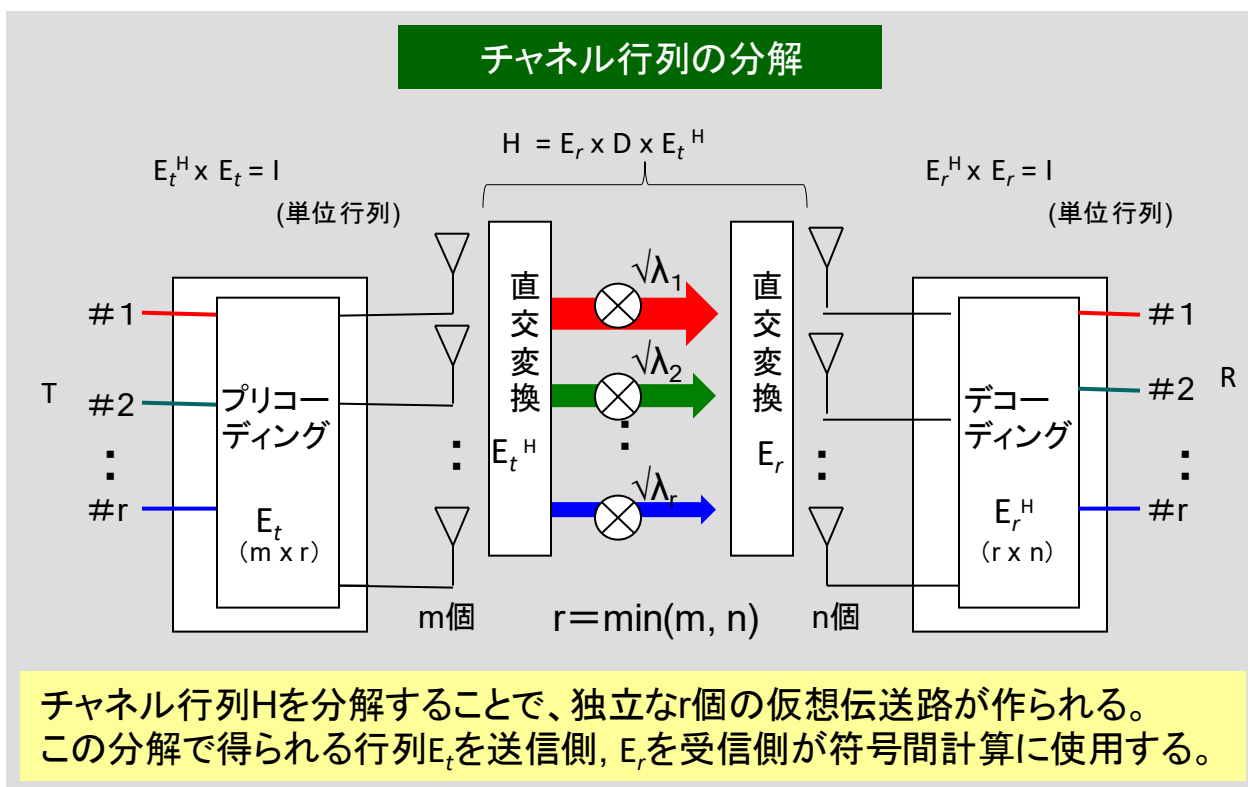
行列の添字 H は共役転置を意味し、 $E_t^H \times E_t = E_r^H \times E_r = I$ (単位行列)となる。また、 D の対角成分は特異値と称する $\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_r}$ で表す。

$$H = \begin{matrix} & E_r & \times & D & \times & E_t^H \\ (n \times m) & (n \times r) & & (r \times r) & & (r \times m) \end{matrix}$$

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 $\sqrt{\lambda_i}$ を乗じたものになる。

$$R = E_r^H H E_t T = E_r^H E_r D E_t^H E_t T = I D T = D T$$



Aの特異値は $A \times A^H$ の行列固有値の平方根

n 行 m 列 ($m \geq n$) の行列 A と、その随伴行列 A^H との積 AA^H は m 行 m 列の正方行列となり、その固有値は全て非負となる。この時、行列 AA^H の固有値の平方根を特異値と呼ぶ。随伴行列 A^H とは、行列 A の転置共役によって得られる行列であり、 A の i 行 j 列の成分と A^H の j 行 i 列の成分とは複素共役になっている。

例えば、

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1-j \\ 1+j & j \end{bmatrix} \text{ では } A^H = \begin{bmatrix} 1 & 1-j \\ -1+j & -j \end{bmatrix}$$

A はユニタリ行列 U, V 即ち $U^H U = U U^H = V^H V = V V^H = I$ (単位行列) を用いて次のように表わせる。ここで、 Σ_1 は対角行列(対角成分以外は全て0)

$$A = U \times \Sigma \times V^H$$

($n \times m$) ($n \times n$) ($n \times m$) ($m \times m$)

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$\Sigma_1 = \text{diag}[\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r]$
 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$

特異値分解の例

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

【ケース1】

$$H = U \Lambda V^H = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^H$$

2x2MIMOにて、TX2 → RX2 が他の3つのパスと逆相になる場合、2個の特異値は等しくなり、独立した2個のストリームが等品質で伝送できる。

$$H = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\theta} \\ e^{-j\theta} & 1 \end{bmatrix}$$

$$H = U \Lambda V^H = U \begin{bmatrix} \sqrt{2(1+\cos\theta)} & 0 \\ 0 & \sqrt{2(1-\cos\theta)} \end{bmatrix} V^H$$

2x2の近距離MIMOでは互いに斜めのパスでは θ の位相遅延が生じるが、損失差は(殆ど)ない。2個の特異値は θ により変動する一方、その2乗(固有値)の和は θ によらず一定である。

“はじめてのMIMO入門”, RFジャーナルNo.34, p.51-52より

MIMOチャネル行列 H は送信、受信側に対応するユニタリ行列 V, U を用いて特異値分解できる。

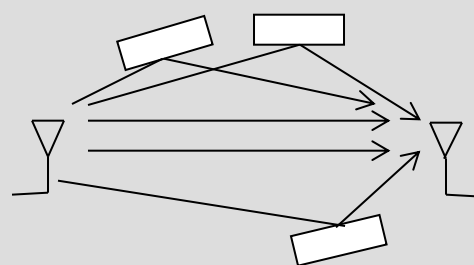
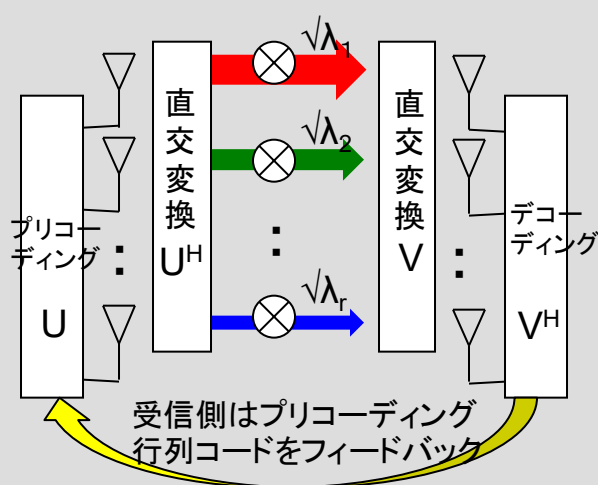
LTEでのMIMO適用方法

特異値 $\sqrt{\lambda_k}$ は、いわば各レイヤーの利得であり、回線の太さ(通信容量)に対応する。これが大きいレイヤーは、受信S/Nが高く64QAMで送っても雑音に打ち勝って受信できる。他方、特異値が小さいレイヤーでは低いS/NになるのでQPSKでも受信できないこともある。

前述したように送信側でのプリコーディングのためにUEは、基地局の複数アンテナから送信されているRS信号の受信強度情報を基地局に報告することになるが、電波環境、即ちチャネル行列値が絶えず変動することを考えると、その伝送量や処理遅延を減らす必要もある。

そこで、LTEでは、予め少数の代表的プリコーディング行列を定めておき、UEは、受信品質が最も高くなると予想されるその行列コードを返送するようにしている。また、基地局では受信環境に応じてレイヤー数(行列ランク数)を増減するランクアダプテーションを行っている。

チャネル行列情報の転送



建物等の反射などによって多くの独立のパスがあるとMIMOには有利。

特異値の大きいレイヤーは高いS/Nが得られるが、逆に小さいとS/Nが低いため、このレイヤーをなくす(ランク数を減らす)のがいい。

ストリーム間の通信品質差が減少

マッシュMIMOでは、基地局アンテナの素子数を200x20というような数にまで高めている。その際、アンテナ面を複数に分割して、同一建物の複数場所に設置したり、あるいは、複数の建物に設置する方式もある。

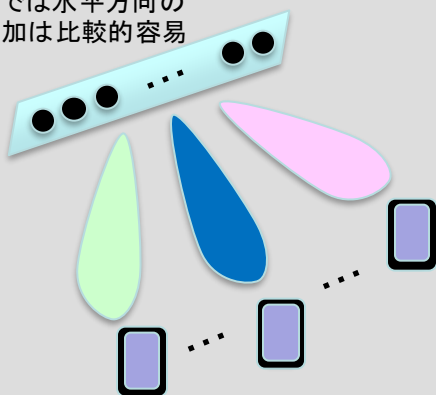
アンテナ素子数を20x20 → 50x20 → 200x20 のように増加していくと、MU-MIMOを適用して最大20ユーザに同時伝送する場合、基地局アンテナ数の増加につれ受信品質が改善していくと同時に、ユーザ間での受信品質のばらつきが次第に少なくなり、全ユーザに一定値以上の通信品質が確保できるようになる。

下図(文献1からの引用)は、20x20と200x20のMIMOアンテナのチャネル行列 H を複素ガウス乱数で1万通り生成させた場合の HH^H の最大固有値($\lambda_{\max}$)と最小固有値($\lambda_{\min}$)の累積確率分布を示している。

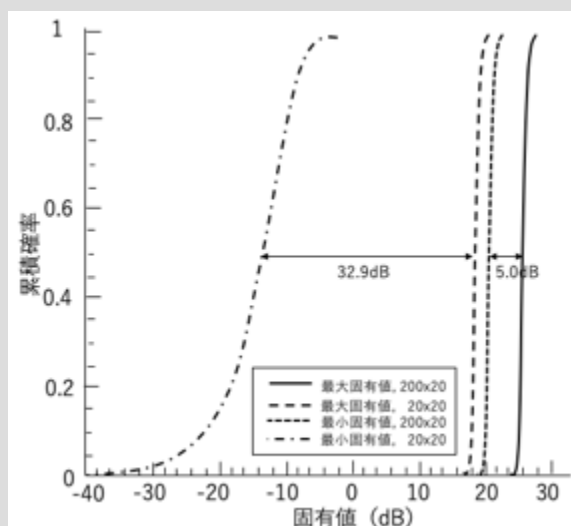
これを中央値で評価すると、20x20では約33dBの開きがあるのに対し、200x20では約5dBの差に留まり、ストリーム間の通信品質差が大きく減少している。

MIMOアンテナ素子増加による効果

基地局では水平方向の素子増加は比較的容易



右図: 文献1: “ HH^H の固有値分布”, 大鐘ほか、電子通信学会誌 Vol.101, No.11, 2018 より



基地局アンテナの素子増加していくに従い、MU-MIMO適用時のUE間の通信品質差を少なくすることができる。



【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。2023年の会社解散後も個人事業主として衛星通信やモバイル通信関係の調査や技術支援を行なっている。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）