

主なLPWA方式の概要



2019年 12月
A2A研究所 田代 務

目次

1 LPWAとは

- (1) IoT/M2Mの需要
- (2) IoT/M2M向け通信方式
- (3) 伝送速度と伝送距離
- (4) LPWA各種方式の比較
- (5) ARIB規格T-108

2 LoRaWAN

- (1) LoRa WANのレイヤー
- (2) LoRa WANのネットワーク構成
- (3) 端末のクラス
- (4) LoRa変調
- (5) 受信感度とSF (Spreading Factor)
- (6) ADR (Adaptive Data Rate)
- (7) クラスAの信号シーケンス
- (8) 信号フレーム構成
- (9) メッセージタイプ
- (10) MACコマンド
- (11) 端末アドレスと2つの鍵
- (12) セキュリティ機能
- (13) クラスB端末
- (14) クラスBでの送受信の例
- (15) クラスC端末

3 NB-IoT

- (1) IoT向けLTE方式
- (2) NB-IoTの主要技術
- (3) 3つの周波数運用モード
- (4) NB-IoTの無線方式
- (5) マルチトーンSC-FDMA

- (6) FDDフレーム構成
- (7) リソースグリッド
- (8) NB-IoTの物理チャネルと信号
- (9) NPUSCHでのリソースユニット
- (10) 同期信号の配置
- (11) 非同期ランダムアクセス(PNRACH)
- (12) 上りメッセージ送信シーケンス
- (13) 動作モード

4 他の方式

- (1) Sigfox: Sigfox Network Operator
- (2) Sigfox: 無線方式の諸元
- (3) Sigfox: 信号シーケンス
- (4) Sigfox: 多重アクセス方式
- (5) Sigfox: フレーム構成
- (6) Sigfox: セキュリティ構成
- (7) ELTRES: 無線方式の諸元
- (8) ELTRES: 変調方式
- (9) ELTRES: フレーム構成とセキュリティ
- (10) ZETA
- (11) Weightless-P



1. LPWAとは

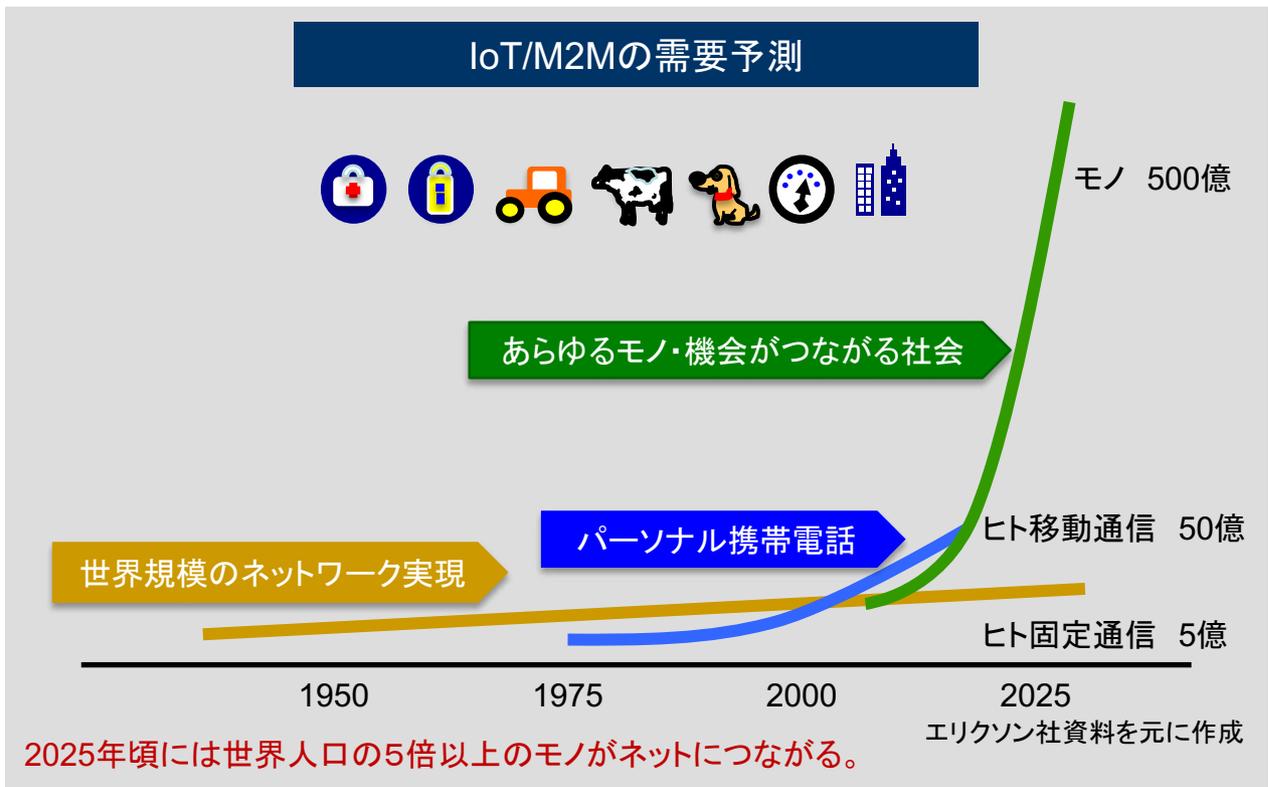
(1) IoT/M2Mの需要

2025年には世界で500億のモノがネットにつながる

機械やモノをネットに接続することによって、遠方からその監視や制御を行ったり、更には機械やモノ同士の協調動作をも可能にする通信がIoT/M2Mである。ここで、IoTはInternet of Things, M2MはMachine to Machineの略。IoT/M2Mによって、生産やビジネス活動の効率化、都市機能の高度化、更には、安全安心といった人々のくらしの質向上が期待できる。

IoT/M2M市場規模は、ネットワークにつながる端末やデバイスの数で表される。通信が始まった前世紀には、固定地点の人が使う電話機や電信機がそれであった。その後、1990年代からはモバイル端末が多数を占めるようになり、現在、世界全体のモバイル端末数は数十億に達したことから、飽和状態に近づいている。

一方、IoT/M2Mの市場は拡大途上にあり、ネットワークにつながる機械やモノの数は今後急速に増加し、2025年には世界全体で500億個に達すると予測されている。





1. LPWAとは

(2) IoT/M2M向け通信方式

利用目的別に複数方式が使い分けられる

IoT/M2M向けの通信ネットワークは、大きく分けると3つがある。

このうち、数十mまでの最も近距離で多く使用されるのがWi-FiやBluetoothに代表されるLAN(Local Area Network)である。

次に、モバイル通信事業者がライセンス帯域を用いて、IoT/M2Mを含む広域データサービスを展開しているCellular WANがある。

これらのLANやCellular WANは主に、人との通信向けに開発された技術であるため、IoT/M2Mには必ずしも適していなかった。

そこで近年、各種センサーからの低速データを低消費電力かつ低コストで通信できるIoT/M2Mの通信専用開発されたものが、LoRaWANに代表されるLPWA(Low Power Wide Area)ネットワークである。

IoT/M2Mでは端末や利用形態が極めて多種多様であるため、これら3種の通信方式は使用目的に応じて使い分けられ、共存していくものと考えられる。

IoT/M2Mに利用可能なネットワーク技術

	LAN	LPWA	Cellular
端末・デバイス数シェア(注)	40%	45%	15%
強み	建物内通信として標準化し、広く普及	低消費電力 低コスト	既存インフラあり ライセンス帯使用で品質保証が楽 高速データも可能
弱み	電池寿命 広域展開コスト大	高速通信には不適 新興の技術標準	柔軟性 TCO
代表例	Wi-Fi, Bluetooth	LoRaWAN, NB-IoT	3G, LTE

(注) “Technical Overview of LoRa® and LoRaWAN™”, LoRa Alliance, Nov. 2015 より

LPWA(Low Power Wide Area)端末を、以下では端末あるいはデバイス(DE)と表記する。



1. LPWAとは

(3) 伝送速度と伝送距離

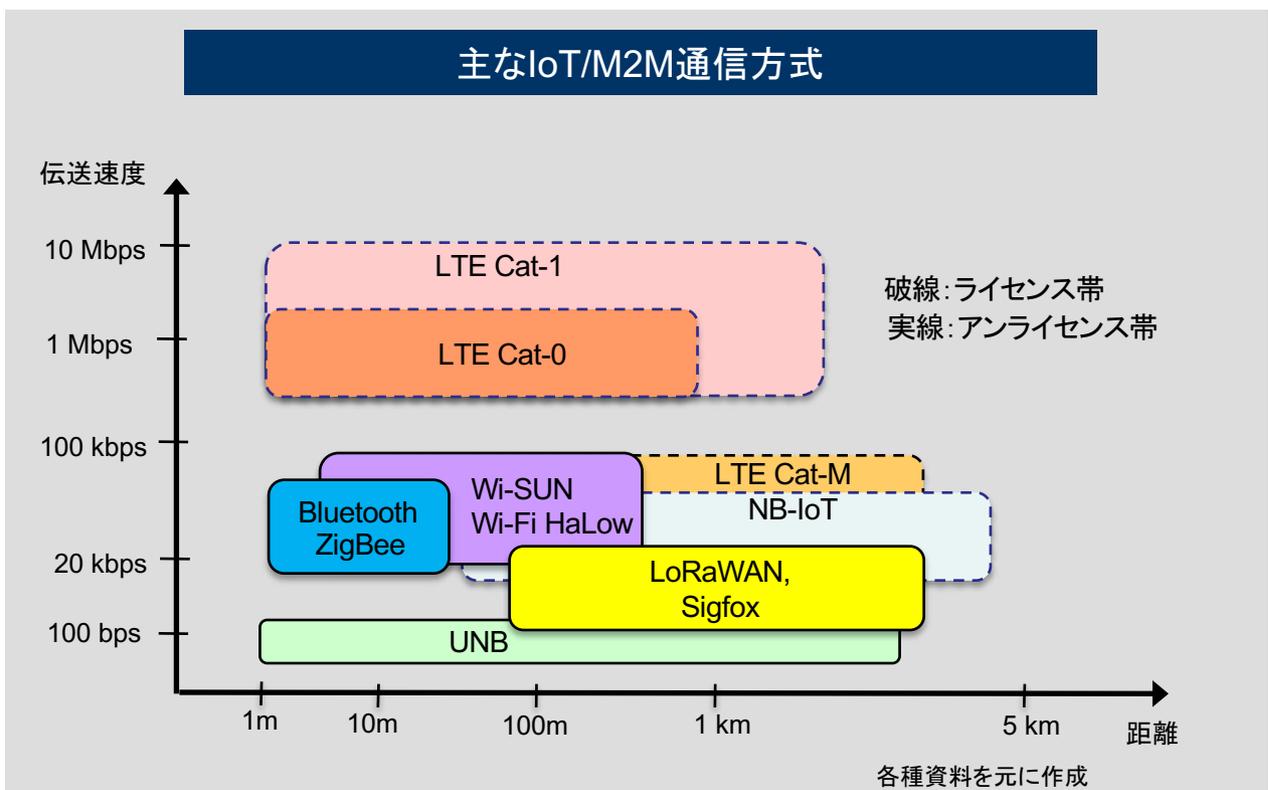
LPWAは低速データを低コストで長距離伝送

IoT/M2M向けの通信方式を伝送距離と伝送速度のグラフで示すと概ね下図のようになる。

通信事業者がライセンス帯を使用するLTE方式では、IoT/M2M向け方式としてカテゴリ1, 0, Mが仕様化され、低速化や、端末簡易化が行われてきた。更に2016年には、LTEとの親和性よりも、低消費電力と通信距離増加を重視したNB-IoTが規格化された。

アンライセンス帯を利用する方式のうち、Bluetooth, ZigBee, Wi-SUNは既に広く普及しているが、到達距離はたかだか数百mである。

これに対して、アンライセンス帯使用のLoRaWAN等では、250~50kbpsの低速データを市街地では数kmまで、ルーラル地域では最長十kmまで送信できる。また、1日に数回程度の通信頻度であれば、乾電池を用いて約5年間に渡って使用可能である。





1. LPWAとは

(4) LPWA各種方式の比較

LoRaWANとNB-IoTが2強

IoT/M2M向けのLPWAには数多くの方式がある。

このうちLoRaWANはLoRa変調の特許を有し、通信モジュールを販売する米国Semtech社など約5百社が参加するLoRa Allianceが定めたWAN規格である。

SigfoxもLoRaWAN同様、サブギガのアンライセンス帯域を使用して、欧州でのスマートメーター等への網の商用化では一歩先行したが、LoRaWANと異なり詳細仕様をオープンにしていない。Sigfoxのアップリンクでは、100bit/sの超低速でDBPSK変調を用いるため、高い受信感度を有している。

アンライセンス帯使用LPWA方式には、この他にEltres, ZETA等がある。

一方、大手モバイル事業者がライセンス帯域と基地局等の既存インフラを活用する方式にLTE Cat-1, Cat-M, NB-IoTがある。NB-IoTは、LTE Cat-1,0, MIに比較して低速度、低コスト、低消費電力であり、より広いエリアをカバーできる。

また、Cat-Mより狭い1.08MHz等の帯域幅を使用しカバレッジを拡大した方式はCat-M1又はeMTC(enhanced Machine Type Communication)とも呼称される。

主なLPWA方式の比較

	LoRaWAN	Sigfox	LTE Cat-1	LTE Cat-M*)	NB IoT
変調方式	SS チャープ	DBPSK(UL) /GFSK(DL)	OFDM(A)と QPSK,16QAM	同左	OFDM(A)と QPSK,8PSK等
帯域幅	125-500 KHz	100Hz	20MHz	1.4-20MHz	200kHz
端末送信電力	20 dBm	20dBm	23-46dBm	23/30dBm	20dBm
端末消費電力	低	低	高	中	低
周波数帯	アンライセンス	アンライセンス	ライセンス	ライセンス	ライセンス
主な推進者	Semtech, IBM, Cisco	SigFox	大手 通信事業者	同左	同左

*) 1.08MHz又は1.4MHz帯域幅を用い、省電力モードや間欠受信が可能な方式をCat-M1又はeMTCと呼称

英国HIS Markit社がLoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, LTE-M の世界市場を比較したLPWANレポートによると、2023年での全体(17億)のうち、LoRaWAN, NB-IoTは各7億強と両者でLPWAN世界市場全体の86%を占めると予測している。



1. LPWAとは

(5) ARIB規格 T-108

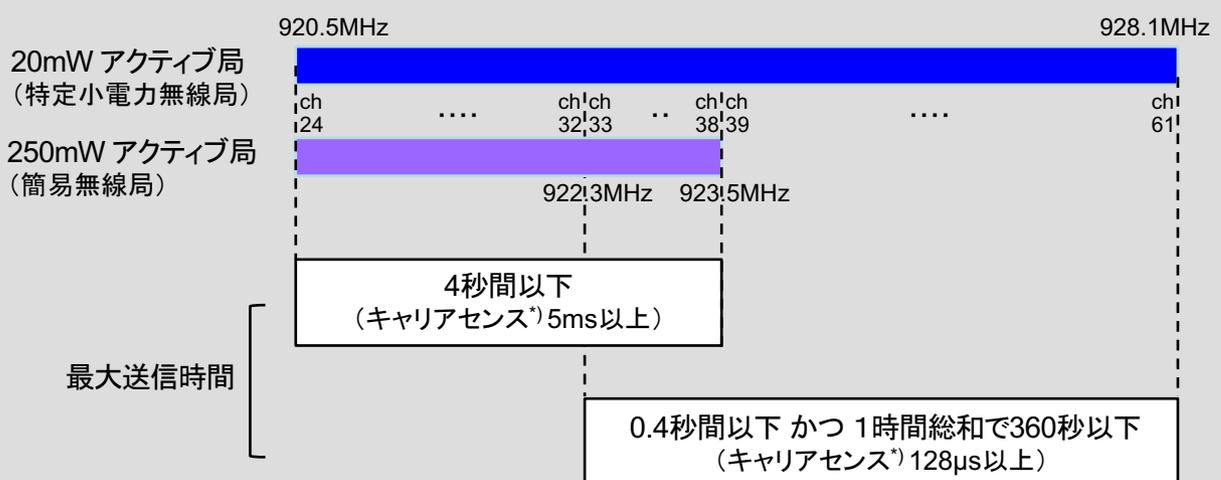
日本の920MHzアンライセンス帯域には独自の技術的条件がある

わが国の920MHz帯域では、自発的に電波発射するアクティブシステムや、リーダー等からの電波受信時にのみ電波発射するパッシブシステムが多数普及しており、最大出力では1mW, 20mW, 250mWの3種類がある。このうち20mW局は免許不要の特定小電力無線局として、電力スマートメーター等に利用されている。

そこで、これら多数の無線機器が互いに干渉なく、同じ帯域を共有できるように、送信出力や、1回あるいは1時間あたりの送信時間上限などについて日本独自の技術的条件を定めている。以下は20mW, 250mWアクティブ局に関する規格 (ARIB T-108)での主要諸元である。

- ・アンテナ利得: 3dBi以下
- ・送信出力: 20mW, または250mW以下
- ・単位チャンネル帯域幅: 200kHz
- ・同時使用チャンネル数: 1~5(ch番号による)
- ・キャリアセンス^{*}): 一定値以上の電波を検出したチャンネルでの電波発射の禁止
- ・送信時間制限: ch番号により最大4秒間, または1時間あたり合計360秒以下
後者では、同時使用チャンネル数により1送信あたり最大0.1~0.4秒間

920MHz帯の技術的条件 (ARIB STD T-108) より



1mW出力のアクティブ局と、ARIB STD T-106,107規定のパッシブ局に関しては記載を略す。

^{*}) 1時間あたりの総和送信時間が36秒以下の場合、キャリアセンスを不要とする新規格が近く制定される見込み。



2. LoRaWAN

(1) LoRaWANのレイヤー

物理層とMAC層のみ規定

LoRaWAN規格をレイヤーモデルで示すと下図のようになる。

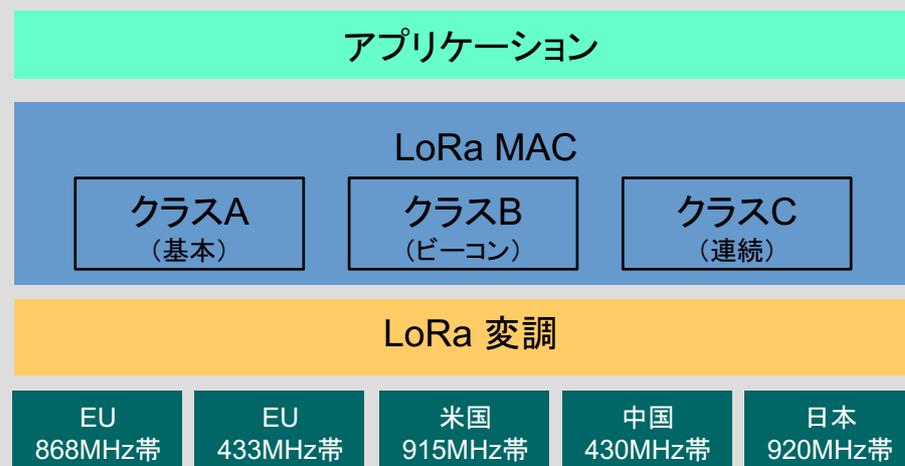
LoRa Allianceでは、PHY層とMAC層の機能を必須条件として定めるほか、複数事業者間のローミング機能、無線による端末ファームウェア更新機能などを推奨仕様として順次策定している。

LoRaWANでは1GHz以下(サブギガ)のアンライセンス帯域を使用するが、使用できる周波数、最大送信電力、最大送信時間(継続送信時間や送信間隔)等が国や地域によって異なるため、その規制に準拠する必要がある。

変調方式には、スペクトラム拡散されたベースバンド信号により、のこぎり波状に周波数を掃引するチャープ信号を変調するLoRa変調方式が使用される。

MAC層では、多数の端末をネットワークで共有するためのアクセス制御や、認証、秘匿性確保等を定めている。端末には、クラスA、B、Cという3種類があり、最も消費電力が低く、非同期でアップリンク主体の伝送を行うクラスAが基本である。

レイヤーモデルから見たLoRaWAN規格の位置づけ



端末からの非同期送信のクラスAが基本であり、NW側からの随時送信が可能なクラスBや高速通信が可能なクラスC端末もクラスAの機能具備が必要である。

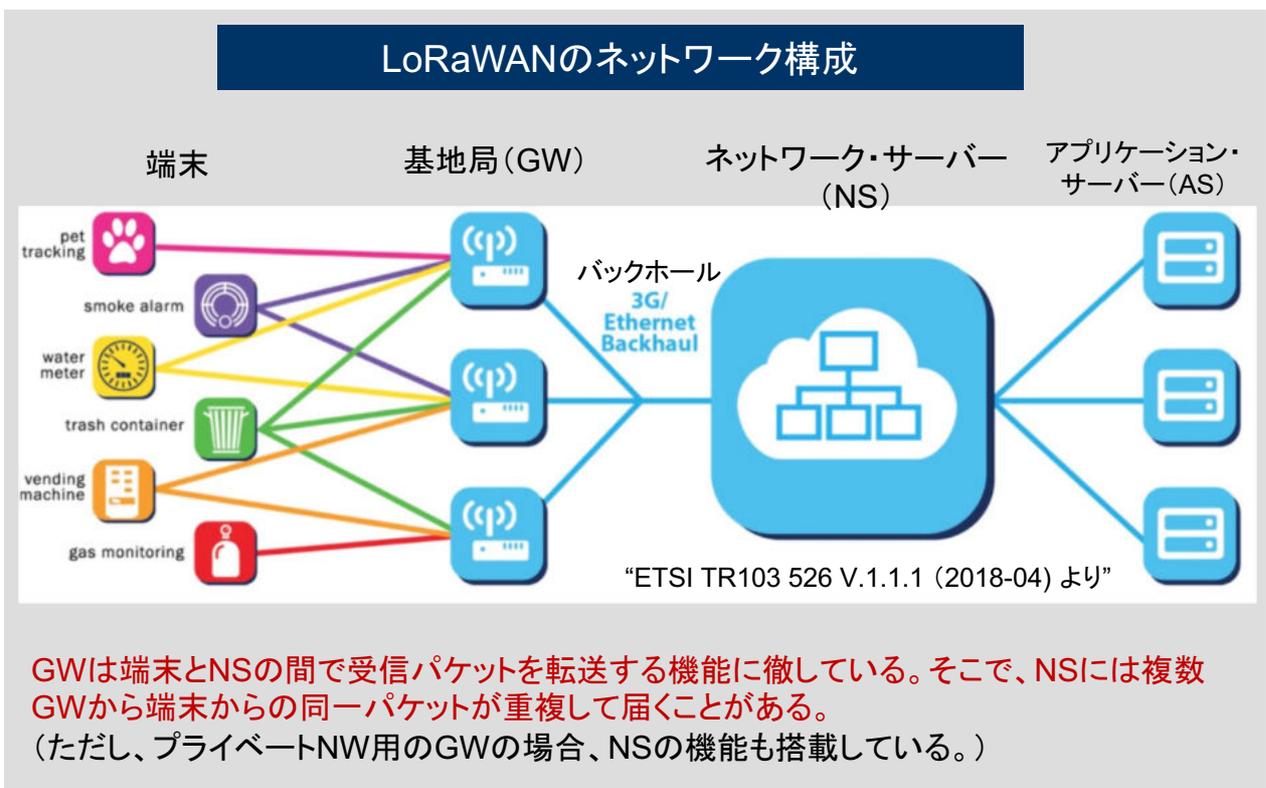
基地局にあたるゲートウェイはパケットの転送のみ

LoRaWANでの網構成は、各種センサー類の端末が基地局にあたるゲートウェイ(GW)を介して、網側にあるネットワークサーバー(NS)と3G/LTE無線回線やイーサネット等の回線(バックホール回線)で接続されている。

GWは、端末とNSの間でパケットを単に転送するブリッジ機能に徹している。ここでのデータ伝送の大半は、端末からの伝送(アップリンク)と想定しており、GWでは受信(復調)できたアップリンクパケットをそのまま網側に転送する。

そこでNSでは複数GWから同一パケットが届くことがある。一方、GWから端末へのダウンリンクパケットは、1つのGWからのみ端末に送信される。

LoRaWAN仕様は、他の無線方式に比較して単純であり、信号形成やプロトコルについて詳細な規定を設けていない。そうすることで、端末の簡単化に加え、多様な端末の利用環境や使用形態、更には、異なる各国の規制にも柔軟に対応できるようにしている。





2. LoRaWAN

(3) 端末のクラス

クラスA, B, Cの3つを規定

LoRaWANでは3種類の端末の利用を想定して仕様が作成された。このうち、クラスAは、電源供給が困難な場所などでの長期間利用を想定して、通信が必要な極く短時間のみ端末主導で稼働する、最も省電力な設計であり、クラスB,Cを含む全端末はクラスA仕様を満足する必要がある。

クラスAでは、端末が任意のタイミングでショートバースト信号をアップリンクするいわゆる純アロハ形式の非同期多重アクセス方式を用いている。一方、端末の受信はアップリンク直後のごく短時間のみに限定している。そこで、網側発信のダウンリンク通信がある場合は、当該アップリンク返答信号に乗せることになるため、それ迄の間、網側で待合せが生じることになる。

クラスBでは、GW送信のビーコンを用いて全てのGW・端末が網同期をとるとともに、各端末が受信ウインドウを開く時間をGWが正確に認識しておくことで、ダウンリンク情報がある時点で直ちにGWから発信できるようにしている。クラスCでは端末が常時受信できるので高速のダウンリンク通信が可能である。

端末クラス

クラス	機能	主な利用
A (基本)	端末主導によるアップリンク伝送 ダウンリンク伝送では大きな遅延を許容 クラスB, Cを含む全端末に必須	電池給電のセンサ (最小の電力消費)
B (ビーコン)	端末は周期的に送信されるビーコンを受信して同期をとることでGW主導のダウンリンク受信も可能	電池給電のセンサ
C (連続)	端末は、アップリンク時間を除き、常時、受信ウインドウを開くことで、低遅延で大容量のデータ受信も可能	外部電源に接続されたセンサ

クラスAは乾電池による給電により、極めて小容量のセンサデータを1日あたり数回程度の頻度で数年以上に渡って送信できることから、最も広く使用されている。

スペクトラム拡散とチャープ変調の組み合わせ

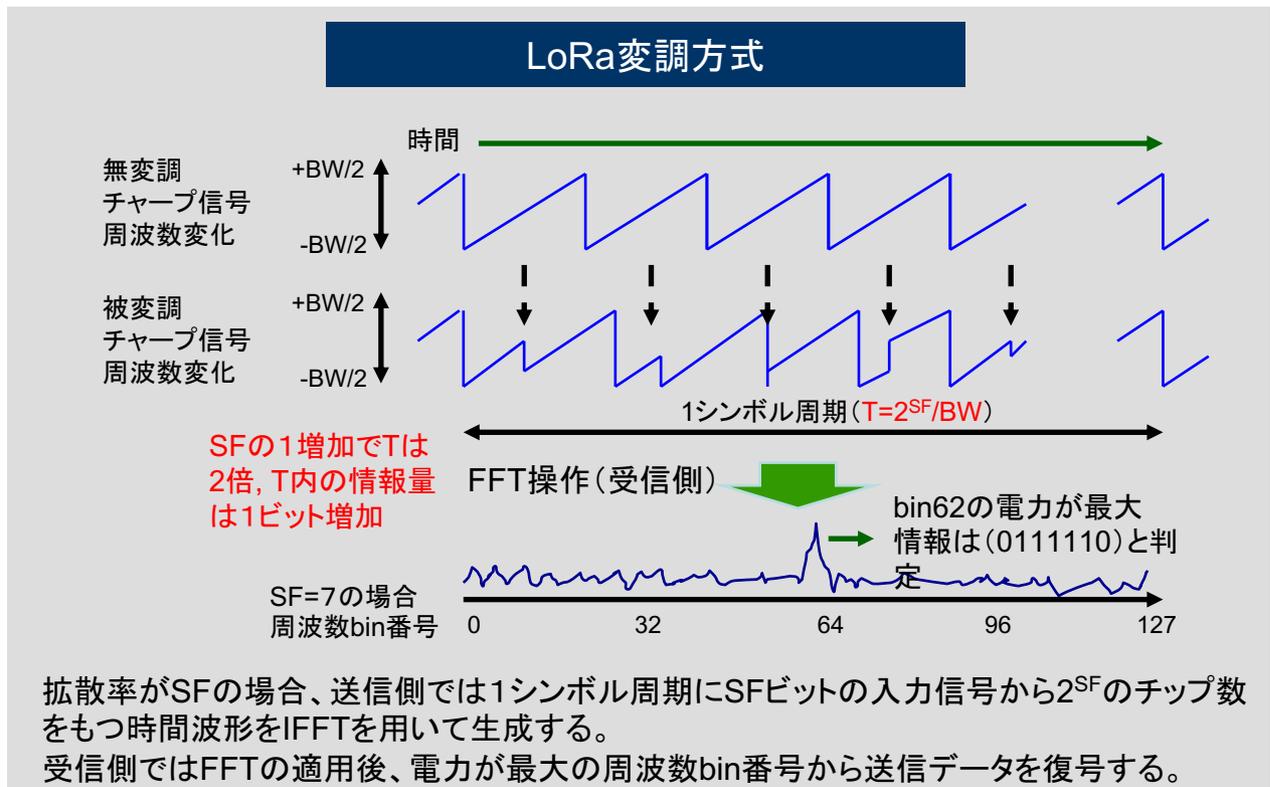
LoRa変調は、スペクトラム拡散とチャープ変調^(注)を組み合わせた方式であり、更に誤り訂正符号を用いることで、周波数安定度の低い発振器でも短時間に受信同期確立と復調が可能であり、雑音に強い優れた受信性能を実現している。

(注) チャープには「鳥のさえずり」の意味がある。受信機音声では、そのように聞こえるため。

LoRa変調の原形であるチャープ信号は1940年代にレーダー用に開発された技術であり、一定振幅の搬送波周波数を鋸波状に増加/減少させる。単調増加(又は減少)途中で周波数が跳躍するタイミングは低廉なFM受信機でも検出できる。

LoRa変調でのスペクトラム拡散にはFFT(高速フーリエ変換)を利用している。送信側では伝送信号の2進数が対応するFFT周波数スロット(bin)番号位置のみに電力を有する時間波形をIFFTにて生成する。一方、受信側ではFFT適用後に、最も高い電力を有するbin番号から送信データを復号する。

伝搬環境が悪い場合には、高い拡散係数(SF: Spreading Factor)を選択しシンボル時間を増加(伝送速度を低下)させることで受信感度を高めることができる。





2. LoRaWAN

(5) 受信感度とSF (Spreading Factor)

高いSFにしてデータ速度を落とし受信感度を高める

受信機の入力点にて、雑音に打ち勝って信号を復調できる限界レベルを受信感度と呼んでいる。

受信感度(S:単位dBm)は、周波数帯域幅(BW: 単位Hz), 受信機雑音指数(NF), 信号電力対雑音電力比(SNR)から次によりデシベル計算できる。

$$S = -174 + 10\text{Log BW} + \text{NF} + \text{SNR}$$

上式第1項は、ボルツマン定数(k: -228.6dBW/Hz)に室温(T: 300° K)を乗じた数値。

拡散係数(SF)を増加しデータ信号速度を低下させると、所要SNRを低下できるので、SFの増加にしたがって、受信感度(S)が下表のように改善する。

LoRaWANのGWでは、単一の125KHzチャネル使用の場合、SF6~SF12の7種類のSFを使用する合計7端末を同時受信できる設計としているものが多い。

SFと受信感度

	伝送速度 R (bit/s)	受信感度 S (dBm)
SF12	293	-137
SF11	537	-134.5
SF10	976	-132
SF 9	1757	-129
SF 8	3125	-126
SF 7	5468	-123
SF 6	9375	-118
FSK	1200	-122

SF(n)を使用した場合、伝送速度(R)は次式で求められる。
ここで、BWは帯域幅、FECは誤り訂正符号レートである。

$$R = \text{SF} \times \text{BW} \times \text{FEC} / 2^{\text{SF}}$$

左表のRは次の場合の数値である。
BW=125k, FEC=4/5

SFの1ステップ増加は、Rがほぼ半分となり、受信感度が約3dB改善することに相当する。

“AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics, Semtech” より

伝送品質に応じて、データ速度を加減

LoRaWAN方式の特徴の一つにADRがある。

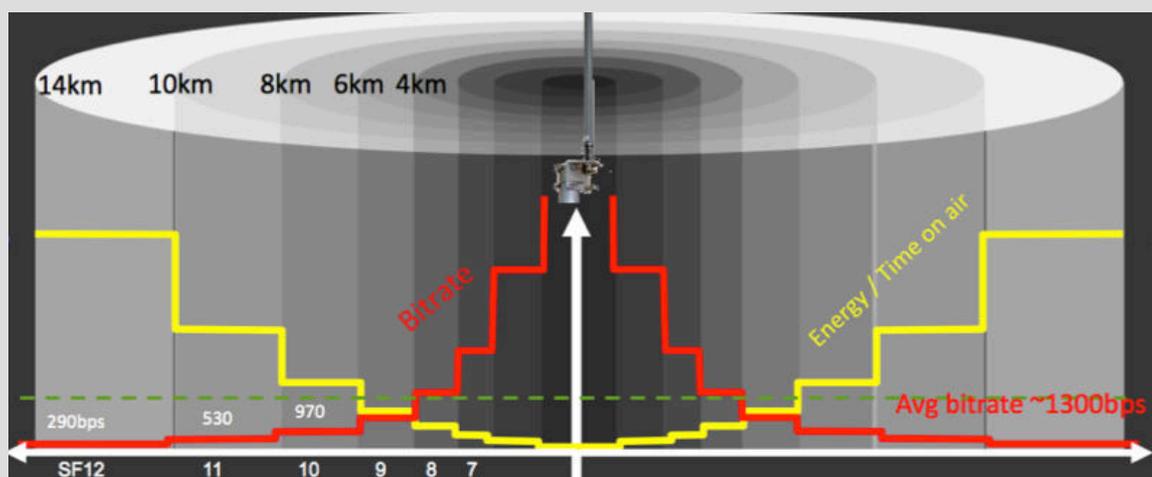
GWからの距離が近い端末の場合、伝搬路での信号レベル減衰が小さいので、低い拡散係数(SF)を持つ拡散信号を用いることでデータ伝送速度を高めても、信号を受信できる。

一定ビット数の情報を送る場合、高速伝送に伴って電波の送信時間を短くできるので、より多くの端末が電波を共有できるとともに、端末の消費電力の削減にもなる。

LoRaWANでは、端末から送信された電波の信号品質(SNR)をGWで測定した結果を復調データとともにNS(Network Server)に転送することで、NSがADR対象の端末に対してデータ速度の増減を指示できるようにしている。

LoRa AllianceではADRでの運用は必須ではなく、常時、固定SFを使用する運用も許容しているが、電波リソース効率運用のためADR運用を推奨している。

ADR (Adaptive Data Rate)の適用例



“Technical Overview of LoRa® and LoRaWAN™”, LoRa Alliance, Nov. 2015 より

GWに近い端末の場合、NSからの指示により、データ速度を順次増加させることでデータ送信を早く終了できる。

アロハ方式のアップリンク直後に短時間だけ受信ウィンドウを開く

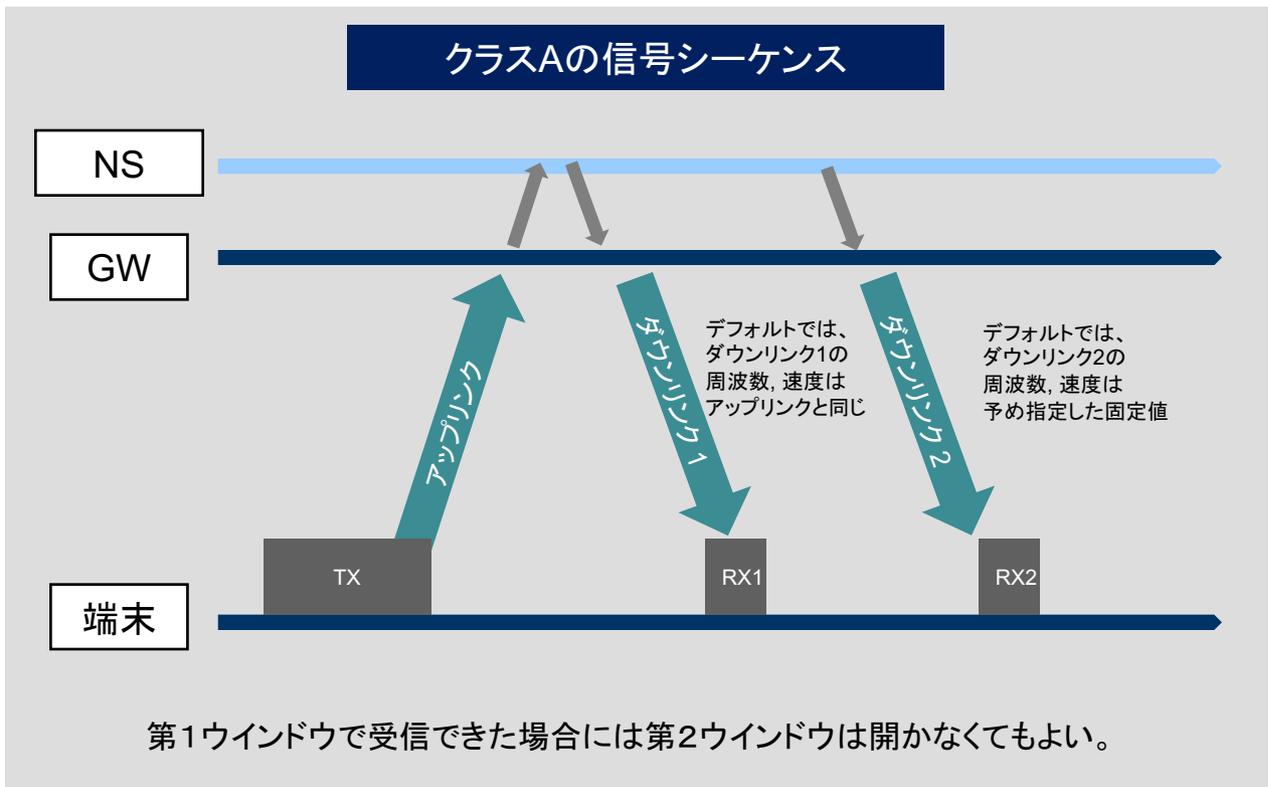
クラスAでは、端末にてデータ送信の必要が生じた時、任意のタイミングで1個のショートパケットを送信する。すなわち、アップリンクの送信タイミングは非同期であり、多重アクセス方式の種類で言うと純アロハである。

この信号を受信・復調できたGWは、当該信号をそのままNSに転送し、その応答が必要な場合にはNSからの信号をダウンリンクする。

端末では、ダウンリンク信号が受信できる時間だけウィンドウを空け、信号(ダウンリンク1)を待ち受ける。このウィンドウの開始タイミングは、NSでの処理等に要する遅延時間を考慮して設定されている。

(デフォルトではアップリンク完了後1秒)

ダウンリンク1の周波数とデータ速度は、デフォルトではアップリンクと同じである。ダウンリンク1を受信できなかった場合は、一定時間経過後に再度、ウィンドウを開いて応答を待ち受ける。それでも受信できない場合には、各国での送信時間制限の規定などを考慮した一定時間の経過後に、再送信を行う手順をとる。





(8) 信号フレーム構成

MACコマンドの收容位置は2種類

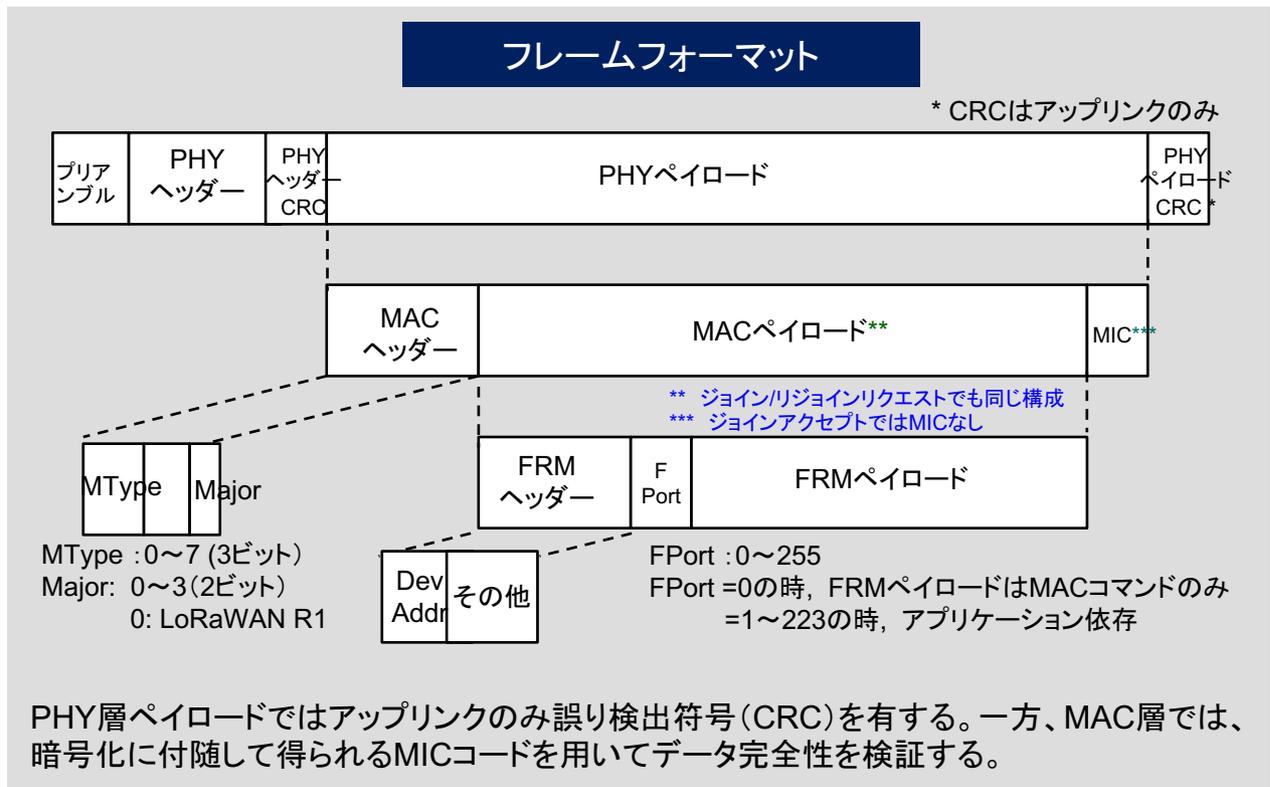
信号の復調に用いるプリアンブルは、網の種類(プライベート、パブリック)によって異なる固定の8ビットコードである。

パブリック: 0x34(00110100) プライベート: 0x12(00010010)

信号はPHY, MAC, FRMの3つの階層で構成され、各層ごとにヘッダーがある。このうち、8ビット長のMACヘッダーの先頭3ビットはメッセージタイプ(Mtype)であり、次ページに示すような送受データの最も基本的な種類を規定する。

MAC層でのパラメータの設定/変更や処理状態の取得等に用いるMACコマンドの收容位置には2種類があり、一つの信号はいずれか一方の位置に收容される。その一つは、フレームペイロード内に收容する形式であり、その場合、Fportの値を0とする。(Fportが0以外の数値の場合には、アプリケーション依存のデータがフレームペイロードに收容される。)

もう一方はフレームヘッダー内にMACコマンドを收容してしまう(ピギーバック)形式である。



受信確認の要否などに対応したメッセージを規定

メッセージタイプ (Mtype) として、最新仕様のLoRaWAN ver.1.1では合計7種類が規定されている。

このうち、Join Requestは端末が網に参加 (Join) 登録を要求するメッセージであり、網に登録されると、その応答であるJoin Acceptがダウンリンクされる。端末のJoin手続きは、網での使用が可能となるように端末初期設定 (アクティベーション) を行う場合や、端末電源断などの原因でセッションが切れ、端末の再登録を行う場合に行われる。

一方、Rejoin Requestは、端末を海外などの他事業者の網に参加するローミング手続きの際などの場合に端末が送信する。

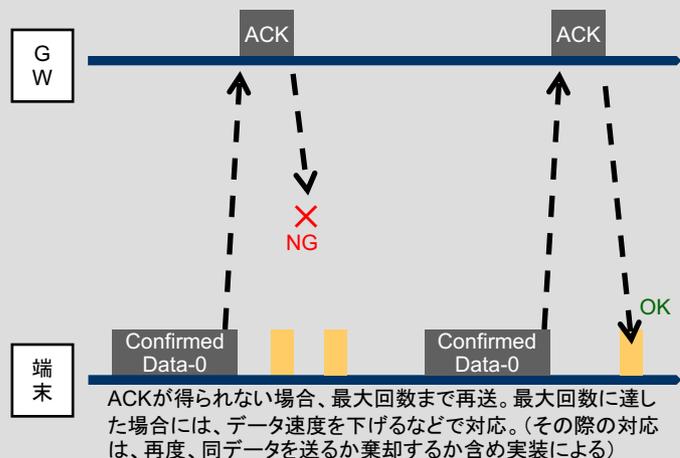
Confirmed Data Up/Downは受信側から受信確認応答信号 (ACK) が必要なメッセージであり、Upはアップリンクのデータ送信、Downはダウンリンクのデータ送信を意味する。一方、Unconfirmed Data Up/Downは、ACKの返送を要しないメッセージである。

メッセージタイプ

MType	内容
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Date Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	Rejoin Request *)
111	Proprietary

*) ver.1.1で追加。その他はver.1.0

Confirmed Dataの再送手順



ACKの返送を要するConfirmed Data送信では、ACKを受信できない場合、一定時間後にデータの再送を行う。



2. LoRaWAN

(10) MACコマンド

無線チャネル使用の効率化や端末の監視などを行う

MACコマンドはNSと端末との間で送受される信号であり、データ速度、送信電力、周波数の変更や端末状態の確認などが行える。

送信元からMACコマンドを受信した場合には必ず、これに対する応答を返す必要がある。その際、要求どおりの動作を行った場合は、応答メッセージ内のACKフィールドを”1”とする。一方、何らかの原因で要求どおりの動作ができなかった場合には、これを”0”とする。

下表はMACコマンドの一覧であり、コマンドIDが02～08はLoRaWAN ver.1.0, 0Aはver.1.0.2にて、それ以外はver1.1にて新たに追加されたコマンドである。

例えば、CID=02は端末からNSに対してリンク状態の確認を要求するコマンドであり、NSは直近アップリンクのS/Nマージンを1dB刻みの整数値で応答する。また、CID=03はNSから端末へのADR制御コマンドであり、端末の送信データ速度、送信電力、使用可能なチャネルリストの変更を要求する。

MACコマンド

*) Dは端末, NはNSを示す。

CID	Request Command	送信元*)	説明
01	Reset Ind	D	ABP(Activation By Personalization)端末のリセット
02	Link Check	D	NWとのリンク接続状態の確認
03	Link ADR	N	端末に速度、送信電力、チャネルの変更を要求
04	Duty Cycle	N	送信デューティー比の設定
05	RX Param Setup	N	受信スロットパラメータの設定
06	Dev Status	N	端末状態(電源レベル、受信マージン)の返送
07	New Channel	N	周波数の追加や変更
08	RX Timing Setup	N	受信スロットタイミングの設定
09	TX Param Setup	N	最長送信継続時間、最大EIRPの設定
0A	DI Channel	N	RX1用チャネル周波数の変更
0B	Rekey Ind	D	OTAA(Over-The-Air Activation)端末のセッション鍵再設定
0C	ADR Param Setup	N	ADR ACKの制限時間や遅延時間の設定
0D	Device Time	D	現在時刻の通知を要求
0E	Force Rejoin	N	即時のリジョインを要求
0F	Rejoin Param Setup	N	定期的なリジョインを要求



2. LoRaWAN

(11) 端末アドレスと2つの鍵

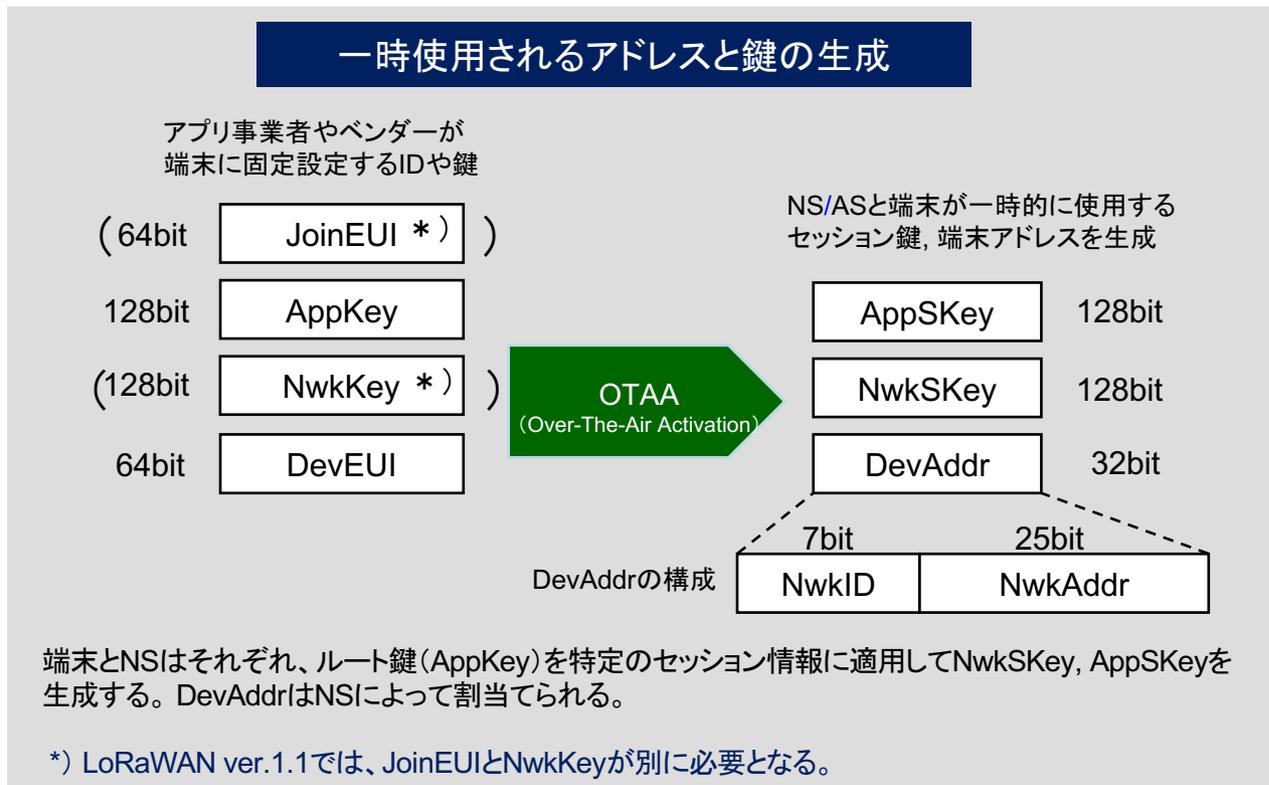
ネットワークへの参加の都度、サーバーと端末の連携で決定

端末がOTA(Over-The-Air)で網に参加するにはDevEUI, AppKeyの2つの情報の入手が必要となる。DevEUIは、端末ベンダーが定めるグローバルに識別可能な端末IDであり、AppKeyはアプリ層, MAC層のそれぞれで暗号化やデータ検証に用いるセッション鍵AppSKey, NwkSKeyを生成するルート鍵である。

網に参加すると、2つのセッション鍵(NwkSKey, AppSKey)と端末アドレス(DevAddr)がNSから割り当てられる。このうち、NwkSKeyは、端末とNSにてMICの生成・検証に用いるほか、MACコマンドをフレームデータ内にて送信する場合には、その暗号/復号にも用いる。一方、AppSKeyは、端末とASにて、アプリ層データの暗号・復号とMICチェックに用いられる。

32ビット長のDevAddrは、他事業者と区別するための7ビット長のネットワークID(NwkID)と、25ビット長の個別アドレス(NwkAddr)にて構成されている。

なお、端末製造前試験などでは、セッション鍵とDevAddrを端末に直接書き込むことでOTA手順をスキップできるABP(Activation By Personalization)もある。





2. LoRaWAN

(12) セキュリティ機能

MAC層とアプリ層のそれぞれで異なる鍵にて暗号化と改ざん防止

LoRaWANでは、端末/AS間、端末/NS間で異なる共通鍵を用いて、暗号化と改ざんの有無チェックを行っている。

端末/AS間のアプリ層ペイロードにはAppSKeyを適用して、CCM方式での128ビット長AES暗号化を行っている。CCM方式は、データフレームごとに加算されるカウンター値をペイロード情報に組合せて暗号化することで復号を困難にする方式であり、Wi-FiのWPA2やIPSecなどでも利用されている。

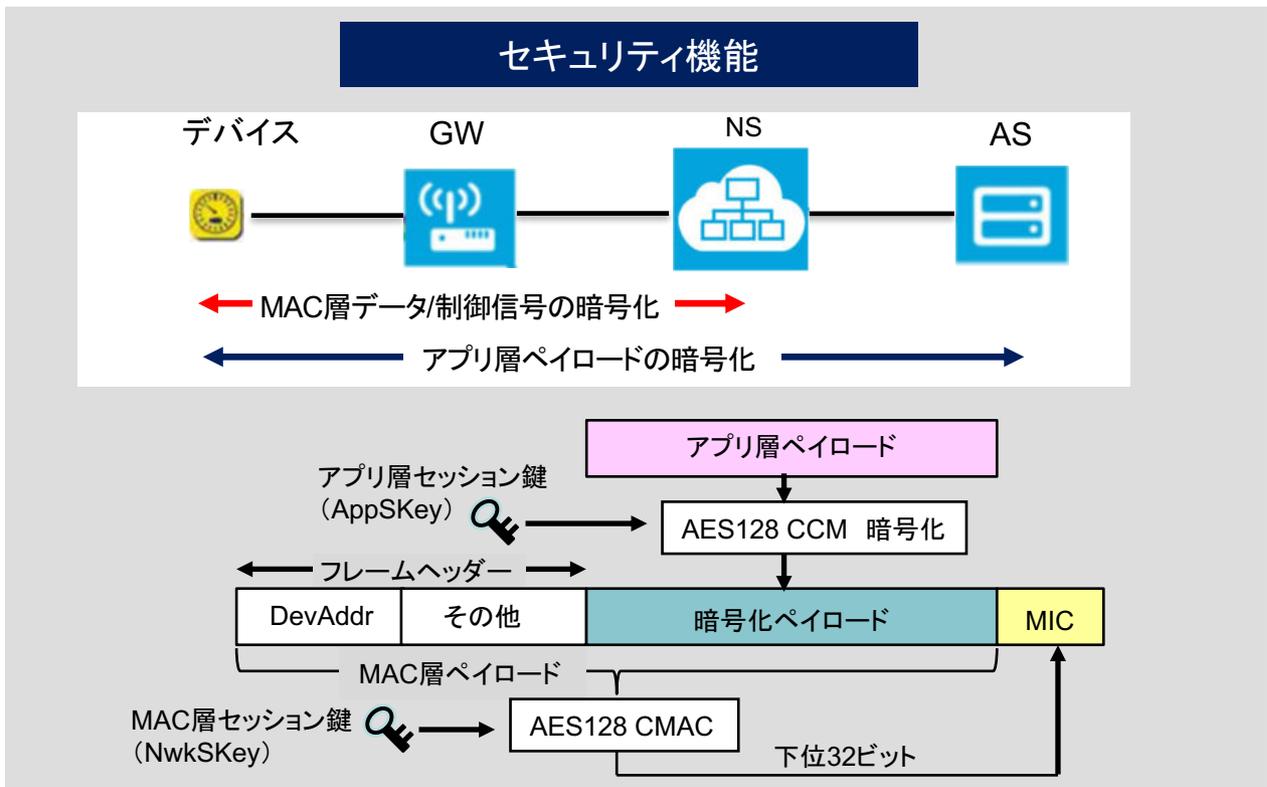
端末/NS間のMAC層では、アプリ層とは別の共通鍵NwkSKeyを、MAC層ペイロードとフレームカウンター等の情報に適用して得られた128ビット長AES暗号データ下位32ビットを改ざんの有無判定(インテグリティチェック)に用いている。

AES: Advanced Encryption Standard

MIC: Message Integrity Check

CCM: Counter with Cipher-based block chaining mode MAC

CMAC: Cipher-based Message Authentication Code



周期的に送信されるビーコンを受信して全端末が同期をとる

クラスBでは、任意のタイミングでダウンリンクが可能となるように、網同期をとっている。このためにGWは周期的にビーコンを送信し、網内の全クラスB端末がこのビーコンを受信することによって同期をとる。その後、各端末は、自身向けダウンリンク用に指定された受信スロット(Pingスロット)を開くことでダウンリンクを待ち受ける。

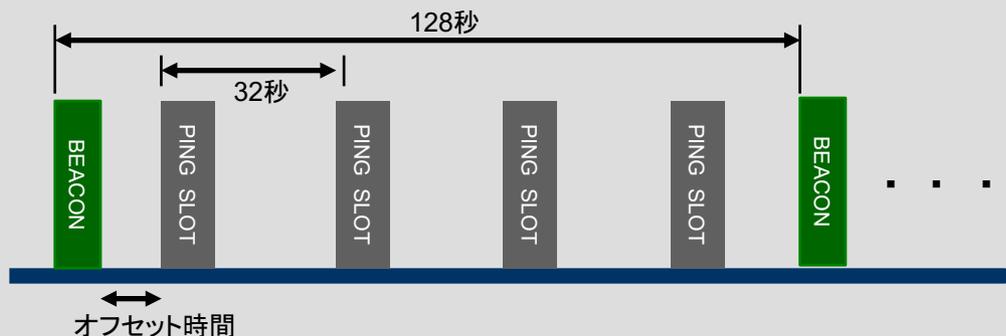
GWが送信するビーコンの周期は128秒である。Pingスロット位置(ビーコンからのオフセット時間)は端末毎に異なるだけでなく、1ビーコン周期ごとにランダム化することで、ダウンリンク信号での衝突を極力回避している。

クラスB端末でも、網への参加(Join)の手順はクラスAと同じであり、ビーコン受信によって同期を確立した後に、アプリ層での判断によってクラスBへのモード切り替えを行う。

なお、一定時間に渡ってビーコンが受信できなくなった場合は、一旦、クラスAに戻った後にビーコンの正常受信を経て、クラスBに復帰するようにしている。

クラスBの受信ウィンドウ (Pingスロットが4個の場合)

複数のPINGスロットのいずれのスロットを用いるかはアプリケーションが決定する。ビーコンとPing Slot間のオフセット時間は128秒の1ビーコン周期ごとに変化させている。このためにNSと端末は同じ数式にて、次のビーコン周期でのオフセット時間を計算する。なお、クラスB運用に先だて、各端末が待ち受けるPing Slotの周期, データ速度, チャンネルのデフォルト値をNSに通知しておく必要がある。



Pingスロットの位置や頻度は端末ごとに異なる。また、オフセット時間をビーコン周期ごとに変化させている。



(14) クラスBでの送受信の例

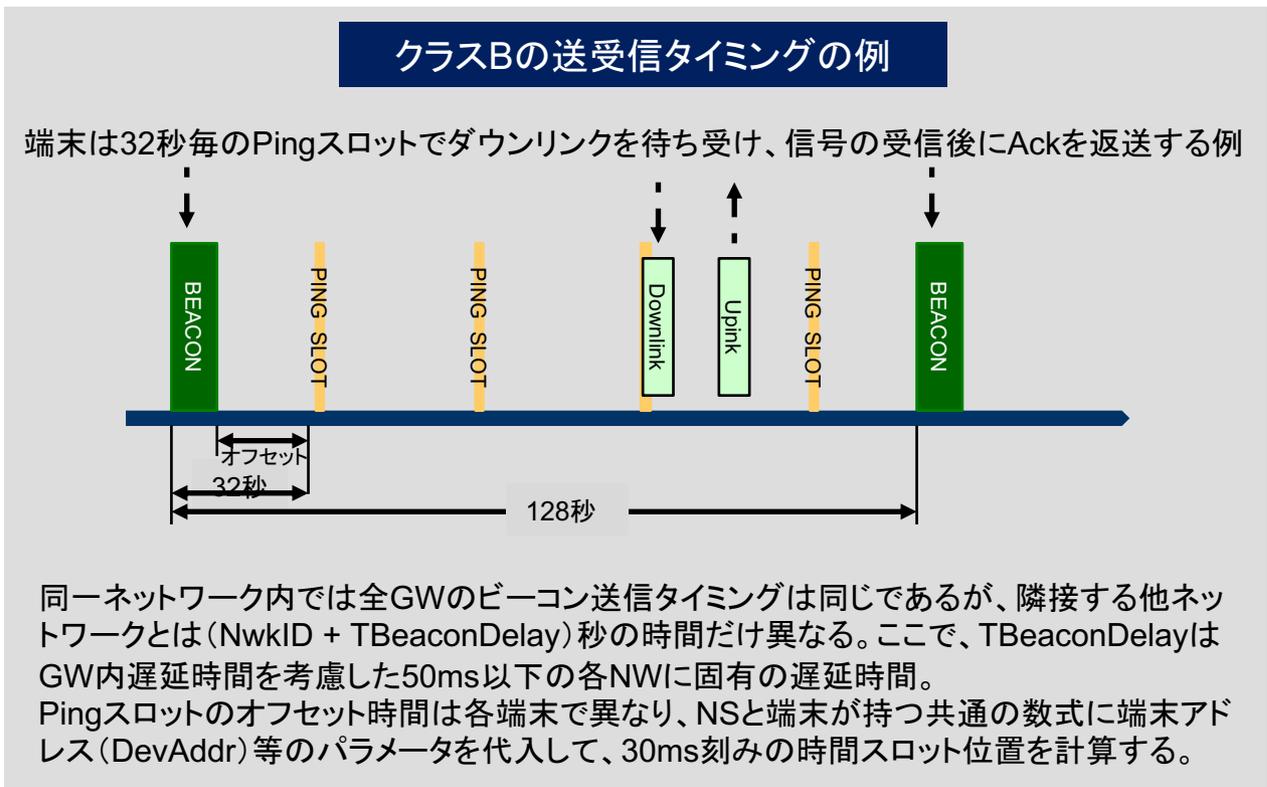
端末はビーコンに同期したPingスロットでダウンリンクを待ち受け

ビーコン信号とPingスロットでの信号送受信の例を下に示す。この例では、128秒のビーコン周期内にて32秒間隔で4個のPingスロットを開く。Ack返送を要求するConfirmed Dataを受信した場合には、応答(Ack)信号をアップリンクする。

各端末はPingスロットを開いて受信を待ち受けるが、Pingスロットの頻度は自身への通信頻度等を考慮して予め端末がMACコマンドによりNSへ要求しておく。

ただし、大半のPingスロットではダウンリンクがないため、プリアンブル信号の不検出後直ちにPingスロットは閉じられる。一方、プリアンブル信号を検出した場合は、信号の復調後、MAC層にて自端末宛てのアドレスであるか、MICは正常であるかをチェックして、自端末宛ての正常データのみをアプリ層に転送する。

なお、クラスA同様、ダウンリンクは最も信号強度の強いGWから送られるので、移動する端末では、定期的に空のアップリンクを送るなどによって、次のダウンリンクではどのGWを経由すべきかのルート更新をNSが行えるようにする。



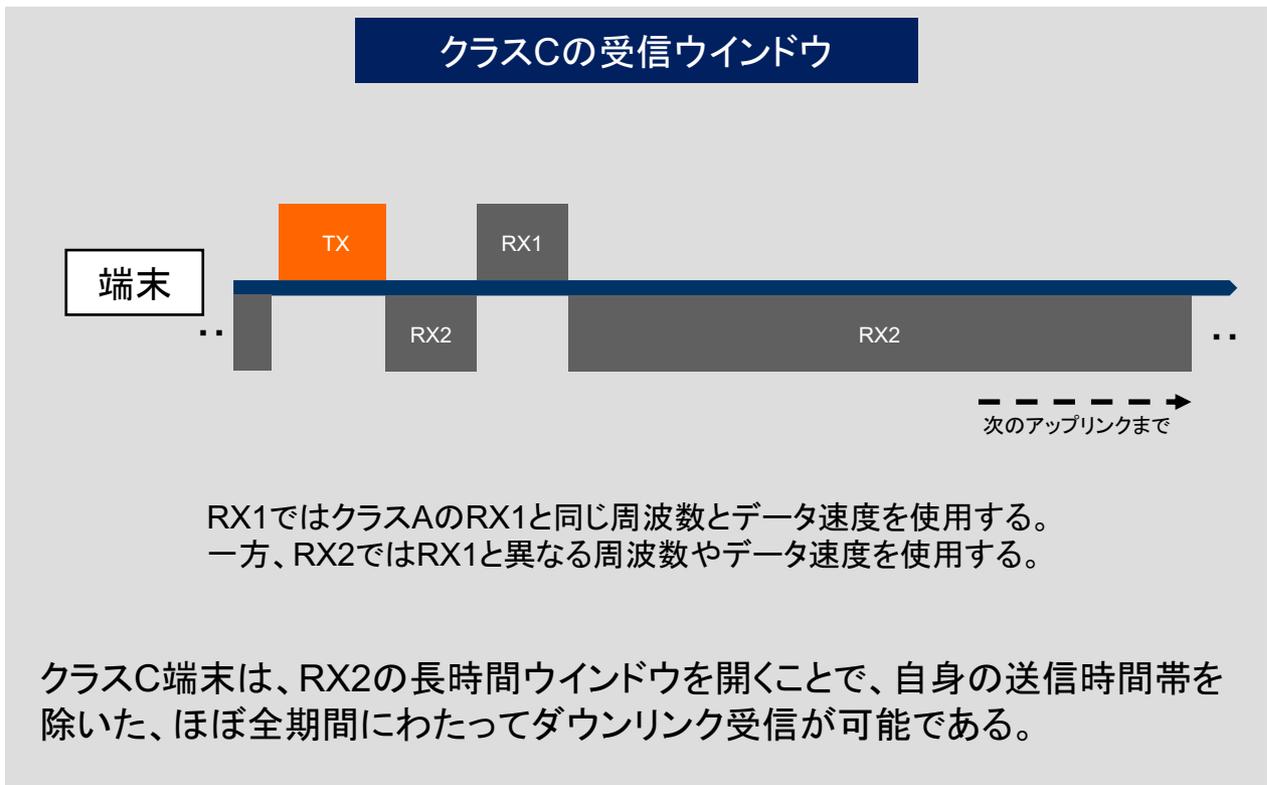
端末送信時以外は常時受信ウィンドウを開いておく

クラスCは外部電源が接続されている端末を想定しており、端末が送信する時間以外は常に受信ウィンドウを開いて待ち受けることで、低遅延で高速のダウンリンク通信を行うことができる。

クラスCではクラスA同様にRX1とRX2の2つの受信ウィンドウが定義されている。このうち、RX1ではクラスAでのそれと同じ周波数とデータ速度を使用する。

一方、RX1と異なる周波数スロットやデータ速度を用いるRX2には、RX1に続く長時間のウィンドウと、送信終了からRX1開始までの短時間のウィンドウの2つがある。そこで、端末の送信時間を除いた、ほぼ全時間帯に渡ってダウンリンクが可能になっている。

クラスC端末がConfirmed DataやMACコマンドを受信した場合、端末は予め決められた一定時間内にアップリンクによる返答を行うものとし、その期間は端末での受信不可になるためNSはダウンリンクを行ってはならないとしている。





3. NB-IoT

(1) IoT向けLTE方式

Cat 1, 0, M1, NB-IoTの4方式

LTE方式などのグローバルなモバイル通信方式の標準化を行っている3GPP(3rd Generation Partnership Project)では、既存LTEとの親和性を考慮したIoT/M2M向け技術仕様を定めている。

これまでに、より低速で簡単な端末^(*)構造に対応した4つの規格が順次制定されている。このうちNB(Narrow Band)-IoTは、LoRaWAN等の他のLPWA方式が急速に台頭することになったため、通常より短期間のうちに制定されることになった。

(*)以下では3GPPでの用語であるUE(User Equipment)を用いる

- ・ Cat 1 2009年 リリース8
- ・ Cat 0 2011年 リリース10
- ・ Cat M1 2016年 リリース13 (別称 eMTC)
- ・ NB-IoT 2016年 リリース13 (3GPP仕様書ではCat NB1と呼称)

IoT向けLTE方式の比較

カテゴリー	Cat 1	Cat 0	Cat M1	NB-IoT
帯域幅	20MHz	20MHz	1.08MHz	180kHz
ガードバンド利用	不可	不可	不可	可能
下り最大速度	10M bit/s	1M bit/s	1M bit/s	250k bit/s
上り最大速度	5M bit/s	1M bit/s	1M bit/s	250k bit/s
リンクバジェット	LTE並み	LTE並み	LTE +15dB	LTE +20dB
UE送信電力	23dBm	23dBm	20/23dBm	20/23dBm
複信方式	全2重	全/半2重	全/半2重	半2重

NB-IoTではCat M1より帯域幅を更に狭くすることでガードバンド利用も可能に

3GPPでは、既存LTEに親和性のあるIoT向け仕様を順次標準化している。

電池駆動で十年以上もつUEも可能に

NB-IoTでは、移動が限定的であるUEが少量のデータ送信を行うこと、電池超寿命化と装置簡単化によるコスト低減が大きいことを考慮して、更なる狭帯域化を図るとともに、以下の技術を採用している。

1. 半二重通信：送信と受信を切替運用することでUE構造を簡素化
2. 信号の繰り返し送信：同じ信号を繰り返し送信することでS/Nを改善し、カバレージを拡張
3. 省電力モードの追加：UEでの待受時間が一定値を超えた時、網への登録状態を維持のまま電源オフに近い状態に遷移
4. 受信間隔の拡大：UEでの信号受信を間欠的(最長2.9時間まで)とし、それ以外の時間では多くの機能を停止

また、接続中のセル間ハンドオーバー機能は搭載せず、セルの再選択はアイドル状態で行うなどの制御簡単化を図っている。

NB-IoTでの主要技術

信号の繰り返し
送信

受信間隔の
拡大(eDRX)

NB-IoT

半二重通信

省電力モード
(PSM)の追加

eDRX: extended Discontinuous Reception
PSM: Power Save Mode

NB-IoTは既存LTEとの親和性を維持しつつ省電力化、装置簡単化を指向。

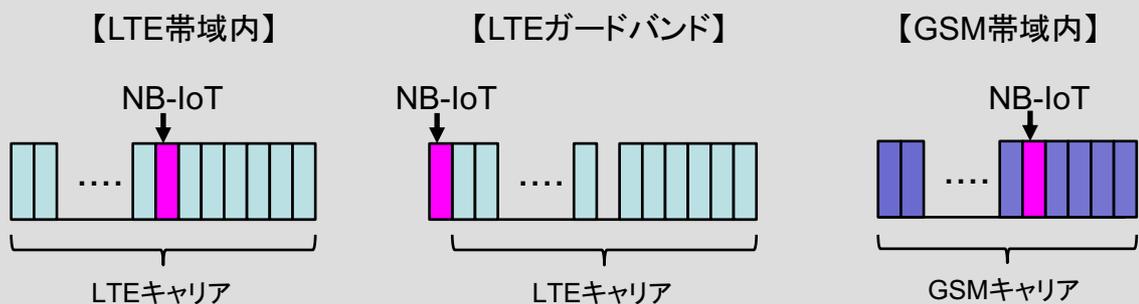
既存LTE帯域のすき間を有効利用

NB-IoTでは、既存LTEでの最小のリソース割り当て単位である180kHz幅(占有帯域幅200kHz)の1つのリソースブロック(RB)内にUEの送受信信号が収まるようにしている。

そこでNB-IoTでは、次の3つの周波数運用モードが可能のため、通信事業者は既存無線システムを有効活用できる。

- (1) 既存LTEの帯域内の一部を1RB単位で使用するインバンドモード
- (2) 5MHz以上の帯域幅を持つ既存LTEのガードバンドに收容するモード
(1.4MHz,3MHz幅のLTEではガードバンドが狭いため不可)
- (3) GSM等の帯域内に独立して收容するスタンドアロンモード

NB-IoTの運用例



既存LTEの周波数使用最小単位の12サブキャリア(180kHz幅)と狭いことから、LTE帯域内やガードバンドなどに配置できるので無駄が少ない。



3. NB-IoT

(4) NB-IoTの無線方式

NB-IoTの一次変調方式はQPSKまで

NB-IoTではLTEでの技術やパラメータの多くを踏襲している。

多重方式には既存LTE同様、下り回線にOFDM、上り回線にはUEピーク電力低減のためにシングルキャリア(SC)FDMAを採用している。

サブキャリア間隔はLTE同様の15kHzに加え、その1/4の3.75kHzも規定しており、シンボル長が4倍に長くなるのでマルチパスによる干渉に強くなる。上り回線では電力を狭帯域に集中させてS/Nを稼ぐことができるようにサブキャリア1波でも利用可能としている。

LTEでは64QAMまでの位相変調方式を使用するが、低速で広いカバレッジのNB-IoTでは、QPSK以下を使用する。特に上り回線では、瞬時電力変化を少なくするため、データシンボル遷移時に零点通過が生じない $\pi/2$ シフトBPSK、 $\pi/4$ シフトQPSKも使用している。

LTE, NB-IoTの無線方式と主要パラメータ

	LTE	NB-IoT		
		下り	上り	
多重方式	下り:OFDM 上り:SC-FDMA	OFDM	SC-FDMA	
一次変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK	QPSK, $\pi/4$ シフトQPSK $\pi/2$ シフトBPSK	
サブキャリア帯域幅	15kHz	15kHz	15kHz	3.75kHz
フレーム時間	10 ms			
スロット数/フレーム	20	20	20	5
スロット時間	0.5 ms	0.5 ms	0.5 ms	2 ms
シンボル数/スロット	7または6	7または6	7	7

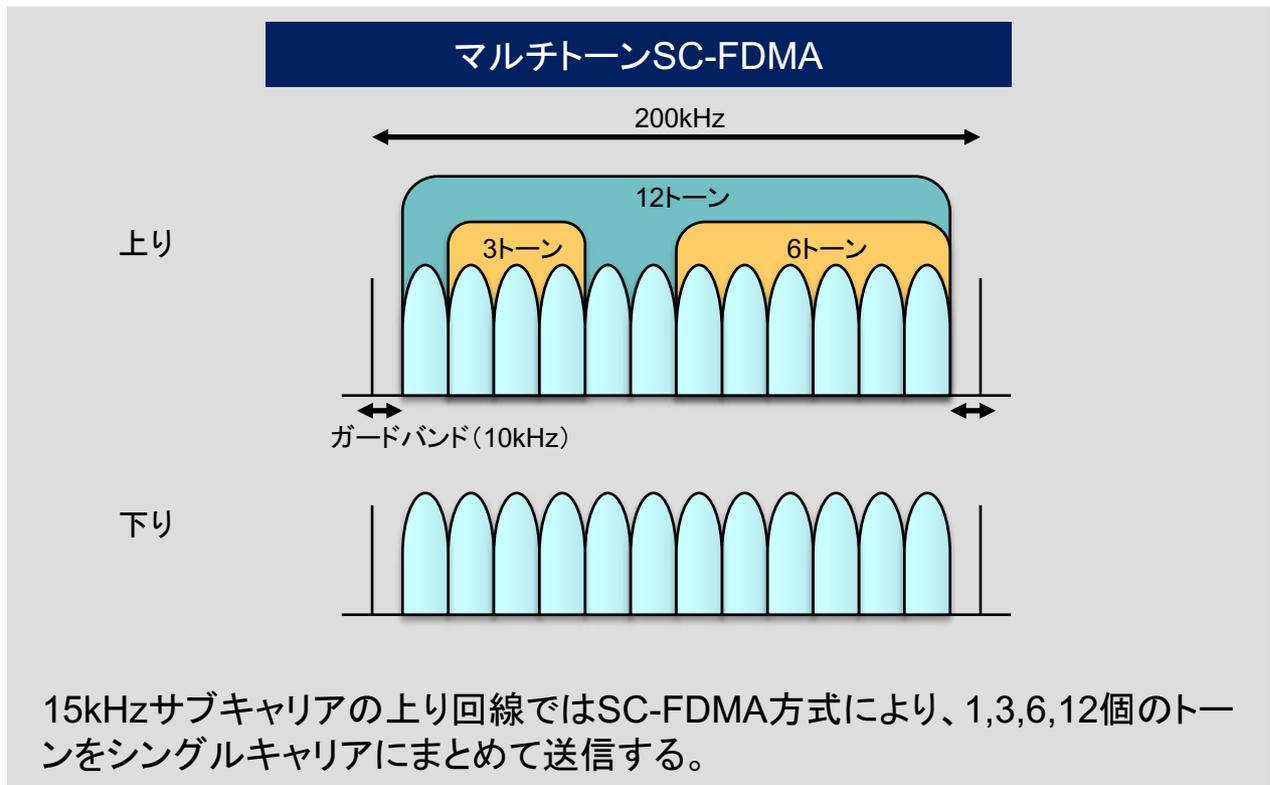
NB-IoTではLTEの無線方式、主要パラメータを踏襲している。

上り回線では単一サブキャリアや複数サブキャリアの組合せが可能

既存LTEでは、無線リソース割当て単位は15kHzサブキャリア12波の組で構成されるPRB(Physical Resource Block)であるが、NB-IoTの上り通信では、伝送速度を犠牲にすることで、より狭い帯域に電力を集中できるように、1,3,6個のサブキャリア(トーン)の単位でも使用できるようにしている。

なお、ランダムアクセスやACK等の制御信号送信に用いる3.75kHzサブキャリア使用の場合、キャリア数は1個に限っている。

一方、NB-IoTの下り通信では、15kHzサブキャリアを12波まとめて使用し、当該チャンネルにアクセスする全てのUEが同時受信するモードに限られるので、リソース割当ては時間単位のみで行われる。





3. NB-IoT

(6) FDDフレーム構造

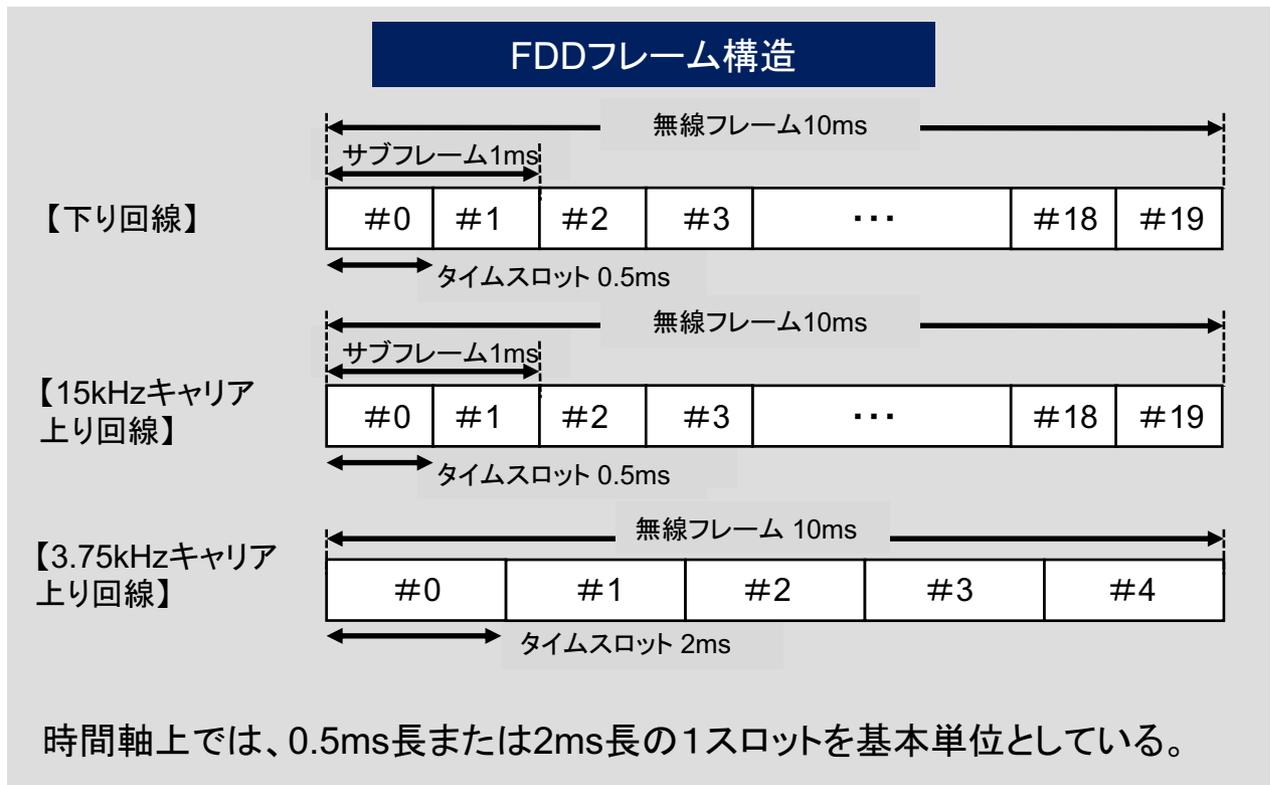
10フレームが10msのFDD

NB-IoTは上下回線に別の周波数を用いるFDD(Frequency Division Duplex)である。

時間軸上では既存LTE同様、上下回線の無線フレーム(RF)が同じ10msのフレーム長を有する構造となっている。

15kHzサブキャリアの場合、1無線フレームは1ms長のサブフレーム10個で構成され、1サブフレームは0.5ms長のタイムスロット2個を有する。

一方、3.75kHzサブキャリア上り回線での1タイムスロット長は2msである。



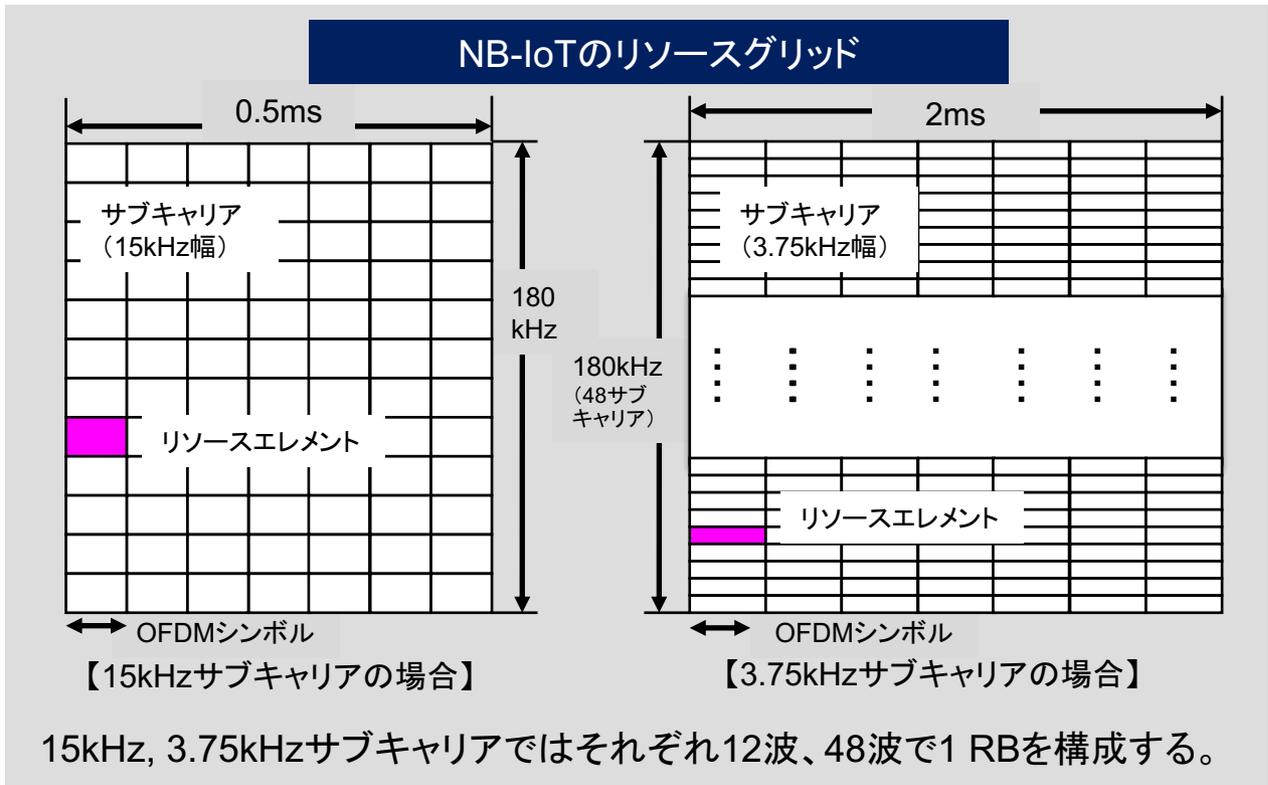
時間と周波数で作る2次元空間がリソースグリッド

LTEやNB-IoTでは、周波数軸と時間軸での無線リソース瞬時位置を2次元的に表示する格子をリソースグリッドと呼んでいる。

NB-IoTリソースグリッドの周波数帯域幅はサブキャリアが15kHz, 3.75kHzのいずれの場合も180kHzである。一方、合計7個のOFDMシンボルをもつ1タイムスロット長は15kHzサブキャリアでは0.5ms, 3.75kHzサブキャリアでは2msである。

このリソースグリッドでは、1 OFDMシンボル時間とサブキャリア周波数間隔が作る要素をリソースエレメントと呼んでいる。

OFDMシンボル長は、サブキャリア周波数の逆数で与えられ、15kHz, 3.75kHzサブキャリアでは、それぞれ66.7 μ s, 266.7 μ sとなる。





3. NB-IoT

(8) NB-IoTの物理チャンネルと信号

既存LTE方式を踏襲している

NB-IoTの物理チャンネルは次の目的に使用される。

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

NPDCCH: UEに上下回線リソース割当やページング等の情報を通知

NPDSCH/NPUSCH: 下り/上りデータトラフィックを伝送
(NPUSCHでは上り制御信号も伝送)

NPRACH: ランダムアクセス用のプリアンブル信号を送信

一方、参照信号(RS)は基地局より全SFの特定スロットに送信される。

NPSS, NSSSでは、隣接セル間干渉が少ないCAZAC*1符号が送信されており、UEはWCDMAやLTE同様の階層型セルサーチによって、504通りあるセル固有の物理識別番号(PID*2)を取得する。

DMRSは、基地局にてUE送信信号の復調に用いる参照信号であり、UEデータ送信時のRU内に多重される。

物理層チャンネルと同期/参照信号

【物理層チャンネル】

先頭のNPはNarrowband Physicalの略

下りリンク(基地局→UE)	上りリンク(UE→基地局)
NPDSCH (DS: Downlink Shared)	NPUSCH (US: Uplink Shared)
NPBCH (B: Broadcast)	NPRACH (RA: Random Access)
NPDCCH (DC: Downlink Control)	

【同期/参照信号】

下りリンク(基地局→UE)	上りリンク(UE→基地局)
NRS (Reference Signal)	DMRS (Demodulator Reference)
NPSS (Primary Sync Signal)	*1) CAZAC: Constant Amplitude Zero Auto-Correlation waveform *2) PID: Physical layer cell ID
NSSS (Secondary Sync Signal)	

MBMSサービス等がないため既存LTEに比べチャンネルや信号種類が少ない。



3. NB-IoT

(9) NPUSCHでのリソースユニット

2つのフォーマットがある

上り方向のデータと制御信号の送信用チャネル(NPUSCH)の信号には2種類のフォーマットがある。このうち、Format 1はデータの送信、Format 2はACK等の制御信号の送信に用いる。Format 2の一次変調方式はBPSKであり、1トーンのみを使用する。

一方、Format 1を用いたデータ送信では、トーン数によって異なるスロット数をもつリソースユニット(RU)の単位で基地局からの割り当てが行われる。例えば3トーンでは8スロット(4ms長)が1RUである。

基地局ではNPRACHによるUEからのアクセス要求を受信した後、上りデータ送信のためのNPUSCHリソース割当て情報(開始時刻、RU数など)をNPDCCH経由でUEに通知する。

上り回線のリソースユニット

フォーマット	サブキャリア幅	トーン数	一次変調方式	スロット数	時間
Format 1 (データ 送信用)	15kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK, $\pi/4$ シフトQPSK	16	8ms
		3	QPSK	8	4ms
		6	QPSK	4	2ms
		12	QPSK	2	1ms
	3.75kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK, $\pi/4$ シフトQPSK	16	32ms
Format 2 (制御信号 送信用)	15kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK	4	2ms
	3.75kHz	1	$\pi/2$ シフトBPSK	4	8ms

上り制御信号の送信には低速のFormat 2が使用される。

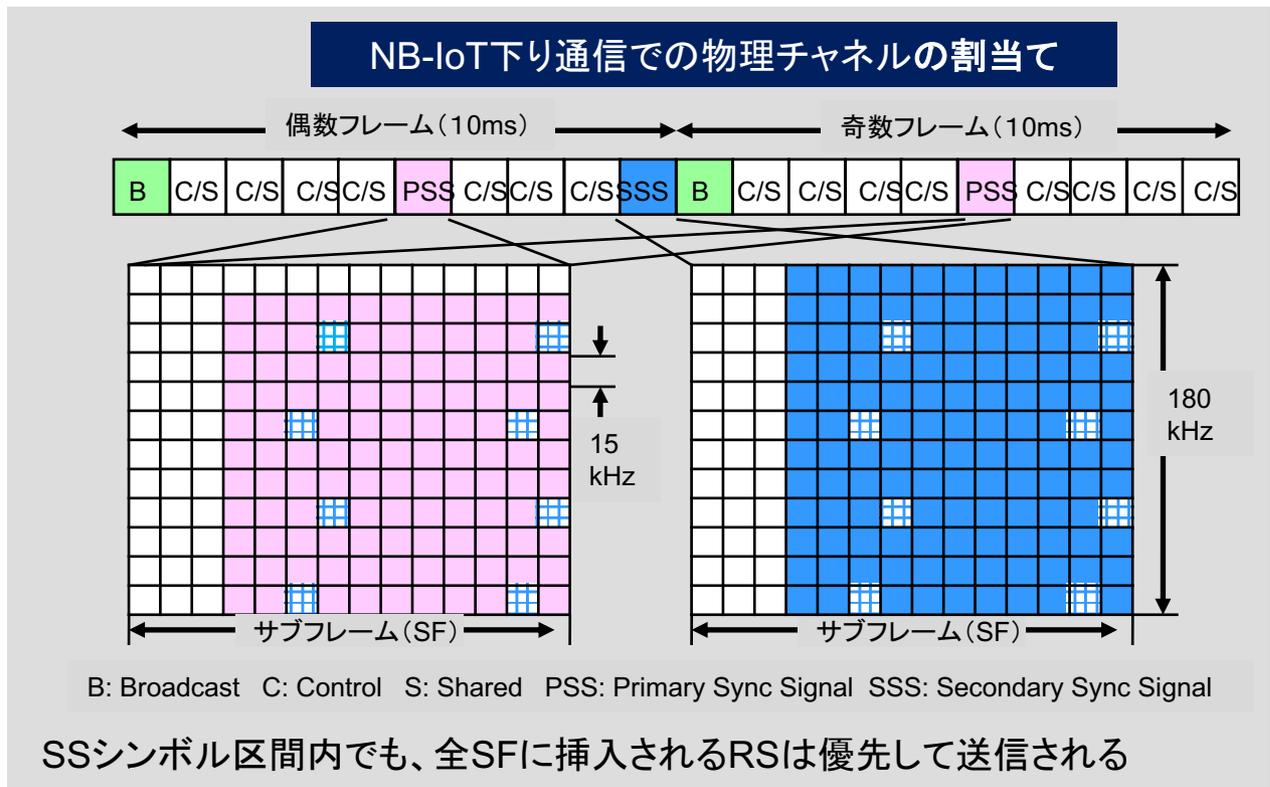
セルサーチ用信号は第5, 第9サブフレームにて常時送信

下り回線の特定サブフレーム(SF)に送信されるセルサーチのための同期信号(SS)では既存LTEでの2段階の同期方式を踏襲している。

NB-IoT用の信号は既存LTEのそれと区別するため、NPSS, NSSSと呼び、NPSSは第5SF、NSSSは偶数フレームの第9SFにて常時送信される。

NB-IoTをLTE帯域内にて運用する場合、SF内の先頭3 OFDMシンボル区間にはLTE向け制御チャンネル(PDCCH)が含まれることがあるので、当該区間にSSシンボルが配置されることはない。

なおSSシンボル区間内でも、全てのSFに挿入される参照信号(RS)は優先して送信される。





3. NB-IoT

(11) 非同期ランダムアクセス(NPRACH)

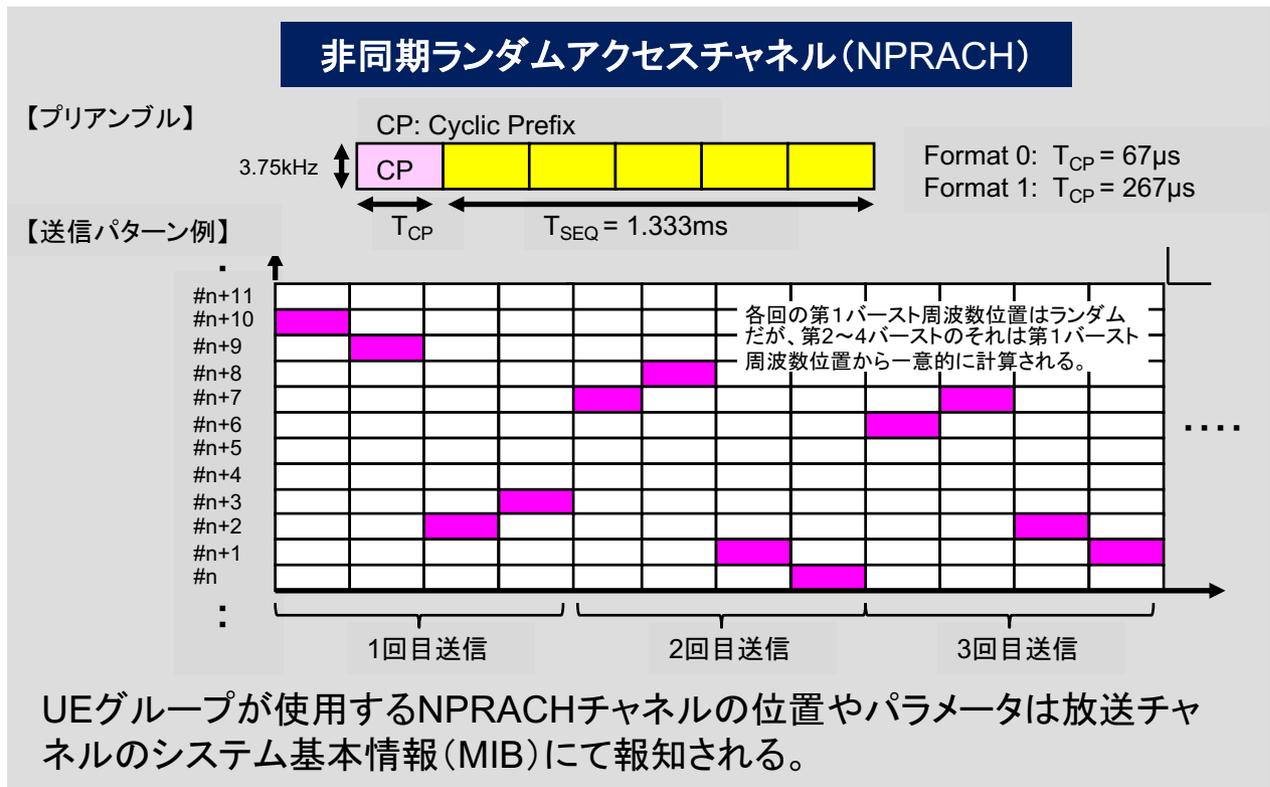
UEのネットワーク登録や送信要求準備のために行われる

UEからのアクセス要求用のNPRACHでは、BPSK変調の3.75kHzサブキャリアによるプリアンブルを用いるが、そのフォーマットには最大接続半径が異なる2種類がある。このうちFormat 0はCP長66.7 μ 秒(接続半径 8km)、Format 1はCP長266.7 μ 秒(接続半径 35km)である。

NPRACHの位置やパラメータはMIBにて報知され、次の値を持つ。

- ・サブキャリア: 連続する3.75kHzサブキャリアの先頭周波数位置と数
- ・周期: 40ms ~ 2.56s
- ・時間軸上での開始位置と繰り返し数 など

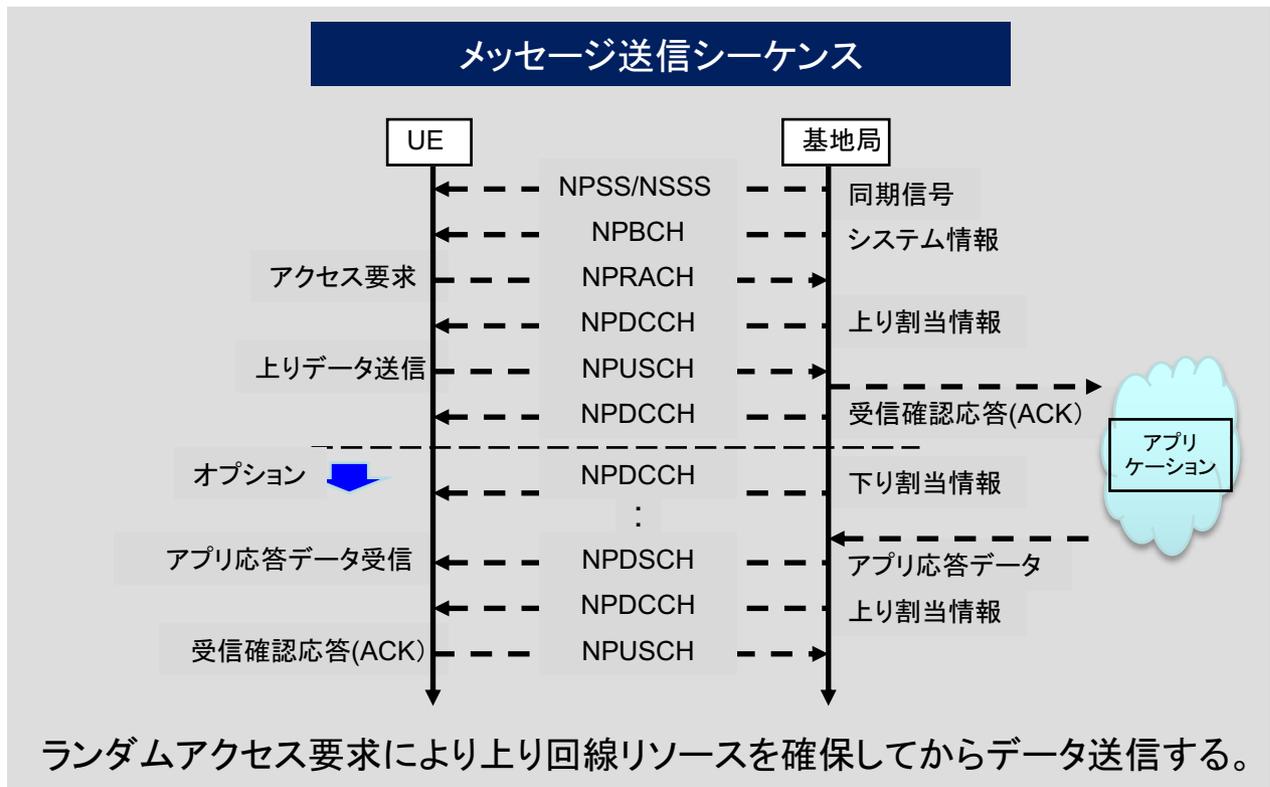
UEは、MIBにて指定された連続する12サブキャリア内にて指定個数(下の例では4個)のプリアンブルをギャップなしで周波数ホッピングして送信し、これを指定回数だけ繰り返す。



上り信号を間欠的に送信し、下り信号の受信はその直後のみ

NB-IoTではセンサーデータ収集のような上り通信が殆どとされている。この上り通信の基本的な手順は次のようになる。

1. UEは基地局からのNPSS/NSSSを受信して同期を確立した後、NPBCHにて報知されているシステム情報や制御情報を取得する。
2. UEはランダムアクセス信号をNPRACHに送信し、上り通信のためのリソース割当てを要求する。
3. 基地局は上記の受信後、上り割当情報をNPDCCHにて送信する。
4. UEは上で指示されたNPUSCH上のRUにてデータを送信し、これを受信した基地局はクラウド側アプリに転送する。
5. 基地局はNPDCCHにてACK応答を返す。その後、次も追加できる。
6. NPDCCHでの下り割当情報と、NPDSCHでのアプリデータ送信。
7. NPDCCHでの上り割当情報と、UEからのACK応答の送信。



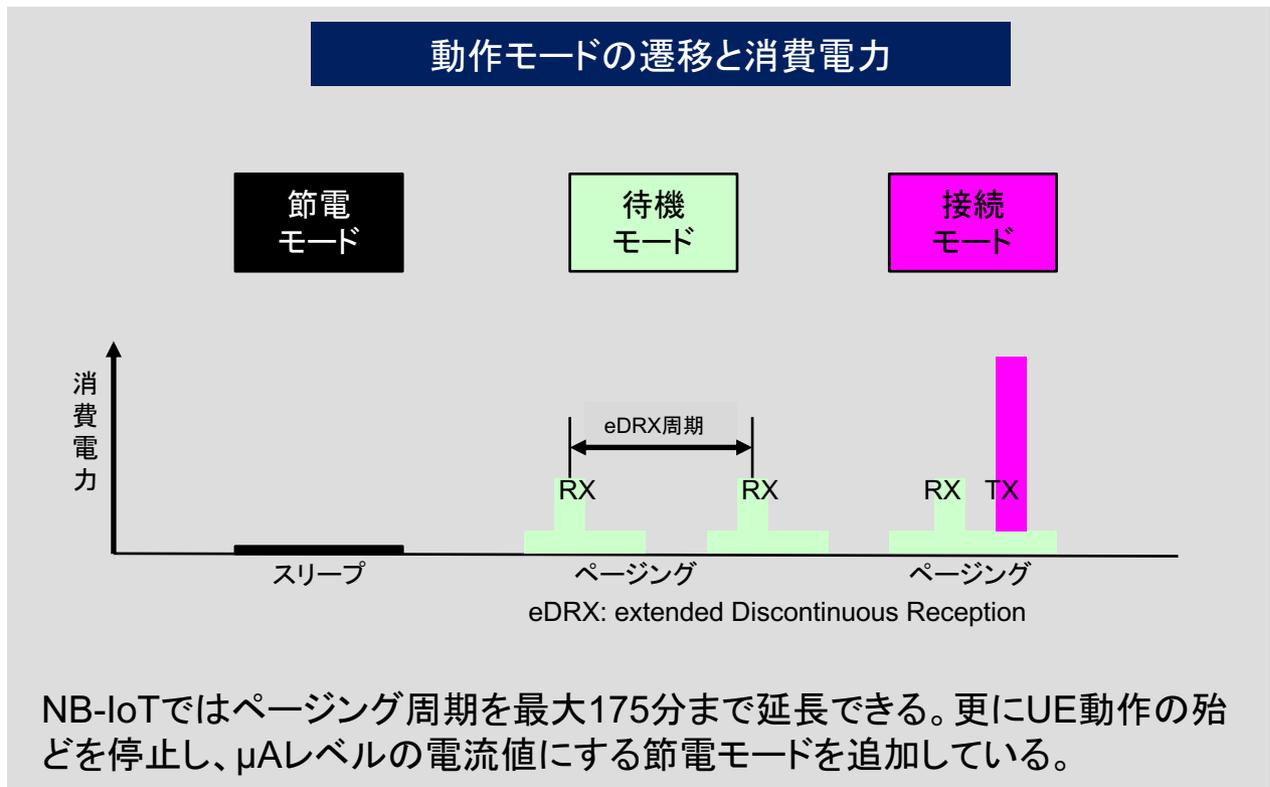
殆どの時間帯では受信も不可なスリープ状態に

NB-IoTでのUEは次の3つの動作モードをもたせることで消費電力を抑えている。

- 節電モード(Power Save Mode) 基地局に登録されてはいるが、UE制御ができないため、送信・受信ともに不可の状態
- 待機モード(Idle Mode) UE制御ができる下り受信可能な状態
- 接続モード(Connected Mode) 上りデータを送信できる状態

各状態では固有のタイマーを持ち、一定の時間の経過あるいはトリガーイベント発生時に動作モードが遷移する。

特に、NB-IoTでは基地局からUEを呼び出すページング信号の周期を長くしているのに加え、節電モードに入る際には基地局にその旨を通知し、無駄なページング情報を送らないようにするなど、待機モードと節電モードでの電力低減を図っている。



4. 他の方式

(1) Sigfox: SNO (Sigfox Network Operator)

基地局とバックエンドは各国Sigfox事業者が運営

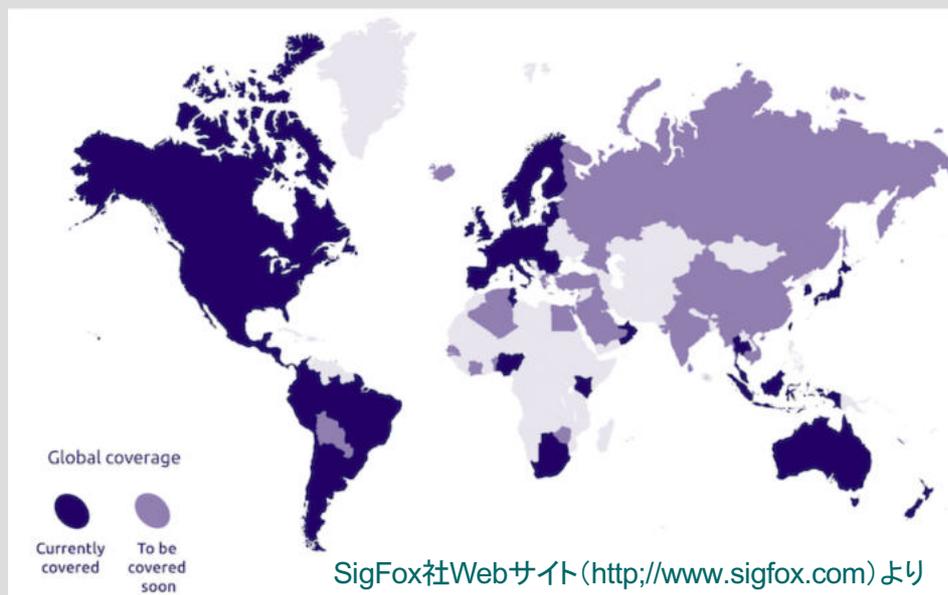
Sigfoxはアンライセンス帯域を使用して、低速データを長距離伝送できるように、フランスSigfox社が開発した方式である。

Sigfox網もLoRaWAN同様、各端末(デバイス)が基地局とスター状につながる構成である。基地局はバックホール回線経由でバックエンドと称するクラウド側サーバーに接続され、端末とバックエンド間でのパケット転送を担っている。

基地局とバックエンドの設備は、Sigfox社が契約したSNO(Sigfox Network Operator)に提供されている。ユーザはモバイル携帯による通信のように、アプリケーションに適した端末を購入して、初期設定を行うことでIoTサービスが受けられる。

Sigfoxでは原則、1国で1SNOが独占的に運営する形式をとっており、日本では、京セラコミュニケーションズ(KCCS)がSNOとしてネットワーク構築と運用を行なっている。

Sigfoxサービス展開状況(2019.9現在)



SigFox社によると、2019.9現在、世界の65カ国以上で利用可能としている。



4. 他の方式

(2) Sigfox: 無線方式の諸元

アップリンクには帯域幅100Hzの差動BPSK変調を使用

SIGFOXの1チャンネル帯域幅は100Hzと狭く、アップリンク(端末からGW)での変調方式には差動2相PSK(DBPSK: Differential Binary PSK)を使用する。一方、ダウンリンク(GWから端末)ではGFSK(Gaussian FSK)変調方式を使用する。

アップリンクでは端末から送信できるデータ量は最大12バイト(8,6,4バイトも可)であり、メタデータ等を含む送信フレーム長は26バイトである。これを100bit/sの速度で伝送するので、1パケットあたりの送信時間は約2秒になる。通常、同じデータを3回づつ(それぞれ別の周波数スロットで)繰り返し送信することで正常受信確率を高めているため、データ送信1回あたり約6秒を要する。

欧州では送信時間デューティー比が1%以下、すなわち、1時間での送信時間は最大36秒に制限されているので、一日あたりの送信数は最大140としており、日本を含むグローバルな運用でも、この制限を適用している。

一方、ダウンリンクでは、600bit/sの速度をもつ350ms長のバースト信号の1宛先端末1日あたりの送信数を最大4回に制限している。

Sigfoxの伝送方式諸元(日本の場合)

	アップリンク	ダウンリンク
周波数帯	920MHz帯	920MHz帯
送信電力	20mW	20mW /250mW *)
変調方式	DBPSK	GFSK
伝送速度	100 bit/s	600 bit/s
最大送信数(1日・デバイスあたり)	140	4
受信感度	-145dBm	-135dBm
送信継続時間(1バーストあたり)	2秒	0.35秒

*)最大20mWは登録を要しない特定小電力無線局、最大250mWは登録を要する簡易無線局

アップリンクは100bit/sと超低速であるため高い受信感度(-145dBm)を有している。

4. 他の方式

(3) Sigfox: 信号シーケンス

端末から同じメッセージを連続3回送信

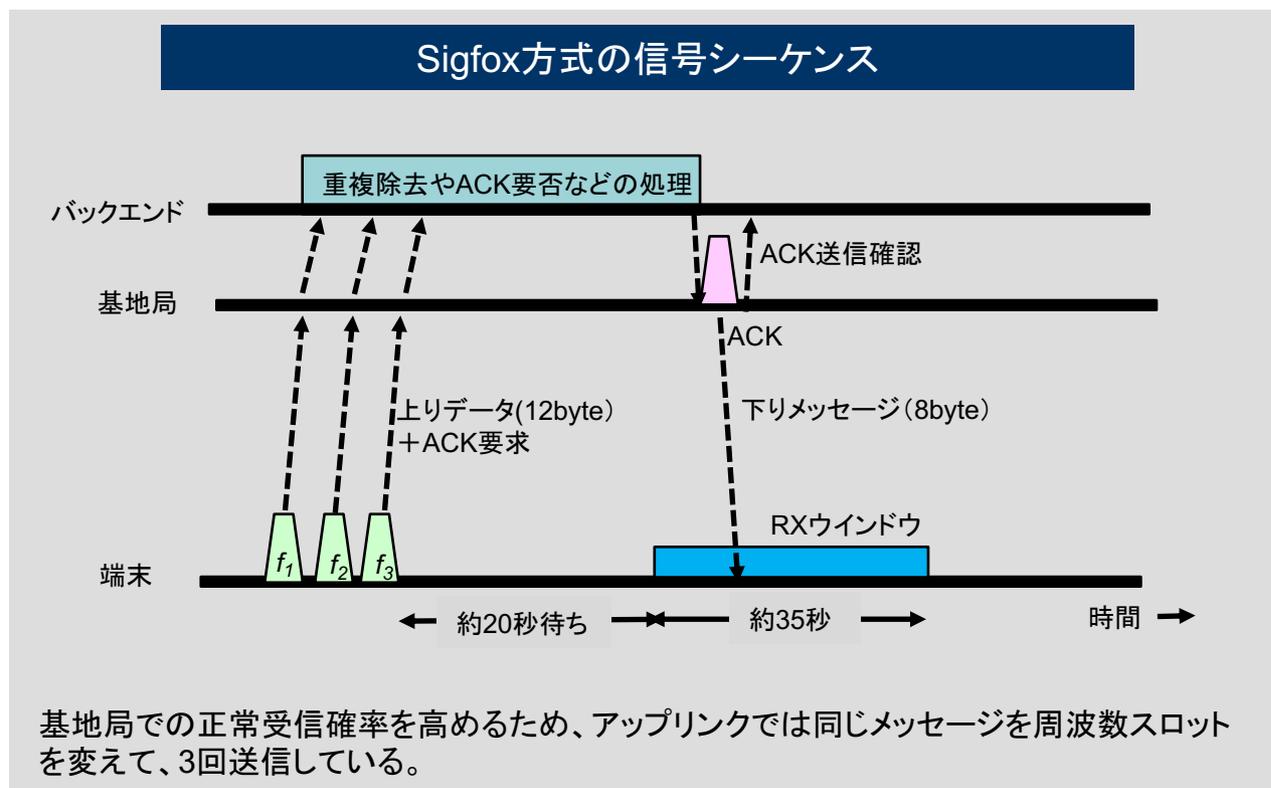
アップリンクは純アロハ方式によるランダムアクセスであり、端末は任意のタイミングでメッセージを送信する。

Sigfoxでは、200KHz幅の帯域内にてランダムに選んだ3つの異なる周波数チャンネルを連続3回ホッピングして同一メッセージを送信する、時間と周波数ダイバーシチ効果の利用によって正常受信確率を高めている。

なお、1つあるいは複数の基地局が受信したメッセージは、そのままバックエンドに転送されるのはLoRaWANのGWと同様である。また、複数基地局で同時受信することで空間ダイバーシチ効果もあるとしている。

ダウンリンクにて受信確認(ACK)メッセージを返す場合は図のように、端末はアップリンク終了の約20秒後にダウンリンクチャンネルに切り替えて受信モードに入り、その後最大35秒間、基地局からのACKを待つ。このACKには最大8バイトのペイロードが載せられる。

ACKが受信できない場合は送信が失敗したと判断し、メッセージを再送する。





4. 他の方式

(4) Sigfox: 多重アクセス方式

下りは複数周波数を同時使用して複数端末に一齐送信

アップリンク、ダウンリンクでの周波数軸と時間軸上での多重アクセスのイメージは下図のようになる。#1～#4は4台の端末を示す。

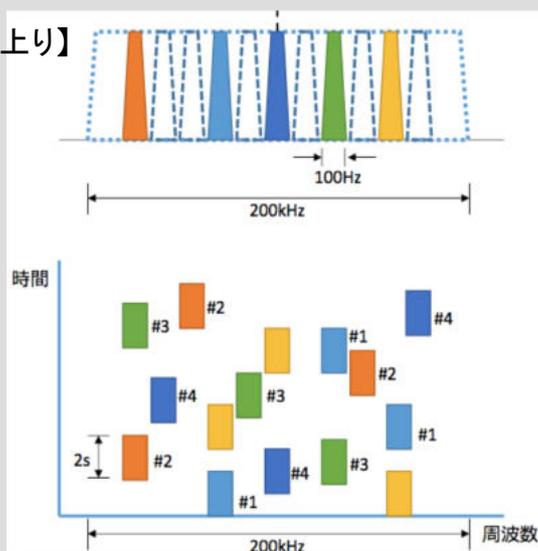
アップリンクでは、各々の端末はランダムなタイミングで2秒間のバースト信号の送信が開始され、周波数ホッピングを用いて3回(合計6秒間)送信される。

一方、ダウンリンクでは要求がある場合にのみ350ms長のバースト信号を宛先端末向けに1回送信する。その際、バースト信号は、複数の周波数スロットを使用し、同時に複数端末宛てに一齐送信する。時間軸上でみたバースト間隔は、この場合、30秒以上としている。

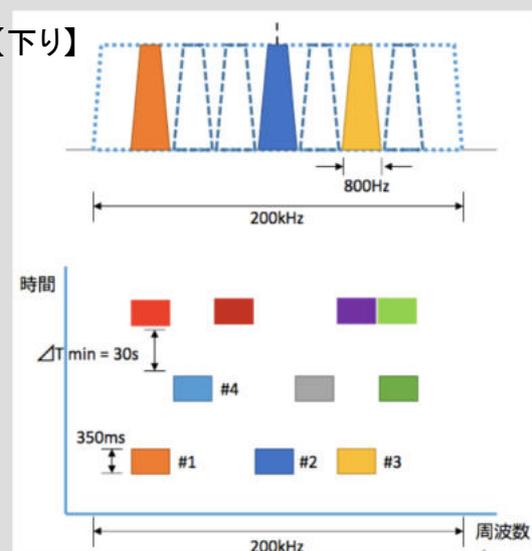
基地局も端末同様に、送信機から受信機への回り込み防止のため、送受を切り替えて運用している(とみられる)。そこで基地局が送信する時間は受信不能となるが、バースト送信時間や送信時間間隔を考慮すると無視できるだろう。

Sigfox上下リンクでの多重アクセスのイメージ

【上り】



【下り】



総務省 情報通信審議会作業班資料920作1-2-3 (KCCS, 2016.11)より

上りはアロハ方式により、任意のタイミングで送信が開始され、3つの異なる周波数スロットをホッピングして同メッセージを3回送信。下りは要求がある端末宛てに、複数周波数で複数端末同時に送信。



4. 他の方式

(5) Sigfox: フレーム構成

アップリンクのペイロード長は最大12バイト、ダウンリンクは8バイト

アップリンク(端末からGW)、ダウンリンク(GWから端末)のフレーム構成を下表(カッコ内はバイト数)に示す。

アップリンクの先頭32ビットは同期用のプリアンブル信号である。プリアンブルに続くフレーム同期信号は送信開始通知やネットワーク識別に用いる。アップリンクでの通信データを収容するペイロード容量は最大12バイト(8,6,4も可)である。

一方、ダウンリンクはアップリンクにて要求がある場合のみ、主に端末の設定変更や制御用に送信され、それらの制御データを収容するペイロード長は最大8バイトである。

1端末あたりの最大送信回数は、アップリンクは140回/日、ダウンリンクは4回/日としている。この最大送信回数は欧州ETSIによるデューティサイクル制限をグローバル統一仕様としている。

Sigfox方式のフレーム構成

【アップリンク】

ヘッダ (10バイト)			ペイロード (最大 12 バイト)	フッタ (4バイト)	
プリアンブル (4バイト)	フレーム同期 (2バイト)	デバイスID (4バイト)		HMAC	FCS

【ダウンリンク】

ヘッダ (17バイト)			ペイロード (最大 8 バイト)	フッタ (3バイト)	
プリアンブル (91ビット)	フレーム同期 (13ビット)	デバイスID (4バイト)		HMAC	FCS

センサ等からのアップリンクで送信できる情報は最大12バイトである。

秘密鍵により生成するハッシュを用い伝送途中の改ざんを防止

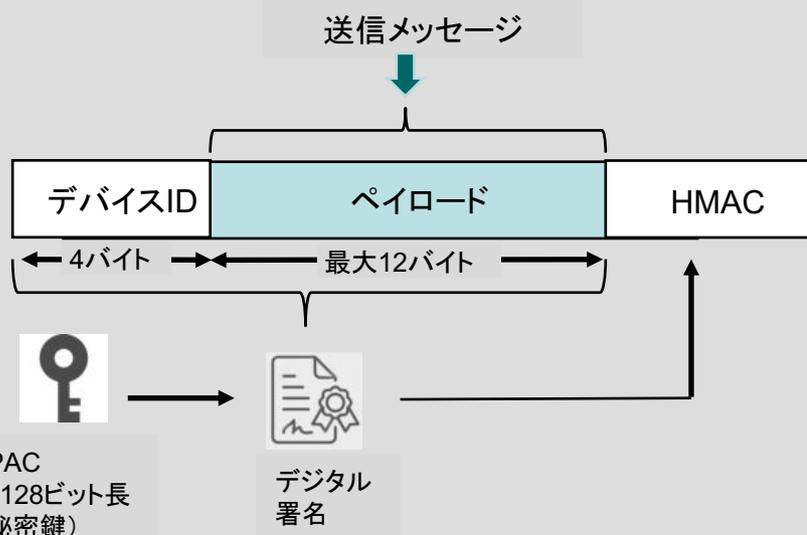
デバイスの認証はアップリンクのヘッダ一部分にあるデバイスIDとペイロードに対して適用されるデジタル署名によって行われる。

送信側では送信メッセージに対してPAC(Porting Authorization Code)と呼ぶ128ビット長の秘密鍵と暗号ハッシュ関数(H)とを用いてデータ完全性チェック用のハッシュ情報(HMAC)を生成し、送信メッセージの末尾に付加して送信する。

受信側では、送信側と同様、受信メッセージ内のデバイスIDとペイロードに対してPACとHから計算されたハッシュ情報を受信メッセージ内のそれと比較することでデバイスの一意性の判断とともにデバイスとバックエンド間での改ざん有無を検出する。

一方、デバイスとアプリケーション間の暗号化はユーザに委ねられており、ペイロードの最大サイズの制限内であれば暗号化を実装してもよいとしている。

Sigfoxセキュリティ方式(デバイスとバックエンド間)



デバイスとバックエンド間は「PAC」鍵を用いて改ざんを防止している。
 デバイスとアプリケーション間は、ユーザの秘密鍵を用いた暗号化が可能である。その場合、通信事業者はユーザの秘密鍵をもたないのでメッセージの解読は不可となる。



4. 他の方式

(7) ELTRES: 無線方式の諸元

アップリンクの受信感度が最も高いが、GPS受信が必要

ソニーが開発した方式であり、2019年 10月に日本国内でのサービスを開始した。

デバイスからサーバー方向へのアップリンクのみの一方向通信であり、基地局（受信局）とサーバー等の網設備の設置や運用はソニーが行なっている。

ELTRES方式は、欧州標準化機関であるETSIにて、ETSI TS103 357でのLfour familyとして標準化されている。

ELTRESでは、シャノン限界に近い誤り訂正能力を有するLDPC符号や、同じパケットの繰り返し伝送などを用いることで受信確率を高め長距離伝送を可能にしている。また、端末の省電力化を図ることで、送信頻度にもよるが多くの利用形態ではコイン電池1個でも動作可能としている。

時速 100km 以上で移動する列車等でも通信が可能であり、ハンドオーバーにも対応している。ただし、低受信強度下でも受信できるように、GPS信号を受信して時刻同期をとる必要があるため、屋外での利用が前提となる。

ELTRESの伝送方式諸元

デバイスからのアップリンク	
周波数帯	920MHz帯
送信電力	20mW
一次変調方式	$\pi/2$ シフトBPSK
二次変調(多重化)方式	チャープ変調
誤り訂正符号	LDPC符号 注1)
ペイロード長	128ビット
送信方式	0.4秒以下のパケットを4回繰り返し送信
受信感度 注2)	-142dBm

注1) LDPC: Low Density Parity Check

注2) 受信感度: 受信機にて受信可能となる最小受信電力

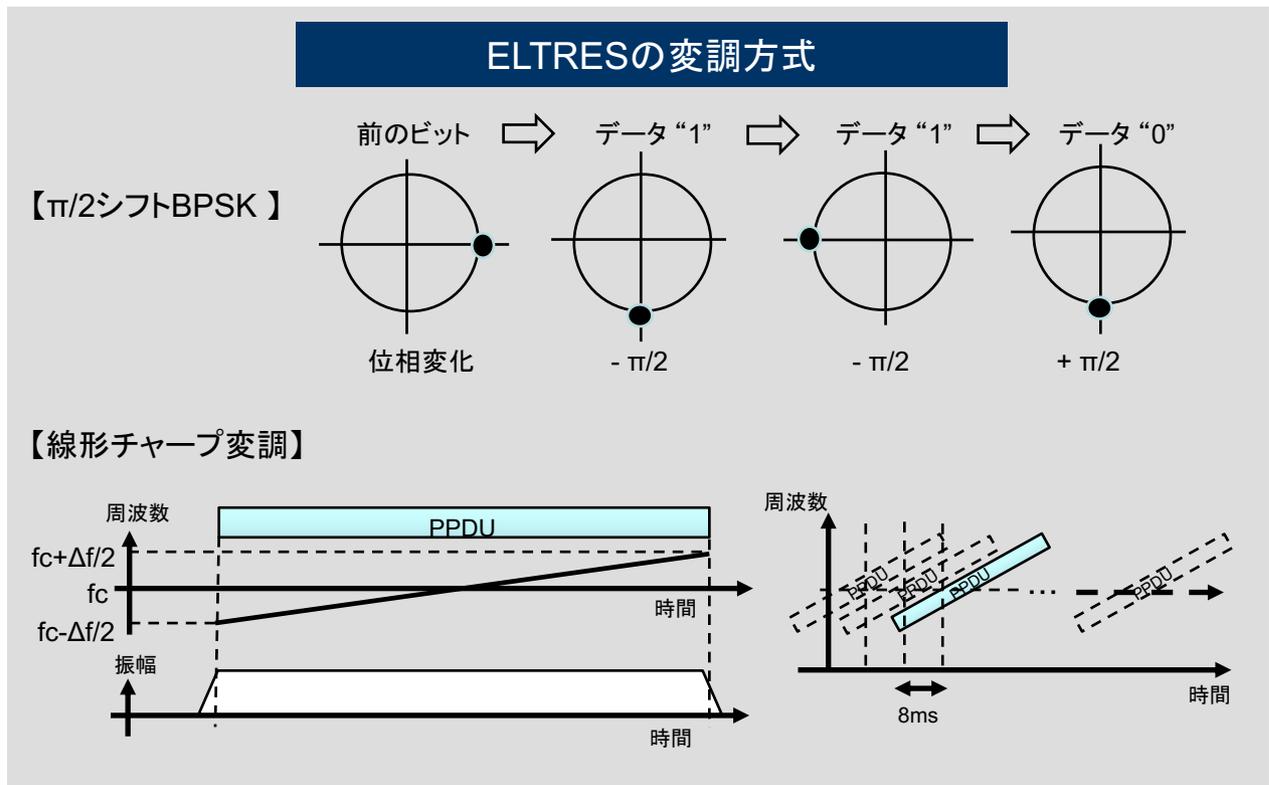
π/2シフトBPSKとチャープ変調を使用

ELTRESでの変調は、1次変調にπ/2シフトBPSK、2次変調(多重化)に線形チャープ変調を用いている。

BPSKでは、送信データの“0”, “1”に搬送波位相の“0”, “π”の2相を対応させるが、π/2シフトBPSKでは、隣り合うタイムスロットの位相差がπ/2となるようにする。データ“0”では、前ビットの位相にπ/2を加え(進ませ)、反対に、データ“1”では、前ビットの位相からπ/2を減ずる(遅らせる)。

このようにすることで、変調に伴う搬送波振幅の変化が抑えられ、包絡線が一定に保たれる。また、位相同期が不完全でも直前シンボルとの位相差だけ見て復調が可能という長所がある。

線形チャープ変調は、搬送波の周波数が時間とともに直線的に変化するものでLoRa変調でも使用されている。ELTRESでは、約0.4秒のバースト送信時間に、周波数 f を中心として $(f_c - \Delta f/2)$ から $(f_c + \Delta f/2)$ まで Δf だけ周波数を単調増加させる。中心周波数が同じチャープ信号を時間軸上でずらすことで、多重アクセスが可能となる。



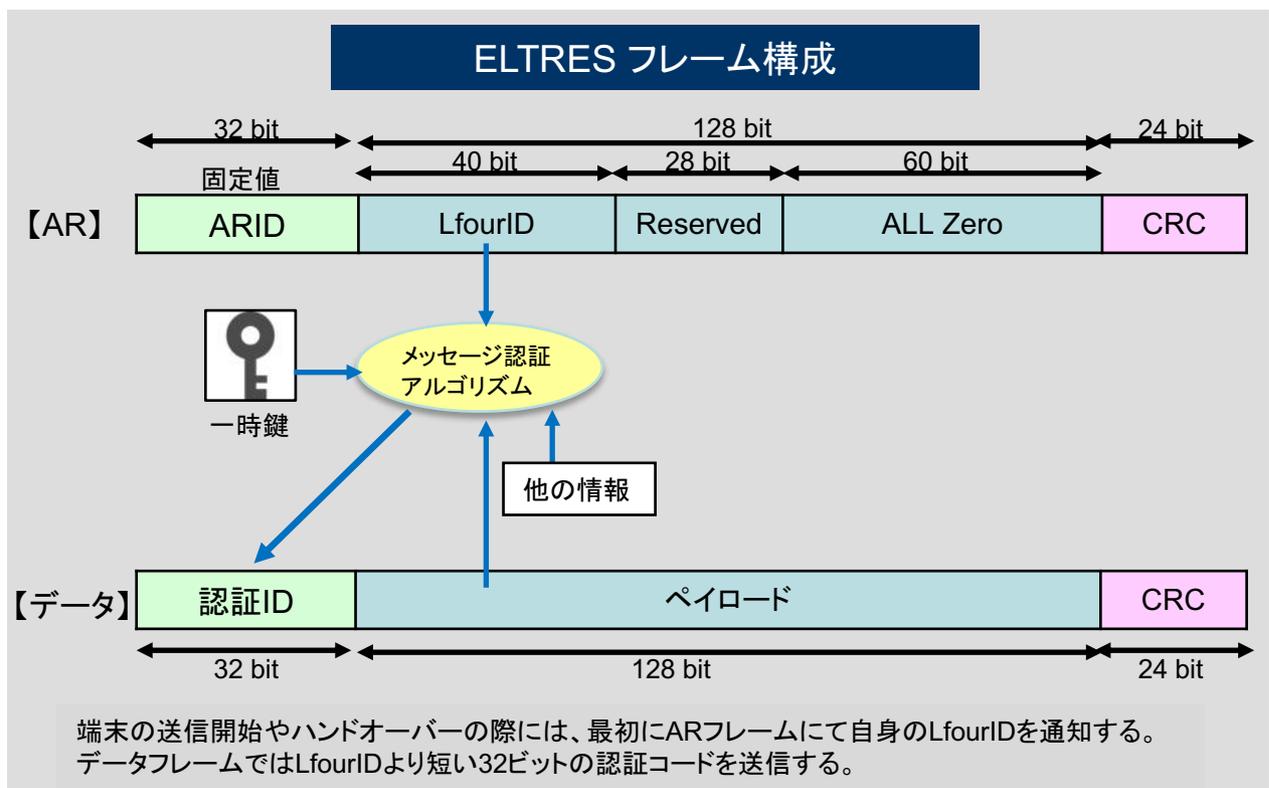
ARフレームは認証やハンドオーバーに用いられる

アップリンク信号には、データ送信に用いるデータフレームと、データ送信に先立ってデバイス認証に用いるAR (Association Request) フレームがある。

ELTRESでは独自の端末識別子である40ビット長のLfourIDで端末を管理している。そこで、端末は通信開始やハンドオーバーの際には、最初にLfourIDを含んだARフレームを、端末IDや契約情報を管理する(セントラル)サーバーに通知し認証を得る。

データフレームの送信では、メッセージ認証アルゴリズムにて、LfourIDと送信ペイロードに一時鍵を適用して生成される32ビット長の認証IDと、24ビット長のCRCを付加することで184ビット長のMACデータ(MPDU)を生成する。

このデータフレームでは、LfourIDが異なると認証IDが異なるので、基地局ではARフレームで受信したLfourIDと比較することで端末の同一性を確認するとともにデータ完全性をチェックする。



4ホップまでのマルチホップが可能

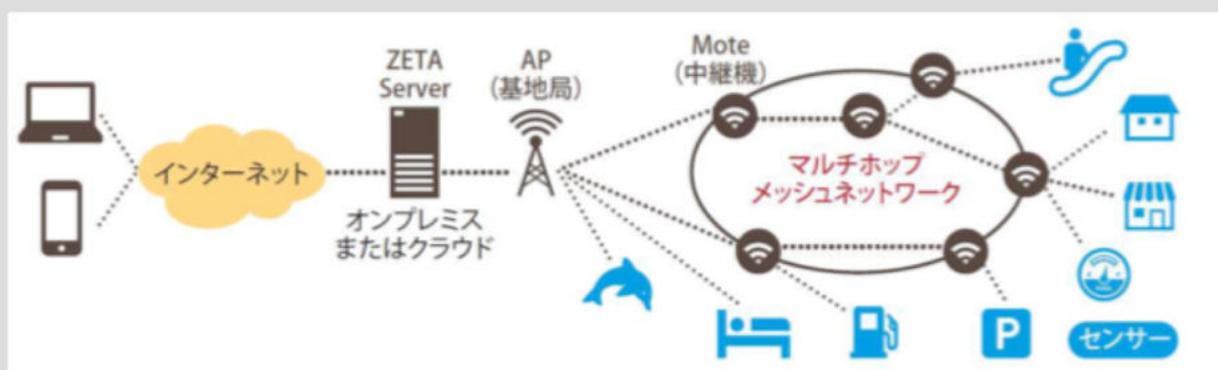
ZETA方式は2013年に英国で創業のZiFiSense社が開発した独自方式であり、中国に続き日本でもZETA Allianceを組織して普及が始まっている。特に、日本では、凸版印刷がZETA通信モジュールを製造している。

ZETAの変調方式は2相FSK(または2相GFSK)を用いて、チャンネル幅は2kHzと狭く、また、周波数ホッピングすることで干渉を軽減している。

ZETAデバイスのデータはZiFiSense社のサーバーにて管理されるため、自前のサーバーの設置は不要である。

通信速度300bit/sでの受信可能な限界受信電力(受信感度)は-130dBmであり、Lora WAN(SF12運用の場合)やSigfoxに比べて多少劣っている。しかし、1ホップで到達できない場合には、電池駆動の中継器を合計3台まで用いることで最大4ホップのマルチホップ通信が可能であるため、森林などの遮蔽物が多い環境でも適用できると考えられる。

ZETA



凸版印刷サイトより

最大4ホップまでのマルチホップのメッシュアクセスにより、ネットワークの自動構成機能を有する。



4. 他の方式

(11) Weightless-P

TDD方式を用い、ダウンリンクでのFOTAも可能

Weightless-Pは製造を担当する台湾本拠のUbiik社などにより、英国に本部があるSIG (Special Interest Group) が仕様を策定した方式であり、2018年より日本での評価キットが販売されている。

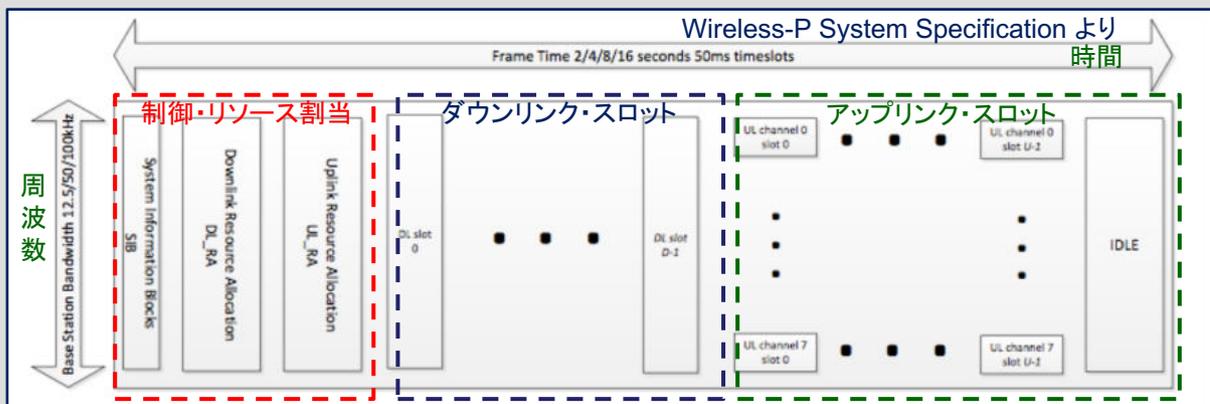
Weightless-Pは、FDMA/TDMA方式を採用することで、待ち合わせのないダウンリンクが実施でき、基地局からのマルチキャストによる端末ファームウェアの更新(FOTA)も可能としている。

また、上下リンクを同じ周波数を用いて切り替え運用するTDD方式を用いており、上下リンクの切り替えタイミングを通信需要に応じて設定することができる。

LoRaWAN同様、拡散信号を加えることで拡散利得を得ており、レート1/2FECと8倍の拡散率を使用した場合、アップリンクでの伝送速度は625bit/s, 受信感度は-135.5dBmとなる。この値はLoRaWAN(SF12)より若干悪いがZETAより良好である。

Weightless-Pの伝送諸元とフレーム構成

	アップリンク	ダウンリンク
周波数帯	920MHz帯 (日本の場合)	
変調方式	GMSK, OQPSK	
FEC	なし, レート1/2 畳み込み符号	
(物理層)伝送速度	0.625, 1.25, 5, 10 kbit/s	6.25, 12.5, 50, 100 kbit/s
拡散率	1, 4, 8	
(最高)受信感度	-135.5dBm	-122.5dBm



【主な参考文献】

1. LoRa Alliance サイト <https://lora-alliance.org>
2. 3GPP サイト <https://www.3gpp.org>
3. Sigfox サイト <https://www.sigfox.com/en>
4. ARIB STD-T108, 電波産業会
5. 「LPWAに関する無線システムの動向について」, 2018.3, 総務省移動通信課
6. ETSI TS 103 357 LTN Protocols, v1.1.1, 2018.6
7. 「LoRa Modulation Basic」, AN1200.22, Semtech
8. 「IoTネットワークLPWAの基礎」, 鄭立, リックテレコム
9. 「アンライセンスバンドを使用するLPWA規格の最新動向」, 高橋ほか, 電子情報通信学会誌, No5, 2019
10. 「SIGFOXネットワークのご紹介」, 総務省情報通信審議会作業班資料, KCCS, 2016.11
11. ELTRESに置くIDの運用方法, ソニーセミコンダクタソリューションズ, 2019.3
12. ZETA無線通信モジュール TZM901シリーズ, 凸版印刷
13. Weightless-P System Specification V1.0.3, Weightless, 2017.11

【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」
「進化を続けるモバイル無線方式」など。

(以上、A2A研究所ウェブサイト www.a2a.jp にて公開中)

