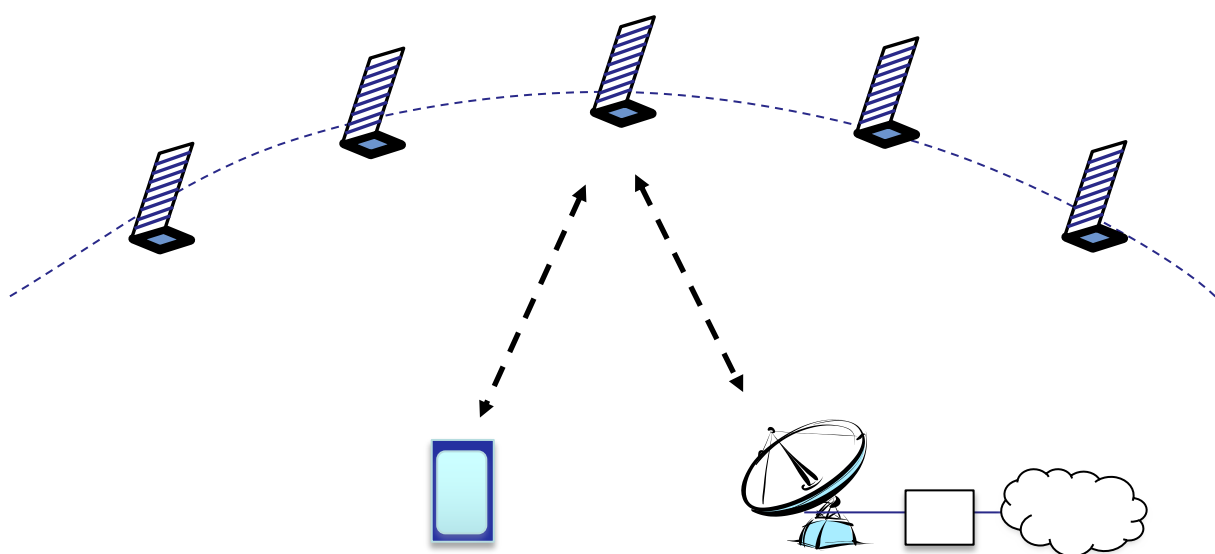


スマホから衛星やHAPSへの ダイレクト通信



目次

1 衛星通信の新時代

衛星ダイレクト通信	3
衛星軌道の分類	4
衛星の高度と速度	5
衛星の軌道パラメータ	6
LEOコンステレーション	7
衛星電話を提供する衛星網	8

2 イリジウム衛星システム

イリジウム衛星	9
イリジウム NEXT衛星	10
通信方式	11
通信チャンネル	12
リンクバジェット	13
電話での通信手順	14
衛星内・衛星間ビームハンドオフ	15
ドップラー補正	16

3 SCS機能搭載衛星システム

Starlink衛星	17
Starlink第2世代衛星のSCS	18
日本からのアクセス	19
Starlink SCSのリンクバジェット	20
BlueWalker衛星	21

4 3GPPでの仕様検討

NTN(Non Terrestrial Network)	22
3GPPでのNTN検討課題	23
無線チャンネルの構成	24
システム情報	25
送信タイミングの制御	26
セル間ハンドオフ	27
フィーダーリンクの切替	28
HARQ機能の一部変更	29

5 HAPS

HAPS	30
成層圏の特性	31
SoftBank のSunlider	32
HAPSの無線周波数	33
フットプリント固定技術	34
NTTグループ等による研究開発	35



1. 衛星通信の新時代

衛星ダイレクト通信

地上携帯網向けスマホで衛星通信が可能に

近年、山岳部や僻地などの携帯電話不感地域を解消するために、地上携帯網のユーザ端末（以下、UEと呼称）から衛星網に直接アクセスできるようにするプロジェクトが進行している。これらのシステムやサービスはSCS (Supplemental Coverage from Space)やD2C (Direct to Cell)などと呼ばれている。以下ではSCS又は衛星ダイレクト通信と称している。

例えば、SpaceXのStarlink第2世代衛星ではSCS用の通信装置を搭載する。KDDI等のモバイル通信事業者(MNO: Mobile Network Operator)は当該衛星を利用して、緊急メッセージ伝送を手始めに低速データや電話サービスの提供開始を検討している。

実は20年以上前より数々の衛星にてSCSの導入が計画されたものの実用に至らなかった。他方、1998年に実用化された後、第2世代システムに移行しているイリジウムシステムはLEO衛星を用いて地上網向けとほぼ同じ小型軽量UEによる電話やメッセージ通信を提供しており、技術的にはSCSにて必要となるいくつかの機能を既に実現している。

下表では1990年代以降の地上携帯網とSCS関連衛星網の歴史をまとめている。次ページからはイリジウム衛星システムも参考にしううえでSCSの主な検討状況を概観する。また、最終章では同じく地上携帯網を補完するHAPSの開発について述べる。

衛星ダイレクト通信を巡る歴史

	地上携帯網	衛星網
1990年代	デジタル方式の携帯電話(GSM)の普及 公衆インターネットの開始 Windows95搭載パソコンの普及	イリジウム衛星システム運用開始 (当初計画より数年の遅延)
2000年代	3G方式でのモバイルインターネット 普及 地上電話網のオールIP化開始	GEO衛星使用の携帯端末導入の試行 と実用化の失敗(米AT&T等) ITUによるSCS用無線帯域の確保
2010年代	4G(LTE)によるモバイルインターネット の更なる拡張	旅客機や大型客船上のスマホからWiFi 経由でインターネット接続
2020年代	5G方式による産業等での多様な応用 やデジタルデバイド地域解消ニーズの 拡大	StarlinkやOneWebによるLEO網の開始 Starlink衛星等へのSCS機能搭載計画 HAPSの開発と実証実験

SCSは既に20年以上以前より検討が行われ、様々なシステムが試行されてきた。



1. 衛星通信の新時代

衛星軌道の分類

LEO, MEO, GEOなど

地球を回る衛星軌道には様々な種類がある。特に通信衛星の場合には、地上からの高度による次のような分類が行われている。

- | | |
|---|----------------------|
| ・低軌道 (LEO: Low Earth Orbit) | 高度2,000km以下 |
| ・中軌道 (MEO: Medium Earth Orbit) | 2,000kmから静止衛星軌道までの高度 |
| ・静止軌道 (GEO: Geo-stationary Earth Orbit) | 高度35,800km |
| ・高軌道 (HEO: High Earth Orbit) | 静止衛星軌道より高い軌道 |

なおGEOのうち軌道傾斜角が 0° の軌道をGSO、又はクラーク軌道と呼ぶ場合もある。衛星の軌道傾斜角による分類では、傾斜軌道、その特別な場合である極軌道などがある。

衛星の離心率による分類では、楕円軌道、その特別な場合である準天頂軌道やモルニア軌道などがある。

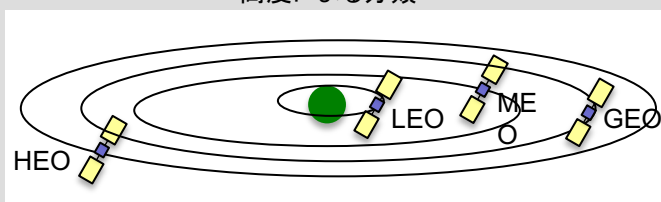
また、衛星の周期に着目した時には次がある。

回帰軌道：地球が1回転する間に整数回だけ周回する軌道（静止軌道はその特別な場合）

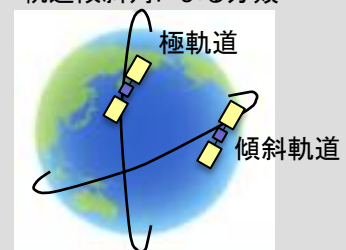
準回帰軌道：定数日の間に地球を複数回周回した後、元の地球上空に戻る軌道

周回衛星の軌道の分類

高度による分類



軌道傾斜角による分類



楕円軌道



モルニア衛星の軌跡（周期12時間）



通信衛星では、LEO, MEO, GEOといった高度による分類が最も広く使われている。



1. 衛星通信の新時代

衛星の高度と速度

衛星速度は周回半径の平方根に反比例して遅くなる

地球上の円軌道を周回する衛星の速度(v)は、地球重心に向かう引力(F_{in})と、反対方向の遠心力(F_{out})が釣り合うことから、次のようにして求められる。

ここで、mは衛星の質量、rは地球重心と物体の距離、 μ はケプラー一定数である。

$$F_{in} = m(\mu/r^2), \quad F_{out} = m(v^2/r), \quad \mu = 3.986 \times 10^5 \text{ (km}^3/\text{s}^2)$$

$$F_{in} = F_{out} \text{ から式を変形すると } v = (\mu/r)^{1/2}$$

また、周期(T)と衛星軌道半径(r_s)の間には、ケプラー第3法則(惑星が太陽を回る公転周期の2乗は楕円長軸の3乗に比例する)での惑星を衛星に、太陽を地球に置き換え、ケプラー一定数(μ)を入れると次の関係がある。

$$r_s = [\mu/(4\pi^2)]^{1/3} T^{2/3}$$

ここで、 r_s は地球中心と衛星間の距離(km)、Tは衛星の公転周期(秒)であり、静止衛星のTは平均恒星日の23時間56分である。

衛星の高度と速度

回転数/日	公転周期 T (秒)	軌道半径 r_s (km)	衛星高度 (km)	衛星速度 v(km/s)
16	5390	6640	262	7.75
15.5	5560	6780	404	7.67
15	5740	6930	554	7.58
14.5	5940	7090	713	7.50
14	6150	7260	881	7.41
6	14360	12770	6392	5.59
4	21540	16730	10355	4.88
2	43080	26560	20184	3.87
1	86160	42160	35786	3.07

地球を周回する衛星の速度は周回半径が大きくなるにつれ遅くなり、IridiumやStarlinkのLEOでは約7.5km/秒だが静止衛星では約3km/秒となる。



1. 衛星通信の新時代

衛星の軌道パラメータ

2行軌道要素形式 (TLE)

TLE (Two Line Elements) は、アメリカ航空宇宙局 (NASA) と北アメリカ航空宇宙防衛司令部 (NORAD) が使用している衛星軌道6要素を示すためのテキスト形式のフォーマットである。

TLEは1行69文字の2行からなり、次で構成される。

AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA (衛星名)

1 BBBBCDDEEEFFF GGHHH.HHHHHHHH +.JJJJJ-J +KKKKK-K L MMMMM

2 BBBB PPP.PPPP QQQ.QQQQ RRRRRRRR SSS.SSSS TTT.TTTT UU.UUUUUUUU
VVVV

このうち、軌道6要素に相当する次の6つの数値は次の文字で示される。

- ・軌道傾斜角(度) PPP.PPPP
- ・昇交点赤経(度) QQQ.QQQQ
- ・離心率(小数点以下の値) RRRRRRRR
- ・近地点引数(度) TTT.TTTT
- ・平均運動(回転/day) UU.UUUUUUUU
- ・元期における通算周回数 VVVV

TLEの例

2024.4.18時点

【STARLINK衛星の例】

赤枠内の数値は軌道傾斜角(°), 青枠内の数値は24時間の回転数

```
STARLINK-1007
1 44713U 19074A 24108.12594161 -.00021914 00000+0 -14528-2 0 9994
2 44713 53.0557 51.1633 0000818 102.8802 257.2279 15.06503069244518
```

【ONEWEB衛星の例】

```
ONEWEB-0012
1 44057U 19010A 24108.20082578 .00000170 00000+0 41163-3 0 9993
2 44057 87.9150 26.2373 0000962 79.9178 280.2062 13.16593379247485
```

【IRIDIUM衛星の例】

```
IRIDIUM 106
1 41917U 17003A 24108.40886266 .00000971 00000+0 33952-3 0 9999
2 41917 86.3970 58.9830 0002188 76.2945 283.8494 14.34223924379867
```

TLEには1日あたりの回転数や軌道傾斜角などの軌道6要素情報が含まれている。



1. 衛星通信の新時代

LEOコンステレーション

20年以上前にビル・ゲイツ等も目指した夢のプロジェクト

宇宙ベンチャー企業等により、数百～数千の小型衛星を約500～1400kmの上空に配置して、グローバルな衛星通信網であるLEOコンステレーションを建設する計画が進んでいる。

(コンステレーションとは星座を意味する。)

四半世紀前にもビル・ゲイツ提唱のTeledesic計画等による同様の動きがあったが、打ち上げコストが甚大であり実現しなかった。現在は新型ロケットの登場や多数衛星の同時打ち上げ、更には衛星機器の大量生産などによって衛星1基あたりのコストは飛躍的に低減した。

但し、ニーズが存在する地域にて1基のみでサービス開始できるGEO衛星に比べLEOコンステレーションは多数衛星の配置後に初めてサービス開始できること、地上から見た衛星位置変化に伴って、UEとの間で同一衛星内のビーム切替や衛星間のビーム切替が必要となるなどシステムは複雑であり通信ビジネスの成功には高いハードルがある。

2024年現在、最も先行するSpaceX社のStarlinkはサービスリンクにKu帯を利用し、UEには数十センチ程度の大きさの平面アンテナを用いて高緯度地域を除く地球全域の固定地点や洋上にて最大数十Mbit/sの高速データ通信を提供している。

OneWebもサービスリンクにKu帯を利用しており、720基の衛星で構成する初期システムはまもなくサービス開始の見込みである。一方、AmazonのKuiperはフィーダリンクとサービスリンクの両方にKa帯を使用する合計3千余の衛星配置を近く開始する予定である。

主なLEOコンステレーション計画

名称	OneWeb	Starlink	Telesat LEO	Kuiper	LeoSat
推進者	OneWeb	Space X	Telesat Canada	Amazon	LeoSat
地上高/傾斜角 (次期 ²⁾)	1200km/87.9°	550km/53° (340km ² ~614km ²)	1000-1248km	590km/33° 610km/42° 630km/51.9°	1400km
衛星個数 (初期 ¹ , 次期 ²)	720 ^{*1} (6372 ^{*2})	1584 ^{*1} (29,989 ^{*2})	1671	3236	78-108
周波数帯	Ku/Ka, V	Ku/Ka, V	Ka, V	Ka	Ka
備考	米国へのChapter11申請後、会社再建	Falcon9で1回に約60基を打ち上げ	ISL具備でGW局数の低減とE2E遅延を削減	Falcon9等の80機以上の打ち上げ機を予約済み	ISL具備 2019年11月に資金不足で活動停止

LEOコンステレーションには大きな技術的リスクがあるのに加え、事業リスクも高い。



1. 衛星通信の新時代

衛星電話を提供する衛星網

イリジウムやインマルサット等が提供

小型軽量なハンドヘルド型UEを利用できる通信衛星には、インマルサット衛星などの静止衛星やイリジウム衛星などの低軌道衛星がある。

これらは地上携帯網のサービスエリア外となる山岳、海洋、僻地等で広く利用されているのに加え、大地震等の大規模自然災害時に地上携帯網が被災した場合などでの非常通信手段としても利用されている。

電話音声符号化方式や回線多重化方式は、地上網オールIP化以前の方式を継承している。一方、携帯電話にLTE方式が導入される2010年代には電話交換設備や伝送設備のオールIP化が進み、端末から中央局設備までの全通信がIPパケット化されて処理されるようになった。

MSS(移動衛星業務)帯域を使用する衛星通信でも、中高速のデータ通信やインターネット接続ニーズに対応して、Ka帯やKu帯サービスリンクで小型平面アンテナを持つ移動端末や航空機や船舶向けの高速通信サービスの提供に注力しており、インマルサット新世代衛星対応向けGW局などは国内設置されている。

他方、日本国内UEとの間で電話サービスを提供するインマルサットやイリジウム等の衛星では、全て海外のGW局経由で地上網に接続されている。

衛星携帯電話サービスを提供する主なシステム

名称	イリジウム	グローバルスター	インマルサット	スラーヤ
衛星軌道	LEO	LEO	GEO	GEO
衛星高度	780km	1414km	35800km	35800km
運用衛星個数	66	24	5*	3
サービスリンク 周波数帯	L帯 (上下1.6GHz)	上りL帯(1.6GHz) 下りS帯(2.4GHz)	L帯 (上り:1.6GHz 下り:1.5GHz)	L帯 (上り:1.6GHz 下り:1.5GHz)
日本での UE提供者	KDDI, 日本デジコム	GlobalStar Japan	KDDI, 日本デジコム、 JSAT Mobile 等	SoftBank, 日本デジコム
備考	日本は米国GW局 経由で地上網に接続	日本は韓国とロシアの GW局経由で地上網に 接続	*)L帯は第3,4世代衛星 でカバー BGAN等の高速データ サービスはKDDI地球 局経由で地上網に接続	アジア等はThuraya-3 欧州等はThuraya-2 でカバー 日本はUAEのGW局経 由で地上網に接続

イリジウム衛星等を経由した衛星電話は海外GW局経由で地上網に接続されている。



2. イリジウム衛星システム

イリジウム衛星

極軌道によるLEOシステム

米国イリジウム社が運用する衛星システムであり、地上高780kmの極軌道を周回する合計66の低軌道(LEO:Low Earth Orbit)衛星にて全世界をカバーしている。6つの軌道面の各々に11個の衛星で構成しているが、設計当初の軌道面数は7,合計衛星数は77のため原子番号77の原子に由来してイリジウムと命名された。(66に設計変更後も同名称を継続使用)

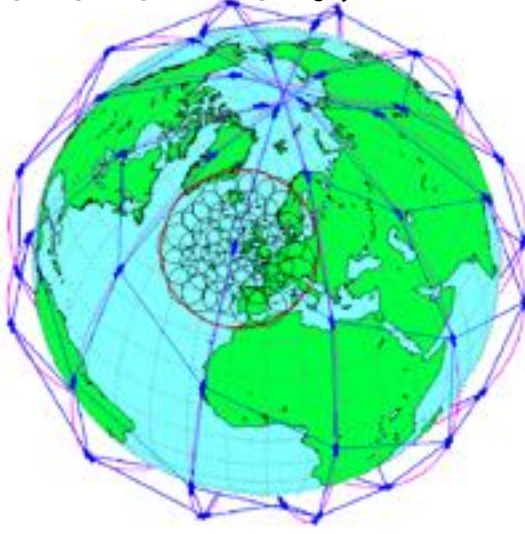
衛星とUE間リンク(サービスリンク)にL帯(1.6GHz帯)の周波数を使用して、地上携帯電話並みの小型UEによる電話やパケット通信、海上ブイ等のセンサからの小容量データ転送などが可能である。

イリジウム衛星システムでは、隣接する4個の衛星との間にクロスリンクと称するKa帯の衛星間中継リンク(ISL: Inter Satellite Link)を有しているため、1衛星のサービスエリアは直径約2千kmとGEO衛星に比べて狭いものの、地球上の多地点にハブ局を設置することなく衛星間中継を介してグローバル通信が可能である。なお、フィーダリンク(ハブ局-衛星間)にはKa帯を利用している。

イリジウム社はサービス開始間もなく事業運営に失敗し、日本の民事再生法にあたる米国チャプター11の対象となったが、その後、再建を果たすとともに、現在は第2世代システム(Iridium NEXT)に引き継がれ従来サービスの継続と新規サービス導入が図られている。

イリジウム衛星の軌道

ICAO TECHNICAL MANUAL より



【クロスリンクによる中継】



KDDIウェブサイトより

イリジウム衛星システムでは衛星間中継を用いることで、大洋や極地方にハブ局を設置することなく、これらの地域を含む地球全域で通信が可能である。



2. イリジウム衛星システム

イリジウムNEXT衛星

航空機航行支援用のHosted Payloadも搭載

イリジウムNEXT衛星はTales Arenia社により製造され、2017年1月から約2年間合計8回のSpaceX社Falcon 9ロケットによる打ち上げにより、第1世代衛星を置換する運用衛星66基と軌道上予備衛星9基の配置を完了した。この他に地上予備として5基を確保している。

イリジウムNEXT衛星では従来衛星で使用されていた端末でのサービスを継続可能とするとともに、高速データ通信や超低速のIoTサービスの拡充を図っている。

特に従来衛星では最大134Kbps迄だった高速サービスでは、上り最大512Kbps, 下り最大1.4Mbpsまでに拡充している。

また、イリジウムNEXT衛星では航空機航行支援サービスを提供する他システム向けのHosted Payloadを搭載している。

これは放送型自動従属監視 ADS-B(Automatic Dependence Surveillance-Broadcast) 受信機であり、GPS情報を航空機や地上基地局に発信することで操縦士は近傍の航空機の位置や移動方向等の情報を取得できるのでレーダー機能を補完できる。

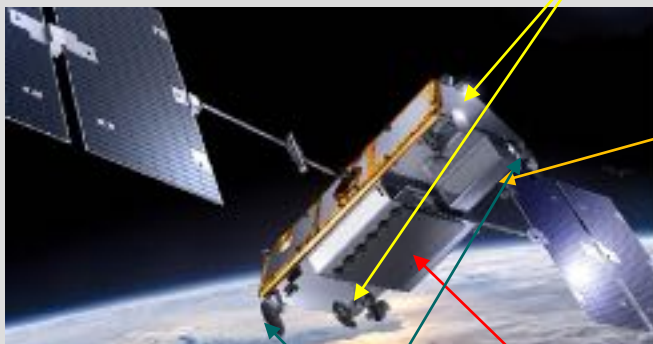
イリジウムNEXT衛星

【第1世代衛星の外観】



Ka-band Antenna L-band Antenna

【NEXT衛星の外観】



第1世代衛星ではL帯サービスリンクのアンテナビームは合計3枚のパネルで生成されていたが、NEXT衛星では一枚のパネルにて生成されている。



2. イリジウム衛星システム

通信方式

48個のスポットビーム

イリジウム衛星サービスリンクでは合計48個のスポットビームで地上セルを生成している。66基の衛星システム全体では合計セル数は3168となるが、特に極地方では多くのセルが重複するため、実際に運用するセルを合計2150に限定することで電力を節約している。

多重アクセス方式では、FDMAとTDDを組み合わせている。

すなわち、1.6GHz帯の10.5MHz幅に合計252波のFDMAチャンネルを並べるとともに、各FDMAチャンネルは8個のTDMAスロットをもつ90ms長のTDDフレームを構成している。なお、監視制御や単信通信用の一部チャンネルは8スロット全てが片方向のみになっている。

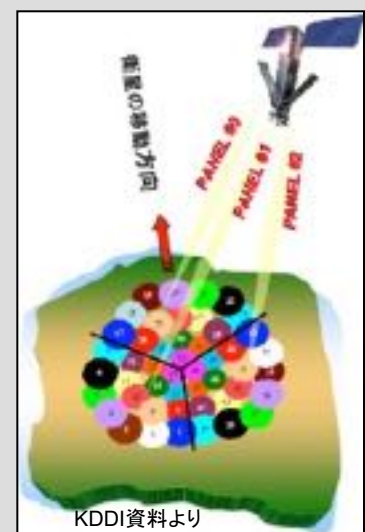
GW局と衛星間フィーダリンクは上り29.1-29.3GHz, 下り19.4-19.6GHzのKa帯が使用される。また、Ka帯(23.18 – 23.38GHz)のクロスリンクでは1/2畳込み符号FECつきQPSK変調の搬送波が25Mbpsの速度で伝送される。

サービスリンク、フィーダリンク、クロスリンク間の接続では、衛星中継器内のOBP(On Board Processor)による再生中継を行なっている。即ち、各リンクの信号を一旦復調した後、チャンネル編成替えと他リンクへの接続を行い、他リンクの変調/FEC方式を適用して送信している。

イリジウム衛星の主要諸元

項目	数値・諸元
ビーム数	48
サービスリンク	L帯: 1616~1626.5MHz (日本では1621.35~1626.5 MHzを使用)
フィーダリンク	Ka帯: 上り 29.1-29.3GHz 下り 19.4-19.6GHz
クロスリンク	Ka帯: 23.18-23.38GHz
多重アクセス方式	FDMA/TDD
中継方式	再生中継

【衛星ビームのイメージ】



合計48個のスポットビームがあるが、極軌道によるカバレッジの重複や隣接セル間干渉を考慮して、実際に使用するチャンネルを限っている。



2. イリジウム衛星システム

通信チャンネル

FDMAとTDDを組み合わせて構成

多重アクセス方式にはFDMAとTDDを組み合わせている。

1.616 – 1.6265GHzの10.5MHz幅には31.5kHzの占有帯域幅を有する合計252波のFDMAチャンネルが41.7kHz間隔で配列されている。各FDMAチャンネルは同期用フレームと合計8個の通信用TDMAスロットによる90ms長のTDDフレームを構成している。

複信通信（電話）の場合、上下リンクに各1個ずつのTDMAスロットが組みで使用される。（合計4組）一方、リングアラート（下り）、放送（下り）、ACK返送（上り）や単信通信では単独のTDMAスロットが使用される。

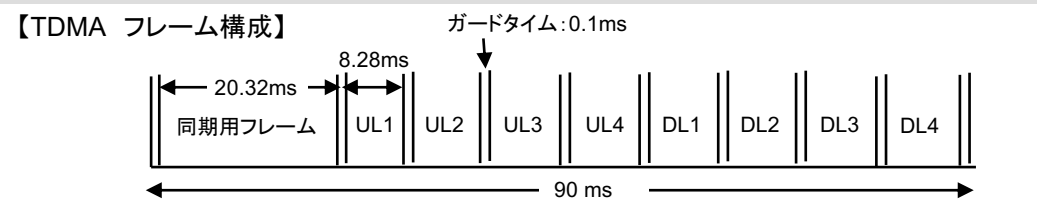
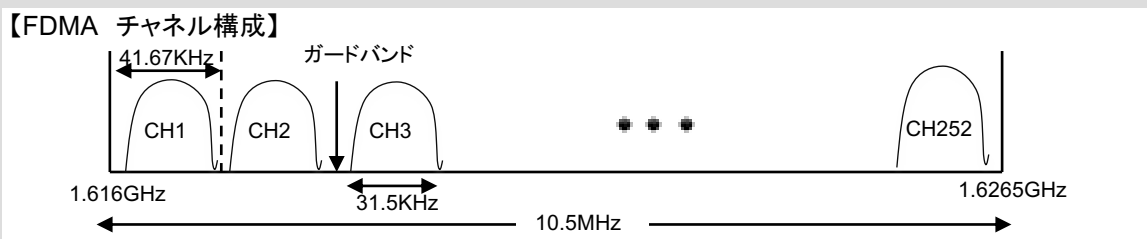
初期アクセス時のランダムアクセス信号等の変調方式にはDE-BPSK、トラヒック信号にはDE-QPSKの差動符号化を用いており、伝搬路状態の急激な変化で瞬間的な位相同期外れが生じた場合の位相同期確立を迅速に行えるようにしている。

1つのTDMAスロット長は8.28ms, シンボル速度は25kspsであるので、トラヒック信号用TDMAスロット1個には次式により414ビットが含まれる。

$$25k \times 2 \times 8.28ms = 414 \text{ bits}$$

なお、NEXT衛星では占有帯域幅590kHzにてQPSKと16APSK変調方式を使用した高速データ伝送も利用可能になっている。

イリジウム衛星のチャンネル構成



【通信中のTDMAスロット構成】 上下リンクで同一 合計414ビット

プリアンブル (32)	UW (24)	リンク制御 (46)	無線リンク制御 (56)	その他 (8)	ユーザペイロード (248)
----------------	------------	---------------	-----------------	------------	-------------------

電話の場合にはTDMAフレームにて、ULとDLの各1スロットを組みで用いる。



2. イリジウム衛星システム

リンクバジェット

約16dBのリンクマージンがある

イリジウム衛星向けUEは地上網のUEと同等の小型軽量であり電話やSMS等が可能である。

衛星高度は780kmと静止衛星に比べて低いのに加え、1.6GHz帯と比較的低い周波数を使用するため、衛星が直接見通せる戸外であれば地上携帯電話より多少大きい送信電力で極地方や大洋上を含む地球上の至るところで通話可能である。

これをリンクバジェットで見ると下表のようになる。

すなわち、最も条件が厳しいUE送信(衛星受信)アップリンクでも衛星見通しがある場合は約16dBの総合C/Nが得られる。そこで、FECを付加したBPSKやQPSK変調方式による低速デジタル変調では相当大きなリンクマージンにて通信できる。

一方、地上携帯網では、UEと基地局間の距離は最大数(から10)km程度と短いものの、地表面での散乱や建物や樹木による遮蔽、更には降雨による電波減衰の影響によって極めて大きな電波損失を受けるため大きなリンクマージンを確保している。

通信チャネルのリンクバジェット

モトローラ社資料より

【アップリンク】

項目	単位	数値
EIRP	dBW	-4.2
衛星受信アンテナ利得	dBi	24
伝搬損失	dB	160
受信雑音温度	K	500
受信雑音帯域幅	kHz	31.5
C/N	dB	16.4

【ダウンリンク】

項目	単位	数値
EIRP	dBW	27.7
UE受信アンテナ利得	dBi	1
伝搬損失	dB	160
受信雑音温度	K	250
受信雑音帯域幅	kHz	31.5
C/N	dB	28.3

【ISL】

項目	単位	数値
EIRP	dBW	38.4
衛星受信アンテナ利得	dBi	36.7
伝搬損失	dB	192.7
受信雑音温度	K	720
受信雑音帯域幅	MHz	12.6
C/N	dB	11.4

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)の条件であり、限界C/Nが0dB程度の場合は約16dBのリンクマージンがある。



2. イリジウム衛星システム

電話での通信手順

UEはSlotted ALOHA方式のバースト信号送信により通信を要求

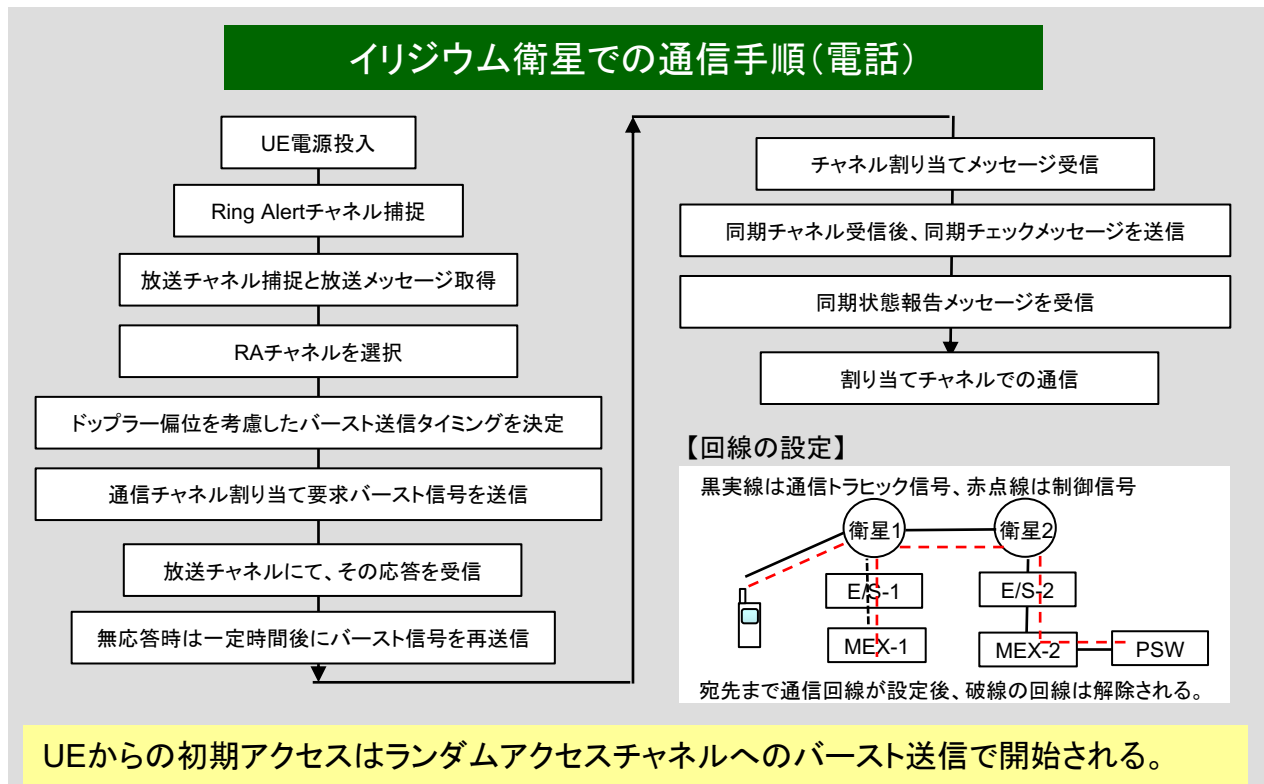
UE電源投入後は次のような初期アクセス手順を行う。

まず、GW局が1626.27MHzにて常時送信しているRing Alertチャンネルを捕捉する。ここでは、ビームID、放送チャンネル番号、衛星(直下地表面上)の緯度経度等を含んだメッセージが48の全ビームに周期4.32秒間の周期で順に繰り返し送信されている。

続いてUEは放送チャンネルにて各種のシステムパラメータを取得後、指定されたランダムアクセス(RA)チャンネル内にて、ドップラー偏位量の補正を行なった送信タイミングで通信リソース割り当てを要求するSlotted Aloha方式のバースト信号を送信する。

その後、放送チャンネルにて通信チャンネルの割り当て等の応答を受信し、続いて指定された通信チャンネルに移動して同期確立を行ない通信開始に至る。放送チャンネルで応答がない場合はランダム時間経過後に再度、Slotted Aloha方式のバースト信号による割り当て要求を行う。

発信UEの最寄り地球局(E/S-1)と配下の移動通信交換局(MEX-1)は認証等のアクセス受付を行うとともに当初は通信回線も引き込むが、通信宛先との間で通信回線が設定された後は、この引き込み回線の接続は解除(カットスルー)する。



UEからの初期アクセスはランダムアクセスチャンネルへのバースト送信で開始される。



2. イリジウム衛星システム

衛星内と衛星間でのビームハンドオフ

衛星内ビーム切り替えと衛星間ビーム切り替え

衛星の移動に伴って、地上のUEは送受信する衛星ビームを頻繁に切り替えるハンドオフが必要となる。

地球上の固定点で1個の衛星が視野に入る時間は各衛星によって異なるものの、平均して数分間、最大7分間である。

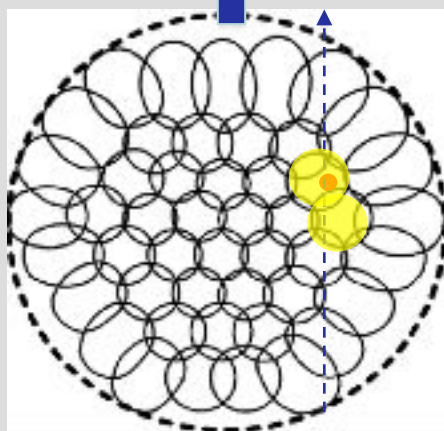
衛星の軌道上速度は約7.5km/秒であり、各ビーム直径は約400kmであるので、ビームの切り替えは約50秒ごとに行う必要がある。衛星内のビーム間の切替えはごく短時間に行われるため音声通信は継続され、通信断は生じない。

一方、1個の衛星全体は直径が約4千kmの円のカバレッジを有するので平均5分程度で後続衛星への切替が行われる。その際、通話中の通信には数百ミリ秒の瞬断が生じることから切り替え発生が認知されるが通話は継続できる。

しかし、後続衛星が視野に入らない場合には通信回線は切断される。

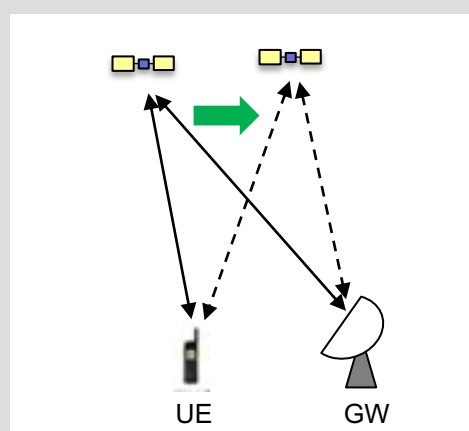
イリジウム衛星でのビームハンドオフ

【衛星内のビーム切替】



約4千km

【衛星間のビーム切替】



通話中には約50秒の間隔で衛星内のビーム切り替え、約5分の間隔で衛星間のビーム切り替えが行われる。



2. イリジウム衛星システム

ドップラー補正

ドップラー偏移量は最大40kHz

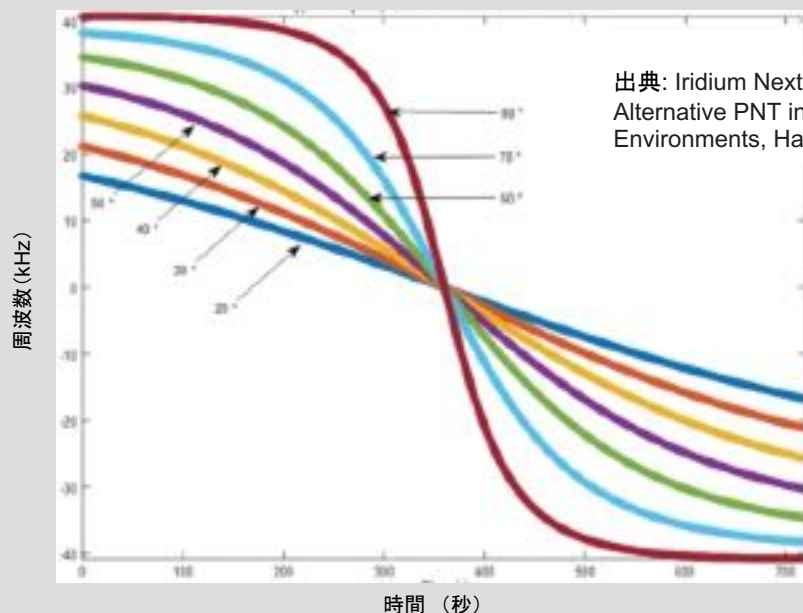
イリジウム衛星は秒速7kmの速度で地上高780kmの上空を移動するので、UEやGW局での受信周波数は衛星との伝搬距離の変動に伴うドップラー偏移を受ける。

固定地点のUEにおける1.6GHz帯サービスリンクでの周波数偏移量は衛星仰角によって異なり、伝搬距離の変動が最大となる時点で約40kHz/秒になる。そこで、UE受信機ではこの変動量に追従する性能が求められる。

また、衛星とUE間の距離が変化することにより信号の到着時間も変動する。そこで、通信開始時には次の手順でUEの送信周波数と送信信号タイミングを調整している。

1. UEはドップラー偏移量を考慮して補正した周波数でSlotted ALOHA方式のバースト信号をRA(Random Access)チャンネル内に送信
2. 衛星にて受信された当該信号の周波数と到着時刻の偏差をチャンネル割り当てメッセージに付加してUEに送信
3. UEは周波数とバーストタイミング補正を適用した同期チェック要求メッセージを送信
4. 周波数とバーストタイミング偏差が許容値内にあることを確認した旨を同期状態報告メッセージとしてUEに送信

仰角の違いによるイリジウム衛星でのドップラー偏移量の変化



衛星への初期アクセス時にドップラー偏移量とバースト送信タイミング偏差を補正する。



3. SCS機能搭載衛星

Starlink

Ku帯サービスリンクにて小型平面アンテナで高速インターネット通信を可能に

Space X社のLEOコンステレーションStarlinkは、地表面から約550kmの上空の傾斜軌道の上に多数の衛星を配置し、2021年から日本を含む世界全域で小型平面アンテナを持つUEを用いた高速インターネットの接続サービスを提供している。

使用周波数帯はサービスリンク(ユーザ局-衛星間)にKu帯、フィーダーリンク(ハブ局-衛星間)にKa帯を使用する。このうち、サービスリンクの周波数範囲は次である。

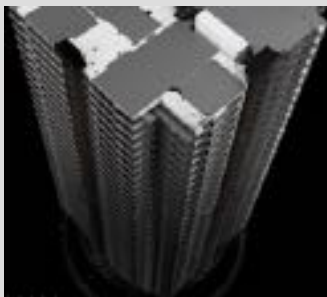
・サービスリンク周波数範囲： 上り 14.0-14.5GHz, 下り 10.7-12.7GHz

衛星側ではフェーズドアレイ方式の平面アンテナを用いて電氣的にビーム方向を制御して地表固定地点方向へのビーム追尾や照射セル切り替え時のビーム高速移動を行う。ユーザ局では多数の微小アクティブ素子がビームを生成するフェーズドアレイ方式の平面アンテナを用いている。

ユーザ局から見たLEO衛星方向は絶えず変化するため、静止衛星や他の非静止衛星との方向が近接する際にはこれらの衛星との間で電波干渉が生じる可能性がある。同社では、1)ビーム方向の制御 2)鋭い指向性のビーム 3)周波数再利用 によって他衛星への干渉回避を行うとしている。

Space XのStarlink

Starlink サイトより



板状の機体が約60個積み重ねられて、ロケット先端に収容される。各々はphased arrayアンテナや全電子化によって薄くなっている。



折り畳まれた太陽電池パネルは本体片側の1枚が展開。クリプトンガスを燃料とするホールスラストで軌道位置を制御。スペースデブリを見つけ追跡するOptical Trackerも搭載する。



極軌道と傾斜軌道の上に数千の衛星を配置する。パネルからの反射光による天文観測への支障軽減のため、サンバイザーを取り付けている。

SpaceXは高度550kmの初期衛星群に加え、高度340~614kmに合計で約3万基までの衛星群の配置を計画している。



3. SCS機能搭載衛星

Starlink 第2世代衛星のSCS

衛星にはSCS向けにeNodeB機能やISL機能を搭載

SpaceX社はSCS機能搭載のStarlink第2世代衛星V2 Miniを最大7500基、525,530,535kmの高度に2024年から順次配置する計画を米国FCC（連邦通信委員会）に申請していた。これに対しFCCは2023年12月、T-Mobileが米国地上網にて使用中の帯域をSCSに用いる当該衛星の打ち上げと軌道上試験を認可した後、2024年3月にはSCS規則を決定した。ここでは、一次業務の電波割り当てを受け運用中の他業務に干渉を与えないなどの二次業務としての条件下でSCSを認可している。

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。米国内ではT-Mobile社が使用中のPCS Gブロック帯の(上り)1910-1915MHz/(下り)1990-1995MHzである。

一方、日本では下表の帯域の使用を計画している。

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)
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 (衛星局内にeNodeB 機能搭載) 光ISL (Inter-Satellite Link) 搭載

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。



3. SCS機能搭載衛星

Starlink第2世代衛星SCSへの日本からのアクセス

総務省の研究会にて技術的条件を審議中

総務省の関係研究会では2024年、SpaceX社とKDDIによる資料提出にもとづきStarlink第2世代衛星を経由する衛星ダイレクト通信の技術的条件を審議している。

初期の衛星ダイレクト通信向けには次の周波数のうちの上下とも最大5MHz幅を利用する。
UE送信(衛星受信): 1920-1980MHz UE受信(衛星送信): 2110-2170MHz

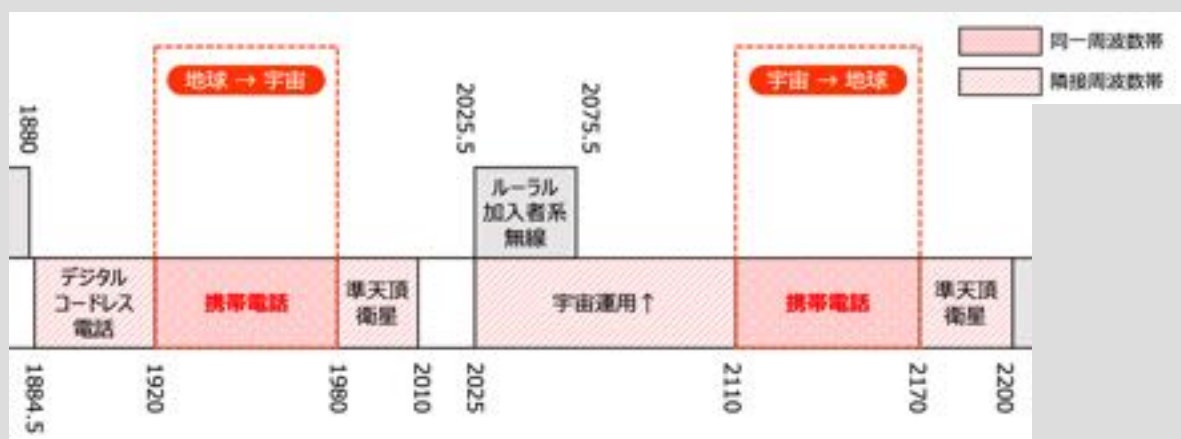
我が国では同帯域にて、DoCoMo, KDDI, SoftBankのMNO3社が上下とも20MHzづつを地上網に使用している。そこで、KDDIの場合は次の帯域内で使用することになる。

UE送信(衛星受信): 1920-1940MHz UE受信(衛星送信): 2110-2130MHz

そこで研究会では当該衛星ダイレクト通信の技術的条件とともに、次のような隣接する無線システムへの与干渉などを評価する。

- UE送信: デジタルコードレス電話、準天頂衛星の受信
- 衛星送信: 宇宙運用局,準天頂衛星向けUEの受信

衛星ダイレクト通信の周波数



総務省資料より

2GHz帯にて衛星ダイレクト通信の導入を可能とするため、総務省ではLEO衛星利用の通信システムの技術的条件や他の無線システムとの共用検討を行なっている。



3. SCS機能搭載衛星

Starlink第2世代衛星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(Supplemental Coverage from Space)では地上携帯電話網で使用中の4G(LTE)方式を使用する。

そこで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リソースブロックが使用されるようである。

最も厳しい上りリンク(UE送信、衛星受信)のリンクバジェットを概算すると下表のようになる。

すなわち、衛星への直接見通しがある場合は20dB以上の総合C/Nが得られる。

そこで、FECを付加したQPSK変調方式などであれば相当大きなリンクマージンにて通信できる。

衛星側では受信信号を復調したうえ、衛星間中継(ISL)伝送や下りリンクでの送信のために変調を行う再生中継を行うので、ベントパイプ型通信のようにリンクの多段接続によって雑音が増加することがない。また、衛星中継器内に基地局(eNodeB)機能を搭載することで、UE側での機能追加を最小限にできるだろう。

ISL伝送には地上(あるいは洋上)での多数の基地局設置が不要となる大きなメリットもある。

Starlink衛星 SCS通信チャネルのリンクバジェット試算

【アップリンク】

項目	単位	数値	備考
周波数	MHz	2000	
UE EIRP	dBW	-7	200mW, アンテナ利得0dBi
衛星受信アンテナ利得	dBi	38/34	ビーム中心/ビーム端
伝搬距離	km	550/650	同上
伝搬損失	dB	153/155	同上
受信雑音温度	K	500	
受信雑音帯域幅	kHz	180	
C/N	dB	26 - 20	

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。



3. SCS機能搭載衛星

BlueWalker 衛星

巨大アンテナで鋭いサービスリンクビームを生成し電子駆動

BlueWalker衛星はAST SpaceMobile社により推進中のSCS向けLEO衛星であり、AT&T, Google, Vodafoneや楽天などがパートナーとして出資や参加を行なっている。

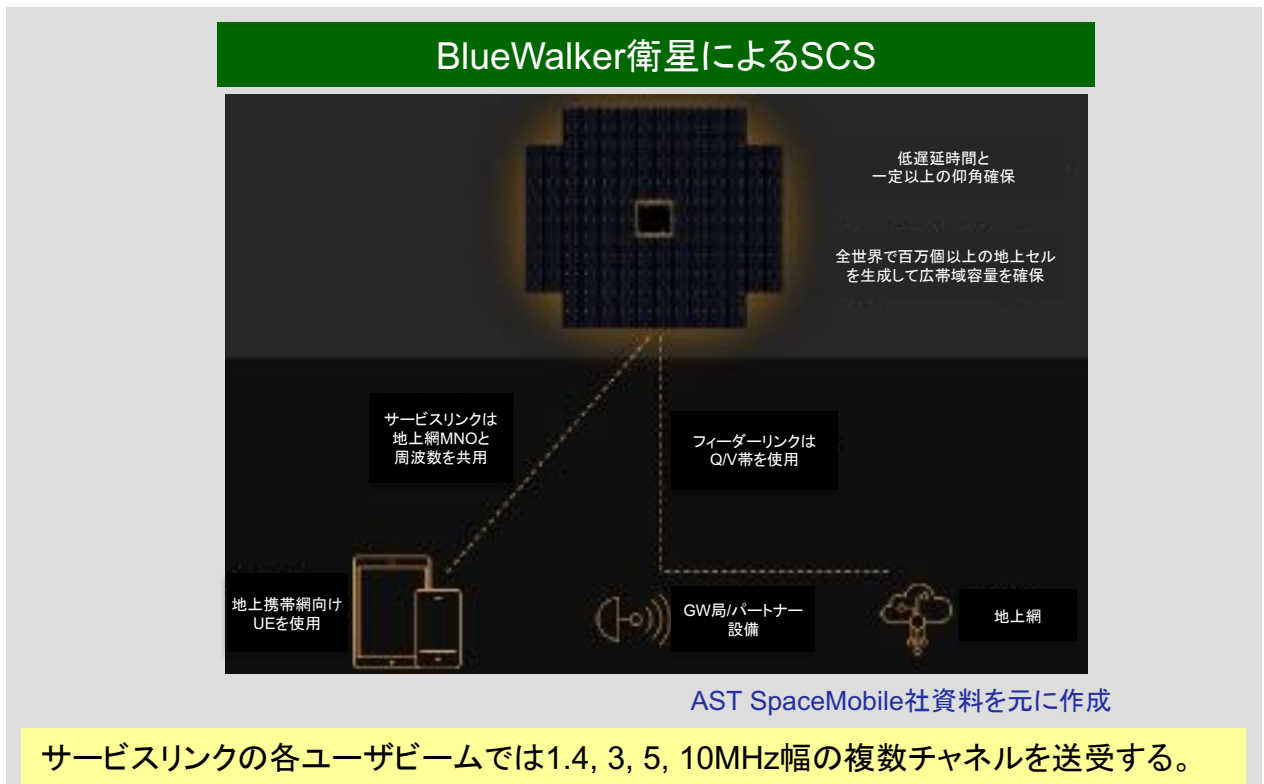
2023年打上げの実験衛星BleuWalker3(BW3)は25m四方の巨大なフェーズドアレイアンテナを有する。2023年4月には楽天モバイル等の上記4社が米国内にて市販スマートフォンからBW3経由で地上網との音声とデータ伝送の実験を行った。

米国FCCへの提出文書によるとBW3の主要諸元は次のとおり。

- ・衛星軌道： 地上高 375~425km, 軌道傾斜角 51~55° の円軌道
- ・(サービスリンク)周波数^{注)}： 上り 846.5-849, 845-846.5, 788-798MHz
下り 891.5-894, 890-891.5, 758-768MHz
- ・(フィーダリンク)周波数： 上り 49.2-50.2, 50.4-51.4GHz,
下り 37.5-42.0, 42.0-42.5GHz
- ・(サービスリンク)アンテナ利得： 最大36dBi

注) 2021年の総務省作業班資料では、日本での周波数は上り1730-1750MHz, 下り1825-1845MHz

AST社によると合計90機にて地球全体をカバーでき、2024年から4半期毎に数機から十機のペースで打ち上げを行うことで2026年の運用開始を目指すとしている。





4. 3GPPによる標準化

NTN (Non Terrestrial Network)

3GPPでのNTNの検討

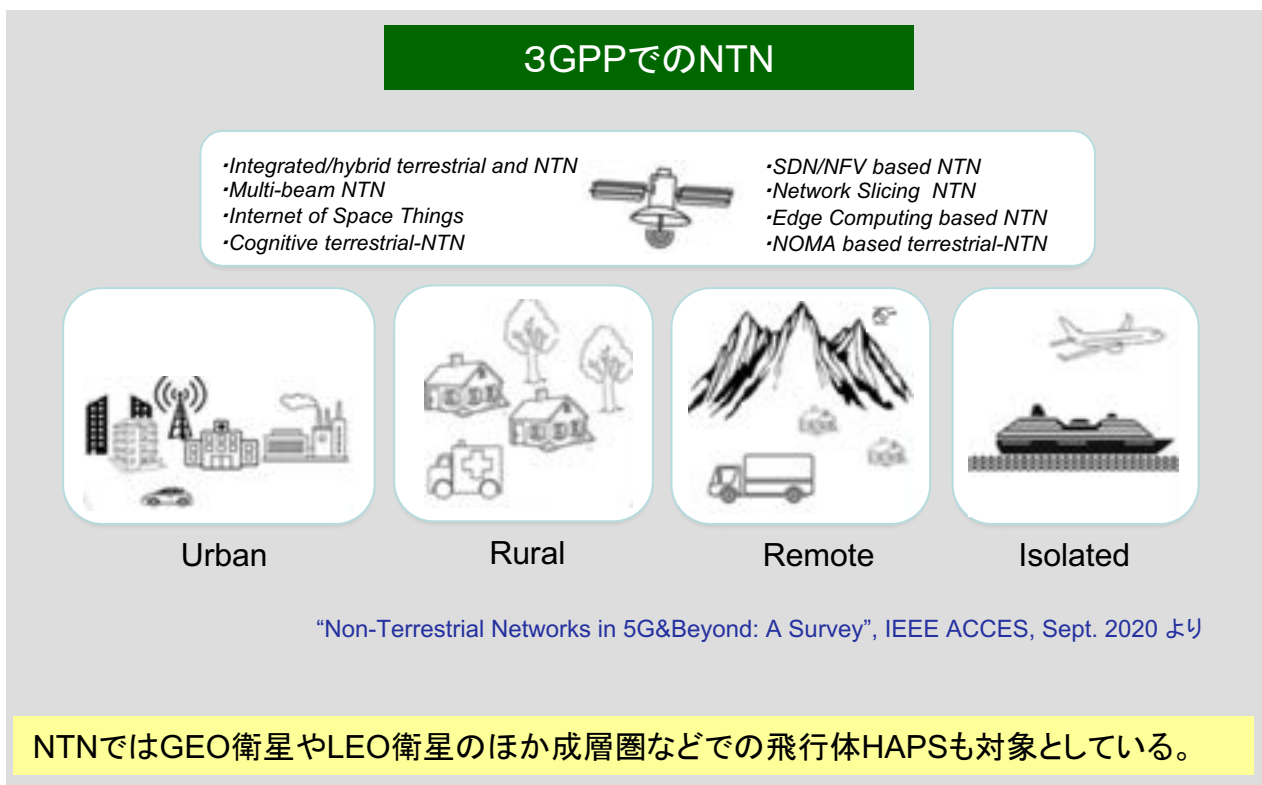
携帯電話の世界統一規格(第3世代方式)を定めるために各国の通信事業者やメーカーによって設立された3GPP(3rd Generation Partnership Project)は、以後も引き続いて新規格の策定を行なっている。

LTE方式を用いた第4世代仕様を拡張した第5世代システムでは人との通信に加えて広範な産業分野への応用を図っている。また、機械やモノの監視や制御に用いるIoT向け通信の仕様も策定している。

また3GPPでは、地上網ではカバーできない地域等にて地上系システムを補完する非地上網であるNTN(Non Terrestrial Network)の仕様策定を行なっている。

NTNはGEOやLEO衛星を主たる対象にしているが、成層圏通信プラットフォーム(HAPS: High Altitude Platform Station)も対象に加えている。

なお、衛星経由のIoTでは、すでにIridium等の衛星通信事業者が独自のサービス展開を行なっているほか、多数のスタートアップ企業や研究機関はLoRaWANやSigfox等のアンライセンス帯使用のLPWA(Low Power Wide Area)方式を小型衛星などで実験している。





4. 3GPPによる標準化

3GPP NTN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

NTNでは現在の地上モバイルの通信方式をベースに、NTNの特性を考慮した機能の追加や変更を検討している。

特に、NTN無線方式ではLTEの次のような方式や機能を用いることにしている。

- ・物理層 多重化方式: OFDM/OFDMAによる周波数多重化とRUベースのリソース割り当て
物理チャンネル: 放送、ランダムアクセス、制御、データ伝送用の各チャンネル
同期信号や参照信号(RS) (但し、RSの多くは省略あるいは簡略化する)
- ・MAC層/リンク層
リソースの割り当て要求からリソース割り当てまでの手順
RS受信測定結果のフィードバックを通じた変調方式・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

衛星回線では遅延時間が大きく、コマンドに対するレスポンスが遅れることなどを考慮した受信ウインドウの拡大や手順の変更が必要となる。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
	ドップラー	ダウンリンクでの初期同期
高度: 大	遅延時間: 大	HARQ
		物理層手順 (ACM, TPC)
		MAC/RLC手順
セルサイズ: 大	遅延時間の変動	ランダムアクセス応答でのTA
衛星中継器の特性	送信機の非直線性	PAPR
	位相雑音	PT-RS

TA: Timing Advance
HARQ: Hybrid ARQ

ACM: Adaptive Code & Modulation
TPC: Transmit Power Control

PAPR: Peak to Average Power Ratio
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。



4. 3GPPによる標準化

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第4世代以降の地上携帯網で使用中のLTEをベースにしており、衛星送信/UE受信の下りリンクはOFDM、UE送信/衛星受信の上りリンクには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には 5, 10, 15, 20MHzの4つがある。

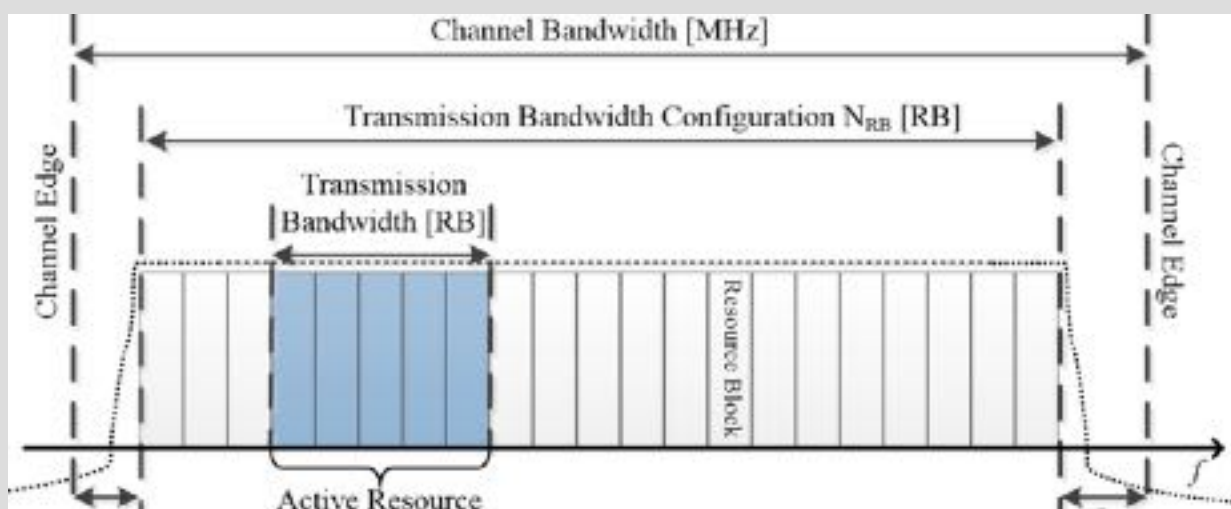
また、サブキャリア間隔(SCS: Sub-Carrier Spacing)として15kHz, 30kHz, 60kHzの3種類が定義されている。

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。



4. 3GPPによる標準化

システム情報

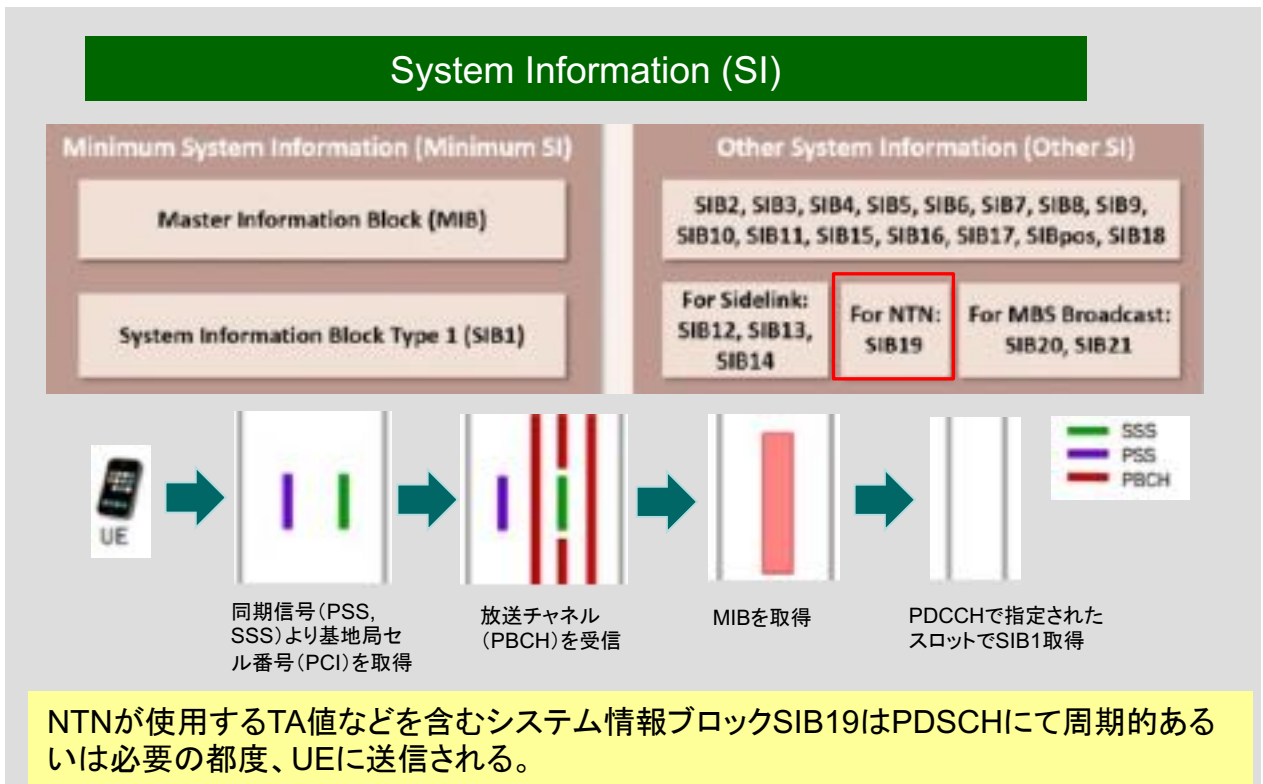
NTN向けにSIB19を定義

NTNのUEは初期アクセス時には地上網同様、下りリンクにて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)で構成されており、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。

現時点でSIB2からSIB21まで定義されているOther SIB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DLSCHでのRRC CONNECTEDモードを介して必要な都度、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。)





4. 3GPPによる標準化

UE送信タイミングの制御

TA (Timing Advance) 値など

NTNでは大きな伝搬遅延に対処するためUEでの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、基地局(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だけ前倒したタイミングでULに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。

この共通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。加えて、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

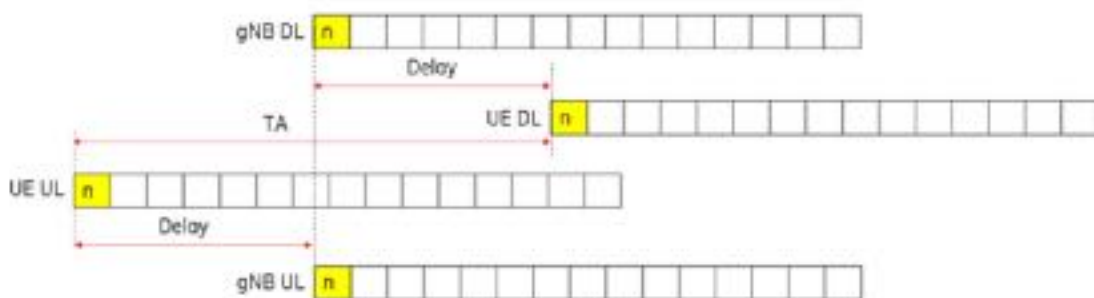


Figure 6.2.1-1: An illustration of large TA in NTN that results in a large offset in the UE's DL and UL frame timing

3GPP TS38.300 より

NTNでは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当該UEに対する基地局での送受信信号タイミングを揃える。

UE受信電力低下をハンドオフ条件にすることは難しい

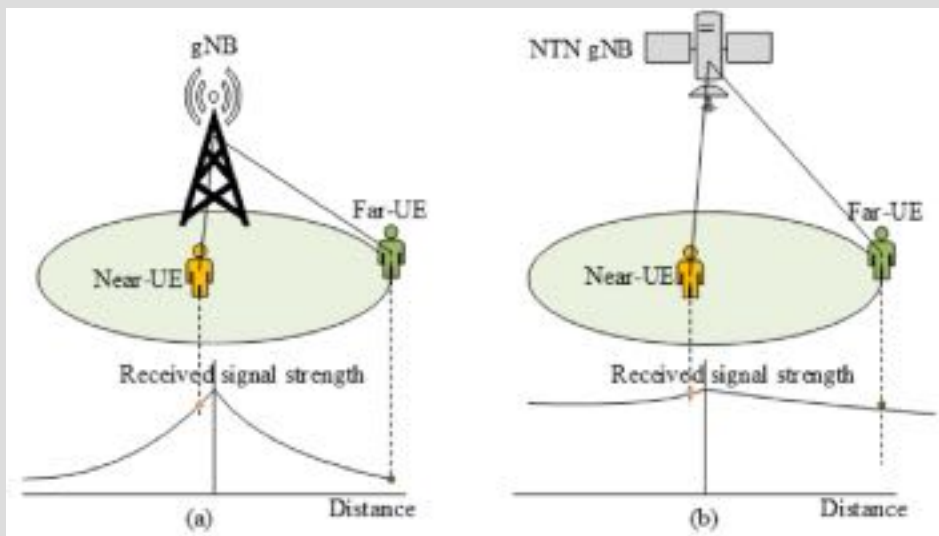
地上網ではセル中心部に比べてセル端では基地局送信基準信号の受信強度(RSRP: Reference Signal Received Power)が顕著に低下するので、UEはセル端にいることを判断できる。

しかし、NTNではセル中心とセル端での衛星からの伝搬路長の比は大きくないため、双方の地点での受信強度(のデシベル)差は大きくない。
そこで、2つのセルのオーバーラップ領域では各ビーム基準信号の受信強度を比較してより良いセルを区別することが難しくなる結果、双方のセル間でハンドオフが反復する「ピンポン現象」発生が起こりうる。

そこで、NTNでは地上網のようなRSRP測定をトリガ条件とするのではなく、SIB19にて報知されるLEO衛星の軌道位置情報などをもとにして、

- 1) UEと衛星間の距離を知り、セル端にいることを判断する「位置情報によるトリガ」又は
- 2) UEの所在エリアがサービスを受ける時間を考慮した「時間ベースのトリガ」を用いることを規定している。

セル中心とセル端での受信強度の相違(左:地上網 右:衛星網)



3GPP TR38.821 Figure 7.3.2.1 3-1 より

衛星網ではセル中心とセル端での受信強度のデシベル差は地上網ほど大きくない。

ソフト切替を行うことで切替中のGW-UE間の接続を維持

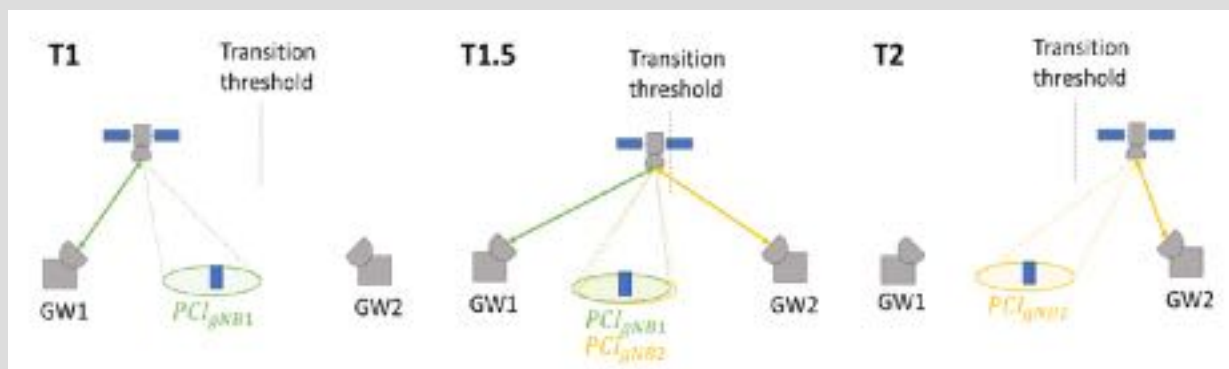
LEO衛星では衛星の移動に伴い、GW局と衛星間のフィーダリンクの切替も必要になる。

NTN回線を収容するフィーダーリンクをGW1からGW2に単純に切り替えるハード切替の場合には一時的に全てのUEとのRRCコネクションが切断されるため、接続中の全UEはフィーダリンク切替後にGW2に対して初期アクセスをやり直す必要が生ずる。

これを回避する解決策がソフト切替であり、同時に2つのGW局(GW1とGW2)との間で接続される時間(下図でT1.5)を経ることによりGW局とUE間のRRCコネクションを維持することができる。

ハード切替では切替の前後に大量の信号負荷が発生するが、ソフト切替においても相当量の信号負荷が生じる。そこで、これを削減するために初期アクセス時の手続きであるランダムアクセス手順を省略するRACH-lessハンドオーバーなどの手順が検討されている。

ソフトフィーダリンク切り替え



3GPP TR38.821 Figure 8.7.1.1-2 より

2つのGWフィーダーリンクがエリア内UEとの通信を同時に疎通する時間を設けることでフィーダリンク切り替え前後でUEとGW間の接続状態が維持できる。



4. 3GPPによる標準化

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ではトラフィックデータの誤り訂正にFECとARQを組み合わせたHARQ(Hybrid ARQ)を使用している。

HARQではFECによる誤り訂正が失敗した場合、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。受信側は保存データと再送された一部のデータを組み合わ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仕様では最大HARQプロセス数を16としている。

これを遅延時間の大きい衛星網に適用した場合、HARQプロセス数の制限のため連続送信可能なデータ数に限界が生じる。

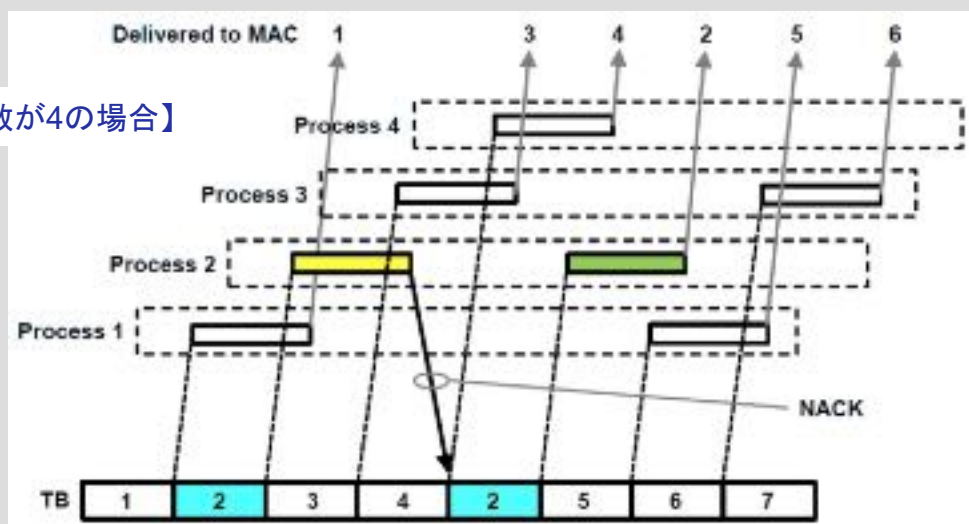
そこで、NTNでは次の対処を行うこととした。

- 1) 最大HARQプロセス数を16から32に増加する、あるいは、
- 2) 正常なデータ受信復号の正否を送信側に通知するARQフィードバック機能を無効化する

ARQフィードバック機能無効化はHARQプロセスごとに設定可能であり、重要通信ではこれを有効にすることで対処できる。

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。



5. HAPS

HAPS (High Altitude Platform Station)

成層圏で旋回する無人飛行機方式の開発が進む

HAPSはHigh Altitude Platform Stationの略称であり、「空に浮かぶ基地局」との間で地上ユーザに通信サービスを提供する無線局である。なお、ITUではIMT方式の基地局を搭載するHAPSをHIBS(High altitude IMT Base Station)とも呼んでいる。

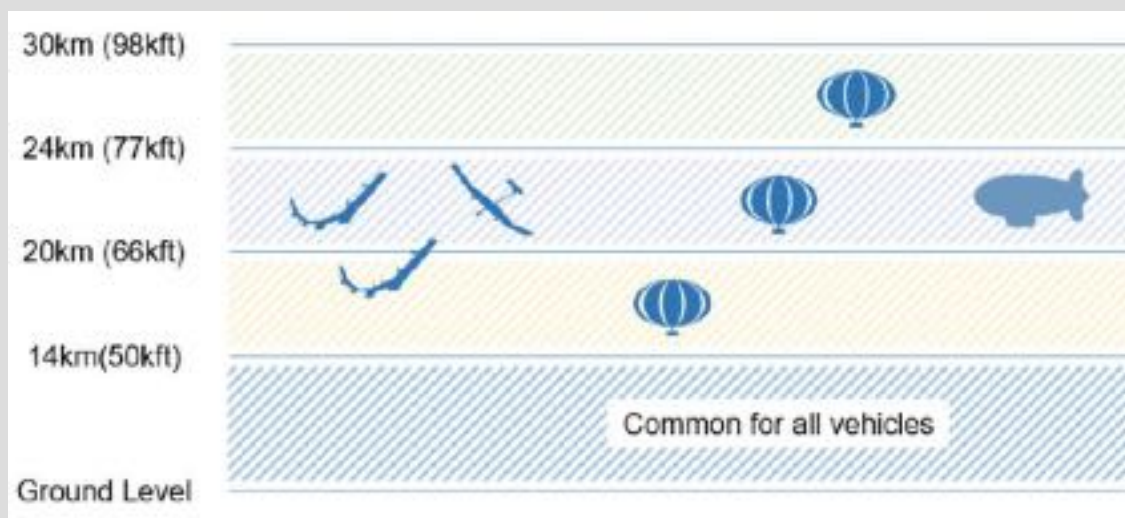
数十年以前には大型の無人飛行船や気球を用いた構想や実験が行われてきたが、いずれも実用化に至らなかった。近年はSoftBankやNTTグループが数十メートル長の主翼を有する無人飛行機に地上携帯網基地局設備を搭載して、成層圏内を周回飛行させて地上広域エリアをカバーする計画が進んでいる。

HAPSはNTN(Non Terrestrial Network)の一種であるが次の特徴がある。

- ・HAPS1機で数百km径のエリアをカバーできるので、島嶼や山岳部などで効率的なエリア展開が図られる。地上高が衛星に比べて低いいため回線設計等で有利である。
- ・長期運用には機体と搭載機器の小型軽量化や省電力化が不可欠である。特に、太陽が当たらない夜間は発電できないため太陽電池とバッテリーの性能向上が重要である。

緯度によって日照時間の変動があることから、SoftBankでは年間を通じて安定した日照時間が得られる低緯度地域からサービス提供を開始することを考えている。

HAPSの運用高度



HAPS Alliance資料より

気球や飛行船が実験されてきたが、近年は飛行機利用の方式の開発が進んでいる。



5. HAPS

成層圏の特性

高度20km付近は風速が最小だが大気密度が地上の1/14と低い

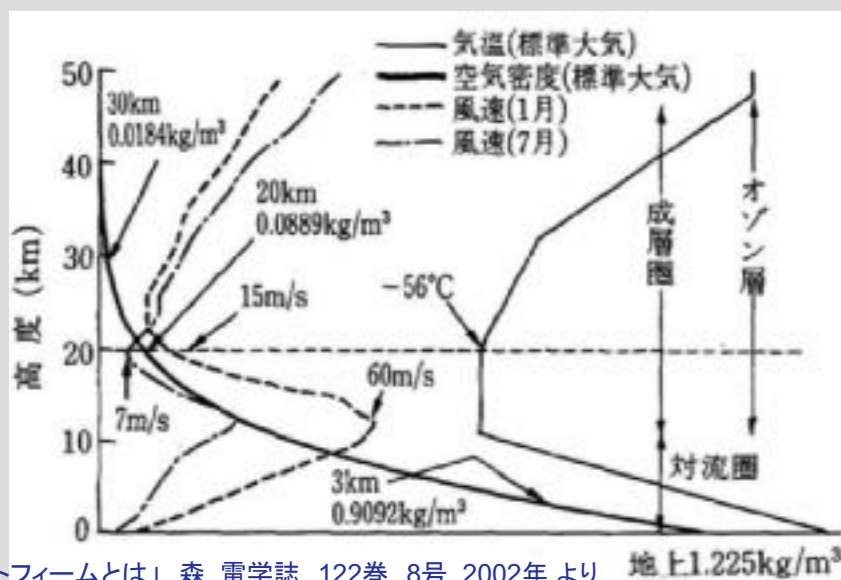
成層圏は対流圏の上にある高度50kmまでの領域である。

成層圏ではほぼ一定速度の風が吹いているが対流圏のような活発な気象現象はない。

高度20km付近では風速が最小であるが、大気密度は地表面の1/14程度であるため飛行体の揚力を確保できるギリギリの空気密度と考えられる。

風向きや風速は季節によって大きく変わり、冬は偏西風、夏は偏東風が優勢となり、風速は毎秒20~30mから強風時には毎秒70~80mに達することもある。

成層圏までの大気



「成層圏プラットフォームとは」 森, 電学誌 122巻 8号, 2002年より

高度が約20kmの空域では風速が最小であるが空気密度が地表面の1/14程度と低い。



5. HAPS

SoftBankのSunlider

翼長78mの無人飛行機

SoftBank子会社のHAPS Mobile社*)は2020年9月21日に初の成層圏におけるテストフライトを実施している。*) 2023年7月、SoftBankに吸収合併
約19キロメートルの高度で5時間38分の滞空を行い、自律型航空式HAPSと地上UEとの間でLTE通信実験を行なった。

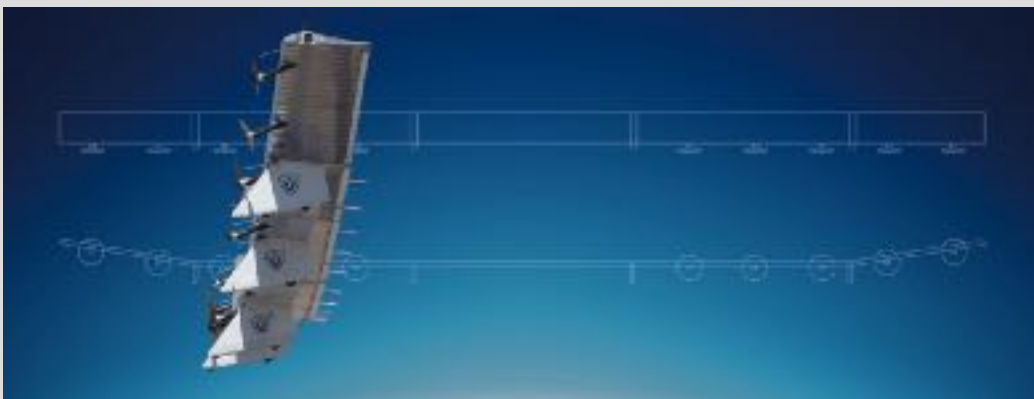
Sunliderと称する当該HAPSでは、次の搭載装置が新規開発されている。

- ・モーター： ソーラー発電のみで長時間飛行を可能とする軽量で高信頼
- ・バッテリー： マイナス70度の成層圏でも重量エネルギー密度が高いリチウムイオン電池
- ・通信装置： 小型軽量で旋回飛行する機体動作に対応したペイロード

HAPSに特有な技術が数多くあることから、SoftBankは商用化にむけた準備を加速するためHAPS関係特許を数多く所有する米Alphabet子会社Loonより出願中を含む特許約200件を取得している。

なお、SoftBank, AIRBUS, NOKIA, INTELSAT等はHAPS技術エコシステムの構築を図るため、2020年にHAPS Allianceを設立している。

Sunliderの外観



【主な諸元】 翼長: 78 m, 巡航速度: 110 km/h
バッテリー: 大容量リチウムイオン
滑空期間: 数ヶ月間

HAPS Alliance資料より

2020年に成層圏での初のテストフライトを実施し、地上UEとLTE通信実験を行った。



5. HAPS

HAPSの無線周波数

WRC23にてHAPS向け周波数分配を決定

HAPSを携帯電話基地局として利用する場合、これまでのITUの無線通信規則では、2GHz帯のみが規定されていた。しかし、世界中で広く携帯電話に使用中の700~900MHz帯、1.7GHz帯、2.5GHz帯をHAPSに利用することは認められていなかった。

2023年にドバイで開催された世界無線通信会議(WRC)では、NTN実現のための周波数確保の一環としてHAPS用無線周波数の新たな分配が日本提案によって次のように決議された。

- ・ 1.7GHz帯/2GHz帯/2.6GHz帯：全世界で可能に
- ・ 700MHz帯：アジアの一部の国を除く全世界で可能に

今後、世界の多くの国の地上網にて使用されている既存スマートフォンでHAPSとの通信の導入や整備などが進むことが期待される。

HAPSで利用可能な周波数帯



SoftBankプレスリリース(2024.1.26)より

2GHz帯のほか、新たに地上携帯電話が使用中の700MHz~2.5GHzの複数帯域にてHAPSの利用が可能になる。



5. HAPS

フットプリント固定技術

常時旋回するHAPSに同期して回転するシリンダーを介してアンテナを接続

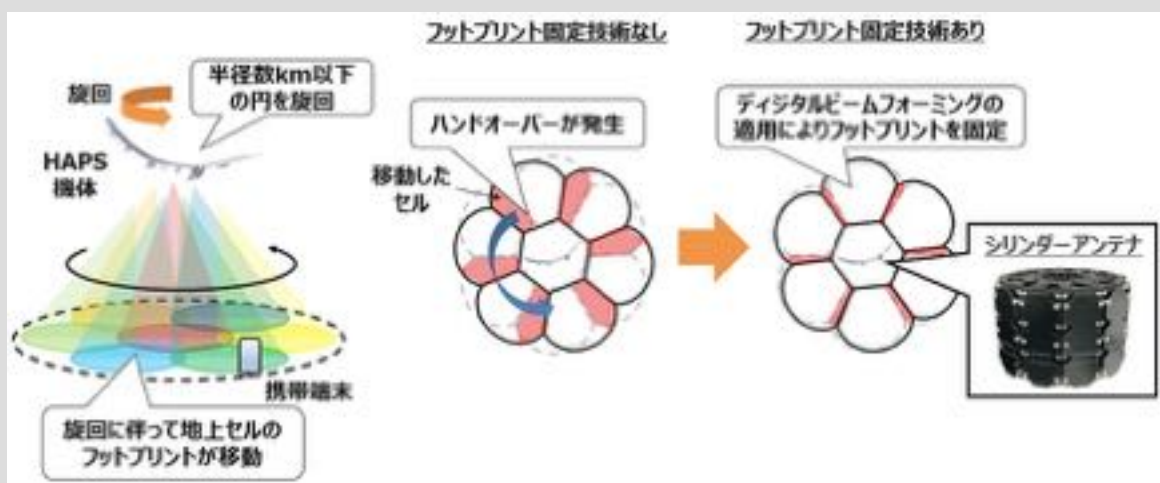
ソフトバンクは2023年3月の都内技術展でHAPS研究の最新動向を展示した。同展示では、HAPSが上空で旋回移動した際のハンドオーバーを防ぐ「フットプリント固定技術」の実証実験などについて紹介した。

HAPSは一定エリア上空を常時旋回するので、HAPSに固定した多素子アンテナが生成するセルの地表面位置の変化に伴いUEは絶えずセル間ハンドオーバーが必要になる。これを防ぐのがフットプリント固定技術であり、機体底部には旋回に合わせて逆回転するシリンダーを有する「シリンダーアンテナ」を使用する。当該アンテナを搭載した係留気球基地局での実験の中でその性能を確認した。

機体Sunliderはソーラーパネルと大容量リチウムイオンバッテリーを電源として約6カ月間飛行する。1台で直径200kmの通信が可能であり、合計30～40機で日本全国をカバーできるとのこと。

担当者によると、複数機体を飛ばした場合のリスク検証や、成層圏飛行に関する法律および国際的な取り決めなどの後、2027年までに国内での実用化を目指すとしている。

フットプリント固定技術



SoftBankプレスリリース(2002.6.22) より

HAPSには多数の新規技術の研究開発が必要になっている。



5. HAPS

NTTグループ等による研究開発

HAPS通信回線での効率的な通信方式等を開発予定

NTTとスカパーJSATが設立したSpace CompassもNTTドコモとともにHAPSの研究開発を進めている。

同社は2023年12月、NICT公募の次の研究開発項目の受託などにより、HAPS通信技術の研究開発を加速し、HAPSを介した携帯端末向け直接通信システムの早期実現を図っていくと発表した。

- ・ HAPS のサービスリンクの多重化による高速大容量化技術
- ・ HAPS のフィーダリンクにおける柔軟に切替え可能な GW 局との通信方式による高速大容量化技術

本研究開発では、2025年度までに国内成層圏環境でのHAPS通信サービス実験を行い、2027年度までにHAPSサービスリンク、フィーダリンクにおける研究開発成果の統合実証実験を行う予定としている。

Space Compass等が受託したNICTの研究開発項目

提案課題：HAPSを介した携帯端末向け直接通信システムの早期実用化と高速大容量化技術の研究開発

<本開発の全体概要図>

Space Compass 報道資料(2023.12.7)より

HAPSでの通信技術として、MIMOアンテナやサービスリンクでの多重化等を開発する。



【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)