

周波数資源

— 不動産としての周波数 —

我々の周りの空中には、TVの送信機、携帯電話のアンテナ塔そして衛星から目に見えない無線電波が飛び交っている。目に見えないのは、我々の眼が明白な理由からいわゆる可視スペクトルすなわち光の波長領域を検知するように発達してきたからである。

これらの無線電波、TVからの光、そしてマイクロ波、熱、紫外線などの他の数多くの現象は、殆どの人々が理解している以上に共通点が多い。それらは全て電磁波スペクトルの一部であり、無線スペクトルの超長波から、我々の眼に感度のある小さな(可視光の)窓を間に含めて、X線、ガンマ線の超短波にいたるまで連続している。

今日、確立されている衛星通信の分野では、無線電波の生成は依然として重要であるが、現在の一番の課題は、より短い波長、逆に言えばより高い周波数の利用にある。

周波数帯域

世界最初の人工衛星スプートニクが打ち上げられた1957年10月、スプートニクはその存在を、アマチュア無線や世界中の専門家のイヤホンに「ビー、ビー」という象徴的な音で知らせた。これらの音を生成した無線電波の周波数は、我々がVHF(very high frequency)として知る周波数帯の下端である約20MHzと40MHzであった。

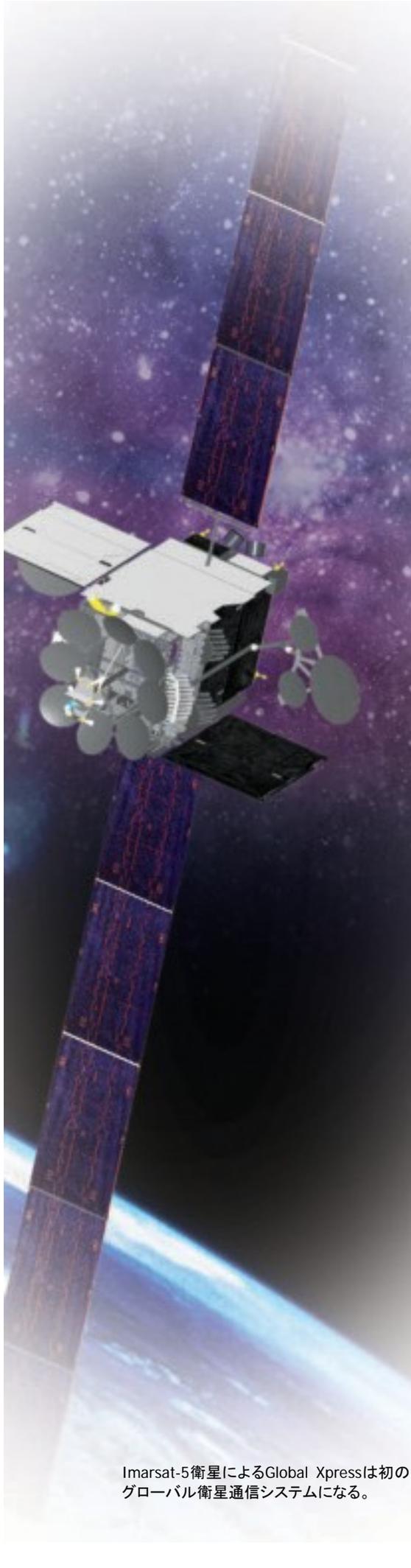
それ以来、主に地上の伝送システムとの干渉を避けるため、衛星や他の宇宙機は、徐々に、MHzの領域よりさらに高いGHzの領域の周波数を使用するように開発されてきている。

この領域のスペクトルはいくつかのサブバンドに分けられてきている。例えば良く知られたC帯、Ku帯などである。これらのサブバンドは衛星通信に使用される周波数の開発の歴史をある程度示している。

電話の幹線やケーブルTV分配局へのTV伝送など商用の固定受信衛星通信サービス用に広く開発されて来た最初の周波数帯はC帯である(IEEEの定義では、4-8GHzの範囲)。この周波数帯の開発の推進理由は、衛星や地上局のハードウェアの製造が比較的容易なことにあった。アンテナ、給電部や伝送線路(導波管)の物理的な大きさは無線周波数の波長に密接に関係しており、C帯は比較的低い周波数であることから、波長が長く、導波管のサイズは大きくなる。

簡単に言えば、1960年代と1970年代の装置製造業者は、より高い周波数に要求される製造許容誤差と装置の小型化に苦労してきていた。これらのより精密な許容誤差に対応する製造設備を整えなければならぬとしたら、装置は、商用市場では高価になりすぎてしまっていたであろう。

実のところ、C帯衛星が一旦確立すると、どこにいても必要なのは衛星通信用のパラボラアンテナと電源だけであったので、5m直径のパラボラアンテナが全米のアパートのビルの上やモーターの駐車場にキノコのように出現した。道を掘り返し何マイルものケーブルを敷設する必要はなかった。



衛星サービスが一般的になるにつれ、現在使用されている周波数帯で利用可能な周波数スペクトルは確実に満杯となってきている。このことが、より高い周波数帯の新しい‘資源’の開発とそこで運用するために必要な技術の発展の必要性を生んでいる。技術課題は残っているが、ますます多くの衛星企業がKa帯システムへの投資を始めている。

仮想的資源〔不動産〕

C帯は、当初、衛星回線に対する人々のニーズを十分に満たしていた、衛星サービスの拡大につれてC帯で使用できる周波数スペクトルは隙間無く埋まり始めた。一旦、周波数スペクトルが満杯になると、できることは、同じスペクトルを繰り返し使用できるような方法を開発するといった微調整だけになる。これは、周波数再利用と呼ばれ、異なった偏波で送信する等で実現できる。

静止軌道上で広く間隔をあけた衛星から送信し、双方に対応する地上局アンテナがお互いに天空の完全に異なった方向に向ければ干渉を避けることができ、同一周波数の再利用がこの方法でも可能になる。しかし、この方法は、米国のように経度方向に広く広がっている場合のみ適用できる。ヨーロッパでは、角度分離は非常に制限があるので、技術者たちは、他の(周波数)資源であるKu帯(12から18GHzの周波数域でさらに6GHzが追加となる)を開発し始めた。

Ku帯への移行は、1970年代にESAによって開拓され、それぞれECSとMarecs (Maritime ECS)として知られる第一世代のEutelsatとInmarsat衛星につながる。

(高い周波数を利用する)技術的な利点として、小さな国に要求される、より狭いカバレッジエリアもしくはフットプリントの生成能力がある。これは、同じアンテナサイズなら高い周波数程より狭いビームを生成できるというアンテナ設計に関する物理特性による。さらに狭いフットプリントによって、干渉なしにある領域に渡って周波数を何度も再利用できるようになる。これが結局、各国内で周波数再利用のために、いまや良く知られている携帯電話のネットワークパターンと良く似たマルチスポットビームを開発することに繋がった。

しかし、Ku帯におけるキラーアプリは、テレビの衛星放送(DTH: direct-to-home)であった。英国に基盤を置くHigh Q システムズのマネージングディレクターのRoger Dewell氏によれば、小型の壁付けタイプのアンテナを生み出したのはKu帯の開発によるものであり、それが最初にDTHマーケットを活性化させたのである、「なぜならば同じ利得を得るのに高い周波数であるほどより小さな物理的領域で済むから。」5mのC帯アンテナを自分のアパートの壁に取り付けることを想像して見れば良い。

確かに、やがてKu帯は、先進国におけるTV放送と他の先端的通信アプリケーションに使用されるデファクト周波数となった。C帯は、米国における従来のケーブルTVへの配信や新興国家での初歩的衛星での利用に留まるようになった。その一方で、より低い周波数帯は他のアプリケーションに適用されてきている。大まかに言っ

Imarsat-5衛星によるGlobal Xpressは初のKa帯グローバル衛星通信システムになる。

小型のTVアンテナはKu帯の遺産であった。
Credit: Mark Williamson.



て、L帯は移動体に、S帯は衛星テレメトリ、トラッキング、コマンドに、X帯は軍用アプリケーションに使用されている。

Ka帯への動き

しかし、Ku帯さえも十分ではなかった。早くも1980年代には、KuからK、Ka帯(KuとKaの呼称はK帯の下側“under”と上部上側“above”であることを表している)への順繰りの進展が、技術的優位性を加速させるものと一般的に理解されていた。確かにKからKa帯に渡る22GHzもの周波数領域がそれを明白にしている。

高い周波数に必要な技術を提供するため、ESAは1970年代後半にKa帯システムの開発を開始した。その結果、1989年にESAのオリンパス技術実証衛星が打ち上げられた。オリンパスは、20/30GHz帯の通信ペイロードとこの周波数帯における大気減衰を定量化するためのKa帯ビーコンペイロードを搭載した。その運用成功によりKa帯の将来性が実証され、イタリアによるイタルサット1Aと1B衛星の開発へと繋がった。イタルサットは、先端的Ka帯ペイロードの実用性を実証するとともにイタリアの通信ネットワークでの事前サービスの提供を

目指した衛星である。

2機のイタルサット衛星はそれぞれ1991年と1996年に打ち上げられた。Ka帯の研究は、1993年に打ち上げられたNASAのACTS(Advanced Communications Engineering Test Satellite)衛星と1997年に打ち上げられた日本のCOMETS(Communications Engineering Test Satellite)によってさらに進展した。

宇宙機関によるKa帯の研究投資の主要な理由は、高い周波数帯における大きな減衰への対策にあった。特に、大気を通して伝送する場合、Ka帯信号はC帯信号に比べて5倍から10倍の減衰を受ける。かくして、送信電力を上げなければ、受信機はさらにいっそうの高感度化(そして高価になる)せねばならず、さもなければアンテナを大きくすることが必要となる。

加えて、雨滴による放射エネルギーの吸収(いわゆる降雨減衰)はC帯に比べてKa帯は簡単に10倍以上と悪くなる。ジョージワシントン大学の宇宙先端通信研究所(Space and Advanced Communications Research Institute)のJoseph Pelton名誉会長は次のように指摘している。「これが、東南アジアや熱帯アフリカのような特に雨量が多く季節的に豪雨があり、それが長く続くような地域へのKa帯の適用をより困難にしている。」

Pelton氏によれば、幸運なことに、いくつかの解決策があるとのこと。例えば、「高い集中度のアンテナビーム(0.5度もしくはそれ以下)」を用いることにより、減衰を相殺する高い放射電力を与え、高い降雨量を示している地域を対象とする適応的な「オンデマンドの」システムがある。オンボードでの処理により、「衛星上で信号を訂正し、その完全性を修復することもできるが、」と、氏は続けて「費用効率が高い信頼性のあるオンボード処理能力」の開発が必要と述べている。

躊躇の理由

しかし、ESAのOlympusによる技術実証から20年以上たった今でもKa帯システムが普及からは程遠い状態にある理由を、こうした開発にかかるコストの高さで、いくらか説明できる。

なぜ、衛星通信事業者はKa帯の流れに乗ることをためらってきたのだろうか？ Dewell氏がその理由をこう説明する。“まず、新しい周波数帯を使うということは、新しい宇宙用のハードウェア開発と品質保証が必要になるんだ。これらの生産数量が少ないうちは供給側、購入側ともに多大なコスト負担を余儀なくされるね”。

加えて、と彼が言う、“衛星通信は先行

THE MAIN SATELLITE FREQUENCY BANDS (as defined by ITU)

Frequency band	Frequency range, GHz
L-band	1-2
S-band	2-4
C-band	4-8
X-band	8-12 (in U.S., 8-12.5)
Ku-band	12-18 (in U.S., 12.5-18)
K-band	18-27 (in U.S., 18-26.5)
Ka-band	27-40 (in U.S., 26.5-40)
O-band (not yet developed)	40-50 (Q-band in U.S.)
V-band (not yet developed)	50-75

者利益が得られるような仕組みになっておらず、実績や信頼性が最新の設計よりも重要視される傾向にある。その上、Ka帯用ハードウェアはC帯などの低い周波数用のものよりもサイズが小さいから、製造上の欠陥が性能に大きく影響するんだ。”

一方で、降雨減衰などの技術的課題は、事業を阻害する要因というよりむしろ、システム上の制約になるとDewell氏は主張する。“どちらかという、必要性和、これに応える能力の問題であり、混み合った既存の周波数帯に留まっていたは立ち行かなくなるといった決定的な理由が衛星事業者には必要だ。つまり、周波数権益(real estate)の話に戻るんだ”。

開発

幾つかの課題があるにもかかわらず、多くの衛星会社は近年、Ka帯システムに投資を続けている。Euroconsultが2011年7月に発行した固定衛星通信事業者に関する調査報告書によると、17の衛星事業者がこの1年半以上にわたりKa帯への投資を行っており、このうち6事業者は実際にKa帯の衛星搭載中継器を保有している。

Ka帯衛星の多くが、それまで実験的な運用であったが、これらとは対照的に、カナダのTelesatは、2004年に38台のKa帯中継器を搭載して打ち上げたAnik F2で、最初に商用サービスを開始した。

米国では、2011年にEchoStar社に買収されるまで長年にわたり衛星事業を行ってきたHughes社がKa帯中継器を搭載するSpaceway3衛星にユーザを移行しようとしている。この移行計画は2012年半ばに打ち上げ予定の全Ka帯衛星、Jupiterにより強力に加速されるだろう。Hughes社によると、この衛星はSpacewayの10倍の通信容量を擁し、150万~200万ユーザにサービス提供可能だそう。同様に、Hughes社と競合するViaSat社は、2011年10月に打ち上げた衛星ViaSat-1により、WildBlueサービスを強力に推し進める構えだ。

ヨーロッパにおいては、EutelsatがKa帯サービス導入をリードしてきている。中でも注目すべきは、そのものズバリに”Ka-Sat”と名付けられた衛星で、82のスポットビームで20回もの周波数繰り返し利用を行い、その通信容量は70Gbpsにおよぶ。Eutelsatの主要な競合相手であるSESは、Ka帯サービス導入が遅れたが、一般向けブロードバンドサービスであるAstra2Connectを将来的にKu帯からKa帯に移行させる予定。SESは、Astra2E, 2F, 2Gの3衛星を発注済で、打ち上げは、2012年から2014年の間を予定している。

更に興味深いことは、SESが新興国市



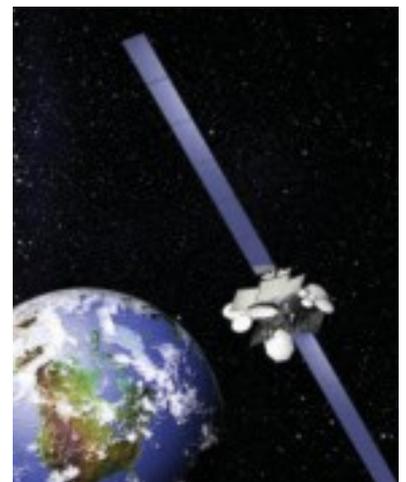
1993年に打ち上げられたACTSへさらなるKa帯の研究に用いられた。

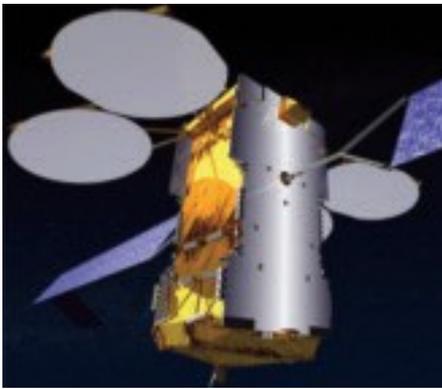
場に向けてO3bネットワークの筆頭株主になっていることだ。O3bは、チャネル諸島に本拠地を置き、名前は「残りの30億人」を意味するOther 3 billionの頭文字。「残りの30億人」とはアジア、中東、アフリカ、ラテンアメリカの発展途上国に住み、インターネット接続を享受していない人々を指す。同社は光ファイバー網の敷設によってバックホールを構築できない発展途上国に対して中軌道(MEO(medium earth orbit))に複数の衛星を打ち上げて、低遅延の光ファイバー品質のバックボーンを構築しようとしている(下線部はWikipediaより編集部より挿入)。同社は2013年前半に最初の8機の衛星打ち上げを計画しており、最近さらに4機の衛星をThales Aleniaに追加発注した。

Ka帯への投資家の中で最も驚くべき存在は、間違いなくInmarsatだ。同社は今までL帯でサービスをしてきたが、次世代衛星のInmarsat-5シリーズで、同社初のKa帯サービス‘Global Xpress’を準備している。このサービスは、60cmアンテナのユーザ端末に対し、ダウンロード速度50 Mbps、アップロード速度5 Mbpsのブロードバンドサービスを世界中で提供する予定だ。

2013-2014に打ち上げを予定する3機のボーイング702衛星は、競争の激化に直面したInmarsatの将来の裏付けとなる、1.2ドル億ドルの全世界ワイヤレスブロードバンド・ネッ

TelesatはAnik F2により最初のKa帯商用サービスを開始。





ヨーロッパではEutelsatがKA-SATによってKa帯サービス導入をリード。

トワークの不可欠な要素。同社の説明によると、“各Inmarsat-5は、15年の衛星運用期間に変化するユーザの利用状況に適應できるよう、通信容量をグローバルかつ柔軟に配分する能力を備えた89ビームのKa帯中継器を搭載する。

Boeing社は、Ka帯とX帯の中継器を搭載する米空軍の広帯域グローバル衛星通信システム用の元請業者でもあるが、おそらく最も重要なことは、Global Xpressが初のKa帯商用

グローバル衛星システムになるという点だろう。

供給の問題？

ニュースメディアによって明らかにされた潜在的な遅延要因は、衛星ペイロードのキーコンポーネントの「供給におけるボトルネック」といわれている。これが、今後数年間における衛星の製造計画や仕上げを遅延させる脅威になる。最もクリティカルな要素は、衛星の高出力増幅器の中心部となるKa帯進行波管(TWT)である。

この問題はハイテクコンポーネントを扱うどの市場でもよく知られていることで、特に開発初期段階にはよくある。研究開発は費用がかかり、納期を遅らせる技術的な問題によく遭遇する。市場が新しい技術への移行には警戒心を持つために、製品に対する初期需要は低い。しかし初期の採用者がその心配を払拭すると急速に需要が拡大することがある(これが現在Ka帯衛星で起きていることだ)。

しかし全体の市場は、その性質上、比較的小さく、少数のキーコンポーネントの製造業者だけを維持できる程度で(特に高額な参入コストを考慮すれば)、これは購買者には製造業者に対しては限られた選択肢しかないことを意味している。こういった理由等により、「その仕事に適している」Ka帯TWT製造業者は世界中で3社しかない。フランスのThales Electron Devices、ドイツのTesat-Spacecom(元AEG-Telefunken)及び米国のL3 Communications(元Hughes Electron Dynamics)である。

このようなニュース報道にもかかわらず、Paul Maisonnier氏(Thales社のマイクロウェーブ、イメージングサブシステム部門の副社長)は、「これまで我が社では製造上の問題はない。契約上の責務は果たしている。」という。

しかし彼は自社の市場占有率の評価は困難だと思っているし、L3社における製造上の問題を指摘することもできない。「我々は宇宙用TWTの製造工場を2カ所持っている。」という。「我々の競争企業が工場を1カ所持っているのだから、世界の需要はこれら3工場ではほぼ分配されていることになる。」

Maisonnier氏はTesat社を重要な競争相手とは見なしていないようだが(同社はInmarsat-5システム用のKa帯進行波管の製造業者である)、「他の企業が主にアジアで製品開発している」が、西洋の製造業者では危険覚悟で無視している市場だとはわかっている。

高信頼な宇宙用増幅器を製造するの

無線スペクトル：資源の管理

どの衛星も地球との通信回線が必要で、それらには3kHz~300GHzまでの無線周波数のうち、指定された一部の帯域を利用する。ジュネーブを拠点として電気通信サービスに関するプランや規約作成を担う組織であるITU(国際通信連盟)は、便宜的にスペクトルをいくつかの周波数帯に分けている(下表)。

周波数帯	対応周波数
VLF	3-30 kHz
LF	30-300 kHz
MF	300-3,000 kHz
HF	3-30 MHz
VHF	30-300 MHz

周波数帯	対応周波数
UHF	300-3,000 MHz
SHF	3-30 GHz
EHF(lower)	30-300 GHz
EHF(upper)	300-3,000 GHz

衛星通信の周波数は主にSHF帯にあるが、UHF帯やEHF帯も使われる。

ITUは通信衛星、観測衛星、科学衛星など無線を使う全ての地上、宇宙システムへの周波数割り当てやシステム間調整をしている。ITUはまた、様々な衛星に対する静止軌道位置やその他の軌道エレメントの割り当て、調整もしている。

周波数割り当てに関し、ITUは世界を3つの地域(Region)に分類している。Region1は、欧州、アフリカ、旧ソ連邦、およびモンゴル、Region2は、米州(南/中/北米)、およびグリーンランド、Region3はアジア、オーストラリアおよび太平洋地域である。

衛星事業者はITUに対して割り当てを希望する周波数、軌道位置を申請し、ITUは意見を募集するために詳細情報を公表する。米国ではFCCが同様の役割を担う。この申請に対して、既存および計画中の他のシステムに対するコンフリクトがなければ、申請事業者に対して周波数や軌道位置等のリソースが割り当てられる(通常、排他的に与えられるが、場合によっては共用を基本にすることがある)。

周波数調整手続きは地上/衛星通信システムがともに相互に干渉なく運用できることを確認しながら行われる。調整手続きにおいて、チャンネル周波数、衛星軌道位置、地球局の設置場所、アンテナ放射パターンや送信電力、データフォーマットなど申請時の詳細情報が調整時に使用して、既存の通信システムに対して干渉を与えないかどうか解析検討される。ITUは衛星の利用形態によって、いくつものサービスを定義している。最も重要なものが固定衛星通信サービス(FSS)、衛星放送サービス(BSS)および移動衛星通信サービス(MSS)である。

なかでもリソースの管理・監督への関心が高まっているが、問題はITUがスペクトルを過剰に占有しようとする申請を規制したり、干渉を及ぼすなどの違反者に罰則を与える権限を持たない、単なるリソース割り当て、調整を行うだけの組織だということである。これまで、こうした運用がスムーズに行われていたのは、ルール違反が最終的にカオスを招くことを利用者が互いに理解していたからであろう。

ほとんど可能性がないが、全ての利用者のための究極的な解決策は、国際交渉によりスペクトルの規制に関するITUの権限を拡大させることだ。もし今、世界で当然のごとく使われている通信回線を維持したいのなら、遅かれ早かれ解決策を見つけなければならない。



このThales製造工場で製造される進行波管のようなデバイス製造のためのクリーンルーム規格は非常に高い。Credit: Thales Electron Devices

はiPodを作るのとは違う。需要が増加しても製造ラインのスピードダイヤルをあげることはできない。TWTや他の無線機器は熟練工が手作業で製造するものだが、技術的な問題は専門技術者チームによって対処される。さらに製造業者は、2000年代初頭における電気通信の低迷を忘れず、速すぎる生産拡大に対しては警戒心をもっている。

これは品質のビジネスであるが、量の問題でもある。20年前には20、30本の進行波管増幅器(TWTA)を搭載する衛星がごく標準的であったが、現在では90から100本のTWTAを搭載する衛星も珍しくない。

それが単に増産の問題であったならば、進行波管製造業者は対処できただろう。しかし品質管理が非常に厳しいため、多くのコンポーネントはそれが衛星関連で使用される前に不合格にせざるを得ない。Maisonnier氏が指摘するように、「この制約が製造利益を低下させ、製造サイクルを長期化させている。」産業評論家によると返品率は50%以上になるという。この数字は率直に言って進行波管製造業者の重圧となる。

TWTAに問題があるとして代替手段があるのか？ あるともないともいえる。ここ数十年、固体電力増幅器(SSPA)はより低い周波数帯での一般的な高出力増幅器として進行波管に置き換わってきたが、より高い周波数用に製造するのは難しい。おそらくより重要な点は、発生する熱を除去することが困難なためにSSPAの出

力電力が制限されることだ。

衛星システムが発展してきたように、より高出力に対する要求(より狭いスポットビームとより小型の地上アンテナと結びあつて)が通信ペイロードの開発を促進し、TWTAにその役割を与えてきた。実際、Ka帯への最近の動向は、近い将来のTWTAの市場を保証しているように思える。

前を向いて

Ka帯の新たな周波数資源(不動産)を開発する機動力の根底には技術開発への挑戦があるが、これは最近の新しい現象ではなく、またゆっくりとした選択によるものでもない。我々は1970年代のC帯からKu帯への移行の再現と見ている。この時は衛星購買者と衛星ユーザの両方に変化をもたらした。

Pelton氏はユーザの地上部分のハードウェアをより高い周波数が扱えるようにアップグレードする必要性に関して楽観的である。「今日、Ka帯の地上システムのコストはC帯やKu帯よりまだ割高だが、10年間のうちにKa帯の技術開発と量産によってコストは軽減できるだろう。」と彼はいう。NASAのために行った予測の中で、Pelton氏は次のように結論づけている。同等のスループットと比較するとKa帯のVSAT(超小型衛星通信地球局)のコストは「2015年にはKu帯のVSATとほぼ同等になるだろう。」

しかし、Dewell氏はアップグレードを行う



主に2つのタイプの進行波管がある。1つはベースプレートを通した熱伝導による冷却タイプと、もう1つは空間へ直接放射による冷却タイプである(放射フィンを示すためにベル型のカバーは取り外してある)Credit: Thales Electron Devices

どの技術分野にも適応できる警告を付け加えていう。「Ka帯への移行によって、実際に使われなくなって残される、非常に多くのC帯とKu帯の既存の家庭用受信設備が存在することになる。」どれほど多くの装置が最後にリサイクル箱入りになるかは、今後の様子をみなければわからない。

Pelton氏は、通信に関する大局的な視点で、Ka帯衛星サービスの展望を見ている。「私の見方では、光ファイバーネットワーク技術だけではなく、広帯域な地上系Wi-FiやWiMaxシステムの費用効果性の経済が最も将来の方向を決めることになるだろう」という。「注視すべき重要なものの1つは、O3b衛星システムである。これはインナーネットプロトコルベースのサービスをサポートし、Wi-FiやWi-Maxシステムとのインターフェースがとれるように最適化されている。」

Pelton氏は将来を次のように考察する。「地上ファイバー、同軸、衛星、高高度プラットフォーム及び地上系のワイヤレスは、消費者がどこでもいつでもブロードバンドサービスを利用できるようなシームレスなエアインターフェース規格を持っている。」

これはKa帯衛星を多くのオプションの1つにすぎなくしてしまい、彼によると、

しかし、彼はさらに小型な受信端末の利点や「干渉の少ない環境で運用できること」を理解しているが、Ka帯への殺到も、「世界中のユーザからなる適切なコミュニティが存在し、潜在的に様々なシステムが共存するようになると、落ち着いてくるだろう。」と信じている。

初期に行われた活動の多くは結果的に「土地の乗っ取りになり… スペクトルの新たな運用領域で早々と権利主張を始めることになる。」

不動産としての土地の開発は、仮想的な資源である周波数空間でも、決してやさしいものではなかった。

しかし予測が難しいアプリケーション—直接放送(DTH)テレビ、車載衛星ラジオ、リアルタイム遠隔医療、無人飛行船操作、衛星ナビゲーション—これらは投資や努力に対する収益を証明するものである。もしKa帯が同様に門戸を開くならば、やってみてはどうだろうか。A



衛星通信ペイロード: 進行波管と電力調整器
Credit: Mark Williamson

「Ka帯への大規模な移行の必要性を失わせ、確実にQ/V帯周波数へのさらなる移行への出鼻をくじくことになるだろう。」

不確定さにもかかわらずDewell氏の全般的な見方はポジティブだ。「私は通信衛星サービスとしてKa帯には大変興味ある」という。「宇宙用ハードウェアが利用可能になったので実施のペースは早まるだろう。」