

# 次世代衛星通信技術 —商用衛星から先進通信技術まで—

佐藤正人\*  
舟田雅彦\*  
江島二葉\*

Next Generation Technologies for Satellite Communications—From a Commercial Satellite to Advanced Communication Technologies—  
Masahito Sato, Masahiko Funada, Futaba Ejima

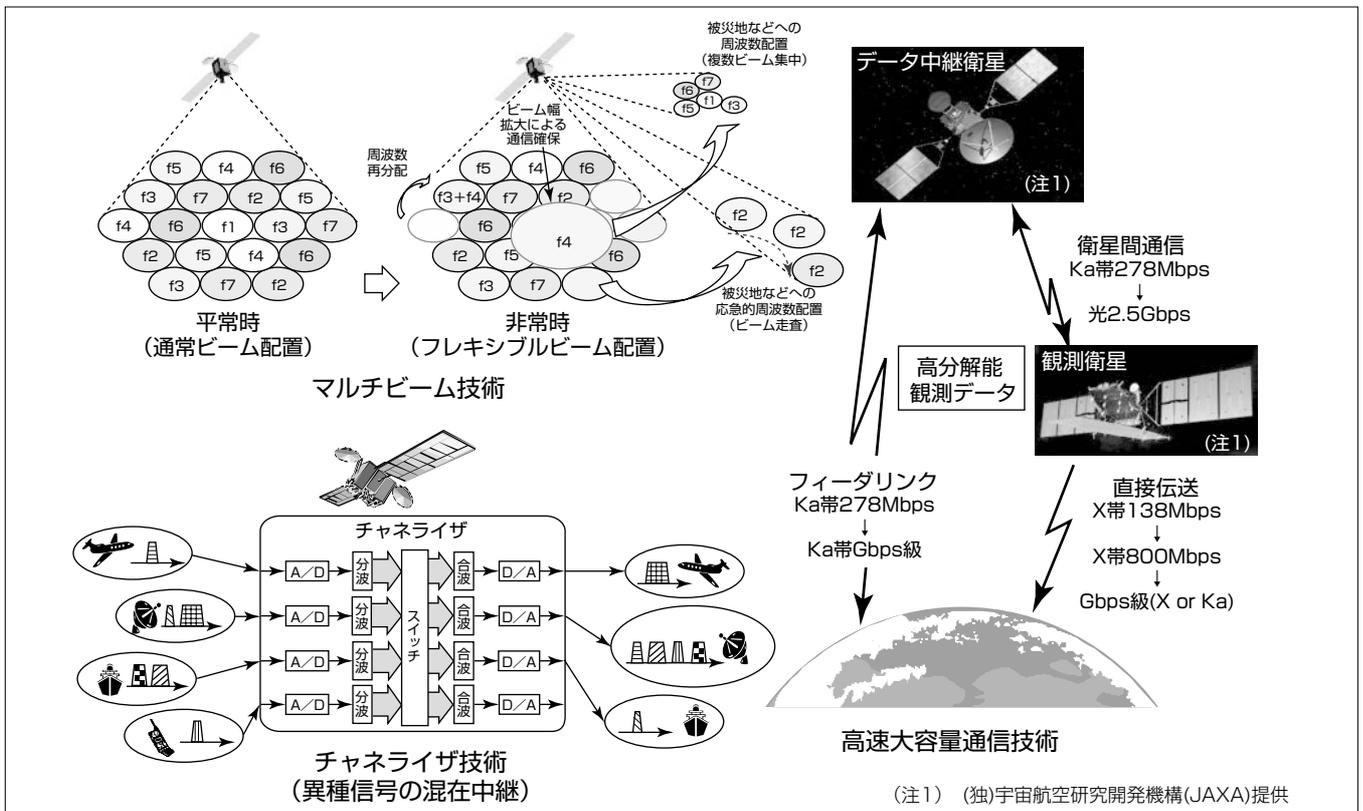
## 要旨

世界初の人工衛星として知られるスプートニク1号(1957年打ち上げ)は、小さな構体(直径58cmの球体)ながら送信機(出力1W)と4本のアンテナを搭載していた。この打ち上げ成功はスプートニク・ショックと言われ、宇宙開発競争のきっかけとなった。そのわずか5年後の1962年にNASA(National Aeronautics and Space Administration)がC帯中継器を搭載した通信放送衛星テルスター1号を打ち上げた。これが衛星通信の原型であり、今日では中継器数/帯域/送信電力が格段に増強されている。衛星通信は広域での情報伝達・配信/双方向通信/移動体通信等、広域をカバーする衛星でしかできない利用分野で継続的に発展しており、今回の東日本大震災でもその重要性がより明確になった。地球観測衛星で撮像した画像伝送もその一つである。地上系の通信インフラは広域災害が発生した場合は壊滅的なダメージを受けるため、衛星ならではの高い残

存性を持つ通信衛星インフラに利用利便性を高める高度な衛星通信技術の適用が望まれる。

近年、海外の通信衛星では、複数サービスエリアへの対応や高速・大容量化の要求が多く、通信需要の変化にフレキシブルに対応可能な、マルチビームによる周波数有効利用、ビーム形状/方向の再構築、周波数帯域可変/ルーティング等の高機能化技術が求められている。また、地球観測衛星に搭載される観測センサの大幅な性能向上・高分解能化が進む中で、高精度の観測データの供給や即時性のニーズに対応するために、より高速/高機能な伝送系の確立も急務となっている。

本稿では、将来の通信衛星インフラのキー技術である、周波数有効利用技術と高速大容量通信技術について、三菱電機での開発状況について述べる。



## 次世代衛星通信技術

将来の通信衛星インフラのキー技術である、マルチビーム技術とチャンネルライザ技術に代表される周波数有効利用技術と、高分解能観測データなどを高速に伝送する高速大容量通信技術の概念図を示す。これらの技術は衛星の利用利便性を高める技術であり、運用要求へのフレキシブルな対応を可能とする将来の衛星通信に不可欠な先進技術である。

1. ま え が き

当社は国産初の商用衛星や各種通信衛星の開発を通じて、通信ペイロードの設計・製造技術を確認しており<sup>(1)</sup>、シンガポールと台湾の通信会社が共同所有する通信衛星ST-2に引き続き、トルコの国営衛星通信会社から通信衛星2機(Turksat-4A/4B)を受注した。当社は、これらの技術をベースに、将来の通信衛星インフラの要求に対応するためのキー技術の開発に取り組んでいる。

本稿では、将来の高機能衛星通信に欠かせない周波数の有効利用を可能とするマルチビーム技術とチャネライザ技術の概要と特長について述べる。次に、今後ますます高精度化が進む観測データの伝送に欠かせない高速大容量通信を可能とする高速変復調技術と光衛星間通信技術について、開発実績と特長を述べる。

2. 周波数有効利用技術

割り当てられた貴重な周波数資源を最大限に活用する周波数有効利用技術の課題には、①単位面積あたりで収容可能な加入者数と各ユーザーに提供可能な伝送容量の向上、②ユーザーの移動に伴う局所的ユーザー集中への効率的対処の2つがある<sup>(2)</sup>。これらの課題に対する対策として、扉ページのマルチビーム技術の説明図に示すような周波数の繰り返しによって周波数の利用効率を高めるとともに、平常時と非常時(災害発生時など)の通信トラフィックの変動にフレキシブルに適應する技術(アンテナ利得可変/ビームスキャン/広帯域データ伝送/周波数配置可変/送信電力可変/適応変調等)が必要である。ここでは、周波数有効利用技術(送信電力可変/適応変調以外)として、マルチビーム技術とチャネライザ技術についての当社での開発状況を述べる。

2.1 マルチビーム技術

マルチビーム技術の中でもダイナミックに機能を可変できるビーム形成回路方式(Beam Forming Network: BFN)は大別して、①APAA(Active Phased Array Antenna)に代表されるMBFN(Microwave BFN)、②デジタル領域で振幅・位相を制御するDBFN(Digital BFN)、③マイクロ波を光波に変換して光領域で振幅・位相を制御するOBFN(Optically controlled BFN)の3つに集約され、いずれもJAXA及び情報通信研究機構(NICT)と共同で開発を実施している。

MBFNについては小型高密度RF(Radio Frequency)モジュール/ビーム形成回路高密度実装技術/ビーム制御回路技術を確認し、2ビームの送信・受信APAA<sup>(3)</sup>としてその機能・性能を軌道上で実証した(図1)。ビーム数の増加とともにRF給電回路規模の増加が避けられないため、搭載ビーム数が制限されるが、広帯域特性が得られる。

DBFNについてはSTICS(Satellite/Terrestrial Integrated mobile Communication System)<sup>(4)</sup>への適用に向け開発中である(図5)。DBFNは、広帯域化の点で衛星搭載用デバイスの性能に依存する信号処理速度の制約(特に入手可能な衛星搭載用A/DはCOTS(Commercial Off The Shelf)部品に比べサンプリングレートが一桁以上小さい)を受けるが、MBFNに比べビーム数の増加に対して回路規模の点で有利である。

OBFNでは光波長の多重化伝送を利用した送信用OBFNを開発し(図2)、NICT実施の総合試験で高速変復調器を介して1,244Mbpsのデータ伝送を確認した<sup>(5)</sup>。光波の高周波数性(周波数はマイクロ波の1,000倍以上)から広帯域化/小型化が期待でき、広帯域/多ビーム化でMBFNとDBFNを凌駕(りょうが)するポテンシャルを秘めているが、光デバイスの宇宙環境での信頼性及びコスト等で課題が残る。衛星搭載及び開発中のBFNの現状を図3に示す。

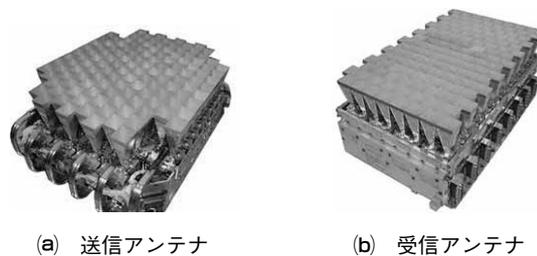


図1. 超高速インターネット衛星“きずな”のAPAA

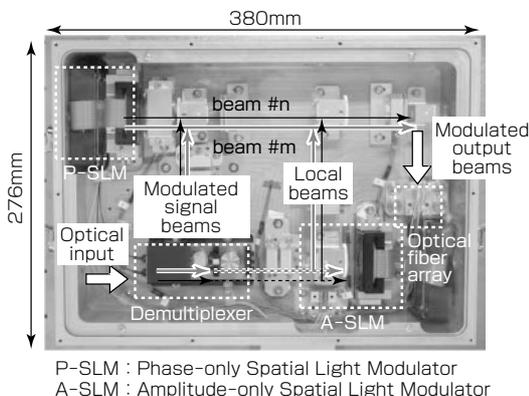


図2. OBFN開発事例(試作装置)

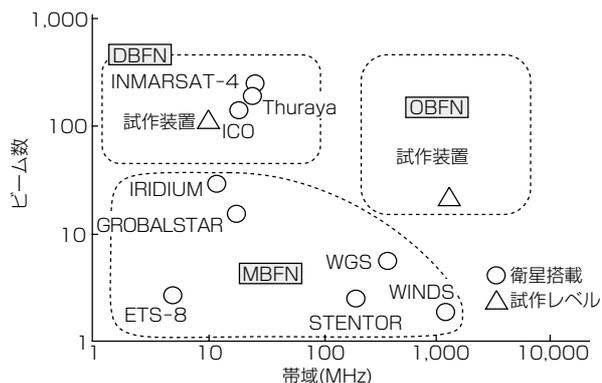


図3. BFN方式の適用の現状

## 2.2 チャネライザ技術

周波数有効利用の実現に欠かせない技術として、マルチキャリア信号をデジタル処理で分波／合波して信号の周波数配置を並び替えるチャネライザ技術が挙げられる。図4にチャネライザ機能の概念を示す。チャネライザは、中継する各アップリンク信号を周波数分波処理によって複数チャンネルに分解後、スイッチによって再配列し、周波数合波処理によって再構成することで、異種信号の混在中継を可能とする。また、従来の通信衛星(アナログ処理)では、周波数帯域に空き領域ができるため、中継器リソースを無駄に消費すると共にビームあるいは異種信号の数に応じて中継器が必要となる。これに対してチャネライザは、中継信号の周波数を再配置して一部の周波数帯域に集約するため、空きのない信号配置を実現でき、衛星に搭載可能な中継器リソースを有効に活用することも可能となる。

今回、30MHzの帯域信号を最大48チャンネルで分波／合波するチャネライザ装置を開発した。図5にNICTで研究開発しているSTICSのために試作した装置を示す。この装置は6枚の基板で構成され、左の2スロットの基板からアナログIF(Intermediate Frequency)信号を取り込み、デジタル信号処理でチャネライザ機能を実現している。他のスロットに挿入された基板は、DBF処理と直交変調処理を行い、アナログIF信号を出力する機能を持つ。

従来のチャネライザ技術<sup>(6)</sup>は固定帯域信号のみの分波／合波であったが、帯域信号を段階的に複数分割していく過程で各段階の信号を選択抽出する技術を適用することで、異なる信号帯域幅の分波／合波を実現した。また、衛星搭載用デバイスの回路規模はCOTS部品と比べて制限があるため、回路の共通利用など、回路設計の最適化によって回路規模の最小化(当初設計の約1/3以下)を達成した。

## 3. 高速大容量通信技術

地球観測衛星に搭載される観測センサの大幅な性能向上・高分解能化によって、高速／高機能な直接伝送系による観測データのダウンリンクシステムの確立が求められている。一方、通常の周回衛星では地上局からの可視時間が

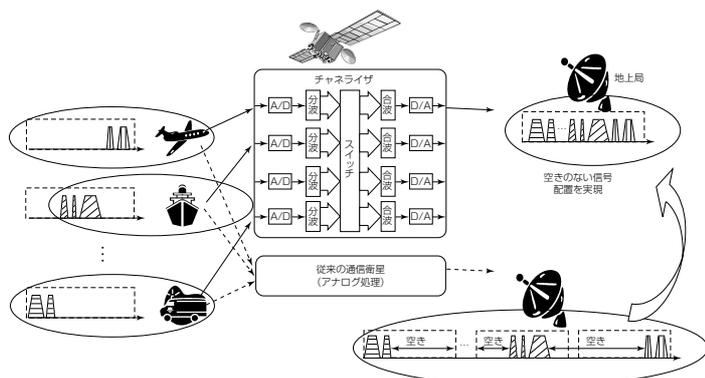


図4. チャネライザ機能の概念

平均10分程度であり、ダウンリンク可能なデータ量に限界があるため、静止衛星を経由してデータを地上に伝送する衛星間通信方式が活用されている。陸域観測技術衛星(ALOS)及びデータ中継衛星(DRTS)では278Mbps(Ka帯衛星間通信)の伝送能力を持っているが、観測衛星の高分解能化、広域撮像化等、性能向上の要請に伴い取り扱うデータ量は今後ますます膨大化する。次に、JAXAと共同開発している、電波を用いたより高速／高機能な直接伝送を可能とする高速変復調技術と、光波を用いた2.5Gbps伝送を可能とする次世代光衛星間通信技術について述べる。

### 3.1 高速変復調技術

データ伝送の高速化・周波数高効率利用化のニーズに対応するため、変調方式として従来のQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)に加え16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)を採用し世界最高水準の800Mbpsを達成する高速マルチモードXバンド変調器(以下“高速XMOD”という。)のEM(Engineering Model)を開発した(図6)<sup>(7)</sup>。高速XMODはマルチモード(800Mbps／16QAM, 400Mbps／QPSK, 200Mbps／QPSK切替え)を持ち、様々なデータレートの衛星に対応できる標準化を実現している。また、衛星用として初めてCGA(Column Grid Array)パッケージのFPGA(Field Programmable Gate Array)を採用し耐放射線性を強化するため運用中にスクラビング(定期的なプログラムの上書き処理)を実施すること、高機能かつ軽量であることなどが特長である。表1に高速XMODの主要諸元を示す。

高速XMODでは高速伝送を実現するため、S-RAM(Static Random Access Memory)型FPGAを用いてQPSK／16QAMのマッピング、差動符号化、ナイキストフィルタなどの機能を高速信号処理で実現した。S-RAM型FPGAは高速動作が可能である一方、耐放射線性が課題であり、アンチヒューズ型FPGAからの制御によって定期的にスクラビングを行いSEE(Single Event Effect)の影響を低減している。2011年2～3月に放射線医学総合研究所で製品用プログラムを動作させ、特性を観測しながら放射線試験を実施した。その結果、スクラビングの効果が設計どおりであることを確認した。また、このFPGAはセラミックCGAパッケージであり、基板との熱膨張係数の違い

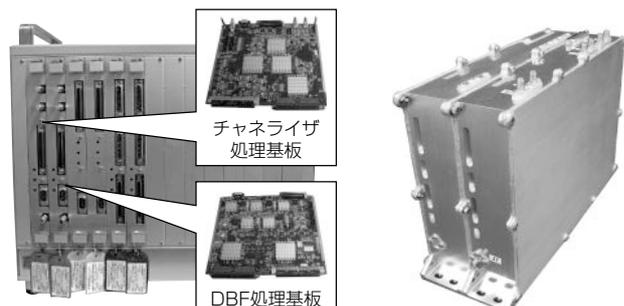


図5. チャネライザ及びDBFN試作機 図6. 高速XMODのEM

によるんだ接合部への熱応力が課題であったが、振動／衝撃／熱サイクル試験及びX線CT(Computerized Tomography)・DPA(Destructive Physical Analysis)検査を含む実装評価を完了した。さらに、MDHS(Mission Data Handling System)～高速XMOD間インタフェースは従来複数チャンネルでのパラレル伝送であったが、高速伝送ではデータスキュー管理が困難となるためSerializer／Deserializerを用いた2 Gbpsのシリアル伝送を採用した。EM開発に先立ち実施したデータ伝送試験で、データスキューやジッタの評価を完了している。

採用したCGAパッケージのFPGAは世界でも探査機など短期ミッション衛星に搭載され始めたところであり、今後の高速デジタル信号処理には不可欠となる。開発したスクラビング技術、実装技術は幅広く応用可能であり、今後の衛星搭載機器の更なる高速化を推進すると考えられる。

3.2 光衛星間通信技術

低軌道周回衛星から静止軌道衛星までをレーザ光を用いて2.5Gbps伝送する光衛星間通信機器の開発を行っている<sup>(8)</sup>。その開発目標を表2に示す。高速大容量の衛星間通信実用化を目指し、通信波長1 μm帯の光ホモダインBPSK(Binary Phase Shift Keying)通信方式、耐放射線に優れた平面導波路型の光出力増幅器、捕捉追尾光と通信光を共用するビーコンレス捕捉追尾方式を採用した。

一例として通信品質評価試験の構成を図7に示す。低軌道周回衛星側を模擬した送信光(2.5Gbps BPSK変調光)を、静止軌道衛星を模擬した内部光学部に空間伝送し、捕捉追尾センサで検出した角度誤差信号をFPM(Fine Pointing Mechanism)にフィードバックすることで、±1 μradの追尾精度が得られることを確認した。また、衛星間距離の変化に伴うドップラ周波数シフト(±7.5GHz)を送信光に重畳した状態で、光位相同期の確立・維持を確認した。さらに光ホモダイン受信機における所望の通信性能(BER(Bit Error Rate)=1E-6時における受信感度-49.1dBm)が得られることを実証した。今後は早期実用化に向けてEM開発着手が望まれる。

4. む す び

将来の通信衛星インフラの高機能要求に対応する次世代衛星通信技術として、マルチビーム技術、チャネライザ技術、高速変復調技術、及び光衛星間通信技術の、当社での開発状況について述べた。今後も継続して開発を推進し、国内外の各種通信／放送衛星への適用につなげたい。これらの技術は、将来、確実に我々の生活に利便性と安心・安全をもたらす礎となるであろう。

参考文献

(1) 針生健一, ほか: 衛星通信ミッション技術, 三菱電機技報, 83, No.3, 211~214 (2009)

表1. 高速XMOD主要諸元

項目	仕様	EM試験結果
出力周波数	8,025~8,400MHz内で一波指定	8,175MHz
出力レベル	+ 5 dBm ± 1 dB	+ 5 dBm ± 0.9dB
変調方式	16QAM/QPSK	16QAM/QPSK
ビットレート	800Mbps(16QAM) 400M, 200Mbps(QPSK)	800Mbps(16QAM) 400M, 200Mbps(QPSK)
I/Q振幅不平衡	±0.4dB	-0.24dB
I/Q位相不平衡	90±2°	91°
キャリア抑圧比	≤ -45dBc	≤ -45dBc
出力スプリアス	≤ -50dBc	≤ -50dBc
消費電力	25.5W以下	19.02W
質量(内部冗長)	3.36kg以下	2.638kg
寸法(内部冗長)	277×106×186(mm)	261×100×180(mm)

表2. 光衛星間通信機器の開発目標

項目	低軌道周回衛星搭載用	静止衛星軌道搭載用
	光ホモダインBPSK	
通信光波長	1.06μm	
通信方式	光ホモダインBPSK	
データレート	送信 2.5Gbps 受信 155Mbps	受信 2.5Gbps 送信 155Mbps
通信光出力	4 W	2 W
捕捉追尾方式	通信光共用(ビーコンレス)	
追尾精度	±1μrad	
アンテナ開口径	φ100mm	φ200mm
質量	40kg	50kg

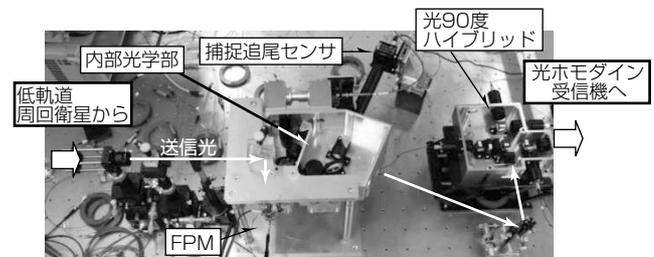


図7. 通信品質評価試験の構成

(2) 三瓶政一: 無線通信技術-周波数利用効率向上への挑戦-, 電子情報通信学会誌, 94, No.5, 417~421 (2011)

(3) 井口岳仁, ほか: WINDS「きずな」アクティブフェーズドアレイアンテナ(APAA)の素子電界ベクトル回転法による軌道上性能評価, 第52回宇宙科学技術連合講演会, 1A12 (2008)

(4) 蓑輪 正, ほか: 安心・安全のための地上/衛星統合移動通信システム, 電子情報通信学会論文誌B, J91-B, No.12, 1629~1640 (2008)

(5) Akaishi, A., et al.: An Optically Controlled Beam Forming Network for Multiple Beam Antenna, 28th ISTS, 2011-j-15 (2011)

(6) Takahata, F., et al.: A PSK Group Modem for Satellite Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, SAC-5, No. 4, 648~661 (1987)

(7) Kazuya, I., et al.: Development of an X-band Multi-mode High speed Modulator-Design and Development test Results of Engineering Model-, 28th ISTS, 2011-j-10 (2011)

(8) 安藤俊行, ほか: 次世代光衛星間通信機器の開発概要, 電子情報通信学会技術研究報告, MW2010-42 (2010)