

■5群 (通信・放送) - 7編 (衛星通信)

4章 地球局

(執筆者：富士 剛) [2014年12月受領]

■概要■

衛星通信は、1964年に設立された国際電気通信衛星機構 (INTELSAT) により商業衛星通信が開始されて以降、大きく発展してきた。INTELSAT は当初衛星回線に C バンド (6/4 GHz) を使用し、以下に示すような標準地球局を制定した¹⁾。

- ・標準 A 地球局：直径約 30 m の開口径を備えた C バンド地球局で、電話・TV などの国際公衆サービスを提供
- ・標準 B 地球局：直径約 13 m の開口径を備えた C バンド地球局で、電話回線数十チャンネルの電話回線を提供

その後、1980年代になると通信衛星の高性能化・大型化が進み、地球局の小型化が図れ、伝送効率の向上が期待できる Ku バンド (14/12 GHz) が使用されるようになった。

更に1980年代には超小型衛星通信地球局 VSAT (Very Small Aperture Terminal) システムが登場し、1 m 前後の小口径アンテナを持つ小型化されたユーザ端末により多数の地点のユーザを収容できるネットワークが構築されるようになり、更に利用が拡大した。現在は、更に高い周波数である Ka バンド (30/20 GHz) を用いて伝送効率を増加させる流れとなっている。

一方、移動体衛星通信は主として音声、低速データ通信用に使用され、周波数は L バンド (1.6/1.5 GHz)、S バンド (2.6/2.5 GHz) が使われている。L バンドは1982年以降、国際海事衛星機構 (INMARSAT) が船舶向けの通信サービスを本格的に開始し、その後航空機、車載端末の利用が可能となった。現在 INMARSAT 第4世代衛星ではハンドヘルド型端末も登場している。一方、国内では NTT ドコモによる衛星電話サービスであるワイドスター II が提供されている²⁾。

2000年代になると移動体向けのブロードバンドサービスが注目されるようになり、特に航空機、船舶向けに Ku バンドシステムの利用が拡大してきた。

本章では、地球局の主要構成要素であるアンテナと送受信装置について説明し、VSAT についての概説を行う。

【本章の構成】

本章では以下について解説する。

- 4-1 アンテナ
- 4-2 送受信装置
- 4-3 VSAT

■5群-7編-4章

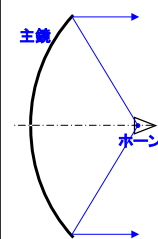
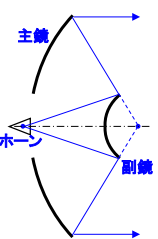
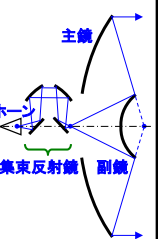
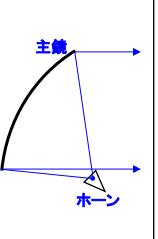
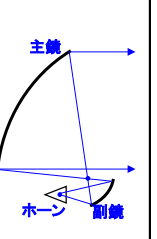
4-1 アンテナ

(執筆：土谷牧夫, 水野友宏) [2014年12月受領]

地球局のアンテナとしては、反射鏡アンテナが多く採用されている。これはアンテナへの技術要件である開口能率、雑音温度、サイドローブレベルや交差偏波識別度などの基本性能が高いことによる。

表1・1に反射鏡アンテナの方式と特徴を示す。通信衛星の高性能化・大型化が進んだ現在においても衛星通信システムの高い信頼性を維持するため、追跡管制や深宇宙用途では同表の複反射鏡型や集束ビーム給電型の大型アンテナが利用されている。大型アンテナ開発の黎明期においては、2枚の反射鏡の形状を理想的な回転二次曲面から修整を施すことで任意の開口面分布を合成し高能率化を図る鏡面修整技術^{3)~5)}や、クランク状の非対称な光軸経路を有する集束ビーム給電系においてもビームの軸対称性を維持して交差偏波を抑制する交差偏波消去技術⁶⁾、更にはこれらをオフセットカセグレン形式に拡張した鏡面修整技術^{8)~10)}などが実用化された。

表1・1 反射鏡アンテナの方式と特徴

方式	軸対称方式			オフセット方式	
	パラボラ型	複反射鏡型	集束ビーム給電型	パラボラ型	複反射鏡型
構成					
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・構造がシンプル ・ホンのブロックングでサイドローブ特性に制限あり ・送受信機との接続損失が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・高能率・低サイドローブ特性を実現可能 ・小口径アンテナでは副鏡のブロックングによる影響が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造は複雑 ・高能率・低サイドローブ特性を実現可能 ・送受信機を固定側に設置可で接続損失が小さい 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造がシンプル ・ブロックングが無く軸対称方式に比してサイドローブ特性が優れるが交差偏波特性が劣る ・送受信機との接続損失が大きい場合あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・高能率・低サイドローブ特性を実現可能 ・オフセットパラボラ型に比して交差偏波特性が優れる
主な適用例	小型アンテナ <衛星放送受信>	中・大型アンテナ <追跡管制地球局>	大型アンテナ <深宇宙用・電波望遠鏡>	小型アンテナ <VSAT局>	小・中型アンテナ <VSAT・SNG車載局>

最近ではCバンドやKuバンドで、開口径が1m級の小型地球局としてVSAT (Very Small Aperture Terminal) が普及している。VSAT用の小型アンテナにおいては小開口で極力高能率化を図り、かつ他システムへの干渉を抑えるように低サイドロープ化が必要であり、ブロックングの影響がないオフセット形式の反射鏡アンテナが用いられることが多い。

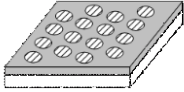
また、LバンドやSバンドを用いた音声やデータ通信用途として、ハンドヘルド型、可搬型及び船舶・車両・航空機に搭載する移動体型の端末が広く使われており、そのアンテナにはヘリカルアンテナやマイクロストリップアンテナなどの素子アンテナや、それらを周期的に並べ

た平面アンテナが用いられている。

2000年代になると移動体向けのブロードバンドサービスが注目されるようになり、特に航空機、船舶向けの Ku バンドや Ka バンドシステムが拡大している。

航空機地球局アンテナでは、空気抵抗低減のため低プロファイルであることが強く求められる。表 1・2 に低プロファイルアンテナの検討例を示す。極端に開口面のアスペクト比を大きくした超楕円開口の反射鏡アンテナや、電子ビーム走査を行うフェーズドアレーアンテナ、衛星仰角に応じて開口を分割機械駆動する平面アンテナなどが実現されている。

表 1・2 低プロファイルアンテナの検討例

	超楕円開口反射鏡アンテナ	フェーズドアレーアンテナ	機械駆動平面アンテナ
構成			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・仰角0°～90°に渡りほぼ同一性能で運用が可能 ・仰角変化に対し利得変動しないメリットがある。 ・副反射鏡による開口分布の制約とブロッキングによりアンテナ高さの低減に制約がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ・低プロファイルが実現しやすい。 ・低仰角運用ではビーム走査角が大きくなり大幅な利得低下、サイドローブ劣化が発生する。ため運用仰角が制限される。 ・素子アンテナに装着する送受信モジュールの低消費電力化と低コスト化が課題。 	<ul style="list-style-type: none"> ・各平面アンテナの高さを抑えることにより低プロファイル化が図れる。 ・複数の平面アンテナを合成することにより利得向上が図れる。 ・低仰角では前方アンテナのブロッキングが避けられない。

船上地球局アンテナでは、C バンドや Ku バンドの ESV (Earth Station onboard Vessel) と呼ばれる船上地球局が広く使われている。

アンテナとしてはレドームを含めた小型化と、波浪による大きな動揺、エンジンやスクリューによる振動下でも高精度に衛星を追尾できることが求められる。これらの要求を満たすアンテナとして、一般的に低サイドローブ化のため開口ブロッキングの少ない軸対称方式の反射鏡アンテナが適用されている。

表 1・3 に、表 1・1 の軸対称方式の反射鏡アンテナを最近のトレンドに応じて細分化した方式と特徴を示す。船上地球局アンテナに最適な形式として、開口ブロッキングを最小化したパラボラ型のバックファイア形式や、一次放射器から放射された全電力が幾何光学的に主反射鏡を照射できる複反射鏡型のリングフォーカスグレゴリアン形式が主流である。

なお移動体搭載アンテナでは、移動体の位置の変化及び姿勢変動に際しても衛星を精度良く捕捉している必要があり、追尾システムは重要な要素技術である。移動体搭載アンテナに適用する追尾方式には誤差信号を利用するモノパルス方式やコンカルスキャンを用いるクローズドループシステムや、慣性航法データによるオープンループシステムがある。システムの経済性が普及の鍵となるが、近年角速度センサの低価格化などにより安価なシステムで高精度の追尾が可能となってきた。

表 1・3 反射鏡アンテナの方式と特徴（軸対称方式）

方式	パラボラ型		複反射鏡型		
	フロントフィード	バックファイア	リングフォーカス グレゴリアン	リングフォーカス カセグレン	カセグレン
構成					
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・構造がシンプル ・ホンのブロックでサイドローブ特性に制限あり ・送受信機との接続損失が大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造がシンプル ・バックファイア放射器部の径を小さく抑えればサイドローブ特性を改善可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・高効率・低サイドローブ特性を実現可能 ・副鏡からの電波は幾何光学的に全て主鏡を照射でき損失抑圧 ・ホーン周辺の電力小 	<ul style="list-style-type: none"> ・高効率・低サイドローブ特性を実現可能 ・副鏡からの電波は幾何光学的に全て主鏡を照射でき損失抑圧 	<ul style="list-style-type: none"> ・高効率・低サイドローブ特性を実現可能 ・小口径アンテナでは副鏡のブロックによる影響が大きい
主な適用例	小型アンテナ <衛星放送受信>	小型アンテナ <移動体衛星通信>	小型アンテナ <移動体衛星通信>	中・大型アンテナ <追跡管制地球局>	中・大型アンテナ <追跡管制地球局>

■5 群-7 編-4 章

4-2 送受信装置

(執筆者：渡邊栄司，池松 寛) [2014 年 12 月 受領]

地球局に用いられる送受信装置は、主として以下の装置で構成される。

- (1) 大電力増幅器 (High Power Amplifier)
- (2) 低雑音増幅器 (Low Noise Amplifier)
- (3) 周波数変換器 (Frequency Converter)
- (4) 変復調器 (Modulator/Demodulator)

以下に、それぞれの装置の概要と必要とされる諸特性について述べる。

(1) 大電力増幅器

地球局用の大電力増幅器としては、数百 W 級の高出力なものではクライストロン管や TWTA (進行波管型増幅器) などのマイクロ波管が、数十 W 以下の中小出力のものでは、ガリウム砒素 (GaAs) や窒化ガリウム (GaN) などを用いた固体化増幅器 (Solid State Power Amplifier) が用いられることが多い^{11),12)}。衛星通信地球局、とりわけ数百 W 級の大電力を送信する送信増幅器では、飽和出力電力のほかに、マルチキャリアを送信した際の相互変調歪み (Intermodulation) 特性が重要視される。

(2) 低雑音増幅器

地球局用の低雑音増幅器には、GaAs の高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor) を用いた低雑音増幅器が広く用いられる。衛星通信用の低雑音増幅器においては、その雑音量を表す量として一般的な雑音指数 (Noise Figure) ではなく、雑音温度 (Noise Temperature) が用いられる。雑音温度 NT [K] は、雑音指数を NF [dB]、周囲温度 T_0 [K] を用いて場合、以下のように表すことができる。

$$NT = \left\{ 10^{\left(\frac{NF}{10}\right)} - 1 \right\} \times T_0 \quad (5 \cdot 1)$$

(3) 周波数変換器

周波数変換器とは、変復調器などで扱う比較的低周波の中間周波数 (Intermediate Frequency) と、衛星とのやり取りを行う高周波の無線周波数 (Radio Frequency) の間を相互に変換するための装置である。周波数変換器は、ミキサ、局部発振器、フィルタなどのマイクロ波デバイス

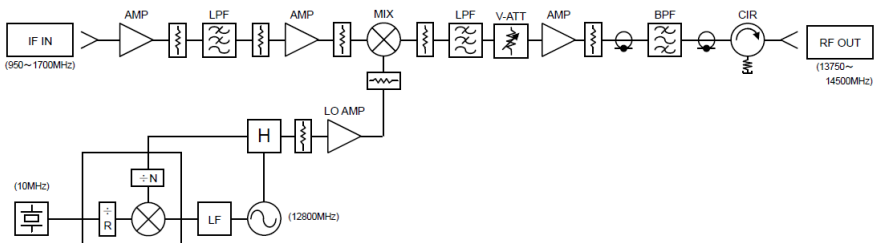


図 2・1 周波数変換器の構成例

を組み合わせる構成され、ミキサとしてはショットキーバリアダイオードを用いたバランス型ミキサが、局部発振器には、良好な周波数安定度/位相雑音特性を実現するため、電圧制御発振器 (Voltage Controlled Oscillator) と位相同期ループ (Phase Locked Loop) 回路を組み合わせた PLL 周波数シンセサイザが広く用いられている。また、フィルタ回路は主としてミキサから発生する不要波を低減するために設けられ、所要の減衰量や実装スペースなどから、基板上的の結合線路を用いたもの、金属の共振棒を用いたもの、誘電体共振器を用いたものなど、様々な形式のフィルタ回路が用いられる。

(4) 変復調器

変復調器はデジタル信号を送信 IF 周波数信号に変調、及び受信 IF 周波数信号をデジタル信号に復調するための装置である。

衛星と地球局の自由空間伝播損失、特に高周波数帯における降雨による信号レベルの減衰が大きいことから、低い C/N で安定に動作する必要があり、変調方式として QAM 変調などの多値変調よりも PSK 変調 (BPSK, QPSK など) が採用されることが多い。フェージングについては一般的に指向性アンテナによる見通し内通信であることから影響が小さく、復調方式としてフェージング耐性がある遅延検波よりも、低 C/N での誤り率特性が良い同期検波が用いられることが多い。また、通常は符号化利得が高い誤り訂正方式 (畳み込み符号+RS 符号の接続符号、ターボ符号、LDPC 符号など) が用いられるが、衛星と地球局間の伝播遅延が大きいため符号/復号遅延が多少大きくても符号化利得が高い方式が使用される場合がある。

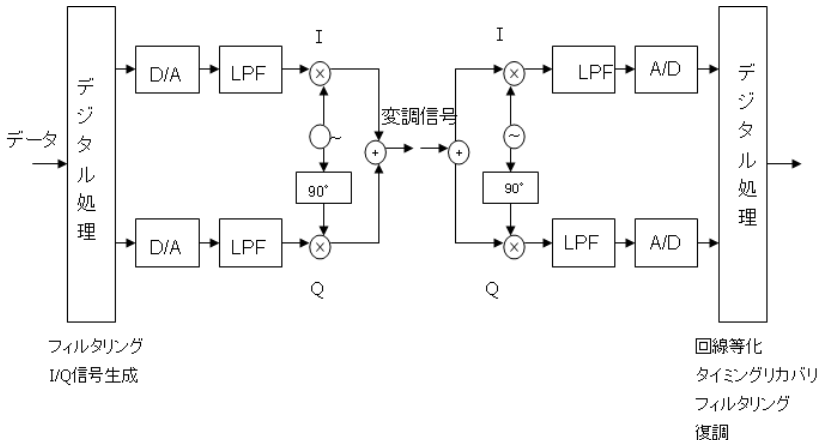


図 2・2 変復調器の構成例

■5群-7編-4章

4-3 VSAT

(執筆者：富士 剛) [2014年12月受領]

VSAT (Very Small Aperture Terminal) とは、ある一つの地球局によりその他の地球局が監視・制御される衛星通信システムにおいて、概ね直径 3 m 程度以下の小径反射鏡アンテナを有する小型地球局を VSAT と称する。各国においてその技術基準は異なるが、制御地球局からの監視・制御を受けることを条件として、各 VSAT の電波免許手続き関連の簡略化を行っている^{13),14)}。従来は固定地球局あるいは可搬型の固定地球局を VSAT と称していたが、近年は船舶などに搭載する移動型の地球局についても VSAT として法整備化が進められている。

標準的な VSAT の構成例を図 3・1 に示す。一般的に VSAT はアンテナ、ODU (Outdoor Unit)、IDU (Indoor Unit) から構成される。送信信号は IDU 内で変調され、アップコンバータ (U-CONV) により送信の中間周波数 (送信 IF) に周波数変換される。送信 IF は OUD 内で更に RF 帯の信号に周波数変換されるとともに、大電力増幅器 (HPA) で増幅された後、アンテナから放射される。アンテナで受信された信号は OUD 内の低雑音増幅器 (LNA) で増幅された後、ダウンコンバータ (D-CONV) により受信 IF 帯の信号に周波数変換され、IDU に送られる。IDU 内で更に周波数変換された後受信信号として復調される。

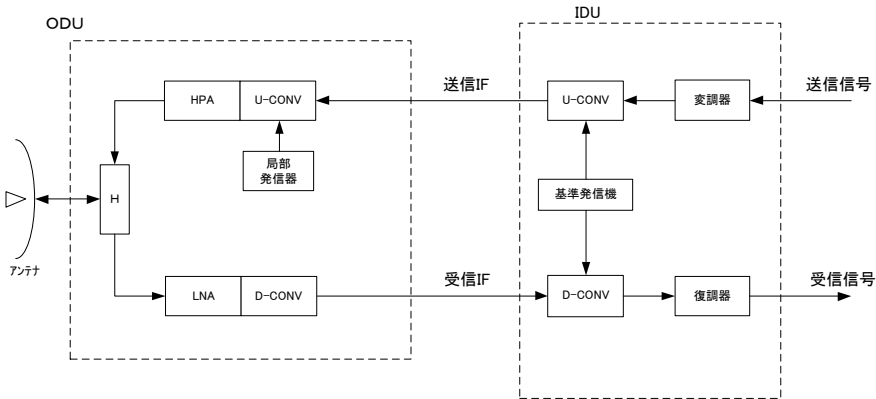


図 3・1 VSAT の構成例

■参考文献

- 1) INTELSAT EARTH STATION STANDARDS (IESS), <http://www.intelsat.com/wp-content/uploads/2012/12/IESS-101E.pdf>
- 2) 鴨川健司, 羽田文彦, 井上雅広, 山本員市: “高度化衛星移動通信システム・サービスについて,” 信学技報, SAT2010-29, pp.1-5, Aug. 2010.
- 3) B.Y. Kinber: “On two-reflector antennas,” Radio Engineering and Electronic Physics, vol.6, pp.914-921, Jun. 1962.
- 4) V. Galindo: “Design of Dual-Reflector Antennas with Arbitrary Phase and Amplitude Distributions,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.AP-12, no.4, pp.403-408, Jul. 1964.
- 5) 水澤丕雄: “鏡面修整カセグレンアンテナの放射特性に及ぼす副反射鏡放射パターンの効果,” 信学論(B), vol.J52-B, no.2, pp.78-85, Feb. 1969.

- 6) 水澤丕雄, 片木孝至: “回転二次曲面鏡系の一性質,” 信学論(B), vol.J53-B, no.11, pp.707-708, Nov. 1970.
- 7) M. Mizusawa and T. Kitsuregawa: “A beam-waveguide feed having a symmetric beam for Cassegrain antennas,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.AP-21, no.6, pp.884-886, Nov. 1973.
- 8) M. Mizusawa, S. Betsudan, S. Urasaki, and M. Iimori: “A dual doubly curved reflector antenna having good circular polarization characteristics,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.AP-26, no.3, pp.455-458, May 1978.
- 9) 水澤丕雄, 田中宏和: “鏡面修整オフセットカセグレンアンテナ,” 信学技報, AP74-37, pp.55-60, Aug. 1974.
- 10) 田中宏和, 蛭子井貴, 水澤丕雄: “試作鏡面修整オフセットカセグレンアンテナの放射特性,” 信学全大, pp.544, Mar. 1975.
- 11) 飯田尚志他: “衛星通信,” pp.150-155, オーム社, 1997.
- 12) 本城和彦: “マイクロ波半導体回路-基礎と展開-,” 日刊工業新聞社, 1993.
- 13) 無線設備規則 第五十四条の三, <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25F30901000018.html>
- 14) ETSI EN 301 428, http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301400_301499/301428/01.03.01_60/en_301428v010301p.pdf