次世代ブロードバンド実現に向けた船舶用アンテナシステム*

井 上 正 夫** 阪 田 哲 次** 縫 村 修 次** 森 茂 久**
夏 目 耕 一** 戸 谷 一 幸** 原 田 良 尚** 尾 崎 裕**

Shipboard Antenna System towards Next Broadband Implementation

By Masao Inoue**, Tetsuji Sakata**, Syuji Nuimura**, Shigehisa Mori**, Kouichi Natsume**, Kazuyuki Totani**,
Yoshihisa Harada**, Yutaka Ozaki**

** 8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki City, Hyogo, Japan 661-8661
Mitsubishi Electric Corporation Communication Systems Center

Abstract

Needs of high-speed mass data communication for vessels have risen world wide. In June 2003, a discussion concerning Earth Station on-board Vessels (ESV) was made during the Committee of WRC-03. Since the earth station having access to the satellites of C-band and the Ku-band Fixed Satellite Service (FSS), it enables the satellite communication to operate for ship services. Especially, since Ku-band has expanded its services, which supports compact equipment smaller than C-band and has been operated for FSS over the world. In this article, the outline of antenna system for Ku-band support ESV broadband is described. The developed antenna is a small antenna system with 0.6 aperture diameter and 46dBW as EIRP that fulfill ESV technological standard requirement.

1. はじめに

船舶向けの高速且つ大容量のデータ通信に対するニーズが世界的に高まっている。ブロードバンド化のニーズに答えるため、船舶向けの高速衛星通信サービスを提供するシステムが実現されつつある。船舶向けの衛星通信サービスは2003年6月に開催された世界無線通信会議(WRC-03)において、船上地球局(ESV: Earth Stations on-board Vessels)に関する審議が行われ、C帯およびKu帯の固定衛星業務(FSS: Fixed Satellite Service)の衛星にアクセスできる地球局として運用することが可能となったため、高速・大容量の海上衛星通信の実現に向けて大きく前進することとなった。

本論文ではKu帯を用いたブロードバンドESVに供するアンテナシステムを開発したのでその概要を示す。

2. ブロードバンドESVシステムの概要

船舶向けのブロードバンド通信を実現するネットワークの一例を図1に示す。ネットワークの運用・管理はNOC(Network Operation Center)が行い、ユーザ地球局はESVと通信を行う。ESVは提供するサービスに応じてさまざまなユーザインターフェイスを装備できる。

図1に示すように NOC の回線制御によりユーザ地球局と ESV 間, ESV 同士あるいはユーザ地球局から複数の ESV への一斉同報送信などのサービスが実現できる。

3. ESV向けアンテナシステム

従来船舶向け衛星通信では1.5/1.6GHz(L帯)などの比較的低い周波数帯が使用されてきたが、ブロードバンド化に向けてはC帯あるいはKu帯が注目されている。特にKu帯は世界中で多くの固定衛星通信用の衛星が運用されていること、また、機器の小型化が図れることがサービスの拡大につながると考えられる。ただし、Ku帯の利用に当たっては従来よりも厳しい制約の基でシステムを実現する必要がある。

以下にアンテナシステムへの要求条件を示す。

(1) ESVに要求される技術基準に適合

隣接衛星および地上システムへの干渉を厳しく抑えるため、軸外輻射電力の抑制および干渉防止のためのアンテナ制御に関する技術基準を満足すること。

(2) 高追尾精度

Ku帯では直径が0.6m以上のアンテナでビーム幅は約2°以下となり追尾精度が厳しくなる上に隣接衛星への干渉対策のためWRC-03決議902では追尾精度を±0.2°以下に抑える規定がある。

*原稿受付 平成18年8月25日。

** 三菱電機株式会社 通信機製作所
〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1

(3) 耐環境条件

船の動揺条件で性能を達成する必要がある。また、船にはエンジン、プロペラなどによる特有の振動があるが、そのような条件下でも耐久性、追尾精度の確保が要求される。これらの環境条件は船舶によっても異なるが、設計基準としては世界的にも多く使われている IEC 60945 の規格を満足することを目標とした。

図1 船舶ブロードバンドネットワークシステムの例

今回上記要求条件を基に表1の主要性能・諸元を有するアンテナを開発し評価した。

項目	主要性能
アンテナ形式	主反射鏡直径 $\phi 60\text{cm}$ 以上 マウント方式 3軸サーボ制御 レドームサイズ $\Phi 900 \times 1050\text{ mm}$
周波数帯	送信: 14.0~14.5GHz, 受信: 11.2~12.75GHz
偏波	直線偏波: 送信・受信直交
交差偏波識別度	送信: 27dB, 受信: 20dB
追尾システム	方式 コニカルスキャンおよび角速度センサーによる 追尾精度 $\pm 0.2^\circ$
偏波追尾	オープンループ方式
EIRP	46dBW
G/T	天頂 11.9dB/K
軸外輻射	WRC-03 決議902準拠
船舶とのインターフェイス	ジャイロコンパス NMEA-0183
動揺条件	ピッチ軸 $\pm 10^\circ / 6\text{秒}$ ロール軸 $\pm 30^\circ / 8\text{秒}$ ヨー軸 $\pm 8^\circ / 6\text{秒}$
ビーム駆動範囲	(1) 方位角方向: 540° 以上連続(巻き取り) (2) 俯仰角方向: $-15^\circ \sim 105^\circ$
最大ビーム駆動速度	(1) 方位角方向: $60^\circ / 15\text{秒}$ 以上 (2) 俯仰角方向: $120^\circ / 15\text{秒}$ 以上 (3) 偏波角追尾: $30^\circ / 15\text{秒}$ 以上
耐環境性	耐風性 (1) 性能保証: 40m/s (平均)、 60m/s (最大) (2) 性能保存: 50m/s (平均)、 75m/s (最大) 耐振性(*) (1) $\pm 1\text{mm}$ にて2~13.2Hz, 7m/s^2 にて13.2~100Hz (2) 各共振点にて2時間 衝撃性 $15\text{G} / 10\text{msec}$ 耐熱耐寒性(*) (1) 性能保証: $-25 \sim 40^\circ\text{C}$ 日射 (2) 性能保存: $-30 \sim 60^\circ\text{C}$ 耐湿性 40°C 相対湿度93%
電源条件	AC100/220V, 50/60Hz

(*) IEC 60945規格に準拠

表1 アンテナシステム主要性能・諸元

図2 アンテナシステム構成図

図2にアンテナシステムの構成図を示す。

本アンテナシステムは ADU(Above Deck Unit)および BDU (Below Deck Unit) から構成される。ADU はレドームで覆われることにより耐候性を確保している。レドーム内にはアンテナ反射鏡・給電部、低雑音増幅器 (LNA)、高周波部 (RFM)、アンテナドライブモジュール (ADM) およびアンテナ構造部、アンテナ駆動部が収納される。

RFM は 30W SSPA (Solid State Power Amplifier), 周波数コンバータ (CONV) など構成されている。ADM には GPS レシーバ、角速度センサー、モータ駆動回路が収納される。BDU はアンテナコントロールユニット (ACU), MODEM などから構成される。ACU はジャイロコンパスとインターフェースし船舶の位置情報や姿勢情報を取り込みアンテナを衛星に指向するよう制御する。

ACU には追尾受信部が内蔵されており、受信信号強度を測定し、常にアンテナのビーム中心が衛星を捉えるよう制御する。

以下に各部の設計の要点を示す。

3.1 アンテナ放射・給電部

アンテナ放射・給電部の構成を図3に示す。

アンテナは開口径 0.6m の軸対象パラボラアンテナとした。給電部の主要構成部品は OMT(Ortho-Mode-Transducer)とフィルター類で、OMT で送受信偏波の分離を行い、衛星からの到来波は OMT で取り出され LNA に送られる。送信波は SSPA からロータリージョイント(R/J)を経由して OMT のもう一方の直交する端子に入力し衛星へと送信される。本アンテナの偏波面追尾はアンテナの反射鏡や給電部全体を回転させることにより実現している。

図3 アンテナ放射・給電部の構成

放射系の設計では以下の WRC-03 決議 902 に基づく周波数共用に関する条件を考慮する必要がある。

(1) 隣接衛星に対する保護

以下の軸外輻射規定を満足する必要がある。

$$2^{\circ} \leq \phi \leq 7^{\circ} \quad 33-25\log \phi \text{ dB(W/40kHz)}$$

$$7^{\circ} < \phi \leq 9.2^{\circ} \quad 12 \text{ dB(W/40kHz)}$$

$$9.2^{\circ} < \phi \leq 48^{\circ} \quad 36-25\log \phi \text{ dB(W/40kHz)}$$

$$48^{\circ} < \phi \leq 180^{\circ} \quad -6 \text{ dB(W/40kHz)}$$

ϕ は主ビーム方向からの離角である。

(2) 地上システムに対する保護

地上固定局を保護するために単一の ESV から放射される水平線方向の輻射電力は以下の規定を満足せねばならない。

① 12.5dB(W/MHz)以下であること。

② 16.3dBW 以下であること。

ここでは小開口アンテナで低サイドローブ化を図る手段として副反射鏡や副反射鏡支持構造のないバックファイアフィード方式を採用することとした。

また、給電部の設計では以下の点に配慮した。

(1) OMT は送信系の BPF と受信系の BRF を内蔵したフィルター体型とし、小型化を図っている。

(2) 反射鏡及び給電部を回転させて偏波面調整することで、回転軸よりも上部の給電部全長を最小限に抑えている。

(3) 交差偏波識別度は、アンテナの交差偏波特性に偏波面追尾誤差を考慮して動揺条件下でシステム要求を満足する。

3.2 高周波部 (RFM)

RFM は SSPA、周波数コンバータおよび RF 制御部から構成されている

3.2.1 Ku 帯高出力・高効率 SSPA

内部整合型高効率高出力 FET (出力電力: 14W, ドレイン効率: 45%) を低損失な導波管回路で 4 合成することにより高出力電力 (30W) と低消費電力 (200W) を両立させている。以下に主要性能を示す。

●周波数範囲: 14.0~14.5GHz

●出力電力: 30W

●消費電力: 200W

●ひずみ特性: -20dBc

(@40dBm)

●質量: 1.5kg

●外形: 206×120×32mm

図4 SSPA

3.2.2 周波数コンバータ

主要性能を以下に示す。

●送信周波数変換器(U/C):

変換周波数: 0.95~1.45GHz→14~14.5GHz

利得可変幅: -20~+17dB

最大出力電力: -0.8dBm

●受信周波数変換器(D/C):

変換周波数: 11.2~12.75GHz→0.95~1.45GHz

周波数コンバータの基本構成を図5に示す。

図5 CONV ブロック図

3.2.3 送信電力制御

RFM の送信電力制御は以下の特徴を有する。図6に電力制御系の構成を示す。

(1) 環境条件の厳しい移動体で、干渉を抑えるために送信電力制御の精度を向上させることは重要な設計条件である。今回送信電力の精度を 1dBrms (RFM として 0.7dBrms, その他 0.5dBrms) に抑えることを目標とした。

(2) バースト信号に対応した EIRP 制御方式を開発した。送信電力設定は以下の手順で行う。

- 変調部から出力される全キャリア数からの目標 EIRP 値を制御部に通知する。
- アンテナ部の RFM に記憶されたアンテナの利得 (レドーム及び周波数特性を含む) から所要 SSPA での出力値を決める。
- SSPA の出力で電力検波された電力値と所要電力値を比較して、クローズドループ制御する。

図6 電力制御系

3.3 機械構造設計

図7にADUの外観構造を示す。

図7 ADU 外観図

船上環境下の運用に配慮し、以下の構造設計を行っている。

- (1) 3 軸 (EL, Cross-EL, AZ 軸) マウント構造を採用し、広角な駆動範囲を有している。また、回転側に電子機器を配置することにより、小型化を図っている。
- (2) レドームは高コストのサンドイッチ構造を避け電気特性に優れた熱硬化型樹脂によるシングルスキン構造とした。
- (3) IEC 60945 に規定された振動条件下で指向精度を満足する設計を行っている。
- (4) ヘリカルアイソレータによる防振マウント構造を採用してアンテナを低剛性とし、軽量化を図っている。また、これにより、船の動揺、船体からの振動等の外乱に対して、安定した追尾精度を確保できる構造

としている。

3.4 追尾システム

船舶用アンテナは、赤道直下から南北極圏にいたる広い範囲で衛星を追尾する必要がある。また、低周波数では大振幅(ロール: $\pm 30^\circ$ を想定)の動揺が、高周波数では船舶特有の大きい加速度(IEC 60945 による $0.7G_{rms}$)の振動が存在し、これらの外乱下においても安定かつ高精度に追尾を維持しなければならない。

以下に今回開発した追尾制御系について述べる。追尾制御系の構成を図8に示す。追尾制御系は GPS センサ、追尾受信回路、角速度センサ、および制御のための演算を行う DSP などから構成される。対象衛星の軌道位置と偏波角度は、ジャイロコンパス(方位)と GPS センサ(現在位置)の情報を用いて船舶の座標系におけるアンテナ方位姿勢の指令値へ変換される。角速度センサの積分量およびコンカルスキャン(後述)によるビーム方位誤差とから現在のアンテナの船舶座標系における姿勢方位を推定し、これをフィードバックすることにより推定量と指令値とを一致させる制御系となっている。

高精度且つ高信頼性追尾システム実現のため以下の対策を講じている。

- (1) アンテナの3 軸周りの回転(方位角、仰角、波面角)を4 個のモータで駆動する方式として広い駆動範囲を持たせているので、任意の方位にある任意の偏波面の衛星に対して連続な追尾が可能である。
- (2) 4 つの回転軸はアンテナ運動部重心にて一点に交わるように配置されており、また駆動には低摩擦のベルトドライブ方式を採用しているため、慣性力による外乱が姿勢方位へ及ぼす影響が最小となっており、動揺や振動に対する感度が小さい。
- (3) アンテナ運動部には高精度の角速度センサを軸に備え、アンテナの方位姿勢が慣性空間に対して変化しないように制御しているため、船がどのように運動しようとも衛星の追尾をはずさない。
- (4) アンテナのビームを衛星近傍で環状に走査し受信レベルの最大方位を検出する方式(コンカルスキャン)を採用しているため、角速度センサで補正できない低周波領域の変動や設置誤差があっても安定した追尾が可能である。
- (5) 角速度センサの信号をモータの駆動指令へ重畳させることにより、船舶の振動の影響をキャンセルする制御方式としている。
- (6) 初期捕捉時に誤ってサイドローブを捕捉することを避けるため、ビーム強度が最大であることを確認できるシーケンスを採用している。
- (7) 船舶の構造物によるブロッケンエリア情報を記憶させることにより、遮蔽を予測した適切な追尾が可能

である。

図8 追尾制御系ブロック図

3.5 アンテナ制御

開発したアンテナシステムは Ku 帯を使用している隣接衛星や地上システムへの干渉を抑えるため ESV として具備すべき以下の機能要求を満たすよう設計している。

- (1) 衛星を追尾できなくなった場合、又は他の衛星に干渉を与える可能性がある場合は送信を停止
- (2) 水平線方向の軸外輻射電力の許容レベル維持
- (3) 隣接衛星方向の軸外輻射電力の許容レベル維持
- (4) 地球局からの送信許可信号を受信した場合のみ送信可能
- (5) 自局の障害を検出する機能を持ち、障害を検出した場合及び地球局からの信号を正常に受信できなくなった場合、送信を自動的に停止

4. 評価結果

開発した直径0.6mアンテナシステムの総合評価を行い以下の結果を得た。

4.1 アンテナ性能

表2に主要性能の検証結果を示す。

項目		実測結果
アンテナ利得	受信帯	34.2dBi
	送信帯	36.5dBi
交差偏波識別度	受信帯	28.8dB
	送信帯	29.9dB
軸外輻射	14GHz	図9 参照
G/T (天頂方向)	12.0GHz	14.0dB/K
EIRP	14GHz	46.0 dBW

表2 アンテナ性能実測結果

図9に送信系の軸外輻射パターンの実測値を示す。軸外輻射はサイドローブ特性の実測パターンから算出した。ここでは送信のデータ速度を3Mbps、変調方式をQPSK、EIRPは46dBWとした。図9からWRC-03に規定されたマスクおよび水平線方向の規格を満たす

ことを確認した。

図10に近軸の受信放射パターン実測値を示す。第1サイドローブはおおむね-20dB以下であり、サイドローブによる誤捕捉や隣接衛星への干渉を抑える設計の妥当性を確認した。

図9 軸外放射パターン (送信)

図10 軸外放射パターン (受信)

4.2 追尾性能

追尾性能確認のためテストレンジにてアンテナを動揺試験機(図11)に載せ評価を実施した。

図11 動揺時の追尾性能試験

図12に動揺時の追尾性能試験結果を示す。追尾精度は、規格値0.2° o-p以下であることを確認した。図13、14に示すように実際の船上においても、追尾精度は規格値0.2° o-p以下であることを確認した。

図 12 動揺時の追尾性能試験結果

(※1) この誤差増大は、追尾精度試験実施時の姿勢基準信号の異常変化(データ化け)によるもの

図 13 船上試験状況

図 14 船上での追尾性能試験

また、図 15 に示すように傾斜状態で加振しながら追尾精度を測定用角速度センサーで測定し、追尾誤差劣化が設計許容誤差以内であることを確認した。

図 15 加振時の追尾性能試験

5. むすび

従来の低い周波数帯のシステムと異なり、Ku 帯を用いる ESV は追尾精度や他の無線システムへの干渉対策などの厳しい制約があるが、今回開発したアンテナシステムの評価を通じてこれらの制約を克服でき、船舶向けのブロードバンド通信が実現できる見通しを得た。今回開発した開口径 0.6m のアンテナは ESV の技術基準に準拠する最小のアンテナであり、主として内航船への適用が期待できるが、外航船用には 1 m 級のアンテナ径が必要と考えられる。今回開発した技術はこれらのアンテナにも適用でき、今後ユーザーニーズに適合したアンテナシステムが供給できると考える。

6. 謝辞

最後に、船上試験等ご協力頂きました NTT コミュニケーションズ株式会社 岡田一泰氏、小島利昭氏、菅澤博明氏、ならびに JSAT 株式会社、宇宙通信株式会社の方々には、厚く感謝致します。