海事衛星通信に用いるストラップダウン型 2 軸 アジマスエレベーション方式のアンテナスタビライズ制御*

村 越 尊 雄^{*1}

Antenna Stabilizing Control System Employing Strapdown 2 Axis Azimuth/ Elevation Method for Maritime Satellite Communications

Takao MURAKOSHI^{*2}

^{*2} TOKIMEC INC. MARKETING & RD CENTER, 333-4, Azumacho, Yaita, Tochigi, 329-2136 Japan

A two-axis antenna-stabilizing control device which does not need a level sensor has been developed. The control incorporates a zero-servo method which zeros the two gyro outputs by rotating an antenna both with an azimuth motor and an elevation-servo motor. This method simplifies control. In addition, the mounts can be miniaturized and made light-weight. By using three accelerometers fitted directly on to the antenna, it is possible to calculate an elevation of the antenna and an inclination correction value around the azimuth axis. In experiments using a Scorsby Table, it was confirmed that pointing errors were less than a few degrees.

Key Words: Servo Mechanism, Two Axis Mount, Antenna Control Device, Gyro, Accelerometer

1. 諸 言

衛星を介して船舶と陸上, または船舶間などで通信を行う海事衛星通信において, 数十度もある船体の動揺下でいかにアンテナを正確に衛星方向に指向させるかが重要となる。本研究では, インマルサット(国際海事衛星機構)スタンダードM用の小型アンテナシステムの開発を目標とし, アンテナ指向制御の簡略化に主眼を置いた。一般にアンテナの制御機構としては, 4 軸方式, 3 軸方式および 2 軸方式があげられる。4 軸方式⁽¹⁾は船の動揺を補正した水平安定台(X-Y軸)を設け, その上にAz(Azimuth)とEl(Elevation)機構を設けたもので, 指向精度は高いが構造が複雑で大型になる問題があった。2 軸方式はX-Yマウント, Az-Elマウントの 2 種類がある。前者は低仰角で後者は高仰角でジンバルロック(機械的に軸の自由度が無くなる)が発生し, 両者ともこの時指向精度が低下する欠点がある。3 軸方式は 2 軸マウントのジンバルロックを回避するた

めに一つの駆動軸を追加したもので, 比較的良好な指向精度が得られるが, 軸制御は複雑で形状も 2 軸マウントより大きくなる。このため最近では 2 軸マウント方式の研究が数多く行われている^{(2), (3), (4), (5)}。しかし従来の 2 軸マウント方式は, アンテナとは別に設置した動揺角センサーを用いてアンテナを衛星方向に指向させているためシステムは複雑になる。また動揺角センサーとアンテナ間のアライメントの経時変化や取り付け部の挙動の違いにより指向誤差が発生する問題が考えられる。本研究ではこれらの問題を踏まえ小型化に有利な 2 軸Az/Elマウントにおいて動揺角センサーを外部に必要としないストラップダウン型(ジャイロをアンテナに取り付ける)を用い, ジャイロの出力がゼロになるようにAz-El軸の周りにアンテナを回転させる制御方法を考案した。また加速度計もアンテナに取り付け, アンテナ方向の演算を可能とし設定した衛星方向に指向できるようにした。本論文はインマルサットの動揺勧告値を参考にし, 運用時間の 90% で指向誤差 10° 以内⁽³⁾を目標として, アンテナ指向装置の制御方法について述べ, 低仰角時(45度以下)での実験結果について報告する。

* 原稿受付 1999 年 8 月 24 日。

^{*1} 正員, (株)トキメック MRD センター (〒329-2136 矢板市東町 333-4)。

E-mail: t-murakoshi@tokimec.co.jp

2. アンテナ指向制御方法

2・1 アンテナスタビライズ装置構成 図1に本研究で用いたアンテナスタビライズ装置の基本構成図を示す。以下に各部の機能を述べる。

① 方位ジャイロ

アンテナ軸Xと仰角軸Yの双方に直角なZ軸周りの角速度を検出するもので、TFG160を使用している⁽⁶⁾。

② 仰角ジャイロ

仰角軸Y-Y周りの角速度を検出する。

③ X加速度計

アンテナ軸X-Xの水平面からの角度を検出する。

④ Y加速度計

仰角軸Y-Yの水平面からの角度を検出する。

⑤ Z加速度計

アンテナ軸と仰角軸の双方に直角な軸Z-Zの水平面からの角度を検出する。

⑥ 船首方位角発信器

船首方位角 ϕ_G を検出するセンサーであり、ジャイロコンパスや磁気方位センサーを用いる。

⑦ GPS

衛星を利用した測位システムであり、船の緯度、経度及び船の進行速度を検出する。

⑧ 方位サーボモータ

取付面（船体面）と垂直な方位軸周りにアンテナを回転させるモータ。

⑨ 方位角発信器

船首方向からの方位軸周りの回転角 ϕ を発信する。

⑩ 仰角サーボモータ

仰角軸周りにアンテナを回転させるモータ。

⑪ 仰角発信器

取付面からの仰角軸周りの回転角 θ を発信する。

⑫ 演算部

アンテナ軸を衛星方向に指向させるように、ジャイロや加速度計の出力を入力演算し、サーボモータ⑧⑩へ命令制御信号を送る。日立のH8マイコン使用。

⑬ アンテナ

改良型ショートバックファイヤアンテナ

2・2 衛星方位角と衛星仰角の演算 本システムではGPSより得られた船体の緯度と経度と、通信衛星の位置から衛星の方位角 ϕ と仰角 θ_s を演算する。以下にその方法に付いて述べる。

R：地球の半径（6 3 7 8 Km）

R_s ：地心から衛星までの距離（4 2 2 3 0 Km）

λ ：船体の緯度

L：船体の経度

Fig. 1 Apparatus of antenna system

λ_s ：衛星の緯度

L_s ：衛星の経度

これらの記号を用いて、船からの衛星方向へのベクトルSを示すと

$$S_x = R_s \sin \lambda_s \cos \lambda \cos (L_s - L) + R_s \cos \lambda_s \sin \lambda - R \quad (1)$$

$$S_y = R_s \sin \lambda_s \sin (L_s - L) \quad (2)$$

$$S_z = -R_s \sin \lambda_s \sin \lambda \cos (L_s - L) + R_s \cos \lambda_s \cos \lambda \quad (3)$$

となり、衛星の方位角 ϕ 、仰角 θ_s は

$$\tan \theta_s = S_x / \sqrt{S_y^2 + S_z^2} \quad (4)$$

$$\tan \psi = S_y / S_z \quad (5)$$

と求められる。

2・3 アンテナ仰角演算 図2にシステムで用

いる座標系を半径1の球面で示す。アンテナ軸は次のような座標の変換により衛星を指向する。

(ステップ1) ヨーイングの発生

船がZ軸周りに $-\dot{\gamma}$ の角速度で回転し、船首は北から ϕ_G の方向を向く。

(ステップ2) ピッチングの発生

Y_1 軸周りに $\dot{\alpha}$ の角速度で回転し、ピッチ角 α が発生。

(ステップ3) ロールの発生

X_2 軸周りに $\dot{\beta}$ の角速度で回転し、ロール角 β が発生。

(ステップ4) 方位軸周りの回転

Z_3 軸周りに $-\dot{\phi}$ の角速度で回転し、方位角 ϕ が発生。

(ステップ5) 仰角軸周りの回転

Y_5 軸周りに $\dot{\theta}$ の角速度で回転し、仰角 θ が発生。

Fig. 3 Control block diagram

2.5で述べる。加算器の後に付加されている積分器は上述のジャイロドリフトを補償するためのものである。上記の拘束系の制御による方位角 ϕ 、及び仰角 θ を伝達関数を用いて記述する。ただし、船体の動揺は考えず、 $h_f = 0$ 、 $\theta_A = \theta$ として扱う。

$$\phi = \frac{KK_T(T_i \cdot s + 1)(\psi - \phi_G) - KK_G T_i U_z \cdot s / \cos \theta}{T_i \cdot s^3 + KK_G T_i \cdot s^2 + KK_T T_i \cdot s + KK_T} \quad (16)$$

$$\theta = \frac{KK_T(T_i \cdot s + 1)\theta_s - KK_G T_i U_y \cdot s}{T_i \cdot s^3 + KK_G T_i \cdot s^2 + KK_T T_i \cdot s + KK_T} \quad (17)$$

ここで $K = K_p K_{VF} / N$ である。ジャイロのドリフトがある場合、方位 ϕ と仰角 θ の最終値は

$$U_z = \tilde{U}_z / s, U_y = \tilde{U}_y / s, \psi = \tilde{\psi} / s \\ \phi_G = \tilde{\phi}_G / s, \theta_s = \tilde{\theta}_s / s \quad (18)$$

とおき、

$$\phi = \tilde{\psi} - \tilde{\phi}_G, \theta = \tilde{\theta}_s \quad (19)$$

となり、アンテナ軸は衛星方向に指向するのがわかる。

積分器の出力を S_z 、 S_y とすれば

$$S_z = \frac{(\phi_G - \psi)(1/K \cdot s^2 + K_G \cdot s) \cos \theta - K_G U_z}{T_i / KK_T \cdot s^3 + T_i K_G / K_T \cdot s^2 + T_i \cdot s + 1} \quad (20)$$

$$S_y = \frac{-\theta_s(1/K \cdot s^2 + K_G \cdot s) - K_G U_y}{T_i / KK_T \cdot s^3 + T_i K_G / K_T \cdot s^2 + T_i \cdot s + 1} \quad (21)$$

この最終値を求めれば

$$S_z = -K_G \tilde{U}_z \quad (22)$$

$$S_y = -K_G \tilde{U}_y \quad (23)$$

となる。この結果から (22) および (23) で表される出力を方位ジャイロと仰角ジャイロの出力にそれぞれ加算することでジャイロのドリフトによる影響を補償できる。

2・5 傾斜補正 船体が動揺や固定的な傾斜をした場合、アンテナに取り付けられたジャイロがこの運動を即座に検出しゼロサーボ制御によりアンテナ軸を衛星方向に指向させる。方位の拘束系制御において用いる衛星方位角 ϕ 、船首方位角 ϕ_G は慣性空間に対しての角度であるが、方位発信器出力 ϕ は船体面と垂直な方位軸周りの回転角であるため、アンテナ軸を正確に衛星方向に指向できない。この現象は船体面が傾いた場合に生じ、方位軸周りに余分に回転させることでアンテナ軸を衛星方向に指向させることになる。この時の角度が傾斜補正值である。

図4は傾斜補正值を球面三角を用いて示したものである。アンテナ軸基準の座標でありピッチ ξ 、ロール η が発生し、アンテナ軸は方位軸 OZ' の周りに h_p 、仰角軸 OY' の周りに θ 回転したときの様子であり、アン

Fig. 4 Inclination correction value in a spherical trigonometry

テナ軸は衛星方向を指向している。傾斜補正値は点Eからの方位軸周りの回転角であり弧EC($=h_f$)となり、三角形ECXにおいて

$$\tanh_f = \sin \eta \cdot \tan(\theta_s - \xi) \quad (24)$$

と求められる。(24)式から明らかなように傾斜補正値 h_f は動揺角 ξ 、 η の関数である。従来のアンテナ指向制御は動揺角を動揺角センサーで計測し、式(24)により演算しアンテナを指向させていたが、本研究では加速度計の出力を用いて傾斜補正値を表し演算を簡略化できる。三角形ECXにおいて

$$\sinh_f = \tan \eta \tan \theta \quad (25)$$

$$\cos \eta = \sin \theta / \sin(\theta_s - \xi) \quad (26)$$

三角形FB'Y'において

$$\sin Y'B' = \sin \eta \cos \xi \cosh_f - \sin \xi \sinh_f \quad (27)$$

であり、これはY加速度計の出力を示している。

式(25)、(26)を用いて式(27)を変形すれば

$$\sin Y'B' = \sin \eta \cos \theta_s / \cos \theta \quad (28)$$

式(25)、(28)から η を消去して h_f を求めれば

$$\sinh_f = \frac{\sin \theta \sin Y'B'}{\sqrt{\cos^2 \theta_s - \sin^2 Y'B' \cos^2 \theta}} \quad (29)$$

となり、 $\tanh_f$ は

$$\tanh_f = \frac{\sin \theta \sin Y'B'}{\sqrt{\cos^2 \theta_s - \sin^2 Y'B'}} \quad (30)$$

である。ここで

$$\cos^2 \theta_s - \sin^2 Y'B' = \sin^2 A'P' \quad (31)$$

であるから、傾斜補正値は

$$\tanh_f = \frac{\sin Y'B'}{\sin A'P'} \sin \theta = \frac{g_y}{g_z} \sin \theta \quad (32)$$

となる。式(32)はtan関数であり、分母と分子の符号に

より象限が変わる。方位系の拘束系は加算器の出力がゼロになるように制御を行うから

$$h_f = \psi - \phi_G - \phi \quad (33)$$

となる。 ϕ 、 ϕ_G 及び ϕ の値によって h_f は数百度以上にもなる。結局式(32)と式(33)の両方から象限を決定し、傾斜補正値 h_f を求めることができる。

3. 実験結果

実験はアンテナ指向装置を動揺装置により動揺させ、信号処理装置に動揺角とアンテナ指向装置の信号を取り込み、指向誤差を計算し評価した。

3・1 傾斜補正確認試験 図5に2.5で説明した傾斜補正の確認実験結果を示す。実験条件はピッチが 15° 固定、ロールが $\pm 12^\circ$ 、衛星方位 ϕ が 90° 、衛星仰角 θ_s を 45° とした。図5からわかるように、

Fig. 5 Pointing errors in fixed inclination

指向誤差は数度以内であり固定傾斜が発生しても十分対応できることがわかる。

3・2 動揺試験結果 図6は三軸の動揺台を用いた動揺試験の結果である。衛星方位角 ϕ は 90° 、衛星仰角 θ_s は 45° とした。動揺条件はロールが 25° 8秒周期、ピッチが 15° 、6秒、ヨーは 8° 、16秒とし、測定時間は10分とした。指向誤差は、ピッチ、ロール、ヨーを動揺台から、またアンテナの方位角 ϕ 、仰角 θ をアンテナ指向装置からコンピュータに取り込み、計測終了後アンテナ軸方向を計算し、設定アンテナ方向と比較評価した。この結果からわかるように、指向誤差は 5° 以下と小さく、方位、仰角の動きも安定して

Fig. 6 Pointing errors, $\phi 90^\circ$ $\theta s45^\circ$

いる。

表1は他の衛星方向における動揺の試験結果である。これらの結果から、本研究の目的である「運用時間の90%でアンテナ指向誤差 10° 以内」を十分満足しているのがわかる。

4. 結 論

本研究により次のような結論を得た。

- ① アンテナに直接ジャイロと加速度計を取り付けたストラップダウン型方式の採用した2軸Az-E方式の制御により外部動揺角センサーを不要とすることができ指向装置の簡略化ができた。
- ② ジャイロの出力をゼロにするように2つのモータを

Table 1 Pointing errors in scorsby table test

ϕ (deg)	θs (deg)	P. E (mean)	P. E (maximum)
0	10	1.02	1.87
45	10	0.85	1.67
90	10	0.60	1.22
0	45	0.60	1.34
45	45	0.61	1.32
90	45	0.95	4.31

回転させるゼロサーボ方式を確立し、従来のような船体の動揺角を用いた複雑な演算処理を不要とできた。

③ アンテナに直接取り付け付けた加速度計を用いた固定傾斜に対しての補正法を考案し、固定傾斜に対する指向誤差を数度以内にすることができた。

④ インマルサットスタンダードM規格に対する目標としての「運用時間の90%でアンテナ指向誤差 10° 以内」を十分満足できた。

また、本論文で開発した制御装置は、BSやCSの受信などの各種移動体通信用として適用が期待される。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、群馬大学工学部 長屋教授に懇切丁寧なご指導を承りました。ここに記して謝意を表します。

文 献

- (1) “国際通信の研究—特集記事『海事衛星通信』—”, KDD Tech. J., 112, pp. 199-290 (1982).
- (2) 真田, 安藤, 金居 “2軸アンテナ駆動... 装置を用いた船舶用簡易衛星放送受信装置”, 日本航海学会論文集, 77号, pp. 91-101 (1987)
- (3) 塩川, 唐沢, 結城 “海事衛星通信船舶局用EL/Azマウントの指向誤差軽減法”, 電子通信学会論文誌 Vol. J69-B No. 8, pp. 833-841 (1986. 8)
- (4) 千葉, 安田, 安東他 “2軸制御方式による船舶用衛星放送受信システムについて”, SANE88-24
- (5) 北村, 荒木, 北山, 佐々木 “船舶用指向性アンテナマウント”, 安立テクニカル, 36, pp. 19-34 (1978)
- (6) 佐藤 “音叉型振動ジャイロについて”, 日本航空宇宙学会誌, 36巻, 第408号 (1988. 1)