船用動揺安定台を用いたKaバンド固定局アンテナによる 船陸間通信実験について

岡村 直興*・榎野 純**・大津 皓平***・鈴木 智美****

On board Communication Tests between Ship and Shore with Unmovable Type of Antenna Using Stabilizing Platform

Naoki OKAMURA, Jun KAYANO, Kohei OHTSU and Tomomi SUZUKI

Abstract

This paper discusses an onboard large-volume Ka band communication tests between ship and shore through WINDS(Wideband Inter Networking engineering test and Demonstration Satellite) using the stabilizing platform. In the movable satellite communication, it is necessary to not only cancel the ship's rolling, pitching and yawing motions but also to track for the change caused by satellite's azimuth and elevation. In this paper, for cancelling the ship's motions, an autoregressive model for feed forward signal is adopted. With regard to yawing, PD feedback control system is adopted. The objective of this study is to verify the performance of stabilizing platform and the validity of this stabilizing platform on the movable ships without the feedback control by using some beam signal from the satellite.

Keyword : Marine Broad-band, WINDS, Communications Satellite, Stabilizing Platform

キーワード: 海洋ブロードバンド, WINDS, 衛星通信, 動揺安定台

1. はじめに

東京海洋大学では洋上船舶と陸上間での高速・大容量通信の実現を目指して 2002 年から「海洋ブロードバンド通信プロジェクト」⁽¹⁾と呼ばれる企業との共同開発プロジェクトを行っている。この研究は大きく 2 つの研究テーマに分かれ、ひとつは主として遠洋区域と陸上を結ぶ衛星回線を用いたネットワーク、もうひとつは陸上ネットワークを使う沿海区域の船陸間通信である。その中の前者で行った開発の一環として、ルネベルグアンテナと呼ばれる多衛星を介して一つのアンテナで送受信できるアンテナも開発してきた⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

ところで、これまで SeaTel 社や Invsat 社等によって船用衛星追従アンテナは多く開発されてきた

が、それらはアンテナ部と動揺安定部が一体となっていた。著者等が今回開発した船用衛星追尾アンテナは、これに対してアンテナ部と動揺安定部は役割的に完全に切り離されている。したがって、動揺安定台上のアンテナ部では通常行うコンキヤルスキャン等の細かい追尾制御は行わず、動揺安定部に全てそれらの機能を任す方式である。

このアンテナの開発において得られた技術のひとつとして、船体が大きく移動しない船上において動揺する船舶と衛星間のビーム指向誤差を電波法施行規則に定められた送信要件である制限内 (± 0.2 度) に抑制することが可能な水平プラットフォームを作ること成功した。そして、この技術を使い既存の固定局アンテナをプラットフォーム

* 学生会員 東京海洋大学大学院 (〒135-0044 東京都江東区越中島 2-1-6) m095003@kaiyodai.ac.jp

** 正会員 東京海洋大学海洋工学部 kayano@kaiyodai.ac.jp

*** 正会員 東京海洋大学海洋工学部 ohtsu@kaiyodai.ac.jp

**** 非会員 独立行政法人宇宙航空開発研究機構

上に搭載し、動揺する船上でも安定的に衛星から発射される水平ビームの受信が可能であることを示してきた。しかし、著者等が行ってきた先行研究において残された課題として、

- (1) 船体の位置が移動しても追従可能な移動局にすること。
 - (2) 本格的な送信実験を行うこと。
- などがある。

そこで今回著者等は、これまでの関連論文⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾では、受信は行っているものの送信事例の報告が必ずしもなされていないことを鑑み、独立行政法人宇宙航空開発研究機構（以下 JAXA）と独立行政法人海洋開発機構（以下 JAMSTEC）と共同で、上記 2 つの課題を解決するため本学練習船「汐路丸」および JAMSTEC 所属「かいよう」を供試船に実証試験を行った結果を報告する。

ところで、既存のこの種の移動局アンテナでは計測した衛星からの水平ビームを受信し、コンキヤルスキャン等で水平ビーム強度が最高になる方向を探索する機能を持っている。しかしながら、本論文における著者等の実験の特徴のひとつは、動揺安定台に搭載させた固定局アンテナは改良せずに、代わって動揺安定台に船体の動揺を打ち消す減揺制御とともに、移動する船舶と変化する静止衛星の相対的な Azimuth（以下 Az）・Elevation（以下 El）の変化を追従する機能を持たせたことである。すなわち本システムは水平ビーム強度信号からのフィードバック制御を行わないオープンループ制御による実験であると言える。

以下では、JAXA 主導のもと東京海洋大学所属練習船「汐路丸」と JAMSTEC 所属海洋調査船「かいよう」で行った、JAXA の超高速インターネット衛星「きずな」⁽⁶⁾を利用した船陸間ハイビジョン映像双方向通信実験のうち、動揺安定台の船体動揺の補償と航行中の船舶から見る衛星の Az・El の変化に対する補償について報告する。

2. 実験概要

2.1 船用衛星アンテナの要件

本研究で利用する「きずな」では超高速通信を実現するため Ka バンドが使われている。Ka バンドは、現在衛星通信で広く使われている Ku バンドに比べ使用周波数が高いため、広帯域通信が可能である。また、アンテナの直径が小さくできる。しかし、雨などの影響による減衰が大きく、通信

ビームの指向性が高くなければいけないという特徴がある。アンテナが受信のみの場合には指向精度の制限は低い、送信を行う場合には電波法施行規則に要求される高い制限がある。今回使用したアンテナは動揺安定台に搭載が可能な可搬型 VSAT1.0m アンテナを使用した。

洋上の船舶では船体動揺が起こるため、安定した通信を確保するために船上に水平な空間を作る必要がある。そこで、動揺安定台を用いて減揺制御をすることとした。また、本研究で用いたアンテナは可搬型であるが固定局用であるため、自らは衛星追尾機能を持たないアンテナである。したがって、船舶の動揺安定補償とともに移動する船舶の位置と衛星との相対位置の変動に対する補償も動揺安定台に担わせる必要がある。また、実用的で安定した通信を確保するために搬送波雑音電力密度比(C/N0)が 108dB 以上でなければならない。

2.2 船用動揺安定台

本研究では、その機構部を株式会社コスメイトにより作成された船用水平安定旋回台を船用動揺安定台として用いた (Fig.1)。主な仕様を Table.1 に示す。ロール軸、ピッチ軸、ヨー軸を操作する事ができ、本実験では船体動揺の逆振幅と、算出した衛星の Az・El を各軸へ変換し、船体動揺の逆振幅値と衛星の Az・El からの変換した値を足し合わせた値を動揺安定台への制御入力値とする。

Table.1 Specifications of Stabilizing Platform

Item	Rolling	Pitching	Yawing
Limits of Movement	±20 deg	±20 deg	±60 deg
Maximum speed	30deg/s	30deg/s	30deg/s

Fig.1 Stabilizing Platform

2.3 姿勢計測装置(ジャイロ)

船体動揺の計測装置として、IXSEA 社の OCTANS を使用した。OCTANS は高精度の光ファイバージャイロを使用し、その精度はロール軸角度、ピッチ軸角度は 0.01 度、ヨー軸角度について 0.1 度の分解能を持っている。ヨー軸のドリフトで発生する誤差の補正の為に OCTANS への外部入力として GPS 受信機を使用する。今回の実験では、計測周期を 20Hz、動揺安定台の制御周期を 20Hz とした。

3. 動揺安定台の制御の目的

このシステムの制御の目的は、動揺安定台を船舶上へ搭載し、動揺安定台のプラットフォーム面を船舶の動揺に対して逆振幅で運動させることにより船舶上に動揺のない水平面を作りあげることである。さらに、船舶の緯度・経度を計測し、「きずな」の Az・EI を算出し、動揺安定台のプラットフォーム面に固定された固定局アンテナを「きずな」の方向へ向けることである。

3.1 AR モデルを用いた船体動揺の予測

船体動揺の減揺は追従制御が基本となる。そのため、単に動揺センサーから得られる値の逆振幅のみを、動揺安定台の制御入力値とした場合、動的な遅れや装置の追従遅れが存在し水平化に限界がある。そのため、何らかの方法で船体動揺を予測し、その予測値を動揺安定台の制御入力値としなければならない。そこで著者等は、船体動揺の予測に秀でた力を発揮し、かつ実績のある自己回帰モデルを採用することとした。ただし、ローリングとピッチングについては自己回帰モデルのあてはまりが良いため自己回帰モデルを採用したが⁽²⁾⁽⁴⁾、ヨーイングに関して、本研究で用いた実験システムでは舵の情報が得られずヨーイングの予測が不可能であり、あてはまりが悪いためフィードバック制御である PD 制御を採用した。

自己回帰モデルは、 $x(n)$ を n 時刻におけるピッチングあるいはローリングの傾斜角度の実測値とすると

$$x(n) = \sum_{m=1}^M a(m)x(n-m) + v(n)$$

ここで、

M : 自己回帰係数の次数

$a(m)$: 自己回帰係数

$v(n)$: ガウス分布 $N(0, \sigma_v^2)$ に従う $x(n)$ とは独立の白色雑音

と与えられる。

この自己回帰モデルは、統計モデルであるため、事前に対象とする運動の物理モデルが必要なく、システムの稼働状態における船体動揺の時系列データによってモデルの同定ができるという便利さがある。また、次数 M の決定には赤池情報量基準 (AIC: Akaike's Information Criterion)⁽⁷⁾ を用いた。

$$AIC(m) = N \log(\sigma^2(m)) + 2(m+1)$$

N : データ個数

σ^2 : 次数 m におけるモデルのあてはめ後に残る残差

ここでは、供試船において実験前にあらかじめ採取されたデータから自己回帰係数を求めた。

3.2 衛星位置推定法

アンテナから見た衛星の Az・EI については次のような関係を用いた。すなわち、Fig.2 において各記号を

O	: 地球中心	P	: 船舶の位置
P_{lat}	: 船舶の緯度	P_{lon}	: 船舶の経度
S	: 衛星位置		
Q	: 赤道と船舶経度の交点		
R	: 衛星経度における船舶緯度の位置		
T	: 直線 SO と地球面の交点		
lon	: 衛星と船舶位置の経度差		
d	: 衛星と船舶との距離		
r	: 地球半径	h	: 衛星高度

とすると EI の算出は次のようにして計算する。船舶の位置 P から衛星 S までの距離 d を

$$d^2 = \sqrt{r^2 + (r+h)^2 - 2r(r+h)\cos(P_{lat})\cos(lon)}$$

で求める。

Fig.2 Satellite's Azimuth and Elevation calc

直線 AB は P 点における接平面内にあり、平面三角形 PSO と同一平面にある。AB と PS のなす角 EI が P からみた S の EI である。

余弦定理より、

$$(r+h)^2 = r^2 + d^2 - 2rd \cos(p) \quad (1)$$

$$d^2 = r^2 + (r+h)^2 - 2r(r+h) \cos(o) \quad (2)$$

$$\begin{cases} o: & \angle POS \\ p: & \angle OPS \end{cases}$$

(2)式を(1)式に代入すると、

$$(r+h)^2 = r^2 + r^2 + (r+h)^2 - 2r(r+h) \cos(o) + 2rd \sin(EI) \quad (3)$$

(3)式を整理すると、

$$\sin(EI) = \frac{(r+h) \cos(o)}{d} \quad (4)$$

(4)式を変形して、

$$\cos^2(EI) = 1 - \frac{((r+h) \cos(o) - r)^2}{d^2} \quad (5)$$

$$\text{ここで、} \quad \tan(EI) = \frac{\sin(EI)}{\cos(EI)} \quad \text{より、}$$

$$\tan^2(EI) = \frac{((r+h) \cos(o) - r)^2}{d^2 - ((r+h) \cos(o) - r)^2} \quad (6)$$

(6)式に(2)式を代入すると、

$$\tan^2(EI) = \frac{((r+h) \cos(o) - r)^2}{(r+h)^2 \sin^2(o)} \quad (7)$$

$$\tan(EI) = \frac{\cos(o) - \frac{r}{r+h}}{\sin(o)} \quad (8)$$

よって EI は

$$EI = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(o) - \frac{r}{r+h}}{\sin(o)} \right\} \quad (9)$$

また、

$$\begin{aligned} \cos(PT) &= \cos(P_{lat}) \cos(lon) + \sin(P_{lat}) \sin(lon) \cos(Q) \\ \cos(PT) &= \cos(P_{lat}) \cos(lon) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $PT = o$ なので(10)式から(9)式は

$$EI = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos(P_{lat}) \cos(lon) - \frac{r}{r+h}}{\sqrt{1 - \cos^2(P_{lat}) \cos^2(lon)}} \right\} \quad (11)$$

である。また、Az は次のように求まる。

Fig.2 において Az は、

$$Az = \angle RPT + 180 \quad (12)$$

である。

$$\angle RPT = \angle PTQ \quad (13)$$

であり、 $\angle PQT$ が 90° であるから、直角球面三角形の公式により

$$\tan(lon) = \sin(lat) \tan(\angle PTQ)$$

$\angle PTQ$ について整理すると、

$$\angle PTQ = \tan^{-1} \left\{ \frac{\tan(lon)}{\sin(P_{lat})} \right\} \quad (14)$$

(13)式と(14)式を(12) 式に代入すると Az は、

$$Az = 180 + \tan^{-1} \left\{ \frac{\tan(lon)}{\sin(lat)} \right\} \quad (15)$$

である。

算出された EI をローリング・ピッチングの目標値、Az をヨーイングの PD 制御の目標値とした。

4. 実船実験

4.1 供試船の主要目

本実験では、船舶に動揺安定台を固定し、動揺安定台のプラットフォーム面にアンテナを搭載して通信実験を行った(Fig.3)。今回の実験は、東京海洋大学所属の練習船「汐路丸」と、JAMSTEC 所属の海洋調査船「かいよう」で行った。「かいよう」はカタマラン船であるため、通常の船体運動とは異なる運動をする。各船舶の主要目を Table.2 に示す。

Fig.3 Test's scene

Table.2 Ship's principal dimensions

Ship Name	Shioji-maru	Kaiyo
Length	49.9m	61.5m
Breadth	10.0m	28.0m
Depth	3.8m	10.6m
Draft	3.0m	6.3m
Gross tonnage	425ton	3350ton
Average speed	14.6knot	13knot

4.2 実験結果：汐路丸

汐路丸での実験データを Fig.4 の(a)~(d)に示す。風向は南西、風速は 2m/s であった。館山湾沖を平均船速 9.1knot で約 3.0mile を北上した時のデータである。(a)はロール方向(上)とピッチ方向(下)の時系列データである。ロール方向について、船体動揺の最大傾斜角度は 1.40 度に対し動揺安定台のプラットフォーム面は 0.10 度、ピッチ方向について、船体動揺の最大傾斜角度は 0.83 度に対して 0.10 度であった。(b)はロール方向(左)とピッチ方向(右)のスペクトラムである。ローリング

Fig.4 (a) Rolling and Pitching

Fig.4 (b) Spectrum

Fig.4 (c) Yawing and Satellite angle

Fig.4 (d) Carrier to Noise ratio

の周波数について 0.14Hz は船体の固有周波数であるが、0.65Hz はうねり、0.24Hz は波浪の影響である。(c)はヨー方向(上)と衛星の Az・El (下)のグラフである。Az・El 合わせて約 0.1 度変化した。(d)は C/N0 である。平均約 111.6dB で安定した通信ができた。微小な変動が見られるが、これは誤差の範囲である。14:03 に船首方位の変化に伴い C/N0 が 0.2dB 程度減少しているようにみられる。これは船体構造物の影響だと思われる。

Fig.5 (a) Rolling and Pitching

Fig.5 (b) Spectrum

Fig.5 (c) Yawing and Satellite angle

Fig.5 (d) Carrier to Noise ratio

4.3 実験結果：かいよう

かいようでの実験データを Fig.5 の(a)~(d)に示す。風向は南、風速は 10m/s であった。伊東沖を平均船速 6.8knot で約 3.2mile を東航した時のデータである。(a)はロール方向（上）とピッチ方向（下）の時系列データである。ロール方向について、船体動揺の最大傾斜角度は 1.52 度に対し動揺安定台のプラットフォーム面は 0.11 度、ピッチ方向について、船体動揺の最大傾斜角度は 1.01 度に対して 0.08 度であった。(b)はロール方向（左）とピッチ方向（右）のスペクトラムである。ロールの周波数は本船がカタマラン船であることにより固有周波数は見られず、周波数が 3 カ所で見ることができ 0.06Hz、0.09Hz、0.13Hz でそれぞれうねり、波浪等の影響であると思われる。ピッチの周波数は 0.1Hz であった。(c)はヨー方向（上）と衛星の Az・El（下）で、合わせて 0.1 度変化している。(d)は C/N0 である。平均約 111.7dB で安定した通信ができた。

4.4 実験結果：まとめ

各船舶の実験でロール方向、ピッチ方向共に動揺安定台のプラットフォーム面では船体動揺を ± 0.2 度以内に軽減できた。両実験で、船舶からみた衛星の Az・El は船舶の移動とともに時々刻々と変化しているが、衛星の Az・El の変化に伴った C/N0 の減少はみられなかった。船型の違う 2 隻の船舶で実験を行い同様な結果が得られた。

5. おわりに

今回、動揺安定台を用いて船体動揺の動揺に対する補償と、船舶の移動に伴って変化する衛星の Az・El の方向へアンテナを向け、船陸間双方向送受信試験を試みた。船のローリング、ピッチングに自己回帰モデルを用いたフィードフォワード制御を採用する事によって水平精度の向上が確認できた⁽²⁾⁽⁴⁾。ヨーイングにはフィードバック制御である PD 制御を採用した。実験の結果、動揺安定台のプラットフォーム面を ± 0.2 度以内に減揺する事ができた。また、航行中の船舶で安定した通信ができ、衛星追尾が可能であるという結果が得られた。船型の異なる 2 隻の船舶で送信実験に成功したことによって、今回提案した手法は周期の違う動揺特性、あるいは多峰性スペクトルを持つ場合でも柔軟に対応できることが確認できた。しか

し、「かいよう」の実験では Fig.5(a)のローリングのグラフの 19:48~19:51 の期間で drift が見られた。今後の課題として、ローリングに見られた drift に対応するため I 制御を入れるなど検討が必要である。なお、本実験で使用したアンテナは、防水対策はしているが、防塩対策や、防強風対策はしていない。少しでも防ぐために、位置が高くなるようにコンパスデッキで実験を行った。JAXA では、船用として防塩対策、防強風対策を行ったアンテナの開発を行っており、今後これらの対策をしたアンテナを用いて実用化を進める予定である。

また、本実験で用いた水平安定台の安定度は更に荒れた海の実験においても高い精度を持つことを実証しており⁽¹¹⁾、本実験より荒天の場合においても十分な性能を持つものと考えている。

謝辞

本実験は、独立行政法人宇宙航空研究開発機構からの受託研究「WINDS を使用しての洋上船舶通信実験のための動揺補償」の一部として行われました。本実験を行うにあたりご協力頂いた JAXA の関係者の方々、JAMSTEC の関係者の方々、有人宇宙システム株式会社の関係者の方々、株式会社衛星ネットワークの関係者の方々、練習船「汐路丸」の乗組員、海洋調査船「かいよう」の乗組員に対して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 庄司り・大津皓平・織田博行・三好晋太郎・岡田一泰・水野勝成：東京海洋大学における海洋ブロードバンド通信システムの開発，NAVIGATION, 第 161 号, pp.37-42, 2004.12.
- (2) 鈴木雅人・大津皓平・浦康彦：海洋ブロードバンドにおける新たな衛星通信アンテナの開発，NAVIGATION, 第 163 号, pp.48-51, 2005.12.
- (3) 鈴木雅人・南清和・大津皓平：動揺安定台の実用化に関する研究—動揺シミュレーションによる減揺効果の確認—，日本航海学会論文集 114 号, pp.171-177(2006)
- (4) 榎野純・塙直人・大津皓平・伊東雅則：自己回帰モデルを用いた動揺安定台に関する研究—I，日本航海学会論文集 103 号, pp.127-134(2000)
- (5) 榎野純・塙直人・大津皓平・伊東雅則：自己回帰モデルを用いた動揺安定台に関する研究

- ー II, 日本航海学会論文集 107 号,
pp.35-40(2002)
- (6) 「きずな」パンフレット: 独立行政法人宇宙
航空研究開発機構
- (7) Akaike, H.: A new look at the statistical model
identification, IEEE Trans. on Automatic
Control, Vol. AC-19, No.6, PP.716-723, 1974.
- (8) 千葉元・安田明生・安東平一郎・山下勝博・
駒宮正男・半間俊士: 船舶における衛星放送
の受信に関する研究, 日本航海学会論文集 81
号, pp.39-48(1989)
- (9) 千葉元・安田明生・安東平一郎・山下勝博:
簡易型自動追尾アンテナによる船舶上での静
止気象衛星画像の受信, 日本航海学会論文集
82 号, pp.129-137(1990)
- (10) 鈴木治・安田明生・山下久雄: 船舶搭載用,
低速回転 Az-El マウントによる衛星追尾方式,
電子情報通信学会論文誌 B-II, Vol.80,
pp714-721 1997.8.
- (11) 篠野雅彦・梶野純・二木祥一・前田克弥: 昼
夜全天候型複合海上監視システムの開発, 日
本航海学会論文集 123 号, pp 61-68(2010)

(2) ロール、ピッチに対しては AR モデルで
動揺の未来値を予測したフィードフォワード制
御を行っております。確かにロール方向に drift
が見られます。今後、I 要素を採用するなど drift
の除去について検討していく必要があります。

質疑応答

岩本才次 (鹿児島工業高等専門学校): 2 点お伺い
します。

(1) Ka バンドは荒天に弱いということですが、
船陸間通信が最も必要なのは、荒天時の航行中
であると思われます。Ka バンドは荒天時にも安
定した通信は可能でしょうか。

(2) 動揺安定台の制御は PD 制御によると説
明があったようですが、ロールに対する動揺安
定台の時系列を見ると時間の経過とともに drift
しているように思われます。これは I 要素が無
い為だと思われそうですが、5°、10°のロールに対
しても示された程度の絶対値の drift で収まるの
でしょうか。

岡村直興: ご質問いただきまして誠に有り難うご
ざいます。

(1) 一般に Ka バンドでは荒天時の安定した
通信が、晴天時に比べ安定しないと言われてい
ます。しかし、経験談になりますが、実験中、
雨が降っていたことがありましたが、問題無く
船陸間の通信が可能でありました。