新しい船用衛星追尾アンテナの開発に関する研究

鈴木 雅人*・大津 皓平**・浦 康彦***

Development of New Satellite Tracking Antenna For Maritime Broad Band Network System

Masato SUZUKI, Kohei OHTSU and Yasuhiko URA

Abstract

Authors designed and developed a new-type of satellite tracking antenna for Maritime Broad Band Communication and a Luneburg Lens Antenna applied in this study because this lens antenna has distinctive functions to communicate with multiple satellites simultaneously. For the sake of tracking a target satellite accurately on board, authors used a gimbals-type of stable platform on which a Luneburg Lens Antenna was installed. Stochastic autoregressive models supported to predict ship's rolling, pitching and yawing behaviors in the stabilizing mechanism. In this paper, the authors describe the principle of this new type of ship's antenna system and evaluate the results of the actual experiments on board.

Keywords : *Horizontal Stabilizing Platform, Luneburg Lens Antenna, AR-model, Satellite Tracking Antenna*

キーワード: 水平安定台, ルネベルグレンズアンテナ, AR モデル, 船用衛星追尾アンテナ

1. はじめに

今日海上と陸上を結ぶ通信基盤として、衛星を用いた船陸間通信は必要不可欠となっている。しかしながら、海上通信と陸上通信を比較するとその通信容量・速度などの格差は比較にならないほど大きい。その理由はニーズの薄い割にサービスエリアが大きいことによるが、他の原因として衛星との送受信を行うアンテナが動揺する船上に置かれていることから船上のアンテナが何らかの衛星追尾機能をもつ必要があり、しかもその要求性能は Ku バンドなどいわゆるブロードバンド帯域になるほど高い精度が求められ、結果として高価になることも考えられる。しかしながら、近年の船員の少人数化、多国籍化等を考えると船舶の運航管理などにリアルタイムでの画像、音声通信を使って陸上から支援を受ける形での新たな船陸間協調運航形態への移行が避けて通れなくなっている。著者等が始めた海洋ブロード

バンドプロジェクト研究はこのような背景により始めたものである。

ところで、このような通信基盤整備に核となる技術には、移動体でのアンテナ送受信技術がある。その現状を見ると、今日船舶用衛星通信に用いられるアンテナはパラボラアンテナである。パラボラアンテナはその原理上単一の衛星との交信に用いられるので船上で複数の衛星の情報が欲しい時、別々に高価なアンテナを用意するか、目標衛星に追尾させるためアンテナ方向を移動させねばならない。

このよう状況を改善するため著者等は、複数衛星との同時交信が可能なアンテナとして、アンテナ部に最近開発されたルネベルグアンテナ (Luneburg Antenna) と呼ばれるレンズ状アンテナを使ったシステムの実用化を目指している⁽¹⁾。

ここでは、このルネベルグレンズアンテナを使っ

* 正会員 東京海洋大学大学院 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6) masuzuki@e.kaiyodai.ac.jp

** 名誉会員 東京海洋大学海洋工学部 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

*** 非会員 SEI ハイブリッド株式会社

た複数衛星同時交信可能なアンテナシステムの原理と開発されたシステムおよびこのアンテナが安定して衛星を追尾できるために必要な水平安定台の性能について実証的に示すことを目的とする。

2. 衛星追尾システムの構成

2.1 ルネベルグレンズアンテナ

本研究のアンテナには、住友電気工業社製のルネベルグレンズアンテナを使用した。このレンズアンテナの形状は Fig.1 に示すように球状が最も良い⁽¹⁾。そしてこの球状アンテナは図の球の半径中心に向かって誘電率 n が半径中心方向に

$$n = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (1)$$

に従って変化する。ここで R は球の半径で r は半径方向の長さである。このような誘電率の連続的変化によって、衛星からの電波は任意の一点で焦点に絞られる。以前はこの誘電率の連続的変化が工作上困難であったが、最近、住友電気工業によって量産が可能となった。

いま、ある衛星から来る電波がこの球面に到達し内部に入射する場合、Fig.1 に示すように電波は式(1)に従って曲がり、最終的に球面の 1 点で焦点を結ぶことになる。この焦点にピックアップを移動してやれば受信が可能となる。他の衛星の場合は、焦点は別の位置に結ぶので別のピックアップをその点に移動してやれば良い。かくしてピックアップの数だけ衛星との交信が可能となる。ところで地上の固定局通信のようにアンテナが固定されている場合はピックアップの移動は簡単である。しかしながら、移動通信のように固定されていない場合、ピックアップ部はなんらかの追尾機能が必要となる。それでも衛星からの電波の受信の場合は比較的簡単であるが、衛星に向けて送信する場合、他の衛星へ送信電波が到達しないように厳しい基準が設けられている(電波法施行規則第 30 条八の 2)。

その基準によると、Ku バンド帯での交信を衛星と行う場合、Fig.2 に示すように、移動体から衛星に向けての送信精度が、

ローリング < 0.2 度
ピッチング < 0.2 度
ヨーイング < 0.2 度

という極めて高精度の追尾機能が必要である。

船体運動は 3 軸の並進運動と 3 軸の回転運動、あわせて 6 軸の運動をしているが、衛星への距離が非

Fig.1 Luneburg Lens Antenna

常に遠距離のため、これらのうち並進運動に起因する影響はほとんど無い。したがって回転運動のみを追従させれば良い。

ところで、船舶の場合は他の移動体と異なり極めて大きな動揺が予想され、アンテナ上部のピックアップのスキャンだけでは満足な追尾性能が得られないことが予想される。

Fig.2 Necessary Accuracies for Satellite Communication

2.2 開発した船用衛星追尾アンテナの構造

著者等はこの精度実現のために 2 段階の追尾方式を採用した。すなわち、

(1) アンテナ基部に水平安定台⁽²⁾⁽³⁾を設け船体の大角度の動揺を減揺させ、精度を各方向に対して 0.5 度以内とする。

(2) 国際基準である 0.2 度以内への追い込みはピックアップの追従によって行う。この追従はステップアレー方式の追従によって電氣的に行う。という方式である。

Fig.3 は全体の構造を示す。水平安定台はピッチング、ローリングをジンバル方式で回転させ、ヨーイング方向はターンテーブルで追従させる。

また上部はアンテナ部であるが、アンテナを球状にすると工作上困難であるので半球状とし、下部に円形の鏝状の反射板(アルミ)を設け、この反射板によって電波を反射させた後、半球内部に入射電波を導く。

Fig.3 Architecture

Fig.4 Satellite Communication System

Fig.4 は電気的なブロック図を示す。(2) の最終的に衛星ビームを正確に追従するステップアレー方式はよく知られていること⁽⁴⁾ およびその精度の向上が本論文の目的ではないことにより、以下の水平安定台の水平安定方式について述べる⁽²⁾⁽³⁾。

2.2 水平安定台

ここで開発した安定台を Fig.5 に示す。XYZ 軸の各回転軸のうち船体上に置かれた光ファイバージャイロによって測定される船体のローリング方向とピッチング方向は、モータの回転によってジンバル方式でこれらの方向に対する角度補償を行う。ヨーイングは船のジャイロコンパスから船首方位を受けてターンテーブルを回転することによって補償を行う。

Fig.5 Horizontal Stabilizing Platform

3. 制御アルゴリズム

3.1 基本となる水平安定法

船体上に水平な平面を構築するための基本となる考え方は、船体の動揺に対し逆振幅・同位相で動揺安定台のプラットホームを動作させることである。すなわち、例えば Fig.6 に示すように船体が左に 10 度傾くとすると、動揺安定台のプラットホームは、船体に対して -10 度傾くことで、プラットホームは水平を保つことができる。

Fig.6 Ship Motion Reduction control

3.2 船体運動予測型水平安定システム

原理的には 3.1 で説明したことでこのシステムは動くが、実際にはアクチュエータの追従遅れ等により偏差が生じるため、このまま単純な離散型 PID フィードバックをこの基本となる水平安定システムに適用すると、Fig.7 のように安定精度が悪い。この時、サンプリングタイムは水平安定台の動きが離散制御特有のステップ状にならないために約 0.06sec と設定されている。そこで著者等は、船体運動を何らかの方法で予測し、その予測結果に追従するフィードフォワード制御機能を付加することにより、追従遅れによる誤差を補償することを考えた⁽³⁾。そしてその予測モデルとして自己回帰モデル(Auto Regressive Model, AR model)による予測を用いてその船体の運動を予測し、Fig.8 に示すようにアクチュエータの追従遅れの時間分を先行出力することで、より水平度の維持精度を向上させることを試みた。

Fig.7 PID control without AR-model (rolling)

Fig.8 Ship Motion Cancel Control with AR model

Fig.9 Long-term Prediction with AR Model
in Rolling Motion

Fig.10 Interpolating of Predictive Value

3.3 船体動揺の予測に用いた AR モデル

船体の動揺角度の予測に用いたモデルは

$$x(n) = a(1)x(n-1) + a(2)x(n-2) + \dots + a(M)x(n-M) + v(n) \quad (2)$$

で表される統計モデルである。ここで $x(n)$ は時刻 n における船体の動揺、 M は著者等が多用してきた最小 AIC 法⁽⁵⁾⁽⁶⁾で求めた次数である。 $a(M)$ は自己回帰係数、 $v(n)$ は予測誤差である。Fig.9 はこの方法によって求めたあるコンテナ船のローリングの予測結果で、610秒近くまでのデータを用いて最小 AIC 法を適用して AR モデルを構成し、その先をカルマンフィルタを使い 20 秒間にわたって予測した結果で、真ん中の線が予測値、点が実測値、両側の線が標準偏差である。ここではローリングのみ描かれているがピッチングも同じように十分な予測精度で船体運動を予測しており、本システムで利用するような高々 1 期先予測においても十分な予測精度を持つと考えられる。

ただし、この船体運動を表す統計モデルは船体運動の観測時間間隔としては 0.5 から 1 秒程度が最も精度が良くかつ実用的である。しかるに追従遅れ補償を行うための予測時間はより短くなることが予想される。予備実験として実験室内でローリング、ピッチングに対する水平台の応答遅れを計測した所、ほぼ 100msec の遅れを生じており、予測区間としては 100msec 程度が最適であることが分かった。(しかし、ヨーイングについてはターンテーブル装置が無いため確認できなかった)。したがって船体運動の予測周期を使って最適なより短い区間での予測が必要となる。ここではその中間での予測値を得る方法として、Fig.10 に示すように 2 次補間公式

$$f(x) = f_0 + r\Delta f_0 + \frac{r(r-1)}{2}\Delta^2 f_0, \quad (3)$$

$$r = \frac{x - x_0}{h}, 0 \leq r \leq 2,$$

$$\begin{aligned} \Delta^2 f_0 &= \Delta f_1 - \Delta f_0 = f_2 - 2f_0 + f_1, \Delta f_0 \\ &= f_1 - f_0, \Delta f_1 = f_2 - f_1 \end{aligned}$$

を使って最適な予測時間における予測値を内挿法によって求めることとした。

4. 実船実験

4.1 設置環境

本研究では以上のような水平安定台付き衛星追尾アンテナシステムを用いて、本大学所属の練習船汐路丸において実験を行った。Fig.11 はその設置位置を示すが、船体強度を考慮し中央デッキとした。そのため一部の方位で構造物により電波が遮られアンテナ受信レベルが低下することとなった。統計モデル作成のためのデータが周期 0.5sec で前もって採られた約 1000 点の観測データに最小 AIC 法によるあてはめを行って求めたモデルを使った。その時の次数は 7 である。

Fig.11 Installation Location

4.2 実験結果

館山沖で受信実験を行った結果を以下に示す。

Fig.12・Fig.13・Fig.14 はそれぞれ実際の船の動揺（ローリング・ピッチング・ヨーイング）と本システムの制御結果を示す水平プラットホーム上に置かれた動揺計測計から得られた対応する運動である。それぞれの図において大きく揺れている波形は船の運動、それに対して小さく変動している波形がプラットホームの対応する運動である。また Fig.15 は同時刻に計測した BS 受信レベルである。Fig.15 に示すとおり、最初の 60 秒付近で電波が遮られアンテナ受信レベルが低下していることが確認される。

Fig.12・Fig.13・Fig.14 より、通常航海時での動揺程度では問題なく水平安定台部の安定度を 0.3 度以内の水平度で保持していることが確認でき、当初の目標である 0.5 度以内を上回った精度であることがわかる。また別途モニターした、BS・CS 放送の映像も鮮明であった。

5. 周波数領域での解析

Fig.15 を見ると、前節で述べたとおり一部の時間においてアンテナ受信レベルが低下している。またこの区間以外でもわずかながらアンテナ受信レベルは上下しており、本装置が衛星を精度よく追尾しきれていない誤差も存在し、受信レベルに悪影響を及ぼす可能性も捨て切れない。そのため、この原因を探るべく、これらの実験結果をフーリエ解析しパワースペクトラムを求め、本システムにおいてどれほど効果的に船体の動揺を打ち消し、衛星を追尾できたのかを検証する。

Fig.12 Rolling (on Deck and on Platform)

Fig.13 Pitching (on Deck and on Platform)

Fig.14 Yawing (on Deck and on Platform)

Fig.15 BS Antenna Level

5.1 解析結果

前節 4.2 の実験結果をスペクトラム解析したグラフを示す。以下の単位はピークを強調するため動揺角に対しては $[\text{deg}^2]$ を dB に直して示している。ローリングに対する解析結果は Fig.16 に示す。図は実際の船のローリングと水平台のローリングの水平度のスペクトラムを示す。Fig.17 はヨーイングと水平台のヨーイングから求めたものである。いずれも大きい方の曲線は対応する船体動揺、小さい方の曲線はプラットホームの対応する動きである。ピッチングについてはローリングと同様の傾向が見られたため、紙面の都合から省略してある。

Fig.16 のローリングに対するスペクトラムを見ると、主要な周波数成分は実験に用いた練習船汐路丸の固有周期であるおよそ 0.15Hz 付近に集中していることがわかる。これに対し水平安定台のローリングの数値を船体のローリング数値と比較すると、本システムによって水平台は十分に減揺され、衛星とのずれがなく追従しているといえる。

Fig.16 Rolling Spectrum (On ship and On Platform)

Fig.17 のヨーイングについても、ローリングと同様に本システムによって大部分の周波数成分を取り除いているといえるが、0.1Hz までの長周期の成分を打ち消し切れていない事が確認できる。そのためのアンテナ受信レベルを示す Fig.18 を見るとわかるように、アンテナ受信レベルはヨーイングと同様の周波数成分を持っている。

Fig.17 Yawing Spectrum
(On ship and On platform)

Fig.18 Antenna Level Spectrum

そこである運動要素への雑音が、アンテナレベルの変動にどの程度寄与するのかを示すノイズ寄与率を求め、どの成分から強く影響を受けているのかを詳細に調べた。ノイズ寄与率は、お互いに関連し合う複数の変数から成るシステムにおいてある要素のスペクトラムが自分自身も含めた他の変数からの影響を受けるかを、周波数領域において全体を1とする割合で表したものである⁽⁶⁾。

Fig.19 は、アンテナ受信レベルのスペクトラムへ与える自身も含めた他の変数からの影響を周波数領域で示した図である。図によるとアンテナ受信レベルの変動はローリング・ピッチングに入り込む雑音によって形成されている部分は少なく、長周期領域においてヨーイングからもっとも強く影響を受けている事がわかる。

Fig.19 Noise Contributing Rate

5.2 ヨーイング追従精度の向上

そこで、実船実験後、計測した旋回動揺データを元に、陸上においてシミュレーションを行ったところ、Fig.20 に示すように目標値との誤差に定常偏差が生じる事が確認できた。そしてこれらの実験から、このヨーイングに定常誤差が発生する原因は、ARモデルによる動きの予測間隔が不適切であったことがわかった。これまではヨーイングのフィードフォワード制御にはアクチュエータの追従遅れを考慮した上で、その予測の間隔をローリング・ピッチングと同じにしていたが、Fig.21 に示すようにそれでは短すぎる事が原因であると考えられた。

このことから、Fig.22 に示すようにヨーイングにおける AR モデルによる予測のタイミングを長くし、より先の船体の動揺を予測・出力することで、動揺安定制御のさらなる精度向上を図った。この時の補間には3次のラグランジュの補間多項式を用いて、動揺安定台の動作が安定する間隔で制御を行った。

この予測区間の変更により、Fig.23 に示すように、ヨーイングの動揺に対する定常偏差は解消する事が出来る事がわかった。

Fig.20 Revision of Prediction time (before)

Fig.21 Prediction time (experiment at on-board)

Fig.22 Prediction time (after revision)

Fig.23 Revision of Prediction time (after)

6. おわりに

著者等は、東京海洋大学工学部で始めた船陸間通信を現在よりできる限り高速・大容量化し、新たな運航形態を創出しようとする海洋ブロードバンドプロジェクト(略称海洋BB)の要素の一つとして、従来とは異なるまったく新しいタイプのルネベルグレンズアンテナを基本とする船用衛星追尾アンテナの開発をした。そして本研究ではそのうち特に受信レベルの良否を左右するそのアンテナ部を支える水平安定台(プラットフォーム)の追尾性能を検証した。以下に検証試験により得られた項目を挙げる。

- (1) システムに採用した動揺安定台により、要求精度 0.5 度以下の誤差を上回る精度(最大誤差 0.3 度以下)で水平を保つことが出来た。
- (2) ローリング、ピッチングに対する水平安定台の応答の遅れはほぼ 100msec であり、したがってこれらの運動の予測時間を 100msec にすれば

良いことがわかった。

- (3) ヨーイングの船体動揺の制御は、実船実験では若干満足し得るものではなかったが、通信を行うには十分な精度であった。
- (4) 実船実験後、ヨーイングの制御を改善するため陸上での動作シミュレーションを行い、ヨーイングの予測時間の見直しにより上項目の欠点が改善される見込みがたった。

現時点では本システムは移動体アンテナとしての許可が得られていないため、電波を送信する事が出来ていない。そのため、速やかに許可を得るためにも、更なる性能の向上を図り、送信実験を行ってみたいと考える。

本研究の遂行に当たり、JSAT 社上瀬氏、住友電工岸本氏およびコスモート社水野社長にお世話になった。ここに深甚の感謝の意を表する。

7. 参考文献

- (1) D. Kraus et al 'Antennas for all Application' McGraw-Hill
- (2) 梶野純・大津皓平・伊藤雅則:自己回帰モデルを用いた動揺安定台に関する研究—□, 日本航海学会論文集, 第 103 号, pp.127-134(2000)
- (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, 第 114 号, pp.171-178(2006)
- (4) 飯田尚志:衛星通信, オーム社
- (5) Akaike, H. 'A New Look at the Statistical Model Identification' IEEE, Trans. on Automatic Control, vol. AC-19, No.6, pp.716-723(1974)
- (6) 尾崎統(編), 北川源四郎(編), 赤池弘次:時系列解析の方法, 朝倉書店

8 質疑応答

萩原 秀樹(東京海洋大学):最初は 1 ステップ先(50msec)先の状態を予測して制御したということですが、何ステップ先を予測すれば最も有効な制御が行えるのでしょうか。

鈴木 雅人:今回の研究では制御サンプリングタイムに影響されずに、さまざまなタイミングでの予測が行えるように改良をしました。そして、アクチュエータの追従遅れを実験結果より読み取り、それを基準に実験を行いましたところ、およそ 2 ステップ先の 100msec の予測を用いた結果がもっとも有効であるとわかりました。