

# 簡易アンテナローテータの実現及び評価

2016sc026 伊藤亮佳 2016sc072 大見真也 2016sc076 佐藤佑亮

指導教員：奥村康行

## 1 はじめに

現在,宇宙には数多くの人工衛星が打ち上げられており,各々ミッションを遂行している.いくつかの人工衛星はCWという比較的消費電力の少ない電波送信方法で,常に機体内部温度やミッション状況などのデータをCWピーコン(モルス信号)として送信している[1].このCWピーコンを受信するのに無線免許は必要なく,誰でも受信ができる.そのためCWピーコンの受信は,小学生などの子供や一般人に向けたアマチュア無線や宇宙工学の教材として用いられている[2].このCWピーコンを受信するためには,単一の指向性を持つアンテナを用いる事が一般的とされている.しかし,一地点における人工衛星の観測可能時間は10分程度と短い時間である.よって,単一指向性を持つアンテナを用いてのCWピーコンの受信には正確な追尾が求められる.本研究では人工衛星を自動追尾する機能を持ったアンテナ固定具の実装を目指す.

## 2 研究の目的

現在,子供や一般人を対象にした衛星追尾イベント[2]などでは手動による追尾が一般的とされているが,手動であることが原因で衛星に対するアンテナの仰角誤差が発生し,人工衛星を正確に追尾できず,CWピーコンを受信できない場合がある.人工衛星を正確に追尾するには,アンテナの方位及び仰角を正確に変更可能であるアンテナローテータが必要となる.そこで筆者らは,誰でも簡単に工作・実験が可能である簡易アンテナローテータの実装を目指す.実装後,簡易アンテナローテータの評価を行う.簡易アンテナローテータの評価に用いるアンテナには,筆者らが作製した八木・宇田アンテナを用いる.

## 3 簡易アンテナローテータ

本節では,本研究で実現する簡易アンテナローテータについて述べる.本研究ではホームセンターなどで購入可能である身近な素材で簡易アンテナローテータの実装を目指す.簡易アンテナローテータの実現構成図を図1に示す.筆者らはArduino,サーボモータを使用し角度制御を行う.以降,作製した簡易アンテナローテータの設計,角度制御方法について述べる.

### 3.1 Arduino

Arduinoとは,14本のデジタル入出力ピン,6本のアナログ入力ピン,6本のアナログ出力ピンが搭載された小型マイコンボードである.プログラム言語はC/C++をベースとしている.本研究では,パルス波を出力するためにArduinoを使用した.

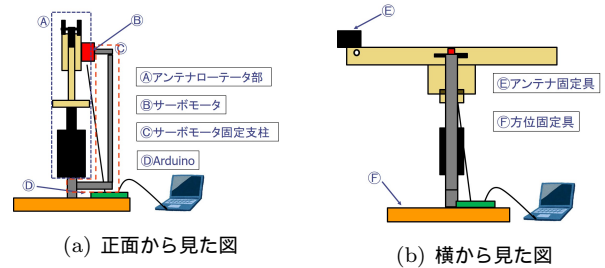


図1 簡易アンテナローテータ実現構成図

### 3.2 サーボモータ

サーボモータとはパルス波を入力することにより,回転角度を自由に制御できるモータである.Arduinoに接続しプログラムを変更することで,自身の望むタイミング,速度での角度変更が可能となる.本研究ではサーボモータには比較的安価なDS3218 20kg高トルクフルメタルデジタルステアリングサーボを使用した.Arduinoの8番ピンよりサーボモータにパルス波を入力する.また,電圧は5Vを使用する.Arduinoとサーボモータを接続した回路図を図2に示す.

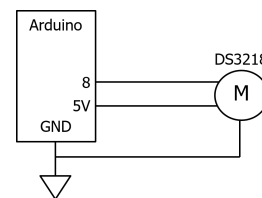


図2 回路図

### 3.3 プログラム

本研究では,参考文献[3]を参考にし,void loop()内を書き換えることで衛星を自動追尾するプログラムを作成した(void loop()内に,衛星の追尾開始時から追尾終了時までの仰角を,仰角が1°変化する毎にmyservo.write(x)のようにプロットし,1°変化するまでの時間をdelay(y)のようにプロットすることで衛星追尾プログラムを実現した.xには角度[deg]の整数,yには時間[ms]の整数が入る.Orbitron[4]を用いることである日時における衛星の仰角が分かる.

### 3.4 作製した簡易アンテナローテータ

本研究では,誰でも購入可能で電波の反射に影響のない素材である木材,塩ビ管,プラスチックを主に使用し作製した.Arduinoは電子機器でありアンテナの反射係数測定時,電波を遮蔽,反射する可能性があるため遠ざける必要

がある．そこで筆者らはサーボモータから基板，Arduino までの配線を 3m に伸ばした．方位はローテータ部を手動で回すことで変更可能である．仰角変更にはサーボモータが用いられており，アンテナ固定部から 450mm 離れているが電波の反射に影響が出る可能性がある．本研究ではサーボモータを試験的に使用し，作製した簡易アンテナローテータがアンテナの電波の反射に影響を与えるかを実際に測定することでサーボモータの使用の可否を評価する．方位を正確に合わせるために方位固定具を使用する．方位固定具には先行研究 [5] で用いられていたアンテナ回転台の一部を再利用した．作製した簡易アンテナローテータを図 3 に示す．

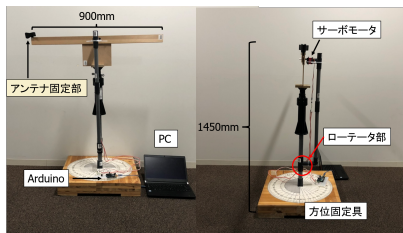


図 3 簡易アンテナローテータ

## 4 アンテナ用語とシミュレーションソフト

本節では，アンテナ電波の放射に関する用語及び本研究で用いるシミュレーションソフトについて述べる．

### 4.1 反射特性

アンテナの動作確認を行うために，反射特性を求める．反射特性は，送信された電力とアンテナ端子で反射した電力を表す．反射特性の式を (1) 式に表す． $S_{11}$  は反射係数， $V_r$  は反射電圧， $V_f$  は入射電圧を表す [6]．

$$S_{11} = 20 \log_{10} |V_r/V_f| \quad (1)$$

### 4.2 指向性

アンテナから放射される電波は放射する方向により強弱が異なる．この性質を指向性といい，最大放射方向と任意の方向との同一距離における電界強度をそれぞれ  $E_0$ ， $E$  とするとき，その任意の方向の指向性係数または指向性関数  $D$  は，角度の関数となり，式 (2) のように表される．

$$D = E/E_0 \quad (2)$$

### 4.3 シミュレーション

アンテナ測定結果への影響を評価するため，本研究シミュレーション値と測定値との誤差を求め評価する．本研究ではシミュレーションについては FDTD 法である XFDTD を使用した [7]．

## 5 作製したアンテナと性能評価

本節では，受信アンテナとして作製した八木・宇田アンテナの設計，性能評価について述べる．本研究ではアンテ

ナの軽量化を図るため，アンテナを作製した．本研究で参考にした衛星 NEXSUS[7] の CW ビーコンは 437MHz 帯が用いられている．よって本研究では 437MHz 帯のアンテナ作製を目指した．

### 5.1 八木・宇田アンテナ

八木・宇田アンテナとは，給電されている放射器と無給電の反射器及び導波器により構成されたアンテナである．鋭い指向性を得られるため，TV の受信用に用いられる．狭帯域の単一指向性であり，高利得なアンテナといえる．[8] XFDTD で作製した八木・宇田アンテナのモデルと，作製した八木・宇田アンテナと，そのパラメータをそれぞれ図 4(a)，図 4(b)，表 1 に示す．簡易ローテータに取り付けられるよう，軽量の素材で八木・宇田アンテナを作製した．エレメントには直径 3mm の真鍮パイプを使用し，アンテナ長はネットワークアナライザで  $S_{11}$  を測定しながら調整した．以降作製した八木・宇田アンテナを被測定アンテナと記す．

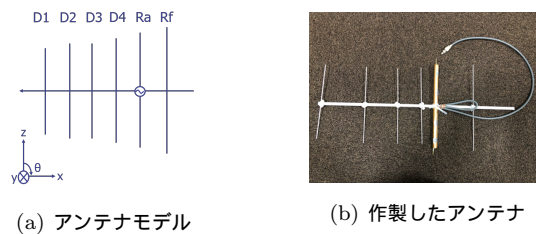


図 4 八木・宇田アンテナ

表 1 八木・宇田アンテナのパラメータ

エレメント	D1	D2	D3	D4	Ra	Rf
エレメント名	導波器	導波器	導波器	導波器	放射器	反射器
エレメント D1 からの距離 [mm]	0	170	300	394	436	592
長さ [mm]	290	300	300	308	385	350

### 5.2 被測定アンテナの動作確認 ( $S_{11}$ 測定)

本研究では，被測定アンテナについての動作確認を行う必要がある．そこで，被測定アンテナに対してネットワークアナライザを用いた反射特性の測定を行う．測定後，ネットワークアナライザを使用し測定した結果と XFDTD を使用したシミュレーション結果を比較する．

### 5.3 被測定アンテナの指向性測定

被測定アンテナの動作確認を終えた後，スペクトラムアナライザを用いた指向性測定を行い作製した被測定アンテナが理想の指向性であるかを評価する．指向性測定を行うモデルを図 5 に示す．1 つの発泡スチロールの上に 437MHz の標準ダイポールアンテナを置き，もう一つの発泡スチロールの上には回転台を置き，その上に被測定アンテナを置く．被測定アンテナは図 5 における  $xz$  平面， $xy$  平面を測定する．今回の実験では，被測定アンテナと標準ダイポールアンテナの距離  $d_1$  を 400cm，地面からの

高さ  $d_2$  を 82cm とした．標準ダイポールアンテナからは 437MHz の電波が発信されているので，それを被測定アンテナで受信する．被測定アンテナをスペクトラム・アナライザにつなぎ，標準ダイポールアンテナから受ける被測定アンテナの信号レベル [dBm] を測定する．アンテナは回転台の上に置かれているので  $5^\circ$  ずつ回転させて  $360^\circ$  分繰り返す．

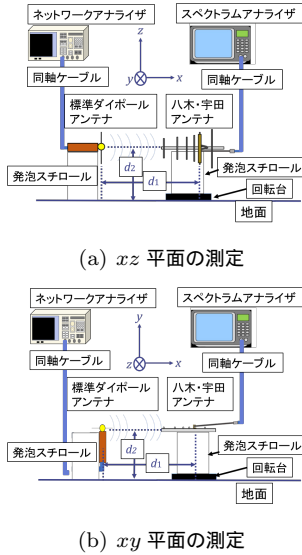


図 5 放射パターン測定を行うモデル

## 6 簡易アンテナローテータの評価測定

本節では作製した簡易アンテナローテータにおける評価測定について説明する．

### 6.1 仰角誤差測定

本測定では，簡易アンテナローテータの仰角をサーボモータで変化させ，プログラムで入力した仰角の値に対する実際の仰角との誤差を水平器を用いて測定する．測定する角度の範囲は  $40^\circ$  から  $90^\circ$  までとし， $1^\circ$  ずつ測定を行う．本研究で用いる水平器で求められる誤差は  $1/100$  勾配と呼ばれ，約  $0.57^\circ$  の誤差である事を意味する．

### 6.2 仰角変化における反射特性測定

本測定では，被測定アンテナを作製した簡易アンテナローテータに取り付け，各仰角における被測定アンテナの反射特性をネットワークアナライザを用いて測定する．測定する角度の範囲は  $40^\circ$  から  $90^\circ$  までとし， $10^\circ$  ずつ測定を行う．同様に被測定アンテナのみでの測定も行う．その後，双方の各仰角における反射特性を比較する．測定場所は，南山大学 S 棟 3 階屋外で行った．測定条件を表 2 に示す．

表 2 測定条件

仰角 [deg]	40	50	60	70	80	90
地面から給電部までの高さ [m]	1.45	1.40	1.33	1.28	1.19	1.10

## 7 測定結果

本節では第 5 節及び第 6 節で行った測定の結果を述べる．

### 7.1 被測定アンテナの動作確認 ( $S_{11}$ 測定) 結果

被測定アンテナの反射特性を，ネットワークアナライザを使用し測定した結果と XFDTD を使用したシミュレーション結果を図 6 に示す．

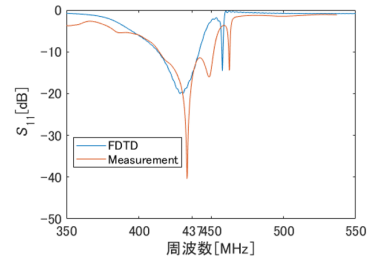


図 6 作製した八木・宇田アンテナの  $S_{11}$  比較

### 7.2 被測定アンテナの指向性測定結果

被測定アンテナの指向性測定結果を図 7 に示す． $xz$  平面の指向性測定において， $0^\circ$  から  $180^\circ$  でシミュレーションと実測の利得の傾向が一致した．しかし  $180^\circ$  から  $360^\circ$  ではシミュレーションの利得に比べて実測での利得が増加した． $xy$  平面の指向性測定において， $0^\circ$  から  $360^\circ$  でシミュレーションと実測の利得の傾向が一致した．

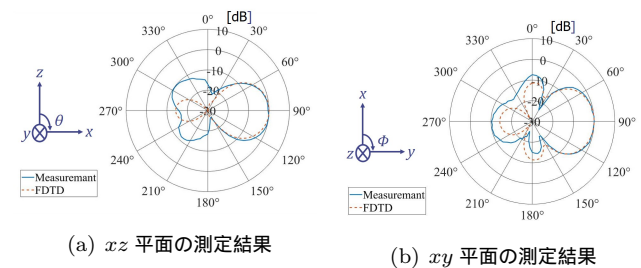


図 7 放射パターン測定結果

### 7.3 仰角誤差測定結果

プログラムで入力した仰角の値を  $x$  軸，実際に水平器で測定した仰角の値を  $y$  軸として仰角誤差測定結果を図 8 に示す．

### 7.4 仰角変化における反射特性測定結果

$40^\circ$ ， $50^\circ$ ， $60^\circ$ ， $70^\circ$ ， $80^\circ$ ， $90^\circ$  のそれぞれの仰角において，被測定アンテナのみで測定した反射特性と被測定アンテナを簡易アンテナローテータに取り付けて測定した反射特性の比較を図 9 に示す．

## 8 測定結果に対する考察

本節では第 7 節で示した結果に対する考察を述べる．



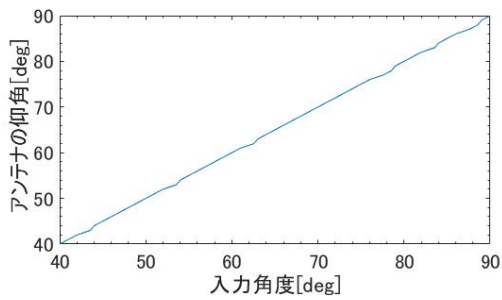


図8 仰角誤差測定結果

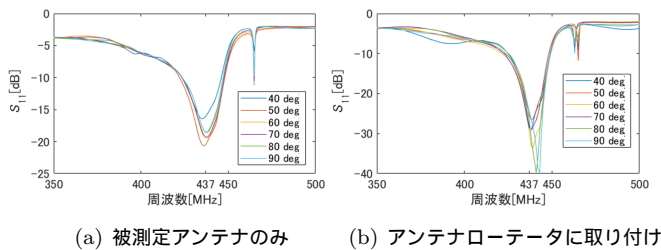


図9 反射特性比較

### 8.1 被測定アンテナの $S_{11}$ 測定結果の考察

被測定アンテナの  $S_{11}$  測定結果から、被測定アンテナは所望の周波数である 437MHz において整合がとれていると評価できる。

### 8.2 被測定アンテナの指向性測定結果の考察

$xz$  平面の指向性測定結果において、 $180^\circ$  から  $360^\circ$  でシミュレーションの利得に比べて実測での利得が増加した理由としては、測定場所における周りの建物による反射の影響だと思われる。これを考慮すると、被測定アンテナの指向性測定結果から、被測定アンテナは理想の指向性であると評価できる。

### 8.3 仰角誤差測定結果の考察

仰角誤差測定結果において、 $40^\circ$  から  $90^\circ$  間で 10 回測定するごとに一度、 $1/100$  勾配 ( $0.57^\circ$ ) 以内の誤差が見られた。測定範囲における角度の誤差が  $1^\circ$  以内であることから、プログラムで入力した仰角の値に対する実際の仰角は正確であると評価した。

### 8.4 仰角変化における反射特性測定結果の考察

仰角変化における反射特性測定結果において、まず簡易アンテナローテータ及び仰角変更による被測定アンテナの動作への影響について考察する。以後、被測定アンテナのみでの測定を条件 A、被測定アンテナを簡易アンテナローテータに取り付けての測定を条件 B と記す。測定結果から、条件 A も条件 B も、被測定アンテナは所望の周波数である 437MHz において整合が取れていると評価できる。このことから、仰角の変化及び作製した簡易アンテナローテータは被測定アンテナの動作への影響に問題がない

事が分かった。

## 9 まとめと今後の課題

本研究で誰でも簡単に工作・実験が可能である簡易アンテナローテータを実装をした。製作時間はパーツが全て揃っている状態から 3 時間程度であった。また、子供にとって危険な道具を使用する機会も少なかった。仰角誤差測定及び仰角変化における反射特性測定により、作製した簡易アンテナローテータによるアンテナの仰角変更及びアンテナ運用に問題がないことが示された。これによりサーボモータの使用によるアンテナの動作への影響に問題がないことも示された。これらのことから、衛星追尾教材に簡易アンテナローテータの導入を検討できると考える。今後の課題として次の 3 つが挙げられる。1 つ目の課題は作製した簡易アンテナローテータに被測定アンテナを取り付けた状態でのアンテナ放射パターン測定を行うことである。この測定を行うことで、簡易アンテナローテータが被測定アンテナに及ぼす影響がより明確に分かると考える。この測定を行うためには電波暗室での測定が必要になる。2 つ目の課題は方位変更の自動化である。仰角に加えて方位も自動化することで衛星の自動追尾により近づけることができると考える。3 つ目の課題は、八木・宇田アンテナ以外のアンテナを取り付けて測定を行うことである。それにより、簡易アンテナローテータに取り付けられるアンテナの幅が広がり、簡易アンテナローテータを衛星追尾以外にも様々な用途に使用できるようになると考える。

## 参考文献

- [1] 中山 大輔, “トラ技 Jr. 2018 春 430MHz にチェーン, 人工衛星の声を聞いてみよう,” pp.16-20, CQ 出版, 東京, 2018.
- [2] 宮崎康行, “人工衛星を作る-設計から打ち上げまで-,” pp.196-197, 株式会社オーム社, 2011.
- [3] Hatena Blog, “とある科学の備忘録,” <https://shizenkarasuzon.hatenablog.com/entry/2019/01/27/080334>, 参照 Nov.23, 2019.
- [4] Orbitron, <https://wind.at-ninja.jp/text/Orbitron/Orbitron.html>, 参照 Nov.23, 2019.
- [5] 栗林 哲也, 榊原 拓馬, 高橋 知秀, “放射パターン測定システムの構築法に関する研究,” 2011 年度南山大学数理工学部情報通信学科卒業論文, 2012.
- [6] 宇野亨, “FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析,” コロナ社, 東京, 2006.
- [7] 日本大学, “NEXUS PROJECT,” [sat.aero.cst.nihon-u.ac.jp/nexus/0\\_Top.html](http://sat.aero.cst.nihon-u.ac.jp/nexus/0_Top.html), 参照 Nov.23, 2019.
- [8] 吉川忠久, “無線工学 B,” 第 2 版東京電機大学出版局, 2013.