指向性GPSアンテナの放射特性解析

宮野 智行*・石島 義之*・安田 明生**

Radiation Pattern Analysis of a GPS Directional Antenna

Tomoyuki MIYANO, Yoshiyuki ISHIJIMA and Akio YASUDA

Abstract

This paper presents the results of the investigation for the receiving antennas with directional gain in order to receive the GPS signals in the geostationary orbit. For the use GPS in geostationary orbit the receiver has to process signals that come from the other side of the earth. It is desired to receive two frequency of GPS signals (L1 : 1575.42 MHz / L2 : 1227.6 MHz) in order to correct the Ionospheric delay. The radiation analysis is performed in order to examine the gain pattern and the directional characteristics of the helical antenna. The computed gains at L1 and L2 of the helix antenna is +15.9 dBi and +13.6 dBi respectively with beamwidth of 25 degrees after this analysis. The computed voltage standing wave ratio (VSWR), gain pattern and axial ratio characteristics agreed well with the measured data of the prototype quadrifilar helical antenna.

Key words : satellite navigation, GPS, antenna, geostationary satellite

キーワード : 衛星航法, GPS, アンテナ, 静止衛星

1. はじめに

近年GPSは民生分野における利用が拡大しており、時刻基準や精密位置情報などの社会基盤となる情報サービスが提供されるようになってきている。宇宙分野においてもGPSは中低軌道衛星や宇宙往還機の航法機器として広く利用されている。これまでGPSの地上利用では無指向性のアンテナが使用されてきたが、スードライト地上局の送信アンテナやGPS大気観測等では、高利得の指向性GPSアンテナの開発が望まれている。宇宙利用においても宇宙機の姿勢変化に対応できるように無指向性のアンテナが使用されてきたが、静止軌道や準天頂軌道におけるGPS利用では、指向性GPSアンテナを使用することが望ましい。これは静止軌道上では地球を挟んで高度20,000 kmに位置するGPS衛星から送信された信号を受信することになるが (Fig. 1)、高利得アンテナを使用すれば一般のGPS受信機が受信しているGPS衛星送信アンテナのメインローブ信号だ

けでなく、サイドローブ信号も受信することができるようになり、測位に必要な観測データが増加するためである。この時、伝搬経路上に存在する電離層によって生じる遅延誤差を補正するために、GPS信号の2周波数 (L1、L2) を受信することが必要となる。アンテナの形式としては、衛星搭載性を考慮して高利得 (+10 dB以上) を得るためには、ヘリカルアンテナが適している。静止衛星以外のミッションでは、低軌道衛星において電離層密度や大気の可降水量を観測するミッションや測位衛星の送信アンテナ等でも、衛星搭載用の2周波GPSアンテナが必要となる。本論文では、静止衛星搭載用に適した特性を得るために、モーメント法による解析を行って、巻き数、リム高、ピッチ角の3つのパラメータについて最適化を行った。そして得られたパラメータを用いてヘリカルアンテナを製作し、指向性や利得を測定した結果、解析と同等の特性が得られ、解析の有効性が確認できた。これによって静止軌道においても測位に必要なGPSの観測データ数が確保でき、

* 正会員 宇宙開発事業団 (〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1)

**正会員 東京商船大学 (〒135-8533 東京都江東区越中島2-1-6)

連続して高精度な時刻、位置、速度情報を提供することが可能となると考える。

2. 要求仕様の検討

本稿では、静止軌道でGPS信号の受信が可能となるような指向性が強く利得の高い受信アンテナの放射特性解析を行う。静止軌道では地球を挟んで高度20,000 kmに位置するGPS衛星から送信された信号を受信するため、受信できる搬送波対雑音比(C/N_0)が20~45 dBHzと地上のGPS受信機の C/N_0 (35~50 dBHz)より低くなる。GPS衛星の送信アンテナのサイドローブ信号まで受信するためには、20 dBHz~25 dBHzの信号を処理する必要がある。GPS衛星送信アンテナのゲインパターンをFig. 2に示す⁽¹⁾。このレベルの受信を受信機の改良だけで達成することは難しい。一方、静止衛星から見たGPS衛星の視線方向ベクトルは、両衛星の軌道高度(GPS衛星: 20,000 km、静止衛星: 36,000 km)から幾何学的に定まる。GPS衛星の送信アンテナのメインローブを21°以内とすると、静止衛星の受信アンテナは地球方向から12.6°以内まで利得が必要となる(Fig. 1)。送信アンテナのサイドローブを36°以内とすると、静止衛星の受信アンテナの放射ビームは23°以内であることが必要となる。このような条件から静止衛星搭載用GPSアンテナに求められる仕様を、ビーム幅25°以上、利得は+12 dBi以上とした。その他の要求としては、周波数はL1、L2の2波を受信し、それぞれの帯域でVSWRを1.5以下とする。衛星搭載を前提としているため、高さ方向は許容されるが、底面積は小さくする必要がある。マルチパスの影響を避けるためサイドローブレベルを低く抑える必要があるなどが挙げられる。以上に述べた静止衛星搭載用GPSアンテナに対する要求仕様をTable 1にまとめる。

Fig. 1. Geometry of GPS satellite and geo-synchronous satellite

Fig. 2. Antenna gain pattern of GPS satellite

Table 1. Requirement specifications for the GPS antenna in the geostationary orbit

Items	Requirement values
Frequency	L1:1575.42MHz L2:1227.6MHz
Impedance	50 Ω
Gain	> 12dBi
Dimension	< φ 200mm
VSWR	< 1.5
Beam width	> 25°
Side-lobe level	< -10dB
F/B	> 20dB
Circular polarization	Right handed circular polarization

3. 放射特性解析

3.1 基礎検討

ヘリカルアンテナの特性解析をモーメント法を用いて行い、パラメータの最適化を行った。ヘリカルアンテナは、その円周 C_A がほぼ1波長、ピッチ角 α が12°~14°の時、アンテナの軸方向に鋭い指向性を有する。この放射モードは軸モードと呼ばれ実験的、理論的に検討されてきた⁽²⁾⁽³⁾。基本的な特性としては、巻き数 N を多くするほど利得は高くなり、軸比も良くなることが確認されている。また、軸モードヘリカルアンテナは有限の反射板を有し、この反射板の大きさにより利得、軸比が変化することが報告されている⁽⁴⁾。アンテナの各パラメータについては以下のことが述べられている。

- (1) 反射板の大きさが1.6波長程度の時、利得が最大となる。
- (2) ピッチ角は12°の時の方が14°の時よりも利得が高くなる。
- (3) 軸比はピッチ角が14°の時の方が12°の時よりも良い。(巻き数が10回転より少ない場合顕著である。)

Fig. 3(a). Number of helical turns and directional gain

Fig. 3(d). Number of helical turns and F/B

Fig. 3(b). Number of helical turns and beam width

Fig. 4(a). Height of limb and directional gain

Fig. 3(c). Number of helical turns and side-lobe level

Fig. 4(b). Height of limb and side-lobe level

本検討においては、L1とL2の両周波数を満足させる必要があるため、周波数をその中心の周波数 f_c

(1401.51 MHz) (波長21.4 cm) と仮定した。仮に(1)より、もし反射板の大きさを約1.6波長とすると、

Fig. 5(a). Height of limb and directional gain

Fig. 5(b). Height of limb and axial ratio

約 $\phi 342$ mmとなり底面積が大きくなる。一方、反射板を小さくするとバックローブが大きくなり、反軸方向の放射に移行し、軸方向へ放射させるためには $\phi 0.5$ 波長より大きくする必要がある⁽⁵⁾。ここでは、反射板を軸方向に折り返す構造にした場合について検討する。底面積の制限より、反射板を $\phi 200$ mm(約1波長)に固定した。リム高の初期設定値は約 $1/4$ 波長となる50 mmとし、リム高を変化させた時の諸特性の変化を解析検討により明らかにする。また、ピッチ角については、上記(2)、(3)より、初期設定値を 12.8° とし、解析により再度検証する。一方、指向性利得(Gd)は、次式で近似される⁽²⁾。

$$Gd \approx 12C_\lambda^2 NS_\lambda \text{ (倍)} \quad (1)$$

(ただし、 $0.8 < C_\lambda < 1.15$, $12^\circ < \alpha < 14^\circ$, $N > 3$)

C_λ : ヘリカル円周, N : 巻き数, S_λ : ピッチ

文献(2)では実験値と比較しているが、この近似式

Table 2. Axial-mode helical antenna
(Pre-condition for the analysis)

Parameter	Design value
Diameter of antenna	$\phi 70$ mm ($\approx 0.33 \lambda$ / circumference $C_\lambda \approx 1.03 \lambda$)
Diameter of reflector	$\phi 200$ mm ($\approx 0.93 \lambda$)
Diameter of helical elements	$\phi 2$ mm

は測定値と比べ高くなる傾向にある。精度も不十分であり、反射板の大きさも考慮されていない。よって、初めにモーメント法による数値解析により所望の利得を得るための巻き数を決定した。モーメント法は、アンテナ素子を複数のセグメントに分けて、自己、相互インピーダンスを求めてマトリックス化し、その逆行列からアンテナ素子の荷電分布を求める方法であり、アンテナの特性解析では一般的に利用されている手法である。セグメントと基底関数を適切に選択することにより、計算負荷を抑えて精度の良い解析が行える。

3.2 解析による検討

Table 2に解析モデルの固定のパラメータを示す。反射板はワイヤグリッド法によりモデル化した。

①巻き数

Fig. 3は、リム高50 mm、ピッチ角 12.8° とし、巻き数を変化させた時の諸特性を示す。Fig. 3(a)に軸方向($\theta = 0^\circ$)の指向性利得を示す。この結果、L1の周波数では巻き数が20回転の時に最大となり、20回転以上では利得向上の効果は小さくなる。これはFig. 3(c)からもわかるように、巻き数を多くとることによりサイドローブレベルも高くなり、特にL1の周波数においてこの傾向が顕著に現れるからである。なお、サイドローブは ϕ カット面による構造の非対称性によりバラツキを生じ、 $\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ を計算した結果、 $\phi = 0^\circ$ (給電位置方向)の時、サイドローブレベルが最も高くなった。また、Fig. 3(b)より、巻き数を多くすることにより、ビーム幅は鋭くなっていくが、 25° 以上を得るためには15回転以下にする必要がある。Fig. 3(d)に示すように、F/Bは巻き数による変化はほとんど見られないが、20 dB以上を得ることができる。なおF/Bは $\theta = 180^\circ \pm 60^\circ$ の範囲の最悪値で評価した。上記の結果とTable 1の条件、導体損等の損失のマージンなどを考慮し、巻き数を15回転に決定した。

②リムによる効果

巻き数を15回転、ピッチ角 12.8° に固定し、リム高を0~100 mmにした時の特性の変化について調べた。Fig. 4(a)は指向性利得を示し、リム高を40 mm

にした時、リム無し ($H_{\text{rim}}=0$ mm) に比べ、L1で0.4 dB、L2で0.7 dB利得が向上した。また、サイドローブは $\phi=0^\circ$ (給電位置方向) で最悪値を取り、その変化を Fig. 4(b) に示す。図よりリム高をそれぞれ L1 で 70 mm、L2 で 30 mm とした時、最もサイドローブの抑圧効果が現れる ($\phi=90^\circ$ 、 180° 、 270° でもサイドローブの抑圧の効果は得られるがその最適値はそれぞれ違うことから、これらの中の最悪値を示す $\phi=0^\circ$ にて評価した)。リム高を 50 mm にした時に L1、L2 の両周波数における最適値となる。以上の結果より、リム高は初期設定値の 50 mm が適当であると考えられる。

③ピッチ角

巻き数15回転としてピッチ角による諸特性の変化について調べた。Fig. 5(a) にピッチ角による軸方向指向性利得の変化を示す。3.1の(2)で述べたピッチ角と利得の関係は、ヘリカルの周長が1波長の時には成り立つが、周波数を高く(周長を1波長よりも長く)した時は、逆にピッチ角を大きくした方が、指向性利得を向上させる。また、(高さ50 mm) リムの有無によってもその変動幅は変化する。周波数による利得差を小さくする場合、ピッチ角を小さくした方が有利である。 Fig. 5(b) にピッチ角によるボ

Fig. 7. Adjustment of the prototype antenna gain

Table 3. Side-lobe level

ϕ	L1	L2
0°	-11.2	-11.1
90°	-12.5	-12.1
180°	-13.0	-13.5
270°	-11.4	-12.0

Fig. 6(a). Right handed circular polarization L1 (Analytical value)

Fig. 6(b). Right handed circular polarization L2 (Analytical value)

アサイト方向の軸比の変化を示す。3.1の(3)で述べたピッチ角と軸比の関係は(高さ50 mm) リムの有無に関わらずほぼ成り立ち、巻き数が15回転と多いためピッチ角による影響は小さいことも確認できた。また軸比を考えた場合、ピッチ角を大きくすることにより、僅かながら改善することができる。軸方向の指向性利得と軸比を検討した結果、ピッチ角 12.8° が適当であると考えられる。

④解析結果のまとめ

解析の結果、巻き数、リム高、ピッチ角をそれぞれ、15回転、50 mm、 12.8° に決定する。この時、L2 で 13.6 dBi (L1 で 15.9 dBi) の指向性利得が得られた。Fig. 6 に巻き数15回転の時の右旋円偏波指向性を示す。この時、ビーム幅は $\phi=0^\circ$ 、 90° とともに 27° (L1) / 41° (L2) となり、カット面によるサイドローブレベルを Table 3 に示す。この結果、カット面による分散は僅かである。またボアサイト方向の軸比は 0.7 dB (L1) / 1.3 dB (L2) であった。

Fig. 8. Voltage Standing Wave Ratio of the prototype antenna (VSWR)

Fig. 9(a). Characteristic of right handed circular polarization (L1)

Fig. 9(b). Characteristic of right handed circular polarization (L2)

4. 放射特性の測定と評価

4.1 入力インピーダンス

円周上で給電される軸モードヘリカルアンテナの入力インピーダンスは近似的に下式で与えられる⁽²⁾。

$$Z_{in} = 150 / \sqrt{C_A} \quad [\Omega] \quad (2)$$

$$(0.8 \leq C_A \leq 1.2, 12^\circ \leq \alpha \leq 14^\circ, N \geq 4)$$

Fig. 10(a). Axial ratio of the prototype antenna (L1)

Fig. 10(b). Axial ratio of the prototype antenna (L2)

従って、ヘリカル円周を $0.98 \leq C_A \leq 1.12$ とすると、 Z_{in} は約 $142 \sim 152 \Omega$ となり、 50Ω の同軸コネクタとの整合をとる必要がある。文献(2)では本アンテナと同様に金属リムが付いた軸モードヘリカルアンテナの整合例が示されている。ここでは、給電点付近のヘリカル素子を徐々にテーパ状にすることにより整合をとっている。一方、今回製作したアンテナにおいては、上記の例と同様に特別な整合回路を設けず、Fig. 7に示す様に給電部分付近の板状ヘリカル素子の幅を部分的に太く、不連続にすることにより整合をとると同時に 50Ω 同軸給電管内部でも整合回

Table 4. Specification of antenna

	1575.42MHz(L1)	1227.6 MHz(L2)
Gain	15.5 dBi	12.7 dBi
Beam width	26°	39°
VSWR	1.43	1.23
Axial Ratio	0.8 dB	1.2 dB

Fig. 11. GPS visibility on the geostationary orbit

路を取り付けている。その結果、実測によりFig. 8に示すVSWRの周波数特性が得られ、1.43(L1)/1.23(L2)となり反射損は無視できる。

4.2 放射特性

放射特性の測定を行った。その結果、動作利得は15.5 dBi(L1)/12.7 dBi(L2)を得ることができた。Fig. 9に $\phi=90^\circ$ における指向性を前記の解析結果と併記した。この時、ビーム幅は 26° (L1)/ 39° (L2)が得られ、解析結果より僅かにビームが鋭くなっている。また、サイドローブは-10.5 dB(L1)/-12.0 dB(L2)となり、指向性は-20 dB以上の高いレベルにおいて、比較的良く一致している。Fig. 10に $\phi=90^\circ$ における軸比パターンを示す。ボアサイト方向の軸比は0.8 dB(L1)/1.2 dB(L2)を得ることができた。本アンテナのL1/L2の2周波に対応した測定結果をTable 4にまとめる。

5. 静止軌道における指向性アンテナの利用

静止軌道上のユーザからのGPS衛星の見え方をプロットした図をFig. 11に示す。外側の環状の軌跡がサイドローブの受信軌跡で、内側の軌跡がメインローブの受信軌跡である。メインローブとサイドローブの可視衛星数を時系列にプロットした図をFig. 12に示す。最大可視衛星数は9機となった。最

Fig. 12. Number of visible GPS satellites on the geostationary orbit

小となる場合は、1機となる時間帯も存在した。GPS衛星が28機配備されている状態では、80%の時間帯で4機以上のGPS衛星が可視となる。ただし、3機以下となる時間帯が1時間以上継続する場合があるので、その間は高安定な周波数基準装置と、摂動等を考慮した軌道伝播モデルで軌道決定を行う必要がある。

6. むすび

静止衛星搭載用の高利得GPSアンテナの放射特性解析と評価を行った。静止衛星搭載に適した特性を得るために、モーメント法による解析により、巻き数、リム高、ピッチ角の3つのパラメータについて最適化を行った。得られたパラメータを用いて、ヘリカルアンテナを製作し、指向性や利得を測定し評価した。その結果、解析結果と同等の結果が得られた。

参考文献

- (1) Mehlen, C. and D. Laurichesse, "Real-time GEO Orbit Determination TOPSTAR 3000 GPS Receiver", Proc. of ION GPS-2000, pp. 1985-1994, 2000.
- (2) Kraus, J.D. and Ronald J. Marhefka, "Antennas, 3rd Edition", Chapter 8 McGraw-Hill Companies, 2001.
- (3) King, H.E. and J.L. Wong, "Characteristics of 1 to 8 wavelength uniform helical antennas", IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-28, No.2, pp.291-296, March 1980.
- (4) 塩川, 唐沢, "軸モードヘリカルアンテナの放射特性", 信学論(B), Vol. J63-B, No.2, pp. 143-150 (昭和55(1980)-02).
- (5) Nakano, H., J. Yamauchi and H. Mimaki,

“Backfire radiation from a monofilar helix with a small ground plane”, IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. AP-36, No.10, pp. 1359-1364, Oct. 1988.

質 疑 応 答

長岡 栄(電子航法研究所)：アンテナの放射特性を最適にしたということですが、例えば、GPS信号のサイドローブを受信できる確率を最大にするというような意味でしょうか？

宮野智行：その通りです。静止軌道においてGPS衛星が送信するGPS信号のサイドローブを受信できるように、アンテナ利得とビーム幅の要求値を設定しました。

織田博行(三井造船昭島研究所)：

①米国では指向性アンテナ等の利用による静止衛星の軌道決定や軌道制御が実施されていますか？また、本研究はNASDA打上げの衛星に搭載される計画があるのですか？

②衛星の自律的な軌道制御に必要な測位精度はどの位ですか？また、本研究で得られる(期待される)精度はどの程度ですか？

宮野智行①米国では、静止軌道でGPSを受信するという実験が行われていますが、実用化は現在検討中のようなのです。NASDAの衛星についても、現在実現性を検討している段階であり、具体的な搭載計画は今のところありません。

②静止衛星を自動自律化するために必要な測位精度は数100 mです。GPSによる測位精度は100 m以下を目標精度に設定しています。

安田明生(東京商船大学)：測位精度目標が100 m以下ということですが、DOPはどの程度ですか？

宮野智行：DOPの値は、通常50以上であり、良い時でも数10程度です。地上にシュードライト局を設置する方法や、高精度クロックを使用して伝播精度を高める等の工夫をして測位精度の向上を検討しています。