衛星搭載用高精度アンテナ指向方向制御系の設計と特性^{*1}
**Design and Characteristics of the High-accuracy On-board Antenna
Pointing Control System**

川 上 用 一^{*2}・北 條 博 史^{*2}
Yoichi KAWAKAMI, Hiroshi HOJO,
上 羽 正 純^{*2}・田 中 博^{*2}
Masazumi Ueba and Hiroshi TANAKA

Key Words : Artificial Satellite, Communication, On-board Antenna, Pointing Control

Abstract

For the ETS-VI antenna system applying to multibeam satellite communication experiments, a new on-board antenna pointing control system and its components were developed to achieve an antenna pointing accuracy requirement. The antenna pointing control system consists of both a conventional satellite attitude control system and an antenna drive control system. The antenna drive control system tracks a beacon transmitted from an earthstation independently of satellite attitude control by driving a sub-reflector. Control accuracies of the system were confirmed to be within 0.002 degrees through control simulations using on-board hardwares with two three-axis motion tables and the RF sensor simulator. Through antenna pointing error analysis based on each error source data, the ETS-VI antenna pointing accuracy is estimated to be within 0.015 degrees.

1. ま え が き

従来、静止軌道上の通信・放送衛星では、衛星本体の姿勢制御によってアンテナ指向方向精度を確保してきた。しかし、近年スポットビーム化あるいはマルチビーム化によるビーム狭小化にともない、ビーム指向方向の高精度化が要求され、姿勢制御に加えてアンテナ反射鏡を回転駆動させて、その高精度化を図る衛星が開発されつつある^{1,2)}。

第1図にアンテナ駆動制御によってビーム指向方向の高精度化を図っている静止衛星のアンテナの口径と指向方向精度を示す。1993年に打上げ予定の技術試験衛星VI型(ETS-VI)のマルチビーム衛星通信用アン

テナでは、現在開発中の衛星を加えても最高レベルにある0.015°の指向方向精度(商用通信衛星3号CS-3の13倍)が要求され、新たな制御系やその構成機器の開発が必要となった。

本稿では、ETS-VI搭載用として開発した制御系の方式設計および使用するセンサやアクチュエータの機能や基本性能について明らかにするとともに、総合制御試験を実施し目標性能の実現を確認した。

2. 要 求 条 件

マルチビーム衛星通信では、周波数を再利用するため、同一周波数を使用するビーム間でカップリングが問題となる。第2図にマルチビーム衛星通信用として考えられている20/30 GHz帯のビーム配置を示す³⁾。約0.3°幅のビームを用いたETS-VIマルチビーム衛星通信実験では東京および大阪ビームは同じ周波数を用いているため、この2つのビームをそれぞれ要求値である0.015°(ビーム幅の1/20)以内に制御しなければならぬ。

またETS-VI搭載用20/30 GHz帯マルチビームアンテナでは、所要の電気性能の実現と給電部の構成の容易性等の理由で、衛星から地球へ電波を送りだす20 GHz帯送信アンテナと地球からの電波を衛星でうける30 GHz帯受信アンテナは個別に設けられている。第3図にETS-VI搭載アンテナの構成を示す。アンテナ口径は20 GHz帯で3.5 m、30 GHz帯で2.5 mであり、それぞれ主反射鏡、副反射鏡および給電部から構成されている。この送信/受信アンテナには同じ指向方向精度が要求されている。

^{*1} 平成2年12月8日原稿受理

^{*2} NTT無線システム研究所

第1図 衛星搭載アンテナ

第2図 20/30 GHz帯ビーム配置

3. 制御系設計

3.1 基本設計 第4図に静止衛星におけるアンテナ指向方向制御の概念を示す。赤道上空36,000 kmの静止軌道にある衛星は、衛星上に設定されたロール軸(衛星進行方向)、ピッチ軸(南方向)およびヨー軸(地球中心方向)を基準としてその姿勢を制御する。搭載されるアンテナは、衛星が所定の経度に設定された場合、要求される地点(P)にそのポアサイトが向くように衛星本体に設置される。

このような衛星搭載アンテナの主な指向方向誤差は、衛星本体が所定の3軸方向に向いているかどうかの姿勢誤差、アンテナの衛星本体への取付け誤差であるアライメント誤差および軌道上で太陽照射方向が日周期で変化することによる熱変形誤差である。

- (1) 姿勢誤差：制御に使用する地球センサの誤差やダイナミックな誤差によって生じる誤差で0.05°程度が現状の最良値である。

第3図 ETS-VI搭載アンテナの構成

第4図 アンテナ指向方向制御の概念

- (2) アライメント誤差：アンテナ系構成の複雑さや反射鏡の大きさによる。ETS-VI搭載アンテナで約0.08°が初期見積り値である。
- (3) 熱変形誤差：アンテナ構造に依存するが、ETS-VIの場合で約0.09°と推定される。
- 0.015°の指向方向精度を達成するには、以上の誤差をすべて補償する必要がある。そこでP点からビーコン電波を発射し、衛星上でその電波方向を検出して、ビーコンに自動追尾するようにアンテナビーム方向を制御する制御系(以下アンテナ駆動制御系と称する)を送受アンテナ別々に、かつ姿勢制御系とは独立に設ける構成とした。

ビーコン用地球局の位置は、アンテナ給電部を設計する上でビーコン受信用給電部の配置が許容される場所でかつ降雨によるビーコン電波(30 GHz帯)の損失が少ない北海道を選択した。

3.2 駆動方法 ETS-VI搭載マルチビームアンテナの場合、主反射鏡、副反射鏡および給電部によってアンテナ系が構成されているため、アンテナビームを駆動する方法としては、主反射または副反射鏡のいずれかの回転駆動が考えられる。前者は制御精度に問題があり、後者は電気特性の劣化が考えられる。

第5図に2トン級衛星で想定される最大姿勢角速度

第5図 アンテナ指向方向制御誤差

第7図 高精度アンテナ駆動機構の基本構造

第6図 ETS-VI搭載アンテナ指向方向制御系の構成

を $0.01^\circ/\text{s}$ とした場合の制御帯域と制御精度の関係を示している。主反射鏡直径約 3.5 m 、副反射鏡直径約 1 m を考慮すると、固有振動数はそれぞれ 2 Hz 、 20 Hz となる。構造共振を防止するため制御帯域をこれらの固有振動数の $1/10$ とすることとすると、主反射鏡を駆動する場合は約 0.2 Hz 以下、副反射鏡を駆動する場合は約 2 Hz 以下となり、制御精度はそれぞれ 0.008° 、 0.0008° と算定される。制御精度を 0.001° (指向方向精度の $1/10$) 以下程度にすることおよび反射鏡駆動による姿勢制御系との干渉を小さくするために、副反射鏡駆動を選択した。

副反射鏡を回転させると、アンテナパターンの収差によってアンテナビーム相互間で指向方向誤差が発生する。ETS-VIでは回転駆動による指向誤差がビーム回転角度の $1/20$ 以下 (0.005°) を目標に、回転中心位置を検討し、鏡面法線上裏面方向で鏡面から 200 mm の位置を選定した。

3.3 制御系構成 以上の検討から求めた ETS-VI 搭載アンテナ指向方向制御系の構成を第6図に示す。姿勢制御系とは独立して設けたアンテナ駆動制御系

は、電波センサ、駆動制御回路および副反射鏡を南北および東西方向に回転駆動させるアンテナ駆動機構から構成される。電波センサは RF センサと略称され、センサ給電部と信号処理回路である追尾受信機から構成される。アンテナ駆動制御系は、アンテナ系から生じるミスアライメントおよび熱変形誤差、ロール軸およびピッチ軸まわりの姿勢制御誤差を補償する。ヨー軸まわりの姿勢誤差については反射鏡を回転することでは補償できないため、指向方向誤差を配分することとした。ETS-VIの場合ヨー軸の姿勢誤差による指向誤差は、姿勢誤差 (0.15°) およびビーコン局 (北海道ビーム) と東京ビームとの離角 (1°) から、 0.003° を配分することとした。

アンテナ駆動制御系の構成機器はすべて開発が必要となったが⁴⁾、特にアンテナ駆動機構については、全くの新規設計で長期信頼性も含め多くの検討を要した⁵⁾。第7図に搭載用アンテナ駆動機構の基本構造を示す。本機構は、 0.0001° オーダの高精度制御に適合するように、リニアモータを用いた直接駆動方式で、かつトルク変動要因である潤滑部がない弾性軸受を使用している。また駆動2軸間のカップリングを小さくするため、ジンバル機構を用いて駆動軸を同一平面内で互いに直交させている。

アンテナ駆動制御系の主センサである RF センサはアンテナ開口径の増大に対応して高精度化が可能である。しかしダイナミックレンジは 100 程度であるため、高精度化に伴い検出範囲が狭くなる。また地上からのビーコンが途絶えた場合も制御系として考慮しておく必要がある。そこでアンテナ駆動機構内に駆動角度を検出できるローカルセンサを配備し、RF センサ検出範囲への引き込みおよび異常時の地上コマンドによる制御を可能とした。

RF センサの主な指向方向誤差はバイアス誤差であり、最終的には軌道上で補正できる。そこでローカルセンサを用いて副反射鏡を2軸まわりに回転させてアンテナパターンを測定しビーム中心を高精度に同定し、初期運用時にコマンドでバイアス補正を行うこと

とした。

アンテナ駆動制御系の制御則は、従来の古典制御理論を用い、精度とともに、安定性を考慮して設計した。特に制御対象であるアンテナ系と並行開発である点を考慮し、構造パラメータの公差を構造設計とのインタフェースにして、副反射鏡の固有振動数を 17 Hz に設定し、パラメータ変動に対する制御/構造の両設計の最適化を図った⁶⁾。制御精度は、RF センサの雑音やバイアス誤差、アンテナ駆動機構の分解能および駆動制御回路のバイアス誤差等を考慮して、アンテナ駆動制御系に割り当てられた約 0.005° のうちから 0.002° を配分した。

4. 特性評価

4.1 地上試験 高精度化が要求される衛星搭載制御系は打ち上げ前に搭載機器を用いて軌道上制御特性を評価する地上試験が不可欠である。しかし ETS-VI 搭載アンテナ指向方向制御系は重力補正が不可欠な 3.5 m の大型アンテナ反射鏡や広大な試験スペースを必要とする RF センサを使用しているため、すべての構成要素を搭載機器で構成しかつ軌道上制御特性を地上試験で高精度に評価することは不可能である。そこで模擬装置やソフトウェアで部分的に模擬した試験系を構成し、姿勢制御系を含めた総合制御試験を実施した。第 8 図に試験系構成を示す。アンテナ駆動制御回路、追尾受信機、地球センサ、姿勢制御回路およびホイールが搭載機器として閉ループに組み入れられている。以下の 3 要素については電波センサ模擬装置、2 台の三軸モーションテーブル、ミニコン等を用いて模

擬した。

- (1) RF センサの模擬：ビーコン電波の代わりにレーザ光を用い、レーザ計測系でレーザ光の方向を 0.0001° の分解能で検出した。この検出した角度信号情報を RF センサの信号処理回路である追尾受信機へ 30 GHz の RF 信号として入力するために、電波センサ模擬装置を開発した。この模擬装置は実測したアンテナパターンを記憶しておき、誤差角度に対応した RF 信号を出力できるため、アンテナ電気特性を模擬できる。
- (2) 衛星姿勢およびアンテナ運動の模擬：ミニコンでアンテナ系や太陽電池パドルを含む衛星全体のダイナミクスを計算した。その結果を、地球センサを搭載し衛星本体を模擬した三軸モーションテーブルに入力した。
- (3) 副反射鏡駆動の模擬：衛星本体を模擬した三軸モーションテーブル上でアンテナ駆動機構の高精度な重力補償は不可能なので、この機構の特性や副反射鏡の構造特性を考慮したダイナミクスをミニコンで計算しアンテナ駆動機構の駆動特性をもう 1 台の三軸モーションテーブル (分解能: 0.0003°) で模擬した。ミニコンは 2 Hz のアンテナ駆動制御系の模擬およびダイナミクスの計算量を考慮して、データ更新時間間隔を 25 ms とした。

RF センサおよびアンテナ駆動機構の駆動特性については別途実施し、センサの検出範囲や線形性および駆動範囲や分解能の特性値を明らかにした。

第 9 図 総合制御試験状況

第 10 図 シミュレーション結果

第11図 アンテナ指向方向誤差

第9図に総合制御試験の試験状況を示す。搭載機器のうち特にセンサへの影響を配慮し、試験はクリーンルーム内で実施した。第10図に、30秒から120秒まで0.6 Nmの外乱トルクが印加された場合のシミュレーション結果を示す。本結果は軌道上最も姿勢変動が大きい場合を表しているが、指向方向制御誤差は 0.002° を満足している。

4.2 指向方向誤差解析 アンテナ指向方向誤差解析は、すべての誤差要因を抽出し、各要因の誤差値をコンポーネント特性試験、センサ特性試験、上記制御試験および解析によって求めた。各誤差値は発生周期別に①バイアス誤差、②長期変動誤差、③日変動誤差、④雑音に分類し、同じ周期の誤差は自乗和平方根(RSS)を、異なる周期の誤差は線形和(LS)で積算した。第11図に本制御系を用いない場合と用いた場合の東京ビームに関する指向方向誤差の軌道上予測結果を示す。従来の姿勢制御のみで本指向方向制御系を機能させない場合、アンテナ指向方向誤差は 0.2° 程度であった。そこで総合制御試験では、定常モードで姿勢制御されている場合でこの 0.2° がオフセット角度として与えられた時のアンテナ駆動制御系への引き込み特性を模擬し、約10秒で引き込みが終了することを明らかにした。次に姿勢変動が大きい軌道制御モードで姿勢制御されている場合で指向方向制御のシミュレーションを行い、誤差配分である 0.002° 以内の制御誤差を確認した。

単体の特性から求めたRFセンサの雑音やオフセッ

ト等をこの制御誤差に加算した駆動制御系の誤差は約 0.005° であり、衛星ヨー軸まわりの誤差であるビーム間誤差、アンテナ副反射鏡回転時の収差による誤差を加えた総合指向方向誤差は 0.015° を満足する結果が得られた。

5. あとがき

ETS-VIに搭載されるマルチビーム通信実験用大型アンテナの指向方向制御系の設計および特性評価を行い、以下の点を明らかにした。

- (1) 地上からのビーコンに追尾して副反射鏡を駆動させるアンテナ駆動制御系を、従来の姿勢制御系に加えた高精度なアンテナ指向方向制御系を新たに開発した。
- (2) 2つの制御系を各々模擬する2台の三軸モーションテーブル、RFセンサ模擬装置等の試験装置によって、搭載機器を用いて軌道上の制御特性を評価できる高精度な試験系を開発し、この試験系を用いたシミュレーションで 0.002° の指向方向制御精度を確認した。
- (3) 指向方向誤差解析を実施し、要求値の 0.015° を満足する評価結果を得た。

今後搭載実機を用いて制御系を再構成し、制御系の機能を再確認する予定である。

日頃御指導、御鞭撻を頂いている無線システム研究所 森田衛星通信部部長および大友 搭載アンテナ系研究グループリーダーに深謝します。

参考文献

- 1) 川上 用一, 貝塚 俊之, 塚田 栄一, 中川 一夫: マルチビーム衛星搭載用アンテナ指向方向制御系, 研究実用化報告, 35, 12号(1986), pp. 69-76.
- 2) Lane, S. O., Caulfield, M. F. and Taormina, F. A.: INTELSAT VI Antenna Overview, AIAA-84-06 60-CP, AIAA 10th Comm. Sat. Sys. Conf., 1984.
- 3) Ohtomo, I., Kumazawa, H., Kawakami, Y. and Yasaka T.: The On-board Fixed and Mobile Multibeam For ETS-VI Satellite, AIAA-90-0805, AIAA 13th Comm. Sat. Sys. Conf., 1988.
- 4) 上野 健治, 貝塚 俊之: 衛星搭載用 30 GHz 帯 RF センサ, 電子通信学会論文誌, J69-B(1986), pp. 1495-1503.
- 5) 塚田 栄一, 川上 用一, 三宅 正二郎, 小川 茂樹: 衛星搭載用アンテナ駆動制御装置の開発, 日本機械学会論文集 C 編, 48(1987), pp. 1047-1052.
- 6) Kawakami, Y., Hojo, H. and Ueba, M.: Control Design of Antenna Pointing Control System with Large On-board Reflector, IFAC Automatic Control in Aerospace, 1989, pp. 33-37.