論文 CONTRIBUTED PAPERS

TV 受信データを用いた放送衛星のアンテナ方向決定システムとその検証結果* Satellite Antenna Direction Determination System Using TV Signal Strength Data and Its Verification Results

横 山 正 基**
Seiki YOKOYAMA

Key words: Artificial satellite; TV signal strength variation;
Antenna Direction Determination System

Abstract

Unique system which is called as Antenna Direction Determination System (ADDs) to confirm the real transmitting antenna direction of broadcasting satellite using TV signal strength data received at various ground stations at the same time has been developed. It is a method to be able to estimate even pointing error caused by sensor error, antenna reflector thermal distortion, etc. which can't be known by telemetry data. The principle of this method is applying the non-linear least square method against the signal strength level variation to get the movement of pre-measured antenna gain footprint. Practical antenna direction determination experiment was done using BSE launched in 1978 through its mission life. From the results of experiment in various operational condition, this system was verified for its capability and usefulness.

1. ま え が き

放送衛星において目的のサービスを達成するためには、その送信アンテナ方向を正しく保ち、一部地域での受信電界の低下や、他国へのスピル・オーバー等を生じさせないようにすることが重要である。これは、通常は、衛星の姿勢を正しく制御し、その結果として所要のアンテナ・ポインティング精度を得ることになる。しかし、地球や太陽等を基準としている姿勢センサーに誤差があったり、アンテナの熱歪などで指向性に影響を受けたりする場合には、姿勢センサーの情報だけを監視していても、実際のアンテナ方向が目的の指向精度を保っているかどうかはわからない。そこで、これを確かめる方法として、別に、同時に受信した複数の受信局の受信電界変動と、衛星の送信アンテナ

利得パターン・データを用いて非線形最小二乗法により上記ポインティング誤差要因すべてを含んだアンテナ方向の動きを決定する方法について、その原理、決定精度、アンテナ・パターンの形状や受信局位置への依存性等を解析した¹⁾。その結果、この手法が放送衛星のアンテナ指向精度を確認する手法として有用であることも確かめられた。

そこで、1978年に打ち上げられた実験用中型放送衛星「ゆり」(BSE)のアンテナ指向精度を確認するためのシステムとして、実際にこの原理を使用したアンテナ方向決定システム (Antenna Direction Determination System, ADDs)を開発した。このシステムの概要、および、実際のシステムとして実現するにあたって重要な具体的なデータ処理法と、さらに、衛星のほぼすべての運用モードでの適用を網羅するように検証した結果について今回報告する。

また、このシステムは、あらかじめ地上で測定した衛星の送信アンテナ利得パターンを用いるが、非線形最小二乗法を用いた決定時の残差の傾向から、逆に、アンテナ・パターンの実現性を確かめることもできる。

実際の BSE からの受信データを用いて行った決定結果でも、このシステムによるアンテナ方向の決定が十分可能であり、また、アンテナ・パターンもほぼ実現されていることがわかった。さらに、BSE の実験期間中は、衛星からの姿勢センサー情報では姿勢変動がほとんど認められないときにも各地で受信レベル変動が発生していたが、これらについてもこのシステムを用いた決定結果から、センサー誤差やアンテナの熱歪などの影響であることが判明するなど、このシステムがアンテナの指向精度を確認する手段として十分有用であることが確かめられた。

* 昭和 58 年 7 月 19 日原稿受理

** NHK 総合技術研究所衛星放送研究部

2. アンテナ方向決定システム

このシステムは、BSE 受信実験のために全国 10 カ所に配置した TV 受信専門局から、地上電話回線もしくは衛星経由打合わせ回線で毎日受信データを収集し、磁気テープに収録したものを入力として、このデータに衛星送信電力変動、降雨減衰、地上局アンテナ追尾損失、タイム・タグ誤差等の各種補正を行った後に、これらの観測された各受信局の受信電界変動をひきおこすような衛星送信アンテナの動き、すなわち、サービス地域に対する送信アンテナ利得パターンの動きの各方向成分の大きさを非線形最小二乗法を用いて決定する計算機プログラムである。さらに、異なった時間帯の決定結果から姿勢誤差の短周期および長周期の変動成分を決定し、任意の時刻の姿勢誤差変化を生成したり、また、受信データを観測しなかった任意の地域での受信電界の変動を計算する機能ももつ。

システムの概要を第1図に示す

2.1) 【データ収集システム】 使用したデータ収集システムは、10カ所の受信地点のうち、離島からは衛星経由打合わせ回線によりデータ伝送を行い、本土内からは1局がカセット磁気テープによる収録、他は地上

第1表 データ収集受信局

受信局名	受信局のタイプ	受信局位置(度)		アンテナ直徑(m)	データ伝送
		北緯	東経		
大阪	可搬形送受信局	34.68	135.52	4.5	専用電話回線
竜串	中感度形受信専門局	32.78	132.88	2.5	公衆電話回線
気仙沼	同上	38.89	141.56	2.5	同上
厳原	同上	34.23	129.28	2.5	同上
松江	同上	35.46	133.06	2.5	同上
尾鷲	同上	34.07	136.20	2.5	同上
稚内	同上	45.39	141.69	2.5	磁気テープ
与那国	高感度形受信専門局	24.44	122.96	4.5	衛星経由打合わせ回線
南大東	同上	25.82	131.22	4.5	同上
小笠原	同上	27.09	142.19	4.5	同上

電話回線によるデータ伝送を行って、毎分のデータを1日分、降雨データ、受信アンテナ方向データ等とともに、毎日一定時に東京のNHK放送センター内で磁気テープに収録するものである。データ処理にはミニコン TOSBAC-40L および 40D を使用している²⁾。各受信局名、受信局のタイプ、位置、アンテナ直徑、データ伝送法を第1表に示す。

これらの局の位置での受信電界変動は、気仙沼、厳原、与那国がピッチ誤差に対して、稚内、南大東はロール誤差に対して、さらに南大東、稚内、厳原がヨー誤差に対して感度がよく、アンテナ方向決定のためにこれらの局の受信電界変動データを用いた場合、各受信局電界の誤差の標準偏差を 0.5 dB 程度としたときでも、たとえば決定したビーム中心変動の誤差の標準偏差で 0.04 度程度の決定精度が得られることが解析的に確かめられている¹⁾。

2.2 アンテナ方向決定プログラム アンテナ方向決定プログラム部は大きく二つの部分に分かれる。一つは磁気テープから受信データを入力して工学値への変換、各種補正を行い姿勢決定用の受信データ・ファイルを磁気ディスクに作成する前処理部であり、もう一つは作成されたファイルから受信データを指定パラメータに従って入力し、非線形最小二乗法による決定計算およびその結果から任意の時刻の姿勢誤差、受信電界変動の生成計算を行う姿勢誤差計算部である。

プログラム・サイズは全体で 350K バイトであり、計算機は IBM 370-138 (現在は 4341-II) を使用し、所要計算時間は 10 局全部の受信データを用いて 1 分ごとを 1,440 組、すなわち、1 日分の姿勢誤差変化を計算する場合で約 18 分である。各軸方向誤差に対して感度のよい局のデータを適当に選べば、使用する受信局数を少なくして、ほぼ同じ決定精度を得ながら計算時間をさらに短縮することもできる。

第1図 アンテナ方向決定システム (ADDS) の概要

2.3 決定用受信データの预处理 衛星のアンテナ方向誤差決定精度には、各種前処理を行った後の受信電界の精度が影響する。ここでは受信電界データの精度に影響を与える各種要因について、その影響の程度と、補正のための前処理の具体的方法について述べる。

2.3.1 大気伝搬変動 BSE の TV 送信周波数は 12 GHz 帯であり、電離層によるシンチレーションの影響も通常は小さく、年に数回数時間にわたって 2~4 dB くらいに達する場合もあるが、ほとんどの場合は 0.5 dB 程度までである。しかも変動周期がきわめて短く、ADDS では毎秒の受信データを 1 分間ごとに平均したものをを用いているため、その影響はほとんど現れず、0.1 dB 程度にも達しない。対流圏での影響もわずかであり、両方とも誤差源としてはほぼ無視できる。

2.3.2 衛星送信電力変動および地上受信機変動 衛星の送信電力変動については、各局に同じ大きさの影響を与えるものであることからほぼ完全に補正することが容易である。また実際にも十分に安定であって、データ収集システムが 0.1 dB 単位に量子化されていたこととも合わせてほぼ無視できるものであった。また、地上受信機も数日間という範囲では十分に安定しており、バイアス変動分は決定過程で推定、補正ができるので問題はない。

2.3.3 降雨減衰 各地の降雨量データは受信データとともに収集されたが、降雨量のデータから降雨減衰の影響を満足できる程度正確に求めることはほぼ不可能であり、実際には降雨のない受信局のデータのみを使用して決定を行うか、毎日繰り返す同じアンテナ方向変動の場合には数日分を比較することにより補正する、という方法となった。

2.3.4 タイム・タグ誤差 受信電界の時刻データを絶対時刻で正確に較正することはむずかしいが、放送波の入、切、衛星側に起因する電界変動などのタイミングを利用して各受信局間の時刻差をなくすよう相対的に較正することは容易であり、十分満足できるものである。

2.3.5 地上局アンテナ追尾損失 受信電界精度に対して最も影響の大きいのは、衛星軌道位置変化による地上局アンテナ追尾損失の変化によるものであるが、衛星は東西および南北方向 ± 0.1 度以内に軌道保持されているため、アンテナ指向方向の設定が正しく行われていれば、本土内受信専門局で用いた直径 2.5 m 級のアンテナではまったく補正しなくてもその影響は通常は最大でも 0.5 dB 以下である。直径 4.5 m 級のアンテナを使用した離島の場合にはこの影響は最大

時 1.5 dB 程度に達しうるので無視できない。実際には、地上局アンテナ方向をわずかに切り換えたときの受信電界の変動量と、軌道生成データ、および実測した地上局のアンテナ利得パターンを用いてまず地上局アンテナ方向を正確に求め、次に各軌道位置での損失分を計算して補正するという方法をとった。ここで補正しきれなかった誤差分が受信電界の誤差のなかでは支配的なものといえるが、この手法でかなり正確に補正ができることが各種の軌道位置での影響計算結果の一致から確かめられ、全体の誤差を合わせても受信電界の誤差は標準偏差でほぼ 0.2~0.5 dB 以内と見積もることができた。

3. システムの検証

実際の放送衛星のアンテナ方向誤差決定は、1978 年に BSE が打ち上げられてから TV 送信波が停止するまでの受信データにより、季節、時間帯、姿勢制御運用法など、条件の異なったものを選んで行い結果の検討を行った。そのなかから、代表的な衛星運用条件のほぼすべてを網羅するよう、バイアスを与えることにより衛星姿勢を順次変化させたときの受信データによるアンテナ方向決定結果の変化、24 時間のアンテナ方向変化としてホイール制御のときおよびスラスタ制御のときの決定結果、さらに、衛星からの姿勢情報ではわからない姿勢センサー誤差によるアンテナ方向変化として月が赤外線地球センサーに干渉したときの決定結果、について述べる。

3.1 衛星姿勢を変化させたときの決定結果 BSE の運用中、衛星のヨー・バイアスを段階的に変化させる試みが、1979 年 2 月 19 日に行われた。このときの、与えたヨー・バイアス値の変化と受信データから決定したヨー誤差の変化をグラフにしたものが第 2 図である。この図からわかるように、この姿勢決定システムで得られたヨー姿勢誤差は与えたヨー・バイアスに対応し、その間の関係はほぼ傾きが 1 であって妥当な姿勢決定結果となっている。

3.2 1 日分のアンテナ方向決定結果

3.2.1 ホイール制御時 24 時間のデータのなかにいろいろなアンテナ方向変動要因を含み、かつヨー姿勢センサーとして、モノパルス・センサーと地球センサーの組合せ使用⁸⁾ および太陽センサー使用の両方の運用も含む、1979 年 2 月 15 日 0~24 時 (JST) の受信データによるアンテナ方向決定結果を示す。

前述の、姿勢変動以外の影響やタイム・タグ誤差などの補正の各種前処理済の受信電界の変化を、衛星の姿勢変化に対して受信電界変動の感度が高い気仙沼、厳原、与那国、南大東について出力したものを第 3 図

第2図 ヨー・バイアス・コマンド変化対決定したヨー誤差変化

第3図 ホイール制御時の受信電界レベル変化

に示す。この日の受信データが収集できたのは大阪、竜串、気仙沼、厳原、尾鷲、稚内、与那国、南大東の8局であった。この8局全部の受信データを用いてアンテナ方向誤差の決定を行った結果として、ビーム中心方向のロール、ピッチおよびポインティング誤差の変化を第4図に示す。また、決定後の受信電界変動の残差の変化を第5図に示す。

残差のおもな部分は、衛星の位置変化による地上局追尾損失分が完全に補正できていないものであるが、すべての局ではほぼ 0.5 dB 以内に納まっており、全決定時間帯において最大時でも 1 dB 程度である。このことから、少なくとも各受信局近辺でのアンテナ・パターンはほぼ実現されていることも確かめられたといえる。また、この日の決定結果を見ると、センサーによる姿勢誤差変化情報ではほとんど姿勢変動はないにもかかわらず、各局の受信レベルは変化し、決

第4図 ホイール制御時のアンテナ方向誤差決定結果

第5図 ホイール制御時の決定した受信電界変動の残差の変化

定結果も第4図内(A)～(C)等のように各種のアンテナ方向変動を示している。これは、その他のテレメトリ・データ等と合わせて検討した結果、次のような原因によるものであることがわかった。

(A)アンテナ・リフレクターの熱歪によるビーム・シフト、(B)ヨー軸太陽センサー制御時の太陽傾角補正量変更時の変化、(C)太陽センサーヨー誤差感度低下時間帯の開ループ制御時制御量が不適当なときに生じるドリフトおよび閉ループに戻ったときのトランジェント。

このほかに第4図のなかで目立つ変動のうち姿勢センサーに起因して発生しているものは(D)、(E)で、その原因は次のようなものであることもわかった。(D)地球センサーの視野を太陽が通過するとき通常2組のディテクター・グループ出力の合成を用いているものを単一モードに切り替えて使用する際発生するトランジェント、(E)ヨー・センサーをモノパルス・センサ

ーと地球センサーの組合せから太陽センサーに切り替えたときのトランジェント。

これらの変動は定量的にも解析結果と合うことが確かめられた⁷⁾。したがって、この面でもシステムの決定機能が検証されたといえる。

3.2.2 スラスタ制御時 BSE は 1979 年 11 月にロールおよびピッチ制御用ホイールが停止し、翌年 3 月にピッチについては回復したが、バック・アップ・モードでの姿勢制御として、ロールおよびピッチもしくはロールだけをスラスタによるデッド・バンド制御とした時期があった。ここではロールおよびピッチ 2 軸についてスラスタ制御を行っていたときのアンテナ方向変化の例として、1979 年 11 月 29 日 16 時～30 日 16 時 (JST) までの 24 時間の受信データの変化を、2 月 15 日の例と同じように衛星の姿勢変化に対して受信電界変動の感度が高い気仙沼、巖原、与那国、南大東について出力したものを第 6 図に示す。さらに、これらの受信データから決定したアンテナ方向変動の様子を第 7 図に示す。

第 6 図 スラスタ制御時の受信電界レベル変化

第 7 図 スラスタ制御時のアンテナ方向誤差決定結果

振動の周期は異なるが、ロール、ピッチ軸ともスレッシュホールドを検知してスラスタを噴射するデッド・バンド制御が行われていることがわかる。実際のアンテナ方向の変化は、デッド・バンド制御によるものの他に、ホイール運用時にも確かめられている各種の変動要因も合成されたものである。2 月 15 日の例で現われている以外のおもな変化は次のようなものである。

(F) 冬季のみに発生する地球センサー温度が急激に下降しているときのセンサー誤差によるピッチ負方向の変動。2 月 15 日の例ではこの時間帯がヨー軸を地球センサーとモノパルス・センサーの組合せにより運用しているためピッチ誤差がヨー誤差になり結果としてポインティング誤差としては現われていない。(G) 太陽輻射圧によるピッチ外乱トルクが小さい時間帯に太陽センサーから地球センサーとモノパルス・センサーの組合せに切り替えたために発生しているトランジェント。(H) 地球を公転している衛星の軌道位置により衛星に対する太陽光照射の向きが変化し、ピッチ外乱トルクの極性が反転するために発生するアンテナ方向差。夜間の反転時は、太陽センサーの太陽傾角補正誤差により発生するアンテナ・ピッチ誤差への影響が最大である衛星ローカル 0 時付近にほぼ一致し、しかもこのときに (G) に述べたこの影響のないセンサーへの切替が重なっているため、15 時 (JST) ころの反転時に比べて変化量が大きくなっている。

このデッド・バンド制御はロール、ピッチともに ± 0.2 度で行われており、受信データによる決定結果もほぼ ± 0.2 度以内に保つ制御が行われていることを示している。

3.3 姿勢センサー誤差発生時の決定結果 姿勢センサー誤差には熱特性によるものなどいくつか存在することがすでに確かめられたが、ここでは赤外線地球センサーに月の干渉の影響があったときの決定結果を示す。

月の干渉の影響は無視できない大きさでありながら太陽の影響程大きくないために地球の輻射と分離することは困難で、通常は発生を予測して冗長系に切り替える以外にこれを避ける方法はなく、そのままならロールまたはピッチのセンサー誤差を発生させる⁹⁾。1979 年中に月の干渉が発生する日および時刻を予測してその日の受信データの変化で確認できたものが第 8 図であり、このうち 5 月 9 日の例についてアンテナ方向を決定した結果が第 9 図である。このデータでは (I) に示すようにピッチ負方向に約 0.03 度のアンテナ方向誤差が発生しているのが確認できた。このときの月齢をもとに実視等級と光量の関係を用いて最大影

第8図 地球センサーに対する月の干渉時の受信電界レベル変化

第9図 地球センサーに対する月の干渉時のアンテナ方向誤差決定結果

響時である満月のときのセンサー誤差を計算すると約0.05度が得られる。

このように、通常の姿勢誤差センサー情報のみではその影響がわからないものについても定量的に把握することができることから、アンテナの実際の指向精度を確かめる手段として有効であることがわかる。

4. む す び

以上、全国各地で同時に受信した衛星からのTV送信波の受信電界変動データを用いて衛星のアンテナ方向を決定するシステムについて、その具体的な構成、データ処理法、および実際に決定を行った結果のいくつかの例について述べた。

1978年に打ち上げられたBSEの実際のデータを用いた決定結果からは、かなり大きな姿勢変動に対して各受信局における決定後の受信電界の残差の変化がほぼ0.5dB以内に納まっていることなど、衛星の送信アンテナ利得パターンが軌道上でもほぼ実現されて

いることが確かめられた。また、地上からのコマンドにより衛星姿勢にバイアスを加えた実験では、与えた変化量に相当する姿勢変化が受信データを用いた決定結果として得られたことからシステムの決定機能も検証できた。さらに、このシステムを用いて検討した結果から衛星のアンテナ方向誤差変動には衛星の姿勢センサー情報だけではわからない要因が存在することも判明し、その他のデータ等を合わせた検討結果からそれが姿勢センサー誤差やアンテナの熱歪による指向誤差などによるものであること、その大きさが定量的にも解析結果とはほぼ一致することなども確かめられたし、予測されるセンサー誤差に対して定量的にその影響を把握することもできた。これらの結果はまたシステムの決定機能を間接的に検証したことにもなり、かつ、受信データを用いた衛星のアンテナ方向決定の有用性を示すことにもなった。

最後に、本研究をすすめるにあたりご指導をいただいた当研究所松下操前次長（現技術本部主幹）、玉井清造次長、島岡淳主任研究員、つねにご助言をいただいている江原暉将研究員をはじめ、関係の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 横山正基：複数の地上局の受信電界データを用いた衛星姿勢決定法の解析，電子通信学会論文誌，昭58-論207 [B-65] (1983)，pp. 567-574.
- 2) 菊池裕宣，仙波健道，堀展彰，村中敏克，寺島外廣：放送衛星受信実験，データ収集・分析システム，昭53光・電波部門電子通信学会全国大会，S1-29 (1978).
- 3) 横山正基，町田正彦，菅克己：全国受信データによる放送衛星の姿勢推定法，昭54電子通信学会全国大会，2171 (1979).
- 4) 横山正基，島岡淳，荒井功恵：全国受信データによる放送衛星の姿勢推定実験，昭55電子通信学会全国大会，2330 (1980).
- 5) 横山正基，島岡淳：全国受信データによる放送衛星の姿勢解析，昭56電子通信学会全国大会，S11-10 (1981).
- 6) 村上秀俊，横山正基，荒井功恵，佐藤秀繁：BSEのビーム・ポインティング及び姿勢制御機能の検討結果，第25回宇宙科学技術連合講演会，1G12 (1981.10).
- 7) SHIMOSEKO, S., MURAKAMI, H., MOCHIZUKI, R., YOKOYAMA, S., KAJIKAWA, M., ARAI, K. and SUENAGA, M.: Analytical Results of BSE Beam Pointing and Attitude Control Performance, AIAA 9th CSSC, 0550 (March, 1982).
- 8) SHIMOSEKO, S., ARAI, K. and MATSUMOTO, H.: Three-Axis Attitude Control Acquisition Results and Regular Operational Status of BSE, AIAA 8th CSSC, 0574 (April, 1980).
- 9) 横山正基，島岡淳：放送衛星の全国受信データで推定した地球センサーに対する月の干渉の影響，第26回宇宙科学技術連合講演会，2B7 (1982.10).