

ETS-VI通信実験を行うための周回衛星AFCシステム

鈴木 健治 高橋 卓 岡本 英二 井家上 哲史

郵政省 通信総合研究所

〒314 茨城県鹿嶋市大字平井893-1

Tel.: 0299-84-7129; Fax.: 0299-84-7158; E-mail: ksuzuki@crl.go.jp

3日5周回で回帰する準回帰軌道をとる楕円軌道の周回衛星となったETS-VIの各種回線を用いた通信実験を行うためには、時々刻々変化する距離変化率に伴うドップラーシフトを補償する必要が生じた。そこで、軌道要素から計算したドップラーシフト量の補正を加えるオープンループ制御と、パイロット信号を毎分観測して補正を加えるクローズドループ制御を併用した周回衛星AFCシステムを開発した。これにより $\pm 100\text{Hz}$ 以内に制御でき各種通信実験が可能となった。

ETS-VI, 周回衛星, 衛星通信, AFC, ドップラー補償

Non-geostationary Satellite AFC System for Satellite Communications Experiments Using ETS-VI

Kenji SUZUKI Takashi TAKAHASHI Eiji OKAMOTO Tetsushi IKEGAMI

Communications Research Laboratory, M.P.T.

893-1 Hirai, Kashima, Ibaraki 314 Japan.

Tel.: 0299-84-7129; Fax: 0299-84-7158; E-mail: ksuzuki@crl.go.jp

To carry out satellite communications experiments using the circuits of ETS-VI which has an elliptical orbit, that is, a subrecurrent orbit, in which the satellite turns around five times in three days, it is necessary to compensate the Doppler shift which is proportional to the constant distance change. We developed a non-geostationary satellite AFC system taking both open-loop control, which compensate the Doppler shift by calculating from orbital elements, and closed-loop control by observing a pilot signal every minute. We can thus control the Doppler shift to within $\pm 100\text{Hz}$ and can carry out various communications experiments.

ETS-VI, Non-geostationary satellite, Satellite Communication, AFC, Doppler compensation

1. まえがき

ETS-VIは1994年8月に打ち上げられたが、アポジエンジン不具合のため静止軌道への投入が不可能となり、3日5周回で回帰する準回帰軌道をとる楕円軌道に投入された[1]。

ETS-VIのSIC(Sバンド衛星間通信用機器)、OCE(Oバンド通信用機器)の各種回線を用いた通信実験[2][3]を行うためには、時々刻々変化する距離変化率に伴うドップラーシフトを補償する必要が生じた。Oバンド折り返しでは最大で-406kHzのドップラーシフトを受け最大30Hz/sで変化する。静止衛星用に整備した通信装置の復調器にも移動体通信に対応したAFC[4]が用意されているが、その受信AFC動作範囲は ± 2 kHzであり引き込み範囲外となってしまう。そこで、軌道要素から計算したドップラーシフト量の補正を加えるオープンループ制御を每秒行うこととした。この方法は宇宙開発事業団においても軌道予測に基づく距離変化率の予報値に有為な誤差の無いことが確かめられており[5]、有効な手段であった。

さらに、衛星中継器の周波数変動等のバイアス的な周波数のドリフト誤差分を補償するため、パイロット信号を通信信号と一緒に送信しこれを毎分観測して補正を加え、通信信号の周波数を常に一定にするクローズドループ制御を併用する周回衛星AFCシステムを提案する。送受信する通信信号の周波数が規定値で扱える様に、アップ/ダウンコンバータのローカル信号を制御する。

これにより ± 100 Hz以内に制御出来ることが確認され、周回衛星中継器や安定な周波数基準を持たない小規模、移動地球局のローカル信号安定度に起因する周波数変動を補償するのに、有効であることが示された。

本報告では、軌道計算に基づくドップラー補償を行うオープンループ制御に加えて、パイロット信号を用いたクローズドループ制御を併用した周回衛星AFCシステムについて述

べる。

2. ドップラーシフト

ETS-VIの軌道の特長

トランスファー軌道から3日5周回で回帰する準回帰軌道をとる軌道長半径30,000km、離心率0.5、軌道傾斜角13.5度の楕円軌道(図1)に投入され、3軸を確立しているが、アンテナを日本方向に向けるための姿勢バイアス運用が地球センサの ± 2 度以内の範囲に制限されることから、実験時間は約3~4時間に限られている。この間ETS-VIは鹿嶋から図2のように見え、各地球局アンテナをプログラム追尾[6]しつつ実験を行う。

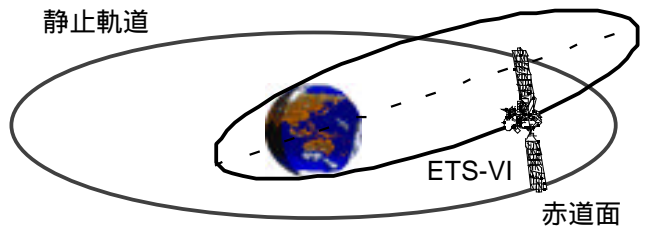


図1 ETS-VIの軌道外観

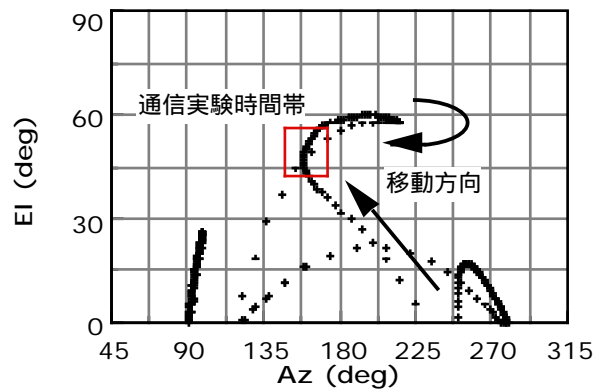


図2 鹿嶋から見たETS-VIの軌道

軌道伝搬精度

宇宙開発事業団において軌道決定された最新の軌道要素をもとに、静止軌道用高精度軌道決定プログラムPODP(KODS[7]からさらに高精度化し軌道決定精度:数mオーダー)によって軌道伝搬し距離変化率 \dot{r} (m/s)を求める。軌道決定誤差や軌道計算モデルの違いなどによる軌道計算誤差は位置精度で数kmであるが、ドップラーシフト量の計算では数十Hzのオーダーまで正しく計算される。

距離変化率から求めるドップラーシフト

地球局と衛星間の距離が時間とともに変化すると、波源が一定の周波数 f_0 (Hz)の電波を出していても、近づいている場合は高い周波数で、遠ざかっている場合は低い周波数で観測されるドップラー効果によるドップラーシフト f を受ける。地球局から衛星までの距離を r (m)ととって距離変化率を \dot{r} (m/s)とし、伝搬速度を c (m/s)とすると、

$$f = -f_0 (\dot{r} / c) \tag{1}$$

と表される。ここで、実際の衛星回線を考えた場合アップリンクとしてノミナル周波数 f_1 (Hz)で送信側の地球局から送信した電波は距離変化率 \dot{r}_1 で遠ざかる衛星ではドップラーシフト f_{UP} を受け $f_1 + f_{UP}$ で受信される。(1)式より、

$$f_{UP} = -f_1 (\dot{r}_1 / c) \tag{2}$$

となる。衛星上の中継器で周波数変換されて送信される電波は、ノミナル値を受信して送信する周波数 f_2 (Hz)に f_{UP} だけシフトした周波数となる。次にダウンリンクとして受信側の地球局で受信されるまでに同様にドップラーシフト f_{DOWN} を受け、受信される周波数 f_R は $f_R = f_2 + f_{UP} + f_{DOWN}$ となる。この間の距離変化率を \dot{r}_2 とすれば(1)式より、

$$f_{DOWN} = -(f_2 + f_{UP})(\dot{r}_2 / c) \tag{3}$$

となる。アップリンクとダウンリンク合わせてドップラーシフト量 f_R は、

$$f_R = f_{UP} + f_{DOWN}$$

$$f_R = -(f_1 (\dot{r}_1 / c) + (f_2 - f_1 (\dot{r}_1 / c))(\dot{r}_2 / c)) \tag{4}$$

送信側と受信側の地球局が同じ位置ならば、距離変化率 $\dot{r} = \dot{r}_1 = \dot{r}_2$ から、(4)式は、

$$f_R = -(f_1 + f_2 - f_1 (\dot{r} / c))(\dot{r} / c) \tag{5}$$

となる。

ETS-VI通信実験回線

ETS-VIを用いた通信実験には、Kaバンド衛星間通信用フィーダリンク機器(FLCE)、Sバンド衛星間通信用機器(SIC)、Oバンド通信実験(OCE)の中継器を介した表1に示す各種回

線がある。

表1 通信実験回線

	Link	Band Width	Uplink	Downlink
SIC	Forward Link	6MHz	29.8984GHz	2.1064GHz
	Return Link	5MHz	2.2875GHz	20.1219GHz 20.2455GHz
OCE	Forward Link	30MHz	29.772GHz	38.000GHz
	Return Link	30MHz	43.000GHz	19.938GHz
	Loop-back Link	1.2MHz	43.000GHz	38.000GHz

これらの各回線の周波数に基づきそれぞれ距離変化率からドップラーシフト量を計算しドップラー補償を行う。

実験時間において鹿島地球局からETS-VIは図3のような距離変化率となり、各回線のドップラーシフトは図4の通りとなる。

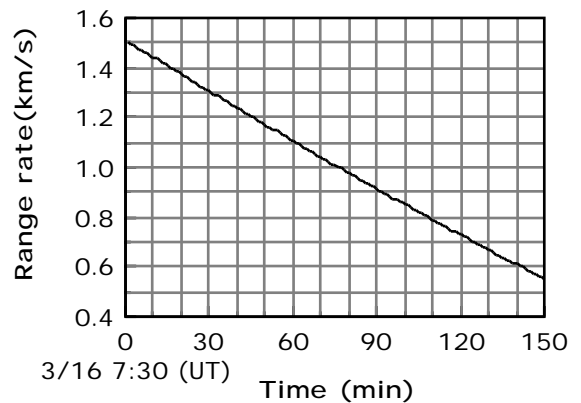


図3 鹿嶋 ETS-VI間距離変化率

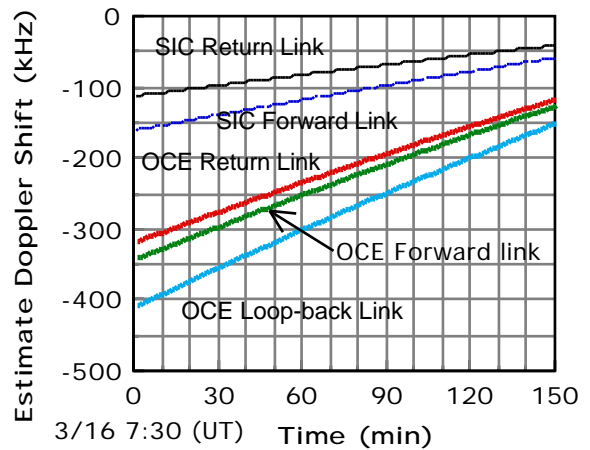


図4 各回線のドップラーシフト

3. AFCシステム構成

SICとOCEのフォワードリンク及びリターンリンクのKaバンドフィーダリンク地球局送受信系が共通となっていて、しかもSICとOCEを同時に実験するため、周波数の違いからドップラーシフト制御量が異なりフィーダリンク地球局側で、同時に両方のAFC制御を行うことが出来ない。そこで今回は、Sバンド、Oバンド疑似衛星局側の周波数変換器のローカル信号を制御する方法とした。

SICフォワードリンクAFCシステム構成を図5に、SICリターンリンクAFCシステム構成を図6に示す。アップリンク側とダウンリンク側のドップラーシフト量の補正は、正負が逆になる。負のドップラーシフトを受ける場合には、アップリンク側では、フィーダリンク地球局側で規定の周波数で信号が受信される様に、規定周波数にドップラーシフト分だけ高い周波数で信号を送信し、逆にダウンリンク側では、フィーダリンク地球局側で規定の周波数で信号を送信し、受信側でドップラーシフト分だけ低い周波数で信号が受信されるので、その周波数が規定値となるよう補償する。

オープンループ制御

距離変化率から求めるドップラーシフト量をパーソナルコンピュータで、周波数変換部のローカル信号に毎秒補正した周波数を与えたシンセサイザの信号を入力することによりドップラー補償を行った。ドップラーシフト分の補償をダウンリンク側で行う場合は、ドップラーシフト分をダウンコンバータのローカル信号に補正を加えればよい。アップリンク側で補償する場合は、送信周波数が変わりさらにドップラシフトを受けるため厳密には差が生じるが、今回のETS-VIを用いた実験時間帯での衛星の距離変化率は最大で1.9km/sであり、数十GHzオーダーの周波数帯では、数百kHzオーダーのドップラーシフトとなり、

これによるずれが現れるのは、数Hzオーダーで問題とならない。

OCEフォワードリンク及び、リターンリンクAFCシステムの基本構成は、SICと同様となっている。

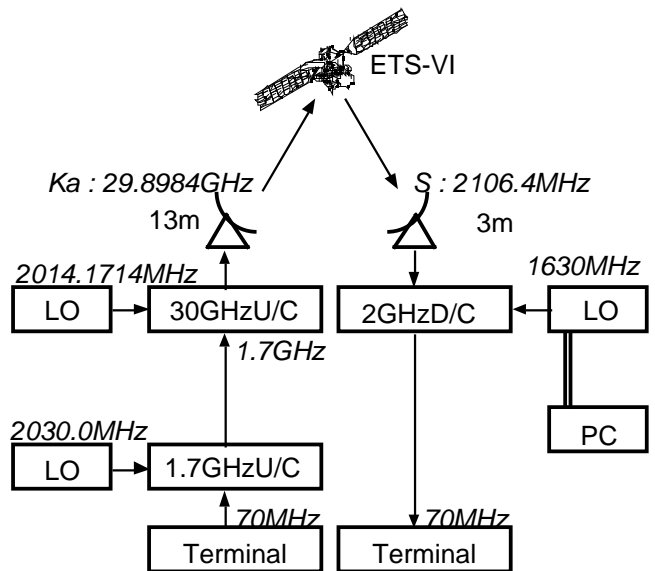


図5 SICフォワードリンクAFCシステム構成

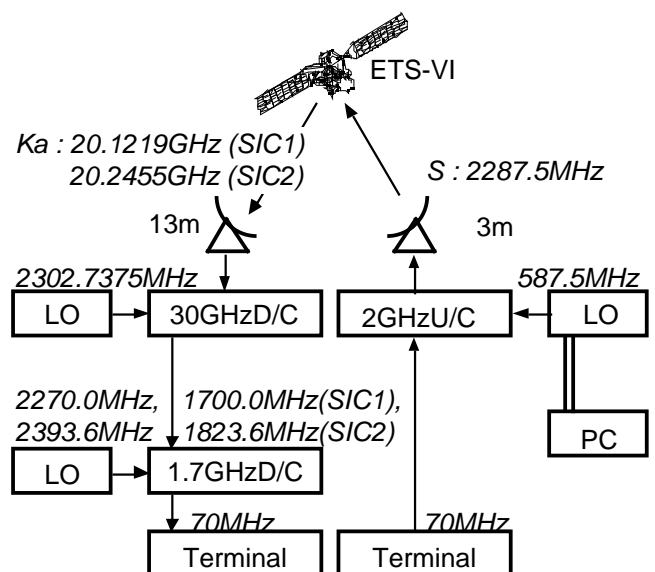


図6 SICリターンリンクAFCシステム構成

クローズドループ制御

大規模な地球局はルビジウム標準などの高安定、高確度な基準信号を得ることが出来る。一方、周回衛星の衛星中継器や、安定な周波数基準を持たない小規模局、移動地球局などでは、ローカル信号安定度に起因する周波数

変動が、数kHz～数十kHzオーダーで存在し、これを補償することが重要である。こうした変動を補償する方法として、パイロット信号を用いたAFC[8]によるクローズドループ制御が考えられるが、クローズドループ制御だけではドップラー周波数変化率が最大30Hz/sと大きいため、制御が間に合わない。そこで、これらを組み合わせオープンループ制御によるドップラー補償を行いつつ、クローズドループ制御を併用する方式を提案する。

オープンループ・クローズドループ制御併用方式

毎秒のドップラー補正量はオープンループ制御で行い、加えて通信信号にパイロット信号を合成して送信し、毎分これを観測してバイアス的に補正を加える。

図7にOCE折り返しモードでのオープンループ・クローズドループ制御併用AFCシステム構成図を示す。パイロット信号は70MHzのIF帯で通信信号と合成し、衛星に送信する。受信側ではドップラーシフトの計算値の周波数で受信されるパイロット信号を、スペアナで1分毎に観測しこれが正確にノミナル値になるようローカル信号の周波数にオフセットを加える。

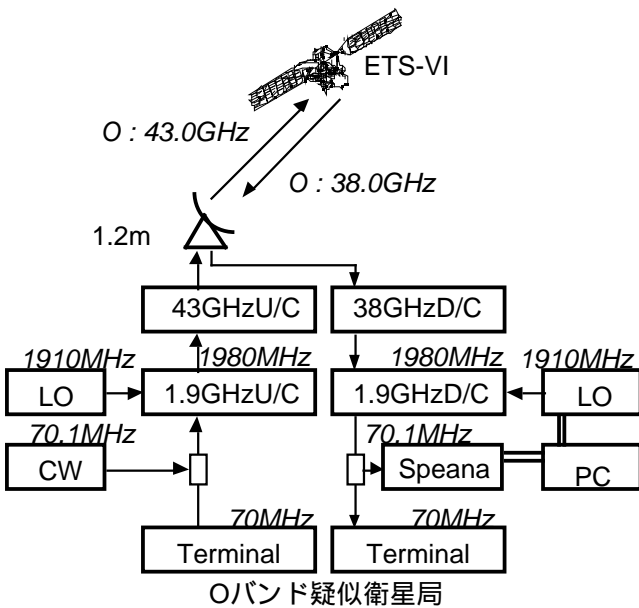


図7 併用方式AFCシステム構成

4. 実験結果

オープンループ制御で行ったSICダウンリンク側ドップラーシフト補償結果を図8に示す。2時間30分の実験時間内において36kHzのバイアス誤差があるものの、周波数変移量は50Hz以内に収まっており、この回線では、オープンループ制御だけで十分通信実験に使えることが分かる。

オープンループ制御だけのOCEフォワードリンク・リターンリンクAFCでは、2時間30分の実験時間にOCEフォワードリンクは8kHz、OCEリターンリンクは10kHzドリフト的に誤差が生じた。これは、例えばOバンド疑似衛星局ODUのアップ、ダウンコンバータのローカル信号にリファレンス信号が入力されておらず、水晶発振器の周波数安定度（長期安定度 $\pm 1 \times 10^{-6}/\text{年}$ 、温度安定度 $\pm 1 \times 10^{-6}/0 \sim 40$ ）に依存し1～2時間で数kHzオーダーが変動することなどによる。

ここで、図9にOCEフォワードリンクのオープンループとクローズドループ併用制御のダウンリンク側AFC結果を示す。実験時間2時間内において周波数変移量は $\pm 100\text{Hz}$ 以内に収まっている。この間のパイロット信号による補正量は図10の通り4kHzに及んでいる。

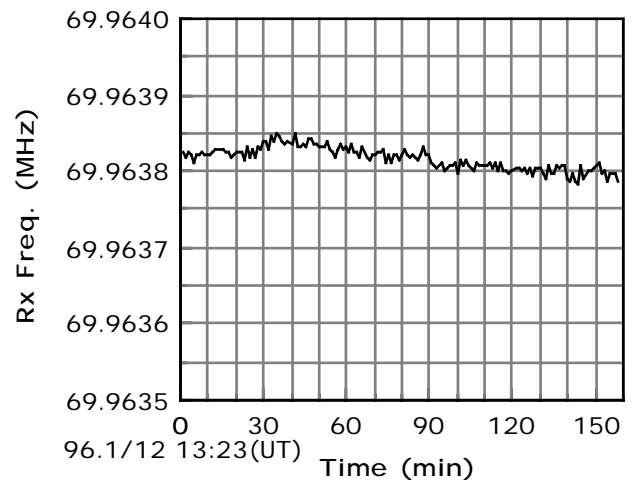


図8 SICフォワードリンクAFC結果

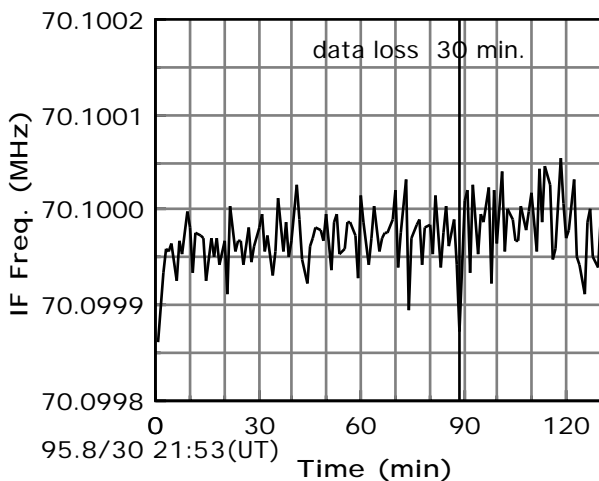


図9 OCEフォワードリンクAFC結果

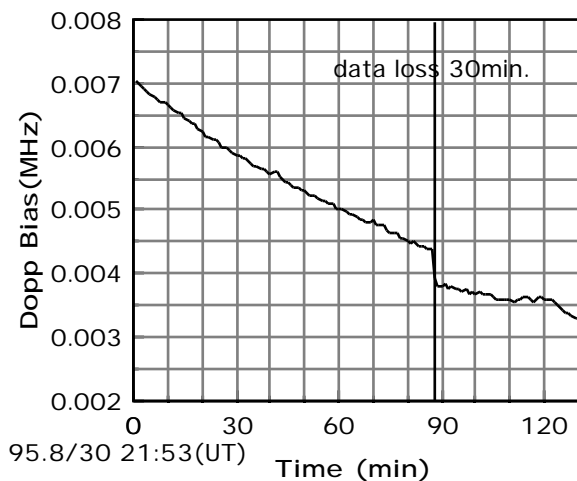


図10 クローズドループ制御量

5. むすび

軌道計算に基づくドップラー補償を行うオープンループ制御に加えて、パイロット信号を用いたクローズドループ制御を併用した周回衛星AFCシステムを提案し、ETS-VIを用いた実験結果からオープンループ・クローズドループ制御併用方式が、周回衛星通信回線のドップラーシフト環境下で、しかも衛星中継器の周波数変動等のバイアス的な周波数のドリフト誤差があっても有効に動作することを示した。

ETS-VIを用いた実験は1994年11月から1996年1月12日の定常運用最終日まで、全90回行った。静止衛星用に整備した地球局を周

回衛星に対応するため、その早い段階でアンテナの追尾系、周回衛星AFCシステムを整備し、各種通信実験を可能とした。今後はこの経験を生かし、小型周回衛星通信システムの検討等を行う予定である。

参考文献

- [1] 田中俊輔，北原浩志，伊藤崇，原田力，稲田陽一，田保則夫，鳥海強，長谷川浩平：“ETS-VI楕円軌道運用”，1995年信学会通信ソサイエティ大会，B-138。
- [2] 高橋卓，山本伸一，鈴木健治，李還幫，井家上哲史，岡沢治夫，若菜弘充：“ETS-VI Sバンド/ミリ波衛星通信実験速報”，1995年信学会総合大会，SB-2-9。
- [3] 高橋卓，吉村直子，李還幫，井家上哲史，若菜弘充，鈴木良昭：“ETS-VI衛星通信実験報告”，1995年信学会通信ソサイエティ大会，B-147。
- [4] 若菜弘充，他：“4. 鹿島地球局 4.4 SCPC通信用端局装置”，電波研季報 技術試験衛星V型を用いた移動体衛星通信実験システム(ETS-V/EMSS)特集号，34，6，pp89-99(1988-3)。
- [5] 白倉政志，篠原幸一，國安省史，大島浩，中原智勇：“ETS-VI/NASA-UARS衛星間通信実験におけるドップラ補償”，信学技報，SAT95(1995-10)。
- [6] 鈴木健治，小園晋一，山本伸一，井家上哲史，若菜弘充：“ETS-VI通信実験を行うためのアンテナプログラム追尾”，1995年信学会通信ソサイエティ大会，SB-3-4。
- [7] 川瀬成一郎，田中高志：“VLBIによる静止衛星の軌道決定”，電波研季報，24，130，(1978-9)。
- [8] 井口政昭，門脇直人，鈴木龍太郎：“4. 鹿島地球局 4.8 AFCシステム”，電波研季報 技術試験衛星V型を用いた移動体衛星通信実験システム(ETS-V/EMSS)特集号，34，6，pp133-139(1988-3)。