

## Sバンド衛星間通信機器の開発

田中 正人\*<sup>1</sup> 木村 繁\*<sup>1</sup> 藤田 正晴\*<sup>2</sup>  
松本 泰\*<sup>3</sup> 鳩岡 恭志\*<sup>3</sup>

(1994年1月24日受理)

DEVELOPMENT OF S-BAND INTERSATELLITE  
COMMUNICATIONS EQUIPMENT ON ETS-VI

By

Masato TANAKA, Sigeru KIMURA, Masaharu FUJITA,  
Yasusi MATUMOTO, and Yasusi HATOOKA

This paper describes the S-band Intersatellite Communications equipment (SIC) to be borne on the Engineering Test Satellite VI scheduled for launch in 1994. This equipment will be used in carrying out the first intersatellite data relay experiments in Japan. The SIC is the first on-board formed multibeam phased array antenna to be borne on a satellite. It is capable of relaying data simultaneously to several orbiting satellites (user satellites) by means of electronically scanned beams. The location of a user satellite can be computed with an on-board microprocessor and the beam pointed towards that direction automatically. This paper describes the functions and the configuration of the SIC and then analyzes the antenna including the effects of phase and amplitude errors caused by temperature fluctuations. In addition, this paper describes the main components, including a new broadband microstrip antenna, a small beam forming network with small phase errors and a phase shifter controller used to compute the orbits of the user satellites.

[キーワード] フェーズドアレー, マルチビームアンテナ, 衛星間通信, アクティブアレー, マイクロストリップアンテナ, ETS-VI.

Phased array, Multibeam antenna, Intersatellite communication, Active array, Microstrip antenna, ETS-VI.

## 1. はじめに

データ中継衛星システムでは静止衛星と周回衛星との間を接続する衛星間通信回線を設定することが重要である。ETS-VI に搭載する S バンド衛星間通信機器 (SIC) は世界で初めて衛星上でビーム形成を行うマルチビームフェーズドアレーアンテナであり, 電子的にビーム走査を行い, 同時に複数の周回衛星 (ユーザ衛星) との回線を設定でき, また, オンボードマイクロプロセッサによ

りユーザ衛星の位置を計算し自動的にビームを向ける, などの特徴を有している<sup>(1)</sup>。

オンボードビーム形成方式は米国のデータ中継衛星 (TDRS) の方式<sup>(2)</sup> に比べて我が国のようにユーザ衛星が比較的少ない場合にフィーダリンクの周波数帯域と電力の有効利用が図れるなどの利点を有する。米国においても次世代のデータ中継衛星ではオンボードビーム形成方式が検討されている<sup>(3)</sup>。この意味で SIC は世界に先行するものである。

本論文でははじめに SIC の開発方式について述べる。次に SIC を米国の TDRS と比較して論じ, SIC の機能・構成について述べる。また, 衛星搭載フェーズドア

\*1 宇宙通信部 衛星間通信研究室

\*2 電磁波技術部 通信デバイス研究室

\*3 宇宙開発事業団

レーではケーブルの熱変形等に起因する位相誤差や振幅誤差による電気性能の劣化が問題となるので、これも含めたアンテナの解析を示す。最後にアンテナ素子、ビーム形成回路、移相器コントローラ等の主要コンポーネントの性能について述べる。

## 2. 開発方式

SIC の開発方式は、開発費を低く押さえることを目

的として EM (エンジニアリングモデル) を製作し試験後改修して搭載モデルとする、いわゆる EM-EFM (エンジニアリングフライトモデル) 方式とした。このため、SIC で製作したのは EFM の 1 種だけで予備品はない。

SIC の開発は CRL と NASDA が共同して行った。その開発作業分担を第 1 図、コンポーネント分担を第 2 図に示す。

## 3. SIC によるデータ中継システム

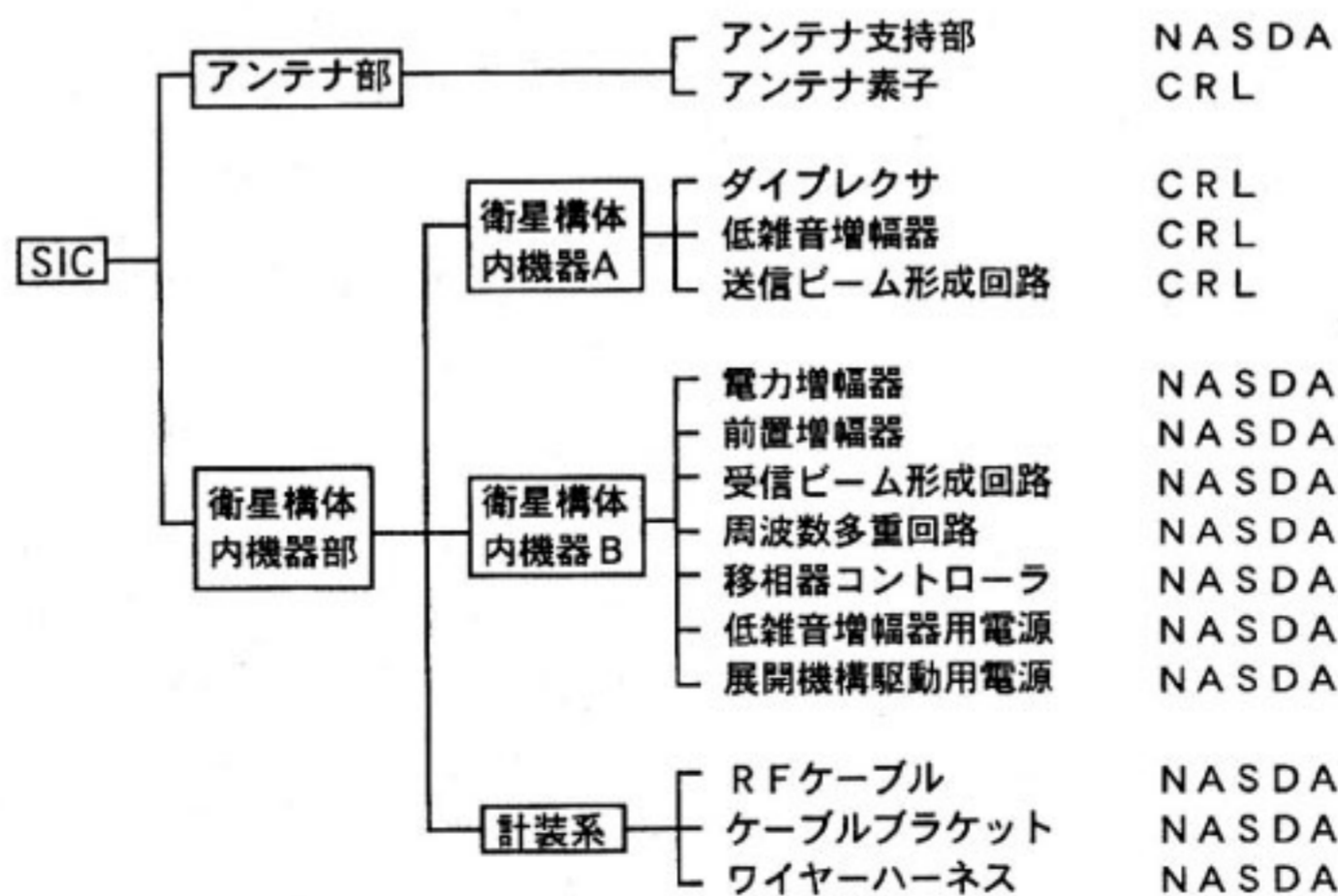
SIC は静止軌道に位置し、地表から高度 1000 km 以下のユーザ衛星と地上局の間のデータを中継することができる (第 3 図)。中継するデータはテレメトリ、コマンド及び数 10 kbit/s 以下の低速データである。SIC はユーザ衛星の負担軽減のためスポットビームにしてアンテナ利得を高めるとともに、マルチビームにして同時に複数のユーザ衛星との回線を構成できる。

リターンリンク (ユーザ衛星→SIC) は、テレメトリ、観測データなどデータ量、頻度とも多いため、2つの独立ビームで最大 2 個のユーザ衛星にアクセスする。フォワードリンク (SIC→ユーザ衛星) は、コマンド中継用でデータ量、頻度とも少ないため、シングルビームで複数のユーザに対して時分割使用する。

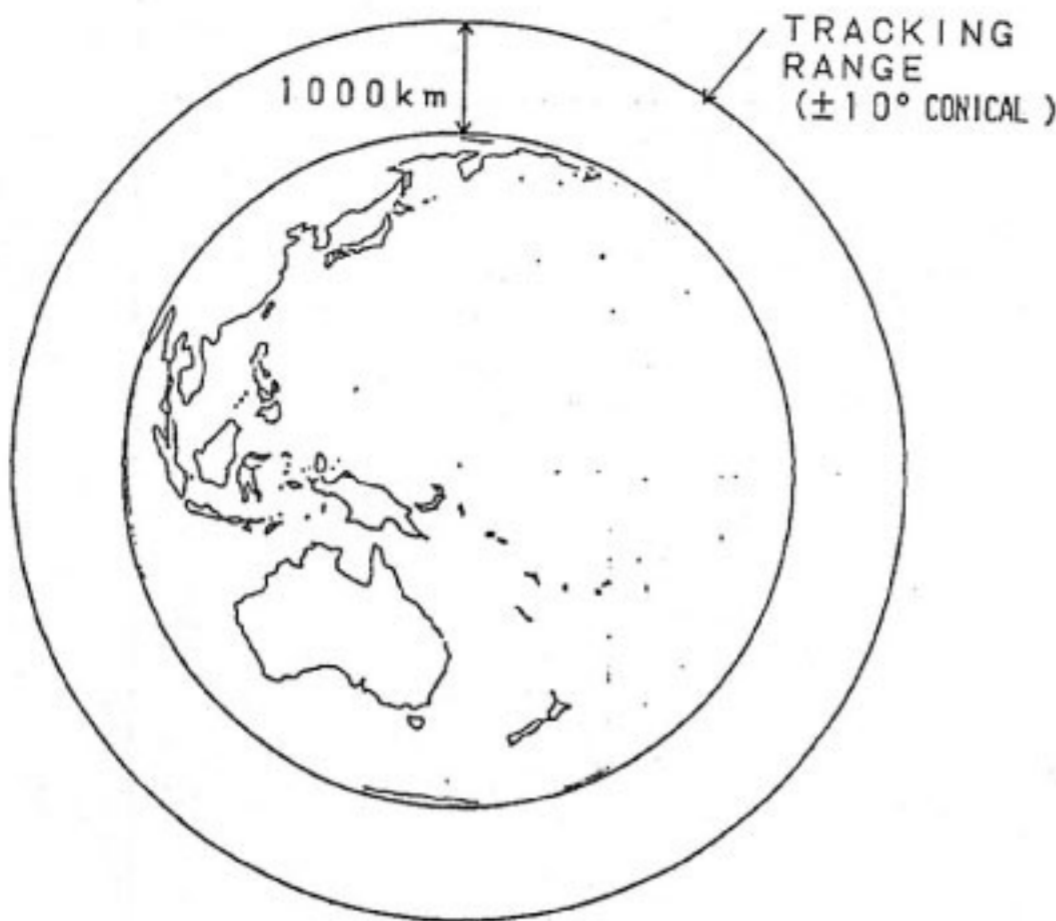
SIC はフィーダリンク機器 (FLCE) に接続され、30/20 GHz 帯のフィーダリンクで地上と結ばれる<sup>(4)</sup>。また、SIC 及び FLCE の各周波数変換には、FLCE 内で発生した周波数シンセサイザ信号 (フィーダリンク地球局の基準信号に位相同期している) を原振としたローカル信号を使用し、ユーザ衛星のレンジレートの測定を

<b>SICシステムの設計</b>	CRL NASDA NASDA
電気設計	CRL
熱設計、構造設計	NASDA
維持設計	NASDA
<b>開発モデルの製作及び試験</b>	NASDA CRL CRL
熱モデル、構造モデルの製作及び試験	NASDA
部分電気モデルの製作及び試験	CRL
アンテナ支持部ダミーの製作及び試験	CRL
<b>搭載コンポーネントの製作及び試験</b>	NASDA CRL CRL NASDA NASDA
アンテナ支持部の製作及び試験	NASDA
アンテナ素子の製作及び試験	CRL
衛星構体内機器Aの製作及び試験	CRL
衛星構体内機器Bの製作及び試験	NASDA
計装系の製作及び試験	NASDA
<b>SICの組立及び試験</b>	NASDA
<b>地上支援装置の製作及び試験</b>	CRL NASDA
電気的地上支援装置の製作及び試験	CRL
機械的地上支援装置の製作及び試験	NASDA
<b>ETS-VIとのインタフェース作業</b>	NASDA

第 1 図 開発分担



第 2 図 コンポーネントの開発分担



第3図 追尾範囲

第1表 SICの主要諸元

(25°C時の試験結果)

捕捉 追尾 性能	アンテナ方式	オンボードビーム形成 マルチビームフェーズドアレー
	ビーム数	1ビーム
	送信	2ビーム
	受信	
	追尾範囲	±10°以上
	追尾誤差	±1.1°以内
通信 性能	周波数	
	送信	2106.4 ± 3 MHz
	受信	2287.5 ± 2.5 MHz
	EIRP	(飽和出力時)
	FOV=10°方向	36.8 dBm
	FOVセンタ	38.6 dBm
	G/T	
	FOV=10°方向	-3.5 dB/K
	FOVセンタ	-1.4 dB/K
	中継利得	
	送信(線形出力)	(前置増幅器カレベルとEIRPとの差)
	FOV=10°方向	110.3 dB
	FOVセンタ	112.1 dB
	受信	(アンテナ入射電力とFDM出力との差)
	FOV=10°方向	受信1: 105.0 dB 受信2: 105.1 dB
FOVセンタ	受信1: 107.1 dB 受信2: 107.2 dB	
帯域内振幅偏差		
送信	0.2 dB	
受信1	0.4 dB	
受信2	0.7 dB	
3 dB帯域幅		
送信	19.6 MHz以下	
受信	19.9 MHz以下	
偏波	(偏波の定義はIEEE標準による。)	
送信	左旋円偏波	
受信	左旋円偏波	
軸比		
送信	1.6 dB	
受信1	1.6 dB	
受信2	1.8 dB	

可能にしている。SICの周波数、帯域、実効放射電力 (EIRP)、利得対雑音温度比 (G/T) 等の性能は、TDRSのSバンド多元接続システム (SMA)<sup>(5)</sup>との適合性を図っており、TDRSシステムとの相互運用の実験を可能としている。SICの主要諸元を第1表に示す。第4図に追尾範囲のエッジ方向である±10°方向にビームを向けたときの送信側の入出力特性を示す。この図で横軸は前置増幅器の入力レベル、縦軸はEIRPでありアレーアンテナ利得を含めたビーム合成後の出力を表している。受信側は線形動作である。第5図に正面方向と正面方向から10°方向にビーム指向させたときのアンテナ放射パターンの測定値を点線で示す。測定結果は計算値とほぼ一致している。計算に必要なアンテナ素子の素子パターンは理論式を用いている。第6図は追尾特性の一例で、対向アンテナを移動させ、これをSICでプログラム追尾したときの受信レベルの変化を示す。受信レベルの計算との差は0.3 dB以下であり、角度換算で追尾誤差±0.9°の追尾が行われている。

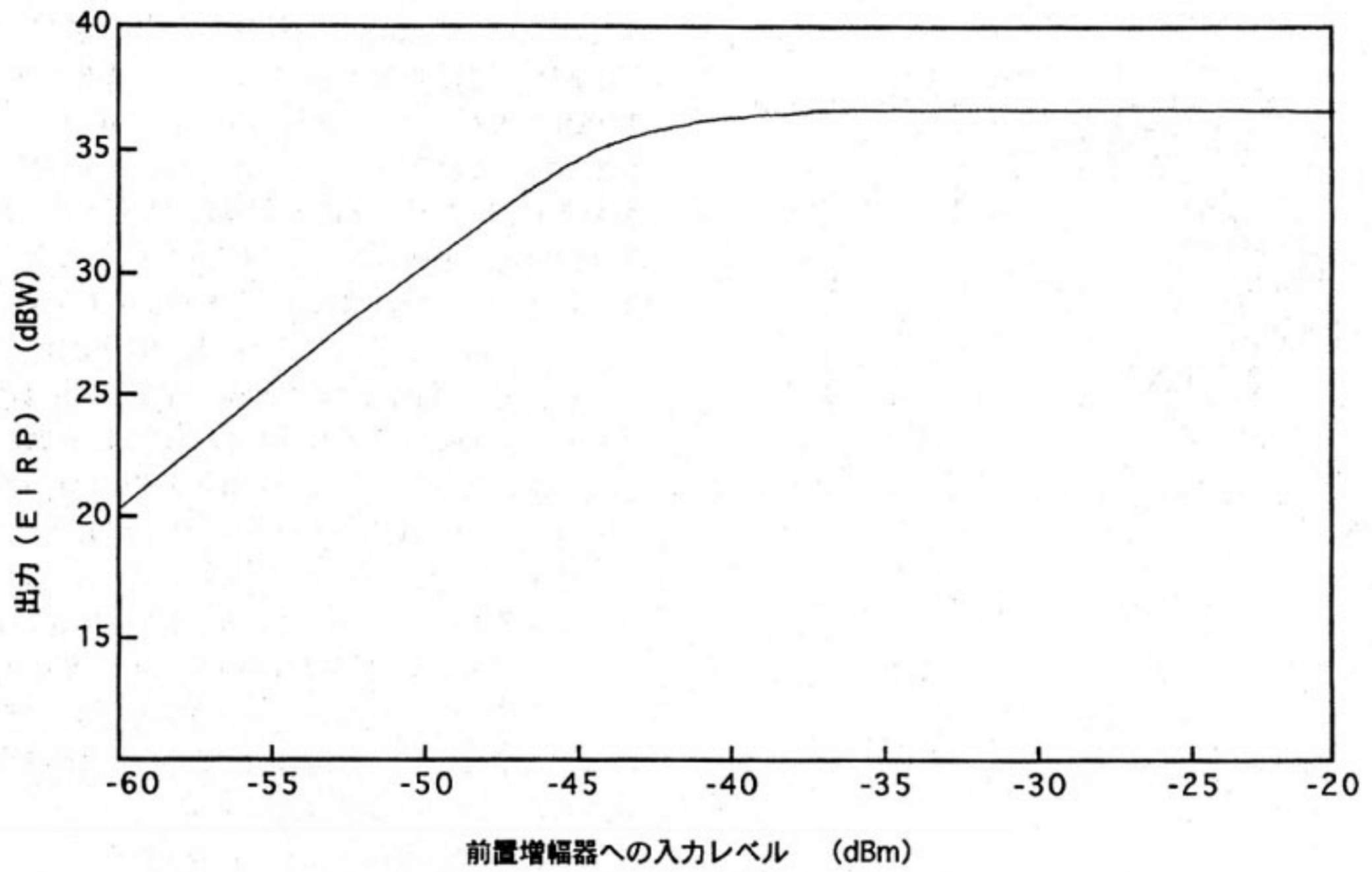
第2表に鹿島宇宙センターに設置するSバンド疑似衛星局、フィーダリンク局との回線設計例を示す。

#### 4. SICの構成

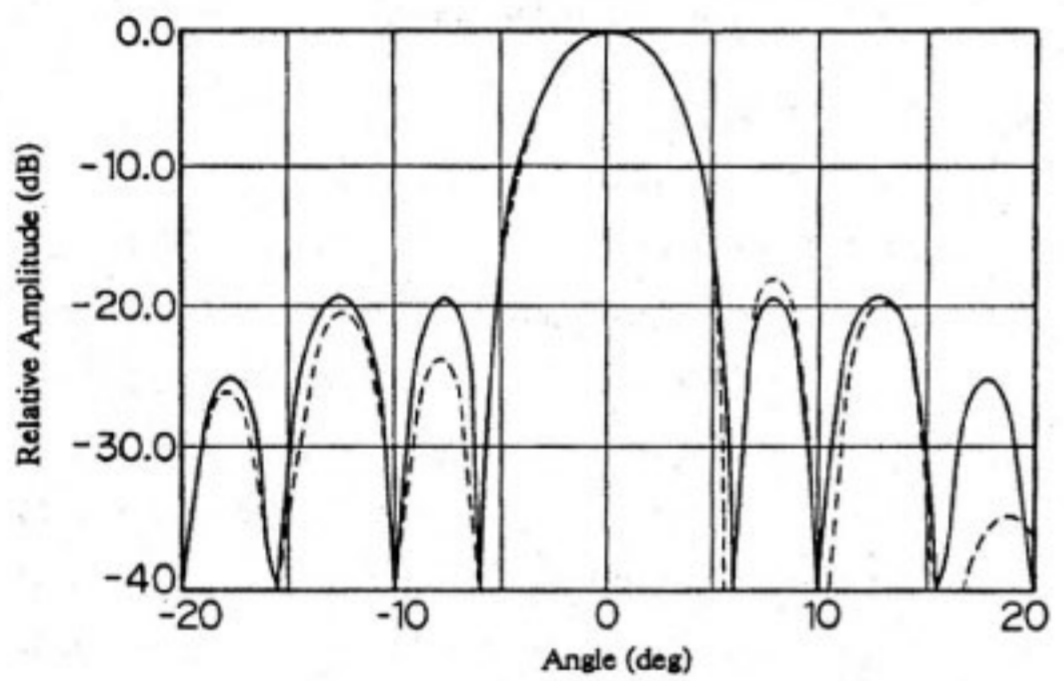
##### 4.1 ビーム形成方式

日本のデータ中継衛星システムでは対象となるユーザ衛星の数が比較的少ないことが予想される。このため、TDRSが採用している適応形地上処理フェーズドアレー (AGIPA) 方式<sup>(2)</sup>に比べて、ユーザ衛星が少ないシステムに適するオンボードビーム形成方式<sup>(6)</sup>をSICでは採用している。AGIPA方式とはアレーアンテナの各アンテナ素子で受信した信号をすべてフィーダリンクで地上に伝送し、地上で適応処理することによりビーム形成を行う方式である。この方式はユーザ衛星数に無関係にアンテナ素子数分の受信信号を個々に地上に伝送する必要があるため、対象とするユーザ衛星数がアンテナ素子数と同じくらいであれば有効であるが、ユーザ衛星数が少ない場合はフィーダリンク周波数の利用効率が低くなる。また、通信容量の増加を目的にアレーアンテナの利得を大きくしようとしてアンテナ素子数を多くすると、フィーダリンク周波数帯域幅の増加が必要となると同時に、フィーダリンク用送信機の電力増加も必要となり相互変調の問題が発生する。

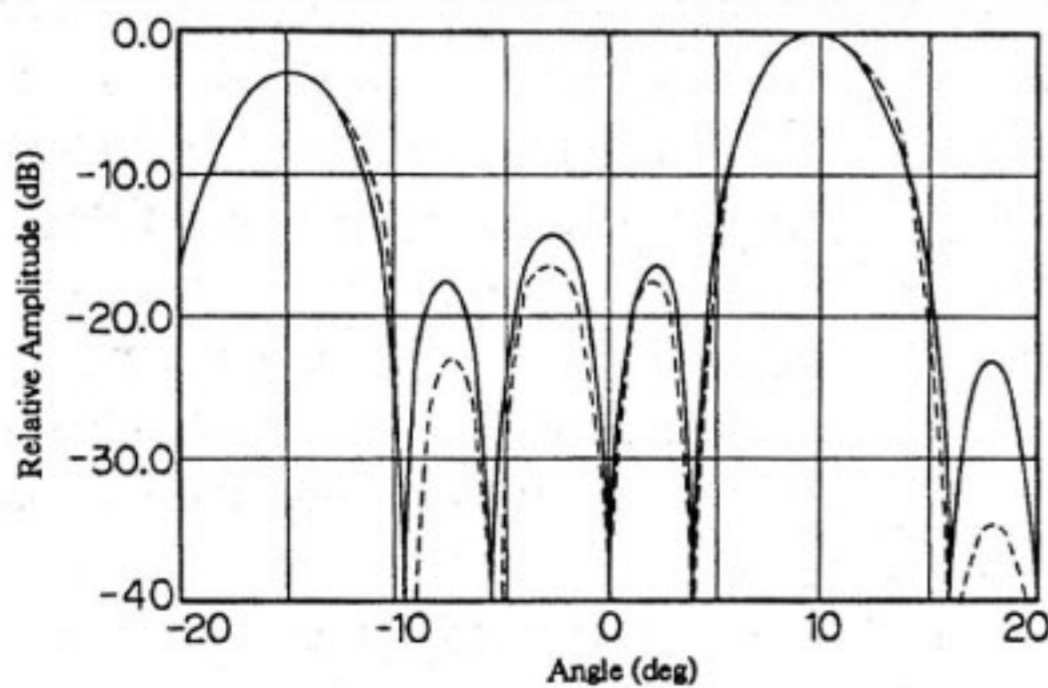
一方、マルチビームを衛星上で形成するオンボードビーム形成方式ではユーザ衛星数に対応する信号を送ればよく、フィーダリンクの周波数帯域および電力の有効利用が図れる。また、アレーアンテナのアンテナ素子数を増してもフィーダリンク周波数帯域幅を増す必要がない。



第4図 SIC 送信側の入出力特性 (25°C)

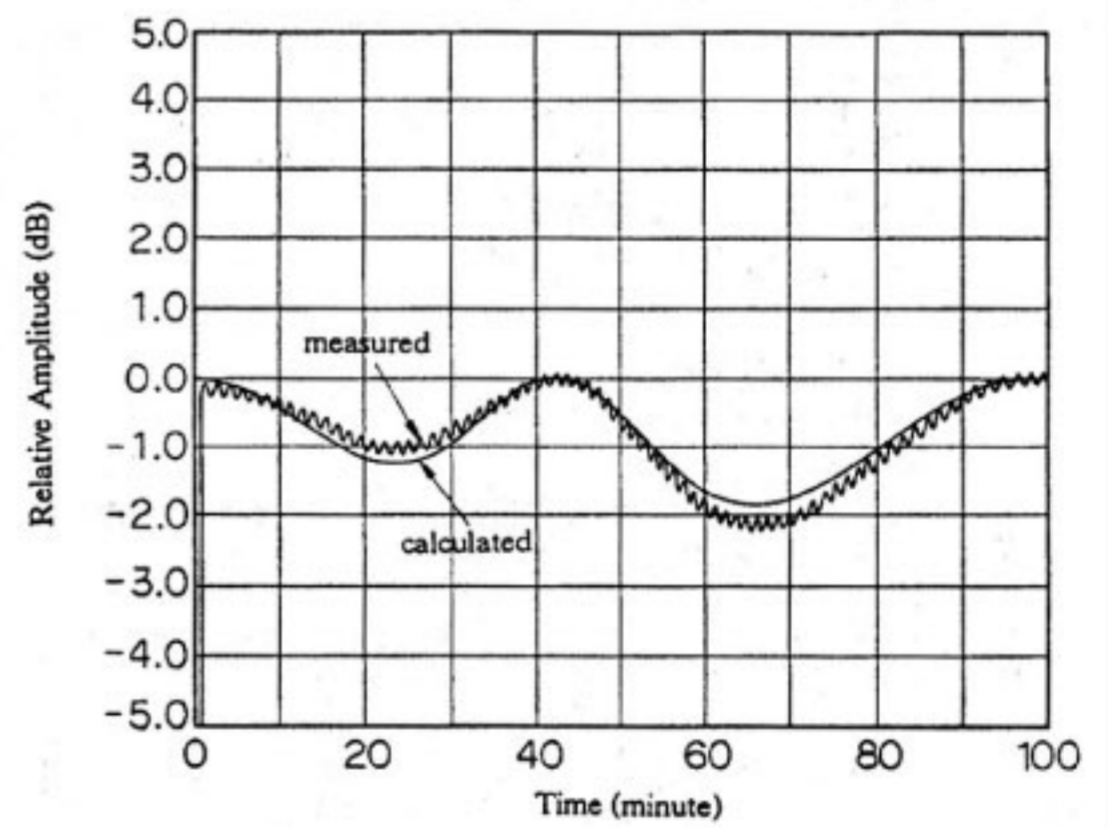


(a) Scan angle = 0°



(b) Scan angle = 10°

第5図 放射パターン  
(— : calculated, ---- : measured)



第6図 追尾特性

第2表 回線設計例

(1) フォワードリンク (送信出力: 飽和時)  
鹿島フィーダ局 → ETS-VI → 疑似衛星局

項目	単位	鹿島フィーダ局 → ETS-VI		ETS-VI → 疑似衛星局	
周波数	GHz	29.8984		2.1064	
送信機出力	dBW	14.1	(32.3W)	13.0	(飽和出力)
不整合損失	dB	—		-0.3	
給電損失等	dB	-6.4		-2.2	
アンテナ利得	dB <sub>i</sub>	61.7		26.9	
EIRP	dBW	69.4		37.4	
電力分配損	dB	—		—	
ポインティングロス	dB	-0.5		-0.5	
偏波損失	dB	-0.5		-0.5	
伝搬損失	dB	-213.4		-190.3	
大気損失	dB	-0.4		-0.0	
ポインティングロス	dB	-0.6		-0.5	
アンテナ入射電力	dBW	-146.0		-154.4	
アンテナ利得	dB <sub>i</sub>	48.7		30.5	
アンテナ雑音温度	K	300		142	
給電損失	dB	-1.0		-1.0	
不整合損失	dB	-0.3		—	
受信レベル	dBW	-98.6		-124.9	
雑音指数	dB	7.4 (1304 K)		1.0	
システム雑音温度	dB · K	32.0 (1601 K)		24.0	
[天空雑音増加分]	dB				
雑音電力密度	dBW/Hz	-196.6		-204.6	
G/T	dB/K	15.4		5.5	
C/N <sub>0</sub>	dB · Hz	98.0		79.7	

	BPSK(3Mbps)	QPSK(3Mbps)	FSK(3Mbps)
総合 C/No(dB · Hz)	79.6	79.6	79.6
所要 C/No(dB · Hz)	75.1	76.7	76.7
マージン (dB)	4.5	2.9	2.9

更に、ビーム指向制御を行う処理系を衛星上に搭載でき、地上局を簡易化できる。

4.2 構成

第7図に SIC の機能系統図を示す。第3表に搭載コンポーネントごとの重量、第4表に消費電力を示す。SIC はビーム形成回路 (BFN) と BFN 内の移相器を制御する移相器コントローラにより、衛星上でビーム形成とビーム指向制御を行う。移相器コントローラはマイクロプロセッサを内蔵し、ユーザ衛星の軌道計算を行い、これに基づいてビームをユーザ衛星に自動的に向けるよ

うに移相器を制御する。

SIC はアンテナ素子ごとに低雑音増幅器 (LNA)、電力増幅器 (HPA) を持つアクティブアレー方式を採用している。オンボードビーム形成におけるアクティブアレーは以下の利点を持つ。

- (1) BFN の挿入損失による G/T, EIRP の劣化がない。
- (2) 1 個の LNA または 1 個の HPA に故障があっても致命的な機能喪失にならず、高い信頼性が期待できる。

第2表 回線設計例

(2) フォワードリンク (送信出力: 線形時)  
鹿島フィーダ局 → ETS-VI → 疑似衛星局

項目	単位	鹿島フィーダ局 → ETS-VI		ETS-VI → 模擬衛星局	
周波数	GHz	29.8984		2.1064	
送信機出力	dBW		-20.1 (9.8mW)		-8.0
不整合損失	dB	鹿島 フィー ダ局	—	ETS- VI	-0.3
給電損失等	dB		-6.4		-2.2
アンテナ利得	dB <sub>i</sub>		61.7		26.9
EIRP	dBW		35.2		16.4
電力分配損	dB		—		—
ポインティングロス	dB		-0.5		-0.5
偏波損失	dB	伝搬 特性	-0.5	伝搬 特性	-0.5
伝搬損失	dB		-213.4		-190.3
大気損失	dB		-0.4		-0.0
ポインティングロス	dB	ETS- VI	-0.6	疑似 衛星 局	-0.5
アンテナ入射電力	dBW		-180.2		-175.4
アンテナ利得	dB <sub>i</sub>		48.7		30.5
アンテナ雑音温度	K		300		142
給電損失	dB		-1.0		-1.0
不整合損失	dB		-0.3		—
受信レベル	dBW		-132.8		-145.9
雑音指数	dB		7.4 (1304K)		1.0
システム雑音温度	dB · K		32.0 (1601K)		24.0
[天空雑音増加分]	dB				
雑音電力密度	dBW/Hz		-196.6		-204.6
G/T	dB/K		15.4		5.5
C/N <sub>0</sub>	dB · Hz	63.8		58.7	

	BPSK(100bps)	QPSK(100bps)	16QAM(100bps)	FSK(100bps)
総合 C/No(dB · Hz)	57.5	57.5	57.5	57.5
所要 C/No(dB · Hz)	30.3	31.9	33.5	31.9
マージン (dB)	27.2	25.6	24.0	25.6

(3) 送信 BFN は HPA の前段に配置されるため送信 BFN 内の移相器は低電力型でよく、小型・軽量化が図れる。

(4) 1 台当たりの HPA 出力電力が小さくても全体として EIRP を大きくできる。

一方、オンボードビーム形成方式では移相器が (アンテナ素子数) × (ビーム数) だけ必要になると共に移相器コントローラが複雑となる。また、アクティブアレー化により、HPA、LNA がアンテナ素子数だけ必要となるなど重量・サイズの点で問題がある。このため移相

器、HPA、LNA のマイクロ波 IC 化、移相器コントローラのハイブリット IC 化により小型・軽量化を図っている。

SIC は 19 個のアンテナ素子を持ち、そのうち 16 個を送信用、残りの 3 個を合わせた 19 個を受信用として使用する。これは、送信系については 16 素子で所要の EIRP を満足でき、3 素子分の HPA とダイプレクサの重量と消費電力を低減できるためである。各アンテナ素子で受信されたリターンリンク信号は、ダイプレクサ、LNA を介して受信 BFN に入る。受信 BFN では各

第2表 回線設計例

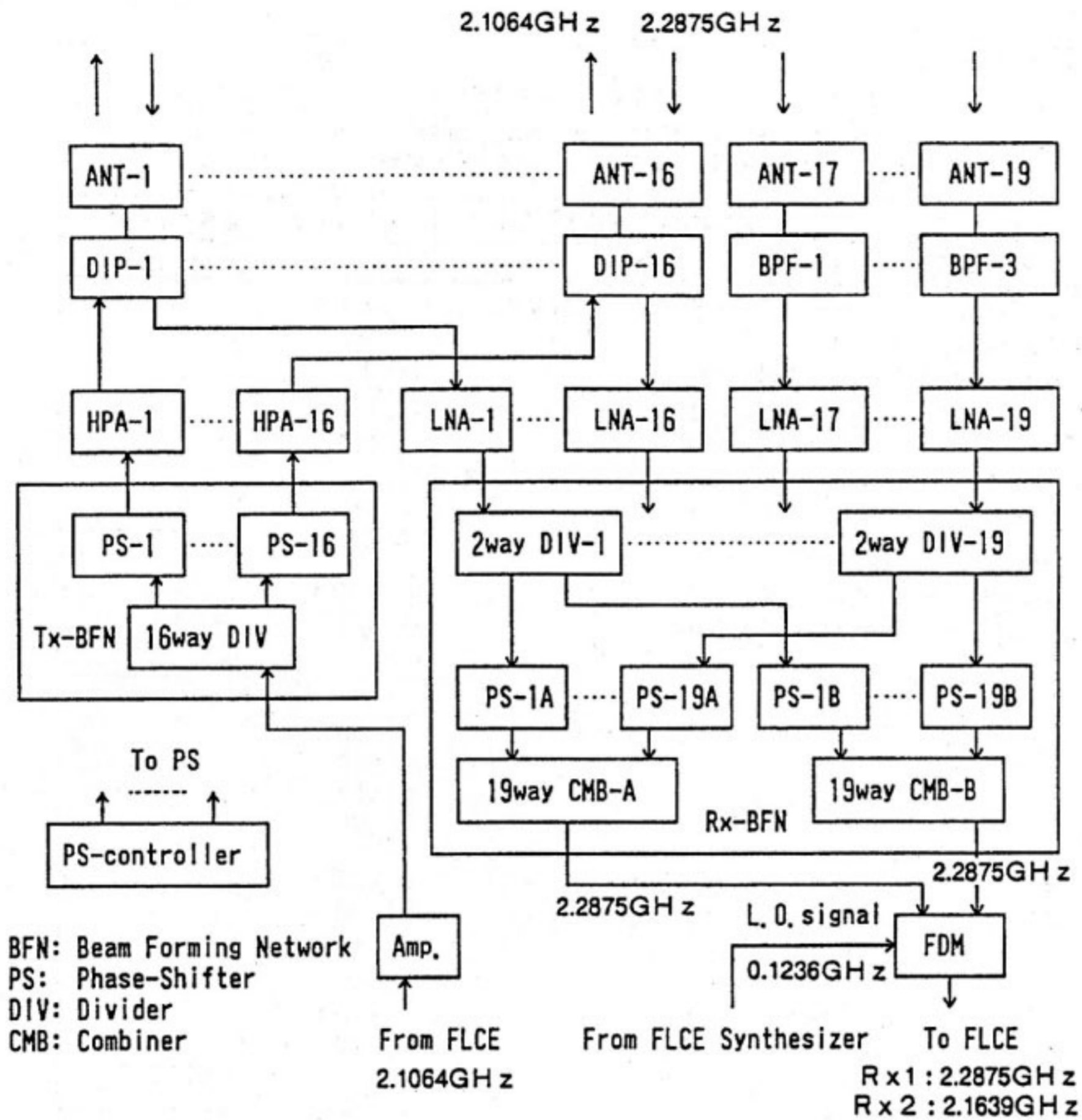
(3) リターンリンク (片チャンネル運用時)  
 疑似衛星局 → ETS-VI → 鹿島フィーダ局

項目	単位	疑似衛星局→ETS-VI		ETS-VI→鹿島フィーダ局	
周波数	GHz	2.2875		20.1219/20.2455	
送信機出力	dBW	16.0	(39.8W)	-5.1	
不整合損失	dB	—		-0.3	
給電損失等	dB	-2.0		-1.1	
アンテナ利得	dB <sub>i</sub>	31.2		49.0	
EIRP	dBW	45.2		42.5	
電力分配損	dB	—		—	
ポインティングロス	dB	-0.5		-0.6	
偏波損失	dB	-0.5		-0.5	
伝搬損失	dB	-191.4		-210.3	
大気損失	dB	0.0		-0.3	
ポインティングロス	dB	-0.5		-0.5	
アンテナ入射電力	dBW	-147.7		-169.7	
アンテナ利得	dB <sub>i</sub>	27.8		59.0	
アンテナ雑音温度	K	300		51.6	
給電損失	dB	-2.3		0.0	
不整合損失	dB	-0.3		—	
受信レベル	dBW	-122.5		-110.7	
雑音指数	dB	3.1		2.6	
システム雑音温度	dB·K	27.9		24.8	
「天空雑音増加分」	dB				
雑音電力密度	dBW/Hz	-200.7		-203.8	
G/T	dB/K	-2.7		34.2	
C/N0	dB·Hz	78.2		93.1	

	BPSK(3Mbps)	QPSK(3Mbps)	FSK(3Mbps)	16QAM(1Mbps)
総合C/No (dB·Hz)	78.1	78.1	78.1	78.1
所要C/No (dB·Hz)	75.1	76.7	76.7	73.5
マージン (dB)	3.0	1.4	1.4	4.6

入力信号は2分割された後、4ビットデジタル移相器により22.5°の整数倍の位相差が与えられ、19合成器で位相合成されて2つの独立した受信ビーム信号が形成される。この2つの受信信号は同じ周波数であり、周波数多重回路(FDM)で周波数多重される。一方、フォワードリンクでは、入力信号を前置増幅器で増幅して送信BFNに入力し、ビーム形成に必要な位相差をもつ16系統の信号に分配する。BFN出力は16系統のHPA、ダイプレクサを経由してアンテナ素子により放射される。SICは設計の初期段階ではアンテナの背面にLNA、

HPAなどの電子機器を配置する設計であったが、各電子機器の発熱や衛星で反射してアンテナ背面に入力する太陽光による熱に対する問題があることが明らかになり、ダイプレクサ以降の電子機器を衛星の構体内に収納する必要が生じた。このためアンテナ素子とダイプレクサ間は長さ約4mのRF同軸ケーブルで接続している。また、SICアンテナ部は打ち上げ時は火工品ボルトによりETS-VIアンテナタワーに固定され、静止軌道上で展開する必要がある。アンテナ展開はパルスモータ駆動による展開方式<sup>(7)</sup>を採用している。これはヒンジ



第7図 SIC 機能系統図

第3表 搭載コンポーネントの重量

コンポーネント	重量 (g)	備考
アンテナ部		
アンテナ素子	3780	19素子分。
アンテナ支持部	25883	展開機構、保持解放機構を含む。
衛星構体内機器部		
ダイプレクサ	3799	19系統分。
電力増幅器	7168	16系統分。4系統ずつを1つのきょう体に収納。電源込み。
前置増幅器	1315	
低雑音増幅器	2359	19系統分。10系統と9系統に分けてきょう体に収納。
低雑音増幅器用電源	737	
送信ビーム形成回路	1507	
受信ビーム形成回路	2890	
移相器コントローラ	5485	
周波数多重回路	2056	
展開機構駆動用電源	1213	
RFケーブル	3091	
ケーブルブラケット	454	
ワイヤーハーネス	1865	
合計	63602	



第4表 消費電力

コンポーネント	消費電力 (W)
電力増幅器	133.7
前置増幅器	1.9
低雑音増幅器	8.3
周波数多重回路	3.8
移相器コントローラ	36.7
合計	184.5

部を通過する19本の同軸ケーブルの抵抗トルクが大きく、これに打ち勝つだけの十分なトルクを得るためである。

## 4.3 テレメトリ, コマンド

SICの各機器の動作状態をモニタし、また種々の制御を行うためのテレメトリ, コマンドの項目と内容の簡単な説明を第5表, 第6表に示す。テレメトリは各HPAの送信出力レベル, 受信ビームレベル, 各機器の

第5表 テレメトリリスト (1/2)

番号	名称	略称	内容
H1001	展開機構温度1	S DEP TEMP 1	アンテナ展開駆動部の温度
H1002	展開機構温度2	S DEP TEMP 2	アンテナ展開駆動部の温度
H1003	ケーブル温度1	S CBL TEMP 1	展開用モータの温度
H1004	ケーブル温度2	S CBL TEMP 2	火工品の温度
H1005	アンテナパネル温度1	S ANT PNL TEMP 1	火工品の温度
H1006	アンテナパネル温度2	S ANT PNL TEMP 2	展開用フレキシブルケーブルの温度
H1007	アンテナパネル温度3	S ANT PNL TEMP 3	アレー中心のアンテナ素子の温度
H4001	送信出力レベル 1	S HPA LEVEL 1	HPAモジュール 1の出力レベル
H4002	送信出力レベル 2	S HPA LEVEL 2	HPAモジュール 2の出力レベル
H4003	送信出力レベル 3	S HPA LEVEL 3	HPAモジュール 3の出力レベル
H4004	送信出力レベル 4	S HPA LEVEL 4	HPAモジュール 4の出力レベル
H4005	送信出力レベル 5	S HPA LEVEL 5	HPAモジュール 5の出力レベル
H4006	送信出力レベル 6	S HPA LEVEL 6	HPAモジュール 6の出力レベル
H4007	送信出力レベル 7	S HPA LEVEL 7	HPAモジュール 7の出力レベル
H4008	送信出力レベル 8	S HPA LEVEL 8	HPAモジュール 8の出力レベル
H4009	送信出力レベル 9	S HPA LEVEL 9	HPAモジュール 9の出力レベル
H4010	送信出力レベル 10	S HPA LEVEL 10	HPAモジュール 10の出力レベル
H4011	送信出力レベル 11	S HPA LEVEL 11	HPAモジュール 11の出力レベル
H4012	送信出力レベル 12	S HPA LEVEL 12	HPAモジュール 12の出力レベル
H4013	送信出力レベル 13	S HPA LEVEL 13	HPAモジュール 13の出力レベル
H4014	送信出力レベル 14	S HPA LEVEL 14	HPAモジュール 14の出力レベル
H4015	送信出力レベル 15	S HPA LEVEL 15	HPAモジュール 15の出力レベル
H4016	送信出力レベル 16	S HPA LEVEL 16	HPAモジュール 16の出力レベル
H4020	受信ビーム1受信レベル	S RX BEAM1 LEVEL	FDMにおける受信ビーム-1の受信レベル
H4021	受信ビーム2受信レベル	S RX BEAM2 LEVEL	FDMにおける受信ビーム-2の受信レベル
H5001	HPA 1 ON/OFF状態	S HPA1 STATUS	HPA電源1のON/OFF状態
H5002	HPA 2 ON/OFF状態	S HPA2 STATUS	HPA電源2のON/OFF状態
H5003	HPA 3 ON/OFF状態	S HPA3 STATUS	HPA電源3のON/OFF状態
H5004	HPA 4 ON/OFF状態	S HPA4 STATUS	HPA電源4のON/OFF状態
H5006	モータ ON/OFF状態	S MOTOR STATUS	展開用モータのON/OFF状態
H5007	モータ CW/CCW状態	S MOTOR CW/CCW	展開用モータの回転方向の状態
H5008	展開リミット状態	S DEP LIMIT STS	展開リミットの状態。 展開完了後はONとなる。
H5009	FDM 電源A ON/OFF状態	S FDM A STATUS	FDM電源AのON/OFF状態
H5022	FDM 電源B ON/OFF状態	S FDM B STATUS	FDM電源BのON/OFF状態
H5011	CPU ON/OFF状態	S CPU STATUS	PS-CONTのCPUのON/OFF状態
H5012	送信機A ON/OFF状態	S TX A STATUS	前置増幅器AのON/OFF状態
H5023	送信機B ON/OFF状態	S TX B STATUS	前置増幅器BのON/OFF状態
H5013	LNA 電源A ON/OFF状態	S LNA PWR A STS	LNA用電源AのON/OFF状態
H5014	LNA 電源B ON/OFF状態	S LNA PWR B STS	LNA用電源BのON/OFF状態
H5010	PS-CONT 電源A ON/OFF状態	S PS CONT A STS	PS-CONT電源AのON/OFF状態
H5021	PS-CONT 電源B ON/OFF状態	S PS CONT B STS	PS-CONT電源BのON/OFF状態

第5表 テレメトリリスト (2/2)

番号	名称	略称	内容
H5016	展開機構駆動用電源 ON/OFF状態	S DM POWER STS	展開機構駆動用電源のON/OFF状態
H5017	展開機構ヒータ1 ON/OFF状態	S DEP HTR 1 STS	アンテナ展開駆動部のヒータ1のON/OFF状態
H5018	展開機構ヒータ2 ON/OFF状態	S DEP HTR 2 STS	アンテナ展開駆動部のヒータ2のON/OFF状態
H5019	アンテナヒータ1 ON/OFF状態	S ANT HTR 1 STS	火工品のヒータ1のON/OFF状態
H5020	アンテナヒータ2 ON/OFF状態	S ANT HTR 2 STS	火工品のヒータ2のON/OFF状態
H6001	受信1ビームポインティング	RX BEAM 1 POINT	各時刻における受信ビーム1の指向方向を北方向余弦と東方向余弦で示す。
H6001	受信2ビームポインティング	RX BEAM 2 POINT	各時刻における受信ビーム2の指向方向を北方向余弦と東方向余弦で示す。
H6001	送信ビームポインティング	TX BEAM POINT	各時刻における送信ビームの指向方向を北方向余弦と東方向余弦で示す。
H6001	CPUメモリダンプ	CPU MEMORY DUMP	メモリに記憶されたSIC MCDMIコマンドデータの内容。プログラム追尾モードテレメトリ、オンボード軌道計算追尾モードテレメトリ、移相器誤差補正値テレメトリを扱う。
H6001	CPUモード/エラー状態	CPU ERROR STATUS	CPUモードのエラー状態
H1008	HPA1 温度	S HPA1 TEMP	HPA1の温度
H1009	HPA2 温度	S HPA2 TEMP	HPA2の温度
H1010	HPA3 温度	S HPA3 TEMP	HPA3の温度
H1011	HPA4 温度	S HPA4 TEMP	HPA4の温度
H1013	PS-CONT 温度	S PS-CONT TEMP	PS-CONTの温度
H1012	FDM 温度	S FDM TEMP	FDMの温度
H1014	DM-PWR 温度	S DM PWR TEMP	展開機構駆動用電源の温度

ON/OFF 状態、発熱機器の温度等のモニタや送信ビーム・受信ビームの指向方向情報の通知に使用される。コマンドは各機器電源の ON/OFF 制御、ヒータの ON/OFF 制御、送信ビーム・受信ビームの指向方向制御に使用される。

### 5. アンテナ解析

#### 5.1 アンテナ素子配列

第8図に SIC アンテナ部の外観、第9図にアンテナ素子配列と座標系を示す。Z方向は地球方向である。SIC アンテナ部の形式は、円形開口のマイクロストリップサブアレーをアンテナ素子として19個用いた三角配列のアレーアンテナである。円形開口のアンテナ素子の場合、三角配列にすることによりアンテナ素子を密に並べることができるため、アンテナ開口の面積有効利用を図っている。第9図において、送信に用いない素子は、アレーの中心から最も遠い No. 3, 8, 19の3素子である。これは六角形の頂点以外の素子を間引くと、隣接素子間隔が基本間隔の倍になる部分が生ずることからグレーテングローブに相当する利得変動が第3図に示した視野の内側や近傍に現れること、及び間引き後のアレー利得パターンの対称性を考慮したことによる。

#### 5.2 視野内最低利得

SIC の追尾範囲である±10°の視野 (FOV : Field of View) 内でのビームピーク方向の利得の最低値 (視野内最低利得とよぶ) を最大とするアンテナ素子径について示す。

一般に、平面アレーを構成するアンテナ素子数がN個で、アンテナ素子間隔が1波長より大きく相互結合が無視できる場合、第4図の座標系での(θ, φ)方向のアレーの利得は、近似的に

$$G = N g_e(\theta, \phi) |A(\theta, \phi)|^2 \quad \dots\dots(1)$$

となる。ここで、 $g_e(\theta, \phi)$  はアンテナ素子利得である。 $A(\theta, \phi)$  はアレーファクタであり、次式で表される。

$$A(\theta, \phi) = (1/N) \sum_{i=1}^N \exp[-j[(2\pi/\lambda)n(\theta, \phi) \cdot r_i - \Psi_i]] \quad \dots\dots(2)$$

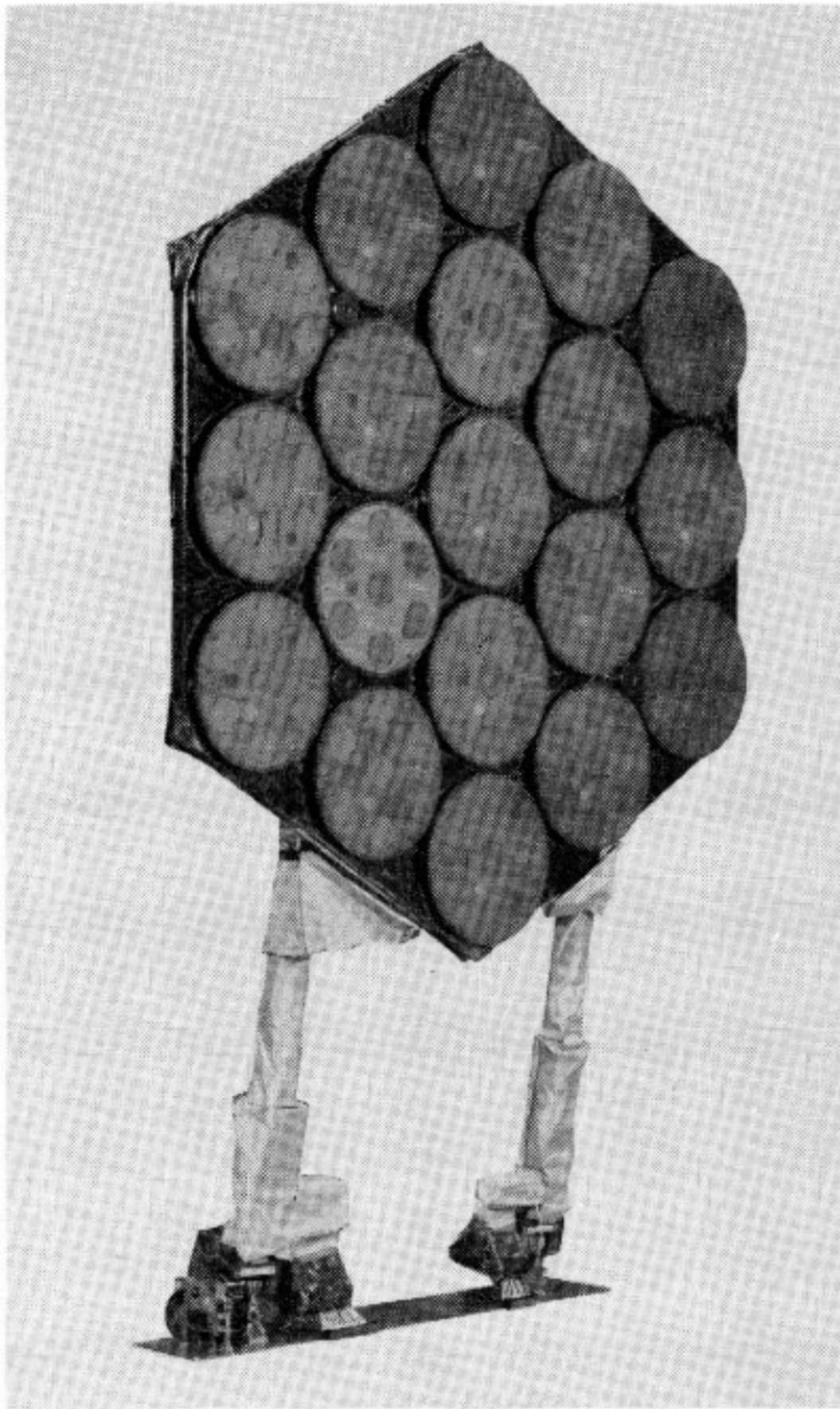
$$\Psi_i = (2\pi/\lambda)n(\theta_0, \phi_0) \cdot r_i \quad \dots\dots(3)$$

$n(\theta, \phi)$  は、(θ, φ) 方向の単位ベクトル、 $r_i$  は素子位置を示す位置ベクトルである。また、 $\Psi_i$  は、(θ<sub>0</sub>, φ<sub>0</sub>) 方向に対して |A|<sup>2</sup> が最大 (=1) となるように素子 i に与える位相である。

一般にアレー利得 G が最大となる方向は、素子の利得パターンの影響によって必ずしも |A|<sup>2</sup> が最大となる方向 (θ<sub>0</sub>, φ<sub>0</sub>) と一致するわけではないが、本アレーア

第6表 コマンドリスト

番号	名称	略称	内容
H001	LNA電源 A ON	S LNA PWR A ON	LNA用電源AのON
H002	LNA電源 A OFF	S LNA PWR A OFF	LNA用電源AのOFF
H003	LNA電源 B ON	S LNA PWR B ON	LNA用電源BのON
H004	LNA電源 B OFF	S LNA PWR B OFF	LNA用電源BのOFF
H005	HPA1 ON	S HPA 1 ON	HPA電源1のON
H006	HPA1 OFF	S HPA 1 OFF	HPA電源1のOFF
H007	HPA2 ON	S HPA 2 ON	HPA電源2のON
H008	HPA2 OFF	S HPA 2 OFF	HPA電源2のOFF
H009	HPA3 ON	S HPA 3 ON	HPA電源3のON
H010	HPA3 OFF	S HPA 3 OFF	HPA電源3のOFF
H011	HPA4 ON	S HPA 4 ON	HPA電源4のON
H012	HPA4 OFF	S HPA 4 OFF	HPA電源4のOFF
H013	FDM電源 A ON	S FDM A ON	FDM電源AのON
H014	FDM電源 A OFF	S FDM A OFF	FDM電源AのOFF
H037	FDM電源 B ON	S FDM B ON	FDM電源BのON
H038	FDM電源 B OFF	S FDM B OFF	FDM電源BのOFF
H017	PS-CONT 電源 A ON	S PS-CONT A ON	PS-CONT電源AのON
H018	PS-CONT 電源 A OFF	S PS-CONT A OFF	PS-CONT電源AのOFF
H039	PS-CONT 電源 B ON	S PS-CONT B ON	PS-CONT電源BのON
H040	PS-CONT 電源 B OFF	S PS-CONT B OFF	PS-CONT電源BのOFF
H019	展開機構駆動用電源 ON	S DM PWR ON	展開機構駆動用電源のON
H020	展開機構駆動用電源 OFF	S DM PWR OFF	展開機構駆動用電源のOFF
H021	モータON	S MOTOR ON	展開用モータのON
H022	モータOFF	S MOTOR OFF	展開用モータのOFF
H023	モータCW	S MOTOR CW	展開用モータの回転方向を順方向に設定
H024	モータCCW	S MOTOR CCW	展開用モータの回転方向を逆方向に設定
H025	展開機構ヒータ 1 ON	S DM HTR 1 ON	アンテナ展開駆動部用ヒータ1のON
H026	展開機構ヒータ 1 OFF	S DM HTR 1 OFF	アンテナ展開駆動部用ヒータ1のOFF
H027	展開機構ヒータ 2 ON	S DM HTR 2 ON	アンテナ展開駆動部用ヒータ2のON
H028	展開機構ヒータ 2 OFF	S DM HTR 2 OFF	アンテナ展開駆動部用ヒータ2のOFF
H029	アンテナヒータ 1 ON	S ANT HTR 1 ON	アンテナ部の火工品用ヒータ1のON
H030	アンテナヒータ 1 OFF	S ANT HTR 1 OFF	アンテナ部の火工品用ヒータ1のOFF
H031	アンテナヒータ 2 ON	S ANT HTR 2 ON	アンテナ部の火工品用ヒータ2のON
H032	アンテナヒータ 2 OFF	S ANT HTR 2 OFF	アンテナ部の火工品用ヒータ2のOFF
H033	CPU ON	S CPU ON	PS-CONTのCPUをONしてCPUモードにする
H034	CPU OFF	S CPU OFF	PS-CONTのCPUをOFFしてダイレクトモードにする
H035	送信機 A ON	S TX A ON	前置増幅器AのON
H036	送信機 A OFF	S TX A OFF	前置増幅器AのOFF
H041	送信機 B ON	S TX B ON	前置増幅器BのON
H042	送信機 B OFF	S TX B OFF	前置増幅器BのOFF
H501	SIC MAG CMD 1	SIC MCMD 1	CPUモード時のビーム指向制御の設定 リアルタイムモードコマンド、 プログラム追尾モードコマンド、 オンボード軌道計算追尾モード、 スレーブモードコマンド、 強制終了コマンド、 移相器誤差補正值記入コマンド、 プログラム追尾データ訂正コマンドを扱う。
H502	SIC MAG CMD 2	SIC MCMD 2	ダイレクトモード時の移相器設定

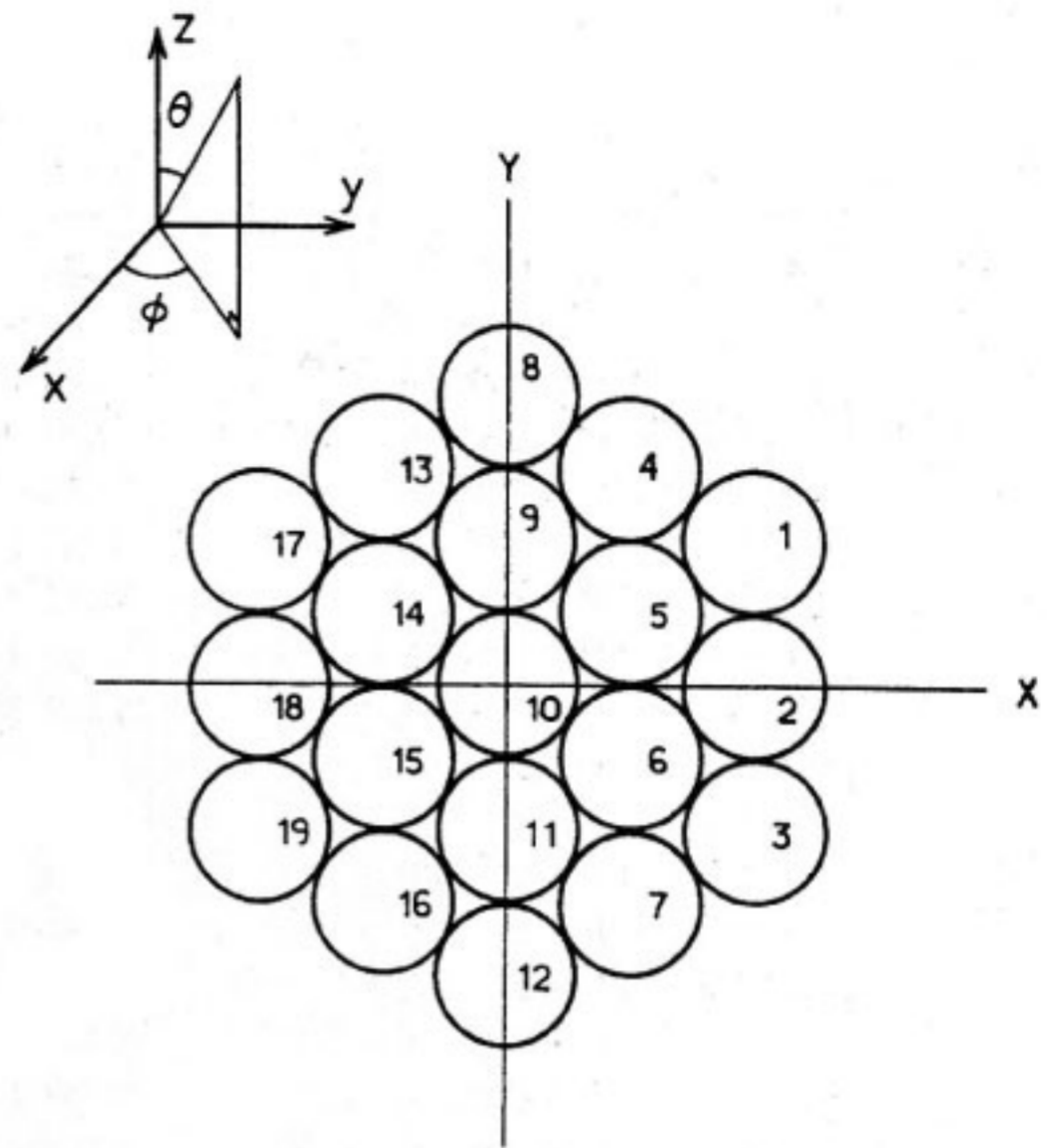


第8図 SIC 搭載モデル

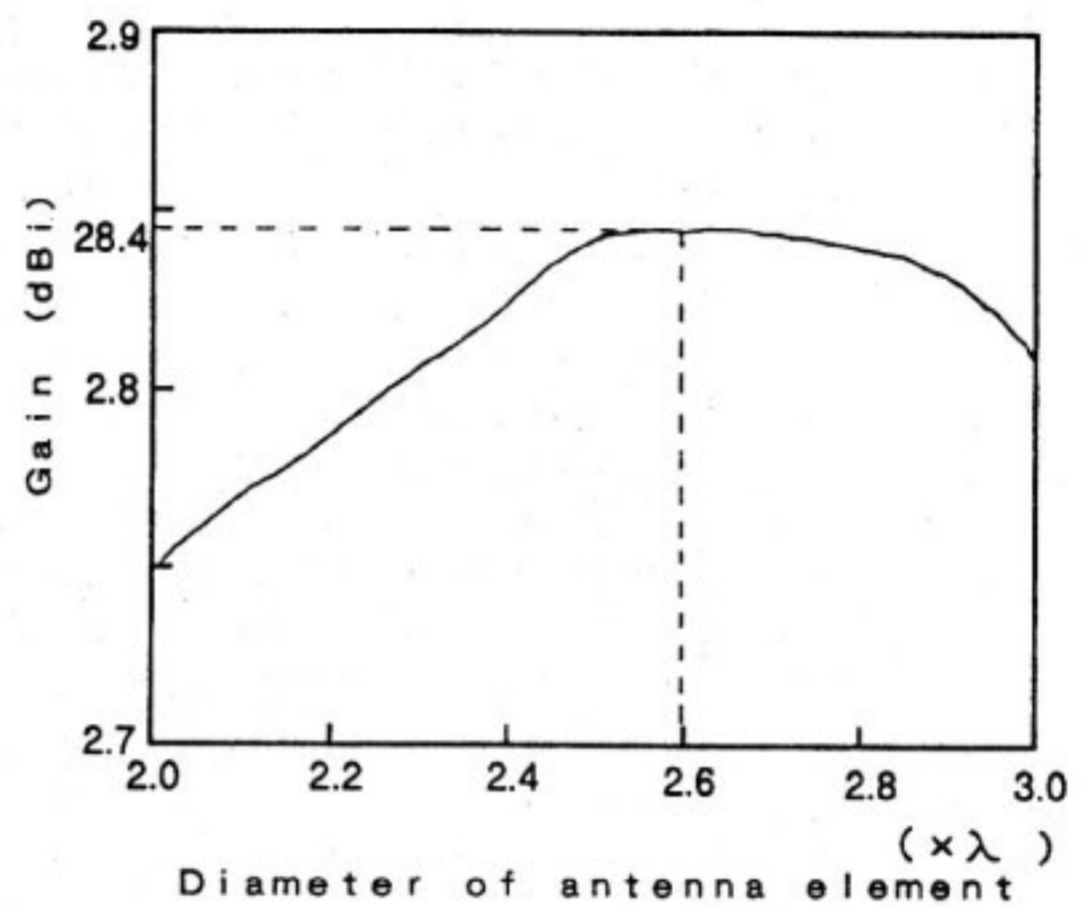
アンテナの場合、第3図に示した視野（追尾範囲）の内側では両者は一致するとしてさしつかえない。これは素子利得パターンがほぼ軸対称であり、その半値幅が30°程度とアレーファクタによる利得パターン（半値幅約6°）に比較してかなりブロードであること、また、第5図に示すようにグレーティングローブが第3図の視野内に生じないことによる。従って、 $\theta_0$  方向に向けたビームのピーク利得は

$$G = N g_e(\theta) \quad \dots\dots(4)$$

となり、 $\theta_0$  方向に対するアンテナ素子利得  $g_e(\theta_0)$  に比例する。主ビーム付近がガウスビームで近似される一般的なアンテナ素子を使用している場合、フェーズドアレーの利得はビーム走査角が大きくなるほど低下するため、視野内最低利得は FOV のエッジ方向の利得となる。アンテナ素子利得  $g_e$  はアンテナ素子径の関数であり、アンテナ素子径を大きくすれば正面利得は上昇するが、その反面 FOV のエッジ方向の利得が低下する。その



第9図 アンテナ素子配列

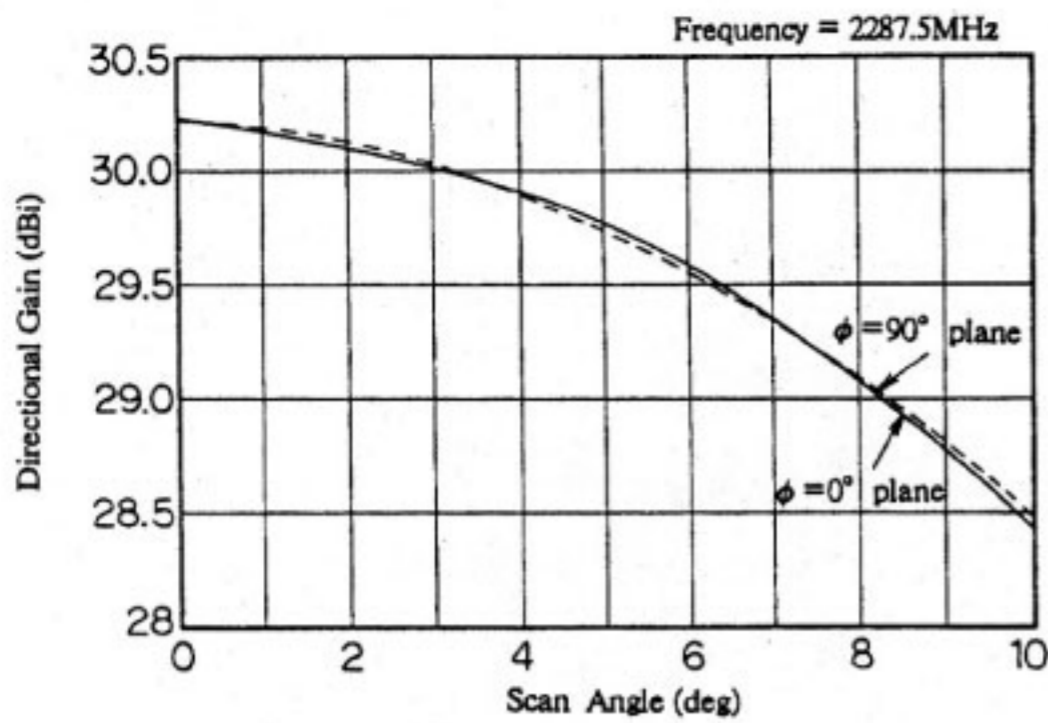


第10図 視野内最低利得

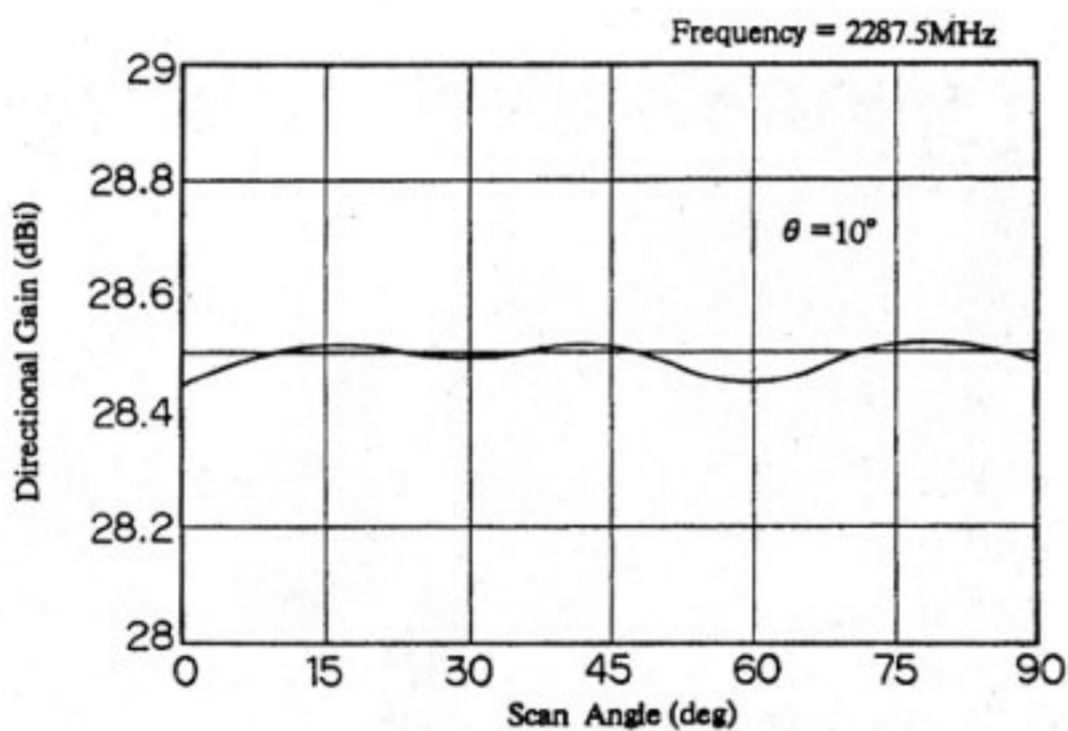
ため、視野内最低利得を最大とする最適な素子径が存在する。第10図に SIC におけるアンテナ素子径と視野内最低利得の関係を示す。図に示すようにアンテナ素子径が  $2.6\lambda$  の時最大となる。SIC では受信系の利得を優先するため、アンテナ素子径は  $341\text{ mm}$  となる。

5.3 アンテナ放射パターン

第9図に示す座標系においてビーム走査角を  $0^\circ$  および FOV のエッジ方向となる  $10^\circ$  とした場合の X-Z 面内の放射パターンの計算値を第5図の実線で示す。なお、



(a) Scan angle :  $\theta$



(b) Scan angle :  $\phi$

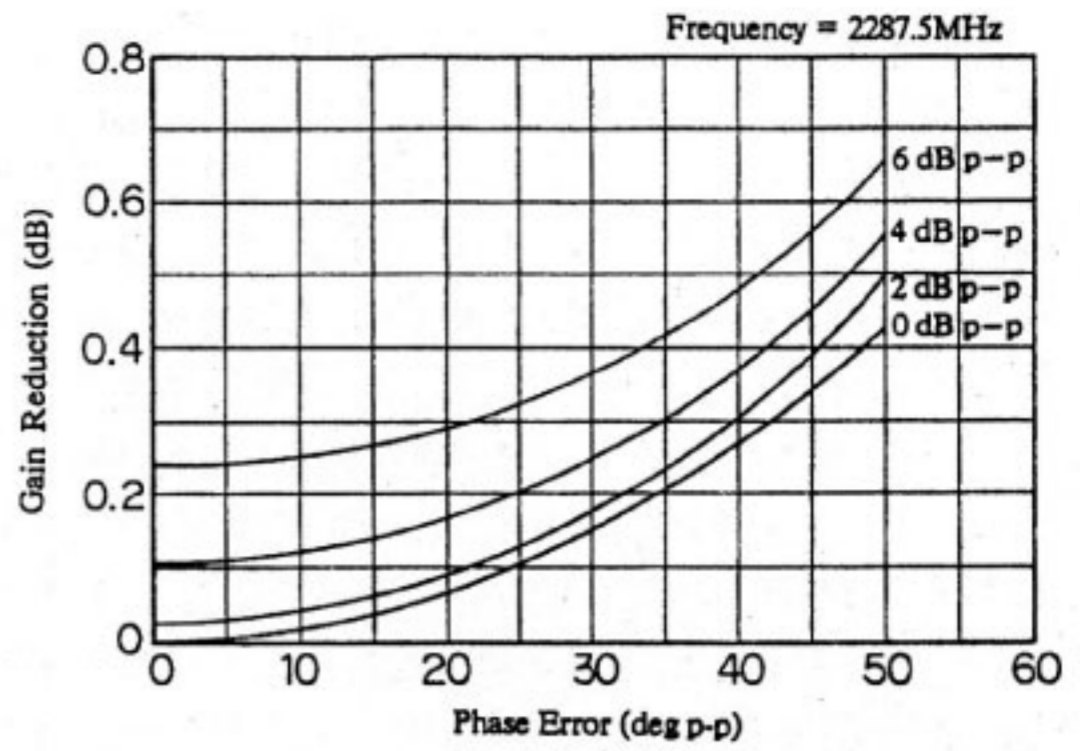
第11図 走査角による利得変動

これらのパターンにおいて、振幅分布は均一、ビーム走査用の位相は4ビット(22.5°ステップ)で量子化して与えた。レベルは、ビーム走査角0°にした時の最大値で正規化して表示している。

一方、ビーム走査角 $\theta$ 及び $\phi$ に対する指向性利得の計算値を第11図に示す。走査角 $\theta$ が増すにつれ、利得低下が生じ、FOVのエッジで1.8 dB低下している。また $\theta=10^\circ$ 方向での走査角 $\phi$ の場合は、アンテナ素子を三角配列したことによる利得変動(リップル)がある。

5.4 振幅・位相誤差による利得低下

SICは、電子機器を衛星構体内に納めておりアンテナ素子と電子機器を接続するケーブルは宇宙環境にさらされる。そのためケーブルの熱変形及び各コンポーネントの製造誤差や温度変動に起因する位相誤差や振幅誤差による利得低下が生じるので、その影響について検討し



第12図 振幅・位相誤差による利得低下

第7表 受信19系統間振幅・位相誤差

	振幅偏差(dB)		位相偏差(dB)	
	固定分	変動分	固定分	変動分
アンテナ素子	±0.5	±0.2	±10	±0.5
ケーブル1(アンテナ-DIP間)	±0.4	±0.2	±11.4	±2
ダイレクタ(DIP)	±0.1	—	±2	—
ケーブル2(DIP-LNA間)	±0.1	—	±8	—
LNA	±0.5	±0.5	±10	±5
ケーブル3(LNA-BFN間)	±0.1	—	±8	—
BFN	±0.5	±0.5	±15	±2.5
移相器量子化誤差	—	—	±11.25	—
移相器設定誤差	—	—	±7	—
二乗平方根	±0.97	±0.76	±13.25	±5.96
目標値(温度範囲内)	±2.0(4dB p-p)		±20(40deg p-p)	
測定結果				
受信ビーム1	1.4dB p-p		27.2° deg p-p	
受信ビーム2	1.5dB p-p		26.1° deg p-p	

た。計算方法は、まず、振幅・位相誤差のピーク・ピーク値(p-p値)を仮定して、この中で各アンテナ素子の給電振幅・位相に一樣ランダムな誤差を発生させたときの指向性利得の放射パターンを積分することにより求め、誤差なしの場合に対する利得低下量を算出した。最大利得低下量は、以下の式により求めた。

$$\text{最大利得低下量} = P - 3\sigma(P) \quad \dots\dots(5)$$

$P$  : 平均利得低下量

$\sigma(P)$  : 利得低下量の標準偏差

ビーム走査方向は、 $\theta=10^\circ$ 、 $\phi=90^\circ$ 、周波数は2287.5 MHz(受信)、試行回数は20回である。また、移相器の量子化誤差は位相誤差の中にも含めるものとし、誤差なしの利得は、量子化なしとして計算した。振幅誤差をパラメータとしたときの、位相誤差に対する最大利得低下量を第12図に示す。

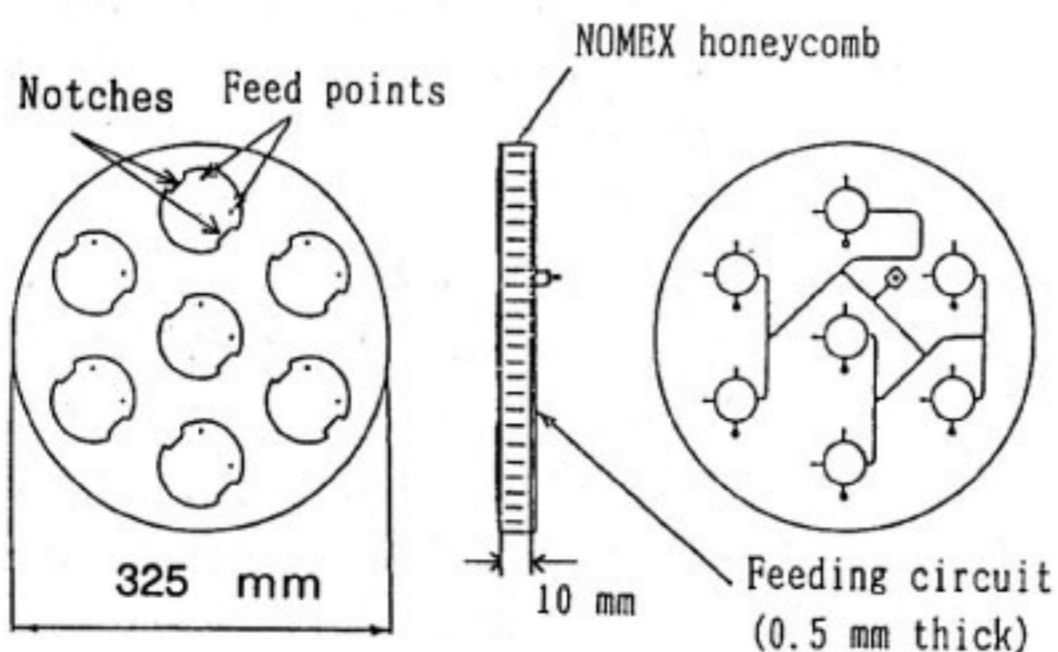
第7表は、SICの受信系における各コンポーネント

の19系統間振幅・位相誤差の配分値（ノミナル値に対する正負両側の最大誤差）である。固定分は製造誤差等による常温における誤差であり、変動分は温度変動を考慮したときの誤差である。なお、位相誤差固定分については19系統間の位相誤差を補償する形で各移相器の移相量を設定するため、各コンポーネントの位相誤差にかかわらず移相器の量子化誤差と移相器の設定誤差によって決まる。振幅誤差は4 dB<sub>P-P</sub>、位相誤差は40°<sub>P-P</sub>と見積もられ、目標値として設定した。測定結果は、目標値以下であり、測定結果から利得低下量を求めると、0.2 dB以下となる。送信系の測定結果も振幅誤差1.0 dB<sub>P-P</sub>、位相誤差28.2 deg.<sub>P-P</sub>で目標値（振幅誤差4 dB<sub>P-P</sub>、位相誤差40 deg.<sub>P-P</sub>）以下であり、利得低下量は0.2 dB以下となる。

6. 要素技術の開発

6.1 アンテナ素子

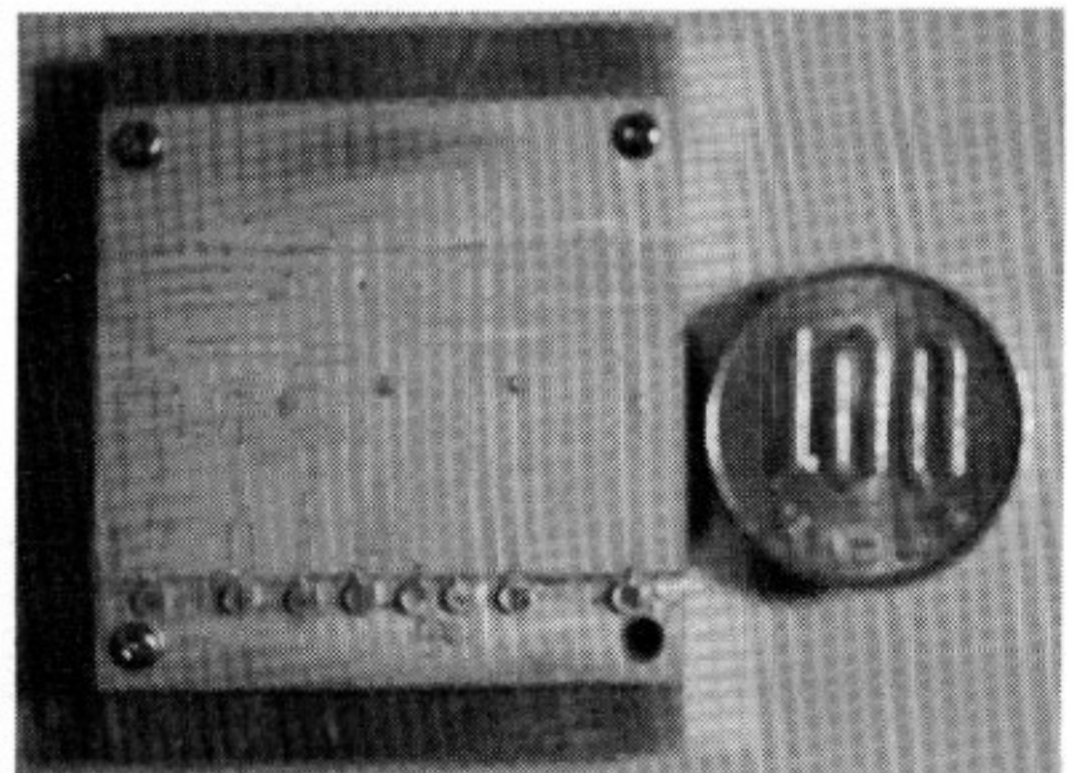
SICのアンテナ素子として7個の放射素子を有するマイクロストリップサブアレーアンテナ<sup>(8)</sup>を開発した。第13図に構成を示す。このアンテナは薄型・軽量で、TDRSに採用されているヘリカルアンテナに比べ打ち上げ時の振動に強く収納性に優れている。また、基板として厚さ10 mm、低誘電率( $\epsilon=1.2$ )のハニカムサンドイッチ板を用いて広帯域化を図っている。放射素子はマイクロストリップ円形パッチであり、背面から90°位相差の2点給電により円偏波を放射する。特徴的なのは、各円形パッチに切り欠きを設けて、励振の非対称によって生じる交差偏波成分を打ち消して軸比特性を改善していることである<sup>(6)</sup>。第8表にアンテナ素子の試験結果を示す。第8表の利得、軸比ともFOV内での最低値である。なお、アンテナ素子直径は取付けクリアランスを確保するため最適値341 mmより小さくする必要があり、円形パッチの間隔を変えずに素子直径を325 mm



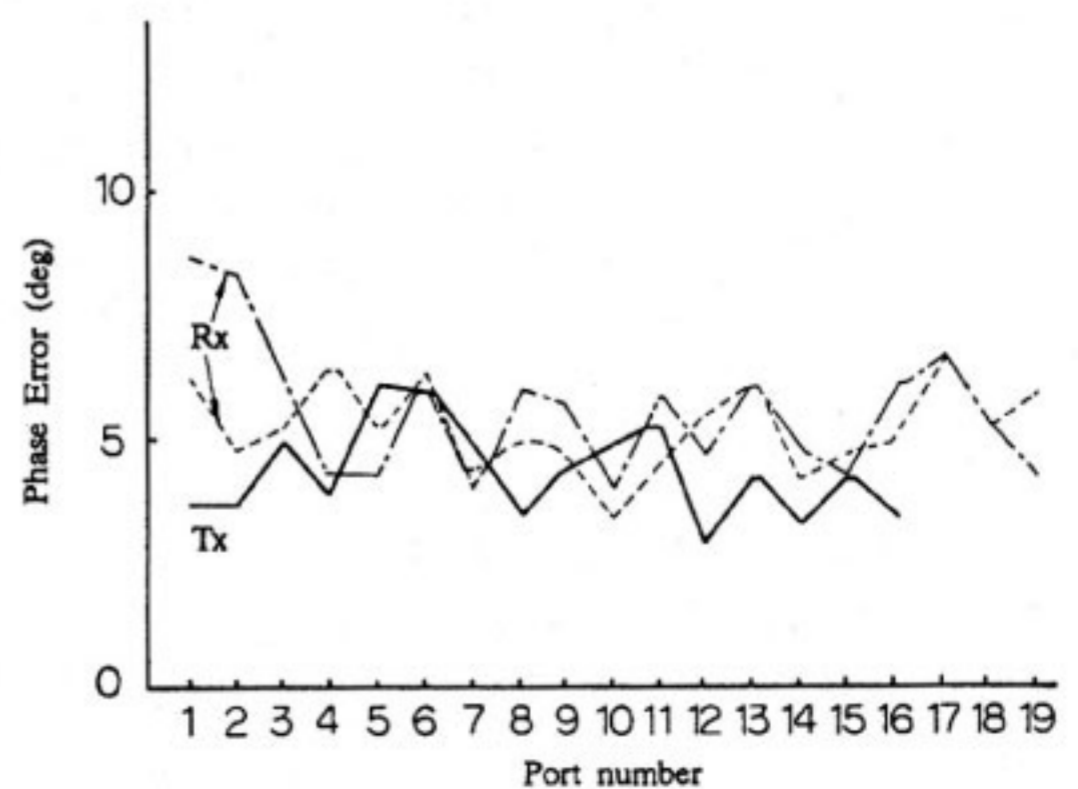
第13図 マイクロストリップサブアレーアンテナ

第8表 マイクロストリップサブアレーの特性

	送信	受信
周波数 (GHz)	2.1064	2.2875
利得 (dBi) (FOV内最低値)	14.2	14.0
軸比 (dB) (FOV内最低値)	1.3	1.8
VSWR	1.23	1.95
重量 (g)	200	



第14図 4ビット PIN ダイオード移相器



第15図 BFNの位相設定誤差

とした。これによる利得への影響は0.1 dB程度の低下にとどまり、許容できる範囲内である。

6.2 ビーム形成回路 (BFN)

BFNは電力合成器、電力分配器及び多数のPINダイオード移相器から構成される回路のため小型化が重要である。移相器は高誘電率基板( $\epsilon=21$ )を用いることや線路を折り曲げて高密度実装することで、面積比で従来<sup>(6)</sup>の1/8(基板寸法4×3cm程度)に小型化している。線路間の最小間隔が基板厚程度となることから線路間の結合が移相量誤差に与える影響が無視できなくなるため、この結合を考慮した設計を行っている。第14図に4ビットPINダイオード移相器を示す。第15図はBFNの各ポートにおいて、位相を22.5°ステップで0~337.5°まで16通り変化させた時の位相設定誤差の最大値を示し、最大8.61°となっており、ビームを形成する上で影響のない値である。

6.3 移相器コントローラ

移相器コントローラは、第9表に示す制御モードによりBFN内の移相器を制御し、所要のビームが形成できるようにするものである。特に、CPUモードでは、内蔵の8ビットマイクロプロセッサにより各アンテナ素子の励振位相量を計算し、ビーム制御信号を出力する。オンボード軌道計算ではSICのビーム幅が広いことから、ETS-VIとユーザ衛星の位置を平均軌道要素を用いて表し、軌道伝搬において摂動として地球重力場の非対称パラメータのうち緯度方向成分のみ考慮し計算の簡略

第9表 SIC ビーム走査モード

ダイオードモード (DIR MODE)	移相器走査モード	地上からのコマンドにより直接移相器にデータを送りビームを指定方向に向ける。
CPUモード (CPU MODE)	リアルタイムモード	地上からのコマンドにより方向余弦データを与えビームを指定方向に向ける。
	プログラム追尾モード	予想方向余弦をあらかじめコマンドにより送信し、追尾開始から20秒ごとに補間計算により求めた方向にビームを向ける。
	オンボード軌道計算追尾モード	軌道6要素及びグリニッジ恒星角から軌道計算を行い、方向余弦を求め、20秒ごとにビーム方向を向ける。
	スレーブモード	送信ビームを指定した受信ビームと同じ方向に向ける。

化を図った<sup>(9)</sup>。第10表に、一般に地上で使われている軌道計算で、ユーザ衛星の位置を接触軌道要素で表し摂動として緯度方向成分と経度方向成分まで考慮した計算との位置誤差の比較を示す。第10表は位置誤差が最悪となり得る2つのケースについて12時間後の衛星の位置誤差を示している。位置誤差は最悪でも20km程度であり、軌道計算による追尾誤差はビーム幅の1/10の0.5°以下を実現できる性能である。

6.4 LNA, HPA

LNA, HPAの性能を第11表に示す。LNAは低雑音GaAsFETを使用することにより、-10°Cから+40°Cの動作温度で雑音指数1.7dB以下を得ている。HPAはGaAsFETを使用し、利得40dB、飽和出力電力約1.3Wである。

LNA, HPAともマイクロ波ICの使用により小型化を図っている。4系統分のHPAを収納した筐体の外形寸法は20×20×6cm程度(電源回路含む)、10系統分のLNAを収めた筐体は22×14×4cm程度(電源回路含まず)となっている。

アクティブフェーズドアレーではLNA, HPA共に動作温度内で系統間振幅・位相誤差が小さいことが要求される。19系統のLNAの動作温度における利得誤差は最大1.6dB<sub>P-P</sub>、位相誤差は最大15°<sub>P-P</sub>で配分値(2dB<sub>P-P</sub>, 30°<sub>P-P</sub>)を十分満足している。また、16系

第10表 軌道伝搬計算結果の比較

	ケース1	ケース2
軌道	円軌道	楕円軌道
高度 (km)	200	傾斜角 200 半長径 2000
軌道長半径 (km)	6578	7478
離心率	0.0	0.12
軌道傾斜角	0.1°	0.1°
位置誤差 (km)	5.725	20.69

第11表 LNA, HPAの特性

	項目	試験結果
L	雑音指数	1.7 dB
N	19系統間利得誤差	1.6 dB <sub>P-P</sub>
A	19系統間位相誤差	15° <sub>P-P</sub>
H	飽和出力電力	1.3W
P	利得	40 dB
A	16系統間出力誤差	0.8 dB <sub>P-P</sub>
	16系統間位相誤差	17° <sub>P-P</sub>

統の HPA の出力電力誤差は最大 0.8 dB<sub>P-P</sub>, 位相誤差は最大 17°<sub>P-P</sub> であり, 要求性能を十分満足する結果が得られている。

## 7. むすび

SIC はサブシステムレベルの試験, FLCE との組合せ試験, 衛星組込後の試験を終え, 良好な機能, 性能が確認されている。今後, 種子島の射場での最終電気性能試験を経て, H-II により打ち上げられ, 軌道上でのチェックアウトが行われる。SIC による我が国初の衛星間データ中継実験は将来の実用データ中継衛星システムの開発に資することが期待されている。

## 謝 辞

SIC について検討, 調整, 開発に携われた通信総合研究所, 宇宙開発事業団, 三菱電機および関連メーカーの関係各位に感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 田中, 木村, 手代木, 松本, 伊藤, 赤石, 水溜, 大久保, “ETS-VI 搭載 S バンド衛星間通信用アンテナの開発”, 信学論 (B-II), J76-B-II, 5, pp.442-451, 1993年5月
- (2) P.F. Sielman, “Adaptive ground implemented phased arrays”, ICC'73, 1973.
- (3) D. Bandel, “The advanced tracking and data relay satellite system : the next generation”, AIAA 90-0894, 1990.
- (4) M. Tanaka, H. Kitahara, C. Harada, and T. Kawanishi, “Experimental intersatellite data relay and tracking system for ETS-VI”, AIAA 90-0887, 1990.
- (5) R. Blyth and D. Haldeman, “TDRSS multiple access telecommunications service”, AIAA 80-0527, 1980.
- (6) 手代木, 中條, 赤石, 広瀬, “データ中継衛星用マルチビームアレーアンテナ”, 信学論(B), J69-B, 11, pp.1441-1452, 1986年11月.
- (7) 田中, 木村, 伊藤, 石川, 幸山, 道岡, 竹之内, “S バンド衛星間通信 (SIC) 用展開機構の開発”, 第33回宇宙科学技術連合講演会, pp.488-489, 1989.
- (8) 田中, 木村, 伊藤, 鳩岡, 松本, 水溜, “ETS-VI 搭載 S バンド衛星間通信用アンテナ素子の高利得化”, '91信学春季全大, B-101, 1991年.
- (9) M. Tanaka, S. Kimura, T. Itoh, H. Shinmura, A. Akaishi, and T. Imatani, “Intersatellite beam pointing by means of onboard satellite orbit calculation”, AIAA 90-0841, 1990.

