

## 3-5 Ka 帯マルチポートアンプ(MPA)

### 3-5 Ka band High Power Multi-port Amplifier (MPA)

黒田知紀 島田政明 小川康雄 細田育生 片上勘次 元橋保夫  
中澤 実 北原真樹

KURODA Tomonori, SHIMADA Masaaki, OGAWA Yasuo, HOSODA Ikuo,  
KATAKAMI Kanji, MOTOHASHI Yasuo, NAKAZAWA Minoru, and KITAHARA Masaki

#### 要旨

将来のマルチビームを有する衛星通信システムへの寄与を想定し、Ka 帯マルチポートアンプ(MPA)を WINDS に搭載し、通信実験を通して実証する。従来のマルチビームアンテナによる通信衛星では、各送信アンテナビームには固有の電力増幅器を接続しており、送信電力に余剰があっても他のアンテナビームに回すことができず、送信電力の有効利用ができなかった。WINDS では複数の送信アンテナビームに 1 式の MPA を対応させることにより、各回線の状況に応じ、地上からのコマンドにより、アンテナビームごとに送信電力を適応的に設定することが可能である。WINDS で搭載する MPA は、入力 8 ポート、出力 8 ポートの MPA である。周波数帯は 17.7~18.8 (GHz)、最大送信電力は約 280 W 以上である。

Ka band High Power Multi-port Amplifier (MPA) is developed and will be demonstrated through the communication experiments for the future satellite communication systems by multi-beams in the WINDS program. In the conventional satellite communication systems by multi-beams, it is designed that transponder configuration set for each transmit power amplifier that is connected to its exclusive antenna beam, so if a port's power condition for communication have some margin, its surplus power can't be distributed to other port's. On the other hand, WINDS has MPA and its control system by ground terminal, total output power of the MPA is shared among all communication ports, and it is possible to assign required output power in several antenna beam efficiently within total output power. MPA for WINDS have 8 input/output ports, frequency band is 17.7-18.8 GHz, and total output power is more than 280 W.

#### 【キーワード】

WINDS, MPA, マルチポートアンプ, Ka 帯, 大電力増幅器  
WINDS, MPA, Multi-port Amplifier, Ka-band, High power amplifier

### 1 まえがき

衛星通信では、高速大容量通信や新しい周波数帯の開拓を目指して、Ka 帯の研究／開発が進められている。Ka 帯の無線通信を行う上では、顕著に見られる降雨減衰への対応も求められる。これらの課題を克服するには、通信回線に必要な回線稼働率を達成するための衛星送信電力を有するとともに、一時的な通信要求の増大に対して、その地域に回線を成立するために必要な衛星送信電力を適切に制御する機能を有することが必要であ

る。

とりわけ、複数地域へ通信サービス(マルチビーム)を提供する衛星通信システムでは、衛星送信電力を通信回線(ビーム)ごとに確保するのではなく、全通信回線を対象として衛星送信電力を一括で確保し、通信を提供する各々の地域の通信環境(降雨状況、通信需要等)に応じてビーム間で衛星送信電力を設定／配分することを行えば、衛星システムリソース的に有利なシステム設計が可能となる。

国内外 8 つの地域へ同時に固定通信回線を提供

できる WINDS [1] では、このような課題を克服するために 8 ポートマルチポートアンプ (MPA) を開発し、通信実験を通して軌道上実証する。

## 2 MPA の特長

各ビームに電力増幅器を配置する従来のマルチビームの衛星通信システムの場合、各サービスエリアの通信回線成立に必要な衛星送信電力を、各ポートに備えておくことが必要である。特に Ka 帯での衛星通信を考えると、降雨時等に発生する RF 信号減衰の補償分まで考慮する必要があり、マルチビームの数が増えれば増えるほど、衛星システムリソースへ与える影響は大きくなる。

一方で、一般的に降雨時よりも晴天である時間の方がはるかに多く、降雨時のための電力確保のために衛星リソースを確保するよりも、衛星で保有する衛星送信電力を各ビームで共有し、通信環境や通信需要から判断し適応的に配分することができれば、効率的な衛星システム設計へ寄与できる。WINDS で開発する MPA は、最大で約 280 W の衛星送信電力を保有しており、この電力を同時に 8 つのビームへ分配することを可能としている。

## 3 WINDS 搭載 MPA の機能・性能

### 3.1 構成

図 1 に WINDS 搭載 MPA の外観(写真)を示す。

図 2 に WINDS 搭載 MPA の機能ブロック図を示す。WINDS 搭載 MPA は、信号の分配/合成を行う入力分配器 (INMTX) / 出力合成器 (OUTMTX)、MPA の RF 性能を良好に設定するために位相・振幅の微調整を行うためのドライバアンプ (D-AMP)、進行波管増幅器 (TWTA) 及び TWTA 故障時に切り替えるための導波管スイッチ (INSW / OUTSW) で構成される。

任意のポートに入力された信号は、INMTX で 8 分割され、D-AMP を経由して TWTA へ入力される。その後、TWTA で増幅(最大約 50 W まで増幅)された信号は、OUTMTX にそれぞれ入力され、特定の 1 ポートへ出力される (1 対 1 通信の場合、図 2 に示す「X」で入力された信号は、「Y」で出力される。)

図 2 は 1 対 1 通信の例であるが、N 対 N (N = 1 ~ 8) の通信まで対応可能であるとともに、D-AMP の機能を利用すると、1 対 N 増幅 (N = 2, 4,

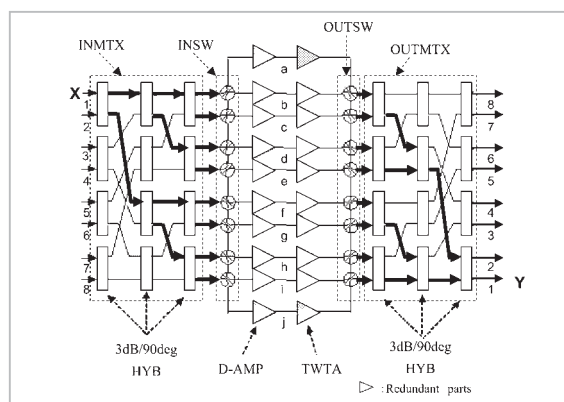


図2 WINDS 搭載 MPA の機能ブロック図

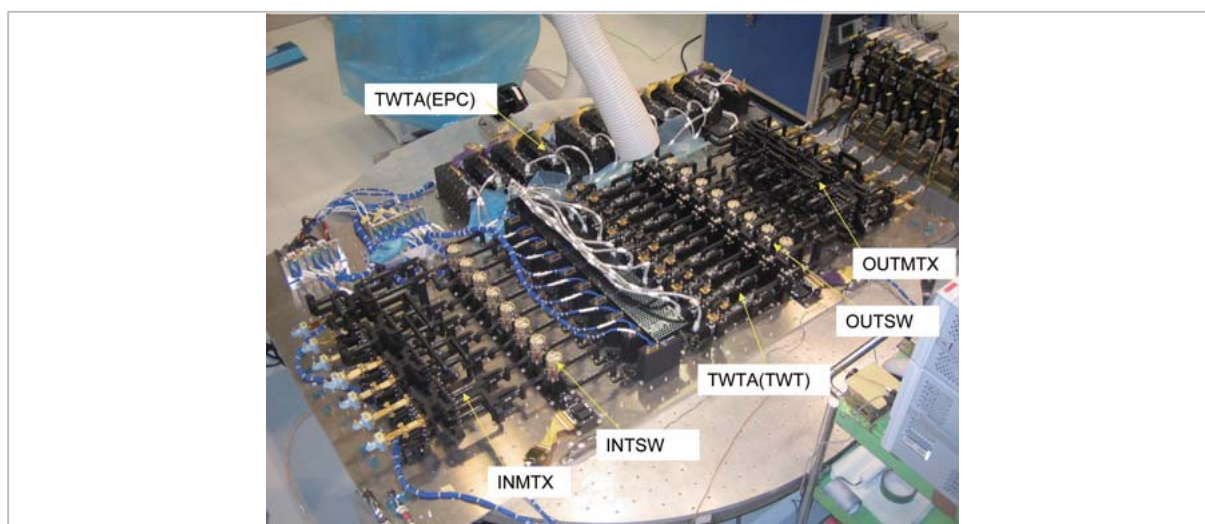


図1 WINDS 搭載 MPA の外観

8)を行うことや、入出力ポートの対応関係を変更することも可能である。

以下、各構成コンポーネントの概要を示す。

#### (1) 電力の分配／合成 (INMTX/OUTMTX)

8ポートMPAでは、入力された信号を均等の電力に8分割しTWTAへ入力し(電力分配)、また、この電力分配と逆の仕組みにより、TWTAで増幅された8系統の信号を、1系統に合成することが必要である(電力合成)。電力分配を行うのがINMTX、電力合成を行うのがOUTMTXである。

このRF信号の分配／合成は、INMTX/OUTMTX部で行われる。INMTXとOUTMTXは、各々12個の導波管ハイブリッド(HYBは2入力2出力)とその間を接続するE/Hバンドで構成される。

一つの信号を8式のTWTAへ分配するのは、HYBを3回通過させることで実現させている。8式のTWTAから出力された信号は、OUTMTXを経由して、INMTXとは逆の仕組みでHYBを3回通過する間に位相合成され、特定の1ポートへ出力される。

#### (2) 進行波管増幅器(TWTA)

RF信号は、INMTXにより8分割され、その後D-AMPを経由してTWTAへ送られ、入力信号を最大約50Wまで増幅し、OUTMTXへ信号を送られる。

MPAで使用するTWTAは、従来の開発技術をベースに、WINDSの通信に必要な周波数、帯

域、出力等の要求を踏まえて、設計を最適化した。TWTの設計は、WINDS開発開始当時、開発担当メーカーにて研究されていた120W級TWT<sup>2)</sup>をベースに、開発を進めた。

WINDSに搭載されるTWTAは飽和出力90W級である。WINDSで搭載する10本のTWTAの入出力特性を図3に示す。MPAの運用では、非線形増幅による相互変調積の影響を考慮し、ほぼ線形増幅とみなせる約2.5dB出力バックオフした領域を利用する。

図4にTWTA(フライト品)の外観(写真)を

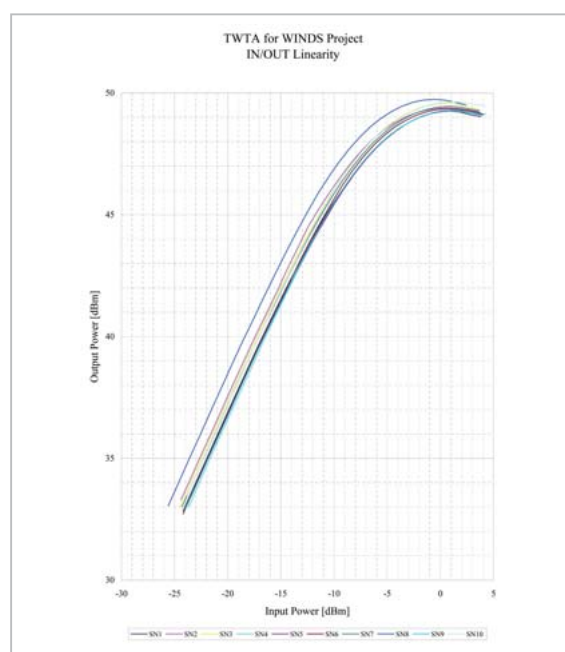


図3 TWTA(フライト品)の入出力特性

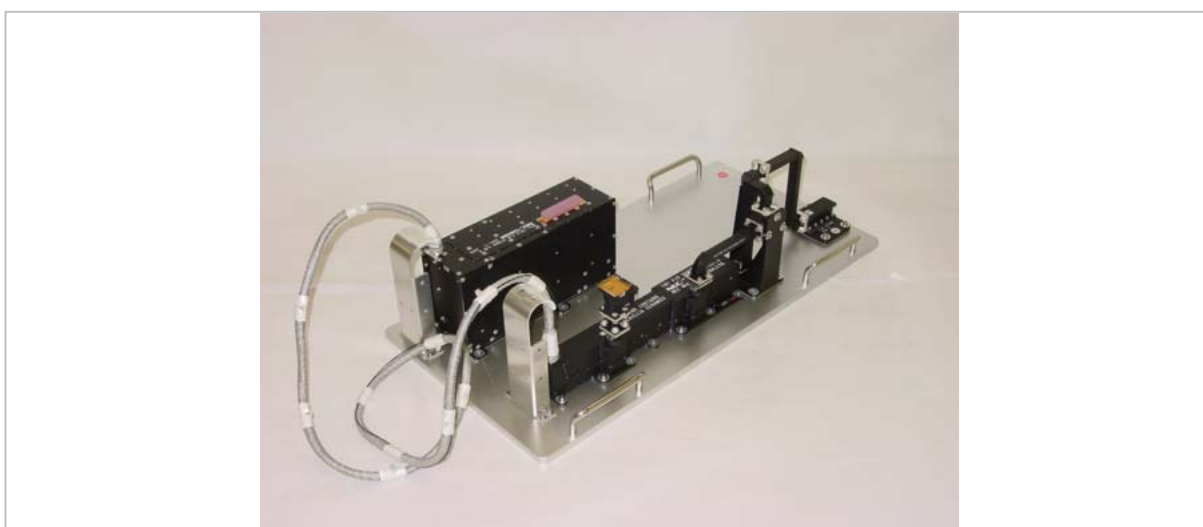


図4 TWTA(フライト品)の外観

示す。

(3) 振幅/位相の調整(D-AMP)

MPAのRF性能を高めるには、TWTA入力前段の振幅と通過位相を各系統でそろえることが重要である。この調整を担うのがドライバアンプ(D-AMP)であり、地上からのコマンドにより、位相は1度刻み、振幅は約0.5dB刻みで設定することができる。

また、D-AMPには、位相を90度刻み(0, 90, 180, 270度の4値)で設定する(以下「ビット位相機能」という。)ことが可能であり、ルート(入出力ポートの対応関係)の変更や1対N増幅(N=2, 4, 8)が行える。(3.3(3)参照)

(4) 冗長系の設定(INSW/OUTSW)

WINDS搭載MPAでは、D-AMP又はTWTAの故障に対応するために、8ポートMPAの構造的な特徴とINSW/OUTSW間の電気長をそろえることが必要なため、D-AMP+TWTAの系統数を偶数にする必要があり、10式構成とした。

図2は現在想定している主系の運用であり、系統b~iを利用する(系統a, jをOFFとする)。万一、特定系統のD-AMPかTWTAが故障した場合は、その隣り合うどちらかの系統をOFFする構成に変更して運用する。

例えば、系統cが故障した場合は、系統b, c又は系統c, dのD-AMPとTWTAをOFF、系統aが故障した場合は、系統a, b又は系統a, jのD-AMPとTWTAをOFFして運用する。つまり、予備系は2系統あるが、1系統の故障に対応が可能な構成である(もちろん、隣り合う2系統が故障した場合は、対応可能である)。

3.2 主要諸元

表1にWINDS搭載MPAの主要諸元を示す。

3.3 機能性能

WINDS搭載MPAの主要機能は以下のとおりである。

- (1) 入力された信号を最大約280Wまで増幅して出力する。
- (2) 最大8ポートまで異なる信号を入力でき、各信号のスペクトルを維持したまま、出力されるポートの電力の合計が280Wを超えない範囲で出力する。

- (3) D-AMPのビット位相機能により、以下の動作が可能である(図2は、各ポートのD-AMPのビット位相器の設定をすべて0度とした場合である。)

図5にビット位相機能の例を示す。「X」から入力した場合に、系統b~iのビット位相器をそれぞれ順に[b=0, c=180, d=0, e=180, f=0, g=180, h=0, i=180]と設定すると、「Z」に出力される。あるいは、「X」から入力した場合に、系統b~iのビット位相器をそれぞれ[b=0, c=270, d=90, e=0, f=270, g=180, h=180, i=90]と設定すると「M」で示す4ポートの出力が可能となる。ビット位相機能により、冗長系の設定や、1対N増幅(N=2, 4, 8)が可能で、WINDSではこれらをTDMAタイムスロットに合わせて2msecで切り替えることが可能である。

4 主要な技術

WINDS搭載MAPの開発にあたって、MPA

表1 WINDS搭載MPAの主要諸元

項目	諸元
周波数範囲	17.7 ~ 18.8 (GHz)
入力電力幅	-8 ~ -22 (dBm/port)(MPA全体で最大-8dBmまで)
総合送信電力	約+54.5 (dBm) [約280(W)]
ポート間アイソレーション	約 25 (dB)
消費電力	1385 (W) 以下
質量	約 65kg
TWTAの出力	最大:90 (W) [飽和領域] 運用:50 (W)[約2.5dBバックオフした線形領域]
D-AMP(振幅の調整)	ゲインミックス: 0 to 3 (dB) ステップ: 約 0.5(dB)
D-AMP(位相の調整)	① Range: 0 to 45(degree) Step: 1 (degree) ②Range: 0 to 360 (degree) Step: 90 (degree)

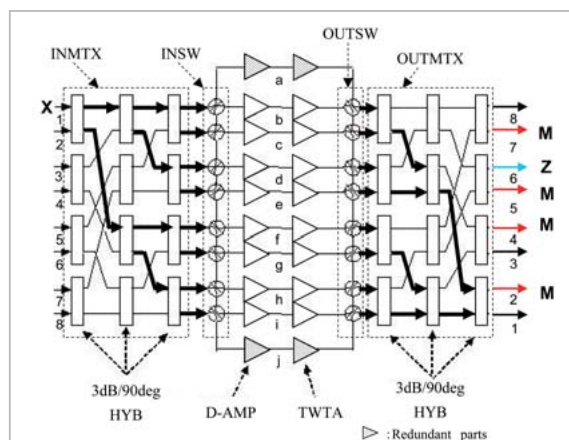


図5 ビット位相機能による出力の変化の説明

の性能を確保及び性能を向上するためのキーとなる技術課題を以下に示す。

(1) INMTX/OUTMTX の設計

最大送信出力の向上は、INMTX/OUTMTX における損失を低減することが必要であり、HYB の設計を搭載実績のある設計をベースに WINDS 用として広帯域化、高アイソレーション化等を取り入れた設計にするとともに、導波管や HYB 間接続の E/H ベンド長の短縮化等を実施し、極力損失を低減した。

ポート間アイソレーションの確保は、ポート間の総電気長をそろえ、位相・振幅のポート間の差を極力小さくすることが必要である。INMTX/OUTMTX の経路長を系統間で同等にするために、ベンドの曲げの回数、曲げの方向、E/H ベンドの使用数等にも配慮した設計を行った。

試作 [3][4] による評価試験を実施し、HYB 及び INMTX/OUTMTX の設計を固めた。表 2 に HYB の試作結果を示す。

これら HYB を用いて INMTX/OUTMTX を試作し、損失が 1.15~1.26 (dB)、ポート間のアイソレーションが 29.6 (dB) 確保でき、フライト品設計の見通しを得た。

(2) D-AMP+TWTA の特性

D-AMP 及び TWTA においては、製造における個体差により、周波数振幅特性、位相特性等を同等に製造することは困難なため、D-AMP+TWTA の単位で特性を評価し、可能な限り個体間の特性の差を少なくするように、D-AMP+TWTA での位相特性について、10 系統でのばらつきを少なくなるように設定した。

(3) 温度条件

MPA は TWTA の発熱、RF 信号の導波管通過時の発熱等により温度上昇が想定される。一方、

D-AMP、TWTA については、温度による特性変化が顕著である。(2) のとおり、D-AMP+TWTA の特性を均一にするには、WINDS 運用時に発生する温度分布に対して、MPA 内の温度分布も可能な限り均一にし、各系統間の温度差を極力小さくすることが必要である。文献 [5] によると、系統間の位相差を 10 度以内、振幅の差を 1.5 dB 以内とすることで、20 dB 以上のポート間アイソレーションが確保されるとされている。

WINDS の開発ではこれを参考に、系統間の位相差を 10 度以内とするには、TWTA、D-AMP の特性から系統間の温度差を 11℃ 程度に抑えることが必要と考え、MPA 下部の構体にヒートパイプを設置する等により、ポート間の温度均一化を図った。

(4) 耐電力設計

WINDS 搭載 MPA では、TWTA をすべて飽和領域で運用した場合においては、最大 700 W 以上の信号が一つの導波管を通過することになることも予想されるので、OUTMTX の導波管の耐電力設計を 1.4 kW 以上としている。

5 試験による検証

試験での D-AMP と TWTA のルートの設定は、図 2 に示すブロック図において、a, j OFF (主系) 及び e, f OFF (冗長系の一つのコンフィギュレーション) にてデータを取得し、評価した。

表2 HYB の試作結果

項目	結果 (ワースト)
挿入損失	3.18 (dB)
リターンロス	28.3 (dB)
振幅偏差	0.13 (dB <sub>rms</sub> ) 以下
ポート間の位相差	-1.35 ~ -1.05 (degree)
ポート間アイソレーション	27.8 (dB)

※サンプル数は 24 個

表3 INMTX/OUTMTX 直結特性試験 (D-AMP 及び TWTA を除いた構成) 結果

	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	IN6	IN7	IN8
OUT1		30.73	33.33	33.59	32.04	33.04	33.16	28.99
OUT2	34.66		33.49	32.81	32.78	31.92	29.28	33.57
OUT3	34.21	29.50		29.31	33.65	29.19	31.71	32.53
OUT4	29.53	34.14	27.04		29.37	33.40	32.80	31.33
OUT5	31.16	30.63	33.21	29.23		27.40	35.25	36.04
OUT6	30.61	30.84	28.95	33.18	29.59		35.77	35.53
OUT7	34.30	29.06	31.23	30.56	33.78	31.19		33.98
OUT8	29.07	34.20	30.55	31.35	30.80	33.43	32.68	

注) 数値は、入力番号 N から入力した時の出力番号 N 以外の出力レベルに対する出力番号 N の出力レベル比 (dB)

常温常圧とともに、低温(約-5℃)、高温(約+50℃)においてもデータを取得し、諸特性について、温度による性能変化は微小であるとともに、MPAの目標性能も得られていることを確認した。

(1) INMTX/OUTMTX直結特性(D-AMP/TWTA除いた構成)

MPA全系組立て前に、D-AMPとTWTAを除き、その間を導波管で接続し、アイソレーションを評価した。その結果を表3に示す。27dB以上のアイソレーションを確保し、56ルート中42ルートで、30dB以上のアイソレーションを確保していることを確認した。

(2) 入出力特性

図6にポート1入力時の入出力特性(18.0GHz:ポートa, j OFF)を示す。-8dBm入力時に出力例のポート1では、55.44dBmにて出力される。他の各ポートの入出力特性も同等の特性を得ている。

(3) ポート間アイソレーション\*2

図7にポート1入力時のポート間アイソレーション特性を示す。ほぼ1.1GHzの帯域にわたって25dBのアイソレーションを確保している。ポート2から8からの入力時もほぼ同等の特性を得ている。

(4) 周波数振幅特性\*2

表4にシステムa, j OFF時の周波数振幅特性の結果サマリを示す。傾向としては、帯域下側の特性がやや大きいのが、600MHzの帯域において1.0dBp-p以下の性能を確保している。

(5) 位相非直線性\*2

表5にシステムa, j OFF時の位相非直線性の結果サマリを示す。当初目的としていた10度以内を満足している。

(6) AM/PM変換特性

図8にシステム1入力/出力時のAM/PM変換特性を示す。MPA開発における仕様配分は、6.2deg/dB以下[-8dBm入力時]と設定しているが、全8システムとも、3.5deg/dB前後の特性である。

(7) 耐電力

真空チャンバにおいて、熱真空試験によりMPAでの最大電力送信の状況を設定し、OUTMTXの導波管が耐え得ることについて確認試験を実施した。その結果、ポート1の試験結果

表4 MPA(フライト品) 周波数振幅特性\*1

周波数帯 (GHz)	振幅偏差 (dB <sub>p-p</sub> )	
	Best	Worst
17.7 -18.3	0.63(port1)	0.81(port2)
18.2 -18.8	0.13(port8)	0.35(port1)

表5 MPA(フライト品) 位相非直線性\*1

周波数帯 (GHz)	位相偏差 (度)	
	Best	Worst
17.7 -18.3	7.91(port5)	8.98(port1)
18.2 -18.8	3.52(port4)	3.73(port3)

\*1 表中の port#とは、port#入力、port#出力を意味する。

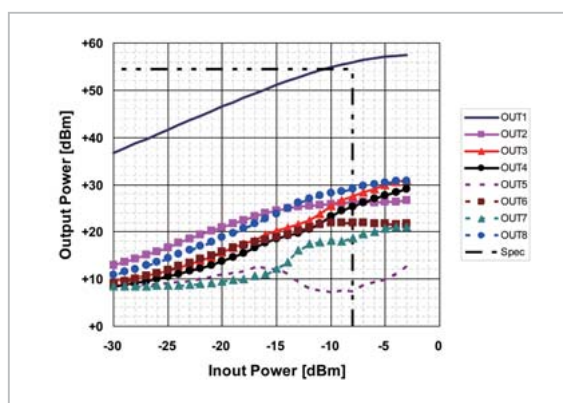


図6 ポート1入力時の入出力特性(18.0GHz)

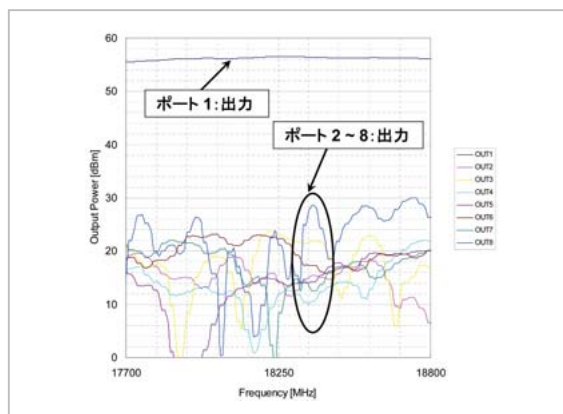


図7 ポート1入力時のポート間アイソレーション特性

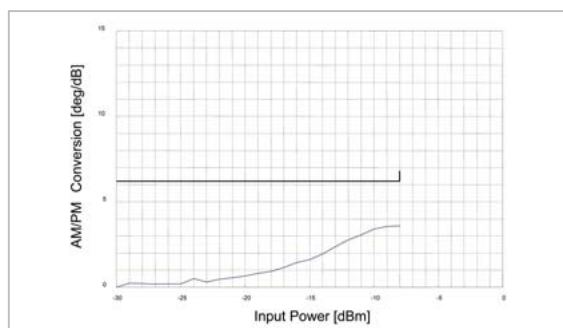


図8 AM/PM変換特性(ポート1入力/出力時: 18.0GHz)

では、+1 dBm 入力時に出力が +57.77 dBm (+1 dBm 以上の入力でもほぼ同等の結果である)ので、MPA の最大出力と考えて良い)となった。この出力で約 10 分間連続運用を実施したが、異常は発生せず、OUTMTX の耐電力設計の妥当性も確認できた。

\*2 測定は、入力レベル-8 dBm (TWTAの動作は約 50 W 出力 [約 2.5 dB バックオフ]) を設定してデータを取得した。その結果、出力は約 +55 dBm である。

## 6 まとめ

熱真空試験、機械環境試験など、様々な環境条件における試験を経て、目標としていた RF 特性を確認することができたため、MPA を軌道上で運用できることの目途を得た。

## 謝辞

開発当初から JAXA 招聘職員として元静岡大学 江上俊一郎氏に開発に参加いただき、MPA の設計、データ評価等について様々なご助言をいただいた。深く感謝する。

## 参考文献

- 1 有川善久ほか, TECHNICAL REPORT OF IEICE, SAT2003-110.
- 2 片上勘次ほか, TECHNICAL REPORT OF IEICE ED98-182(1998-12)
- 3 Y. Motohashi, et al, "18GHz band High Power Multi-port Amplifier for WINDS Satellite", 23rd International Symposium on Space Technology and Science, Matsue, May 26-Jun. 2, 2002.
- 4 T. Kuroda, et al, "Ka band High Power Multi-port Amplifier (MPA) for WINDS Satellite", IEICE GENERAL CONFERENCE SB-8-15, 2004.
- 5 江上俊一郎ほか, 信学論(B), J69-B, No.2, pp206.



くろだ とちのり  
**黒田知紀**

独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙利用推進本部 WINDS プロジェクトチーム



しまだ まさあき  
**島田政明**

独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙利用推進本部 WINDS プロジェクトチーム  
衛星通信



おがわ やすお  
**小川康雄**

独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙利用推進本部 WINDS プロジェクトチーム



ほそだ いくお  
**細田育生**

NEC 東芝スペースシステム株式会社  
技術本部搭載機器 1 グループ



かたがみ かずし  
**片上勤次**

NEC 東芝スペースシステム株式会社  
技術本部搭載機器 1 グループ



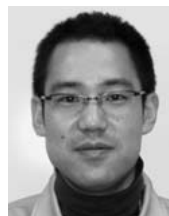
はら たかお  
**元橋保夫**

NEC 東芝スペースシステム株式会社  
技術本部搭載機器 1 グループ



なかざわ みつひろ  
**中澤 実**

日本電気航空宇宙システム株式会社宇宙・情報システム事業部第一技術部



きたはら まさき  
**北原真樹**

株式会社シーテック