

## 3-4 マルチビームアンテナ

### 3-4 Multibeam Antenna System

小澤 悟 長谷川 巧 島田政明 平山勝規 小石洋一

OZAWA Satoru, HASEGAWA Takumi, SHIMADA Masaaki, HIRAYAMA Katsunori, and KOISHI Yoichi

#### 要旨

2008年に打上げ予定の超高速インターネット衛星搭載用マルチビームアンテナのRF性能について概説する。

A multibeam antenna system is being developed for mounting on WINDS, the GIGA bit class communication satellite, slated for launch in 2008 by JAXA. This paper describes the RF characteristics of this antenna system.

#### [キーワード]

衛星通信, 超高速インターネット衛星, Ka帯, マルチビームアンテナ, 衛星開発  
Satellite communications, Wideband Internetworking Engineering Test and Demonstration Satellite, Ka band, Multibeam antenna system, Satellite development

## 1 まえがき

MBA(マルチビームアンテナ)は、2008年に打上げ予定のWINDS(超高速インターネット衛星)に搭載されるアンテナである。このアンテナは、マルチポートアンプとともに、Ka帯を使用し、5mのアンテナを持つ地上局に対し1.2Gbpsの送受信及び地域別降雨保証を実現する技術の実証を行う。このため、1ビームに1ホーンのマルチビーム、Ka帯通信衛星では史上初となる偏波グリッド板、軌道上でも高い鏡面精度を保つ主反射鏡などを採用している。

本稿では、WINDS回線成立性にかかわるMBAのRF性能について概説する。

## 2 仕様

WINDSのサブシステムであるMBAは、固定ビーム通信用アンテナであり、同じくWINDSサブシステムであるマルチポートアンプと合わせ、開口径5mのアンテナを持つ地上局に対して1.2Gbps、45cmのアンテナを持つ地上局に対し

て155Mbpsの送信を実現するように設計されている。表1に固定ビームに関するWINDSの仕様を示す。MBAは、国内及び周辺都市をカバーする国内MBAと、アジア太平洋地域をカバーする海外MBAから構成されている。MBAのカバレッジは、図1のように、国内MBAが12エリア、海外MBAが7エリア、合計19エリアとなる。表2にMBAの仕様を示す。

## 3 RF特性<sup>[1]</sup>

### 3.1 設計

図2(a)にMBAの外観を示す。MBAは、主として、2枚の開口径2.4m相当の主反射鏡、2枚の副反射鏡、偏波グリッド板、19の給電ホーンを擁する三つの給電部から構成される。

MBAでは、国内MBAの限られた空間に12ビームに対応する給電ホーンを配置するため、偏波グリッド板を採用している。図2(b)にその概念図を示す。偏波グリッド板は電波吸収率の小さい誘電体パネルに等間隔・平行にグリッドを配置した構成で、直線偏波のうち、電界方向がグリッ

ドに対して平行な直線偏波である V 偏波を反射し、電界方向がグリッドに対して直行する H 偏

波を透過する設計となっている。そのため、偏波グリッド板を挟んで、一方に V 偏波給電部、他

表1 固定ビーム通信に関する要求値

		値
周波数	送信	18GHz
	受信	28GHz
ビームカバレッジ		(図 2)
ビーム数	日本	12
	海外	7
偏波		直線
EIRP	北海道西、関東、近畿、九州	67.9dBW
	北海道東、東北、中部、中四国	67.6dBW
	沖縄、その他	67.3dBW
G/T	北海道東、北海道西、東北、関東、中部、九州、近畿、中四国	16.9dB/K
	沖縄、その他	16.3dB/K

表2 マルチビームアンテナに対する要求値

		値
偏波	北海道東、東北、中部、中四国、沖縄、シンガポール	垂直
	北海道西、関東、近畿、九州、その他	水平
送信アンテナ利得(*)	北海道西、関東、近畿、九州	45.4dBi
	北海道東、東北、中部、中四国	45.1dBi
	沖縄、その他	44.8dBi
受信アンテナ利得(*)	北海道東、北海道西、東北、関東、中部、九州、近畿、中四国	45.9dBi
	沖縄、その他	45.3dBi
	アイソレーション	25dB

(\*)マルチビームアンテナ内の導波管ロスを含む

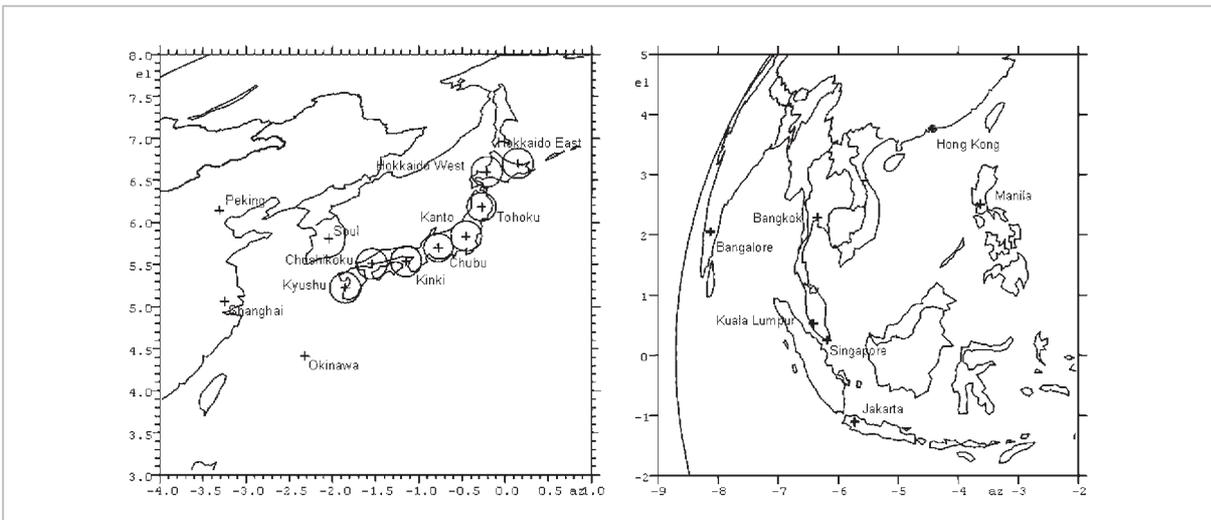


図1 マルチビームアンテナのカバレッジ

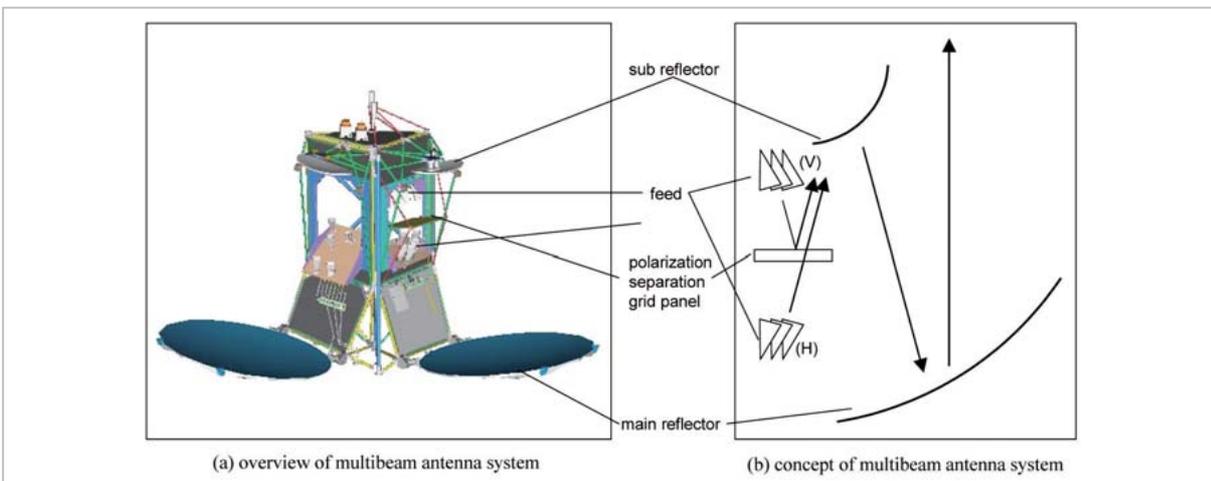


図2 マルチビームアンテナ概観図

方にH偏波給電部を配置することが可能である。

各給電部には5～7の給電ホーンが配置されており、各ホーンは焦点から外れた位置に配置されている。離焦点位置へのホーンの配置は、アンテナのRF性能の劣化の原因となるため、MBAでは、オフセットカセグレン方式を採用している。これにより、論理的なF/Dを3.4と大きく設定でき、離焦点によるRF性能の劣化を軽減している。

### 3.2 ピーク利得とアンテナ放射パターン

MBAの各ビームのピーク利得を解析した。表3～6に、それぞれ国内MBA送信ビーム、受信ビーム、海外MBA送信ビーム、受信ビームのピーク利得の解析結果を示す。これらの表より、MBAはピーク利得要求値を満足していることが確認できる。また、アンテナ放射パターンも解析している。代表例として、図3～6に、関東送信

表3 国内MBA送信ビーム利得

ビーム 偏波		北海道西	関東	近畿	九州	ソウル	北京	上海	北海道東	東北	中部	中四国	沖縄
照射点利得 解析値 (dBi)	17.7GHz	51.4	51.4	51.4	51.4	49.4	49.6	50.8	51.3	51.2	51.2	51.3	51.1
	18.25GHz	51.7	51.7	51.7	51.7	49.8	50.0	51.1	51.6	51.5	51.5	51.6	51.4
	18.8GHz	52.0	52.0	52.0	52.0	50.2	50.3	51.4	51.9	51.8	51.8	51.9	51.7
照射領域 解析値 (dBi)	17.7GHz	49.4	49.3	49.3	49.3	-	-	-	49.3	49.2	49.2	49.2	-
	18.25GHz	49.6	49.5	49.5	49.5	-	-	-	49.5	49.4	49.4	49.4	-
	18.8GHz	49.8	49.7	49.7	49.7	-	-	-	49.7	49.6	49.6	49.6	-
照射点アンテナ利得 (dBi)	17.7GHz	47.8	47.8	47.8	47.8	45.8	45.8	47.2	47.4	47.3	47.3	47.4	47.5
	18.25GHz	48.1	48.1	48.1	48.1	46.2	46.2	47.5	47.7	47.6	47.6	47.7	47.8
	18.8GHz	48.4	48.4	48.4	48.4	46.6	46.5	47.8	48.0	47.9	47.9	48.0	48.1
照射領域アンテナ利得 (dBi)	17.7GHz	45.8	45.7	45.7	45.7	-	-	-	45.4	45.3	45.3	45.3	-
	18.25GHz	46.0	45.9	45.9	45.9	-	-	-	45.6	45.5	45.5	45.5	-
	18.8GHz	46.2	46.1	46.1	46.1	-	-	-	45.8	45.7	45.7	45.7	-
仕様値(dBi以上) (国内8ビームは照射領域、 その他は照射点での利得)		45.4				44.8			45.1				44.8

表4 国内MBA受信ビーム利得

ビーム 偏波		北海道西	関東	近畿	九州	ソウル	北京	上海	北海道東	東北	中部	中四国	沖縄
照射点利得 解析値 (dBi)	27.5GHz	54.3	54.4	54.5	54.4	54.2	53.0	53.7	54.2	54.7	54.7	54.2	53.7
	28.05GHz	54.4	54.5	54.5	54.5	54.4	53.0	53.7	54.3	54.8	54.8	54.3	53.7
	28.6GHz	54.5	54.5	54.6	54.5	54.5	53.1	53.8	54.3	54.9	54.9	54.3	53.7
照射領域 解析値 (dBi)	27.5GHz	52.0	51.9	51.9	51.9	-	-	-	50.5	50.2	50.1	50.2	-
	28.05GHz	52.0	51.9	51.9	51.9	-	-	-	50.4	50.2	50.1	50.1	-
	28.6GHz	52.0	51.9	51.9	51.8	-	-	-	50.4	50.2	50.1	50.1	-
照射点アンテナ利得 (dBi)	27.5GHz	48.8	48.9	48.9	48.8	48.7	47.4	48.2	50.2	50.7	50.7	50.2	49.6
	28.05GHz	48.9	48.9	49.0	49.0	48.8	47.5	48.2	50.2	50.8	50.8	50.2	49.7
	28.6GHz	48.9	49.0	49.0	48.9	48.9	47.5	48.2	50.2	50.8	50.8	50.3	49.7
照射領域アンテナ利得 (dBi)	27.5GHz	46.5	46.3	46.4	46.3	-	-	-	46.4	46.2	46.1	46.1	-
	28.05GHz	46.5	46.3	46.3	46.3	-	-	-	46.4	46.1	46.1	46.1	-
	28.6GHz	46.4	46.3	46.3	46.3	-	-	-	46.3	46.1	46.0	46.0	-
仕様値(dBi以上) (国内8ビームは照射領域、 その他は照射点での利得)		45.9				45.3			45.9				45.3

表5 海外MBA送信ビーム利得

ビーム 偏波		マニラ	香港	バンコク	ハノイ	ジャカルタ	クアラルンプール	シカゴ
照射点利得 解析値 (dBi)	17.7GHz	49.7	49.4	51.1	50.7	50.3	48.2	48.3
	18.25GHz	50.0	49.7	51.4	51.0	50.6	48.6	48.8
	18.8GHz	50.2	49.9	51.7	51.3	50.8	49.0	49.2
照射点アンテナ利得 (dBi)	17.7GHz	46.6	46.3	48.0	47.6	47.2	45.1	45.2
	18.25GHz	46.9	46.6	48.3	47.9	47.5	45.5	45.7
	18.8GHz	47.1	46.8	48.6	48.2	47.7	45.9	46.1
仕様値(dBi以上) (国内8ビームは照射領域、 その他は照射点での利得)		44.8						

表6 海外MBA受信ビーム利得

ビーム 偏波		マニラ	香港	バンコク	ハノイ	ジャカルタ	クアラルンプール	シカゴ
照射点利得 解析値 (dBi)	27.5GHz	52.0	51.7	54.2	53.8	53.4	53.2	53.6
	28.05GHz	51.9	51.7	54.3	53.9	53.5	53.3	53.8
	28.6GHz	51.9	51.7	54.4	54.0	53.6	53.5	54.0
照射点アンテナ利得 (dBi)	27.5GHz	48.4	48.1	50.7	50.3	49.9	49.6	50.1
	28.05GHz	48.4	48.1	50.7	50.3	50.0	49.8	50.3
	28.6GHz	48.4	48.1	50.8	50.4	50.1	50.0	50.5
仕様値(dBi以上) (国内8ビームは照射領域、 その他は照射点での利得)		45.3						

ビーム、受信ビーム、バンコク送信ビーム、受信ビームのアンテナ放射パターン解析結果を示す。

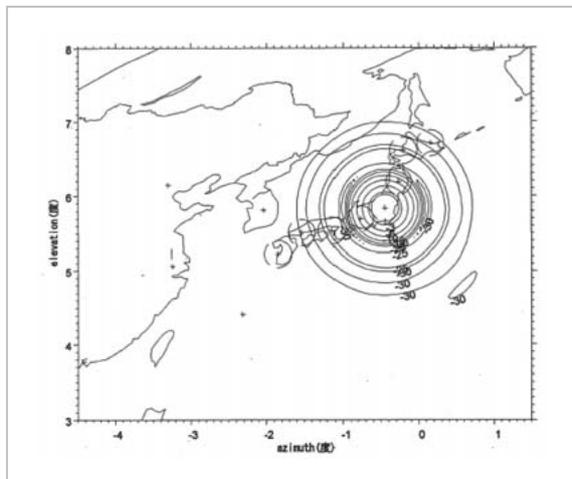


図3 関東送信ビームコンタ

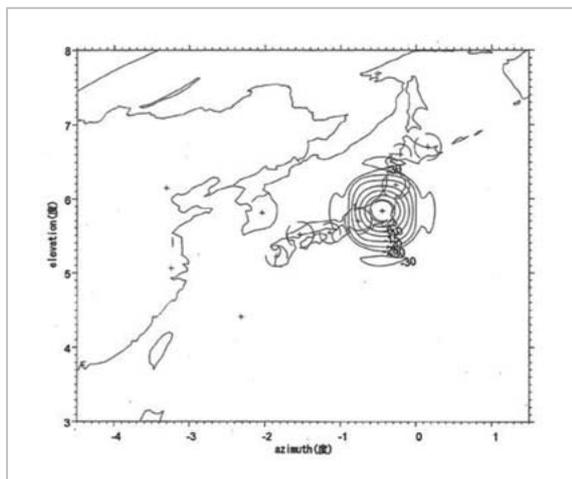


図4 関東受信ビームコンタ

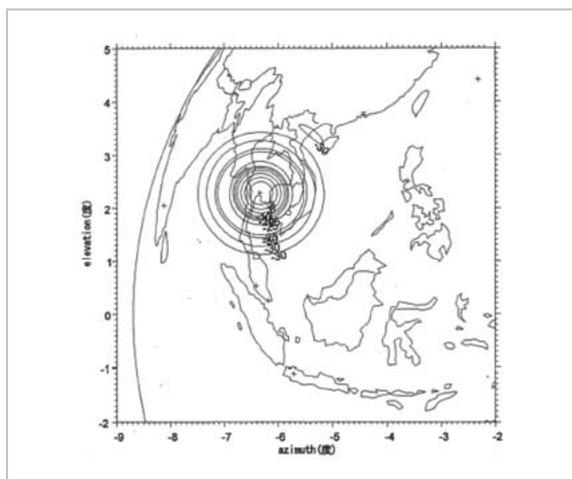


図5 バンコク送信ビームコンタ

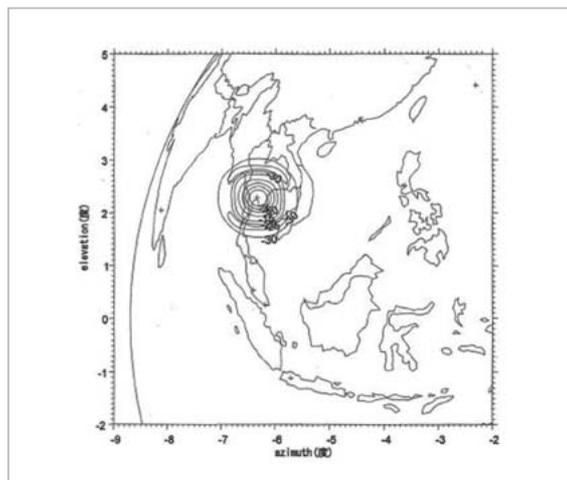


図6 バンコク受信ビームコンタ

### 3.3 アイソレーション

MBA はビーム間アイソレーションを規定している。送信ビーム間アイソレーションの概念を図7に示す。送信ビーム間アイソレーションは、希望ビームのアンテナパターン  $X_d$  dBi と、干渉ビームのアンテナパターン  $X_i$  dBi の差  $I_i$  dB を計算し、アイソレーション  $I_i$  のパターンを作成することで評価している。例として、関東送信ビームのアイソレーションパターンを図7に示す。同様に、受信ビーム間アイソレーションの概念を図8に示す。受信ビーム間アイソレーションは、希望ビームの照射領域端でのアンテナ利得  $X_d$  dBi と、希望ビームの照射領域でのアンテナパターン  $X_i$  dBi との  $I_i$  dB 差を計算し、アイソレーション  $I_i$  のパターンを作成することで評価している。例として、関東受信ビームのアイソレーションパターンを図9、10に示す。これらの解析により、MBA はビーム間アイソレーション仕様を満たしていることを確認している。ビーム間アイソレーションの仕様値を表7～10に示す。

## 4 指向方向制御<sup>[2]</sup>

### 4.1 設計

軌道上で生ずるビーム方向の誤差は、追尾受信機及びアンテナ指向制御機構と副反射鏡で構成するアンテナ指向制御系によって補正される。アンテナ指向制御系のブロック線図を図11に示す。

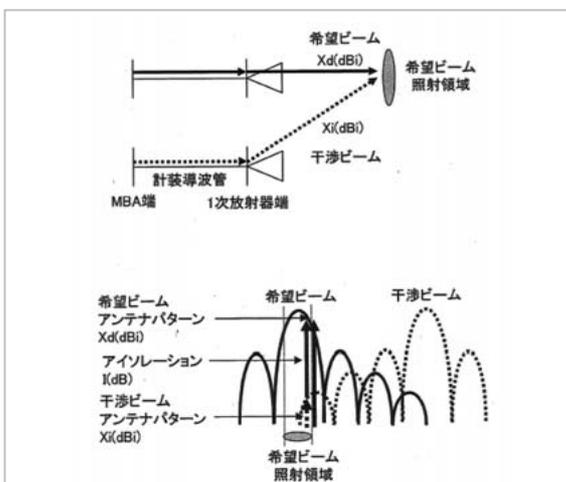


図7 送信ビーム間アイソレーション

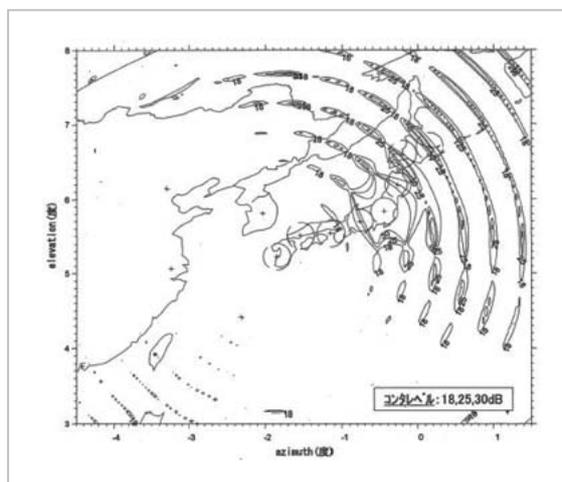


図9 送信アイソレーション解析結果

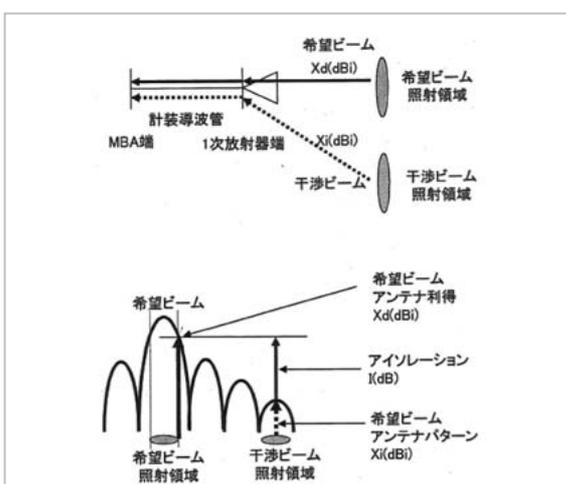


図8 受信ビーム間アイソレーション

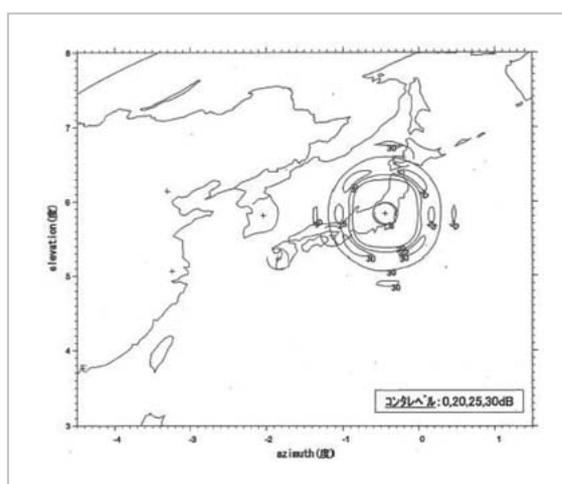


図10 受信アイソレーション解析結果

表7 国内 MBA 送信ビーム間アイソレーション仕様値

干渉ビーム	希望ビーム											
	北海道東	北海道西	東北	関東	中部	近畿	中四国	九州	沖縄	ソウル	北京	上海
北海道東	25	N/A	30	18	30	25	30	25	30	25	30	30
北海道西	25	25	N/A	30	18	30	25	30	25	30	25	25
東北	N/A	25	25	N/A	30	18	30	25	30	25	30	30
関東	30	N/A	25	25	N/A	30	18	30	20	25	25	25
中部	18	30	N/A	25	25	N/A	30	25	30	30	30	30
近畿	30	18	30	N/A	25	25	N/A	30	N/A	25	25	25
中四国	25	30	18	30	N/A	25	25	18	25	30	30	30
九州	30	25	30	18	30	N/A	25	30	N/A	20	16	16
沖縄	25	30	25	30	25	30	18	30	30	30	30	30
ソウル	30	25	30	20	30	N/A	25	N/A	30	18	20	20
北京	30	25	30	25	30	25	30	20	30	18	16	16
上海	30	25	30	25	30	25	30	16	30	20	16	16

表8 国内 MBA 受信ビーム間アイソレーション仕様値

干渉ビーム	希望ビーム											
	北海道東	北海道西	東北	関東	中部	近畿	中四国	九州	沖縄	ソウル	北京	上海
北海道東	30	N/A	30	25	30	25	30	25	30	25	30	30
北海道西	25	25	N/A	30	25	30	25	30	25	25	25	25
東北	N/A	25	25	N/A	30	25	30	25	30	25	30	30
関東	30	N/A	25	25	N/A	30	25	30	25	25	25	25
中部	25	30	N/A	25	25	N/A	30	25	30	30	30	30
近畿	30	25	30	N/A	25	25	N/A	30	N/A	25	25	25
中四国	25	30	25	30	N/A	25	25	25	25	25	30	30
九州	30	25	30	25	30	N/A	25	30	N/A	25	20	20
沖縄	25	30	25	30	25	30	25	30	30	30	30	30
ソウル	30	25	30	25	30	N/A	30	N/A	30	20	20	20
北京	30	25	30	25	30	25	30	25	30	20	20	20
上海	30	25	30	25	30	25	30	20	30	20	20	20

表9 海外MBA送信ビーム間アイソレーション仕様値

		希望ビーム						
		マニラ	香港	バンコク	バンガロア	ジャカルタ	シンガポール	クアラルンプール
干渉ビーム	マニラ		25	25	25	25	25	30
	香港	25		25	25	25	25	30
	バンコク	25	25		25	25	25	30
	バンガロア	25	25	25		25	25	30
	ジャカルタ	25	25	25	25		25	30
	シンガポール	25	25	25	25	25		25
	クアラルンプール	30	30	30	30	30	25	

表10 海外MBA送信ビーム間アイソレーション仕様値

		希望ビーム						
		マニラ	香港	バンコク	バンガロア	ジャカルタ	シンガポール	クアラルンプール
干渉ビーム	マニラ		25	25	25	25	25	30
	香港	25		25	25	25	25	30
	バンコク	25	25		25	25	25	30
	バンガロア	25	25	25		25	25	30
	ジャカルタ	25	25	25	25		25	30
	シンガポール	25	25	25	25	25		25
	クアラルンプール	30	30	30	30	30	25	

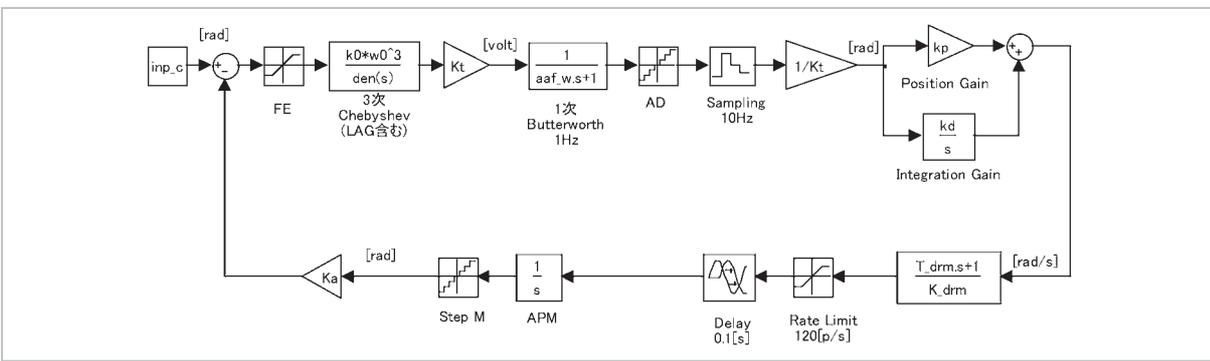


図11 アンテナ指向制御系ブロック線図

### 4.2 国内MBAビーム指向制御

国内MBAに属する12のビームは、沖縄からのビーコン信号に基づき指向制御される。国内MBAにおける、機械的指向精度誤差を除いた指向制御系精度の仕様は、定常状態で $0.005^\circ$ である。図12に定常状態における指向制御系のシミュレーション結果を示す。この結果より、指向制御系精度が仕様を満たすことが確認できる。

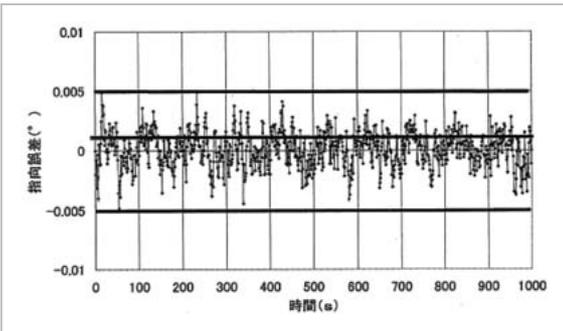


図12 アンテナ指向制御系シミュレーション結果

### 4.3 海外MBAビーム指向制御

海外MBAのビームは、24時間のスキャンを行うことで一日のビーム指向履歴の推定をし、指向制御を行う。スキャンは、図13のように副反射鏡をアンテナ駆動機構にて十字方向に制御し、利得を測定する。スキャンの幅は約 $\pm 0.4^\circ$ で、アンテナ利得が $-5\text{ dB}$ 程度の範囲である。得られた利得を用い、アンテナパターンを

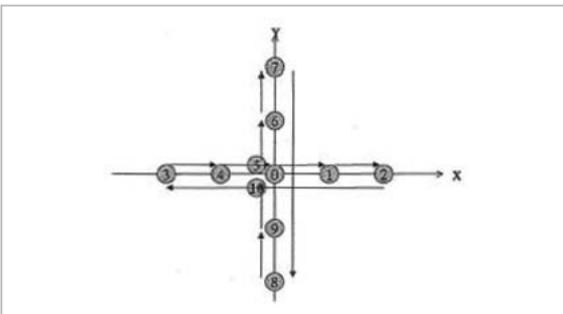


図13 スキャン順序

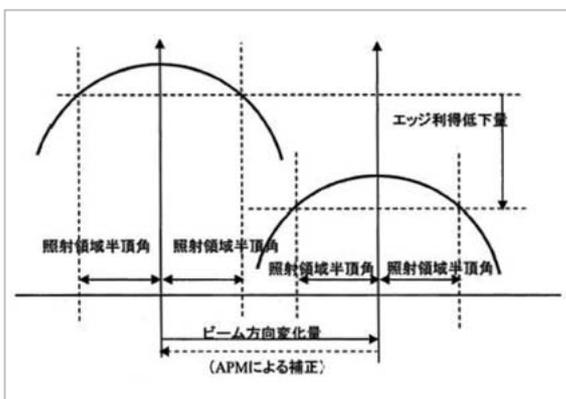


図14 指向誤差による指向損失の定義

$$A = A_0 + c_1x + c_2y + c_3x^2 + c_4y^2 + c_5xy + c_6x^3 + c_7y^3 + c_8x^2y + c_9xy^2$$

と近似し、ピーク利得方向の推定を行う。ただし、 $P$  [dB] は利得、 $x$  [rad] 及び  $y$  [rad] はそれぞれ  $A_z$ 、 $E_l$  の方向を表すパラメータである。この推定を5分ごとに行い、24時間のビーム指向履歴を

推定する。得られたビーム指向履歴を使用して、約一週間にわたり、指向制御を行う。解析により、この推定方法を用いた場合の指向精度は  $0.042^\circ$  以内であることが確認されている。

#### 4.4 ビーム方向誤差と利得低下量

ビーム指向誤差は、ビーム指向精度に加え、各ビーム間偏差などを考慮すると、総合  $0.031^\circ$  となる。国内 MBA のカバレッジでは、特にカバレッジ端での、ビーム方向誤差による利得低下量を考慮している。利得が低下する概念を図14に示す。このようにして発生する利得低下量は、最大でも送信 1.68 dB、受信 3.52 dB である。

### 5 まとめ

本稿では、WINDS の回線計算の基となる MBA の RF 特性について概説した。

#### 参考文献

- 1 S. Ozawa, T. Maeda, M. Shimada, K. Hirayama, A. Fukatsu, and Y. Koishi, "Design of Onboard Multibeam Antenna System for Giga Bit Class Communication Satellite", 11th Ka and Broadband Communications Conference, Rome, Sep. 2005.
- 2 S. Ozawa, M. Shimada, Y. Koishi, K. Hirayama, and K. Maeda, "The multi-beam antenna pointing system for WINDS", AIAA-2007-3162, Seoul, South Korea, 2007.



小澤 健

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 博士(工学)  
宇宙構造、構造解析



長谷川 巧

宇宙技術開発株式会社  
衛星通信、アンテナ



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

平山勝規

NEC 東芝スペースシステム株式会社  
衛星搭載アンテナ、衛星搭載レーダー

小石洋一

日本電気株式会社  
衛星通信システム、衛星搭載中継器