論文 CONTRIBUTED PAPERS

高精度ファンリブ型メッシュ展開鏡面^{*1} Highly Accurate Fan Rib Type Mesh Deployable Reflector

板波隆雄^{*2}・三沢正吉^{*2}
Takao ITANAMI and Masayoshi MISAWA

Key Words: Satellite Communication, Mesh Antenna, PIM, Deployment Mechanism, Sidelobe

Abstract

This paper describes the performance of fan rib type highly accurate, highly reproducible mesh deployable reflector with precision screw type adjustment element for surface drawing and motor and link type deployment system. Surface error and its reproducibility for repeated deployment decreased less than 1/2 of previously developed fan rib type mesh reflector with spring type deployment system. No periodic distortion which corresponds to rib arrangements can be seen and thus mesh reflector with very low gore lobe and side lobe characteristics, which is very useful for frequency reuse, is achieved in C band. This paper also presents measured higher order passive intermodulation (PIM) products of mesh developed and used for this deployable reflector with the mesh tension as a parameter.

1. ま え が き

衛星通信の多様化に伴い、世界的に通信衛星は、複数の周波数を使用するマルチバンド化、サービスエリアを複数の高い利得のアンテナビームで照射するマルチビーム化に向かっている^{1,2)}。

このような複数の通信ミッションを搭載する衛星用のアンテナに関しては打上げロケットへのコンパクトな収納技術、周波数帯共用技術等の確立が必要である。我々は、打上げロケットをH-2相当、衛星は技術試験衛星VI号(ETS-VI)相当の2ton級を想定して、L,S,C,Ku,Ka帯の5周波数帯を使用するマルチバンドアンテナ系についてメッシュ展開アンテナを用いた幾つかの構成案を提案するとともに、その性能の実現性について検討を進めてきた³⁻⁵⁾。第1表に各周波数帯の呼称に対応する周波数、波長、所要の鏡面精度を示す。

メッシュ展開鏡面については既にファンリブ型やラジアルリブ型等の数種のもものが提案されている⁶⁻¹²⁾。ここでは、オフセット型主反射鏡とのマッチングが良く、コンパクトに収納可能なファンリブ型を選択し検討した。ファンリブ型メッシュ展開鏡面については、ばね方式の展開機構により展開する開口径3.5mφ、鏡面精度1.7mm rmsのS帯用のもの¹¹⁾が既に開発されているが、将来の鏡面の大型化を踏まえて、ばね方式展開機構に比べてより高い展開時の信頼性と高い鏡面精度の実現が期待できるモータとリンクにより構成する展開機構を用いた方式(M & L方式)を選択し試作検討した。

本論文では、このマルチバンドアンテナ系のS/C帯用メッシュアンテナとして試作検討を行ったファンリブ型のメッシュ展開鏡面の特性とこれらを実現するための技術について述べる。

また、通信を行う際に問題となる、メッシュ反射面でのパッシブインタモジュレーション(PIM)による不要波の発生量の測定結果についても述べる。このパッシブインタモジュレーションは、周波数の異なる2波以上の送信信号が金属のポイントコンタクト部や金属が薄い酸化膜を介して接触する部分等に入射する場合に入射波と異なる周波数の不要な信号が発生する現象である。この不要な信号が、他の周波数の通信信号に悪影響を与えるため問題となる。

2. 展開信頼性の向上

2.1 展開抗力特性 アンテナ系の構成例を第1図に、試作した3.5mφメッシュの展開鏡面を第2図にそれぞれ示す。メッシュ展開鏡面では、鏡面が展開するに従って、電波反射面を形成する弾性体のメッシュの張力が次第に強まり、展開方向とは逆方向に展開を妨げる力(展開抗力)が発生する。メッシュ展開鏡面の展開抗力トルクの測定値の一例を第3図に示す。第3

^{*1} 平成4年10月14日原稿受理

^{*2} NTT無線システム研究所衛星通信研究部

第1図 搭載アンテナ系の構成例

第1表 帯域, 周波数, 波長, 鏡面精度の概要

帯域	周波数 (GHz)	波長 (mm)	所要の鏡面精度 (mm)
Ka	30	10	0.2
	20	15	0.3
Ku	14	21.4	0.4
	12	25	0.5
C	6	50	1
	4	75	1.5
S	2.7	111.1	2.2
	2.5	120	2.4
L	1.6	187.5	3.8
	1.5	200	4

図の横軸の規格化展開角度は、展開開始時の展開アームの角度を0とし展開終了時の同アームの角度を1として規格化して示した展開角度である。縦軸の規格化トルクは、ばね式展開機構の展開終了時のばねによる展開トルクを1として規格化して示したトルクである。メッシュの展開抗力トルクは、展開が終了する直前から急激に増加し展開終了位置で最大となる。

メッシュの製造時の弾性係数のばらつき、鏡面成形のための調整時にメッシュ鏡面に発生する張力のばらつき等を考慮すると展開抗力トルクは比較的大きなばらつきを生じる可能性を有する。このような展開抗力にばらつきのある鏡面を確実に展開させるためには、展開抗力により生じるエネルギーを十分に上回る大きな

第2図 M & L 展開機構を用いたメッシュ展開アンテナ

第3図 メッシュ鏡面の展開抗力とばね方式展開機構の展開力

展開エネルギーを与えるか、もしくは展開動作の途中で常時この展開抗力トルクを上回る展開トルクを与えることが必要となる。

2.2 ばね方式展開機構 従来のばね方式の展開機構では、展開動作が進むとばねが次第に緩み展開力は

減少する。このばねによる展開トルクの一例(展開力 A)を第3図に合わせて示す。第3図よりばね方式の展開機構では展開の途中で展開抗力トルクが展開トルクを上回る。しかし、ばねの展開エネルギーがリブの運動エネルギーとして蓄えられており、展開抗力トルクが展開トルクを上回る位置でもリブの展開速度が減少しつつ展開動作が持続し、展開終了位置に達する。つまり、展開エネルギーが、展開抗力エネルギーを上回っていれば、リブは展開終了位置に達する。展開が終了し、展開機構が固定される際、展開力エネルギーの余剰分は、リブの根本に衝撃荷重を発生させる。この荷重によりリブの根本に歪みが発生し、発生する歪みのピーク値が歪みの許容限界を越えるとリブは破壊される。展開抗力の持つエネルギーがばねの有する展開エネルギーを上回る場合には、鏡面の展開は途中で停止する。

この展開エネルギー、展開抗力のエネルギーは第3図の展開力、展開抗力を示す曲線の下部に囲まれる面積(図中の斜線部の面積)で表される。

展開終了角度近傍における展開抗力トルクのばらつきが大きいことから、これを考慮して十分な余裕を持って展開を終了するようにばね力による展開トルクを設定し、展開の信頼性を確保するように設計することは容易ではない。

展開の信頼性を確保するため展開力が余裕を持って常に展開抗力を上回るように設計する方法が考えられる。この場合の例(展開力 B)を第3図に破線で示す。図から容易に分かるように展開終了時にはリブが過剰な運動エネルギーを有しており、リブには非常に大きな衝撃荷重を生じる。

第3図の実線の展開力 A の場合リブに生じる歪みのピーク値は、許容限界の $1/2.7$ の 610×10^{-6} である。第3図の破線の展開力 B の場合、これによる余剰エネルギーが展開力 A の場合の10倍以上であるので、リブに生じる歪みのピーク値は3倍以上となる。従って発生する歪みが許容値を越えリブは破壊される。

バネ力を弱めると展開抗力が展開力を越える状態を生じるため展開の信頼性が低下する。従って、ばね式の展開機構を使用してリブが破壊されない条件下で高い展開信頼性を確保することは容易ではない。

また、ばね式の展開ではどちらの設計方針をとるにしても過剰なエネルギーを有する状態で展開機構が固定されることは避けられず、リブは展開終了時に静止する位置を一旦通り越した後、静止位置に戻る。このため、リブ上に張られたメッシュやメッシュ鏡面を形成するコード等は、一度過剰に張り広げられた後、最

終状態に達する。このことは、後に第3章でより詳細に述べるが、鏡面精度を劣化させる要因となり、所望の鏡面精度を得ることをより困難にする。

2.3 モータとリンク方式の展開機構 モータとリンク機構により構成される M & L 方式の展開機構の一構成を第4図に示す。モータが一定の力でボールねじを回転させ、ボールねじに取付けられた同期プレートを押上げると同期ロッドが回転ヒンジを押して回転させる。回転ヒンジとリブの取付けられている展開ヒンジは平行四辺形リンク機構を構成しており、回転ヒンジの回転により展開ヒンジが回転しリブが展開する。

リブの最大展開力(展開トルク)すなわち展開ヒンジの展開トルク特性は、

$$\frac{T}{F} = \frac{L \tan \theta \cos(\theta - \beta)}{N \sin \beta \tan \theta + \cos \beta} \left\{ 1 + \frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right\} \quad (1)$$

ここで、

β : 10 度、

T : 展開ヒンジの展開トルク、

F : モータによりボールねじ軸方向に発生する力、

L : 展開ヒンジのアーム長、

N : リブの本数、

θ : 展開ヒンジの最終展開角度－展開角度、

ϕ : 同期ロッドとボールねじ軸の角度

で与えられる。

展開終了時に同期ロッドの角度 ϕ が 90 度、リブ本数 N が 7、展開ヒンジのアーム長が 100 mm となるよう設定した場合の最大展開力特性の(1)式による計算値を第5図に実線で示す。第5図には第3図に示した展開抗力の測定値も合わせて示す。この同期ロッドの角度 ϕ が展開終了時に 90 度になる構成により、展開が終了する直前から最大展開力が急激に増加する特性を得ることができ、展開抗力のプロファイルに類似でかつそれを上回る最大展開力を展開途中の全ての位置で得ることが可能となる。

従って、本鏡面の展開機構として M & L 方式のも

第4図 M & L 展開機構の構成(断面図)

第5図 M & L展開機構の展開力

ので展開終了時に同期ロッドの角度 ϕ が 90 度となる構成を採用することとした。第 5 図には試作した M & L 方式の展開機構の最大展開力特性の測定値を実線で示す。リンク機構の摩擦の影響等により測定値は計算値より小さいが、常に展開抗力の 1.8 倍以上の最大展開力を得ている。

また、展開終了位置の近傍では、同期ロッドの角度 ϕ はほぼ 90 度になり同期プレートが動いても同期ロッドの先端はほとんど動かず、展開ヒンジもあまり回転しない。このためリブの展開速度を非常に小さくすることができる。従って、展開終了時に展開機構が固定される場合でも、衝撃は小さくリブや鏡面が破壊されたり、リブが正常な展開位置を通り越すような状態は生じない。

これより、ばね方式の展開機構と比較して、より高い展開信頼性を有する展開機構を実現できることが期待できる。

3. 展開時鏡面形状再現性

3.1 展開方式による比較 第 6 図にメッシュの張力-歪み特性の測定値の一例を示す。数サイクルで張力-歪み特性の形状は安定し、明らかにヒステリシスを有することが分かる。

鏡面形状の調整後に鏡面展開が行われるが、ばね方式では、この際メッシュ鏡面は一旦張り広げられ大きな張力が加えられた後、縮んで展開時の形状になる。どの程度の過大な張力が加わるかは展開の状況のばらつきにより変化する。従って、張力-歪み特性のヒステリシスの影響で鏡面形状が変化する。M & L 方式ではばね方式のようにメッシュ鏡面が余分に張り広げられるような現象は生じないことから鏡面形状調整時の形状が維持され易い。従って、展開動作を繰り返す場合、M & L 方式はばね方式より鏡面形状の安定性が良く鏡面精度の劣化が少ないと考えられる。

第6図 メッシュの張力-歪み特性

第2表 鏡面誤差測定値とアンテナ利得低下量

反射鏡面	ϵ/D ($\times 10^{-4}$)	ϵ_r/D ($\times 10^{-4}$)	利得低下 (dB)	
			4 GHz	6 GHz
本アンテナ	1.1	0.1	0.1	0.2
ファンリブ 文献 11)	2.4	0.4	0.3	0.6
Harris ラジアルリブ 文献 7)	1.1	0.3	—	—
MBB ラジアルリブ 文献 9)	11.2	—	—	—

ϵ : 鏡面誤差, ϵ_r : 鏡面再現誤差, D : アンテナ開口径。
ファンリブ型のは実開口径の 2 倍の径とした。

展開動作を繰り返した場合の両方式の鏡面精度の測定結果より得られる精度の変化分を第 2 表に示す。M & L 方式がばね方式の半分の値である。この結果、M & L 方式の採用によりより高い鏡面形状の再現性が得られることが明らかになった。

3.2 鏡面成形 今回試作した鏡面は、S/C 帯共用アンテナに使用されることから 6 GHz 帯の電波に対して十分な鏡面精度 (1 mm rms 以下) を有していることが望まれる。

リブとリブとの間に挟まれた三角状のメッシュ曲面の部分をゴアと呼ぶ。また、ゴアのなかで鏡面形状を所望の形状に形成するためメッシュを複数の点で引留める際に生じる凹凸をピローと呼ぶ。メッシュ鏡面特有の鏡面変形としては、ゴアを単位とした周期的な鏡面変形およびピロー変形があり、これらがメッシュ鏡面の鏡面精度を劣化させる主要因である。

ピロー変形が極めて少ない高精度鏡面を形成するため本鏡面では鏡面を引留め成形する点の数を増加し、メッシュ中を通るコードの張力を高め、メッシュ面と裏面のインパーワイヤの結合長を微調整するための精密ねじ調整機構および高い張力のクォーツコードを保持しかつローカルなピロー変形を抑えるための大型のパッドを用いた鏡面調整装置を使用した。

第7図 鏡面調整手順

第8図 調整による鏡面精度の変化

第9図 鏡面誤差コンタ図

この鏡面構成により鏡面形状の調整を実施した。調整の手順を第7図に、調整による中央部分の2つのゴアの鏡面精度の変化を第8図に示す。1回の粗調整と3回の微調整によりC帯アンテナの目標値である1mm rmsを上回る0.86mm rmsの高精度な鏡面を実現できた。第8図には中央のリップを挟んで両側にあるゴア1とゴア2の調整による鏡面精度の変化を合わせて示す。鏡面誤差の値が大きいリップ先端部近傍で、ゴア1はゴア2と比べて鏡面を引留め点の数を約2倍に増やし、引留めるパッドの径を2.5倍に大きくしている。これらの効果によりゴア1はゴア2より少ない調整回数でより高い0.81mm rmsの鏡面精度を達成している。

また、全てのゴアをゴア1と同一の構成にすれば2回の微調整で1mm rms以下の鏡面精度を達成でき、少ない手間でも高精度の鏡面を実現できることが分かる。

第9図には鏡面誤差のコンタを示す。リップの配置に対応した周期的な誤差は見られない。また、第2表には、主要なラジアルリップ型やファンリブ型の鏡面誤差、鏡面再現誤差について鏡面開口径で正規化した値を比較して示す。本鏡面の鏡面誤差は、Harris製のラジアルリップ型⁷⁾のものと同様であり、従来のファンリブ型のものの1/2の値である。また、鏡面再現誤差は、Harris製のものの1/3、従来のものの1/4と小さい。

4. アンテナ特性

本鏡面と従来のファンリブ型の鏡面についてそれぞれの鏡面誤差測定値を用いアンテナ特性の解析を実施

した。鏡面誤差による利得低下量について第2表に示す。新たに開発した鏡面での利得低下は鏡面精度が高いため従来の鏡面の1/3と小さく、C帯の高い周波数域においても0.2dBと小さい。サイドローブ特性の計算結果を第10図に示す。新たに開発した鏡面のサイドローブレベルは約-25dB以下、ゴア単位の周期的変形のため生じるゴアローブレベルは-30dB以下であり、従来の鏡面のゴアローブレベルより約5dB低い値である。このことから、新たに開発した鏡面ではリップやクォーツコードの間隔に対応した変形やピロー変形のような周期的誤差が小さいことが分かる。また、C帯でもゴアローブレベル、サイドローブレベルの充分低い、従ってマルチビームによる周波数再利用が可能な鏡面が実現できたことが分かる。

第10図 鏡面誤差測定値によるアンテナ特性計算値

5. メッシュ鏡面のPIM発生量

メッシュ鏡面では、金属メッシュが絡み合って電波反射面を形成しているため、金属のポイントコンタクトが多数存在することから2つの周波数の異なる電磁波(周波数 f_1, f_2)が入射した場合、(2)式で示される周波数の電磁波が発生する。

$$f_N = f_2 \pm \frac{N-1}{2} \Delta f \quad (2)$$

ここで、 $\Delta f = f_2 - f_1$ 、 N : 発生次数

発生量はポイントコンタクト部の接触の状態や入力電力により変化する。接触の状態は主としてメッシュの張力に依存すると考えられる。そこで、NTTで開発した金めっきモリブデン細線を編んだ32ゲージのメッシュについて、アンテナ鏡面で発生するPIMの影響を評価するために必要なPIM発生量の入力電力依存性、メッシュ張力依存性を測定した。測定は対向したホーンアンテナ間にメッシュを挿入して測定する手法を用いた。

また、通信に際して実際に問題になるのはより高次のPIM発生量であるが高次のPIM発生量に関する報告は少ない^{10,14)}。これについても同じ方法で入力電力依存性、メッシュ張力依存性の測定を行った。第11図に測定系の概要を示す。入射波は3.5GHzと4.0GHzであり、3次、5次、7次、9次のPIM発生量を測定している。メッシュの張力の設定は70cm×120cmの面積の治具上にメッシュを多数の錐りにより均一に張り広げ、中央部を約40cm×80cmの面積の非金属の枠により挟み込み、設定された張力を維持した測定用メッシュ反射面を得ている。

メッシュ張力依存性、入力電力依存性についての測定結果を第12図に示す。メッシュ鏡面でのPIM発生量については、文献10)、12)～14)でも測定結果が

第11図 PIM測定系の構成

報告されている。第12図には文献13)に示された6GHzでの測定結果および文献14)にKu帯での測定結果の外挿として示された値を合わせて示す。これらは3次のPIM発生量の周波数の異なるデータではあるが、本測定結果とほぼ同一の対入力電力特性が得られている。メッシュの張力に対する発生量の変化については、張力0.5kg/m²と2kg/m²でのデータが示してある。張力の減少とともに発生量が増加することが分かる。また、3次のPIM発生量の入力電力依存性は、張力にかかわらずほぼ同様の傾向を示し、約2.5dB/dBの傾斜であることが分かる。また、同一ではあるがロットの異なるメッシュについて高次のPIM発生量を測定した。その結果を第13図に示す。第13図にはこのメッシュの3次の発生量を合わせて示してある。5次、7次のPIM発生量の入力電力依

第12図 入力電力依存性

第13図 高次PIM発生量の入力電力特性

存性については、その傾斜は約5 dB/dBであった。メッシュの張力に対する発生量の変化については、張力0.5 kg/m²と2 kg/m²でのデータが示してある。張力の減少とともに発生量が増加することが分かる。発生量の次数依存性については、3次と5次の差が入力電力密度65 dBm/m²で約30 dBであり入力電力密度の減少につれてその差が大きくなる傾向にあること、5次と7次および7次と9次の差はそれぞれ約20 dBであることが分かる。発生量の張力依存性については、張力0.5 kg/m²と2 kg/m²でのデータの比較から、張力の減少とともに発生量が増加し、約30 dBの差があることが分かる。本測定の測定限界は-100~-110 dBm/m²であり、測定誤差は±2 dBである。

マルチバンドアンテナ⁵⁾でPIM発生が問題となるS帯(送信帯域2.5~2.535 GHz, 受信帯域2.655~2.69 GHz)では、アンテナ鏡面上の送信信号の電力密度は約45 dBm/m²で、許容発生量の上限値は約-165 dBm/m²であり、受信帯域へ落ち込む不要波の次数は9次(2.675 GHz)以上となる。45 dBm/m²の入力での3次の発生量を入力電力依存性を約2.5 dB/dBとして求めると、メッシュ張力0.5 kg/m²で約-100 dBm/m²、2.0 kg/m²で約-125 dBm/m²となる。3次と9次のPIM発生量の差は入力電力密度45 dBm/m²で70 dB以上と推定されるので、張力0.5 kg/m²では約-170 dBm/m²、張力2.0 kg/m²では約-195 dBm/m²以下となる。従って、張力2.0 kg/m²では十分に許容値以下のレベルとなり、通信に悪影響を与えないことが分かる。

6. ま と め

展開抗力のプロファイルと類似の特性を得ることが可能なモータとリンク機構の組合せによる展開方式の採用により従来のばね方式に比べて展開信頼性を向上することができることを明らかにした。

また、この方式の採用によりばね方式のものより高い鏡面精度が得られることを示し、マルチバンド衛星用S/C帯アンテナとして十分な0.81 mm rmsの鏡面精度を実現できることを明らかにした。

さらに、メッシュ鏡面のPIM発生量についても測定を実施し、6 GHz帯やKu帯での測定結果と同等の発生量であることを確認するとともに、入力電力特性、メッシュ張力依存性を明らかにした。また、メッシュ鏡面の高次PIM発生量について測定を実施し、

5次、7次、9次の高次PIM発生量特性を明らかにした。この結果アンテナの構成、形状パラメータが分かればメッシュ鏡面でのPIMの発生による通信への影響を評価することが可能になった。

参考文献

- 1) 山本平一, 鮫島秀一: 情報化社会を担う通信衛星, スペクトラム, 1, 4 (1988), pp. 8-21.
- 2) Ohotomo, I., Kumazawa, H., Kawakami, Y. and Yasaka, T.: Development of the On-board Fixed and Mobile Multibeam Antenna for ETS-VI Satellite, AIAA 13th ICSSC, 90-0805-CP, 1990.
- 3) 上野健治, 熊沢弘之, 大友 功: マルチバンド通信衛星搭載アンテナの構成, 電子情報通信学会技術報告, SAT89-49 (1989).
- 4) 熊沢弘之, 板波隆雄, 上野健治, 近藤 彰, 大友 功: マルチバンド通信衛星搭載アンテナ系の一検討, 1990年電子情報通信学会秋期全国大会, B-186, 1990.
- 5) 上野健治, 板波隆雄, 熊沢弘之, 大友 功: マルチバンド通信衛星搭載アンテナの電気特性, 電子情報通信学会技術報告, AP90-90 (1990).
- 6) Tankersley, B. C. and Bartlett, H. E.: Tracking and Data Relay Satellite Single Access Deployable Antenna, National Telecommunications Conference Records NTC '77, 19-4, 1977.
- 7) Wong, G. G., Hamada, S. J. and Low, P. W.: TDRSS Spacecraft Antenna Farm, IEEE AP-S, 1, 24-10 (1989), pp. 507-510.
- 8) Schaefer, W., Drachenberg, F., Herbig, H., Schallig, R., Festa, A., Roederer, A. and Pontoppidan, K.: Unfurlable Offset Antenna Design for Multipurpose Applications, Collection of Technical Papers of 10th AIAA CSSC 84-0659, 1984, pp. 64-74.
- 9) Kellermeier, H., Kulterer, G., Steiner, H. M., Habersack, J. and Pontoppidan, K.: Surface Contour Measurement and Performance Analysis and Verification of the MBB Unfurlable Mesh Reflector, ESA Workshop on Antenna Technologies, ESTEC, 1989.
- 10) Kellermeier, H., Vorburgg, H. and Pontoppidan, K.: The MBB Unfurlable Mesh Antenna (UMA) Design and Development, Collection of Technical Papers of 11th AIAA Communication Satellite Systems Conference AIAA-86-0664, 1986, pp. 417-425.
- 11) Itanami, T., Minomo, M. and Ohotomo, I.: Fan Rib Type Deployable Mesh Antenna for Satellite Use, Acta Astronautica, 17, 5 (1988), pp. 561-566.
- 12) Kellermeier, H., Vorburgg, H., Pontoppidan, K. and Eaton, D. C. G.: The ESA/MBB Unfurlable Mesh Antenna Development for Mobile Services, Acta Astronautica, 19, 1 (1989), pp. 47-56.
- 13) Hobber, C. F., Pollard, D. L. and Nicholas, R. R.: Passive Intermodulation Product Generation in High Power Communication Satellites, AIAA 11th ICSSC 86-0657, 1986.
- 14) Heinze, H. and Vorburgg, H.: Experience Gained by Sector Model Testing of an Unfurlable Mesh/Rib Antenna, Proc. of 2nd ESA Workshop on Mecha. Tech. for Antenna ESTEC, Noordwijk, ESA SP-261, 1986.