アクティブフェーズドアレイアンテナ用 2 次元展開パネルの開発* (展開シーケンスの提案とヒンジ機構・ラッチ機構の開発)

神 野 誠^{*1}, 鈴木 龍太郎^{*2}, 飯 倉 省 一^{*3}

Development of a Two-Dimensional Deployable Panel for Active Phased Array Antenna (Proposal of Deployment Sequence and Development of a Hinge and a Latch)

Makoto JINNO^{*4}, Ryutaro SUZUKI and Shoichi IIKURA

^{*4} Toshiba Corporation, Corporate Research & Development Center,
1 Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa, 212-8582 Japan

Next generation LEO (Low Earth Orbit) System (NeLS) that would provide a global multimedia mobile satellite service for handheld user terminals has been studied by the Next-generation LEO System Research Center. The system needs large active phased array antennas on board the satellites. Therefore, it is essential to develop a two-dimensional deployable antenna panel. In this paper, a deployment sequence for active phased array antenna is proposed. The sequence will be able to provide a stiff and accurate antenna. Also, new types of hinge and latch mechanism are proposed for the antenna. Each hinge is located at reverse side of the panels after deployment, there is neither gap between panels. The newly developed latch pulls the shaft into the holder with very low torque, after the shaft is latched incomplete. The effectiveness of the proposed hinge and latch mechanism were confirmed by experiments. Next, we will develop the two-dimensional deployable panel for active phased array antenna by the proposed sequence with the proposed hinge and latch.

Key Words: Design, Space Equipment, Machine Element, Hinge, Latch, Two-Dimensional Deployable Panel, Active Phased Array Antenna

1. はじめに

IT 分野の発展にともない、移動通信に対するニーズは、より一層パーソナル化、マルチメディア化が進み、携帯端末による映像伝送が可能な通信衛星システムが望まれている。現在、郵政省を中心に次世代低軌道周回通信衛星システム NeLS (Next generation LEO (Low Earth Orbit) System) についての検討が進められており、通信・放送機構 川崎次世代 LEO リサーチセンターで、低軌道周回衛星群を利用した通信ネットワークの実現を目指したシステム検討、要素技術の研究開発が行われている^{(1)~(3)}。低軌道周回衛星を利用した通信システムでは、周回衛星から広角かつ高速にビーム操作を行うことが必要であり、アクティブフェーズドアレイアンテナの採用を前提としている。この場合、

アンテナは、数 m 四方から最大約 10m 四方になり、システム実現のためには、収納状態から、確実に展開し、かつ、展開後のアンテナの電気特性が優れたアンテナ展開機構の開発が不可欠である。

宇宙環境で使用される展開構造物に関する研究開発は、おもに、展開トラス構造に関するものであり^{(4)~(9)}、アクティブフェーズドアレイアンテナの 2 次元展開機構を対象とした研究開発は少ない⁽¹⁰⁾。

そこで、アクティブフェーズドアレイアンテナ用の展開機構を対象とし、パネル 4 枚 (1 枚: 1.5m×1.5m×0.03m) を折り畳んだ収納状態から、展開後に正方形 (3m×3m) のアンテナ平面を構成することが可能な 2 次元展開パネルを開発する。本論文では、まず、2 次元展開方式の展開シーケンスを提案する。そして、アンテナ電気特性の確保を考慮した機構設計とするために、従来問題であったパネル間の隙間やアンテナ面側の機構部をなくすることが可能となる新たなヒンジ機構および、展開後の面精度を維持するために必要な新たなラッチ機構を提案する。さらに、これらの要素試作と評価実験を行い、提案するヒンジ機構およびラッチ機構の有効性を確認したので報告する。

* 原稿受付 2000 年 8 月 30 日。

^{*1} 正員, (株) 東芝研究開発センター (〒212-8582 川崎市幸区小向東芝町 1)。

^{*2} 通信・放送機構 川崎次世代 LEO リサーチセンター (〒210-0005 川崎市川崎区東田町 2-11)。

^{*3} 正員, (株) 東芝小向工場 (〒212-8581 川崎市幸区小向東芝町 1)。

E-mail: makoto.jinno@toshiba.co.jp

2. 基本 要 求 仕 様

以下の基本 要 求 仕 様を前提に、アクティブフェーズドアレイアンテナを対象とした 2 次元展開機構の検討を進めた。

(1) 折り畳まれたパネル 4 枚を展開し、 2×2 枚の正方形のアンテナを構成すること。さらに、多数枚 ($M \times N$ 枚) への拡張性を考慮すること。

(2) 展開後にパネル間に隙間およびアンテナ面側に機構部などの凸部がないこと。

(3) 展開後の剛性および面精度が高いこと。

なお、本論文では、2 次元展開機構およびその機構要素技術の検討を行うことを主たる目的とするため、詳細仕様は特に設定しない。ただし、パネル 1 枚の寸法は $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \times 0.03\text{m}$ と仮定し、検討および要素試作を行った。

3. 提 案 す る 展 開 シ ー ケ ン ス

パネル展開機構を対象とした従来の研究開発は、おもに、屏風状に折り畳んだパネルを展開する 1 次元展開によるものが多い^{(6), (11)~(13)}。しかし、等方性かつ大面積の開口面が必要とされるアクティブフェーズドアレイアンテナでは、収納効率を考慮すると 2 次元的に展開するアンテナ展開機構が必要である。従来の 2 次元展開に関する研究開発^{(10), (14)}では、展開後にパネル間の隙間やアンテナ面側の機構部がなく、かつ剛性、面精度の高いアンテナ展開機構を提供することは困難である。そこで、図 1 に示すような展開シーケンスによる 2 次元展開方式のアンテナ展開機構を提案する。収納状態から 3 段階の展開により、4 枚のパネルを正形状に展開させる。3 段階の展開を、便宜上、順にトラス展開、ラッチ展開、パネル展開と呼ぶ。各展開は各展開軸に設けられたアクチュエータ（例えば、減速機付ステッピングモータ）により所定の展開速度で展開させる。

(1) Step 1: トラス展開 折り畳まれた 4 枚のパネルが、トラス展開軸を回転中心に展開されるとともに、衛星構体面に最も近いパネルがトラス構造により高剛性に支持される。

(2) Step 2: ラッチ展開 外側の 2 枚のパネルが、それぞれラッチ展開軸を回転中心に展開され、両パネルは先端部でラッチ機構によりラッチされる。

(3) Step 3: パネル展開 2 枚 1 組のパネルをパネル展開軸を回転中心に展開し、4 枚のパネルを正形状に展開させる。

提案する展開シーケンスにより、展開後に正方形のアンテナを構成することができる。また、トラス構造およびパネル間に配置するヒンジ機構により高剛性の

Fig.1 Proposed deployment sequence

アクティブフェーズドアレイアンテナを提供することが可能となる。さらに、パネル先端部をラッチさせるラッチ機構により、面精度の高いアクティブフェーズドアレイアンテナを提供することが可能となる。ただし、パネル間に隙間およびアンテナ面側に機構部などの凸部が生じないヒンジ機構と、パネル先端部で確実にラッチさせることが可能なラッチ機構の開発が必要である。

4. 内 折 り ヒ ン ジ 機 構

4.1 提案する内折りヒンジ機構の構成 表裏交互

に折り畳まれたアンテナパネルを展開する場合、図 2 (1) に示すように、アンテナ面が外側に折り畳まれている場合には、従来のヒンジを適用することで、展開後のパネル間の隙間をなくす構成にすることは容易である。しかし、図 2 (2) に示すようにアンテナ面が内側に折り畳まれたパネル間に従来のヒンジ機構を適用すると、パネル間にヒンジ機構の大きさに対応した隙間が生じたり、アンテナ面側に機構部が配置されることになる。提案する展開シーケンスでは、パネル展開において、アンテナ面が内側に折り畳まれる構成に

Fig.2 Conventional hinge configuration

Fig.3 Proposed internal hinge

Fig.4 Internal hinge and conventional hinge as stowed

なる。放射素子は、アンテナ面に等間隔で隙間なく並ぶことが理想であり、パネル間の隙間は、アンテナの放射特性を劣化させることになる。そこで、図3に示すようなヒンジ機構を提案する。それぞれのパネル背面部に円弧状のガイドアームが固定されている。ガイドアームが円弧方向にスライド可能となるよう、ローラサポートにガイドローラが配置されている。パネルを収納状態から展開させると、ローラサポートのガイドローラに沿って、ガイドアームが回転し、展開後には機構部はすべてパネル背面に収納される構成になっ

Fig.5 Experimental apparatus

Fig.6 Experimental configuration

ている。提案するヒンジ機構を、アンテナ面が内側に折り畳まれているパネル間に配置するヒンジ機構として内折りヒンジ機構 (Internal hinge mechanism) と呼ぶ。

4.2 内折りヒンジ機構の試作と剛性評価 展開後のヒンジ機構の回転 (ねじり) 剛性は、アンテナ全体の面外固有振動数を支配する要因の一つである。そこで、内折りヒンジ機構と従来のヒンジ機構 (外折りヒンジ機構と呼ぶ) を試作し、提案する内折りヒンジ機構の展開後のねじり剛性が十分であるかを評価した。図4に示すように収納状態では、内折りヒンジ機構のガイドアームとパネルとの干渉を避けるため、内折りヒンジ機構のガイドアームの外径 D は、外折ヒンジ機構部分のパネル間隔 (外折りヒンジ機構の外径) を d 、パネル厚さを t とすると、 $D/2 < d + t$ とする必要がある。試作したヒンジ機構では、 $d=80\text{mm}$ 、 $t=30\text{mm}$ 、 $D/2=109.5\text{mm}$ とした。

図5に示す剛性測定装置により、展開後の剛性を比

較した。図 6 に示すように回転自在の外折りヒンジ（上側）と測定対象のヒンジ（下側）の 2 カ所でアーム 1 およびアーム 2 は支持されている。測定対象ヒンジのラッチピンで回転をロックした展開後の状態で、アーム 1 の先端部に荷重を加えて回転トルクを与え、荷重の影響を受けないアーム 2 の先端部の変位を測定することでヒンジ部分のねじれ角を測定した。測定結果を図 7 に示す。また、同図より求めた剛性値を表 1 に示す。実験結果から明らかなように提案する内折りヒンジ機構は、質量が増えるものの、従来のヒンジ機構と同等以上の剛性が得られることが確認できた。なお、回転方向によって剛性値が異なるのは、方向により荷重の受ける面が異なるためである。

4.3 内折りヒンジ機構の拡張性 内折りヒンジ機構と外折りヒンジ機構をパネル間に交互に配置することにより、多数枚（ $M \times N$ 枚）においてもパネル間に隙間のないアンテナを提供することが可能となる。図

Fig.7 Experimental results of torsional stiffness

Table 1 Stiffness and weight of hinges

Item	Stiffness $\times 10^3$ [N·m/rad]	Weight [kg]
Internal hinge	31.9 (Fitted line 1) Stowed direction	2.15
	104.3 (Fitted line 2) Deployed direction	
Conventional hinge	18.5	1.39

Fig.8 $M \times N$ panels antenna configuration

8に4×4枚構成の場合の例を示す。図中の数字は、衛星構体からパネルが連結されている順番を示している。

また、収納効率も向上させることが可能である。パネル枚数を $M \times N$ 枚、パネル厚さを t 、外折ヒンジ機構の幅を d とすると、収納時の積層高さ h は、従来のヒンジ機構（外折りヒンジ機構のみ）をパネル間に配置した場合、

$$h = t(M \times N) + d(M \times N - 1) \quad (1)$$

内折りヒンジ機構と外折りヒンジ機構をパネル間に交互に配置した場合、

$$h = t(M \times N) + d \left(\text{int} \left\{ \frac{M \times N - 1}{2} \right\} \right) \quad (2)$$

となり、積層高さをおよそ $d(M \times N - 1)/2$ 低くすることが可能である。たとえば、 $M \times N = 4 \times 4$ 枚、 $t = 30$ mm、 $d = 80$ mm とすると、収納時の積層高さ h は、従来のヒンジ機構だけの場合 $h = 1680$ mm、提案する方法の場合 $h = 1040$ mm となり、約 38% 減少させることができる。なお、 $M \times N$ 枚の場合の展開シーケンスや機構上の課題については、さらに詳細を検討する必要がある。

5. 引き込みラッチ機構

5.1 提案する引き込みラッチ機構の構成 提案する展開シーケンスのラッチ展開時にパネル間をラッチさせるラッチ機構を検討する。従来のラッチ機構を図 9 に示す。ラッチ軸が受け部方向に移動するとともにラッチ爪を押し広げ（2 点鎖線で図示）、さらに、ラッチ爪がラッチ軸を押さえ付ける状態まで移動させてラッチ動作が完了する（実線で図示）。この従来のラッチ機構によるラッチ動作を確実にを行うためには、十分な押付け力で、ラッチ軸を完全に受け部まで移動させることが必要である。より信頼性のあるラッチ機構を

提供するためには、熱変形によりパネルに反りなどが生じ、ラッチが不完全な状態に陥るようなことも想定しなければならない。ラッチが不完全な状態でさらにラッチ軸を受け部まで引き込むには、剛性のあるパネルを曲げて引き込むだけの力ないしトルクが必要である。ラッチ展開用のアクチュエータで、パネル先端部のラッチ機構にそのような力ないしトルクを与えるためには、過大なトルクが必要である。または、新たなアクチュエータや動力伝達機構を付加する必要がある。そこで、図10に示すようなラッチ機構を提案する。提案するラッチ機構は、パネル間に反り（例えば20mm程度と仮定する）がある場合でもラッチする機構（第1ラッチ）が設けてある。まず、ラッチ展開動作で第1ラッチがラッチされる。パネルの反りの量によって第1ラッチから受け部の範囲（0～20mm）で停止する。次にパネル展開動作がはじまる。パネル展開によりラッチ軸とラッチ軸先端のラッチアームが、受

Fig.9 Conventional latch

Fig.10 Proposed drawing latch mechanism

け部側に対して回転する。第1ラッチのローラガイドに沿って、ラッチローラが回転するとともに、受け部方向に押し付け力が加えられ、ラッチ軸がこの押し付け力によって下降して、受け部方向へ引き込まれ、第2ラッチ（図中点線で表示）が動作し、ラッチ動作が完了する。パネル展開軸から反力の作用する位置までの距離（ラッチアームの長さ）は短いため、ラッチ展開時に、ラッチ展開用のアクチュエータでパネル先端部のラッチ軸を引き込む場合に比べ、パネル展開用のアクチュエータでラッチ軸を引き込むためのトルクは小さい。提案するラッチ機構を引き込みラッチ機構（Drawing latch mechanism）と呼ぶ。

5.2 ラッチ軸の引き込みトルク つぎにパネル展開時のラッチ軸の引き込みトルクを求める。図11にラッチ軸の引き込み時の状態をモデル化した図を示す。ラッチ軸の位置 $P_{LS} = (0, y_{LS})$ は、ラッチアーム長を l 、ラッチアームの回転角を θ 、ローラガイドを円弧とした時の半径を R とすると

$$y_{LS} = l \cos \theta + \sqrt{R^2 - l^2 \sin^2 \theta} \quad (3)$$

と表せる。ただし、 $y_{LS} \leq R$ 、 $l < R$ である。また、ラッチ軸の回転トルク T は、ラッチローラがローラガイドから受ける力を F とすると、ラッチ軸まわりのモーメントの釣り合いから、

$$T = Fl \sin(\pi - \theta - \theta_1) \quad (4)$$

となる。ここで、

$$\tan \theta_1 = \frac{l \sin \theta}{\sqrt{R^2 - l^2 \sin^2 \theta}} \quad (5)$$

である。 F は、パネルの曲げ剛性に起因する復元力を F_p とすると、

$$F = \frac{F_p}{\cos \theta_1} \quad (6)$$

と表せる。さらに、 F_p は、パネル先端部の剛性を k とすると、ラッチ後の初期位置からの変位に比例するため、

Fig.11 Model of drawing latch

Fig.12 Latch torque

Fig.13 Latch holder force

Fig.14 Maximum of latch torque

Fig.15 Maximum of latch holder force

$$F_p = k(R - y_{LS}) \quad (7)$$

となる。また、ホルダ部の受ける力 F_H は、 F の x 方向成分、すなわち、

$$F_H = F_p \tan \theta_1 \quad (8)$$

となる。式 (3) ~ 式 (8) より求めたラッチ軸の回転

Fig.16 Experimental apparatus for drawing latch

(1) Before second latch (2) After second latch

(3) Latch torque

Fig.17 Experimental results of drawing latch

トルク T およびラッチ軸がホルダ部を押し付ける力 F_H を図 12, 図 13 に示す。パラメータは、 $l = 20 \text{ mm}$, $k = 10.5 \times 10^3 \text{ N/m}$, ラッチ軸の初期位置 $y_{LS0} = 42 \text{ mm}$ (引き込み量: 20 mm) である。 $R = 42 \text{ mm}$ の場合が、次節で示す評価実験で試作した引き込みラッチ機構の設計値である。さらに、 R/l に対する T および F_H の最大値を図 14 および図 15 に示す。ローラガイドの半径がラッチアームの長さに対して小さい場合、すなわち $R/l \leq 1.5$ では、 T および F_H は、非常に大きな値となっている。したがって、 $R/l = 2$ 程度あるいはそれ以上に設定することが必要である。

5.3 引き込みラッチ機構の試作と評価実験 提案する引き込みラッチ機構により、ラッチが不完全な状態

でもラッチ軸を引き込むことが可能であることを図 16 に示す実験装置により確認した。外折りヒンジ 2 ヶ所で回転自在に支持されたパネルを減速機付ステッピングモータにより、収納状態から展開し、その時の展開トルク（引き込みトルク）を測定した。パネルは実験的に $460\text{mm} \times 48\text{mm} \times 10\text{mm}$ のアルミ板材とし、先端部の引き込みラッチ機構をラッチ不完全な状態で固定した後にパネル展開動作を行った。図 17(1)(2)に示すように、ラッチが不完全な状態から、ラッチ軸を引き込んでいるのが確認できる。また、引き込みトルク（引き込み量：20mm）は、図 12 の $R=42\text{mm}$ の解析値と同様の結果が得られている。実験値の引き込みトルクが、解析結果に比べ全体的に大きいのは、すべり軸受けの摩擦トルクに起因するものと考えられる。図 13 によると、ラッチ軸がホルダ部を押し付ける力 F_H は最大 65.8N である。さらに、2 ヶ所の外折りヒンジ部分は、支持間距離（約 200mm）が短いそれぞれ F_H の 2~3 倍に増大された反力が生じる。これらの部分にはすべり軸受け（直径：16~28 mm, 摩擦係数：0.05~0.15）を用いているため、トータルで $0.5\text{N}\cdot\text{m}$ 程度の摩擦トルクが生じることになる。

なお、ラッチ展開時に、ラッチ展開用のアクチュエータでパネル先端部のラッチ軸を引き込むことを考えると、引き込みトルクは $10.5 \times 10^3 \text{ N/m} \times 0.02 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ （パネル寸法）= $315 \text{ N}\cdot\text{m}$ となり、提案する引き込みラッチ機構は、1/100 以下のトルクである。

以上のように、提案する引き込みラッチ機構は、新たにアクチュエータや動力伝達機構を設けることなく、極めて低トルクでラッチ軸を引き込むことができ、シンプルかつ軽量のラッチ機構といえる。

6. おわりに

アクティブフェーズドアレイアンテナの展開機構を対象とし、パネル 4 枚を折り畳んだ収納状態から、展開後に正方形の平面を構成することが可能な 2 次元展開方式のアンテナ展開機構を開発するために、展開シーケンスの提案を行い、さらにその展開シーケンスを実現するために必要な要素技術の開発を行った。以下に主な結果をまとめる。

(1) トラス展開、ラッチ展開、パネル展開の展開シーケンスからなる 2 次元展開方式を提案した。

(2) 従来問題であったパネル間の隙間や放射面側の機構部をなくすことが可能な内折りヒンジ機構を提案し、評価実験により従来の外折りヒンジ機構と同等以上の剛性が得られることを確認した。また、多数枚 ($M \times N$ 枚) への拡張性を示した。

(3) 展開後の面精度を維持するために必要な新たな引き込みラッチ機構について提案し、機構解析により、極めて低トルクでラッチ軸を引き込むことが可能であることを示し、評価実験によりその有効性を確認した。

今後は、提案する展開シーケンスおよび内折りヒンジ機構、引き込みラッチ機構を採用したアクティブフェーズドアレイアンテナ用の 2 次元展開機構を開発する。

本研究開発は、通信・放送機構の研究開発により実施した成果である。最後に、日頃ご指導頂く早稲田大学安田靖彦リーダーに深謝いたします。

文 献

- (1) Suzuki, R. et. al., Proc. of the sixth International Mobile Satellite Conference, (1999), 18-23.
- (2) 秋葉敏克・ほか 4 名, 第 12 回「電磁力関連のダイナミックス」シンポジウム, (2000), 123-126
- (3) 安田靖彦・ほか 5 名, 通信・放送機構 平成 12 年度研究成果発表会予稿集<席上発表編>, (2000), 65-76
- (4) Miura K. and Furuya, H., AIAA J., **26**-8, (1988), 995-1002.
- (5) Fager, J. A., NASA CP-2269, Part 1, (1983), 513-525.
- (6) Coyner, J. V., NASA CP-2368, Part 1, (1985), 213-233.
- (7) Onoda, J., J. Spacecraft and Rockets, **25**-2, (1988), 109-116.
- (8) 中村邦彦・ほか 2 名, 機論, **64**-617, C, (1998), 191-202.
- (9) 角田博明・ほか 4 名, 日本航空宇宙学会誌, **46**-539, (1998), 675-681.
- (10) Tabata, M., Proc. of the International Conference on Adaptive Structures and Technologies, (1997), 434-443.
- (11) 日野秀男・ほか 7 名, 第 32 回宇宙科学技術講演会講演集, (1988), 614-615.
- (12) 古川功一・高原憲一, 第 39 回宇宙科学技術講演会講演集, (1995), 581-582.
- (13) 東芝レビュー, **55**-3, (2000), 39.
- (14) Miura K. and Natori M., Space Solar Power Review, **5**-4, (1985), 345-356.