

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14208

研究課題名（和文）全方位通信可能な球型フェーズドアレイ無線機の研究

研究課題名（英文）Study on Spherical Phased-Array Transceivers for Omnidirectional Communication

研究代表者

白根 篤史（Shirane, Atsushi）

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：40825254

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超小型衛星による次世代の高速衛星通信の実現に向け、小型・軽量、そして姿勢制御不要な全方位通信が可能な球型フェーズドアレイ無線機を、折り畳み可能な多面体をフレキシブル基板で構成する独自のアプローチによって実現してきた。これまで、小さく畳み、平面に大きく展開する構造が活発に研究されてきたが、アンテナを所望の方向に向ける姿勢制御機構が超小型衛星搭載への課題となっていた。本研究では、アンテナ面積および姿勢制御の両方の課題を同時に解決するため、平面に展開するのではなく、折り畳まれた多面体を立体的に球面に展開する構成をとり、必要となる技術について試作評価を行い有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の球面展開型フェーズドアレイは、SpaceX社のような数百kg級衛星の非展開型フェーズドアレイや、現在研究開発段階にある平面展開型フェーズドアレイと比べても、アンテナ指向性を全方位に持つことで姿勢制御を不要にし、さらに多面体構成の展開構造によってコンパクトな収納を可能にすることで、一桁以上の軽量化を実現できる。飛躍的な打ち上げコストの低下により、通信衛星打ち上げへの参入障壁が下がり、あらゆる場所・時・人・モノがつながる世界の到来を加速する。

研究成果の概要（英文）：Toward the realization of next-generation high-speed satellite communications using small satellites, this research has realized a spherical phased-array transceiver that is compact and lightweight, and can communicate in all directions without the need for attitude control, using an original approach that consists of a foldable polyhedron with a flexible substrate. Although the structure that folds small and expands to a flat surface has been actively studied, the attitude control mechanism that directs the antenna in a desired direction has been a challenge for installing the radio on a small satellite. In this study, in order to solve both antenna area and attitude control issues at the same time, a configuration in which the folded polyhedron is expanded into a spherical shape was adopted instead of expanding it into a flat surface.

研究分野：無線通信集積回路

キーワード：衛星通信 集積回路 無線電力伝送 小型衛星 フェーズドアレイアンテナ フレキシブル基板

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

衛星通信の進展は、世界人口のおよそ半数の人々に新たにインターネット接続をもたらし、すでにネットワークが敷設されているような地域であっても、老朽化した光ファイバや災害時の代替ネットワークとしての役割が期待されている。上空 2000km 以下の低軌道に多数の衛星を投入しコンステレーションを構成することで、高速、低遅延でありながら全世界をカバーできる通信ネットワークの構築が進められている。現在最も大規模な衛星コンステレーションを構築する SpaceX 社は、重量 200kg 以上の衛星をこれまでに 700 機以上打ち上げている。

衛星の重量は、打ち上げコストに直接影響するため、より多くの衛星を打ち上げるために最も重要な要素の一つである。軽量化実現のため、これまで衛星の小型化、低消費電力化が盛んに研究されてきた。低消費電力化は、太陽電池、バッテリー、および配線の小型・軽量化につながる。現在、衛星通信用アンテナのサイズに関しては、様々な膜面展開機構が研究されており、衛星サイズを超えて何倍にも大きく展開するアンテナの実現が検討されてきている。大きく展開した膜面上に多数のアンテナをアレイ状に配置し、フェーズドアレイ無線機を構成することで、アンテナ利得および出力電力を向上させ、さらにビームフォーミングにより指向性制御を可能にする。しかし、平面上に並べられたフェーズドアレイで制御できる指向性は、球面座標系 (θ, ϕ) とともに $\pm 60^\circ$ 程度であり、姿勢制御機構が必要となるため、衛星全体の軽量化を困難にしている。

本研究は、姿勢制御を不要にするには、無線機にはどのような構造が求められるのか。言い換えれば、あらゆる方向に指向性を持たせるにはどうすればよいのか、という問いを発端としている。一般的な無線通信で用いられる無指向アンテナは、あらゆる方向の通信を可能とするが、衛星通信の高速化には伝搬損失の大きい Ka 帯(28GHz 帯等)以上の高い周波数帯の利用が必須であるため、高い指向性を有する必要がある、なおかつあらゆる方向に指向性を制御する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、上記の問いの一つの解として、球面上にアンテナ素子を搭載した全方位指向可能なフェーズドアレイ無線機を提案する。これまで、平らに広がる面として考えていたフェーズドアレイ無線機を、球面上に展開することで、姿勢制御することなくあらゆる方向への通信を可能とする。本研究の目的は、全方位通信が可能な球型フェーズドアレイ無線機の構成方法および設計方法を理論的に明らかにすること、そしてプロトタイプとなる無線機の試作を通してその妥当性を実証することである。

3. 研究の方法

球型フェーズドアレイ無線機の構成方法の検討：

本研究では、球型フェーズドアレイ無線機を、フレキシブル基板を用いた多面体で構成する。任意の球面に同相な多面体は、平坦に折り畳み可能であり、打ち上げ時には畳んでおき、軌道投入後に大きく開くことが可能な球面展開型フェーズドアレイが実現可能である。多面体を構成するために、折り曲げ可能かつ高周波特性に優れた Liquid Crystal Polymer (LCP) フレキシブル基板を用いて、アンテナおよび高周波回路の構成を検討する。このとき、上述のようにフレキシブル基板上の折り曲げ線をまたいで配線することができないため、パッチアンテナとフェーズドアレイ IC の接続をワイヤレス化する。球面の中心に無指向性のアンテナを配置し、オンチップアンテナを搭載したフェーズドアレイ IC を用いて電波の送受信を行う。送受信した電波の位相調整と増幅を IC 内で行い、反対面である表面にあるパッチアンテナに接続する構成をとる。

球型フェーズドアレイ無線機の理論検討：

球型フェーズドアレイ無線機の構成を決定後、球型特有のパラメータと指向性の関係について理論検討を行う。球の半径を大きくすると実効的なアンテナ面積が大きくなり、より長距離の通信が可能となる。また、多面体の面の数は、多いほど出力電力が増加し、さらにフェーズドアレイのアンテナ間隔が縮まり、不要方向へのサイドローブの抑圧につながる。これら 2 つのパラメータと衛星通信に用いるキャリア周波数から、フェーズドアレイの性能を理論的に計算し、衛星通信の回線要求を満たすよう値を決定する。平面上に構成される一般的なフェーズドアレイに対して、本無線機は、球面に沿ってアンテナ素子が搭載されるため、球面による経路差すなわち位相差を考慮する必要がある。フェーズドアレイ IC を用いてこの位相差を補償することで所望の方向への指向性を制御する。

球型フェーズドアレイ無線機のプロトタイプ試作：

本無線機のプロトタイプを試作し、測定評価を行うことで、球型フェーズドアレイの構成方法および理論検討の妥当性を実証する。周波数としては、次世代の衛星通信の周波数帯として利用が期待されている Ka 帯の 28GHz で設計を行う。まず、フェーズドアレイ IC およびフレキシブル基板上にてアンテナの試作を行うことで、球型無線機を構成する要素ブロックの性能確認を行う。そして、球型フェーズドアレイ無線機のプロトタイプとして、正 20 面体の各面にアンテナ素子を搭載したフェーズドアレイ無線機を試作する。本実験で得られた結果と理論値を比較

し、構成方法およびその理論検討の妥当性を実証することで、さらなる大規模球型フェーズドアレイ無線機実現の基礎を築く。

4. 研究成果

フレキシブル基板上にフェーズドアレイ無線機を構成し、折りたためる無線機を作成した(図1)。小型衛星用ヘテロセグメント液晶ポリマー(LCP)基板上のKaバンド64素子展開型アクティブフェーズドアレイ送信機(TX)を提案した。提案したフェーズドアレイTXは、6層と2層のLCP基板を一体化することで、大きなアレイサイズの実装と小さなフォームファクタを実現した。ヘテロレイヤー構造を考慮したアンテナ設計と伝送線路設計を行い、46.7dBmのEIRPを達成し、提案されたフェーズドアレイTXは256-APSK DVB-S2Xをサポートすることに成功した。提案したアクティブフェーズドアレイTXは、9.65gの軽量性に加え、大きなアンテナ開口サイズにより、低打ち上げコストおよび高速衛星通信に大きく貢献するものである。

また、折り曲げ線を通る配線無くすために無線電力伝送による電力供給手法を提案し、実際に試作評価を行い有効性を確認した。提案したワイヤレス給電無線機トランシーバは、オンチップ・バトラー・マトリクスを組み込むことで、ビーム制御フリーの無線給電を実現した。複数のビーム角度でビームフォーミングが可能である。無線給電トランシーバのプロトタイプ(図2)は、PCB上のアレイアンテナ、Si CMOS 65nmプロセスで製造されたオンチップ・バトラー・マトリクスと整流器から構成され、無線電力伝送(WPT)は、RF-DC変換効率12.2%を達成しながら、24GHzで0dBmの入力電力で0.12mWを生成する。同時に無線通信も利用可能で28GHzの通信性能は、RXモードとTXモードの両方で、100MHz帯域幅の64QAMで測定を行い、有効性を確認した。

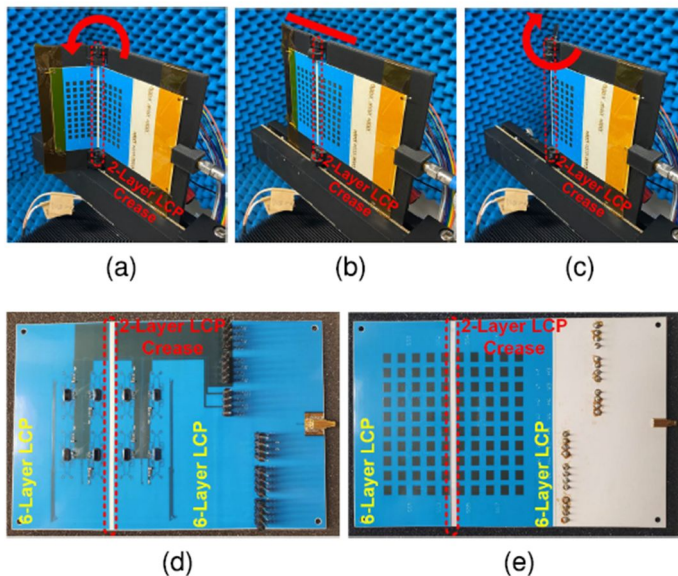


図1 作成したフレキシブル基板上のフェーズドアレイ無線機の写真 (a) 谷折り (b) フラット (c) 山折り (d) 部品面 (e) アンテナ面

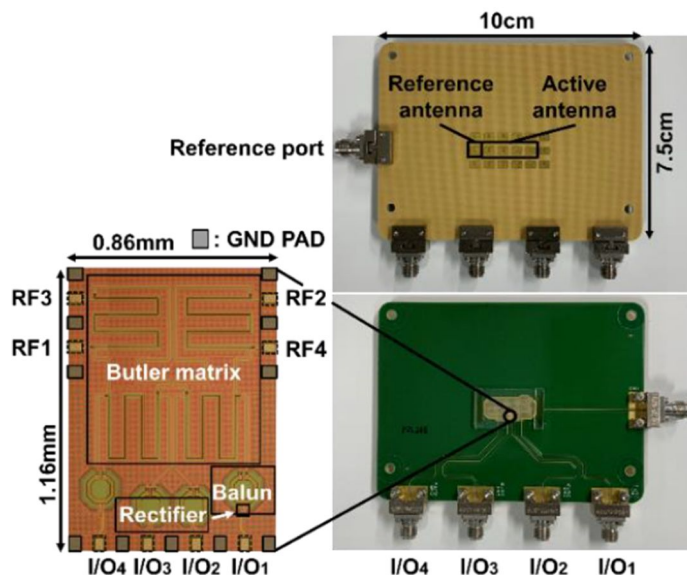


図2 試作した無線給電トランシーバの写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 You Dongwon, Wang Xiaolin, Herdian Hans, Fu Xi, Lee Hojun, Ide Michihiro, Gomez Carrel Da, Li Zheng, Mayeda Jill, Awaji Daisuke, Pang Jian, Sakamoto Hiraku, Okada Kenichi, Shirane Atsushi	4. 巻 11
2. 論文標題 A Ka-Band Deployable Active Phased Array Transmitter Fabricated on 4-Layer Liquid Crystal Polymer Substrate for Small-Satellite Mount	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 69522 ~ 69535
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3291814	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 You Dongwon, Xi Fu, Herdian Hans, Wang Xiaolin, Narukiyo Yasuto, Fadila Ashbir Aviat, Lee Hojun, Ide Michihiro, Kato Sena, Li Zheng, Wang Yun, Awaji Daisuke, Pang Jian, Sakamoto Hiraku, Okada Kenichi, Shirane Atsushi	4. 巻 33
2. 論文標題 A Ka-Band 64-Element Deployable Active Phased-Array TX on a Flexible Hetero Segmented Liquid Crystal Polymer for Small Satellites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Microwave and Wireless Technology Letters	6. 最初と最後の頁 903 ~ 906
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LMWT.2023.3264810	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Keito Yuasa, Sena Kato, Michihiro Ide, Kenichi Okada, and Atsushi Shirane
2. 発表標題 Beam Control Free 28GHz 5G Relay Transceiver and 24GHz Wireless Power Receiver Using On-Chip Butler Matrix
3. 学会等名 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 Dongwon You, Xi Fu, Hans Herdian, Xiaolin Wang, Yasto Narukiyo, Ashbir Aviat Fadila, Hojun Lee, Michihiro Ide, Sena Kato, Zheng Li, Yun Wang, Daisuke Awaji, Jian Pang, Hiraku Sakamoto, Kenichi Okada, and Atsushi Shirane
2. 発表標題 A Ka-Band 64-element Deployable Active Phased Array Transmitter on a Flexible Hetero Segmented Liquid Crystal Polymer for Small Satellites
3. 学会等名 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 Xiaolin Wang, Dongwon You, Xi Fu, Hojun Lee, Zheng Li, Daisuke Awaji, Jian Pang, Atsushi Shirane, Hiraku Sakamoto, Kenichi Okada
2. 発表標題 A Flexible Implementation of Ka-Band Active Phased Array for Satellite Communication
3. 学会等名 International Microwave Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------