

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420316

研究課題名(和文)フレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナ要素技術の研究

研究課題名(英文)Fundamental Technologies for Flexible Phased Array Antenna

研究代表者

佐藤 史郎 (SATO, FUMIO)

山形大学・理工学研究科・客員教授

研究者番号：80511980

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：衛星放送の簡易モバイル受信に必要なフレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナ実現に向けて、その要素技術開発を目的とした。フレキシブルな有機フィルムから成るマイクロストリップ線路をベースに、電磁界シミュレーションによるデバイス考案と設計、低コストな印刷法によるプロトタイプを試作により、低損失な新しいフレキシブル・プリント可能な可変移相器およびパッチアンテナと組み合わせたアンテナユニットの特性を明らかにした。また、上記デバイス設計法の改善とそれらのデバイスに適應する給電方式およびアレイ化基本方式について動作シミュレーションを行い、フレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナ実現の見通しを得た。

研究成果の概要(英文)：Fundamental technologies for flexible phased array antenna required for mobile reception system for satellite broadcasting have been investigated, using electro-magnetic simulation and fabrication process by screen printing method. A new type of flexible, printable and variable phase shifter having low insertion loss characteristics has been developed for the first time. Characteristics of the flexible patch antenna followed by the phase shifter as an antenna unit were also clarified from the power supply point of view. Performance of 4-arrayed system of antenna unit was investigated by simulation as a first step for phased array antenna. It was confirmed that the phase scanning and synthesis of power could be conducted by the above variable phase shifter. These results support the realization of flexible phased array antenna.

研究分野：総合理工

キーワード：フェーズドアレイアンテナ 可変移相器 ポリマーアクチュエータ 挿入損失 マイクロストリップライン パッチアンテナ

1. 研究開始当初の背景

爆発的に急増しつつある通信トラフィックや、最近の複雑化してきている無線通信環境に対応する効率的な無線通信技術が求められている。フェーズドアレイアンテナは、高周波帯における無線通信の指向性利得を向上することにより、通信の大容量化・高速化を実現するキーデバイスの一つとして、電波資源の有効活用に貢献する

フェーズドアレイアンテナは、個々のアンテナ素子と、それぞれから出力される高周波信号の位相を揃える移相器、および給電回路等の部品からアレイ構成されるもので、これまでも衛星通信用として様々なタイプのデバイスが研究開発されてきた。中心課題は、低損失・高効率化、小型化などであるが、とくに中核を成す移相器の性能や機能がフェーズドアレイアンテナとしての性能を大きく左右する。最近では、低損失な MEMS スイッチを用いた 24GHz 帯の移相器が開発されている。

我が国の 12GHz 帯衛星デジタル放送サービスは、パラボラアンテナによる固定受信システムをベースとしている。現状のパラボラアンテナは、直径～30cm、重量～数 kg であるが、受信にはアンテナ軸を正確に電波到来方向に整合させるための機械機構系が必要であるので、地上デジタル放送のように、簡単に持ち運んで、任意の場所で受信するというモバイル受信はこれまでは困難であった。しかし、今後は、大規模災害時の避難場所や、その他の受信設備のない場所での衛星放送受信を可能とするため、丸めて折り畳んでコンパクトに持ち運ぶことができ、アンテナ軸を電波到来方向に対して電氣的に調整できる機械機構系不要なフレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナの実現が求められるものと予想している。車載用など、いくつかの衛星放送モバイル受信アンテナが開発されているが、いずれもフレキシブルとはならない。

一方、エレクトロニクスデバイスのフレキシブル化は、有機材料を用いた有機 EL ディスプレイ、フレキシブル有機太陽電池、フレキシブル有機トランジスタ、フレキシブル有機センサ、などで着々と進められている。有機材料の活用は、柔軟性、伸縮性、軽量・薄型・大画面など、材料特性からもたらされる新しい機能の創出だけでなく、従来のシリコンデバイス製造技術に比べて格段に省電力・省資源・省スペースな印刷法によって製造できるメリットが大きい。従って、フレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナは、上記のフレキシブル・プリンタブル・エレクトロニクスデバイスと整合性の高い将来の無線通信システムとしても期待される。

2. 研究の目的

本研究では、我が国の 12GHz 帯の衛星デジタル放送に対して、コンパクトに持ち運び便利で、どこでも簡易に受信できるようなフェーズドアレイ・アンテナシステムの実現に必要な要素技術の開発を目的とする。これにより、たとえば大規模災害時に避難場所へ持ち運び、アンテナの据え付けが不要で、電氣的にアンテナ軸を調整することにより簡易な受信セットアップを可能とする。このため、本研究で目標とするフレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナの要求条件を以下のように設定する。

- (1) 12GHz 帯の高周波信号受信
- (2) フレキシブル
- (3) 低コストな印刷製造可能
- (4) 低損失・高効率化

本研究では、キーとなる要素技術として、アンテナ基本構造の構築、フレキシブル・プリンタブルな可変移相器基盤技術の開発、フレキシブルパッチアンテナおよび給電回路方式の開発、アレイ化基盤技術の開発を行う。これらの結果から目的のフェーズドアレイ・アンテナシステム実現に向けた課題を整理し、今後の研究開発に資することとする。

3. 研究の方法

- (1) フレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナ基本構造の構築

従来のハード基板を用いたフェーズドアレイ・アンテナに対して、本研究ではフレキシブル・プリンタブルな特性とするために、主材料としてフレキシブルな有機材料を用いたマイクロストリップ線路(MSL)型の新しい構造を探索する。またその構造において、従来の有機材料特性や既存の印刷技術により形成するパッチアンテナ、可変移相器あるいは導波路などの特性が、12GHz 帯のフェーズドアレイ・アンテナ動作への適応性を有するかを検討する。

- (2) 新しいフレキシブル・プリンタブルな可変移相器の開発

これまでの MSL 型の可変移相器としては、シリコンの可変容量ダイオード(バラクタ)や GaAsMESFET、あるいは低損失な MEMS マイクロ波スイッチが活用されてきた。また、誘電率可変方式として液晶を用いた移相器も開発されている。しかし、いずれも本来フレキシブル・プリンタブルとすることができない上、容量可変範囲、挿入損失、位相可変駆動電圧などに課題がある。本研究では、当初、有機半導体を用いた可変容量ダイオード素子を検討したが、容量可変範囲を大きくとる見通しが不明となったので、新しいフレキシブルな有機可変移相機構を着想することとした。

- (3) デバイス設計・製作

MSL 型のデバイス・回路設計(パッチア

ンテナ素子、可変移相器、給電方式、アレイ化基本方式) とそれらの動作検証は、電磁界シミュレーション[CST: MicroWave Studio (AET) 社、あるいは Sonnet]で行った。

パッチアンテナ素子や可変移相器回路、導波路作製法としては、従来の無機半導体デバイス作製に用いられてきた薄膜真空堆積技術やフォトリソグラフィ法などに対して格段に省電力・省資源・省スペースで低コストな印刷技術の適応性を確認する。

4. 研究成果

(1) フレキシブル・フェーズドアレイ・アンテナ基本構造

第一次基本構造として、フレキシブルな有機材料フィルムの誘電体層とスクリーン印刷法で形成する金属導波路から成る MSL 型のパッチアンテナおよびその出力を入力する可変移相器回路の組み合わせを基本素子とした。可変移相器回路は、反射型 3dB-90° ハイブリッドカップラの反射端に新たに開発するフレキシブルなポリマーから成る位相制御ユニットを設け、反射位置を可変 (MSL 長可変) することで可変移相を実現する (図 1)。この位相制御ユニットはポリマーアクチュエータから成る。この構造では、理想的な反射を仮定すれば、挿入損失は、MSL の長さで決まることになり低損失特性が期待できる。

(2) パッチアンテナおよび反射型 3dB-90° ハイブリッドカップラ回路

具体的デバイスとして、低周波から 12GHz 以上の高周波域までほぼ一定の誘電率 (~0.3) を有する厚さ 0.125mm の市販の PEN フィルム[ポリエチレンナフタレート、 $\tan \delta$ (~0.003)]を誘電体層に用いた。導波路金属は、スクリーン印刷法で形成する銀ペーストを用い、誘電体裏面の GND としては銅箔を貼り付けた (図 2)。この MSL をベースとしたフレキシブルなパッチアンテナ素子とフレキシブルな可変移相器特性を調べ、それぞれ機能することを明らかにした。すなわち、フレキシビリティ (曲げ状態) に対する挿入

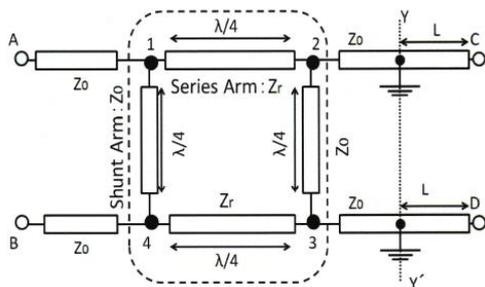


図 1 フレキシブル可変移相器の基本原
理.

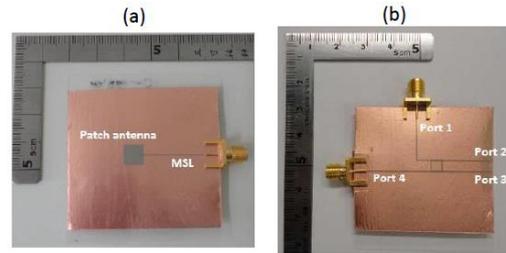


図 2 スクリーン印刷で形成したフレキシ
ブルパッチアンテナ(a)とフレキシブル
3dB-90° ハイブリッドカップラ(b).

損失特性や位相特性の変化は小さく、それぞ
れの機能に深刻な影響は及ぼさないことが
わかった。

(3) フレキシブル・プリンタブルな可変移 相器

3dB-90° ハイブリッドカップラの反射端
の位置 (たとえば図 1 における C, D) に従来
方式のように可変容量ダイオードを用いる
場合、電磁界シミュレーションの結果、容量
変化が 10 倍 (0.6pF~6pF) に対して位相変
化は 90° 程度でしかなく、位相可変範囲を大
きくするのが難しいことが判明した。このた
め、反射端位置を可変することで導波路の線
路長が変わり位相が変わるポリマーアク
チュエータから成る新しい位相制御ユニッ
トを考案した。この移相器で理想的な反射が起
こると仮定すると、主たる挿入損は導波路の
導体損だけで、極めて低損失なデバイスが実
現できる。図 3 に試作した 3dB-90° ハイブ
リッドカップラを用いてその反射端の位置を
可変することによる位相変化を示す (ここ
では機械的に接地点を移動させた)。移相量と接
地点移動量の関係は、試作した 3dB-90°
ハイブリッドカップラが良好な動作を示して
いることを示している。さらに上記の位相制
御ユニットを組み合わせることにより (図
4)、低電圧 (2V~7V) の駆動で~45° 程
度の範囲のアナログ的可変移相が実現でき
ることを明らかにした。この場合の挿入損は
-2dB 程度に抑えることができた。

以上のように、新しいフレキシブル・プリ

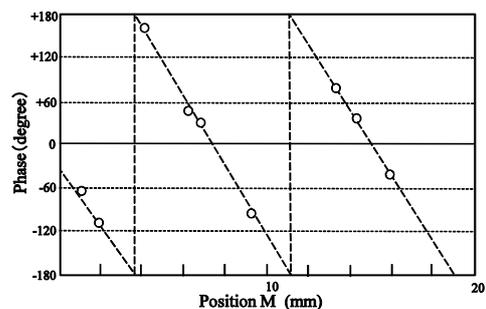


図 3 試作した 3dB-90° ハイブリッド
カップラの接地点と位相の関係 (接地点の
機械的移動による) .

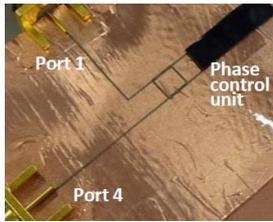


図4 3dB-90° ハイブリッドカップラの反射端にポリマーを用いた位相制御ユニットを備えたフレキシブル可変移相器。

ンタブルな可変移相器を実証することができた。この可変移相器の現状の性能は印刷型MSLの導体損に大きく依存する。今後は印刷技術および金属インクの改善によりさらなる導電率向上が望まれる。また位相制御ユニットのさらなる性能改善も求められる。

(4) 3dB-90° ハイブリッドカップラの高精度設計

従来のハイブリッドカップラ格子の設計においては、用いる周波数での有効波長の1/4の長さをもつShunt Arm, Series Armの導波路それぞれについて端部の中点を格子のコーナー中心とする方式が採られているが、コーナー近傍はインダクタンスの異常等があり、この方式では所定の周波数で分配回路として機能させることができず、複雑な補正計算や試行錯誤によって調整するしかなかった。本研究の設計パラメータのハイブリッドカップラにおける設計周波数と動作周波数の差の周波数依存性を図5(a)に示す。設計周波数が高くなるほど周波数の差が大きくなる。

これに対して本研究では、新しく最適化手順を考案した。は以下の通りである。

① ピーク周波数とShunt Arm長との関係を求める (Series長は固定)

② 手順1で各Sパラメータピーク周波数が一致するShunt arm長を求める (Series長は固定)

③ 手順2で一致した周波数が設計周波数になるように、Series:Shuntの長さの比を変えずに格子を拡大・縮小してピーク周波数を設計周波数へシフトさせ、最終形状を得る。

この設計法により正確に所望の動作周波数

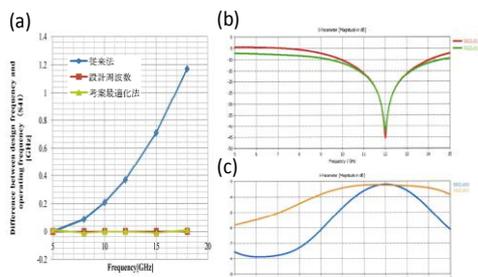


図5 従来法による所望動作周波数とシミュレーション周波数のずれ(a)、今回開発した設計法による回路のS11, S41特性(b)、S21, S31特性(c)。

が実現できることとなった[図5(b), (c)]。

考案した設計最適化手法の原理確認のために、一般的なFR-4基板を用い、1GHz~5GHzの周波数範囲で、考案した最適化手順を用いたハイブリッドカップラを製作して動作検証を行った。その結果、本法が有効であることを実証することができた。

(5) 回路レイアウトに関する検討

①給電方式

給電方式については、共平面型、近接結合型、容量結合型の3種類について、1アンテナユニット(パッチアンテナ+可変移相器)における移相性能、製作難易度・高機能化の点で比較を行った。その結果、近接結合型が最もゲインが大きくなることを確認した。また、パッチアンテナ素子に平面波を入射し、平面波の入射角度を変化させて、共振周波数と受信電界強度の平面波入射角度依存性についてシミュレーションを行った。共振周波数については、共平面型および近接結合型で給電用MSLが平面波の影響を受け、共振周波数がずれることがわかった。

各給電方式を用いた1アンテナユニットについて、入射平面波に対して、可変移相器の接地点位置の移動(移相可変)による移相シミュレーションを行った。いずれの方式においても、接地点位置8mmの移動で合計約360°の移相量が得られ、設計通り移相特性が実現できることが確認できた。印刷製作難易度・高機能化の面では、共平面型は一つの印刷工程で製作することができ、製作が容易であるのに対して、近接結合型は、フィルム基板の重ね合わせで容易に構成することができるメリットがある。一方、容量結合型は、GND面のスリットを2枚の誘電体で挟む構造であるので、穴あけ加工などの工程が複雑になるデメリットがある。

②アレイ化基本方式

本研究でのパッチアンテナ素子、給電回路

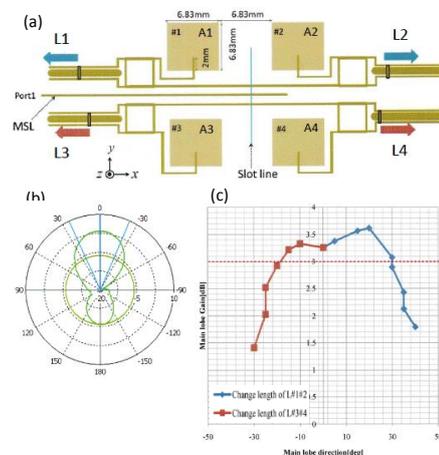


図6 4ユニットアレイのシミュレーション。アレイ化のレイアウト(a)、放射パターン(b)、メインローブ方向とゲインの関係(c)。

および可変移相器を接続したものを1アンテナユニットとして、4ユニット・アレイについてシミュレーションを行った(図6)。図6(a)のレイアウト図においてアンテナA1、A2、あるいはアンテナA3、A4の可変移相器の位相を変化させて(L1、L2、あるいはL3、L4を変化)指向性走査シミュレーションを行った。図6(b)に放射パターンを、(c)にメインローブ方向とゲインの関係を示す。0.5mmの接地点移動で約5°の指向性走査量が得られることがわかった。接地点移動量が大きくなると指向性利得が減少し、約45°の指向性走査で指向性利得3dB以上を確保できることが分かった。

以上により、本研究でのパッチアンテナ、可変移相器を組み合わせアレイ化することによりフェーズドアレイ・アンテナを構成できる見通しが得られた。

5. 主な発表論文等

[学会発表等] (計1件)

①フレキシブル可変移相器用ハイブリッドカプラの設計

宇佐見雄大、矢沢健太郎、横山道央、佐藤史郎、時任静士(山形大)

アンテナ・伝播研究会(AP)

2015年3月20日(金) 福井大学 文京キャンパス

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

①名称: 高周波デバイス

発明者: 佐藤史郎、横山道央、宇佐見雄大、古川忠弘、時任静士

権利者: 国立大学法人山形大学

種類: 特許

番号: 特願2015-050742

出願年月日: 2015年3月12日

国内外の別: 国内

[その他] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 史郎 (SATO, Fumio)

山形大学・大学院理工学研究科・客員教授

研究者番号: 80511980

(2) 研究分担者

横山 道央 (YOKOYAMA, Michio)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 40261573