

氏名	ほんま なおき		
授与学位	本間尚樹 博士(工学)		
学位授与年月日	平成17年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻		
学位論文題目	高速無線通信用指向性可変平面アンテナに関する研究		
指導教員	東北大学教授 澤谷 邦男		
論文審査委員	主査 東北大学教授	澤谷 邦男	東北大学教授 杉浦 行
	東北大学教授	安達 文幸	東北大学助教授 陳 強

論文内容要旨

1. 緒言

近年の無線通信の普及は目覚しく、特に PDC や IMT-2000 に代表される地上系移動体通信システムにおいては、日本国内の加入者数は 2003 年度末で約 8000 万人に上る。また、通信サービスの多様化が進み、従来の音声通信だけではなく、画像や動画などのマルチメディアコンテンツの提供が多く見られるようになった。それに伴い、より高速な無線通信実現への期待が高まっている。同時に、様々な場所や環境においても安定した無線通信を実現することが求められている。無線通信における伝送速度の向上法として、様々な手法が検討されており、中でもアンテナの高利得化による伝送速度の向上法が特に注目されている。しかし、アンテナの指向性利得を向上することはビーム幅を絞ることに対応しており、ビームを適切な方向に指向させることが必須となる。その場合、無線局の場所や環境の変動に応じた指向性の制御が必要になる。

指向性可変アンテナは、アンテナの方向を変えずにビーム方向のみを制御できるため、アンテナ設置場所や無線局筐体形状などの自由度を向上させることができる。特に、平面アンテナの採用によってアンテナの省スペース化を容易に実現することができる。しかし、これまで指向性可変平面アンテナに関して様々な手法による実現法が提案されているが、高いアンテナの利得が求められる場合は、給電回路の損失等が増加し、特に 1GHz 以上の周波数帯ではスイッチなどの可変機構の挿入損失によってアンテナの放射効率が大きく低下するという問題があった。また、アレーアンテナではアンテナ数に応じて多数の可変機構を構成する必要があるため、給電回路の構成や制御が複雑化するという問題があった。また、独立したアレーアンテナを複数用いるビームスイッチングアレーでは、ビームごとにアンテナを構成するため、アンテナ構成が大形化するという問題があった。

本論文では、高速無線通信に適したアンテナ技術を確立することを目的とし、指向性可変平面アンテナの簡易化・低損失化・小形化を実現するアンテナ構成技術を提案する。本論文は以上に述べた背景に基づいて、近年注目されている FWA(Fixed Wireless Access)・移動体衛星通信・無線 LAN の 3 つの無線通信システムへの指向性可変平面アンテナ構成技術の適用を目指して検討を行った研究成果をまとめたものである。

2. 誘電体移相器を用いた低損失アレーアンテナ

FWA は固定局間における高速無線通信サービスの提供を目的として検討されている。可搬で設置自由度の高い端末局を考えると、基地局にビームを向けるために指向性が可変であることが望ましい。また、ユーザ分布が変化した場合でも高い伝送速度や収容率を得るためには、基地局アンテナについても指向性制御が必要になる。端末局と基地局の両者とも位置が固定であるため、静的な指向性制御で十分である一方、低損失性が要求される。

本章でははじめに、指向性制御の頻度が低く特に省スペース性と低損失特性が重視される FWA 端末

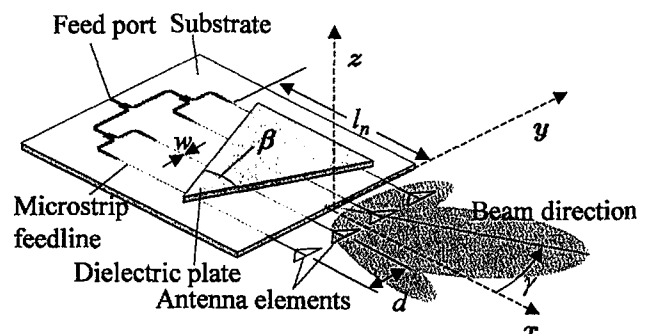


図1. 三角形状誘電体移相器を用いたアレーアンテナ

局等に適した構成として、図1に示すマイクロストリップ線路(以下MSL: MicroStrip Line)と三角形誘電体移相器を用いた低損失アレーアンテナを提案する。三角形誘電体板は並行する複数のMSL上に配置され、それぞれのMSLとの交差長が異なるためMSL間には位相差が与えられる。三角形の頂角 β を変えることによってMSL端部に構成されるアレーアンテナの主ビーム方向を制御することができる。また、線路幅の最適化によって移相器の小形・低損失化を実現する設計式を提案している。移相器の損失を最小化する線路幅 w は、

$$\frac{d}{dw} \left(\frac{\alpha_{msl} + \alpha_{mmsl}}{\sqrt{\epsilon_{re}} - \sqrt{\epsilon_{re0}}} \right) = 0 \quad (1)$$

の微分方程式を解くことによって得られる。ここで、 α_{msl} と ϵ_{re0} はそれぞれMSLの単位長さあたりの損失と実効比誘電率、 α_{mmsl} と ϵ_{re} は誘電体板とMSLにより形成される多層MSLの単位長さあたりの損失と実効比誘電率である。

10GHz帯において三角形誘電体移相器を用いた4素子パッチアレーアンテナを試作し評価を行った。最大ビームチルト角を30°とした場合、移相器の挿入損は10GHzにおいて0.5dB以下であることが明らかになり、線路幅最適化を行わずに特性インピーダンスが50 Ω となる線路幅を用いた移相器と比べて移相器の長さ l_n が約50%に小形化できることがわかった。また、図2に示す三角形誘電体板の頂角 β に対するビーム方向と動作利得の測定結果より、ほぼ設計どおりの放射特性が得られることが明らかになり、本構成と設計法が低損失化と小形化に有効であることを明らかにした。

次に本章ではFWA末端局と比べて指向性制御の頻度が高い基地局用アンテナへの適用を目的として、図3に示す簡易な指向性制御を実現する誘電体移相器を提案する。これは複数の並列するテーパ状MSLとこれらの線路上を線路方向にスライドする矩形誘電体板とを組み合わせた構成である。幅の広いMSLと比べて幅の狭いMSL上に誘電体板を重ねた場合に大きな位相遅延が与えられることを利用し、線路ごとに適切にテーパ形状を決定することによって隣接する線路間の位相差を均一に保ちながら制御することができる。計算により移相器特性を評価した結果、不要放射は僅かで低損失特性が得られることがわかった。図4は本移相器を給電回路に適用した4 \times 8素子アレーの放射パターンを26GHz帯において測定したものであり、良好なビーム走査特性を実現することを確認した。ここで、ビーム方向の設計との誤差は $\pm 1^\circ$ 以下であった。以上から、提案する誘電体移相器は制御性の向上と低損失特性を両立することを明らかにした。

3. 可変リアクタンス装荷多段パッチアンテナを用いたビーム走査アンテナ

次世代の移動体衛星通信は、従来システムでは困難であった高速移動体においても高い伝送速度を実現する手段として期待されている。そのためには衛星からのレベルの低い信号を受信するため、高利得なアンテナが必要になるだけでなく、移動体から見た相対的な衛星位置が大きく変動するため、様々な方向に対して動的に衛星を追尾することが必要になる。さらに、列車や航空機などの高速な移動体への適用を考慮すると、空気抵抗が問題となるため低姿勢なアンテナ構成が求められる。アンテナを機械的に回転さ

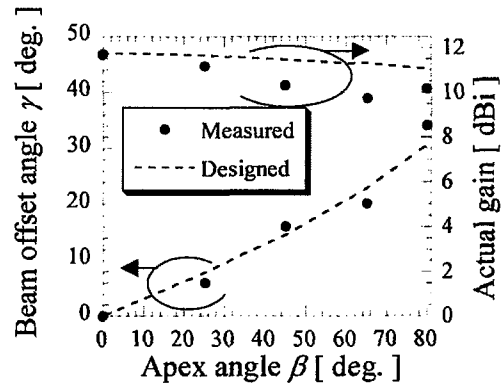


図2. 三角形頂角 β に対するビーム方向 γ と絶対利得

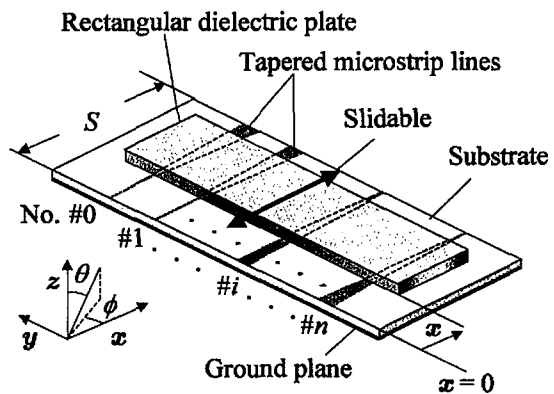


図3. テーパ状マイクロストリップ線路を用いた誘電体移相器

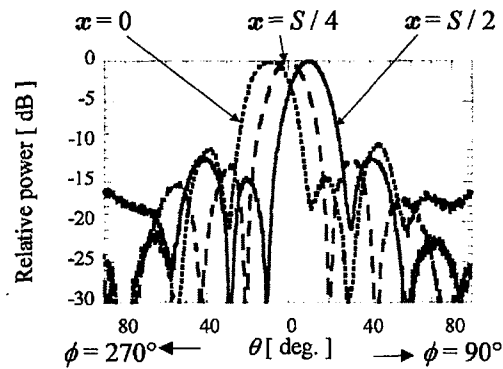


図4. 試作した26GHz帯アンテナの放射パターン

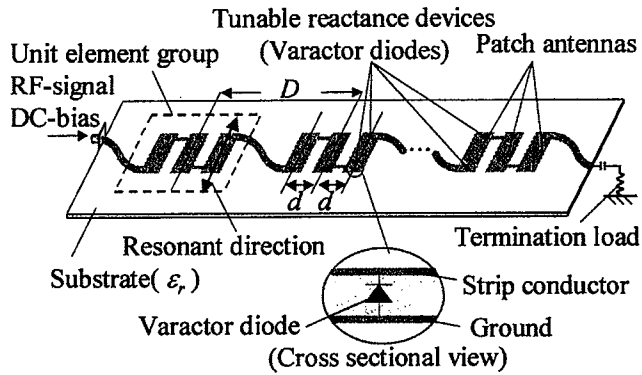


図5. MUSCATアレーの構造

せることによって仰角方向の衛星追尾を行う場合は薄形化が不可能となるため、仰角方向の電子的な指向性制御が必須となる。

本章では移動体衛星通信で求められる電子制御による仰角方向の動的な指向性制御を実現する低姿勢な平面アンテナとして、可変リアクタンス装荷多段パッチアンテナアレー(MUSCATアレー: Multi-Stage Configured patch Antenna with Tunable reactance devices)を提案する。図5に示すようにMUSCATアレーでは、可変リアクタンス素子としてバラクタダイオードを装荷した複数のパッチアンテナを近接させ多段接続することによって単素子と等価な放射特性を有する単位素子群を構成する。リアクタンス値を同時に制御した場合、パッチアンテナごとに通過信号に位相遅延が与えられるため、単位素子群では段数に応じて大きな移相量を実現できる。また、単位素子群を直列に接続することによって、単一のバイアス制御によって素子群間の位相差が均等に一括制御されるため、簡易制御でビーム走査を実現できる。

2.4GHz帯における測定結果から、単位素子群はアンテナ素子として機能するとともに、移相器としても動作し、単位素子群あたりの素子数を $m=3$ とした場合に $|S_{11}|$ が -15dB 以下で $|S_{21}|$ の変化が 1dB 以下となる可変範囲において、従来のMSL移相器の約3倍である 110° の移相量が得られることを明らかにし、単位素子群における多段構成の採用によって損失が低減され移相量を拡大できることを示した。次に、試作を行った8素子群アレーの放射パターンを図6に示す。図より、バイアス電圧の制御によってビームが走査することが確認できるとともに、大きなサイドローブの発生や主ビーム形状の変形もなく、良好な放射特性が得られることがわかる。図7に主ビーム方向に対する動作利得の評価結果を示す。ここで、主ビーム方向はアンテナ面法線方向 $\theta = 0^\circ$ を基準としている。また、比較のために、多段化をしていない $m=1$ の場合のビーム走査特性を併せて示している。その結果、多段化しない場合は 3dB の利得偏差内において得られるビーム走査角は約 13° となったが、段数を $m=3$ とした場合に $11^\circ \sim 38^\circ$ の角度範囲で主ビーム方向が可変であることを確認し、2倍以上の 27° の走査角が得られることを明らかにした。以上から、MUSCATアレーは広走査角特性を有するとともに制御が簡易であり低姿勢なアンテナ構成で実現可能であることを示した。

4. 導波素子共有パッチ八木・宇田アレーを用いた小形セクタアンテナ

屋内における無線アクセスとして急速に普及している無線LANでは、伝送速度の高速化手段としてアンテナの利得向上が求められており、また端末の持ち運び等により所望波の方向やレベルが変化する環境においても、迅速に指向性を制御することによって高い伝送速度を安定して実現することが必要になる。小形端末に適したアンテナ構成を考えると、高度な指向性制御機構の実装が困難であるため、比較的幅の広いビームの切り替えによって伝送品質を向上させる簡易な指向性制

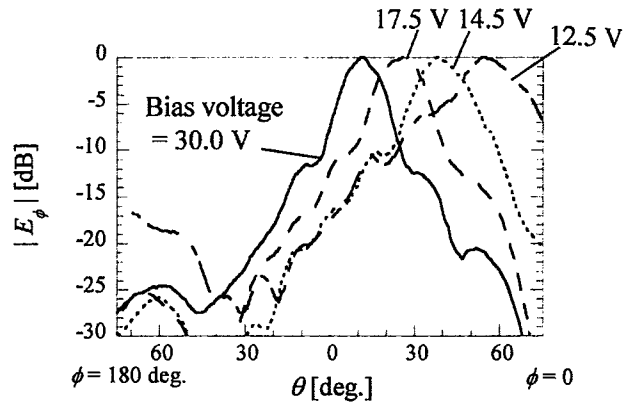


図6. バイアス電圧に対する放射パターンの変化

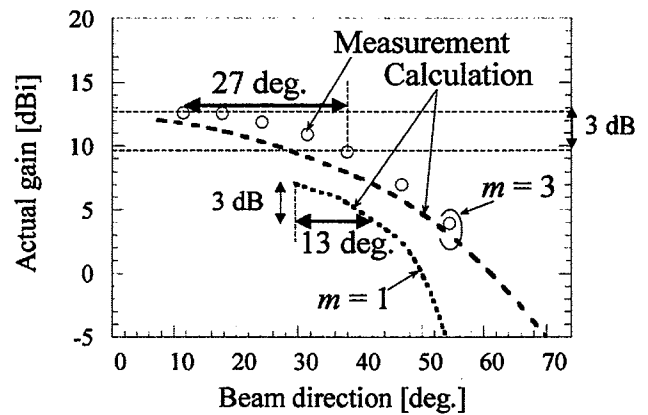


図7. 主ビーム方向に対する動作利得の変化

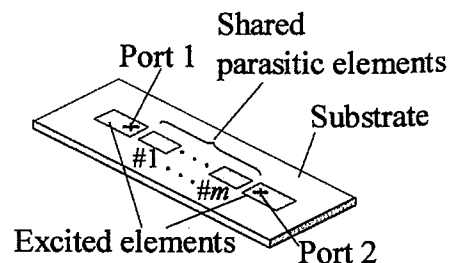


図8. 単位素子列の構造

御法が望ましい。端末用マルチセクタアンテナはそのような簡易な指向性制御法として提案されているが、ビームごとに個別のアンテナが必要になるため、そのサイズが大形化するという問題があった。一方、近年の携帯端末の小形化を考慮すると、小形で薄形にアンテナを構成することが必須となる。携帯端末に適した小形かつ薄形な無線 LAN 用セクタアンテナの基本構成要素として、図 8 に示す導波素子共有パッチ八木・宇田アレーアンテナを提案する。本構成では、平面アンテナの採用によって薄形化を実現するだけでなく、マルチセクタアンテナを小形化するために、2つの正対したパッチ八木・宇田アレーアンテナ間で m 素子の無給電素子からなる導波器を完全に共有させており、2つのパッチ八木・宇田アレーアンテナを別々に構成した場合と比べてアレー長を半減できる。また本アンテナの6セクタアンテナへの適用例として、図 9 に示す3つの導波素子共有パッチ八木・宇田アレーアンテナを中心で互いに交差させた構成を提案する。2ビームを実現する素子列を交差させ、交差素子列間で素子をさらに共有することによって、6セクタアンテナの大幅な小形化を図っている。図 10 に数値解析と測定により得られた6セクタアンテナの放射パターンを示す。ここで、他セクタによるビーム幅や利得への影響を改善するために、終端条件の最適化を行っており、交差素子列の給電ポートの終端条件を開放とし、対向セクタの比励振給電ポートに終端抵抗を接続している。その結果、16dB以上のF/B(Front-to-Back ratio)が得られ、11dBiの高い動作利得が得られることを明らかにした。パッチ八木・宇田アレーアンテナを放射状に配した場合と比べてアンテナ面積を1/5に縮小できることを示し、提案構成の採用によって無線 LAN に適した薄形セクタアンテナを大幅に小形化できることを示した。

5. 結言

本論文では、次世代の高速無線通信に適した簡易・低損失・小形に構成可能な指向性可変アンテナを実現することを目的とし、3種類のアンテナ構成法を提案した。動的な指向性制御が不要である代わりに低損失特性が求められる場合のアンテナ構成として、誘電体移相器を用いた低損失アレーアンテナを提案し、提案構成は低損失特性と高い制御性を両立することを明らかにした。また、移動体衛星通信端末局で必要となる動的な指向性制御を実現する構成として可変リアクタンス装荷多段パッチアレーを提案し、本アンテナは広走査角特性を有するとともに制御が簡易であり低姿勢なアンテナ構成で実現可能であることを示した。また、無線 LAN 端末局ではアンテナの小形化と簡易な指向性制御機構が求められるため、導波素子共有パッチ八木・宇田アレーを用いた小形セクタアンテナを提案した。6セクタ間での導波素子の共有化によってアンテナ面積を1/5に縮小できることを示し、セクタアンテナの大幅な小形化と薄形化を両立することを示した。

以上に述べた指向性可変平面アンテナ技術は、将来のワイヤレスアクセスシステムへの適用によって利便性向上および伝送速度向上に寄与するものであり、その発展に貢献するものであると考える。

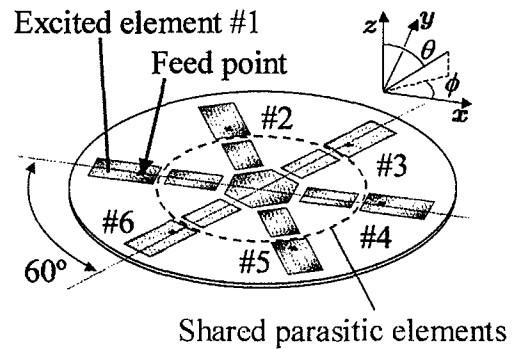
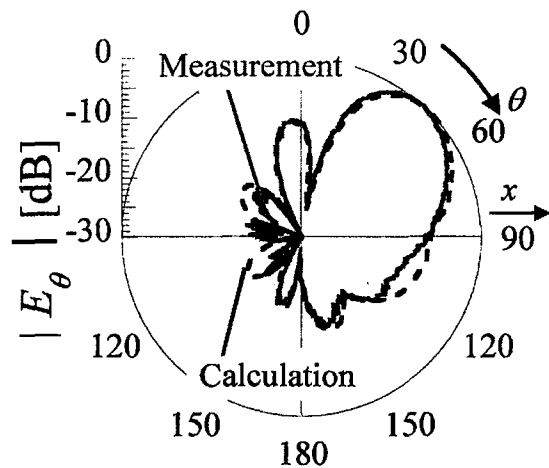
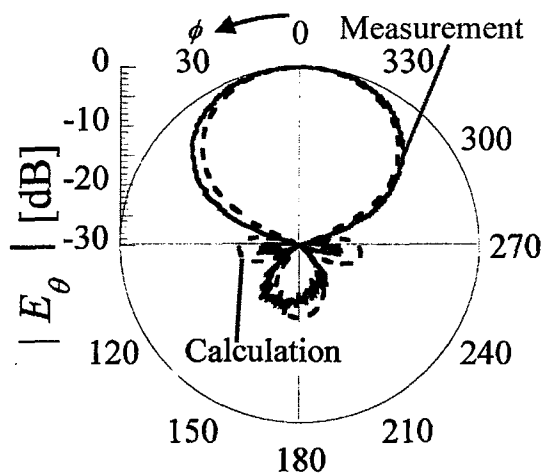


図9. 素子列を交差させて配置した6セクタアンテナ



(a) Vertical plane (zx-plane)



(a) Conical plane ($\theta=45^\circ$)

図10. 計算と測定により得られた放射パターン

論文審査結果の要旨

無線通信の高速化・高性能化を図るためには、アンテナの高利得化が不可欠であり、それに伴って鋭い指向性を高速または低速で制御できるアンテナの開発が望まれている。また、送受信機の小型化への要求から、アンテナの小型化・薄形化も重要な課題である。本論文は、FWA (Fixed Wireless Access)、移動体衛星通信及び無線 LAN の 3 つの無線通信システムに着目し、簡易な方法で指向性を可変できる小形平面アンテナについて行った研究の成果をまとめたもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は緒言である。

第 2 章では、FWA で必要になる半固定の指向性制御を行う平面アンテナとして、まず三角形誘電体と複数の平行マイクロストリップ線路 (MSL) を用いた移相器を提案し、その低損失化を図っている。また、10 GHz 帯の試作と実験により、挿入損が 0.5 dB 以下で、50 Ω の MSL を用いた移相器に比べてサイズを約 50 % に小型化できることを明らかにしている。次に、複数の平行テーパ状 MSL と線路上をスライドする矩形誘電体板からなる移相器を提案し、実験により 26 GHz 帯で挿入損が 1.5 dB 以下であることを示している。また、これらの移相器を用いた平面アレーアンテナの試作実験により、所望のビームが得られることを確認している。これらの移相器は簡易な構造で低損失であり、有用である。

第 3 章では、移動体衛星通信で求められる高速指向性制御を実現する平面アンテナとして、可変リアクタンス素子を装荷したパッチアンテナを複数個配置し、多段に接続した可変リアクタンス装荷多段パッチアンテナアレーを提案している。2.4 GHz 帯における測定結果から、単位素子群は移相器及びアンテナ素子として良好に動作し、同じ長さの MSL 移相器の約 3 倍の移相量が得られることを明らかにしている。また、8 素子群アレーの放射特性の測定から、広角なビーム走査が実現できることを示している。さらに、無給電素子を設けることにより走査角を拡大する方法、並びに開放スタブにより高周波帯における可変リアクタンスの損失を低減する方法を提案し、試作実験によりこれらの効果を確認している。これらはフェーズドアレーアンテナの給電回路の大幅な簡略化を可能とするもので、優れた成果である。

第 4 章では、無線 LAN 端末用アンテナとして、導波素子共有パッチ八木・宇田アレーアンテナを用いた平面マルチセクタアンテナを提案している。これは、2 つの正対したパッチ八木・宇田アレー間で導波器を共有することによりアンテナを小型化したものであり、これを複数配列して切り替えることにより指向性を制御する。このアンテナを 6 セクタアンテナに適用し、3 つの導波素子共有パッチ八木・宇田アレーを三角形に配置した構成、及び中心で交差させた構成を提案している。これらは、八木・宇田アレーを放射状に配置した従来のセクタアンテナに比べて、その面積をそれぞれ 35 % 及び 24 % に小型化したもので、高く評価される。

第 5 章は結言である。

以上要するに本論文は、高速または低速で指向性を可変できる平面アンテナを簡易な構造で実現する方法を提案すると共に、低損失化・小型化を図ってその有効性を示したもので、無線通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。