さ　とうようすけ
氏　　名　佐　藤　洋　介
授　与　学　位　博士（工学）
学位授与年月日　平成２７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　平面アンテナを素子に用いた小型ビームフォーミングアンテナに関する研究
指　導　教　員　東北大学教授　加藤　修三
論文審査委員　主査　東北大学教授　加藤　修三　東北大学教授　安達　文幸
東北大学教授　末松　憲治　東北大学教授　陳　強

論文内容要旨

平面素子によるビームフォーミングアンテナは、ミリ波無線通信や広域無線センサネットワークなどで応用が期待されている技術である。多くの国で免許不要帯である 60GHz 体ミリ波無線通信（日本:57-66GHz アメリカ:57-64）は、数 Gbps の無線通信を実現するために注目があつまっており 60GHzWPAN 標準規格として IEEE802.15.3c、および 60GHzWLAN 標準規格として IEEE802.11ad の策定が完了している。ミリ波無線通信では、高い伝送損失と人体などの障害物によって通信が妨げられることが大きな課題である。高利得をもち電気的にすばやく位相を制御できるビームフォーミングアンテナは、高利得によって伝搬損失を補いビーム走査によって障害物を避けて反射波を用いて通信を継続できるため有効である。 IEEE802.15.3C、IEEE802.11ad 双方においてビームフォーミング技術の利用が想定されており、基板上に形成できる小型で高利得をもつビームフォーミングアンテナはミリ波無線通信において重要な役割を果たすことが期待されている。フェイズドアレイアンテナはビームフォーミングアンテナ構成に適しているため様々なフェイズドアレイによるビームフォーミングアンテナが提案されているが、ミリ波無線通信においてはＲＦ移相器の挿入損失が 5-10dB と大きく、それにともなって消費電力が大きくなることが課題であった。それゆえ、高利得アンテナ素子を用いて移相器や増幅器での損失を補うことなどにより低消費電力で動作する送受信機の開発がすすめられており、移相器の制御ステップを 90° 程度まで大きくする（離散位相制御）ことによって構造を簡易化 する方法などが提案されている。離散位相制御時には出力位相が限られることによる特性劣化が生じる。システム設計のためには、離散位相制御ステップによるビームフォーンミングアンテナの利得変動について平均値ではなく最大変化量を明らかにする必要があるため解析を行った結果、位相制御ステップが 90° 以下であれば劣化は 1dB 以下となることを解析によって明らかにする。さらに、離散位相制御ビームフォーミングアンテナでは移相器の出力位相が限られているため対象性を利用して移相器の個数を減らすことも有効であり、その手法として奇数素子フェイズドアレイによるビームフォーミングアンテナを提案する。

広域センサネットワーク実現へむけて、low energy critical infrastructure monitoring (LECIM) に注目が集まっており、その注目を受けて IEEE802.15.4k において標準化が行われている[21]。広域センサネットワークにおけるセンサ端末はバッテリーのみで長期間駆動が必要なため、基地局に高利得アンテナを用いて端末側の消費電力を軽減することが有効になる。また、

ISM(Industry-Science-Medical)バンドで運用されるシステムで問題となる他システムからの干渉に対して、高利得アンテナを用いることで干渉軽減も可能である。広域センサネットワークは、局所的に偏在するすべてのセンサノードに対して高利得を用いた通信を行えることが望ましいため、ビームフォーミングアンテナが有効である。フェイズドアレイアンテナから構成されるビームフォーミングアンテナは高い利得を持ちビーム走査が可能であるため現在広く利用されている技術であるが、研究対象となっているアプリケーションが軍事利用のレーダや携帯端末による衛星通信であるため、20dBi 以上の高利得と低サイドローブ特性を目標としている。そのためフェイズドアレイアンテナは 100～10000 程度の素子数から構成されており、位相制御工数が非常に大きくアンテナサイズが巨大化する。アンテナサイズが大きくなると、屋外に設置される基地局アンテナは風への耐性や設置容易性が課題となり、素子数が多いアンテナを用いた場合に生じる大きな位相制御工数は一般レベルへの普及へ向けた大きな課題となる。従来型のフェイズドアレイアンテナを基地局アンテナとして用いる場合は、セクタンテナに代表される指向性アンテナと比較してサイドローブが大きくなってしまうため他のシステムから干渉を受け易く、ISM バンドで用いることが難しくなることも実用上の課題であった。メインローブの高利得化に着目したフェイズドアレイアンテナや、素子サイズを軽減したフェイズドアレイアンテナに関しても様々な提案がなされているが、広域センサネットワーク基地局用アンテナに適した小型低サイドローブ特性を満たしていない。ワイヤレスセンサネットワーク基地局用に適した小型で低サイドローブかつ高利得をもつフェイズドアレイアンテナによるビームフォーミングアンテナとして、狭素子間隔配置ビームフォーミングアンテナを提案する。提案アンテナはフェイズドアレイアンテナの素子間結合を許容してより狭い素子間隔でアンテナを構成することによってアンテナの小型化と低サイドローブ化を実現できる。

本論は全 6 章で構成されており、2 章から 5 章にてそれぞれ提案内容について述べ、第 6 章では結論をまとめている。

第 2 章では離散位相制御時に生じる利得変動の解析結果について述べている。離散位相制御ビームフォーミングアンテナでは位相組み合わせが限られるため、これらすべての位相組み合わせにおける指向性をすべて導出し、離散位相制御ビームフォーミングアンテナの放射方向に対する最大利得を明らかにする。最大利得を連続位相制御時における最大値と比較することにより利得変動量をもとめた解析結果を図 1 に示す。位相ステップが 90° 以下であれば利得変動量を 1dB 以下にできることを明らかにしている。また、求めた利得変動量はＲＭＳ平均値を用いて求めた利得変動よりも 0.5dB 以上大きく、システム設計においては提案手法により正確な利得変動値を求めることが必要であることを明らかにする。

第 3 章では高利得アンテナ素子としてダブルスロットアンテナを提案する。ミリ波無線通信を携帯端末で行うには、送受信機の小型低消費電力化が必須である。そのため、ビームフォーミングアンテナは小型高利得素子であることが望ましい。チップアンテナなどの小型アンテナは単体の利得が低いため多くの素子数が必要となるため携帯端末用アンテナ素子には適さない。そこで、既存の平面アンテナと同程度のサイズでより高い利得を持つアンテナとして、二つのスロットアンテナをオフセット給電によって組み合わせたダブルスロットアンテナを提案する。

第 4 章では奇数素子ビームフォーミングアンテナによる位相調整工数の低減法を提案する。離散位相制御ビームフォーミングでは出力位相が限られるため、実装時に生じる製作誤差による位相変化に移相器のみで対応することが困難である。特にミリ波

無線通信は１波長が 5㎜ 程度と非常に短いため、物理的な線路長などの移相器以外での調整には工数が多く必要となる。5-9 素子まで素子数を変化させた場合の特性について表１に示す。N素子によって構成される奇数素子フェイズドアレイアンテナは、N+１個の素子で構成される偶数素子フェイズドアレイアンテナと比較して移相器の挿入損失を低減し高い実効利得が得られる。よって、提案する奇数素子ビームフォーミングアンテナは、中央の素子に位相器が不要となるため必要位相組み合わせを減らすことができ、必要な位相調整工数を削減可能な手法である。提案手法は位相調整が困難なミリ波以外のアプリケーションでも応用が可能である

第５章では広域センサネットワークに適した小型高利得ビームフォーミングアンテナとして狭素子間隔配置フェイズドアレイアンテナを提案する。狭素子間隔フェイズドアレイアンテナは、素子間結合を許容して素子間隔を狭くすることにより小型が可能な手法である。さらに、アレイファクタにおける開口範囲が狭くなるためメインローブに放射電界が集中し低サイドローブ特性を持つ指向性が得られる。アンテナの設計には電磁界シミュレータを用いることにより、アクティブゲインなどの相互結合による特性変化を含めた解析を利用することにより、相互結合を許容した小型低サイドローブビームフォーミングアンテナを実現可能となる。

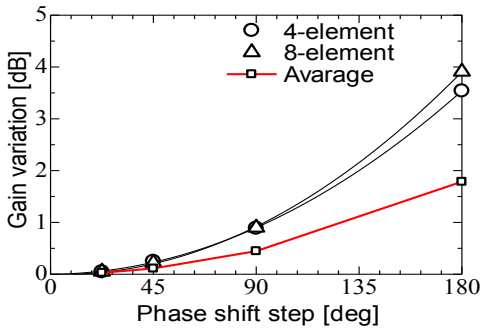


図１　利得変動解析結果

表１　ダブルスロットフェイズドアレイアンテナ

移相器調整工数比較

	平均利得	移相器損失	実効利得	移相器個数	構造の複雑さ（位相組み合わせ数）
5素子ビームフォーミングアンテナ	13.8dBi	4dB	9.8dBi	4	2
6素子ビームフォーミングアンテナ	14.5dBi	5db	9.5dBi	6	4
7素子ビームフォーミングアンテナ	15dBi	4.3dB	10.7dBi	6	4
8素子ビームフォーミングアンテナ	15.5dBi	5dB	10.5dBi	8	6
9素子ビームフォーミングアンテナ	15.8dBi	4.5dB	11.3dBi	8	6

論文審査結果の要旨

ビームフォーミングアンテナはレーダなど産業用に幅広く使われているが、民生機器、特に携帯端末に搭載するには小型化及び低消費電力化技術が重要になっている。従来、ミリ波では多数の小型パッチアンテナをアンテナ要素とする手法が用いられてきたが、ミリ波無線通信をスマートホーン等に搭載するにはより一層の小型化、低消費電力化及び位相調整工数低減の技術を開拓する必要がある。また、900 MHz センサネットワーク用アンテナとしては要素アンテナ間隔を1/2 波長以上とする設計手法が一般的だが、より一層の小型化・サイドローブ低減技術を開拓する必要がある。本論文はこれらの課題を解決するために、提案・解析・実験による検証を行ったミリ波用ダブルスロットアンテナ、奇数素子ビームフォーミングアンテナ、及び900 MHz 用狭素子間隔ビームフォーミングアンテナについての研究結果を中心にまとめたものであり、全編 6 章よりなる。

第 1 章は緒言であり、研究の背景について述べている。

第 2 章では、ミリ波送受信機の低消費電力化の一つとして提案されていた「離散位相制御によるビームフォーミング」の欠点である、ビームとビームの狭間方向の利得低下の影響を明らかにし、90° 以下の離散位相制御であれば、フェイズドアレイアンテナ素子数にかかわらず利得変動幅 1 dB 以下であり、実用上、問題が無いことを明らかにした。実用的なビームフォーミングアンテナ設計に指針を与えるもので有用な成果である。

第 3 章では、ビームフォーミングアンテナの小型化には、フェイズドアレイアンテナ素子の高利得化(アンテナ素子数の低減に貢献)が本質的であり、著者はフェイズドアレイアンテナ素子として小型高利得特性をもつダブルスロットアンテナを提案し、電気特性の解析、試作評価によって提案アンテナが従来方式よりも約 3 dB 利得が高く(利得: 8.7 dBi) ミリ波ビームフォーミングアンテナのアンテナ素子数半減(大きさ 1/2 化)に大きく貢献することを実証した。これによる改善効果は大変大きく有用な成果である。

第 4 章では，ビームフォーミングアンテナ実装上の大きな課題であった位相調整工数の低減について述べている。各アンテナ素子の経路差や移相器製作誤差に対する位相調整工数の低減を図るため、筆者は、90° を単位とする位相組み合わせ数と移相器個数を低減できる「奇数素子ビームフォーミングアンテナ」を提案し、解析と試作評価を行い、提案方式は 30-50 %の位相調整工数低減が可能であることを明らかにした。この手法は携帯端末搭載用低損失ミリ波ビームフォーミングアンテナの実現に大変有用な手法である。

第 5 章は老朽化したインフラストラクチャの監視システムや農業用センサネットワークなどへの応用が期待されている 900 MHz 帯広域無線センサネットワークへの使用を目的とし、必要とされる高利得基地局アンテナ、基地局の周囲に局所的に偏在するセンサノードを効率良く照射する(ビーム走査が可能な)ビームフォーミングアンテナに関する研究結果である。従来の 1/2 波長間隔で構成されるフェイズドアレイアンテナの課題であったアンテナサイズとサイドローブレベルの低減を図るために、著者はアンテナ素子間に相互結合を許容し素子間隔を 1/2 波長以下としたビームフォーミングアンテナを提案し、解析、試作評価によって提案アンテナは小型化（60-70 %）が可能であり、かつ高利得低サイドローブ特性（利得 8 dBi、サイドローブ-14.7 dBc 以下)をもつことを示した。本手法は実用上有用であると同時に、小型・低サイドローブ特性を有するビームフォーミングアンテナ設計の重要な方向を示唆したと言える。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、ミリ波ビームフォーミングアンテナについては 90° の離散位相制御が実用上十分であることを示し、小型・低消費電力化のためにダブルスロットアンテナと、アンテナ移相器調整工数を低減する奇数素子ビームフォーミングアンテナを提案し、また 900 MHz 帯広域無線センサネットワーク基地局アンテナの小型・低サイドローブ化のため、アンテナ素子間に結合を持たせたアレーアンテナを提案しこれらの効果を解析・実験により検証したもので、電磁波工学ならびに電気・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。