移動通信用デジタルビームフォーミングアンテナに 関する研究

学位論文内容の要旨

近年、移動通信は携帯電話の急速な普及により社会生活の中で必要不可欠の存在となっている。当初は音声通話が主要な用途であったが、インターネットアクセスに代表されるデータ通信の需要の拡大により、伝送レート的高速化、大容量化が求められている。これら要求に応えるためには、有限な資源である周波数の利用効率を向上させることが喫緊の課題である。

デジタルビームフォーミング(DBF)アンテナは複数の素子アンテナから構成されるアンテナ、すなわちアレーアンテナとデジタル信号処理を組み合わせた高機能アンテナであり、所望波の到来方向にアンテナの指向性を制御する機能や、信号品質を劣化させる遅延波を除去する機能を実現する。それゆえ周波数利用効率の改善や高速伝送を実現する移動通信用アンテナとして期待されている。しかしながら DBF アンテナの高機能な特長を具現化するには、複数の素子アンテナの送受信信号を高速にデジタル信号処理する必要がある。また、その技術を実用化するためには、複数の端末からの通信信号を処理する基地局、および小型軽量で低消費電力かつ経済的な可搬型の移動端末にデジタル信号処理装置を搭載しなければならない。

本研究では、第一に移動通信への適用に向けた取り組みとして、受信用 DBF アンテナのデジタル信号処理部の回路を実際のハードウェアに実装することにより小型化が図れることを示し、その規模を定量化することを目的とする。第二にデジタル信号処理部を含めた DBF アンテナシステムを開発し、実際に無線通信を行うことにより DBF アンテナの機能を実証し、有効性を確認することを目的とする。第三の目的として、DBF アンテナの移動通信システムへの適用および実用化に向けた展望について示す。

第1章では、移動通信の現状とその課題を明らかにし、その課題を解決する手段として DBF アンテナの適用について説明し、その課題と研究の目的について示した。

第2章では、フェーズドアレーアンテナから発展した DBF アンテナの歴史的経緯について述べ、続いて DBF アンテナを構成する要素であるアレーアンテナ、RF 回路、デジタル回路について説明し、サンプリング方法、エレメントスペースとビームスペースについて DBF アンテナの基本的な構成方法を示した。

第3章では、DBF アンテナの本質的な特徴を決定するデジタル信号処理部のアルゴリズムについて整理した。その中で、マルチビーム生成法、最大比合成法、さらに移動通信に適した干渉除去アルゴリズムとして、LMS (Least Mean Square), RLS (Recursive Least Square), SMI (Sample

Matrix Inversion), CMA (Constant Modulus Algorithm) について動作原理を説明した。また開発した DBF アンテナに実装した 2 次元 DFT によるマルチビーム生成, セルフビームステアリング (SBS), および CMA についてアルゴリズムを具体的に示した。

第 4 章では, DBF アンテナで用いるデジタル信号処理部の構成方法について, ソフトウェアおよびハードウェアによる手法について整理し, 本研究で行った小型化を実現するためのハードウェアによる実装方法について示した。その設計指針に従いデジタル信号処理部アーキテクチャとして考案した 2 次元フーリエ変換によるマルチビーム生成に適した回路構成を示した。またデジタル信号処理部の小型化について, FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いたハードウェア設計により, 16 素子のアレーアンテナでマルチビームアンテナ構成では約 11.8 万ゲート, ビームスペース SBS (BSSBS)アレーアンテナ構成では約 12.9 万ゲート, ビームスペース CMA (BSCMA)アダプティブアンテナ構成では 13.3 万ゲートで実現できることを明らかにした。

第 5 章では, 開発した DBF アンテナシステムの装置概要とその評価系の構成について述べた。開発 DBF アンテナシステムは 16 素子のアレーアンテナとマイクロ波無線受信部, A/D 変換器および 10 個の FPGA が搭載されたデジタル信号処理部で構成されている。システムの動作検証のため, 大型電波暗室で行った評価実験の環境および方法について説明した。また実システムでの回路やケーブルなどに起因する位相と振幅の不均一性を補正するキャリブレーション方法について示した。最後に実環境における DBF アンテナシステムの特性評価のため行った, 野外衛星受信実験のシステム構成について示した。

第 6 章では, 開発した DBF アンテナシステムの性能を実証するために行った評価結果についてまとめた。大型電波暗室では, マルチビーム生成機能の実証のため各ビームの放射パターンを測定し, それらを入力として最大比合成を行う BSSBS アレーアンテナのビーム合成機能を確認した。次に干渉波を用いて BSCMA アダプティブアレーアンテナの諸特性について評価し, その基本的な干渉除去機能を明らかにした。さらに実験衛星 ETS-V を用いた対向受信実験を行った結果から, 実動作環境でも到来波へのビーム生成機能および追尾, 捕捉機能が正しく動作することを確認した。これらの結果から開発した DBF アンテナシステムの有効性を確認した。

第 7 章では, 移動通信システムへの適用・実用化に向けた展望として, 空間並列伝送による高速化を可能にする MIMO (Multiple Input Multiple Output)伝送方式について, W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 上り回線を適用例として検討を行った。その結果, E-SDM (Eigen Space Division Multiplexing) アルゴリズムが周波数選択性フェージング環境を含めて, 最も有効であることがわかった。W-CDMA 上り回線の仕様では, 3.84MHz の帯域で, 最大 6 コード多重により 2,048kbps の伝送 (周波数利用効率 0.53) が可能であるが, MIMO 適用により, 4 並列伝送 (周波数利用効率 2) が, MIMO チャネルの状況に応じて制御すれば可能であることを明らかにした。さらにマルチユーザ多重環境での MIMO 構成法について検討し, 各ユーザを直交化する下り回線用 Joint Transmit and Receive Multi-user MIMO Decomposition アルゴリズムを上り回線に適用する方法について述べ, 2 ユーザを完全に分離して MIMO 通信が行えることを示した。また周波数選択性フェージング環境下において, 遅延パス数倍の受信アンテナを用い, 各遅延パスを別ユーザに見立てて独立に空間分離し, それを最大比合成することによって, 誤りフロアが発生することなくユーザを分離できるアルゴリズムを提案した。計算機シミュレーションにより 1 パスに比べ遅延パスを合成

することにより、ダイバーシチ効果を得られる結果が得られた。

以上の DBF アンテナの FPGA への実装、実験による確認、高速通信のための MIMO 伝送の検討結果から、DBF アンテナが移動通信のための技術として有効であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 川 恭 孝
副 査 教 授 宮 永 喜 一
副 査 教 授 野 島 俊 雄
副 査 教 授 小 柴 正 則

学 位 論 文 題 名

移動通信用デジタルビームフォーミングアンテナに 関する研究

移動通信は携帯電話の普及により社会生活の中で欠く事ができない重要な存在となった。近年では音声通話からデータ通信のアプリケーションの用途へ要求が広がりを見せ、伝送レート的高速化、大容量化が求められている。高速化にとともに、利得の確保、周波数選択性フェージングの対策、さらに空間多重技術が必要となっている。これらの課題を解決するため、デジタルビームフォーミング(DBF)アンテナが盛んに研究されている。DBFアンテナは複数の素子アンテナから構成されるアレーアンテナとデジタル信号処理を組み合わせた高機能アンテナであり、所望波の到来方向にアンテナの指向性を向ける機能や、信号品質を劣化させる遅延波を除去する機能を実現する。しかしながらDBFアンテナを実用化するためには、複数の端末からの通信信号を処理する基地局、および小型軽量で低消費電力かつ経済的な可搬型の移動端末にデジタル信号処理装置を搭載しなければならない課題があった。

本研究の第一の目的は、受信用DBFアンテナのデジタル信号処理部について、そのアーキテクチャに関して研究し、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて装置の小型化を図ることにより実現性を示すこと、開発したシステムを用いて、実際に無線通信を行いDBFアンテナの有効性を確認することである。第二の目的は、空間多重により高速伝送を実現するMIMO伝送について特性を明らかにし、DBFアンテナの移動通信システムへの適用および実用化に向けた展望を示すことである。

まず開発したDBFアンテナに実装した2次元フーリエ変換によるマルチビーム

生成，最大比合成を行うセルフビームステアリング(Self Beam Steering: SBS)，および干渉除去が可能な CMA (Constant Modulus Algorithm)についてアルゴリズムを具体的に示し，次に DBF アンテナで用いるデジタル信号処理部について小型化を実現するためのハードウェアによるアーキテクチャを示した．FPGA を用いて，16 素子アンテナのマルチビーム生成機能を約 11.8 万ゲート，ビームスペース SBS (BSSBS) アレーアンテナを約 12.9 万ゲート，ビームスペース CMA (BSCMA)アダプティブアレーアンテナを約 13.3 万ゲートで実現した．この結果から DBF アンテナのデジタル信号処理部を 1 つの LSI に実装できることが分かり，実用化への見通しを示すことができた．

次に，開発した DBF アンテナシステムを用いて大型電波暗室で行った評価結果から，2次元フーリエ変換による 16 本の直交マルチビームを生成する機能を確認した．また，BSSBS アレーアンテナによる直交マルチビームの最大比合成機能が実現されていることを確認し，BSCMA アダプティブアレーアンテナについて干渉除去機能が動作していることを検証した．さらに実験衛星 ETS-V を用いて対向受信実験を行い，実動作環境における到来波方向へのビーム生成機能および追尾，捕捉機能を検証した．これらの結果から，開発した DBF アンテナシステムの有効性を確認した．

最後に移動通信システムへの適用・実用化に向けた展望として，空間並列伝送による高速化を可能にする MIMO (Multiple Input Multiple Output)伝送方式について，W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) 上り回線への適用を検討した．その結果，E-SDM (Eigenbeam Space Division Multiplexing) アルゴリズムが周波数選択性フェージング環境を含めて，最も有効であることを明らかにした．さらにマルチユーザ多重波環境での MIMO 構成法について検討し，2 ユーザを完全に分離して MIMO 通信が行えることを示した．また，周波数選択性フェージング環境下において，遅延パス数倍の受信アンテナを用いて，各遅延パスを空間分離，最大比合成して，ユーザを分離できるアルゴリズムを提案し，評価結果から遅延パス合成でダイバーシチ効果が得られていることを確認した．

これを要するに，著者はデジタルビームフォーミングアンテナの FPGA による実装・実験，および，高速通信のための MIMO 伝送の検討を行い，デジタルビームフォーミングアンテナの移動通信への適用に見通しを示したものであり，無線通信工学に貢献するところ大なるものがある．よって著者は，北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める．