

論文の内容の要旨

論文題目 CDMA 基地局用アダプティブアレーアンテナに関する研究

氏名 原 嘉孝

本論文では、W-CDMA 方式の高機能化に向けて、基地局用アダプティブアレーアンテナを用いたシステム構成を論じる。アダプティブアレーアンテナでは複数アンテナを用いることにより高品質な信号の送受信を行うことができる。そのため、現在の W-CDMA 方式よりも多くの通信ユーザ、高速伝送をサポートできるものとして期待されている。技術的には上りリンクでの受信機構成、下りリンクでの送信機構成、アクセス制御方法として現実的かつ高性能な構成が求められる。各章では、このような要求に対応するための要素技術について論じる。

まず、第1章では研究背景を述べ、第2章ではアダプティブアレーの基礎理論であるウェイト収束特性の解析を行う。第3章ではCDMA 上りリンクにおける高効率な基地局用アレーの構成を提案する。第4章ではマルチメディア通信を考慮した CDMA 下りリンク用ビーム形成を示す。第5章では、基地局用アダプティブアレー利用時のアクセス制御法を提案する。第6章では、各章の研究結果をまとめる。

第1章「序論」では研究背景を説明する。現在、国内では最大2Mbpsをサポートする第3世代移動通信 W-CDMA 方式のサービスが開始されているが、将来的にはさらに高速なデータ通信のサポートに期待が寄せられている。このうち、10Mbps程度までをサポートする3.5世代では基地局用アダプティブアレーアンテナの利用による W-CDMA 方式の高機能化が検討されている。また、100Mbps程度までをサポートする第4世代では OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を用いた新たな伝送方式にも注目が集まっている。

いずれの研究においても、複数のアンテナを用いる信号の送受信方式は重要な課題と位置づけられている。3.5 世代では CDMA 基地局用アダプティブアレーアンテナ、4 世代では MIMO (Multi-Input Multi-Output), OFDM 用アレーアンテナ, SDMA(Space Division Multiple Access) など複数アンテナを用いた通信の研究が盛んである。このようにアンテナ技術に注目が集まる背景には、周波数の欠乏、端末の送信電力増大に対してアンテナ技術以外により解決策がないという実情がある。低消費電力で高速無線通信を行うためには、複数アンテナを用いた空間領域の活用が必須となるであろう。本論文では、この中で近未来の課題として「CDMA 基地局用アダプティブアレーアンテナ」を取り上げ、その技術的詳細を

論じる。

第2章「SMIアダプティブアレーのウエイト収束に関する解析」では一般的なアダプティブアレーの受信特性解析を行う。本結果は基本的かつ重要なものであり、アダプティブアレーの基礎理論となる。本結果の一部は第3章へと発展する。

アダプティブアレーでは複数のアンテナで信号受信し、あるウエイト $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3, w_4]^T$ に基づきアンテナ間で信号合成する。この際、適したウエイトを用いると希望信号を強く受信でき、干渉信号を抑圧できる。その結果、単純な最大比合成の場合よりも高品質な合成出力を得ることができる。ウエイト \mathbf{w} は通常受信信号と希望信号のパイロット信号を用いて演算される。この際、多くの信号サンプルを用いるほど良好なウエイトを得ることができる。しかし、実環境では利用できるパイロット信号は限られており、限られたパイロット信号数の中で最適状態に近いウエイトを得ることが重要となる。

第2章では、代表的なウエイト演算アルゴリズムであるSMI(Sample Matrix Inversion)法に対し、パイロット信号数と出力SINRの平均値との関係を導く。最終的に、アダプティブアレー出力における平均SINRは次式で導出される。

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = 1 - \frac{M-1}{N-2} - \frac{(M-1)(1-M/(N-2))}{M+(N-2)\Gamma_0} \quad (1)$$

ここで、 Γ_0 は最適ウエイトを用いた場合のSINR、 M はアンテナ数、 N はパイロットシンボル数である。本式はさまざまな受信環境で適用可能であり、シミュレーション結果ともよい精度で一致する。従来のウエイト収束解析は Γ_0 の大きい場合に限って行われていたが、本解析は任意の Γ_0 に対して精度よく適用できる。従って、アダプティブアレーのウエイト収束を表す基礎理論として広い適用範囲が考えられる。

この他に、第2章では異なる受信サンプルを用いて相関行列と相関ベクトルを演算する変形SMIアルゴリズムのウエイト収束特性も明らかにした。変形SMIアルゴリズムは従来存在しない方法であるが、本演算方法でもウエイト演算が可能であることを示している。この変形SMIアルゴリズムは第3章のCDMA用アレーにおいて演算の効率化を実現する重要技術となる。また、CDMA方式では逆拡散後よりも逆拡散前でウエイト演算を行う方がウエイト収束が速いことも理論的に証明した。この証明により、従来主流の方法よりもさらに高速なウエイト収束が可能であることが明らかとなり、第3章の提案CDMA用アレーが高性能を有する理由となっている。

第3章「上りリンク相関行列共通型基地局用アダプティブアレーアンテナ」では上りリンクにおけるCDMA基地局用アダプティブアレーアンテナの効率的な構成を提案する。CDMA方式ではアダプティブアレー技術の導入により干渉電力の低減と容量増加が期待されている。しかし、基地局において高速ウエイト演算法を用いると演算量が非常に大きくなるという問題がある。一方で、演算量の低いウエイト演算法ではウエイト収束が遅く、パケット通信での利用が難しい。このような状況で低演算量と高性能を同時に実現できるCDMA基地局の信号処理構成が求められている。

このような要求に対し、第3章では高性能と低演算量を同時に満足できる相関行列共通型アダプティブアレーを提案する。本構成では、SMIアルゴリズムにおいて90%以上の演算

量を占める相関行列演算を各ユーザで共通とすることにより、大幅な演算量の削減を実現している。従来、CDMA方式では逆拡散後の受信信号がユーザごとに異なるため、ユーザ間での相関行列の共通化はできないものと考えられてきた。これに対し、提案法では逆拡散前に相関行列演算を行ってもウエイトに影響がないことを証明し、相関行列の共通化が可能であることを示した。このような構成によって、ユーザ数に無関係に相関行列演算を1つとでき、大幅な演算量の削減が可能となる。また、性能面でも提案法は従来の方法よりも高速ウエイト収束を実現でき、高品質な信号受信が可能となる。このように提案法は、相関行列の共通化により、低演算量化とウエイト高速収束を同時に実現する方法である。本手法のハードウェア構成は簡易であり、実用的な方法である。

第4章「CDMA下りリンクにおける基地局用ビーム形成法」ではTDDモード、FDDモードそれぞれのCDMA下りリンクにおけるビーム形成法について論じる。

まず、ビーム形成法に先立って、CDMA下りリンクにおける端末RAKE受信の特性解析を行う。ここでは、W-CDMA下りリンクで用いるロング符号及びウォルシュ符号、多ユーザへの信号送信、基地局での送信ビーム形成を考慮し、端末におけるRAKE受信後のSINRの厳密解を導く。導かれたSINR厳密解は、いかなる環境においても正確に受信SINRを表現でき、シミュレーション等を行う上で有効である。性能評価では、導出された厳密解が正確な受信SINRを与えることをシミュレーションにより確認した。また、本解析結果を用いて、RAKE合成が理想的でない場合の受信特性の劣化についても評価を行った。

次に、端末におけるSINR厳密解をさらに理論展開し、下りリンクに適したビーム形成アルゴリズムを導いた。ここでは、送信電力制御状態において基地局の総送信電力が最小となるようにビーム形成を決定する。ビーム形成に当たっては、各ユーザの伝搬路状態とマルチメディア通信における必要SINRを考慮する。従来のビーム形成法では各ユーザの必要SINRなどの情報を十分に活用していなかったが、提案法ではその活用により高性能なビーム形成を目指す。性能評価の結果、TDDモード及びFDDモードの双方において、提案マルチメディア通信対応型ビーム形成により高容量を達成できることが分かった。また、FDDモードではビーム形成は伝搬特性の影響を受けやすく、角度広がりが大きくなるにつれ通信容量は急激に劣化する。その際の対応策として、閉ループ伝搬路推定が効果的であることがわかった。

第5章「アダプティブアレーを用いるCDMAのアクセス制御」では基地局用アダプティブアレーアンテナ利用時のアクセス制御を論じる。アダプティブアレーを用いてシステム容量を増やすためにはシステムの入口であるアクセス制御についても考える必要がある。これは、映画館内の席数を増やしても、入口で定員以下の入場制限を行なうと観客数が増えないのと同じで、入口(アクセス制御)が従来のままではシステム容量を効率的に増やすことができない。特に、アダプティブアレーでは、方向別にトラヒック状態が異なる場合もあり、ユーザの到来方向を考慮したアクセス制御が必要となる。

そこで、第5章ではアダプティブアレーを用いたCDMA基地局のアクセス制御法を提案する。提案法では、新規ユーザからの通信要求に対し、基地局はアダプティブアレーを利用した場合のSINRを予測する。基地局は、予測SINRが基準SINR以上の場合のみ新規ユー

ザの通信を許可し、それ以外は呼損とする。本方式を用いると、新規ユーザの存在方向を考慮してアクセス制御を行なうことができ、効率的にユーザを収容できる。

第6章「結論」では本論文での研究成果をまとめる。本論文ではCDMA 基地局アダプティブアレーにおける上下リンクの信号処理構成、アクセス制御を論じた。3章で示した提案アダプティブアレーは高速ビーム形成と低演算量を同時に実現できる実用的な方式である。また、5章のアクセス制御は、現在あまり研究が行なわれていないが、今後重要な課題になると考えられる。各章で扱った要素技術単体として効果がある。また、CDMA 方式では最終的にアダプティブアレーアンテナを用いたシステム構築が求められるが、各章で扱った要素技術を組み合わせることにより整合性のよいシステム構築を行うこともできる。このように本論文で扱った技術は要素技術単体としての効果とシステム構築における整合性の双方を考慮しており、実用的な構成である。