

学位論文題名

# Studies on Direction-of-Arrival Estimation and Ultra-Wideband Transmission Technologies

(信号到来方向推定および超広帯域伝送方式に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

近年, ADSL や光回線などの高速なブロードバンド通信の普及によってインターネットを介した情報のやり取りが容易となった。それにより, 様々なサービスが提供されるようになり, インターネットは我々の生活には欠かせないものとなっている。いつでも, どこでも情報を手に入れたいという要望を満足するためには, ワイヤレスデータ伝送技術の進展は欠かせないものとなる。近年, 会社や家庭内において情報の共有化・分散化を図るために複数のコンピュータを接続する LAN や PAN の導入が進んでおり, ケーブルの取り回しなどの利便性から無線により LAN を形成する動きが活発になっている。無線 LAN に関する共通の技術規格化は IEEE802.11 によって規定されており, 最大 54Mbps の伝送速度を実現することが可能となっている。

このように無線通信技術は我々の生活に欠かせないものとなっているが, 無線周波数の枯渇が大きな問題となり, 周波数の利用効率を高めるための研究が盛んに行なわれている。アダプティブアレーアンテナ技術は周波数利用効率の向上を図るために有効な技術であり, さまざまな研究が行われている。通常, 同一周波数を用いて複数の無線ユーザが通信を行なう場合, それらは互いに干渉となり, 十分な通信を行なうことができない。アダプティブアレーアンテナでは複数のアンテナを設置し, 各アンテナの重み付け係数を決定することで, アンテナシステムの指向性を自由に制御することが可能となる。大きなアンテナ利得 (メインビーム) を希望するユーザに向け, 大きな利得落ち込み (ヌル) を干渉となるユーザに向けることにより, 希望ユーザの信号のみを得ることが可能となる。また, この技術を応用して送信器・受信器側双方に複数のアンテナを設置し, 通信を行なう MIMO 通信が注目を浴びている。送信側の各アンテナから異なる情報信号を送信し, 受信側でこれらの信号を分離することができるため, 送信アンテナ数に比例した伝送速度の向上が可能となる。

このようにアレーアンテナ技術の導入は無線通信の周波数利用効率を高めるために有効であるが, 十分な性能を達成するためには正しく伝搬環境を分析した上でアンテナの設計を行なう必要がある。そのため, 電磁波の到来方向を高精度に推定する技術が重要となる。MUSIC や ESPRIT は到来方向を高精度で推定する高分解能推定方法として注目を浴びている。この時, アレー配列として直線状に等間隔でアンテナを配置した等間隔リニアアレー (ULA) が用いられることが多いが, 到来方向によって, その推定精度が異なるという欠点があり, 周囲 360 度から信号が到来するような屋内伝搬環境には向かない。アンテナを等間隔に円状に配置した等間隔円アレー (UCA) を用いる場合, 推定精度の方向依存性は回避されるが, コヒーレントな信号 (完全相関波すなわち信号の相関が 1) が到来する場合には推定できないという問題がある。

また、ホームネットワークや無線 USB2.0 のような手軽かつ低消費電力で 100Mbps 以上の近距離通信を実現する技術として Ultra-Wideband (UWB) が注目を浴びている。これらは無線 PAN の技術として IEEE802.15 において標準化が行なわれてきた。無線 LAN 規格に関しては IEEE802.11n において MIMO 技術適用のための技術標準化が行なわれているが、UWB においては、まだ検討はなされていない。

本論文ではアレーアンテナ技術の応用という観点から高速な無線技術を実現するため、信号到来方向推定および MIMO-UWB 通信についてさまざまな検討を行った。

第 1 章は序論であり、研究の背景、目的および検討課題について述べている。

第 2 章から第 4 章までは無線信号の到来方向推定技術に関して検討を行っている。まず、第 2 章において高分解推定法のひとつである MUSIC アルゴリズムとその応用である Root-MUSIC アルゴリズムについて述べ、コヒーレントな信号の到来方向を推定するための前処理手法として SSP 法および MSSP 法についても論じている。

第 3 章では円筒アレーを用いたコヒーレントな信号の推定について述べている。円アレーを用いた到来方向推定においては前述の SSP 法を適用できないためコヒーレントな信号の推定はできない。円アレーを用いた到来方向推定に関する研究は行なわれているが、それらは全て同一の天頂角から到来する場合に限られている。そこで、本論文は円アレーをスタックした円筒アレーと到来方向推定アルゴリズムを提案し、計算機シミュレーションおよび実測データを用いてその推定精度を明らかにしている。

第 4 章では円筒アレーのデータに SAGE アルゴリズムを適用し、さらに高精度な到来方向推定法について述べている。SAGE アルゴリズムは最尤推定法として MUSIC などよりも高い推定精度を有することが知られているが、繰り返し信号処理手法であるため初期値の設定が重要であり、その初期値を真の到来方向と全く異なる値とした時、正しい推定結果が得られないという問題がある。そこで、本論文では第 3 章で提案した手法から得られた推定値を用いて SAGE アルゴリズムを適用する方法を提案し、シミュレーションおよび実測データを用いてその優れた推定精度を示した。

第 5 章から第 7 章までは MIMO-UWB 通信に関する検討を行っている。MIMO-UWB 通信において、超高速な無線通信を用いた場合に起こる符号間干渉 (ISI) と MIMO を適用する場合に起こる同一チャネル間干渉 (CCI) の影響を同時に取り除く復調信号処理が必要となる。第 5 章においてその復調信号処理として周波数領域等化 (FDE) と空間信号処理を組み合わせた信号処理について述べている。また、さらに優れた空間処理方法として V-BLAST-MMSE や PIC についても述べている。

第 6 章では上述の信号処理の際に必要なチャンネル情報 (CSI) を推定する技術として時間領域のチャンネル推定法と周波数領域チャンネル推定法の提案を行い、ビット誤り率および演算量によって評価を行った。

第 7 章では実際に MIMO-UWB 伝搬路データを測定し、ビット誤り率の評価を行う。UWB は近距離での使用が想定されているため、ユーザ間の通信が見通し内環境になることが考えられる。一般に MIMO 環境において見通し内環境では各送信アンテナから到来する信号の相関が高くなるため、信号分離特性が劣化することが知られている。そこで、本論文では、各送信アンテナから送る信号の送信タイミングおよび受信アンテナで受ける受信タイミングをコントロールする送受信タイミング制御法について提案し、優れた伝送特性が得られることを示した。

第 8 章は結論であり、本論文の内容と得られた成果を要約している。

# 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

## Studies on Direction-of-Arrival Estimation and Ultra-Wideband Transmission Technologies

(信号到来方向推定および超広帯域伝送方式に関する研究)

近年、携帯電話や無線 LAN に見られるように無線通信技術は我々の生活に欠かせないものとなっている。無線通信においては共通な空間を伝送媒体とするため、その需要が高まる程、周波数の枯渇が大きな問題となり、その利用効率を高めるための研究が盛んに行なわれている。アダプティブアンテナはアレーアンテナの指向性を制御することによって、干渉となる信号を抑圧することを可能とするものである。また、この技術を応用して送受信機双方に複数のアンテナを設置し、通信を行なう MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 通信が注目を浴びている。送信側の各アンテナから異なる信号を送信し、受信側でこれらの信号を分離することができるため、送信アンテナ数に比例した伝送速度の向上が可能となる。

このような技術は無線通信の周波数利用効率を高めるために有効であるが、その特性を評価するためには、信号の到来方向を推定するなどの伝搬環境の分析が重要である。そのため、電磁波の到来方向を高精度に推定する技術が重要となる。MUSIC(Multiple Signal Classification) は到来方向を高精度で推定する代表的な高分解能推定方法として知られている。

一方、近距離における高速伝送を可能とする技術として、極めて広帯域に渡り低い送信電力スペクトル密度で通信を行う超広帯域 (UWB, Ultra Wideband) 通信が提案されており、MIMO 技術の導入を含め、鋭意検討が行われている。

本論文では、アレーアンテナ技術の応用という観点から、信号到来方向推定および MIMO-UWB 通信について、いくつかの提案を行っている。本論文は以下に述べるように 8 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、研究の背景、および、本研究の目的について述べている。

第 2 章では、代表的な高分解信号到来方向推定法の一つである MUSIC アルゴリズムと、

その応用である Root-MUSIC アルゴリズムについて述べている。次に、コヒーレントな信号の到来方向を推定するための前処理手法として SSP(Spatial Smoothing Preprocessing) 法についても論じている。

第 3 章では、円筒アレーを用いたコヒーレントな信号の到来方向推定法の提案を行っている。円アレーを用いた到来方向推定においては SSP 法を適用できないためコヒーレントな信号の推定はできない。そこで、円アレーをスタックした円筒アレーによる到来方向推定アルゴリズムを提案し、計算機シミュレーション、および、実測データを用いてその推定精度を明らかにしている。

第 4 章では、円筒アレーのデータに SAGE(Space-Alternating Generalized Expectation-Maximization) アルゴリズムを適用することによる高精度な到来方向推定法を提案している。SAGE アルゴリズムは最尤推定法として MUSIC などよりも高い推定精度を有することが知られているが、繰り返し信号処理手法であるため初期値の設定が重要である。ここでは第 3 章で提案した手法により得られた推定値を初期値として SAGE アルゴリズムを適用する方法を提案し、シミュレーション、および、実測データを用いて、その優れた推定精度を明らかにしている。

第 5 章では、MIMO-UWB 通信の受信方式について論じている。このような通信方式においては、広帯域であることによる符号間干渉に加えて、複数の送信アンテナからの信号による同一チャンネル間干渉が妨害となる。この干渉を除くために、周波数領域等化と空間信号処理を組み合わせた方式の特性評価を行っている。また、さらに優れた空間処理方法として順序付け逐次復号や並列干渉キャンセラについての評価も行っている。

第 6 章では、上述の信号処理の際に必要なチャンネル情報を推定する手法として時間領域のチャンネル推定法と周波数領域チャンネル推定法の提案を行い、ビット誤り率と演算量によって評価を行っている。

第 7 章では、実際に MIMO-UWB 伝搬路データを測定し、ビット誤り率の評価を行っている。UWB は近距離での使用が想定されているため、ユーザ間の通信が見通し内環境になることが考えられる。各送信アンテナから信号を送るタイミングと受信アンテナで信号を受けるタイミングをコントロールする送受信タイミング制御法について提案し、優れた伝送特性が得られることを示している。

第 8 章は結論であり、本論文の内容と得られた成果を要約している。

これを要するに、著者は、アレーアンテナによる高分解能信号到来方向推定法と、MIMO 技術を用いた超広帯域無線通信に関して重要な新知見を得たものであり、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。