

小型偏波共用アンテナを用いた空間多重技術

元吉克幸*
塚本 薫*
柳 崇*

Spatial Multiplexing Technology with Compact Dual-polarized Antenna

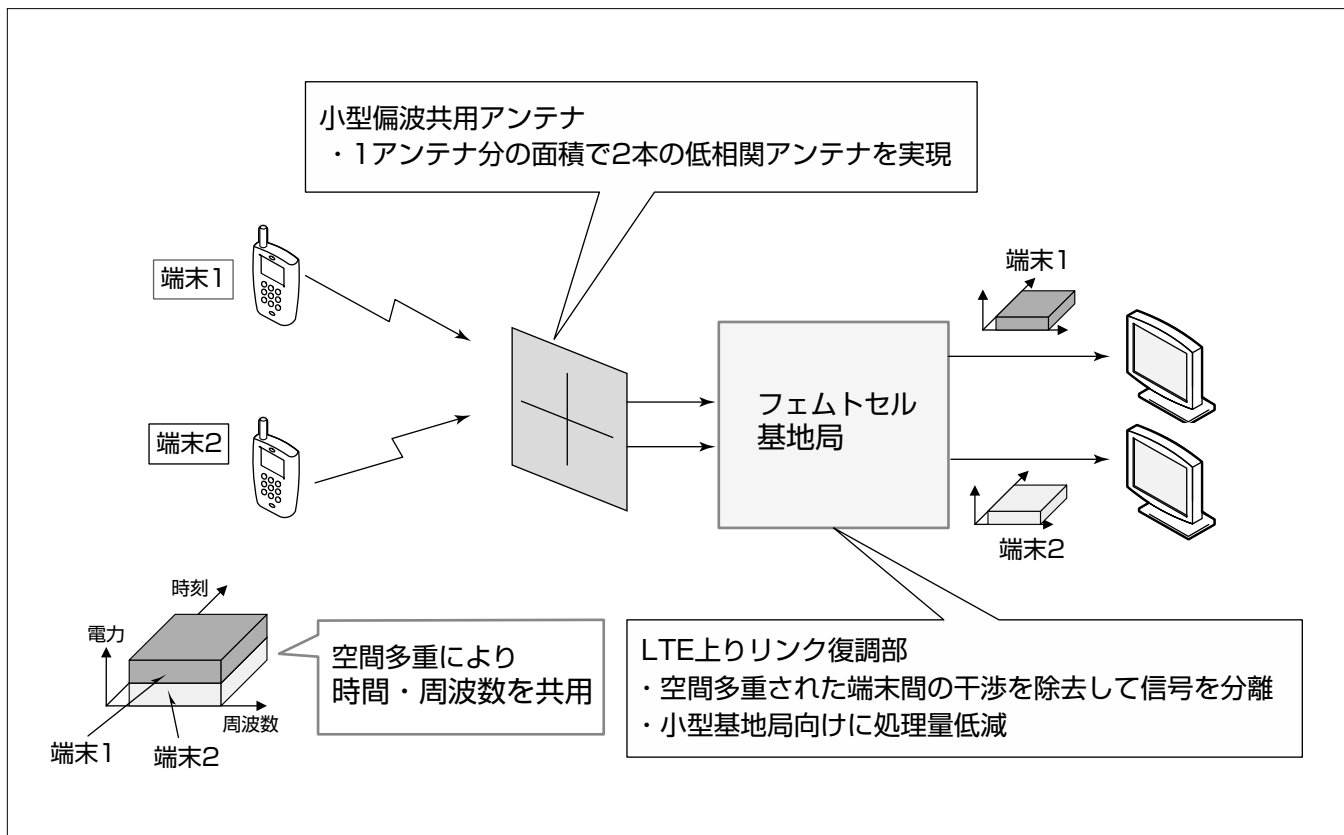
Katsuyuki Motoyoshi, Kaoru Tsukamoto, Takashi Yanagi

要 旨

携帯電話からのインターネットアクセスの普及やスマートフォンの台頭によって、逼迫(ひっぱく)する周波数資源の利用効率を向上させる手段としてMIMO (Multiple Input Multiple Output)空間多重が注目されている。MIMOでは複数のアンテナから異なる情報を同一時刻・周波数上で空間多重することによって周波数利用効率の向上が可能となる。ただし、アンテナ間の距離が近いとアンテナ間の相関が高くなり通信容量が低下するため、通常はアンテナを半波長以上離して設置し低相関を実現する。これに対し、直交偏波^(注1)を活用した小型偏波共用アンテナを用いれば、1アンテナ分の面積で2本の低相関アンテナが共存可能となり、フェムトセル用基地局などの小型装置でのMIMO空間多重実現が容易となる。

本稿では、はじめにMIMO空間多重の概要を述べ、次に無線伝送実験の結果を述べる。実験では、フェムトセル環境を想定して試作したLTE(Long Term Evolution)上りリンク復調部に、別途試作した小型偏波共用アンテナを接続して、2台の端末から同一時刻・周波数で送信した信号を受信するマルチユーザーMIMOを構築した。各端末からハイビジョン相当の動画を送信し、復調部では信号分離・復調・復号をリアルタイムに実行し、2端末分の動画を再生する。実験の結果、小型偏波共用アンテナの適用によってアンテナ実装面積を抑えつつ、MIMO空間多重によって5MHz帯域で36Mbpsのシステムスループットを安定的に達成できることを確認した。

(注1) 電波伝搬における電界の向きを偏波といい、偏波が互いに直交関係にある場合(水平偏波と垂直偏波など)を直交偏波という。



小型偏波共用アンテナを使用したMIMO空間多重システム

2台の携帯端末からの異なる送信信号を2本のアンテナで受信する2×2MIMO空間多重のイメージを示す。2台の送信端末は同一時刻に同一周波数で送信を行う。小型偏波共用アンテナは1本分のアンテナ実装面積で低相関な2本のアンテナを実現可能である。小型偏波共用アンテナを使用することでアンテナ実装面積を小さくでき、無線装置の小型化が可能となる。

1. ま え が き

iモード^(注2)などによる携帯電話からのインターネットアクセスの普及やスマートフォンの台頭によって、携帯電話のデータ通信量は年々上昇を続けており、逼迫した周波数帯域を有効利用できる無線通信方式への関心が高まっている。

この課題に対して、例えば3GPP(3rd Generation Partnership Project)⁽¹⁾で標準化が行われ、2010年12月に日本でサービスが開始されたLTE^(注3)ではMIMO空間多重技術が規格に採用された⁽²⁾。MIMO空間多重では、複数のアンテナから情報を空間多重し、複数のアンテナで受信することで、同一時刻・周波数上で情報の多重伝送を行うことができ、周波数利用効率が向上する。MIMOはLTEの他にも無線LAN(IEEE802.11n⁽³⁾)やWiMAX^(注4)(Worldwide Interoperability for Microwave Access)⁽⁴⁾等でも採用されており、無線通信高速化の有力な手段として注目を集めている。

一方で、MIMO空間多重は先に述べた複数のアンテナを使用することからアンテナの実装面積が大きくなるため、フェムトセル用の超小型基地局装置⁽⁵⁾などのように実装面積に制約がある場合に問題となる。装置を小型化するためにアンテナを高密度に実装すると、アンテナ間の結合が強まって相関が大きくなり、MIMO空間多重の周波数利用効率が低下することが知られている⁽⁶⁾。この課題に対しては、直交偏波を活用してアンテナ間の低相関化と省スペース化を両立した小型偏波共用アンテナ⁽⁷⁾の適用が有効である。

本稿では、はじめにMIMO空間多重の基本技術を述べ、次に、小型偏波共用アンテナを用いたMIMO空間多重の実現例として、フェムトセル環境を想定したLTE上りリンクの無線伝送実験⁽⁸⁾について述べる。実験結果から、小型偏波共用アンテナを適用することでアンテナの実装面積を抑えつつMIMO空間多重による高速伝送が実現可能であることを示す。

(注2) iモードは、(株)NTTドコモの登録商標である。

(注3) LTEは、ヨーロッパ電気通信標準協会(ETSI)の登録商標である。

(注4) WiMAXは、WiMAX Forumの登録商標である。

2. MIMO空間多重技術

2.1 MIMO伝搬モデル

図1にMIMO伝搬モデルを示す。MIMO空間多重では、複数の送信アンテナ($X_1, X_2, \dots, X_i$)から並列に送信された信号($s_1, s_2, \dots, s_i$)はMIMO伝送路を介して複数の受信アンテナ($Y_1, Y_2, \dots, Y_m$)で受信される(受信信号 $r_1, r_2, \dots, r_m$, 雑音 $n_1, n_2, \dots, n_m$)。受信信号はMIMO伝送路によって送信信号が混じり合った状態となるため、受信側で信号処理によって信号を分離して元の送信信号を推定する。

MIMO空間多重のメリットは、その高い通信容量にあ

る。図2に、送受信アンテナ本数と平均信号対雑音電力比(S/N)対通信容量の関係を示す。このようにMIMOはS/Nが同じ場合でもアンテナ本数が増加するほど通信容量が増加する。この特性が、MIMOが高速伝送の実現手段として有力視される理由である。

2.2 MIMO多重信号の分離方法

MIMO多重信号を分離する方式には様々な種類があるが、本稿では処理が単純で広く用いられている空間フィルタリングについて簡単に説明する。MIMO伝送路は、行数が受信アンテナ数、列数が送信アンテナ数の行列(伝送路行列)で表現される。受信信号は、送信信号と伝送路行列の乗算結果に雑音を加算した形で表現される。空間フィルタリングは、受信信号に対して伝送路行列から作成した行列を乗算することによって、元の送信信号を推定する方式である。

単純には、伝送路行列の逆行列を受信信号に乗算することで送信信号が推定される(Zero-Forcing:ZF)。ただしZFは雑音を無視するため特性が劣化する場合があるので、雑音を考慮したMMSE(Minimum Mean Square Error)空間フィルタリングが広く用いられる。なお、後述の無線伝送実験で使用したLTE復調部にもMMSE空間フィルタリングが実装されている。

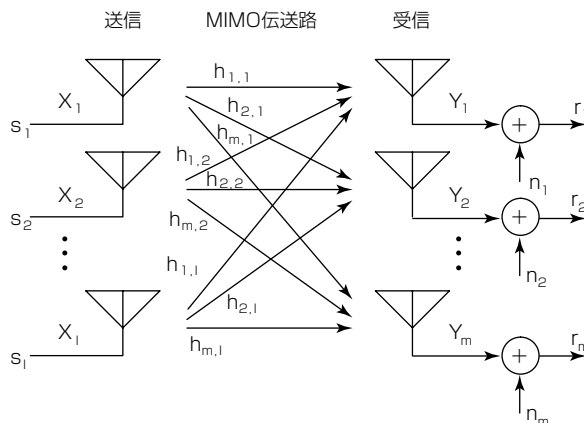


図1. MIMO伝搬モデル

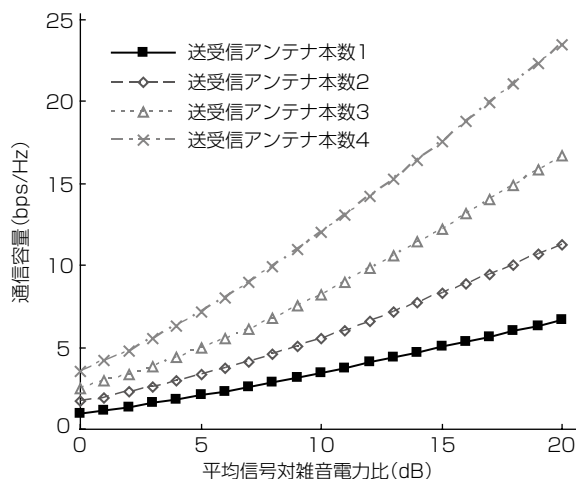


図2. 平均信号対雑音電力比と通信容量の関係

2.3 小型偏波共用アンテナ

2.2節では、MIMO空間多重が高い通信容量を達成可能なことを述べたが、実際にはアンテナ間の相関によって通信容量は低下する。図3にアンテナ間相関と通信容量の関係を示す。ここでは受信アンテナ間にのみ相関を与え、送信アンテナ間は無相関としている。同一偏波のアンテナ間相関は、アンテナ間の距離に依存する。空間相関を低く抑

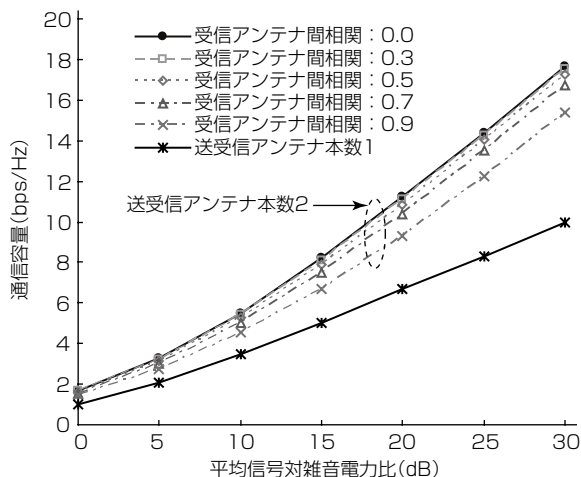


図3. アンテナ間相関と通信容量の関係

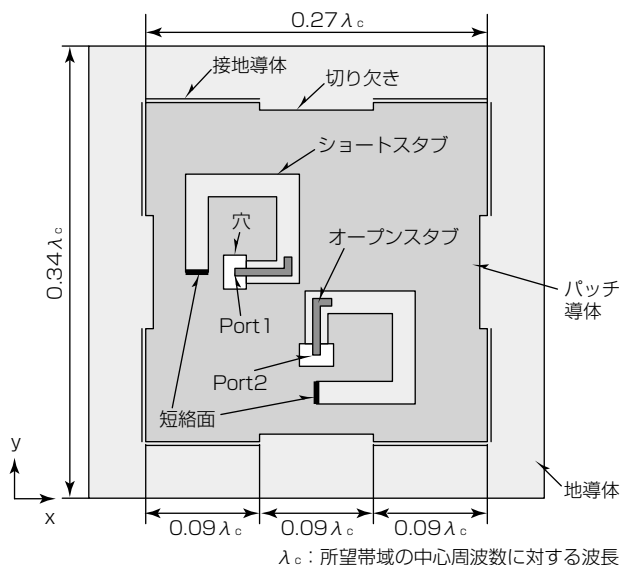


図4. 小型偏波共用アンテナ⁽⁷⁾

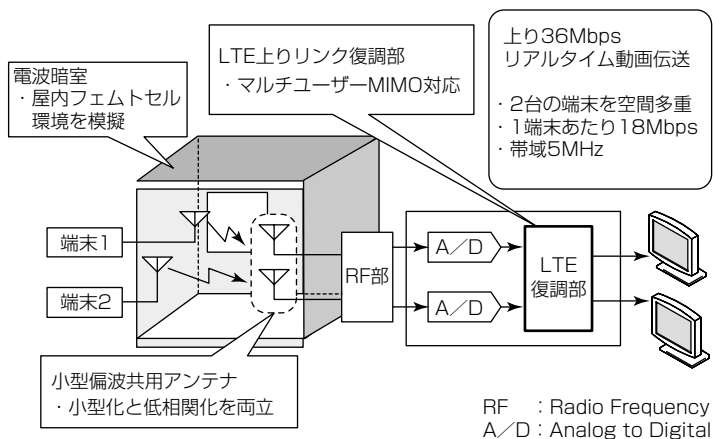


図5. 無線伝送実験系の構成

えるためには半波長(2GHzで7.5cm)以上アンテナを離すことが望ましいが、筐体(きょうたい)が小型な場合は実現が難しい。

この課題に対する解決策として、直交偏波を利用して1本分の実装面積で2本の低相関アンテナを実現する小型偏波共用アンテナが有効である。このアンテナを用いることで、低相関化によるMIMO通信容量の向上と、アンテナ実装面積低減の両立が可能となる。図4に小型偏波共用アンテナの構造を示す。

このアンテナは2つの入力ポートによって直交する2つの直線偏波を放射する偏波共用パッチアンテナである。パッチ導体の端部に接地導体を対向配置させ、さらにパッチ導体のエッジ中央部に切り欠きを設けることによって小型化を図っており、従来のパッチアンテナに比べ、面積比で約1/4に小型化されている。誘電体を使用していないため軽量化が可能であり、小型な筐体への内蔵に適している。

3. 無線伝送実験

ここでは、小型偏波共用アンテナを適用したMIMO空間多重伝送の実現例として、LTE上りリンクの無線伝送実験について述べる。

3.1 実験諸元

図5に無線伝送実験系の構成を、表1に実験諸元を示す。この実験では、2台の端末からLTE上りリンク信号でハイビジョン動画を送信し、電波暗室内に構築したMIMO伝送路を介して、2.3節で述べた小型偏波共用アンテナによって受信し、FPGA(Field Programmable Gate Array)に実装した復調部でリアルタイム復調・復号を行い、パソコン上で動画を再生する。この実験では、2台の端末で空間多重するマルチユーザーMIMO伝送を実施した。これによって、複数の端末を同一時刻・周波数上に収容可能となり、周波数利用効率が向上する。今回の実験では、端末1台あたり18Mbps、合計36Mbpsを5MHz帯域で伝送した。MIMO信号の分離には2.2節に述べたMMSE空間フィルタリングを適用した。また、屋内フェムトセル環境の特徴である低速移動環境を考慮して、MMSE空間フィルタリングの計算頻度を最適化することで、FPGA1石で実現可能な規模に回路の小型化を実現している。

表1. 実験諸元

項目	諸元
周波数帯	1.95GHz帯
帯域幅	5MHz(25リソースブロック)
変調方式	64QAM
符号化率	5/6
誤り訂正符号	Turbo Code
送信アンテナ数	2(ダイポールアンテナ×1, 端末数2)
受信アンテナ数	2(小型偏波共用アンテナ×1)
最大伝送速度	18.336Mbps(1端末あたり)

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

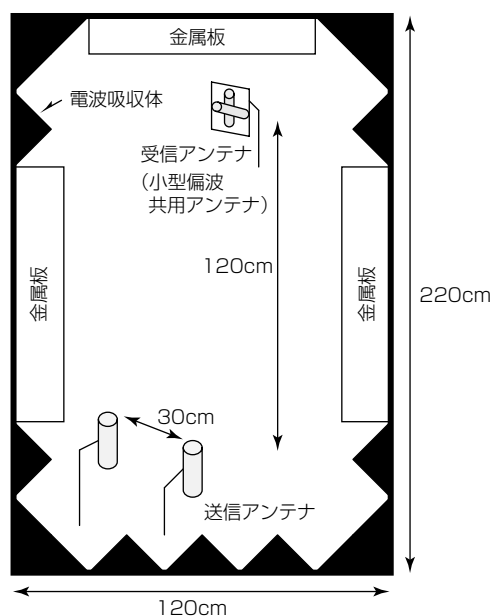


図6. 実験で使した無線伝搬環境

3.2 実験結果

図6にこの実験で使した無線伝搬環境を示す。実験では屋内フェムトセル環境を想定し、電波暗室内に複数の金属板を設置して多重反射環境を構築した。端末側はダイポールアンテナで送信し、これを基地局側の小型偏波共用アンテナで受信した。アンテナの偏波面は、送信側がともに垂直、受信側が偏波共用によって水平・垂直となる。また、送信側のアンテナ間隔は2波長(30cm)まで近付け、端末側の偏波面が同じでかつ端末間の距離が近く、マルチユーザーMIMOとしては劣悪な条件での評価も実施した。

実験の結果、基地局受信側に小型偏波共用アンテナを適用することによって、アンテナ1本分の実装面積で2本のアンテナを空間的に離れた場合と同様のマルチユーザーMIMO多重伝送が実現可能であり、5MHz帯域のLTE上りリンク通信で、3GPP規格上の最大スループット(端末数2のマルチユーザーMIMO適用時)に相当する36Mbpsが達成可能となることを確認した。図7に36Mbps伝送時のコンステレーション(受信信号点の配置)を示す。

4. むすび

周波数資源を有効活用する手法として注目を集めているMIMO空間多重技術を小型偏波共用アンテナと組み合わせることで、装置の小型化と高い通信速度が実現可能となることを、試作したLTE上り復調部と小型偏波共用アンテナを用いた無線伝送実験で示した。

今後は、さらなるアンテナ本数の増加による伝送速度の高速化と装置の小型化を両立させる方式確立に取り組む。一例として、アンテナ選択によってRF回路の規模を増やさずに通信品質と伝送速度の向上を実現する方式に関して検討を進める予定である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

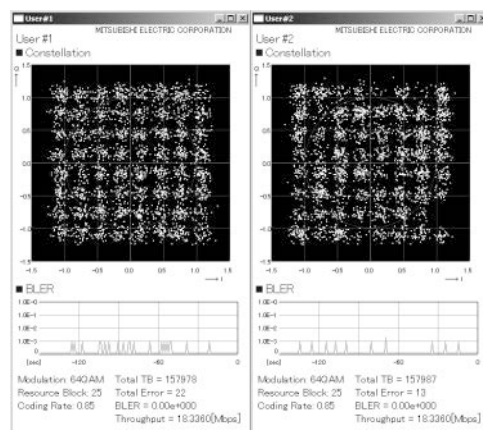


図7. 36Mbps伝送時のコンステレーション(受信信号点の配置)

参考文献

- (1) 3rd Generation Partnership Project <http://www.3gpp.org>
- (2) 中村武宏, ほか: 3GPP LTE/SAE標準仕様完成における活動と貢献, NTT DOCOMOテクニカルジャーナル, 17, No. 2, 36~45 (2009)
- (3) IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput (2009)
- (4) IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1 (2006)
- (5) 中澤正幸, ほか: 高性能フェムトセル無線基地局装置, 三菱電機技報, 84, No.8, 445~448 (2010)
- (6) 唐沢好男: MIMO伝搬チャネルモデリング, 電子情報学会論文誌B, J86-B, No.9, 1706~1720 (2003)
- (7) 柳 崇, ほか: 広帯域整合用スタブと開放端容量を併用した直交偏波共用MSA, 電子情報通信学会技術研究報告, AP2009-144, 13~18 (2009)
- (8) 塚本 薫, ほか: LTEフェムトセル基地局用マルチユーザーMIMO性能検証装置の試作, 電子情報通信学会総合大会, B-5-2 (2010)
- (9) 塚本 薫, ほか: LTEフェムトセル基地局における下りリンクアンテナ選択送信ダイバーシチに関する検討, 電子情報通信学会総合大会, B-5-62 (2011)
- (10) 元吉克幸, ほか: LTEフェムトセル基地局における上りリンクアンテナ選択受信ダイバーシチに関する検討, 電子情報通信学会総合大会, B-5-63 (2011)