

室内 MIMO システムの平均チャネル容量を最大化する 基地局アンテナ指向性設計法

室内に設置する2×2 MIMO基地局における平均チャネル容量を最大化するアンテナ指向性設計手法を、幾何光学法を用いた伝搬特性解析により明らかにした。なお、本研究は横浜国立大学 大学院 工学府 物理情報工学専攻 新井研究室（新井 宏之教授）との共同研究により実施した。

井上 祐樹 長 敬三

1. まえがき

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)^{*1} 多重伝送は、複数の送信アンテナから同一の無線リソース（時間、周波数、コード）を用いて異なる情報データを送信し、複数の受信アンテナで受信して信号を取り出すことで、伝送速度を向上できる伝送方法であり、現在、無線LANやWiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), LTE (Long Term Evolution) などの標準化規格に採用されている [1]~[3]。MIMO 多重伝送の手法は、送信側で伝搬チャネル^{*2} 情報を用いるか用いないかにより、固有モード伝送方式^{*3} と空間分割多重方式^{*4} とに分類[4]でき、標準化規格では両方式共に規定がある。本稿では、実現性を考慮し、比較的実装が簡単な空間分割多重方式について扱う。その中でもさまざまな受信方式が提案[5]されているが、本稿では受信方式によら

ないチャネル容量を用いて概説する。

MIMO 多重伝送を行う基地局には無指向性アンテナが一般的に用いられているが、指向性アンテナを用いることにより伝送特性を改善できることが報告されている [6]。しかし、伝送特性を改善可能とするアンテナの指向性は、基地局が設置される環境に依存する。これまでは、特定の環境における指向性アンテナによる伝送特性改善効果について報告されているが、具体的な指向性の設計指針がなかった。さらに、近年のブロードバンドの普及により、特にオフィスや家庭のような室内環境での無線通信の高速化の要求が高まり、アンテナ指向性の設計指針が重要な技術課題となっている [7]。

本稿では、室内環境における指向性アンテナの設計法を確立することを目的とし、2×2 MIMO 構成の基地局装置を室内に配置することを想定したときの、部屋のアスペクト比（縦横比）に対する伝送特性が最大と

なる指向性アンテナの半値幅^{*5}、指向方向の設計式を幾何光学手法^{*6}を用いた伝搬特性解析により明らかにした結果について述べる。本検討は、MIMO システムへの指向性アンテナの適用検討で定評のある横浜国立大学 新井教授との共同研究で実施した。

2. 提案する指向性設計法

2.1 伝送特性解析モデル

本検討で用いた部屋のモデルの天井からの俯瞰図を図1に示す。部屋

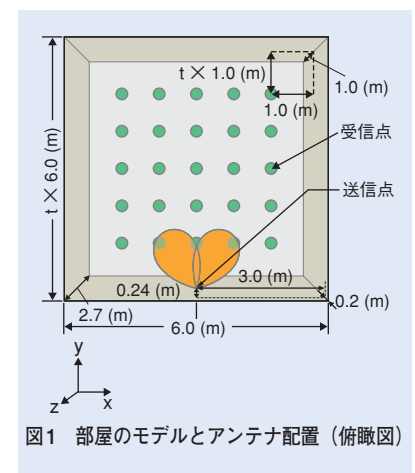


図1 部屋のモデルとアンテナ配置 (俯瞰図)

*1 MIMO：複数の送受信アンテナを用いて伝送容量を拡大する無線通信技術。
*2 伝搬チャネル：無線通信の個々の通信路。ここでは各送受信アンテナ間の通信路。
*3 固有モード伝送方式：あらかじめ推定した伝搬チャネル情報を基に送信側で指向

性形成を行って信号を伝送するMIMO 多重伝送方式。
*4 空間分割多重方式：それぞれのアンテナ素子に異なる情報データを入力して送信するMIMO 多重伝送方式。

*5 半値幅：アンテナから放射されている電力がその最大値から半分になるまでの角度範囲。指向性の鋭さを表す。
*6 幾何光学手法：電磁波の波動性を考慮せず、電磁波の伝搬を幾何学的な線として扱う手法。

は横方向 (x方向) 6.0m, 縦方向 (y方向) $t \times 6.0m$, 高さ方向 (z方向) 2.7mの直方体の空間で, 壁面の材質はコンクリートとした. ここで t は部屋のアスペクト比を表す. 基地局アンテナは図1に示すように一方の壁面 (zx面) のx方向の中央部に設置する場合を想定し, 天井から0.2m, 部屋の壁から0.24mの位置に素子間隔を搬送波周波数5GHzの半波長3.0cmにして固定した. 移動局アンテナは床から1.0mの高さで, 図1に示すx方向, y方向共に部屋サイズの1/6間隔で移動局を移動させ, 全部で25の地点で測定するものとした.

基地局アンテナの各素子の指向性 $D(\theta)$ は, 式(1)で示されるペンシルビーム^{*7}と仮定し, 移動局アンテナには, 各素子に等方性アンテナ^{*8}を適用した.

$$D(\theta) = \begin{cases} \cos^q(\theta) & (0 \leq \theta \leq \pi/2, 3\pi/2 \leq \theta \leq 2\pi) \\ \alpha_{F/B} \cos^q(\theta) & (\pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/2) \end{cases} \quad (1)$$

$$\Theta = -\frac{\log_{10} 2}{\log_{10} \cos(\theta_H/2)}$$

ここで $\alpha_{F/B}$ はF/B比 (Front-to-Back ratio)^{*9}の逆数を表す. 本稿では, 後方への放射のない理想的なアンテナ (F/B比が ∞ , $\alpha_{F/B} = 0$) を仮定した. θ_H は指向性の半値幅を表す. 本検討では2つの素子の半値幅は同じとし, 互いの指向性の最大放射方向は図2に示すように, 基地局を設置した壁面の法線方向に対して対称とした. また指向性の利得は, 図1におけるxy面, yz面双方で半値幅を θ_H 同一として式(2)を用いて算

出した [8].

$$Gain = 10 \log_{10} \frac{4\pi}{\theta_H^2} \quad (2)$$

半値幅を設定し式(1)および式(2)から計算したペンシルビームの指向性を図3に示す.

各地点における伝搬特性を, 幾何光学手法を用いた伝搬特性解析により算出し, 得られた伝搬特性に基づいてMIMO多重伝送時のチャンネル容量 C を式(3)によって算出した. チャンネル容量は, ある周波数の伝搬路において単位時間当りに伝送できる最大の情報量を表し, 総送信電力を一定とすると, チャンネル容量が高いほど周波数利用効率¹⁰が優れ, 高速なデータ通信が可能であることを示す.

$$C = \log_2 \left[\det \left[I + \frac{P_t}{m\sigma^2} HH^H \right] \right] \\ = \sum_{i=1}^m \left(1 + \log_2 \frac{P_t \lambda_i}{m\sigma^2} \right) \text{ [bit/s/Hz]} \quad (3)$$

式(3)において m は基地局のアンテナ本数であり, 今回の場合 $m = 2$ である. P_t は総送信電力, σ^2 は雑音電力

を表す. H はチャンネル行列^{*10}であり, H^H はその H の複素共役転置を表す. λ_i はチャンネル行列 H の i 番目の固有値を表す. I は単位行列である. また伝搬特性解析における基本仕様を表1に示す.

以上の環境で, 2×2 MIMO空間分割多重伝送を行ったときに平均チャンネル容量が最大となる半値幅およびビーム間角度を有する基地局アンテナ指向性の条件について検討した.

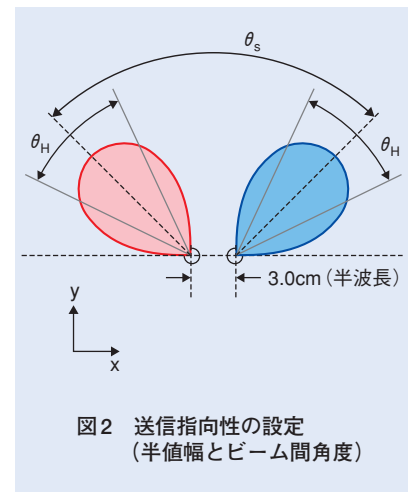


図2 送信指向性の設定 (半値幅とビーム間角度)

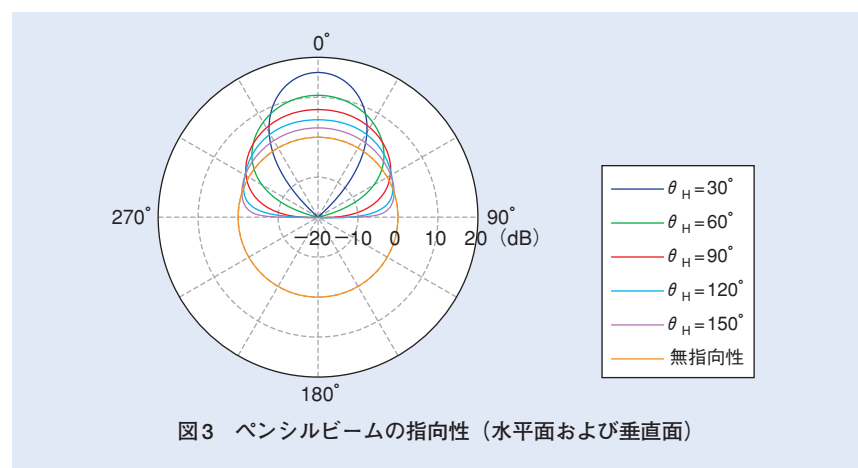


図3 ペンシルビームの指向性 (水平面および垂直面)

*7 ペンシルビーム: 3次元空間内で一方へ強い指向をもつアンテナの指向性.
*8 等方性アンテナ: 全方向へ均一に電磁界を放射し, 利得を評価するときの規準となるアンテナ. 仮想的なもので現実には存在しない.

*9 F/B比: アンテナの最大放射方向の電力とその反対側辺における, ある角度範囲の不要な放射電力の最大値との比.

*10 チャンネル行列: 送受信アンテナ間のチャンネル応答を表す行列. チャンネル行列の固有値は各送信信号系列の受信SNR (Signal to Noise Ratio) に影響する.

表1 シミュレーション基本仕様

MIMO	2×2
搬送周波数	5GHz
送受信アンテナ間隔	半波長
シンボルレート	4Msps
変調方式	QPSK (ヘッダ部) 16QAM (データ部)
各アンテナ送信電力	-5dBm
雑音電力	-85dBm
チャネルモデリング	レイトレース法
壁面の材質	コンクリート
比誘電率	2.76
導電率	0.0023S/m
最大反射回数	5回

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying): 4位相偏移変調, 16QAM (16 Quadrature Amplitude Modulation): 16値直交振幅変調, sps: symbol per second

2.2 伝送特性評価結果

部屋のアスペクト比 t を変化させたときの、基地局指向性の最大放射方向と平均チャネル容量の関係を図4に示す。図4において横軸は最大放射方向を、最大放射方向間の角度 θ_s で示している。図4(a)~(c)はそれぞれアスペクト比 t が0.5, 1, 2の場合を示し、各グラフにおいて半値幅を 30° , 60° , 90° , 120° , 150° および無指向性（等方性アンテナ）としたときの結果を示している。

図4より、いずれのアスペクト比においても、無指向性を用いた場合

よりも平均チャネル容量が良くなる指向性が存在していることが分かり、特にアスペクト比が1以上においてその傾向が顕著である。

部屋のアスペクト比に対する平均チャネル容量を最大とする半値幅および最大放射方向の関係を図5に示す。平均チャネル容量を最大とする半値幅はアスペクト比が大きくなるにつれ狭くなる傾向もみられるが、おおむね 60° 前後の値となっている。最大放射方向の間の角度 θ_s はアスペクト比が大きくなるにつれ狭くなる傾向がみられる。図5(b)に基地局から相対する壁の角方向の角度 θ_c を重ねてプロットしてみると、両者が共に同じ傾向で減少している。これらの結果から、半値幅を 60° とし、最大放射方向をそれぞれ部屋の角方向に向けることで本検討の環境では平均チャネル容量を最大にできることが分かる。

3. 指向性アンテナによる伝送特性改善理由

基地局に指向性アンテナを用いる

ことでMIMO 多重伝送時の伝送特性が改善する要因としては、主にアンテナ利得の増加と空間相関^{*11}の低減が考えられる。

式(3)中の固有値 λ_i の中で最大となる固有値を第1固有値、2番目を第2固有値と定義すると、直接波が存在する室内環境では主に第1固有値が支配的になり、第2固有値に比べ大きくなる [9]。アンテナ利得の増加は、第1固有値を大きくし特性を改善できる効果をもつと考えられる。

一方、空間相関の低減は、素子間隔が狭く無指向性のアンテナ素子を用いると空間相関が高くなるような状況でも、指向性アンテナを別々の方向に向けることによりチャネル容量を増加させる効果をもつと考えられる。

今回の検討では、アンテナ素子間を半波長離しており、無指向性アンテナを用いても空間相関は低くなる条件と考えられるため、平均チャネル容量の改善効果は、主にアンテナ利得の増加によるものと考えられる。

例として、アスペクト比 $t=2$ で半値幅を 60° のときの第1、第2固

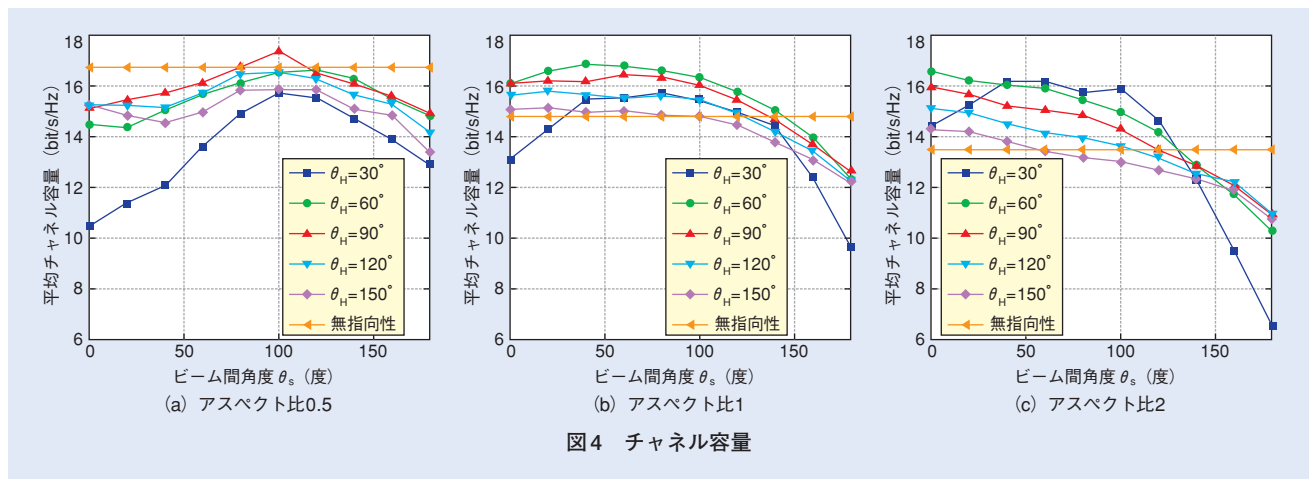


図4 チャネル容量

*11 空間相関：空間的に離れた2点のチャネル間のフェージングの相関、電波の到来状況および2点間の位置関係に依存する。空間相関が高いと信号の分離が難しくなりMIMOのチャネル容量が低下する。

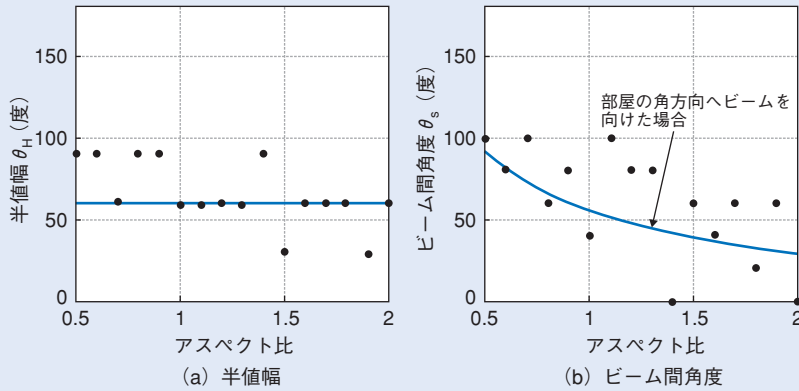


図5 平均チャネル容量を最大とするビーム設定

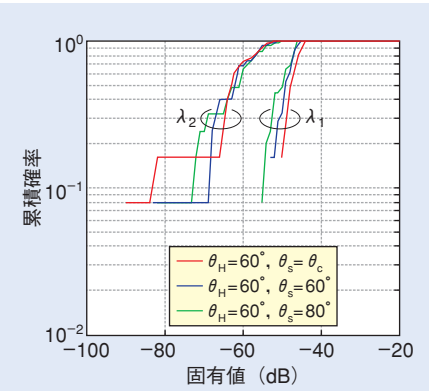


図6 固有値の累積確率

有値の累積確率分布を図6に示す。第1固有値が支配的であり、ビーム間角度 θ_s を変化させることで第1固有値が改善する傾向を確認できる。

4. あとがき

本稿では、室内移動通信環境を想定し、部屋のアスペクト比に応じて、 2×2 MIMO空間分割多重伝送時の平均チャネル容量を最大とする基地局アンテナ指向性設計法を、幾何光学手法を用いた伝搬特性解析により明らかにした。その結果、半値幅を 60° とし最大放射方向を部屋の角方向に向けることで、室内の平均チャネル容量を最大化できることを示した。

今後は素子数を増やした検討や、

アンテナの実現方法について検討を行い、高速移動通信の普及が予想される室内環境での効率的なエリア構築における、基地局アンテナの設計仕様や設置の手順書などにまとめ、事業に活かしていく予定である。

文献

- [1] IEEE Draft Std P802.11n/D2.00, Feb. 2007.
- [2] 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor1-2005.
- [3] 3GPP-TR 25.876: "Multiple Input Multiple Output in UTRA."
- [4] 大鐘 武雄: "MIMO システムの基礎と要素技術," アンテナ・伝搬における設計・解析手法ワークショップ (第29/第30), 2004.
- [5] 佐和橋, ほか: "マルチアンテナ無線伝送技術/その1 マルチアンテナ無線伝送技術の概要," 本誌 Vol.13, No.3, pp.68-75, Oct. 2005.
- [6] 伊藤 直人, 新井 宏之, 丸山 珠美, 長 敬三: "非均一指向性を有する切替型送信アンテナによる室内MIMO 伝送特性の改善効果," 信学技報, AP2005-134, Jan. 2006.
- [7] 守倉 正博, 久保田 周治 監修: "802.11 高速無線LAN 教科書, 改訂版," インプレス, 2005.
- [8] J. D. Kraus: ANTENNAS, Second edition, McGraw-Hill, USA, pp.26-27, 1988.
- [9] 鶴田 誠, 唐沢 好男: "仲上-ライスフェージング環境におけるMIMO チャネル行列の第1固有値の簡易計算法," 信学論B, Vol.J87-B, No.9, ワイヤレスパーソナル通信におけるアンテナ・伝搬の最新技術特集号, pp.1486-1495, 2004.