

# 屋内 MIMO システムにおける送信アンテナ指向性の影響

忠田 雅裕 藤元 美俊 堀 俊和

福井大学大学院 工学研究科 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

E-mail: [chuuta@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp](mailto:chuuta@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp)

**あらまし** 本報告では、屋内 MIMO システムの基地局アンテナとして、指向性アンテナを用いた場合の電力半値幅およびアンテナのビーム方向と平均チャネル容量との関係を明らかにするとともに、平均チャネル容量改善効果について考察を行う。さらに、平均受信 SN 比を変化させることで、チャネル応答行列の固有値が平均チャネル容量改善率に及ぼす影響を明らかにする。その結果、適切な指向性アンテナを用いることでオムニアンテナを用いた場合に比べ、平均チャネル容量を 1.5 倍程度まで改善できることがわかった。また、固有値解析から基地局位置に適したビーム幅、ビーム方向に設定することで反射波成分が大きくなり、チャネル容量をさらに改善できることがわかった。

**キーワード** MIMO, 指向性アンテナ, 電力半値幅, 固有値

## Effect of Radiation Pattern of Transmission Antenna on Indoor MIMO System

Masahiro CHUTA Mitoshi FUJIMOTO Toshikazu HORI

Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukui, 910-8507 Japan

E-mail: [chuuta@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp](mailto:chuuta@wireless.fuis.fukui-u.ac.jp)

**Abstract** The performance of the indoor MIMO system using directional antennas is studied in this paper. And the relationship between the channel capacity and radiation characteristics of the antenna is evaluated. Moreover, the effect of eigenvalue of channel response matrix on variation of average channel capacity is investigated. As a result, it is shown that the average channel capacity can be improved by about 1.5 times than the case of omni-directional antenna is used. It is also indicated through eigenvalue analysis that the channel capacity is improved moreover when the beamwidth and direction of the basestation antenna is set appropriately.

**Keyword** MIMO, Directional Antenna, Half Power Beam Width, Eigenvalue

### 1. まえがき

現在 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)システム [1]が大きく注目され、一部実用に供されている。MIMO システムでは、送受信局それぞれに複数のアンテナを用いて通信を行うことにより、周波数帯域を広げることなく大容量無線通信が可能であり、その 1 つとして IEEE802.11n の規格化が進められている。

屋内 MIMO システムにおいて、基地局は部屋の入り口や壁際に設置することが考えられる。その場合、基地局アンテナとしてダイポールアンテナに代表されるオムニアンテナを用いるより、指向性アンテナを用いた方が良好な伝送特性が得られると考えられる [2][3]。しかし、指向性アンテナを用いる場合、ビーム方向やビーム幅によっては伝送特性が劣化する可能性がある。

本報告では、屋内環境において、基地局に指向性アンテナを用いた屋内 MIMO システムのビーム方向およびビーム幅が伝送特性に与える影響を明らかにする。

以下、2 章では解析のための伝搬解析モデル、アンテナ素子指向性、基地局アンテナのビームの角度差お

よび平均チャネル容量の算出について述べる。3 章では電力半値幅およびビーム方向と平均チャネル容量の関係を明らかにする。4 章ではさらに、チャネル応答行列の固有値が平均チャネル容量に及ぼす影響について明らかにする。

### 2. 屋内 MIMO 伝送解析モデル

#### 2.1 伝搬解析モデル

図 1 に伝搬解析に用いた部屋のモデルを示す。部屋の大きさは縦 20m, 横 20m, 高さ 3m の直方体とした。また、壁の材質は比誘電率 5, 導電率 0.05[S/m]のコンクリートとした。

伝搬解析にはレイトラッキング法を用いた。周波数は 5GHz とし、壁の反射回数は 5 回までとした。シミュレーションで得られた複素受信電圧を正規化することでチャネル応答行列としている。本報告では、基地局アンテナ 2 素子、端末アンテナ 2 素子をそれぞれ半波長間隔で配置した 2×2MIMO 環境を考える。基地局を部屋の隅に設置した場合と壁中央に設置した場合の

2つの配置を考え、基地局アンテナは壁から50cm、高さ1mの位置に設置した。無線端末は図1の室内を縦、横ともに1m間隔で移動させる。計測ポイントは361ポイントであり、各計測ポイントにおいて、無線端末のアンテナの素子をx軸方向と平行に配置した場合( $\phi=0^\circ$ )、y軸方向と平行に配置した場合( $\phi=90^\circ$ )、そして斜め方向に配置した場合( $\phi=45^\circ, 135^\circ$ )の4パターンの配置についてそれぞれ複素受信電圧を求めた。

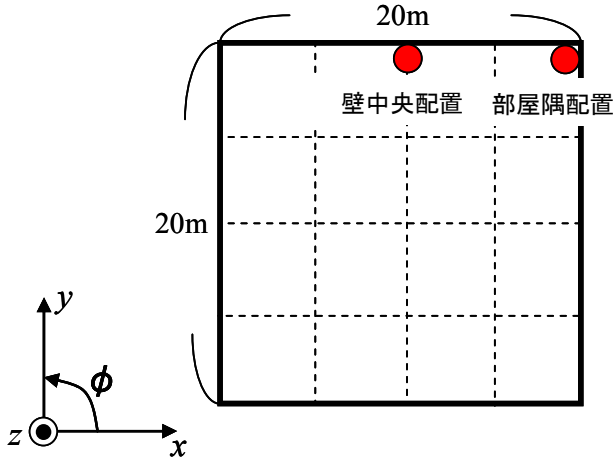


図1 部屋モデル

## 2.2 アンテナ素子指向性

基地局、無線端末とも垂直面電力半値幅 (Half Power Beam Width: HPBW) は  $\theta_{HP}=78^\circ$  とし、基地局アンテナの水平面HPBW  $\phi_{HP}$  をパラメータとして変化させた。ここで、素子指向性には以下の式を用いた[4]。

$$E(\theta, \phi) = \begin{cases} E_{\max} \cos\left\{\frac{\pi(\theta - \theta_0)}{2\theta_{HP}}\right\} \cos\left\{\frac{\pi(\phi - \phi_0)}{2\phi_{HP}}\right\} & (|\theta - \theta_0| \leq \theta_{HP}, |\phi - \phi_0| \leq \phi_{HP}) \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

$\theta_0, \phi_0$  は垂直面、水平面のビームの中心方向、 $E_{\max}$  は電界の補正係数であり、HPBWが変化しても放射効率が常に一定となるように設定した。端末側のアンテナは水平面内無指向性とした。

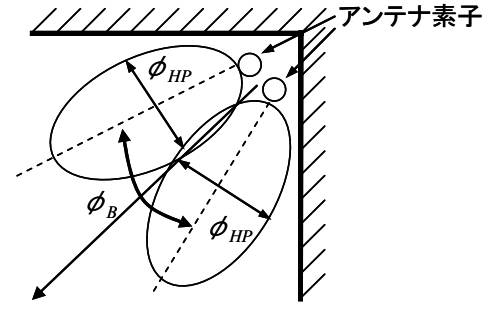
## 2.3 基地局アンテナのビームの角度差

部屋の隅に基地局を設置する場合には、図2(a)のように対角方向と直交する方向にアンテナ素子を配置した。また、ビーム方向は部屋の対角方向を挟んで対称となる方向に向け、2つのビーム方向の角度差を  $\phi_B$  とする。

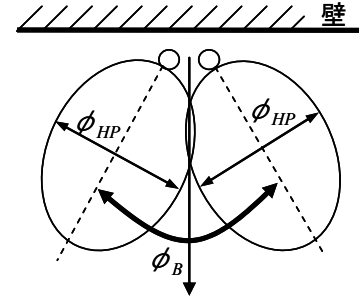
一方、壁中央に基地局を設置する場合は、図2(b)のように壁に対して平行となるように素子を配置し、ビーム方向は対面する壁の方向を挟んで対称となる方向に向け、2つのビームの角度差を  $\phi_B$  とした。

## 2.4 平均チャンネル容量の算出

MIMOシステムにおける重み係数の制御はMMSEに基づくものとし、チャンネル容量は以下の式を用いて求



(a) 部屋隅に基地局を配置した場合



(b) 壁中央に基地局を配置した場合

図2 ビーム幅およびビーム方向

める[1]。

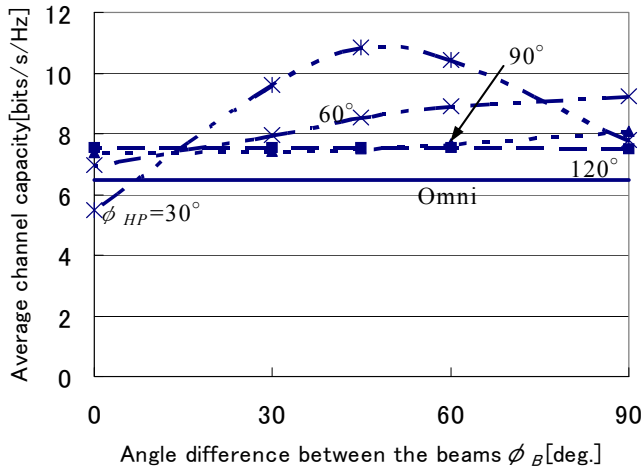
$$C = -\sum_{j=1}^{N_t} \log(1 - h_j^H (H H^H + N_t I_{N_r} / \gamma_0)^{-1} h_j) \quad (2)$$

ここで、 $H$  はチャンネル応答行列、添字  $H$  はエルミート転置、 $h_j$  は  $H$  行列の第  $j$  列、 $I$  はベクトル単位行列、 $\gamma_0$  は平均受信SN比である。まず、2.2節で述べた水平面HPBW  $\phi_{HP}$  と2.3節で示したビームの角度差  $\phi_B$  を設定し、そのときのチャンネル応答行列を求める。求めたチャンネル応答行列を式(2)の  $H$  に代入し、平均受信SN比を設定することでチャンネル容量が得られる。部屋の位置や受信素子の配置ごとにチャンネル容量を算出し、それらの平均値を平均チャンネル容量とする。

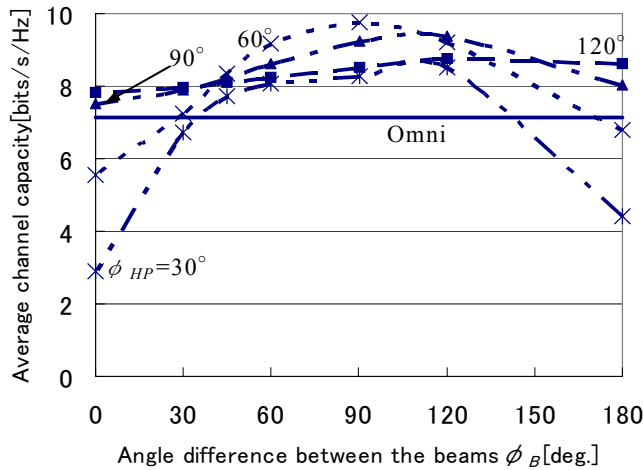
## 3. 電力半値幅およびビームの角度差と平均チャンネル容量の関係

図3にビームの角度差  $\phi_B$  と平均チャンネル容量の関係を示す。図3(a)および図3(b)は、それぞれ部屋の隅に基地局を設置した場合および壁中央に基地局を設置した場合である。横軸はビームの角度差  $\phi_B$  で、縦軸は平均チャンネル容量である。平均受信SN比は30dBに設定した。

図3(a)より、基地局が部屋の隅にある場合には、基地局アンテナにオムニアンテナを用いる場合に比べて指向性アンテナを用いた方がチャンネル容量が改善されていることがわかる。これは、指向性アンテナを用いることで無駄な放射が抑制され、高い受信電力が得られたためと考えられる。また、HPBW  $\phi_{HP}$  とビームの角度差  $\phi_B$  を変化させると、 $\phi_{HP}=30^\circ, \phi_B=45^\circ$  辺りで最も平均チャンネル容量が高くなり、最大で1.5倍



(a) 部屋隅に基地局を配置した場合

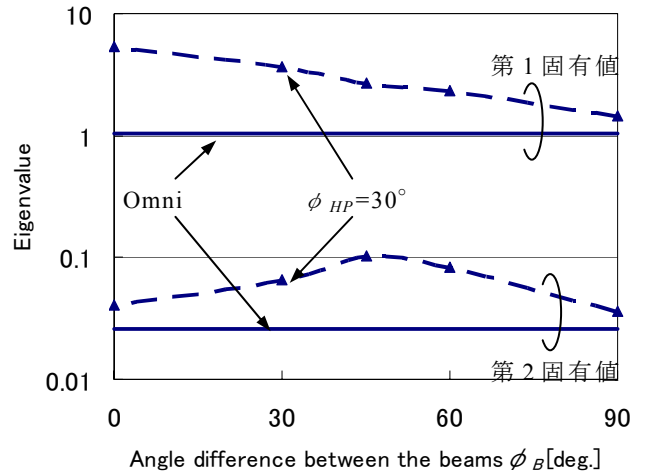


(b) 壁中央に基地局を配置した場合

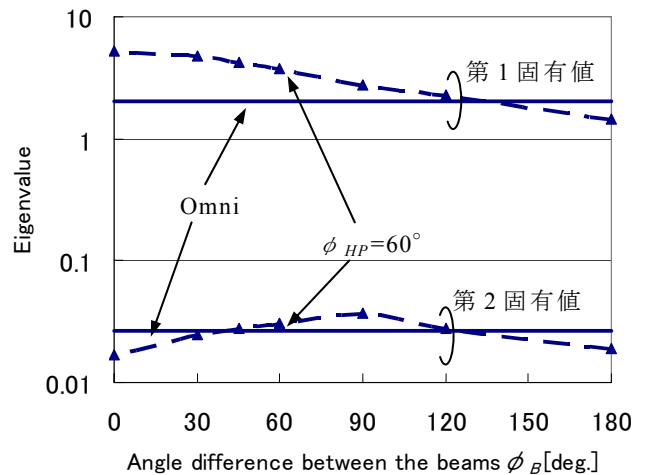
図3 ビームの角度差による平均チャネル容量の変化

程度になることがわかる. その理由を解析するために,  $\phi_{HP}=30^\circ$  でビームの角度差  $\phi_B$  を変化させたときのチャネル応答行列の第1固有値と第2固有値の変化を求めた. その結果を図4(a)に示す. 横軸がビームの角度差  $\phi_B$ , 縦軸がチャネル応答行列の固有値を表している. 図4(a)より第1固有値が支配的なことから仰上-ライスフェージング環境であることがわかる[6]. ただし,  $\phi_B=45^\circ$  付近では第2固有値が高くなっていることから, 反射波成分が大きくなり, チャネル容量が大きく改善したと推察できる. このため, 図3(a)において  $\phi_{HP}=30^\circ$ ,  $\phi_B=45^\circ$  辺りで最も平均チャネル容量が高くなったと考えられる.

また図3(b)より, 壁中央に基地局を設置した場合でも, 指向性アンテナを用いることによって平均チャネル容量が改善されるが, HPBWが狭く, かつビームの角度差が極端に狭かったり, 広すぎたりすると平均チャネル容量は劣化することがわかる. これは部屋の隅に基地局を設置した場合に比べて部屋全体をカバーするために必要な放射角が広く, HPBWが狭すぎると部



(a) 部屋隅に基地局を配置した場合



(b) 壁中央に基地局を配置した場合

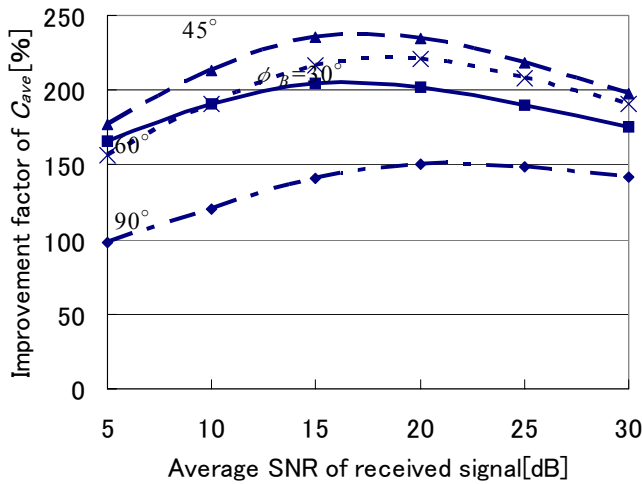
図4 ビーム角度差によるチャネル応答行列の固有値の変化

屋全体に放射できないためと考えられる.

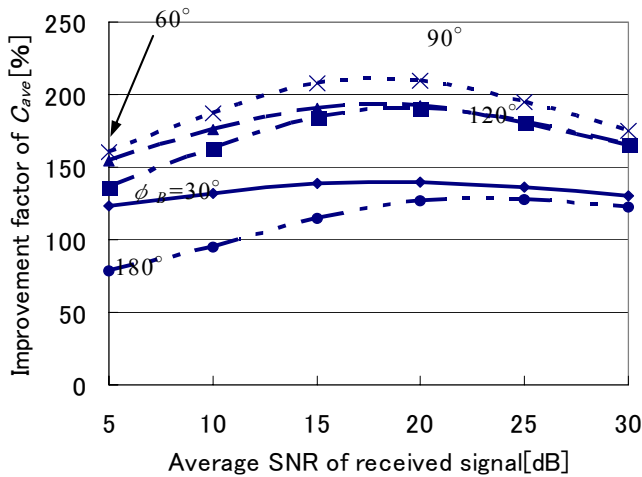
また, 壁中央に基地局を設置した場合に平均チャネル容量が最も高くなるのは  $\phi_{HP}=60^\circ$ ,  $\phi_B=90^\circ$  辺りである. これも先ほどと同様,  $\phi_B$  を変化させたときの固有値の変化(図4(b))と比較すると, 平均チャネル容量のピークが第2固有値のピークと一致している. このことから, チャネル容量の増加は反射波成分の増加によるものと考えられる. 以上のことから, 基地局に指向性アンテナを用いた場合のチャネル容量の増加は, 受信電力の向上よりも, むしろ第2固有値の増加が大きく寄与しているといえる.

#### 4. 固有値が平均チャネル容量改善率に及ぼす影響

図5に平均受信SN比を変化させたときの, 平均チャネル容量改善率を示す. 図5(a)および図5(b)は, それぞれ部屋の隅に基地局を設置した場合, および壁中央に基地局を設置した場合である. 横軸は平均受信SN



(a) 部屋の隅に基地局を配置した場合



(b) 壁の中央に基地局を配置した場合

図5 平均受信 SN 比によるチャンネル容量向上率

比、縦軸は平均チャンネル容量改善率であり、次式より求めた。

$$\alpha = \frac{C_{ave}(\phi_B)}{C_{ave}(0^\circ)} \times 100[\%] \quad (3)$$

ここで、 $C_{ave}(\phi_B)$ はビームの角度差が $\phi_B$ の場合の平均チャンネル容量、 $C_{ave}(0^\circ)$ は $\phi_B$ が $0^\circ$ 、すなわち同一方向にビームを向けた場合の平均チャンネル容量である。上記の式から $C_{ave}(0^\circ)$ と比べた場合の平均チャンネル容量の改善率を知ることができる。

図5(a)より、 $\phi_B$ が $30^\circ$ から $60^\circ$ の場合は、常に平均チャンネル容量の改善率が高いことがわかる。これは図4(a)において第2固有値が大きい条件に一致する。しかし、SN比が低下すると第1固有値しか使えなくなるために、平均チャンネル容量改善率が低下することがわかる。逆に、SN比が非常に良好な場合は同一指向性のアンテナ( $\phi_B = 0^\circ$ )でも第2固有値を活用することから、異なる方向にビームを向けることの効果は少なくなると考えられる。また、図5(b)からも同様に、第2固有値が高い $\phi_B$ が $60^\circ$ から $120^\circ$ の場合には、

常に平均チャンネル容量が改善されるが、 $\phi_B$ を $180^\circ$ まで広げると平均チャンネル容量改善率が大きく低下する。これはビーム角度差 $\phi_B$ を広げすぎると第1固有値が小さくなるためと考えられる。

## 5. むすび

屋内環境において、基地局に指向性アンテナを用いた屋内MIMOシステムの各アンテナのビーム方向およびビーム幅を変化させることで、伝送特性に与える影響をチャンネル応答行列の固有値を用いて明らかにした。さらに、平均受信SN比を変化させることで固有値と平均チャンネル容量改善率の関係を明らかにした。

適切な指向性アンテナを用いることで、オムニアンテナを用いる場合に比べ平均チャンネル容量を1.5倍程度まで改善できることがわかった。また、指向性アンテナを用いることで直接波成分が大きくなるが、基地局位置に適したビーム幅、ビーム方向とすることで、反射波成分が大きくなり、チャンネル容量を改善できることがわかった。

以上より、基地局に指向性アンテナを用いることはチャンネル容量改善に有効であり、電力半値幅とビームの角度差が大きな影響を及ぼすことがわかった。

## 文献

- [1] 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回),” 2004
- [2] 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.
- [3] 上原一浩, 関智弘, 鹿子嶋憲一, “幾何光学手法による任意指向性アンテナに対する屋内伝搬特性解析,” 信学論, Vol. J78-B-II No. 9, pp. 593-601, Sept. 1995.
- [4] 藤元美俊, 堀俊和, “アレーアンテナの指向性制御における素子特性の影響,” 信学技報, AP2005-96, Oct. 2005.
- [5] Sokthai Chan, Mitoshi Fujimoto and Toshikazu Hori, “Novel Configuration for Indoor Wireless LAN Base Station Applied to SDMA System,” Proc. ISAP2005, Seoul, Korea, pp. 253-256, Aug. 2005.
- [6] 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チャンネル行列の第1固有値の簡易計算法,” 信学論, Vol. J87-B No. 9, pp. 1486-1495, Sept. 2004.