

MIMO チャンネル容量と受信アンテナ利得の関係の検討

齋藤 一樹[†] 陳 強[†] 澤谷 邦男[†]

[†] 東北大学大学院工学研究科 〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: †{saitok,chenq,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし レイトレーシング法を用いて屋内伝搬特性の解析を行い、 2×2 MIMO(Multi-Input Multi-Output) チャンネル容量を計算した。その際、利得の異なる 4 種類の受信アンテナを用い、アンテナの利得と MIMO チャンネル容量の関係について検討を行った。合計 132 点の受信点において 2 つの受信アンテナの方向をそれぞれ回転させ、チャンネル容量を統計的に求めた。また、各場所ごとに MIMO チャンネル容量が最大となるようにアンテナ方向を最適化した場合についても解析を行った。その結果、アンテナ方向を任意の方向に向けた場合には、低利得のアンテナを用いた方がチャンネル容量が大きくなることを示した。一方、アンテナの方向を最適化した場合には、高利得のアンテナを用いた方が大きなチャンネル容量が得られた。

キーワード MIMO チャンネル容量, ミリ波帯, アンテナ指向性

Study of Relation between MIMO Channel Capacity and Directivity of Receiving Antenna

Kazuki SAITO[†], Qiang CHEN[†], and Kunio SAWAYA[†]

[†] Department of Electrical and Communication Engineering, Tohoku University, 6-6 Aoba Aramaki-aza
Aoba-ku, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: †{saitok,chenq,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Channel capacity of indoor 2×2 Multi-input Multi-output (MIMO) system is calculated using ray tracing method. Relation of antenna directivity and MIMO channel capacity is evaluated by using 4 antennas which have different directivity. Receiving point and direction of receiving antennas are changed and the cumulated channel capacity is obtained. Channel capacity for the case that the optimum directions of antennas are employed at each receiving point is also evaluated. As a result, in the case that antenna direction is arbitrary, low directivity antenna should be used to obtain a large channel capacity. On the other hand, high directivity antenna should be used to realize larger channel capacity in the case that antenna direction is optimized.

Key words MIMO channel capacity, millimeter waveband, antenna directivity

1. ま え が き

近年、無線による動画配信などの需要がますます高まり、超広帯域な無線通信が求められている。そのため、新たな周波数資源としてミリ波帯を用いた無線通信が注目されている [1], [2]。ミリ波の波長が短いために電子デバイスやアンテナの小形化が可能であり、開口面の大きなアンテナの構成が容易であるといった利点を有している。また、複数のアンテナを利用した通信方式として MIMO(Multi Input Multi Output) システムの研究が盛んに行われている [3]- [5]。MIMO システムは複数のアンテナから同一周波数の独立な信号ストリームを送信することにより、周波数帯域あたりの伝送容量を向上させるシステムである。

これらのミリ波帯通信、開口面の大きいアンテナによる MIMO システムを組み合わせることで超高速通信が可能になるものと期待される。しかし、ミリ波は伝搬損が大きく、壁面などからの反射パスの受信 SNR が劣化するため、MIMO 伝送容量が低下する可能性がある。そのため、高利得アンテナを用いて SNR を改善し、伝送容量を増加させる方法が考えられる。先ほど述べたように、ミリ波ではアンテナの小形化が可能であるため、開口面の大きな高利得アンテナの実装も容易である。しかしながら、高利得アンテナは指向性が鋭いため、受信されるパスの数が減少するので伝送容量がえって減少することも考えられる。そのため MIMO チャンネル容量とアンテナ利得の関係について定量的に評価する必要がある。

数 GHz 帯においては、MIMO チャンネル容量とアンテナ指向性の関係についていくつかの研究が報告されており、無指向性のアンテナを用いるよりも、指向性を持ったアンテナを適切に用いることによってチャンネル容量が改善されることを示している [6], [7]. また、空間相関とアレー素子間結合を考慮した MIMO 伝送特性が検討されており、アンテナ間隔が $3/8\lambda$ 以上離れている場合には空間相関およびカップリングの影響はほとんど無視できることが示されている [8], [9]. さらに、指向性利得や放射効率の異なる複数のアンテナを用いた実環境での MIMO 特性評価が行われており、通信特性を改善するためにはチャンネルロスを軽減することが重要であると記されている [10]. しかしながら、各アンテナの指向性利得の差異は小さく、指向性利得に対する MIMO 特性の議論は十分ではないように思われる.

一方、60 GHz 帯においてアンテナの指向性による伝搬特性への影響についての検討も行われている [11]. しかしながら、ミリ波帯においてアンテナの指向性と MIMO チャンネル容量の関係についての研究は行われていない. そこで、本論文ではレイトレーシング法によりシミュレーションを行いミリ波帯の MIMO 通信を想定し、屋内のような近距離通信でありながら、半波長ダイポールアンテナから、13.91 dBi の高利得を持つ大開口アンテナまでの、利得の異なる受信アンテナを用いて、利得と MIMO 伝送容量の関係について検討を行う. また、アンテナの指向性方向を最適制御することによって、アンテナ利得と MIMO 伝送容量の関係についても検討を行う.

2. MIMO チャンネル容量の計算法

2.1 MIMO チャンネル容量

レイトレーシング法によって送受信アンテナ間の伝搬パスを計算することができる. その伝搬パスより、チャンネル応答行列は

$$g_{ij} = \sum_{k=1}^K P_{ij}(k), \quad i = 1, 2, \dots, N_t, \quad j = 1, 2, \dots, N_r \quad (1)$$

で求められる. ここで、 N_t は送信アンテナ数、 N_r は受信アンテナ数、 K は送信アンテナから受信アンテナに到達するパスの数を表す. g_{ij} はレイトレーシング法によって得られるチャンネル応答行列 \mathbf{G} の要素であり、 $P_{ij}(k)$ は i 番目の送信アンテナから k 番目の伝搬路を経て j 番目の受信アンテナに到達するレイのチャンネル応答である. 一般に MIMO のチャンネル容量は受信電力を正規化した正規化チャンネル応答行列、即ち

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}\mathbf{G} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \left(\sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_r} E[|g_{ij}|^2] / (N_t N_r) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

を用いて求められる. ここで、 $E[\cdot]$ はアンサンブル平均を表す. また、MIMO チャンネル容量は

$$C = \sum_{j=1}^{N_t} \log_2(\lambda_j \gamma_0 / N_t + 1) \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (4)$$

で与えられる [12]. ここで、 $N_t \leq N_r$ であり、 λ_j は $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ の固有

Table 1 解析諸元.

Table 1 Analysis Specification.

Frequency	60 GHz ($\lambda_0 = 5$ mm)
Transmitting antenna	Isotropic antenna
Receiving antenna	Directive antenna
Antenna spacing (Tx)	$0.5\lambda_0$
Antenna spacing (Rx)	$6\lambda_0$
Transmission power	0 dBm
Received noise level	-100 dBm

値、 γ_0 は平均受信 SN 比である. (4) 式より、 2×2 MIMO の場合は第 1 固有値と第 2 固有値の比が 1 に近いほど第 2 ストリームをより有効に使い、チャンネル容量を向上できることがわかる.

2.2 数値解析法

散乱体周辺の電磁界分布を求める方法として、モーメント法や FDTD (Finite Difference Time Domain) 法などが良く用いられている. これらの手法は高い精度で電磁界を計算できることが知られている一方で、散乱体の大きさや伝搬路が波長に比べて十分に大きい場合には膨大なメモリと計算量が要求される. これらに対して、レイトレーシング法は高周波近似法の一種で、電波をレイで近似してその伝搬特性を求める手法であり、散乱体や伝搬路が波長に比べて十分大きい場合に高精度が期待できる. このようにレイトレーシング法はミリ波帯の伝搬チャネルを求めるのに適した手法であり、広く用いられている [13].

レイトレーシング法は送信アンテナから生じる多数のレイの伝搬路を追跡するレイラウンチング法と、散乱体からの反射波の経路を鏡像波を用いて求める鏡像法に分類される. レイラウンチング法は散乱体の数が多い場合に計算量・計算時間の面で鏡像法よりも有利である. 一方、レイラウンチング法では、レイを離散的に発生させて伝搬路を推定するため、受信側では、一定の開口を持つ受信エリアを設ける必要がある. そのため、レイの取りこぼしが生じ正確な伝搬路推定を行うことが出来ない. 従って、精度よく経路長を推定するには鏡像法が一般的に用いられる [14], [15]. MIMO チャンネル容量を求める際には位相情報が必要となるため、経路長を正確に求める必要があるため、本論文では鏡像法を用いている.

2.3 シミュレーション条件

シミュレーション諸元を表 1 に示す. 周波数は 60 GHz、受信アンテナの素子間隔は $6\lambda_0 = 3$ cm、送信電力は 0 dBm、受信ノイズレベルは -100 dBm とした. また、散乱体からの反射の回数は 3 回までとし、回折波は考慮しない. 2 つの送信アンテナの位相差が送信信号に依存し、ランダムに変わることを考慮して送信アンテナ 1 と 2 の位相差を 0 度から 350 度まで 10 度ずつ変化させ、36 通りの送信信号について解析している. 送信アンテナ数 $N_t = 2$ 、受信アンテナ数 $N_r = 2$ の 2×2 MIMO システムについて解析を行った.

3. 解析モデル

解析に用いた屋内モデルは図 1 に示すような散乱体のない直方体の部屋とした. 部屋の大きさは長さ 7.7 m、幅 6.3 m、高さ

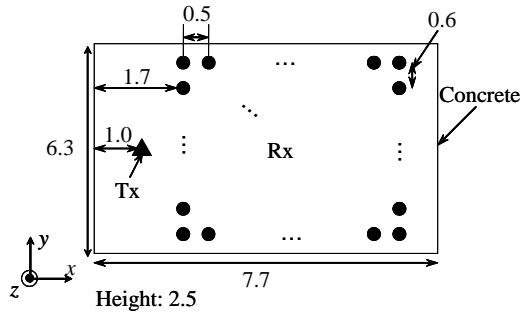


Figure 1 屋内モデル (Unit:m).
Fig.1 Indoor Model.

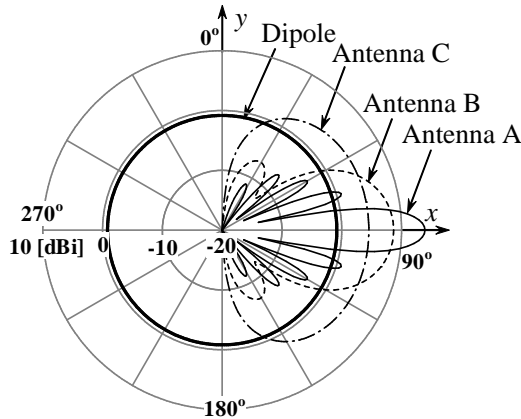


Figure 2 受信アンテナの水平面内利得パターン.
Fig. 2 Gain pattern of receiving antennas in horizontal plane.

2.5 m であり、部屋の天井、壁、床は厚さ 10 cm のコンクリート $\epsilon_r = 6.5 - j0.43$ で構成されている。送信アンテナは壁面から 1 m、高さは 1.5 m の位置に固定した。受信アンテナも 1.5 m の高さで、図 1 に示すように $12 \times 11 = 132$ 点における受信信号の解析を行った。さらに、各受信点で受信アンテナ #1 と #2 を独立に 5 度ずつ 360 度回転させ、受信点ごとに合計 $72 \times 72 = 5184$ 通りのチャネル容量を得た。

送信アンテナは等方性アンテナを仮定し、受信アンテナとして、水平面において無指向性であるダイポールアンテナと指向性を有する 3 種類のアンテナ A, B, C を用いた。指向性アンテナの利得パターンは、反射板つき半波長ダイポールアレーアンテナの数値シミュレーションから求めた値を元に、バックローブを除去したものである。

これらのアンテナの水平面内、垂直面内の利得パターンをそれぞれ図 2、図 3 に示す。また、表 2 にそれぞれのアンテナの最大利得、水平面の 3 dB ビーム幅を示す。なお、アンテナの偏波は垂直偏波である。

4. シミュレーションの結果

4.1 屋内モデルの伝搬環境

屋内モデル内の高さ 1.5 m の水平面で、部屋の中心の領域 A と、部屋の端の領域 B における受信電力の分布を計算した。計算結果とレイリー分布、仲上・ライス分布と比較した結果を図

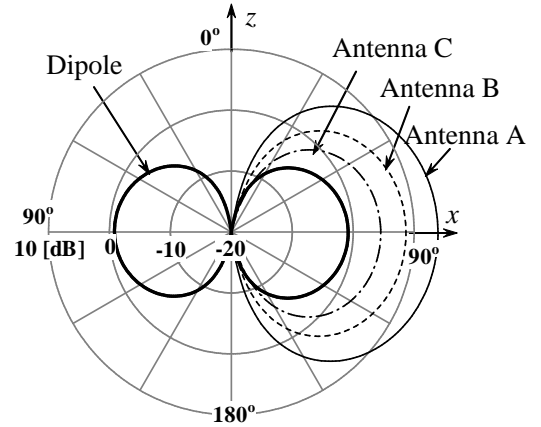


Figure 3 受信アンテナの垂直面内利得パターン.
Fig. 3 Gain pattern of receiving antennas in vertical plane.

Table 2 3つの受信アンテナの特性.

Table 2 Characteristics of three receiving antennas.

	Maximum gain [dBi]	3 dB Beam width in horizontal plane [deg.]
Antenna A	13.91	10
Antenna B	8.67	36
Antenna C	4.53	118
Dipole	-0.82	360

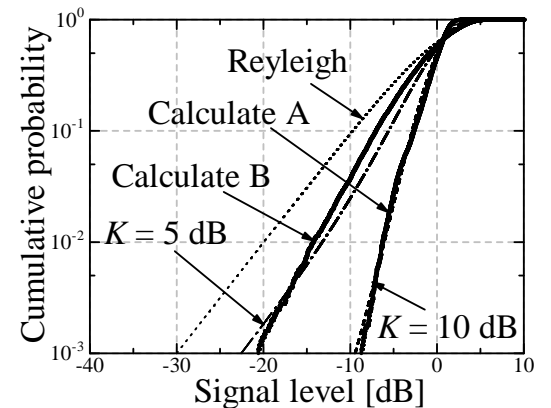


Figure 4 屋内モデルの伝搬環境.

Fig. 4 Propagation environment of indoor model.

4 に示す。その結果、領域 A の電力分布は $K = 10$ dB、領域 B の電力分布は $K = 5$ dB の仲上・ライス分布と一致していることが確認できた。

4.2 アンテナの向きがランダムの場合

図 5 に受信アンテナの 132ヶ所の位置と 5 度毎の水平面の回転方向における MIMO チャネル容量の累積確率を示す。データ数は $132 \times 72^2 \times 36 \approx 2.46 \times 10^7$ である。アンテナの設置場所・方向がランダムの場合には、オムニアンテナが最もチャネル容量が大きくなり、低利得のアンテナの方がチャネル容量は大きくなることを確認できた。具体的には、指向性アンテナの中で最も低利得のアンテナ C を用いることによって高利得のアンテナ A に比べてチャネル容量の中央値が約 33% 改善された。

次に、MIMO チャネル容量の要素となっている固有値の比の

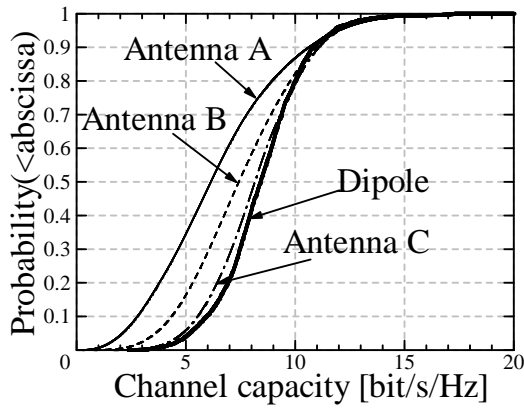


Figure 5 すべての場所とアンテナ方向に対する MIMO チャンネル容量の累積確率。

Fig. 5 Cumulative probability of channel capacity for all locations and all directions.

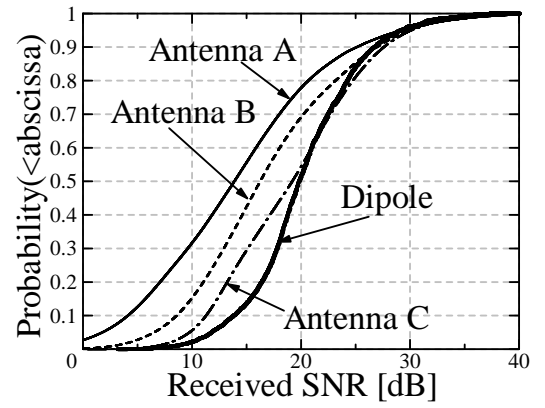


Figure 7 すべての場所とアンテナ方向に対する受信 SN 比の累積確率。

Fig. 7 Cumulative probability of SNR for all locations and all directions.

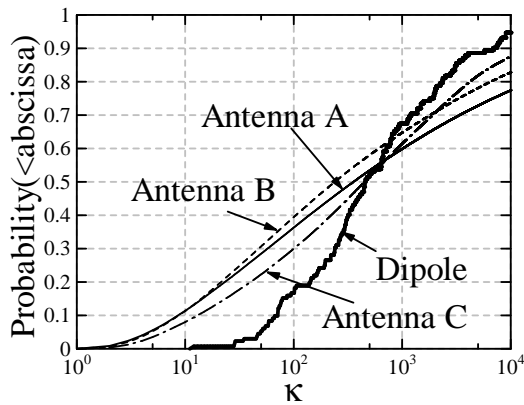


Figure 6 すべての場所とアンテナ方向に対する固有値の比 κ の累積確率。

Fig. 6 Cumulative probability of κ for all locations and all directions.

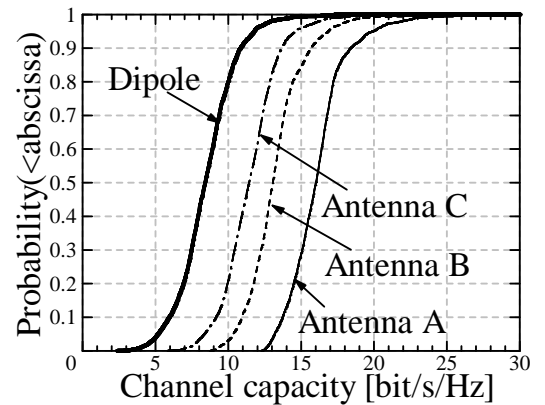


Figure 8 アンテナ方向を最適化した場合の MIMO チャンネル容量の累積確率。

Fig. 8 Cumulative probability of channel capacity for the case of optimum antenna direction.

累積確率を図 6 に示す。固有値の比は無指向性であるダイポールアンテナでは傾向は異なるが、中央値では指向性アンテナ A, B, C の固有値の比とほとんど変わらないことがわかった。ダイポールアンテナは無指向性であるため、アンテナ方向が変化しても信号の受信状況が変化しない。従って固有値の比のばらつきが少ないと予測される。

さらに受信 SN 比の累積確率を図 7 に示す。受信 SN 比は低利得のダイポールアンテナが最も高く、指向性利得が高くなるほど受信 SN 比は低下するという結果が得られた。

以上の結果を考慮すると、低利得なアンテナを用いた場合、固有値の比 κ に着目するとチャンネル容量の減少をもたらすことができるが、SN 比の点で優れているために、チャンネル容量が増加するものと考えられる。

4.3 アンテナの向きを最適化した場合

各受信位置において、アンテナの向きを水平面においてそれぞれ回転させ、最もチャンネル容量が大きくなる時のアンテナの向きを最適化された状態とする。従って測定データ数は $132 \times 36 = 4752$ である。このチャンネル容量の累積確率を図 8 に示す。この場合、高利得のアンテナ A を用いることにより、ア

ンテナ C の場合と比較してチャンネル容量の中央値が約 40% 改善された。無指向性であるダイポールアンテナは最もチャンネル容量が低くなった。

次に、固有値の比の累積確率を図 9 に示す。結果より、ダイポールアンテナの固有値の比は大きい。3 種類の指向性アンテナの固有値の比は指向性利得の低いアンテナ C が最も大きく、アンテナ A が最も小さな値を示した。

固有値の比にはアンテナの利得パターンが関係していると考えられ、角度に対して利得の変化が大きいアンテナほど良くパスを分離できていると予測される。

受信 SN 比の累積確率を図 10 に示す。アンテナの向きを最適化したことにより、図 7 とは逆にアンテナ A の SN 比が最も大きくなっており、これがチャンネル容量の改善をもたらしたのと考えられる。

チャンネル容量に基づいてアンテナ方向を最適化したか、実際にはチャンネル容量を計算してアンテナ方向を定めるのは困難である。そこで、最大チャンネル容量が得られるアンテナ方向の特徴を調べ、アンテナの最大利得方向と最大チャンネル容量の関係を明らかとする。

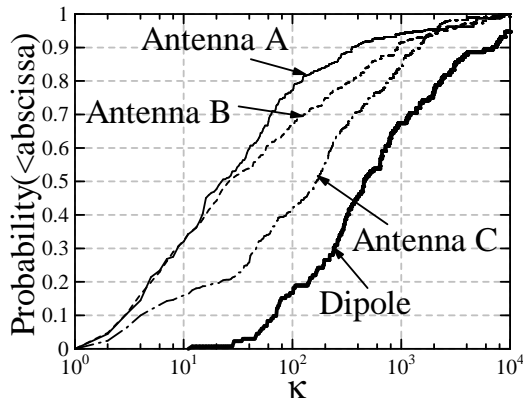


Figure 9 アンテナ方向を最適化した場合の固有値の比 κ の累積確率.
 Fig.9 Cumulative probability of ratio of eigen value κ for the case of optimum antenna direction.

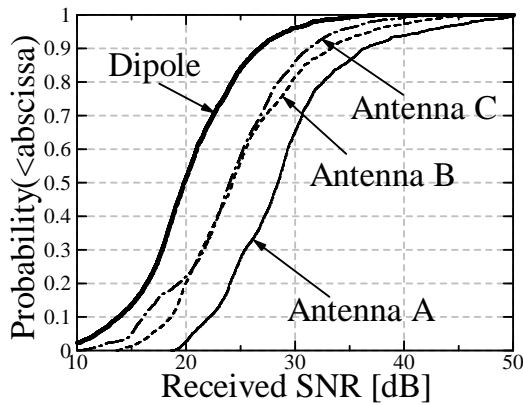


Figure 10 アンテナ方向を最適化した場合の受信 SN 比の累積確率.
 Fig.10 Cumulative probability of received SNR for the case of optimum antenna direction.

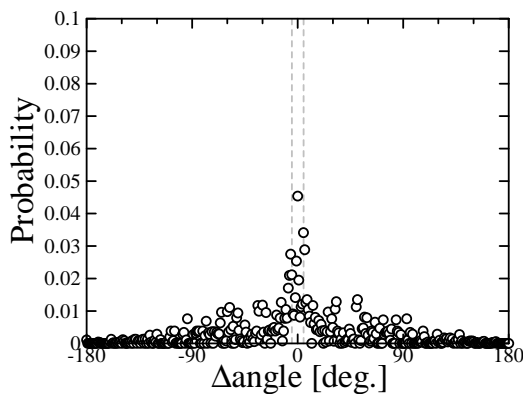


Figure 11 最適化したアンテナ方向と送信アンテナの方向のなす角の確率分布 (アンテナ A).
 Fig.11 Probability distribution of received SNR for the angle between optimum antenna direction and transmitting antenna direction.

最適化された受信アンテナの向きと受信アンテナから見た送信アンテナの方向の差を Δangle と定義し、その分布を図 11 から図 13 に示す。点線で区切られている範囲はアンテナの 3 dB ビーム幅となっている。図 12 の結果より、アンテナ B は向きを

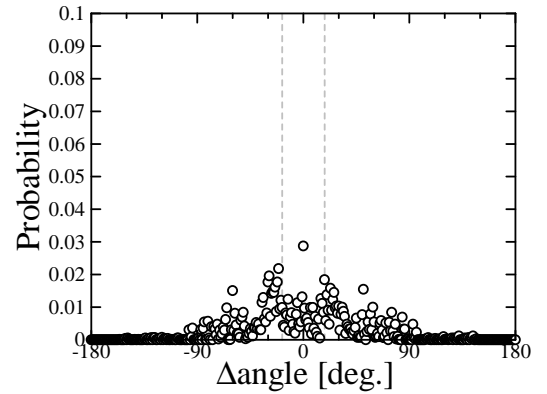


Figure 12 最適化したアンテナ方向と送信アンテナの方向のなす角の確率分布 (アンテナ B).
 Fig.12 Probability distribution of received SNR for the angle between optimum antenna direction and transmitting antenna direction.

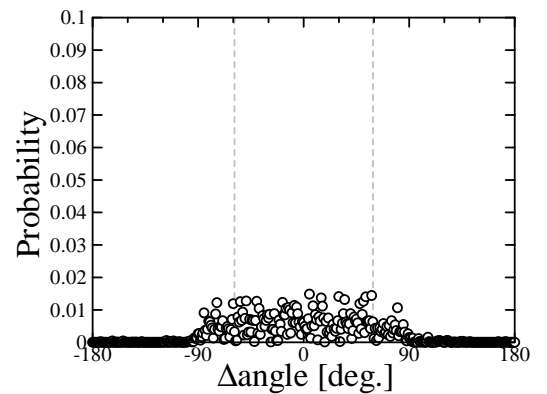


Figure 13 最適化したアンテナ方向と送信アンテナの方向のなす角の確率分布 (アンテナ C).
 Fig.13 Probability distribution of received SNR for the angle between optimum antenna direction and transmitting antenna direction.

最適化したときに送信アンテナを 3 dB ビーム幅に見込んでいない場合が多いことが確認できる。このことから先ほど述べたように、アンテナ B を用いた場合には、SN 比よりも固有値の比の改善を重視した最適化が行われたことが確認できた。

さらに、固有値の比をまったく考慮せずに受信アンテナの向きを送信アンテナの方向に向けた場合の結果と最適化した場合の結果の比較を示す。

アンテナ方向が最適化された状態の比較対象として、各場所において送信アンテナの方向にアンテナの最大利得方向に向けた場合のチャンネル容量を計算する。単純に送信アンテナの方向にアンテナの最大利得方向を向けることによっても、受信 SN 比の改善が得られるため、チャンネル容量の増加が期待できる。

受信アンテナ #1 と #2 の最大利得方向を共に送信アンテナの方向に向けた場合 (Steer) のチャンネル容量を各場所について同様に解析し、その累積確率の中央値をそれぞれアンテナ方向がランダムな場合 (Random)、最適化した場合 (Optimum) のものと比較した。その結果を表 3 に示す。

結果より、単純に受信アンテナを送信アンテナの方向に向け

Table 3 チャンネル容量の比較 (単位: [bit/s/Hz]).

Table 3 Comparison of channel capacity. (Unit: [bit/s/Hz])

	Random	Optimum	Steer
Antenna A	6.14	16.01	12.72
Antenna B	7.42	13.05	11.04
Antenna C	8.16	11.43	10.39
Dipole	8.42	8.42	8.42

るだけでもアンテナの方向がランダムである場合と比較するとチャンネル容量は大きく改善されることが確認できた。具体的には、ランダムの場合と比較して、最も指向性利得の高いアンテナ A では約 2 倍のチャンネル容量が得られ、指向性利得の低いアンテナ C においても約 27% のチャンネル容量の改善が見られた。

一方、最適化した場合にはランダムの場合と比較してアンテナ A では約 2.6 倍のチャンネル容量、アンテナ C では約 40% の改善が得られ、単純に送信アンテナの方向に向けた場合よりも大きな効果が出ている。2 本の受信アンテナの最大利得方向を直接波方向に向ける (Steer) ことによってアンテナ方向を最適化した場合 (Optimum)(図 10 参照) よりも大きな受信 SN 比が得られている。しかしながら、固有値の比が著しく大きくなってしまっており、アンテナ方向を最適化した場合に比べてチャンネル容量は小さくなっている。この傾向は指向性利得が高いアンテナほど顕著に現れている。

この結果より、指向性利得の高いアンテナでは、送信アンテナの方向に受信アンテナを向け、受信 SN 比を大きくすることが必ずしも最適ではなく、場合によっては送信アンテナとは別の方向にアンテナを向けることでチャンネル容量をより増加させることができると予測される。

5. む す び

屋内でミリ波を用いた通信の伝搬特性をレイトレーシング法により解析し、利得の異なる 4 種類の受信アンテナについて MIMO チャンネル容量を求めた。アンテナの向きがランダムである場合を想定し、アンテナの位置と向きに対するチャンネル容量の累積確率を求めた結果、低利得のアンテナを用いた方が受信 SN 比が高く得られるためにチャンネル容量が大きくなることが確認できた。また、アンテナの位置に応じてその向きを最適化した場合のチャンネル容量の累積確率を求めた結果、高利得のアンテナを用いたほうが固有値の比、受信 SN 比共に良い特性が得られ、チャンネル容量が高くなることがわかった。

さらに、アンテナの向きを単純に送信アンテナの方向に向けた場合には、受信 SN 比は大きく改善されるが、同時に固有値の比も大きくなってしまい、最適化した場合のチャンネル容量には及ばなかった。従ってこのような方法では十分に最適なアンテナ方向を設定することは出来ないことが明らかになった。

References

[1] Nan Guo, Robert C. Qiu, Shaomin S. Mo, and Kazukai Takahashi, "60-GHz Millimeter-Wave Radio: Principle, Technology, and New Results," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2007, Article ID 68253.

[2] 大野 健, 小川 晃一, "60GHz 帯屋内高速無線 LAN 用誘電体装荷セクタアレー," 信学論 (B), vol.J88-B, No.9, pp. 1738-1751, 2005 年 9 月.

[3] 唐沢 好男, "MIMO 伝搬チャンネルモデリング," 信学論 (B), vol.J86-B, No.9, pp.1706-1720, 2003 年 9 月.

[4] 大鐘 武雄, 西村 寿彦, 小川 恭孝, "MIMO チャンネルにおける空間分割多重方式とその基本特性," 信学論 (B), vol.J87-B, No. 9, pp. 1162-1173, 2004 年 9 月.

[5] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when Using Multiple Antennas," Wireless Personal Communications 6, pp. 311-335, 1998.

[6] 伊藤 直人, 新井 宏之, "送信アンテナ指向性を考慮した MIMO 伝送特性に関する研究," IEICE Society Conf., B-1-218, Sept. 2005.

[7] M. Chuta, M. Fujimoto and T. Hori, "Channel Capacity Improvement of Indoor MIMO System by Using Directional Antennas," IEICE Tech. Rep., AP2006-159, Mar. 2007.

[8] 大島 一郎, 佐々木 克守, 中田 幸男, 高橋 行隆, 唐沢 好男, "空間相関とアレー素子間結合を考慮した MIMO 伝送特性 [I]," 信学技報, AP2007-103, PP.7-12, 2007.11.

[9] ダン フン レー, ビスワス シュプラト クマル, 谷口 哲樹, 唐沢 好男, 大島 一郎, "空間相関とアレー素子間結合を考慮した MIMO 伝送特性 [II]," 信学技報, AP2007-132, PP.57-62, 2008.1.

[10] 溝口 聡, スティーブ パーカー, フィル ロジャース, 天野 隆, 川端 一彰, 諸岡 翼, "MIMO 用アンテナの一検討," 信学技報, AP2005-88, PP.29-34, 2005.10.

[11] T. Manabe, Y. Mlura and T. Ihara, "Effects of Antenna Directivity and Polarization on Indoor Multipath Propagation Characteristics at 60 GHz," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 14, No. 3, April. 1996.

[12] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," European transactions on Telecommunications, vol.10, no. 6, pp. 585-595, Nov./Dec. 1999.

[13] C.-P. Lim, M. Lee, R. J. Burkholder, J. L. Volakis, and R. J. Marhefka, "60 GHz Indoor Propagation Studies for Wireless Communications Based on a Ray-Tracing Method," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol. 2007, Article ID 73928.

[14] 森 浩徳, 平 和昌, 長谷 良裕, 若菜 弘充, "レイトレース法を用いたマイクロセル遅延波到来方向特性の検討," 信学技報, Vol.97, No.132, pp. 53-58, 1997 年 6 月.

[15] 今井 哲郎, 藤井 輝也, "レイトレースを用いた市街地対応移動通信伝搬推定システム," 信学技報, Vol.97, No.134, pp. 31-38, 1997 年 6 月.