

次世代超高速WLANのためのミリ波帯直交偏波MIMO伝送方式の研究

研究代表者 梅比良正弘 茨城大学 教授
研究代表者 沢田浩和 東北大学電気通信研究所 助教

1 はじめに

IEEE802.15.3c、IEEE802.11ad において、数 Gbps の高速伝送を行うことのできる 60GHz 帯を用いた WLAN/WPAN の標準化規格が開発され、製品化も進められつつある[1][2]。次世代超高速 WLAN においては、10Gbps を超える超高速伝送が要求されると考えられ、広い帯域を利用できる 60GHz 帯といえども MIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送を用いた周波数利用効率の向上が必須であることから、60GHz 帯を用いる MIMO 伝送方式の検討が行われている[3][4]。

筆者らは、これまでミリ波を用いた数 Gbps 高速伝送におけるチャネルモデルや伝送技術の研究開発を進めてきており、ミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送方式を提案し、基礎検討を進めてきた[5]。しかしながら、提案するミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送方式の実現性を明らかにするには、ミリ波帯直交偏波 MIMO チャネルモデルを開発し、そのチャネルモデルを用いて想定される様々な利用環境における伝送特性をシミュレーションにより評価することが必要である。

本研究調査においては、(1)ミリ波帯直交偏波 MIMO チャネルモデルの研究と(2)ミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送技術の研究、の2つのサブテーマを設定し、ミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送方式の実現性を明らかにすることを目的に研究を進めた。ミリ波帯直交偏波 MIMO チャネルモデルに関しては、従来のマイクロ波帯で開発された MIMO チャネルモデルは無指向性アンテナの利用を前提としており、伝搬損が大きく指向性アンテナの利用が必須となるミリ波帯では、このチャネルモデルは適用できない。IEEE802.11ad 等の標準化において開発されたチャネルモデルは SISO を対象としており、水平・垂直偏波を利用した直交偏波 MIMO チャネルモデルを開発し伝搬特性を明らかにした。さらに、開発したチャネルモデルを用いて、ミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送方式の特性評価を行うためにレイトレース法を用いたシミュレーション系を構築し、ミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送方式における、チャネル容量と BER 特性を評価した。

2 ミリ波帯直交偏波 MIMO チャネルモデル

ミリ波帯直交偏波 MIMO チャネルモデルの研究については、ミリ波伝搬特性測定システムを開発し、リビングルーム環境における伝搬データを取得した結果、1Gbps 程度の高速通信が可能な -55dBm 以上 (IEEE802.15.3c 規格) のパスは直接波と 1 回反射波のみであることを実験で確認した。またデスクトップ環境でも伝搬測定を行い、1m の伝送距離で、送信アンテナを 1 本、受信アンテナを 3 本とした SIMO 伝送の場合の受信ダイバーシチ利得を解析し、4-6 dB の改善となることを確認した[6]-[8]。

2-1 ミリ波 MIMO 伝搬特性の取得

ミリ波伝搬特性を取得するために、アドバンテスト社のクロスドメインアナライザをベースとしたミリ波伝搬測定システムを開発した。開発したシステムは、従来のベクトルネットワークアナライザをベースとしたシステムと比較して簡易に構成可能である。図 1 に開発した伝搬測定システムの構成を示す。スーパーヘテロダイン方式を採用しており、送信周波数と局部発振周波数を制御することでミキサから出力される中間周波数を一定として、送受信の中間周波数信号をクロスドメインアナライザに入力し、2 信号入力の振幅差、位相差から伝送信号の複素応答が取得できる。特定小電力無線局の出力規制値 10dBm、実用的サイズのアンテナ利得 10dBi、ミリ波の伝搬損 (88dB@10m) を考慮すると、高速通信可能な伝送距離は最大でも 10m 程度であるため、表 1 のようなパラメータ設定で伝搬特性を測定した。測定用の送受信機は回転台上に設置し、直接波および屋内の壁などからの反射波にアンテナを向けて測定できるようにした。

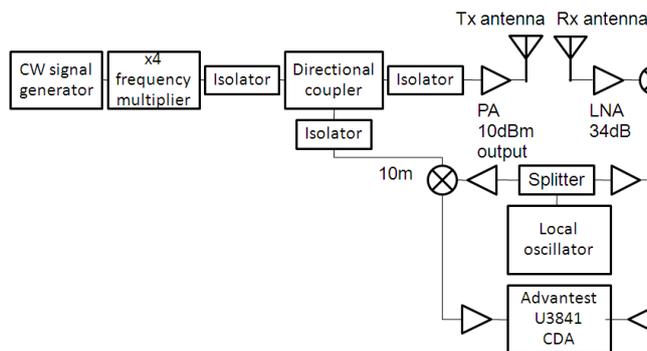


図1 開発したミリ波伝搬測定システム

表1 伝搬測定パラメータ

Measurement frequency band	61-63 [GHz]
Transmission power	10dBm
Tx antenna gain	16dBi (HPBW = 30deg.)
Rx antenna gain	16dBi (HPBW = 30deg.)
Rx LNA amplifier gain	34dB

2-2 ミリ波 MIMO 伝搬特性の解析

ミリ波通信が利用される環境として IEEE802. 11ad で検討されているリビングルームを構築し、伝搬測定を行った。図1のようにL:6.3m×W:4.9m×H:2.7mの大きさの部屋に什器類を配意し、直接波が受信できる場合、および人体により直接波が遮蔽された場合の対策として壁などからの反射波を受信する場合の伝搬特性を取得した。送受信アンテナの各方向に対する受信電力の分布を図2に示す。図中の①は直接波を示し、その他のピーク値②～⑨は反射波を示す。この中で1Gbps程度の高速通信が可能で-55dBm以上(参考: IEEE802. 15. 3c規格)のパスを選択すると、直接波①と1回反射波②の2波までしか無いことが確認できた。

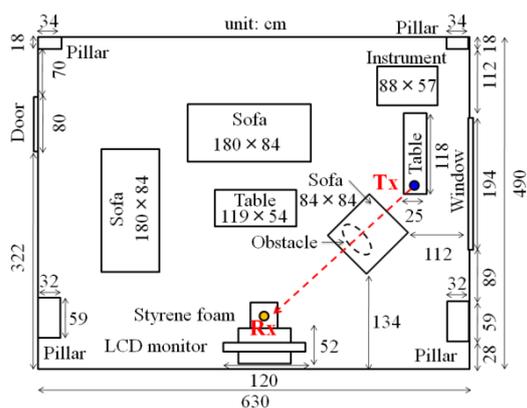


図2 リビングルーム環境

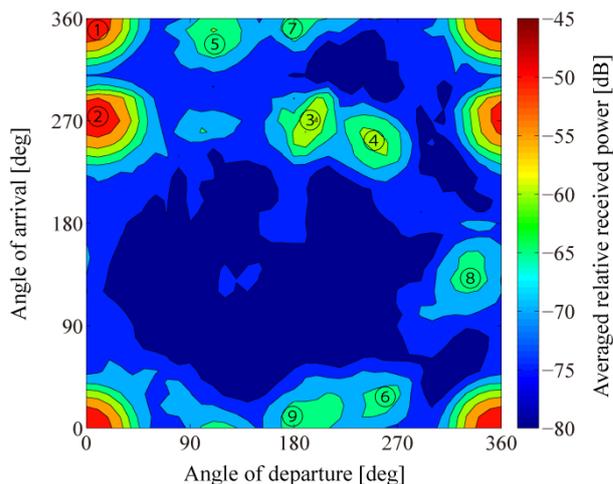


図3 各送受信方向に対する受信電力分布

2-3 ミリ波 MIMO 伝搬特性の解析

60GHz帯を利用した無線通信規格 IEEE802. 15. 3c 及び IEEE802. 11ad では1対1のSISO通信を前提としているが、今後はMIMO通信による更なる高速化へ進むと考えられる。そこで本報告では、アンテナ間距離が比較的近距离となるデスクトップ環境で、SIMO通信時の伝搬特性実験を行った結果、アンテナ選択ダイバーシチにより4dB程度の改善が得られたことを示す。

伝搬実験を行ったデスクトップ環境を図4に示す。測定条件を中心周波数62.5GHz、帯域3GHz、送信電力0dBmとして、送受信アンテナはビーム幅60度(10dBi)のコニカルホーンを机上からの高さ0, 8, 9, 10, 30cmで変化させ、机上の側部を1cm間隔で水平に移動させて受信電力を測定した。ここに送受信位置はパラメータX, Yで表す。図5に示す送受信アンテナの高さを10cmとした場合の受信電力の分布から、図4のノートPC手前側では見通しがあり受信電力が高いが、場所依存による電力変化が縞模様のように現れていることが分かる。これに対し、アンテナ高さを送信側10cm、受信側8, 9, 10cmとして選択ダイバーシチを行った場合の受信電力改善効果を図6に示すと、見通しのある範囲で一様に高い平均電力が得られ、机の奥側エリアでも改善効果が見られた。図7に示す受信電力の分布から、受信ダイバーシチにより、CDF50%値で約4dBの改善効果が得られることが分かった。

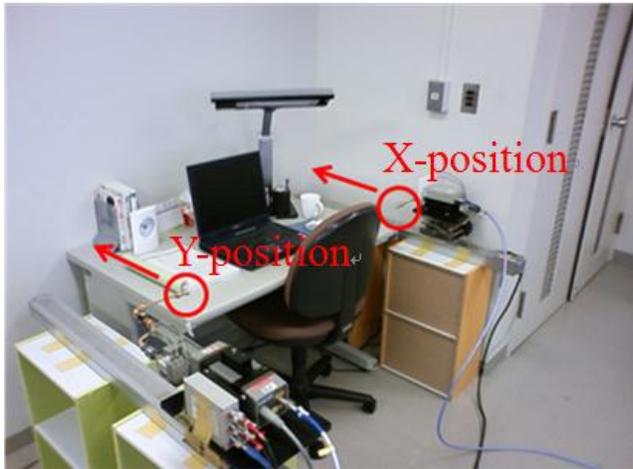


図4 デスクトップ環境の伝搬測定スナップショット

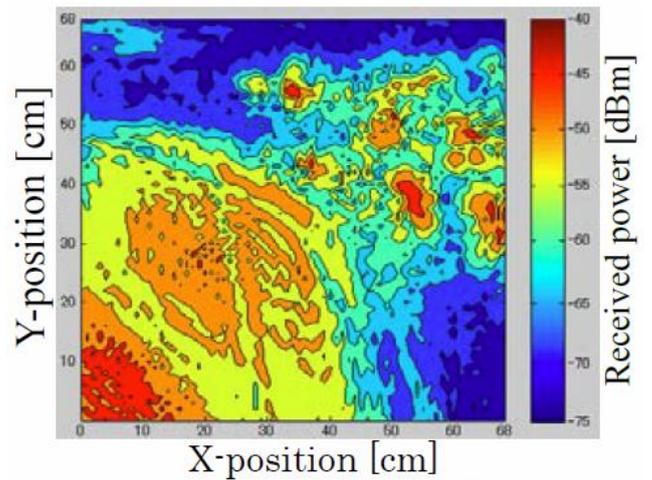


図5 TX, RX アンテナ高さ10cmの受信電力測定結果

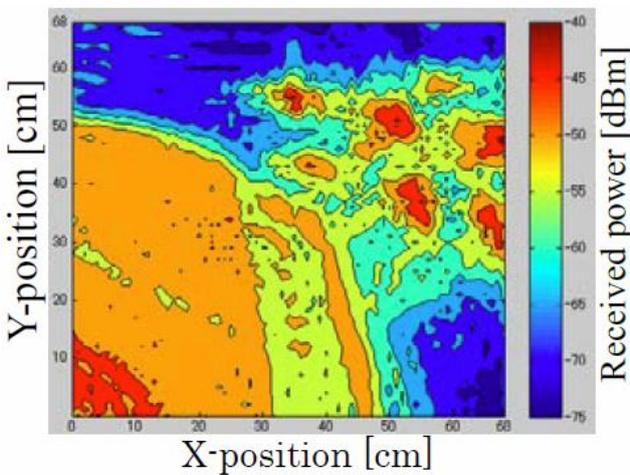


図6 TX アンテナ高さ10cm、RX アンテナ高さ8, 9, 10cm

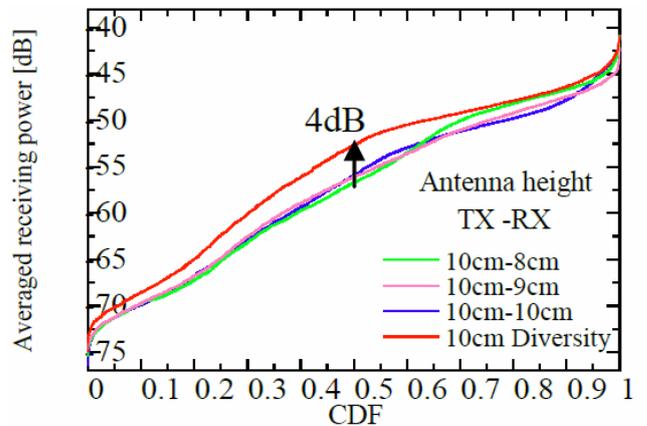


図7 選択ダイバーシチ受信電力のCDF値

3 ミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送技術

前章におけるミリ波帯直交偏波 MIMO チャンネルモデルの検討より、ミリ波帯においては、直接波と1回反射波を考慮すればよいことがわかった。この結果に基づき、MIMO 伝送特性を評価するため、レイトレースを用いたシミュレーションプログラムを開発し、チャンネル容量ならびに BER 特性を評価した。その結果、デスクトップ環境では、V/H 偏波 MIMO、V/V 偏波 MIMO を切り替えることでチャンネル容量を最大化できること、MIMO アンテナは縦配置としたほうが大きなチャンネル容量が得られること、さらに直交偏波を用いたミリ波 MIMO 伝送においては、送受信アンテナの高低差があるほど、またアンテナ半値幅が小さいほど、良好な BER 特性が得られることを明らかにした[9]-[11]。

3-1 ミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送シミュレーションプログラムの開発

ミリ波帯 WLAN として標準化が進められている IEEE802.11ad に基づくシミュレーションプログラムの開発を進めた。伝搬環境は図8の会議室でのデスクトップ環境を想定し、レイトレース法に基づき伝搬経路をシミュレーションするプログラムを開発した。2X2 MIMO 伝送を想定し、水平・垂直偏波の直交偏波を用いるミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送、および同一偏波を用いる MIMO 伝送の双方に対応可能なよう、図9に示すように、MIMO におけるアンテナ配置として、送信2アンテナ、受信2アンテナの間隔が離れている場合についても特性評価できる MIMO 伝送シミュレーションプログラムを開発し、デスクトップ環境におけるチャンネル容量ならびに BER 特性を評価した。なお、BER 特性の評価においては、IEEE802.11ad のシングルキャリア変調方式を対象とした。

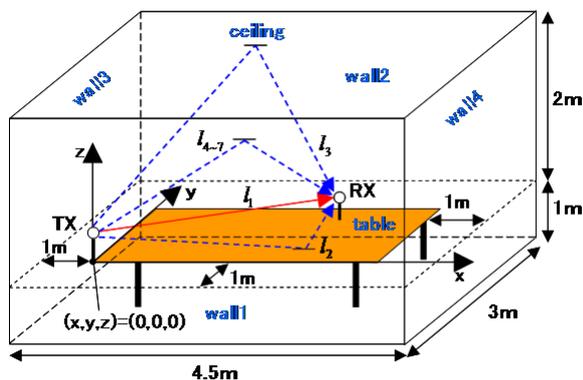


図8 会議室におけるデスクトップ環境

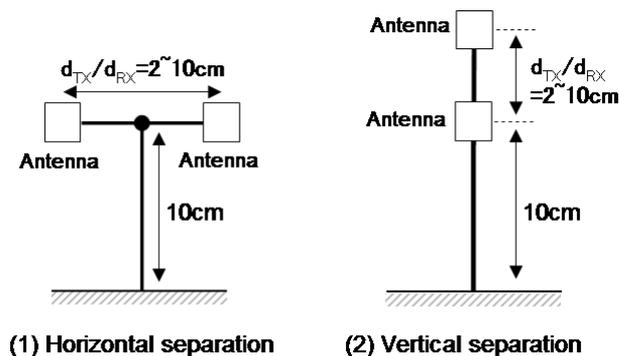


図9 MIMOにおけるアンテナ配置

3-2 ミリ波帯直交偏波 MIMO チャンネルモデルを用いた MIMO 伝送特性の評価

(1) チャンネル容量

①で開発したシミュレーションプログラムを用いて、会議室のデスクトップ環境におけるチャンネル容量ならびに BER 特性の評価を行った。アンテナ間を離れた MIMO では直交偏波 (V/H)、垂直偏波 (V/V)、水平偏波 (H/H) の利用が考えられる。これら三種類の MIMO のチャンネル容量の比較を行った。

図 10 に TX 高=10cm、RX 高=10cm、送受信アンテナ間隔が 2cm の場合のデスクトップ上の位置に対するチャンネル容量の分布を示す。図よりわかるように、V/H、V/V 偏波に比べ H/H 偏波 MIMO は小さなチャンネル容量しか得られないことがわかる。この結果に基づき、V/H 偏波、V/V 偏波の場合について、送受信アンテナが横配置、縦配置の場合の MIMO チャンネル容量の評価結果を図 11、12 に示す。横配置の場合はアンテナ間隔によらずチャンネル容量は一定であるが、縦配置の場合はアンテナ間隔に対してチャンネル容量は増減することを明らかとした。

図 13 に送受信アンテナ間隔を横方向 2cm、縦方向 2cm の場合の V/H、V/V、H/H 偏波 MIMO 伝送のチャンネル容量の比較を示す。V/H 偏波と V/V 偏波を比較すると、全体の 60% のエリアで V/H 偏波で、残りの 40% のエリアでは V/V 偏波でチャンネル容量が最大となった。特に、チャンネル容量が小さい領域では、V/V 偏波・アンテナ縦配置でチャンネル容量が最大となることを示した。これより、V/H 偏波 MIMO、V/V 偏波 MIMO を切り替えることでチャンネル容量を最大化できることがわかった。

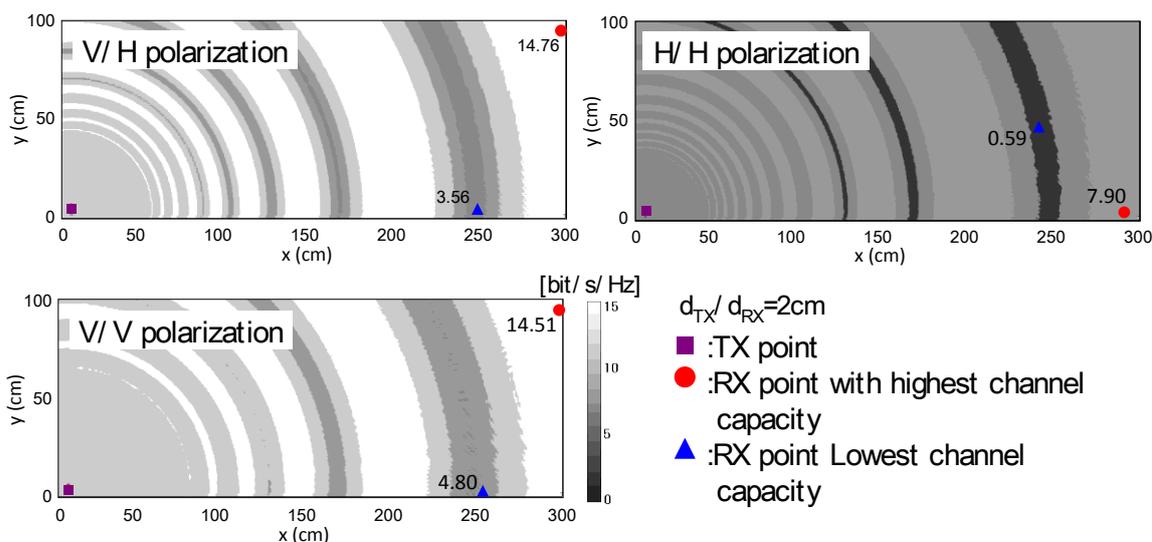


図 10 デスクトップ環境におけるチャンネル容量の分布

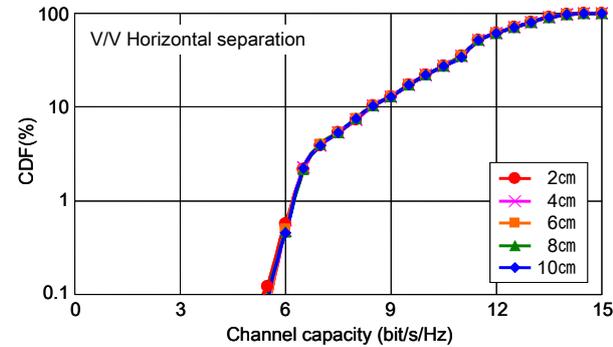
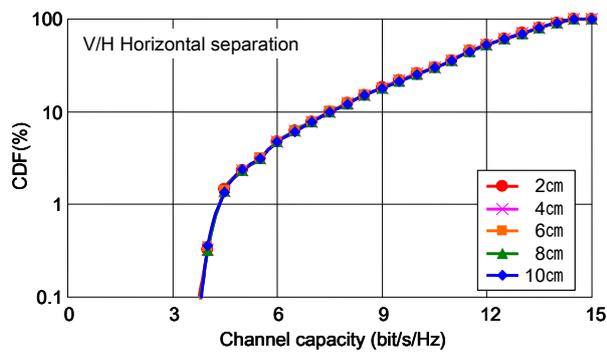


図 11 送受信アンテナが横配置の場合の MIMO チャンネル容量

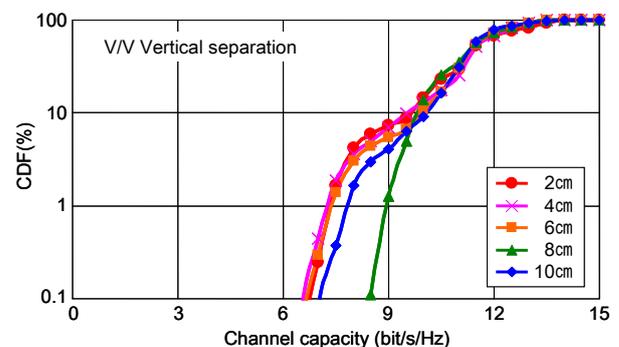
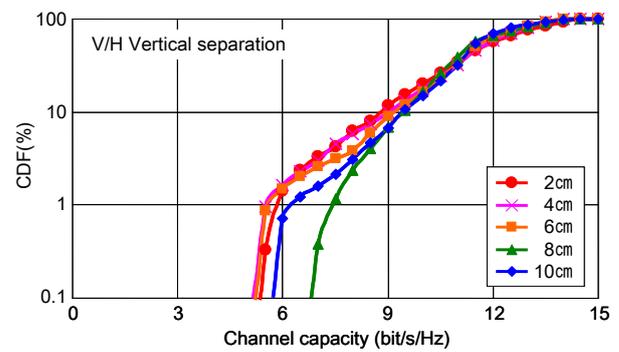


図 12 送受信アンテナが縦配置の場合の MIMO チャンネル容量

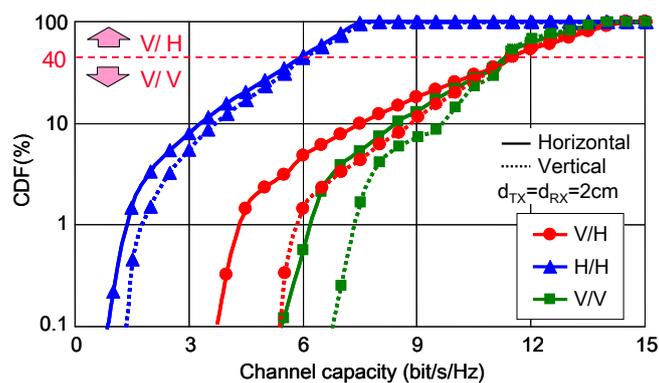


図 13 送受信アンテナ間隔が 2cm の場合の MIMO チャンネル容量の比較

(2) BER 特性

レイトレーシングを用いて直交偏波 MIMO 伝送の BER 特性を評価した。CASE 1 (TX 高=10cm、RX 高=2cm)、CASE 2 (TX 高=10cm、RX 高=10cm)、CASE 3 (TX 高=190cm、RX 高=2cm) の環境において、指向性アンテナの半値幅を 15° 、 30° 、 60° とし、QPSK の場合の BER 特性を比較評価した。デスクトップ環境の場合には遅延時間が小さく、2.16GHz 帯域ではフラットフェージングとなり、ZF (Zero Force) 法で信号分離した場合の BER 特性を評価した結果を図 13 に示す。CASE3 はアンテナが天井近辺に設置されることを想定しているが、アンテナ半値幅によらず BER 特性は理論値からの劣化はない。一方、送受信アンテナの高低差がない CASE2 では、アンテナ半値幅= 15° でも大きな劣化が見られた。図より分かるように、指向性アンテナの半値幅が小さくなるほど、また、送受信アンテナの高低差が大きいくほど、良好な BER 特性が得られることがわかった。

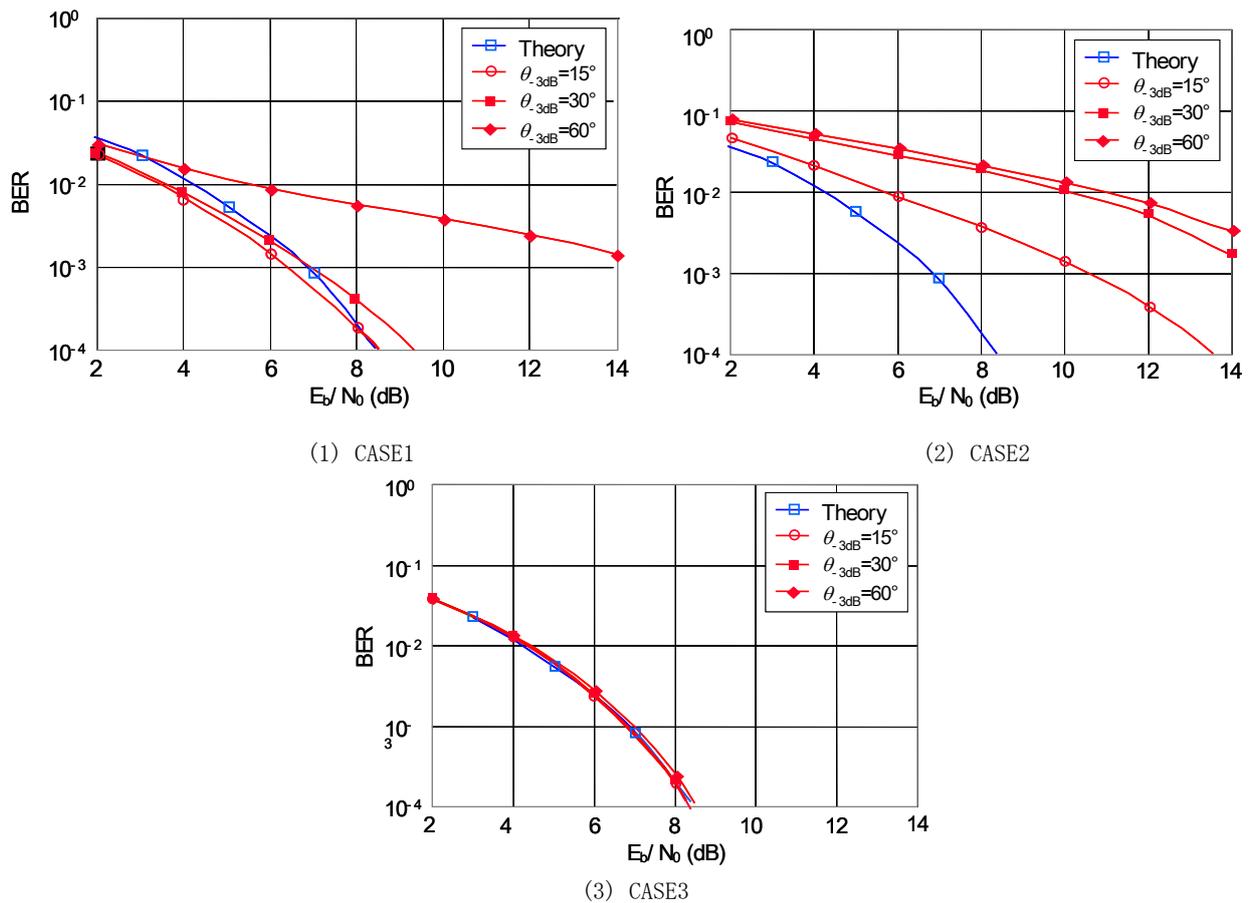


図 14 デスクトップ環境における直交偏波 MIMO 伝送の BER 特性 (QPSK)

4 まとめ

本文では、次世代超高速 WLAN のためのミリ波帯直交偏波 MIMO 伝送方式の研究についての成果を述べた。

ミリ波帯直交偏波 MIMO チャンネルモデルについては、リビングルーム環境における伝搬データを取得した結果、1Gbps 程度の高速通信が可能で -55dBm 以上 (IEEE802.15.3c 規格) のパスは直接波と 1 回反射波のみであることを確認した。また、デスクトップ環境で伝搬測定を行い、送信アンテナを 1 本、受信アンテナを 3 本とした SIMO 伝送の場合の受信ダイバーシチ利得を解析し、4-6 dB の改善となることを確認した。

ミリ波帯直交偏波 MIMO チャンネルモデルの検討より、ミリ波帯では直接波と 1 回反射波を考慮すればよいことから、MIMO 伝送特性を評価するため、レイトレースを用いたシミュレーションによりチャンネル容量ならびに BER 特性を評価した。その結果、デスクトップ環境では、V/H 偏波 MIMO が常によいわけではなく、V/V 偏波 MIMO が大きなチャンネル容量を持つ場合が 40% あることがわかった。したがって、V/H 偏波 MIMO と V/V 偏波 MIMO を切り替えて用いることでチャンネル容量を最大化できること、MIMO アンテナは縦配置としたほうが大きなチャンネル容量が得られること、さらに直交偏波を用いたミリ波 MIMO 伝送においては、送受信アンテナの高低差があるほど、またアンテナ半値幅が小さいほど、良好な BER 特性が得られることを明らかにした。

今後の課題として、V/H 偏波 MIMO と V/V 偏波 MIMO の切替制御方法の検討、他の利用環境において特性評価を行うと共に、円偏波についての特性評価、さらには 2x2 のみならず 4x4 などのさらなる空間多重伝送の可能性について検討を進める必要がある。

【参考文献】

- [1] IEEE802.15.3c, IEEE 802.15 WPAN Task Group 3c (TG3c) Millimeter Wave Alternative PHY, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>

- [2] IEEE802.11ad, Status of Project IEEE 802.11ad Very High Throughput in 60 GHz, http://www.ieee802.org/11/Reports/tgad_update.htm
- [3] I. Sarris, A.R. Nix, "Maximum MIMO Capacity in Line-of-Sight," 2005 Fifth International Conference on Information, Communications and Signal Processing, pp.1236-1240, Bangkok, Sept. 2006.
- [4] N.Lashkarian, K.Nassiri-Toussi, "MIMO Beam-forming at 60 GHz: Analysis of Ergodic Capacity," IEEE GLOBECOM 2009, Nov. 30 2009-Dec. 4 2009.
- [5] 笹目利章・渡邊雄彦・梅比良正弘, "レイトレースを用いた60GHz帯WPANにおける直交偏波MIMO伝送方式の特性評価," 電子情報通信学会 技術研究報告, SRW研究会, 平成22年10月18日.
- [6] 沢田浩和, 加藤修三, 梅比良正弘, 原田博司, "60GHz帯デスクトップ環境のためのRXアレイアンテナによるスイッチングダイバーシチの提案," 電子情報通信学会技術研究報告, SRW2013-2, pp.3-7, 2013年4月.
- [7] Hirokazu Sawada, Shuzo Kato, Masahiro Umehira, Hiroshi Harada, "A Proposal on Arrayed RX Antenna Switching Diversity for 60 GHz Desktop Communications," Proceedings of 6th Global Symposium on Millimeter Wave 2013 (GSMM2013), T5-4, 2013.4.
- [8] 沢田浩和, 加藤修三, 梅比良正弘, "アンテナダイバーシチによる60GHz帯通信の受信電力改善効果," 2013年電子情報通信学会総合大会, B-1-49, 2013年3月.
- [9] Masahiro Umehira, Toshiaki Sasame and Hirokazu Sawada, "An Orthogonal Polarization based MIMO Transmission for Advanced 60GHz WLAN," Proceedings of 75th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2012 Spring), pp.1-5, 2012.5.
- [10] 江林達矢, 梅比良正弘, 沢田浩和, "60GHz帯直交偏波MIMO伝送方式におけるアンテナ配置のチャネル容量への影響," 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2012-234, vol. 112, no. 351, pp.303-308, 2012年12月
- [11] Masahiro Umehira, Tatsuya Ebayashi and Hirokazu Sawada, "Impact of Antenna Spacing on Channel Capacity of 2X2 MIMO Transmission using 60GHz band in Desk-top Environments (Invited)," Proceedings of 6th Global Symposium on Millimeter Wave 2013 (GSMM2013), T1-1, 2013.4.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
60GHz 帯デスクトップ環境のための RX アレイアンテナによるスイッチングダイバーシチの提案	電子情報通信学会技術研究報告 (SRW2013-2)	2013 年 4 月
A Proposal on Arrayed RX Antenna Switching Diversity for 60 GHz Desktop Communications	Proceedings of 6th Global Symposium on Millimeter Wave 2013	2013 年 4 月
アンテナダイバーシチによる 60GHz 帯通信の受信電力改善効果	2013 年電子情報通信学会総合大会予稿集	2013 年 3 月
An Orthogonal Polarization based MIMO Transmission for Advanced 60GHz WLAN	Proceedings of 75th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2012 Spring)	2012 年 5 月
60GHz 帯直交偏波 MIMO 伝送方式におけるアンテナ配置のチャンネル容量への影響	電子情報通信学会技術研究報告 (RCS2012-234)	2012 年 12 月
Impact of Antenna Spacing on Channel Capacity of 2X2 MIMO Transmission using 60GHz band in Desk-top Environments (Invited)	Proceedings of 6th Global Symposium on Millimeter Wave 2013	2013 年 4 月