

## 屋内 2x2MIMO-OFDM の伝搬特性について

山田 渉<sup>†</sup> 北 直樹<sup>†</sup> 安藤 篤也<sup>†</sup> 高尾 鉄也<sup>\*</sup> 森 大典<sup>\*</sup> 佐藤 明雄<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>NTT アクセスサービスシステム研究所 〒238-0006 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

<sup>\*</sup>NTT アドバンステクノロジー株式会社 〒238-0006 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

<sup>‡</sup>東京工科大学 〒192-0982 東京都八王子市片倉町 1404-1

### 1. はじめに

IEEE802.11a/b/g 規格を代表とする無線 LAN システムが開発され、最大伝送速度 54Mbps のパーソナルユース向けの無線通信システムが身近になりつつある。今後の来るべきユビキタス社会においては、更なる高速無線通信システムの実現が期待され、100Mbps 以上の伝送速度を実現する無線 LAN システムの研究開発が進められている[1]。高速伝送を実現する手法は種々提案されているが、中でも高い周波数利用効率の達成が可能とされる MIMO (Multi-Input Multi-Output) 方式の実用化については、世界的に大きな期待が寄せられている[2]。

MIMO 方式伝送では、基地局、端末局で使用されるアンテナ条件や、システムの存在する周囲の伝搬環境により伝送特性が大きな影響を受けることが知られている。したがって、システムの実用化に際しては使用の想定される実環境における MIMO 伝搬特性を把握することが重要である[3]。

筆者らはこれまでにそれぞれ特徴の異なる数種類の屋内実環境において 2x2MIMO-OFDM 伝搬特性の把握を進めて来た。本稿では、これら異なる屋内環境における 2x2MIMO-OFDM チャネルにおける周波数利用効率、チャネル行列の固有値、条件数、及び固有ベクトルについて、環境依存性、アンテナ間隔依存性、偏波依存性の観点から述べる。

### 2. 2x2MIMO-OFDM チャネル測定

屋内実環境での測定により 2x2MIMO チャネル行列を取得した。測定を行ったパラメータを表 1 に示す。

#### 2.1. 測定環境

測定を行った環境は電波暗室/Room A/Room B/Room C である。

Room A の寸法は 14m\*12m\*3m で壁面材質はコンクリート、Room B の寸法は 28m\*17m\*6m で壁面材質は金属、Room C の寸法は 21m\*12m\*2.5m で壁面材質は金属である。

表 1. 測定パラメータ

	環境	アンテナ間隔	偏波	移動距離
		基地-端末	基地-端末	
環境	電波暗室	1 -1	VV-VV	5m
	Room A (14m*12m*3m)			9m
	Room B (28m*17m*6m)			18m
	Room C (21m*12m*2.5m)			5m
アンテナ間隔	Room A (14m*12m*3m)	1 -1	VV-VV	9m
		5 -5		
		1 -5		
		0.6 -5		
		0.6 -1		
		0.6 -0.6		
偏波	Room B (28m*17m*6m)	1 -1	VV-VV	10m
			VH-VH	

(V: V-pol H: H-pol)

### 2.2. MIMO-OFDM 測定器

表 2 に MIMO-OFDM 測定器[4]の諸元を示す。

表 2. MIMO-OFDM 測定システム諸元

中心周波数	5.2GHz
周波数帯域幅	7.5MHz
サブキャリア間隔	156.25kHz
サブキャリア本数	49
変調方式	OFDM
アンテナ本数	送信側 2 本, 受信側 2 本

本測定システムでは全サブキャリアに対する瞬時 2x2MIMO チャネル行列を 25.6usec 毎に取得することが可能である。

### 3. 狭帯域特性

測定によって得られた 2x2MIMO-OFDM チャネル行列のサブキャリア 1 本に着目して各種処理を行なった。

#### 3.1. 検討パラメータ

検討を行うパラメータは周波数利用効率、固有値、条件数である。

- 固有値は取得されたチャネル行列から特異値分解を行うことにより求めた。
- 周波数利用効率は算出された固有値を用いて以下の式から算出を行なった。

$$C = \log_2(1 + \lambda_1 \gamma) + \log_2(1 + \lambda_2 \gamma) \quad (1)$$

ここで  $\lambda_i$  は固有値を表し、 $\gamma$  は SN 比を表す。

- 条件数は、最大特異値を最小特異値で除算したものである。条件数は行列の感度を表すパラメータであり、1 に近いほどその行列演算誤差が少ないことを表す。逆に条件数が大きいほどその行列は行列演算誤差が大きく、逆行列演算等の際に誤差を生じ易い。従って MIMO のチャネル推定演算を行なう方式においては条件数が 1 に近いほど計算される固有値の誤差が小さくなり、安定した通信を行なうことができるシステムであると言える。

### 3.2. 環境依存性

アンテナ間隔、アンテナ構成を一定とし、異なる環境での測定値の比較を行なった。ここでは伝搬損失の中央値変動に起因する SN 比による違いを省くため、各測定環境を 1m 区間に分割した後、それぞれの区間における受信電力の中央値によって区間毎にデータの規格化を行なった。

#### 3.2.1. 周波数利用効率の環境依存性

各環境における周波数利用効率の 1m 区間中央値の距離特性を図 1(a)に、周波数利用効率の 1m 区間における標準偏差を図 1 (b)に示す。周波数利用効率の計算には SN 比を与える必要があるが、今回は SN 比=20dB として計算を行なった。

電波暗室以外の環境では、全ての環境において同様の特性を示しており、基地局-端末局間距離が大きくなるに従い緩やかに上昇していることがわかる。1m から 20m までの範囲では 8bps/Hz から 9bps/Hz に増加している。また標準偏差も距離に対して約 1.5 から約 2 へと増加する傾向がある。電波暗室のように有効なマルチパス波が存在しない環境では、得られる周波数利用効率は一定で 7bps/Hz 付近に分布し、通常的环境に比べ 1bps/Hz 程度低い値になった。また標準偏差は伝搬環境に変化がないことから 0~0.5 付近と低い値になっている。このことから 2x2MIMO の場合、環境によらず周波数利用効率は 8~9bps 程度であり、基地局-端末局間距離が大きくなるにつれて増加する傾向があることが分かる。

#### 3.2.2. 固有値の環境依存性

各環境における最大固有値の 1m 区間中央値の距離特性を図 2(a)に、1m 区間における標準偏差の距離特性を図 2(b)に示す。同様に、最小固有値の 1m 区間中央値、標準偏差の距離特性をそれぞれ図 3(a) (b)に示す。

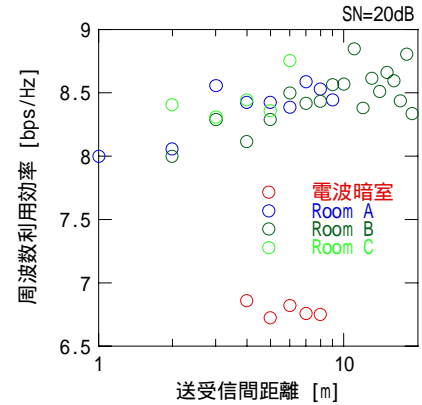


図 1(a). 周波数利用効率の距離特性

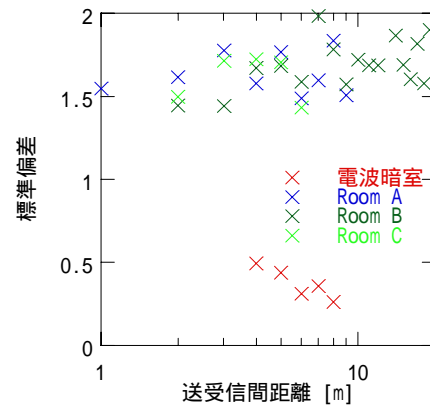


図 1(b). 周波数利用効率標準偏差の距離特性

電波暗室以外の環境では、ほぼ同様の特性を示し、最大固有値は基地局-端末局間距離が離れるに従い小さくなり、最小固有値は大きくなる。1m~20m までの距離の場合、最大固有値は約 -2dB から -3dB に減少し、最小固有値は約 -15dB から -10dB に増加する。標準偏差については、最大固有値の場合では距離が増加するとともに、約 3.5dB から 1.5dB へ増加するが、最小固有値の場合では明らかな距離に対する依存性は無く、約 4.5dB から 6.5dB の値となった。電波暗室の場合、最大固有値と最小固有値の差が最も大きく、最大固有値が約 0dB 程度、最小固有値は約 -25 から -30dB 程度である。距離に対する依存性は無い。標準偏差については最大固有値の場合が約 -6 から -10dB であり、最小固有値の場合が約 -25 から -30dB 程度である。以上をまとめると、2x2MIMO の場合、電波暗室以外の環境では、固有値の環境依存性は小さく、距離に対して同様の傾向を示し、基地局-端末局間距離が大きくなるほど、最大固有値と最小固有値の差が小さくなる傾向にある。また最大固有値の標準偏差は環境依存性が小さく、距離に対して同様の傾向を示し、基地局-端末局間距離が大きくなるほど標準偏差の値は小さくなる傾向にある。最小固有値の標準偏差については、環境依存性が小さいだけでなく、送受信間距離に対する依存性も小さい。

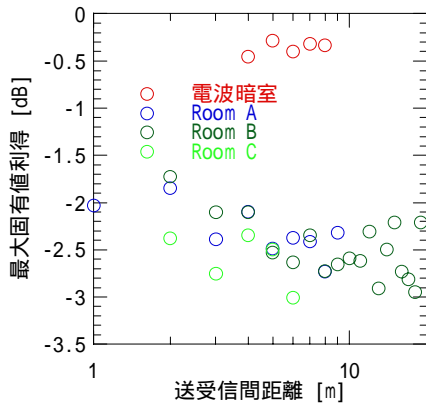


図 2(a). 最大固有値の距離特性

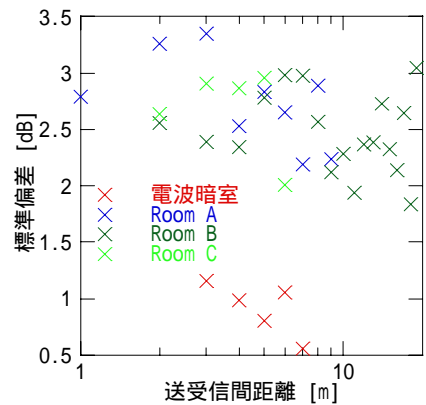


図 2(b). 最大固有値標準偏差の距離特性

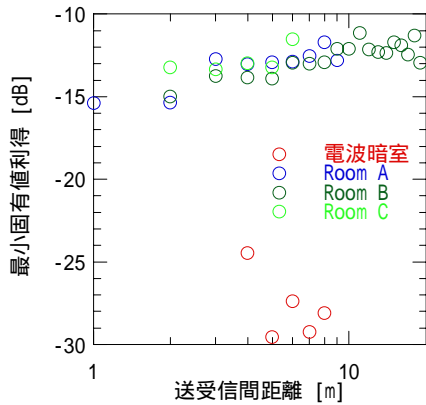


図 3(a). 最小固有値の距離特性

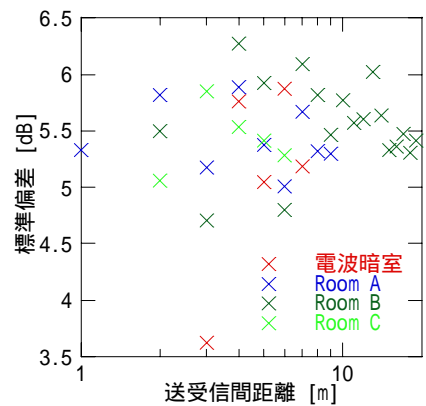


図 3(b). 最小固有値標準偏差の距離特性

### 3.2.3. 条件数の環境依存性

各環境における条件数の距離特性を図 4 に示す．条件数の距離依存性は顕著であり，基地局-端末局間距離が大きくなるに従い条件数は小さくなる．環境により距離に対する条件数の減少量は異なり，環境依存性があることも分かる．図中の破線は最小二乗近似直線であり，(2)式及び表 3 で表される．

$$y = a + b \log(x) \quad (2)$$

表 3. 近似曲線の係数

環境	a	b
電波暗室	5.25	24.33
Room A	4.78	-1.97
Room B	4.58	-1.52
Room C	3.64	-0.72

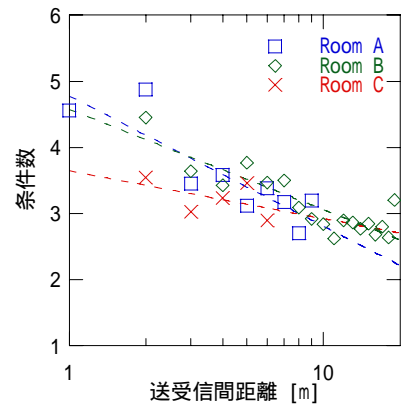


図 4. 条件数の基地局-端末局間距離特性

### 3.3. アンテナ間隔依存性

本節では同一測定環境，同一測定ルート，及び同一測定条件下においてアンテナ間隔のみを変化させ， $2 \times 2$ MIMO チャンネルのアンテナ間隔依存性について得られた結果について述べる．測定環境は Room A(14m\*12m\*3m)である．

#### 3.3.1. 周波数利用効率のアンテナ間隔依存性

周波数利用効率のアンテナ間隔依存性を図 5 に示す．縦軸は累積確率を示している．この図から周波数利用効率は基地局アンテナ間隔と端末局アンテナ間隔のうち小さな方に支配されていることが分かる．図 6 に  $\min \{ \text{基地局アンテナ間隔}, \text{端末局アンテナ間隔} \}$  に対する周波数利用効率の累積 50% 値を示す．アンテナ間隔が 0.6 -0.6 , 5 -5 の場合 13.5bps/Hz 程度であり，他の場合に比べて大きな値となっており特異である．それ以外の場合ではアンテナ間隔によらず 12.5bps/Hz 程度であり， $2 \times 2$ MIMO チャンネルにおいては，明確なアンテナ間隔依存性は見られない．

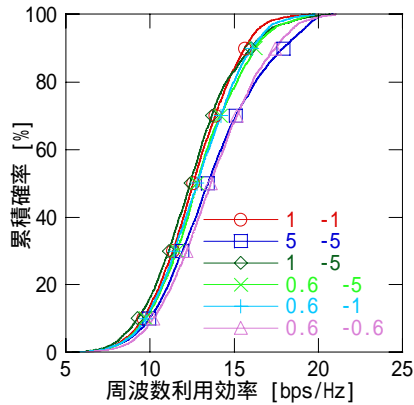


図 5. 周波数利用率のアンテナ間隔依存性

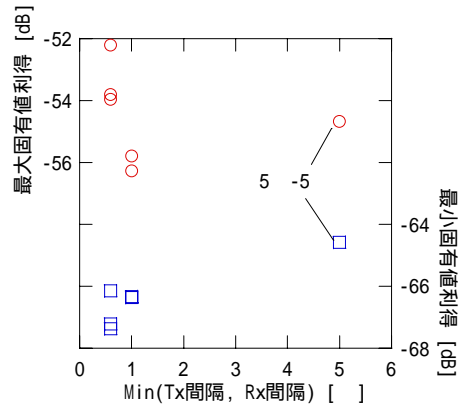


図 8. 固有値のアンテナ間隔依存性(50%値)

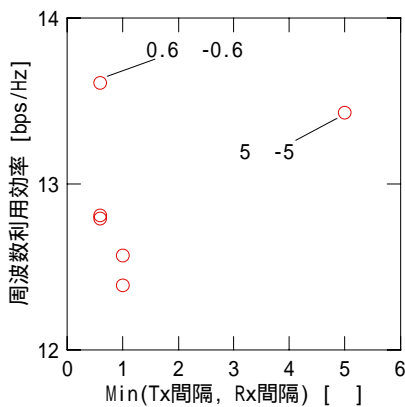


図 6. 周波数利用率のアンテナ間隔依存性 (50%値)

### 3.3.2. 固有値のアンテナ間隔依存性

各アンテナ間隔における固有値の累積確率特性を図 7 に示す．アンテナ間隔が 0.6 -0.6 の場合に最大固有値は最も大きな値となること分かる．一方、アンテナ間隔が 5 -5 の場合に最小固有値が最も大きな値となる．図 8 に  $\min\{\text{基地局アンテナ間隔, 端末局アンテナ間隔}\}$  に対する周波数利用率の累積 50% 値を示す．図 8 から最大固有値はアンテナ間隔が大きくなるに従い、小さくなる傾向にあり、最小固有値は逆に大きくなっていく傾向があることがわかる．

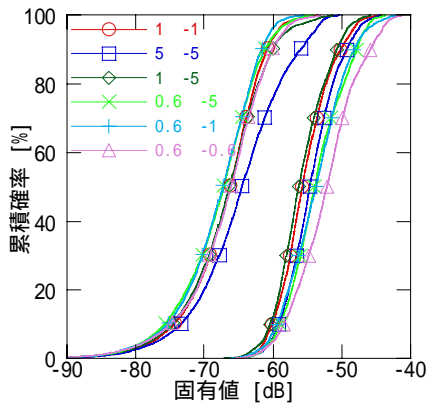


図 7. 固有値のアンテナ間隔依存性

### 3.3.3. 条件数のアンテナ間隔依存性

各アンテナ間隔における条件数の累積確率を図 9 に示す．周波数利用率のアンテナ間隔依存性 (図 5) の検討と同様に、基地局/端末局アンテナ間隔の小さい方が条件数の大きさに対して支配的である．図 10 に  $\min\{\text{基地局アンテナ間隔, 端末局アンテナ間隔}\}$  に対する条件数の累積 50% 値を示す．条件数はアンテナ間隔が大きくなるに従い小さくなる傾向にあり、0.6 の場合で 5 程度、5 の場合で 3 程度であった．従って条件数を小さくするためには、基地局/端末局双方のアンテナ間隔をある程度以上にする必要がある．

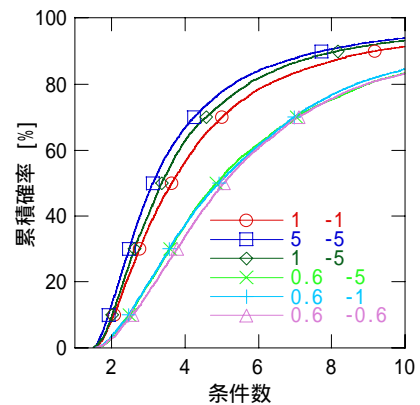


図 9. 条件数のアンテナ間隔依存性

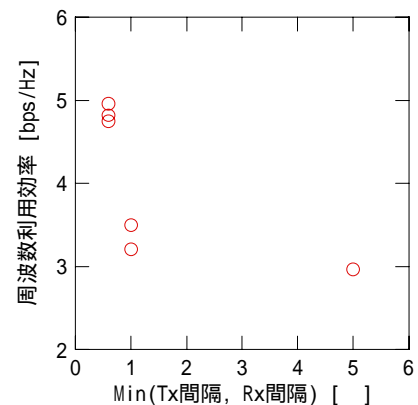


図 10. 条件数のアンテナ間隔依存性 (50%値)

表 4 にこれまでの結果をまとめる．表に記される値は累積確率が 50% 値と標準偏差である．

表 4. 各パラメータのアンテナ間隔依存性

アンテナ間隔	周波数利用効率 (標準偏差)	最大固有値 (標準偏差)	最小固有値 (標準偏差)	条件数
1 - 1	12.57 (2.31)	-55.78 (3.73)	-66.33 (5.64)	3.50
5 - 5	13.43 (2.96)	-54.67 (3.75)	-64.57 (6.79)	2.96
1 - 5	12.39 (2.58)	-56.27 (3.73)	-66.37 (6.14)	3.21
0.6 - 5	12.79 (2.51)	-53.97 (4.14)	-67.22 (5.97)	4.75
0.6 - 1	12.81 (2.44)	-53.80 (4.35)	-67.37 (5.70)	4.82
0.6 - 0.6	13.61 (2.72)	-52.20 (4.66)	-66.14 (6.10)	4.96

### 3.4. 偏波依存性

本節では，同一測定環境，同一測定ルート，及び同一測定条件下においてアンテナブランチの偏波のみを変化させ， $2 \times 2$ MIMO チャンネルの偏波依存性について得られた結果について述べる．測定環境は Room B(28m\*17m\*6m)である．

#### 3.4.1. 周波数利用効率の偏波依存性

偏波の違いによる周波数利用効率の累積確率特性を図 11 に示す．アンテナ構成を VV-VV としたときの周波数利用効率の累積確率 50% 値は 12.22bps/Hz であり，標準偏差は 2.10 であった．またアンテナ構成を VH-VH としたときの周波数利用効率の累積確率 50% 値は 12.34bps/Hz であり，標準偏差は 2.28 であった．従って偏波構成による差は無く，周波数利用効率に対する影響を持たないことがわかる．

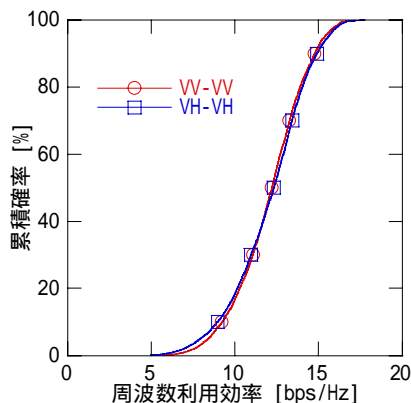


図 11. 周波数利用効率の偏波依存性

#### 3.4.2. 固有値の偏波依存性

偏波の違いによる固有値の累積確率特性を図 12 に示す．VV-VV としたときのアンテナ構成と VH-VH を比

較すると VV-VV 構成のほうが最大固有値と最小固有値の差は大きいことがわかる．これはアンテナ XPD が作用していることが原因である．

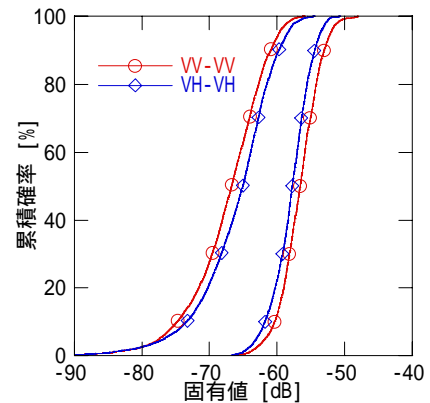


図 12. 固有値の偏波依存性

#### 3.4.3. 条件数の偏波依存性

偏波の違いによる条件数の累積確率を図 13 に示す．VV-VV 構成は明らかに VH-VH 構成より条件数の特性が悪い．これはアンテナ XPD が原因である．今回の測定環境は完全見通し内であり空間の XPD が高い環境であることも原因といえるが，見通し外環境においてもある程度の XPD は期待できる．従ってアンテナ構成を VH-VH とすることは安定なシステム構築の上で効果的だといえる．

表 5 にこれまでの結果をまとめる．表に記される値は累積確率が 50% 値と標準偏差である．

表 5. 各パラメータの偏波依存性

アンテナ間隔	周波数利用効率 (標準偏差)	最大固有値 (標準偏差)	最小固有値 (標準偏差)	条件数
VV-VV	12.22 (2.10)	-56.58 (2.91)	-66.74 (5.57)	3.15
VH-VH	12.34 (2.28)	-57.75 (2.81)	-65.09 (5.72)	2.27

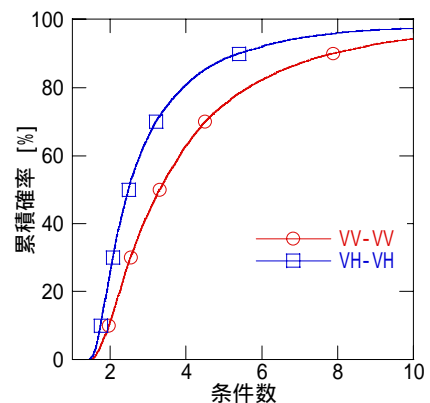


図 13. 条件数の偏波依存性

#### 4. 広帯域特性

ここでは測定によって得られた広帯域MIMOチャネル行列の評価を行う．評価指標としては固有ベクトルの相関を用いる．固有ベクトルの相関は，例えば高い固有ベクトル相関の値に着目するとチャネル行列の間引き推定などの用途，低い固有ベクトル相関の値に着目するとサブキャリアダイバシティなどの用途に使用することができる．

固有ベクトルの相関の性質として2つの固有ベクトルが完全に同一であるとき1であり，位相が  $\pi/2$  ずれている場合0である．固有ベクトルの相関が0.9を超える場合，2つの行列はほとんど同一であると考えることができることから，本原稿では0.9を評価軸とする．

#### 4.1. 固有ベクトルの周波数相関特性

##### 4.1.1. 環境依存性

図14に固有ベクトルの相関が0.9以上になる確率を示す．この図から固有ベクトルの周波数相関の環境依存性はかなり大きいことが分かる．電波暗室では遅延波がないため相関帯域幅は  $\infty$  となっている．Room Aでは固有ベクトルの周波数相関が0.9以上となる確率90%の値は1.59MHzであり，Room Bでは0.56MHz，Room Cでは1.12MHzであった．

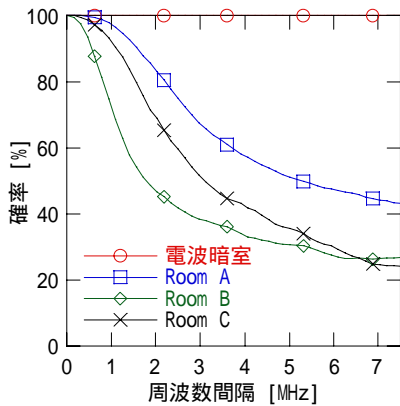


図14. 固有ベクトル相関の環境依存性

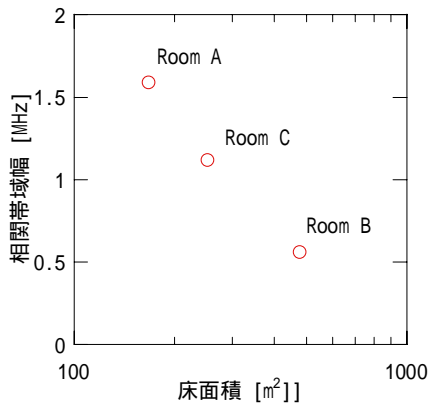


図15 部屋面積と相関帯域幅の関係

また，図15に固有ベクトルの相関が0.9以上となる確率が90%以上となる帯域幅と部屋面積との関係を示す．この関係から部屋面積が大きくなるに従い相関のある周波数間隔は小さくなっていることがわかる．

##### 4.1.2. アンテナ間隔依存性

図16に固有ベクトルの相関が0.9以上になる確率を示す．この図から固有ベクトルの周波数相関のアンテナ間隔依存性があることが分かる．表6に固有ベクトルの相関が0.9以上となる確率が90%以上となる周波数間隔を示す．周波数間隔がもっとも大きなアンテナ間隔は0.6 -0.6 のときで2.11MHz，もっとも小さなアンテナ間隔は5 -5 のときで1.56MHzであった．これよりアンテナ間隔が狭いほど相関のある周波数間隔は広いことがわかる．

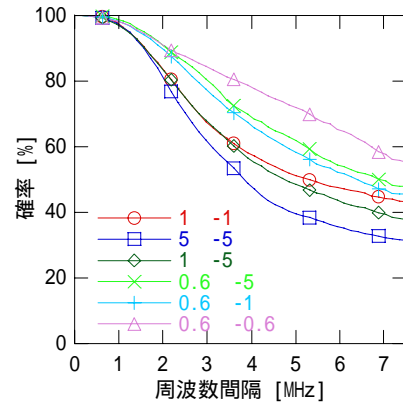


図16. 固有ベクトル相関のアンテナ間隔依存性

表6. 周波数相関帯域幅のアンテナ間隔依存性

アンテナ間隔	相関周波数間隔
1 -1	1.59 MHz
5 -5	1.56 MHz
1 -5	1.58 MHz
0.6 -5	2.07 MHz
0.6 -1	1.97 MHz
0.6 -0.6	2.11 MHz

##### 4.1.3. 偏波依存性

図17に固有ベクトルの相関が0.9以上になる確率を示す．この図から固有ベクトルの周波数相関の偏波依存性は多少あることが分かる．表7に固有ベクトルの相関が0.9以上となる確率が90%以上となる帯域幅を示す．相関のある帯域幅はVV-VV構成のとき0.49MHz，VH-VHのとき0.35MHzであった．これはアンテナ構成が異なることから，4本のパス相関が低くなったことが原因と考えることができる．

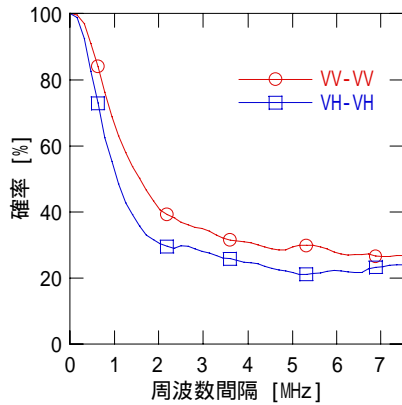


図 17. 固有ベクトル関連の偏波依存性

表 7. 周波数相関帯域幅の偏波依存性

アンテナ間隔	相関周波数間隔
VV-VV	0.49 MHz
VH-VH	0.35 MHz

## 4.2. 固有値の入れ代わり問題

あるサブキャリアで推定されたチャネル行列を、隣接するサブキャリアに適用することにより計算量の低減を行なうシステムを想定すると、最大固有値と最小固有値の入れ替わりが発生する箇所では大きな推定誤りが生じる。そこで固有値の入れ替わりの発生頻度について実測値を基に検討を行った。固有値の入れ替わりの発生判定は雑音の影響により固有値の入れ替わりが発生することを考慮し最大固有値と最小固有値の差が 0.1dB, 0.5dB, 1dB を閾値としてその頻度を求めた。図 18 は閾値を 0.5dB としたときの実測値から得られた固有値の入れ替わりが発生しやすい箇所である。以下は、1m 辺りの発生頻度に規格化して検討を進める。

### 4.2.1. 環境依存性

図 19 に部屋の床面積と入れ替わりの発生が想定される回数の関係を示す。

この図から部屋の面積が広がるにつれ固有値の入れ替わり発生頻度は上昇する傾向であることがわかる。また閾値を 1dB としたときは 1m 辺りの入れ替わり発生頻度が 100~200 回とかなり高いことがわかる。

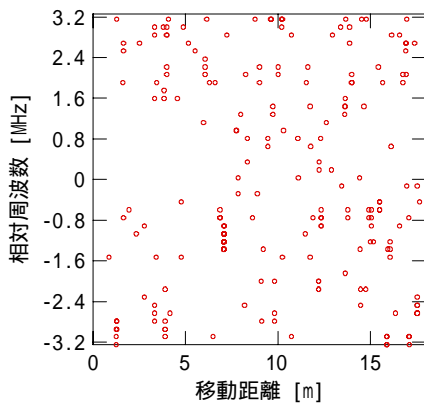


図 18. 固有値の入れ替わる箇所

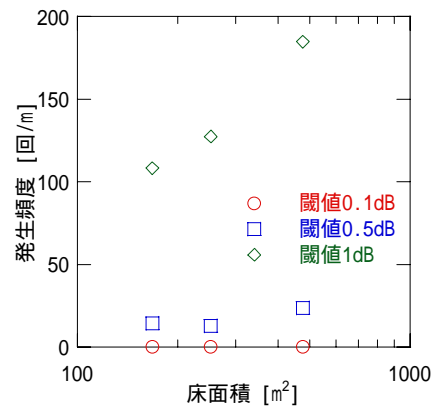


図 19. 入れ替わり発生頻度と床面積の関係

### 4.2.2. アンテナ間隔依存性

図 20 にアンテナ間隔と入れ替わりの発生が想定される回数の関係を示す。ここでアンテナ間隔は、送信側/受信側のアンテナ間隔の小さいものをアンテナ間隔としている。

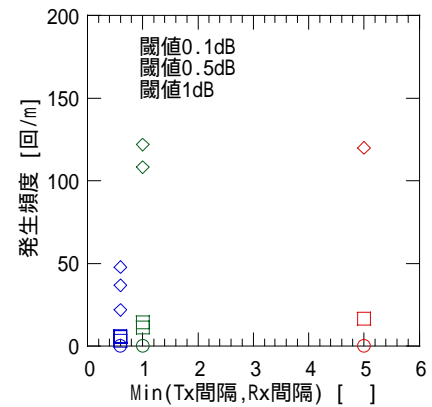


図 20. 入れ替わり発生頻度とアンテナ間隔の関係

この図から送受信アンテナ間隔の小さいほうに支配的に固有値の入れ替わり発生頻度が上昇する傾向であることがわかる。また閾値を 1dB としたときは 1m 辺りの入れ替わり発生頻度が 50~150 回とかなり分散があることがわかる。

### 4.2.3. 偏波依存性

表 8 にアンテナ偏波構成を変えたとき、部屋の面積と入れ替わりの発生が想定される回数の関係を示す。

表 8. 入れ替わり頻度と偏波の関係

偏波構成	閾値 0.1dB	閾値 0.5dB	閾値 1dB
VV-VV	0.5	45.7	307.4
VH-VH	1.1	151.2	1148

この表から VH-VH としたときは VV-VV と比べて約 3 倍の頻度で固有値の入れ替わりが発生していることがわかる。これは VH-VH は条件数が低く、最大固有値と最小固有値が近接していることから発生頻度が高ま

っていると考えられる。

## 5. まとめ

屋内実環境における 2x2MIMO-OFDM チャネル特性の実測結果について述べた。

サブキャリア一本に着目した狭帯域特性の検討では、距離に伴う伝搬損失の中央値変動を取り除いて各種チャネル特性について検討を行った。得られた主な結果は下記の通りである。

- ・周波数利用効率、固有値は距離特性を持ち、周波数利用効率、最小固有値は基地局-端末間距離が大きくなるにつれて増加し、条件数、最大固有値は基地局-端末間距離が大きくなるにつれて減少する傾向にある。
- ・周波数利用効率のアンテナ間隔依存性は小さい。基地局アンテナ間隔と端末局アンテナ間隔のうち、小さい方が条件数に対して支配的である。
- ・周波数利用効率の偏波依存性は小さい。固有値、条件数特性では、アンテナの XPD 特性が支配的である。

広帯域 (OFDM) 特性では、固有ベクトルの周波数相関を評価パラメータとして、環境、アンテナ間隔、偏波依存性について検討を行なった。また固有値の入れ替わり問題についても言及した。主な検討結果は下記の通りである。

- ・固有ベクトルの周波数相関が 0.9 以上となる確率が 90% 以上となる帯域幅(以下、相関帯域幅)の環境依存性は大きく、部屋の床面積に対して反比例する。
- ・アンテナ間隔が狭いほど相関のある周波数間隔は広くなる。
- ・偏波構成を変えることにより偏波間で独立なフェージングが発生し、その影響が相関帯域幅を狭くする。
- ・固有値の入れ替わり頻度は部屋面積に比例する。
- ・固有値の入れ替わり発生頻度については基地局アンテナ間隔と端末局アンテナ間隔のうち、小さい方が支配的である。
- ・VH-VH 構成の場合、VV-VV 構成の場合に比べて約 3 倍の頻度で固有値の入れ替わりが発生している。

今後、以上の検討結果を元に、実環境における 2x2MIMO-OFDM チャネルのモデル化を進めて行く。

## 参考文献

- [1] S. Kurosaki, Y. Asai, T. Sugiyama, and M. Umehira, "SDM-COFDM scheme using feed-forward inter-channel interference canceller for broadband mobile communications," Proc. IEEE Veh. Tech. Conf., vol.3, pp.1079-1083, May 2002.
- [2] G.J. Foschini and M.J. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment

when Using Multiple Antennas", Wireless Personal Communications, pp.311-335, March 1998.

- [3] 唐沢好男, "MIMO 伝搬チャネルモデリング", 信学論(B), vol.J86-B, no.9, pp.1706-1720, Sept. 2003.
- [4] 山田渉, 北直樹, 安藤篤也, 佐藤明雄, 高尾鉄也, 森大典, "屋内広帯域 MIMO-OFDM チャネルにおける固有ベクトルの周波数特性の検討", 信学技報, AP2004-67, July 2004.