

平面大地見通し伝搬環境での端末間すれ違い通信における 2x2 MIMO チャンネル特性の検討

多賀 登喜雄

関西学院大学理工学部

あらまし 端末間すれ違い通信の検討では、携帯端末に搭載されている Bluetooth や無線 LAN 機能を利用することが想定されているが、将来は LTE 方式の普及に伴い MIMO 伝送方式を適用することが予想される。しかしながら、見通し内通信環境ではチャンネル相関が高くなり MIMO 伝送の優位性が発揮できない可能性がある。本報告では舗装されていない平面大地上において近距離見通し内伝搬環境下ですれ違い通信を行った場合の MIMO チャンネルの特性、伝送容量特性を幾何光学計算および 2GHz 帯での実験にて検討した。実験値を説明するには所謂 2 波の平面大地モデルでは十分でなく、平面大地の起伏に対するモデル化が必要である。

キーワード MIMO チャンネル, 平面大地モデル, 端末間通信, 幾何光学計算, 2 GHz 帯

A Study on Performance Evaluation of 2x2 MIMO Channel for Inter-Terminal Communications on LOS Plane Earth Propagation Environments

Tokio TAGA

School of Science & Technology, Kwansai Gakuin University

Abstract The Bluetooth or wireless radio LAN module mounted on handheld terminals will be expected to use in Inter-terminal communications (ITC) for present researches on opportunistic communication. According to widely usage of LTE system in the future, MIMO transmission would be adopted in the inter-terminal communication. However, it may not possible to obtain the superiority of MIMO transmission in that ITC environments because of the high channel correlation in a line-of-sight radio propagation environments. In this report, the MIMO channel characteristics and the transmission capacity as the terminals are operated in the LOS closed propagation environment on a non-paved plane earth are investigated in the geometrical optic calculations and 2 GHz band experiments. The result shows that the two path plane earth model is not enough to express the experimental results, but another model accounting with rough surface of plane earth should be needed.

Keyword MIMO Channel, Plane Earth Model, Inter-Terminal Communication, Geometrical Optic Calculation, 2GHz Band

1. はじめに

近年相次いだ震災において、通常時に広域・高速な通信ネットワークを享受していても大規模災害時には通信基地局などのインフラ損壊により通信機能が途絶し、災害地内の人々が孤立化することを経験し、災害時の迅速な状況把握、情報伝達網の耐性強化などに関心が高まり、DTN (Delay- and Disruption-Tolerant Networking) に対する研究が活発に行われている [1-3]。DTN を実現するための技術として蓄積搬送型通信、即ち移動ノード間での

リレー型通信により損傷を受けていないネットワークまで情報を転送する方式の研究が進められており [4]、スマートホンを用いた実機に依るシステム評価の実証実験も実施されているが [5]、その多くはリレープロトコルの研究であり、移動ノード間の通信手段としては携帯端末に実装されている近距離通信手段、すなわち Bluetooth や無線 LAN の機能を利用もしくは利用することを想定している。しかしながら、次世代方式規格である LTE 方式の急速な普及、エリア拡大に伴い、将来は全ての端末に

MIMO 伝送方式の機能が実装されると考えられる。従って端末間同士の通信においても MIMO 伝送方式を利用して動画のような容量の大きいファイルの転送などが行われるものと考えられる。

端末同士がすれ違う場合、見通し環境となるため、開放空間に置かれた場合と同様に空間相関が高くなり、MIMO 伝送効果が激減する [6] ことが予想される。筆者は、舗装されている平面大地上ですれ違う端末間での MIMO チャネル特性と伝送性能につき、大地面や周囲のビル壁面等の存在による特性変動、および Bluetooth や無線 LAN などの SISO 伝送に対する性能比較を計算と実験により検討した [7]。その結果、平面大地上における見通しパスと大地面反射パスからなる 2 波モデルを基本とする幾何光学計算により 2x2-MIMO チャネルの特性が説明できることを実験的にも確認した。

本報告では、舗装されていない（多少の起伏がある）平面大地上で端末間通信を行う場合に、文献 [7] と同じ 2x2-MIMO チャネルの特性、並びに伝送容量特性について検討した結果について論じる。

2. 計算モデルと伝送容量評価法

2.1. 計算モデル

図 1 に送受信点配置と座標系を示す。送受信点は共に平面大地上にあり、アンテナ高は 1.25m とする。また 2 本の半波長ダイポールアンテナを 0.5 波長の素子間距離で並列配置したアレイ構成 (2x2-MIMO 構成) とし、送信 (Tx) 点を xy 平面の原点上に設置し、ブロードサイド方向を y 軸方向に取る。また、受信 (Rx) 点は原点を通信とする半径 R[m] の円周上を移動させるものとし、初期位置を x 軸上に取り、受信アンテナのブロードサイド方向を円周方向に取りながら円周上を移動させ、このときの受信点方向角度を α° とする。上記の送受信点は 2 素子アレイの中心点に一致させ、半径 R は 5 ~ 15m の近距離を想定する。計算には、大地面が十分滑らかな平面大地モデル (直接波と大地面反射波の 2 波モデル, Dry Ground [8]) を考え、幾何光学計算を行って受信点位置に対するチャネル特性 (複素電界, 伝搬損失, 固有値等) を求める。表 1 に計算諸元を示す。アレイアンテナの指向性の計算には相互結合を考慮し、細線近似により求められる電界指向性 (図 2) を適用する。

2.2. 伝送容量評価手法 (SNR の評価方法)

見通し伝搬路において端末同士がすれ違う場合、端末間距離の変動に伴って受信電力が大きく変動する。即ち、SISO 伝送時の SNR が距離と共に変動することから、SNR に依存する伝送容量も距離と共に大きく変動する。このような特性を定量評価するため、本報告では無線 LAN 規格を参考に伝搬損失と SNR の関係を次

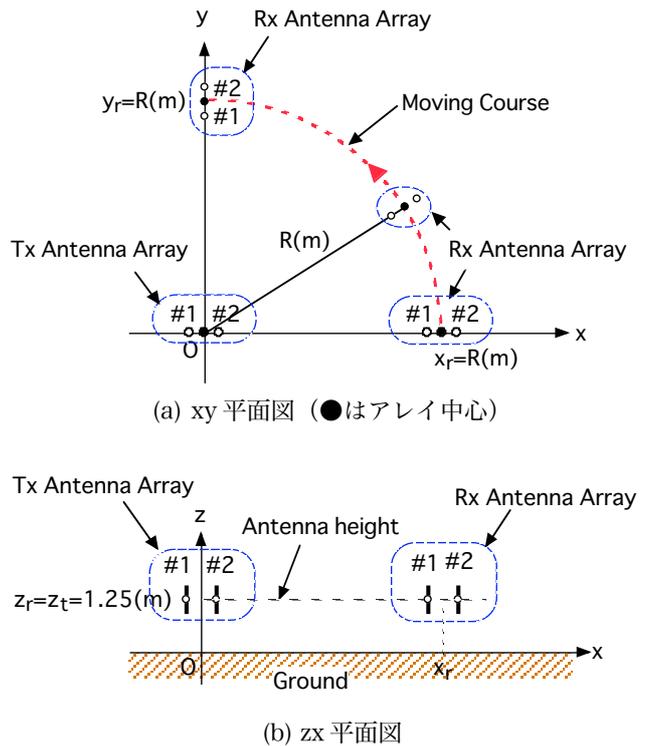


図 1 計算モデルと座標系

表 1 計算諸元

周波数	2.0 (GHz) ∴ 波長: $\lambda=0.3$ (m)
送信電力	0 (dBm)
MIMO構成	2x2-MIMO
送受信アンテナ	半波長ダイポールアンテナ
アンテナ素子間隔	送受信アンテナ共に、0.5波長
送受信アンテナ高	1.25 (m)
複素誘電定数 [8]	大地面: $\epsilon_r=5.5-j*60*0.001*\lambda$

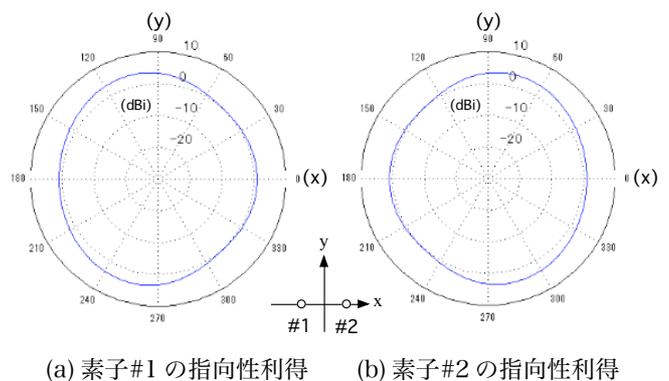


図 2 半波長ダイポールアンテナアレイの放射指向性

のように規定する。

文献 [9] より、5GHz 帯を用いる IEEE802.11a の OFDM 通信規格では、24Mbps の伝送速度を得る最低

受信感度は-74dBmである。従って、送信電力を10mW (10dBm)、送信アンテナの実効利得を-5dBi、人体効果を3dBとすると、この時の許容伝搬損失は $(10-5-5-3-3)+74=68(\text{dB})$ となる。また、0.1%PERの品質でOFDM変調で24Mbpsを実現するC/Nは23dBであるので、C/N=23dBを「24Mbpsの伝送速度を得る最低受信感度:-74dBm」と対応させると、受信機の熱雑音電力(端末側雑音電力)は $P_N=-97\text{dBm}$ と考えられる。以上のことから、本研究では、伝搬損失が68dBの時のC/N=23dB(すなわち、受信機の雑音指数を0dBと仮定すれば、71dBの伝搬損失がSNR=20dBに相当する)と規定し、算出した伝搬損失をSISO伝送時のSNRに換算し、式(1)によりMIMO伝送容量を評価する。

$$C = \sum_{i=1}^{M_0} \log_2 \left(1 + \frac{\lambda_i \gamma_0}{M_i} \right) \quad (1)$$

ここで $M_0 = \min\{M_t, M_r\} = \min\{2, 2\} = 2$ であり、 λ_i ($i=1, 2$)は固有値、 γ_0 はSISO伝送時のSNRである。同様に、SISO伝送時の伝送容量は式(2)により評価する。

$$C = \log_2(1 + \gamma_0) \quad (2)$$

3. 計算結果

本章では、前章で述べた計算モデルに対してSISOと2x2-MIMOのチャンネル特性および伝送容量を比較・考察する。

3.1. 受信電力特性

図3に送受信アンテナ共に半波長ダイポールアンテナとした場合のSISO受信時の送受信点間距離に対する受信電力特性を示す。本報告では以下、送受信点間距離が $R=5, 10, 15$ (m)の場合について検討する。そこで図中には、後述のMIMOチャンネル特性を考える際のSISO伝送時のSNRを、半径 R が各々の距離の場合に対して記している。それぞれの移動コース半径で円周上を移動するとき、SISO受信レベル(SNR)は図3の

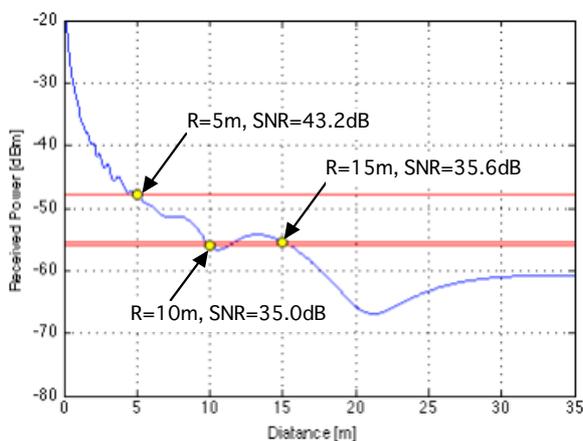
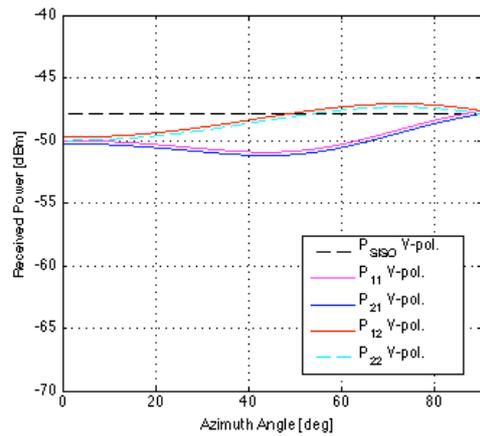


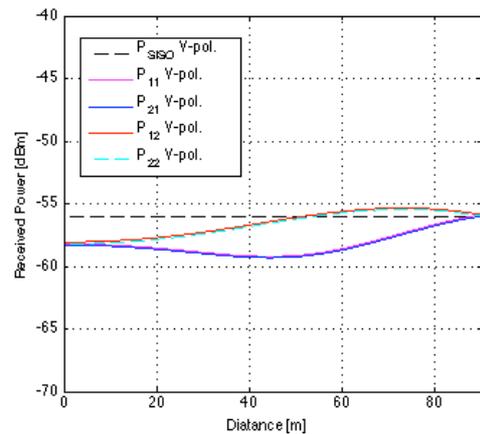
図3 距離Rに対するSISO受信電力特性とSNR

各値で一定である。

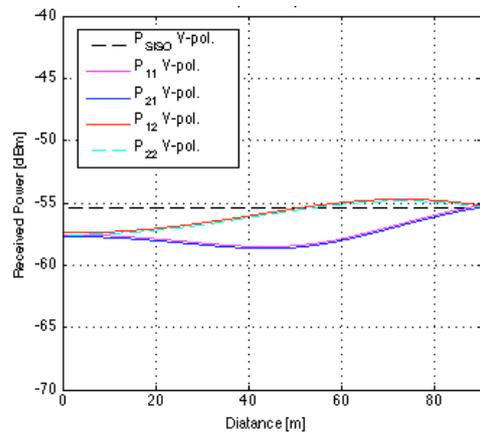
2x2-MIMOの場合、図2に示したように各アンテナの水平面内指向性が等方向性ではないため、受信点方向角度 α ならびに対応する送受信アンテナ素子により受信電力が変化する。n番目の送信アンテナからm番目の受信アンテナに至るチャンネル応答を $\mathbf{H}=\{h_{mn}\}$ ($m, n=1, 2$)とおくとき、それらの受信電力 $|h_{mn}|^2$ の特性は図4に示すものとなる。図中の破線はSISOの受



(a) R=5m



(b) R=10m



(c) R=15m

図4 R=5, 10, 15mでの2x2-MIMOの受信電力特性

信電力を示す。図4より、2x2-MIMOの受信電力はアンテナの指向性利得の変動に応じて緩やかに変動する。

3.2. 2x2-MIMOの固有値・伝送容量特性

図5に各移動コースの半径Rに対する2x2-MIMOの固有値と伝送容量の変動特性を示す。固有値計算に用いる相関行列はMIMOのチャネル応答行列をSISOの受信電力で正規化しているため、図中の1がSISOに対応する固有値となる。いずれのコース上においても第1固有値は1より大きいが、これはアンテナ指向性利得によるSNRの改善効果に依存する特性である。しかしながら、第2固有値は第1固有値よりも50dB以上小さ

くなっており、理論上はチャンネル間の相関が高いためにMIMO伝送の特徴である並列伝送効果が発揮できない特性となっている。この結果、2x2-MIMO伝送容量は図5に示すようにSISO伝送よりも僅かに高くなるものの、SISO伝送容量を倍増するような効果は得られない特性となる。

4. 実験値との比較・考察

3章にて推定したMIMOチャネル特性の妥当性確認のため、2GHz帯にて実施した実験値との比較、考察を行う。

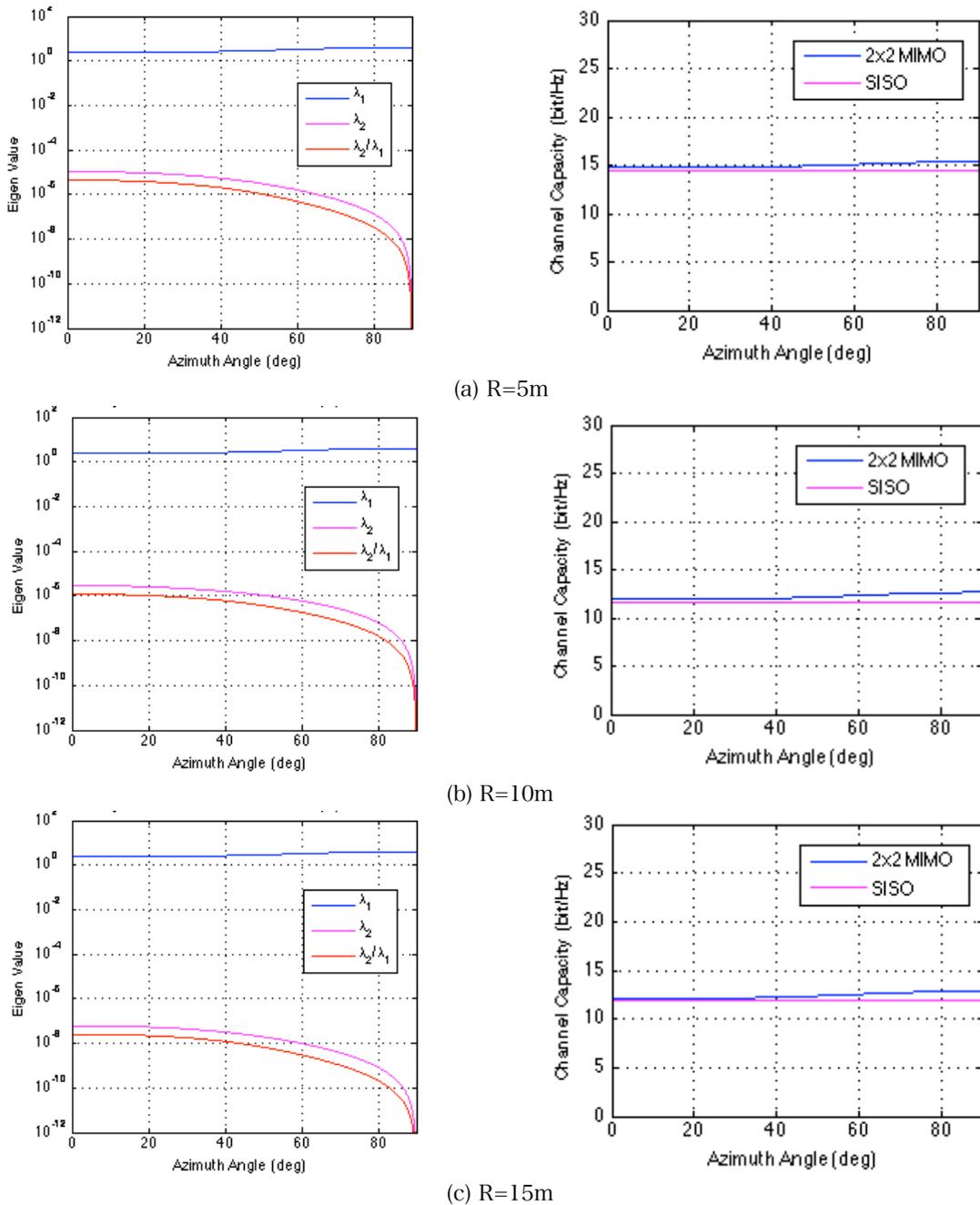


図5 R=5, 10, 15mでの2x2-MIMOの固有値特性と伝送容量特性

4.1. 実験の概要

半波長ダイポールアンテナを0.5波長間隔で並列設置したMIMO用2素子アレイを用い、関西学院大学理工学部前のグラウンドにて移動伝搬実験を行った。実験場所の概要を図6に、実験風景を図7に示す。送受信点の位置関係などは図1と同じであるが、半径Rは5m, 10m, 15mの3通りとしてその円周の4分の1（方向角度 α が 0° から 90° まで）の範囲を移動コースとした。実験諸元を表2に示す。測定装置はロードシュワルツ社製の8ポート・ベクトル・ネットワークアナライザを用い、2GHzの無変調波による測定を実施した。受信アンテナは移動台車に取り付け、図6に示す移動コース上を等速度で移動させ、SISOおよびMIMOチャネルの複素受信電界を91.7秒間（19501サンプル/ポート）ずつ個別に測定した。以下、SISO受信電力を正規化電力とし、伝送容量評価を行った。

4.2. SISO 受信電力

図8にSISOチャネルの受信電力特性と平均受信電力の計算値との比較を示すが、直接波と大地面反射波からなる2波モデルによる推定値は実測値とほぼ同様の傾向を示す。R=5mの受信電力には若干の揺らぎがあるが、これはグラウンド面の起伏による移動台車上のアンテナ位置の揺らぎに起因するものと考えられる。しかしながら、半径Rが5m, 10mの場合は、多重波フェージングの様相を呈する変動となっており、2波以上の到来波を受信していると考えられるべき特性である。これらの瞬時受信電力特性は表3に示すようにR=5m, 10mのときそれぞれ $k=4.59\text{dB}$, 5.74dB の仲上-ライス分布で近似でき、見通し条件下であるにもかかわらず直接波以外の到来波の総受信電力が比較的高いと言える。

図9に式(2)より求めたSISOの伝送容量の計算値と実測値との比較を示す。図8(a)~(c)に示した受信電力の計算値が実測値にほぼ一致することから、SISO伝送容量は2波モデルにより推定できることが確認できる。

以下、図8(d)に示した平均受信電力値（図中●）をそれぞれの移動コースにおける正規化受信電力としてMIMO固有値および伝送容量の評価に適用する。

4.3. 2x2-MIMO 受信電力特性

図10に2x2-MIMOチャネルの受信電力特性と計算値との比較を示す。いずれの図においても、緩やかに変動する2波モデル推定値に比べて実験値は多重波フェージングの様相を呈する変動となっている。各々の半径における受信電力特性は仲上-ライス分布で近似でき、そのkファクタは表3に示すようにR=5mのとき $k=8.2\sim 10.6\text{dB}$ 、R=10mのとき $k=1.95\sim 5.79\text{dB}$ 、R=15mのとき $k=2.2\sim 7.55\text{dB}$ となり、直接波以外に比較的多くの伝搬パスが存在すると思われるべき伝搬路

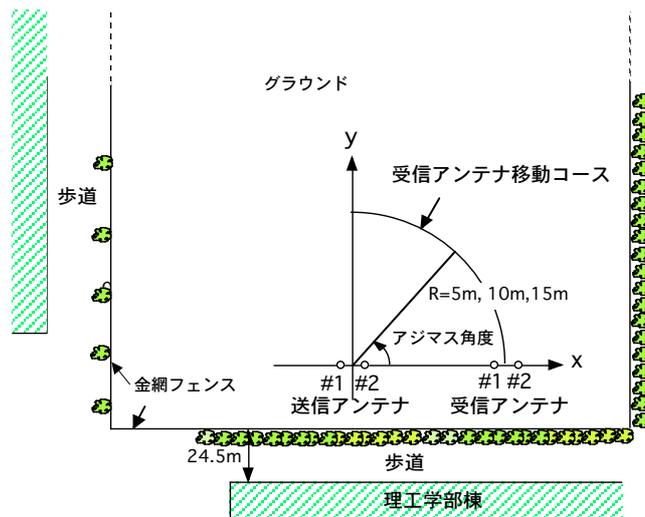


図6 実験場所の概要図



図7 実験風景

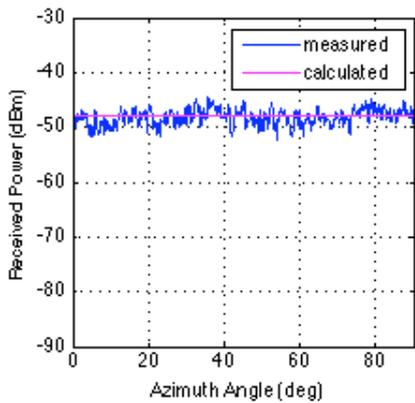
表2 実験諸元

実験周波数	2.0 (GHz) CW
送信電力	0 (dBm)
送受信アンテナ	半波長ダイポールアンテナ
アンテナ素子間隔	送受信アンテナ共に、0.5波長
送受信アンテナ高	1.25 (m)
測定時間/1回	91.7 (sec)
データサンプリング数	19501/port

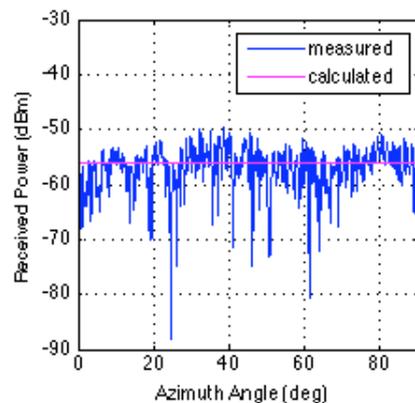
と言える。

4.4. 2x2-MIMO の固有値、伝送容量

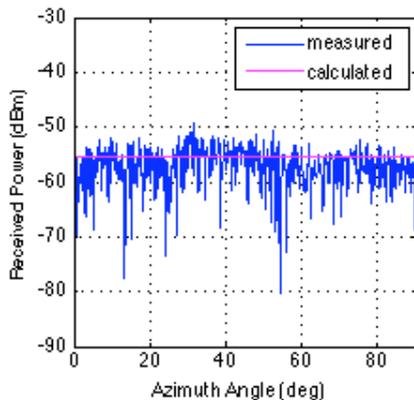
固有値および伝送容量の実測結果を計算値と共にプロットした結果を図11に示す。第1固有値はほぼ推定値に一致するが、第2固有値はいずれの半径Rの場合も実測値の方が推定値よりも高く、2波モデルではMIMOチャネル特性を十分説明できない結果となっている。



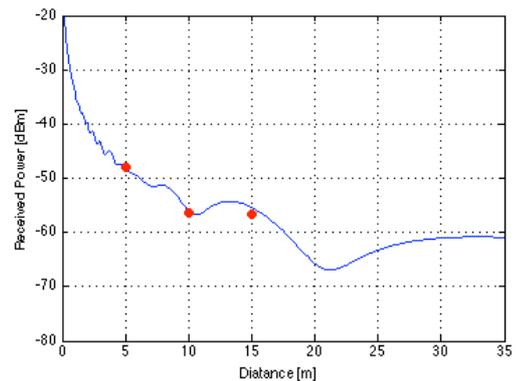
(a) R=5m



(b) R=10m



(c) R=15m

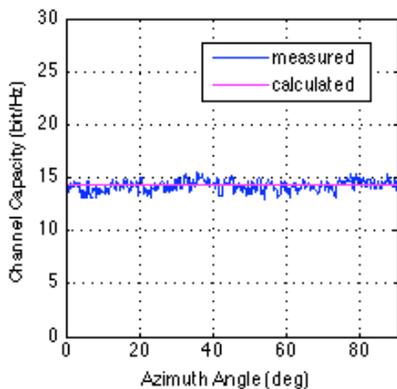


(d) 距離特性 (—計算値, ●実験値)

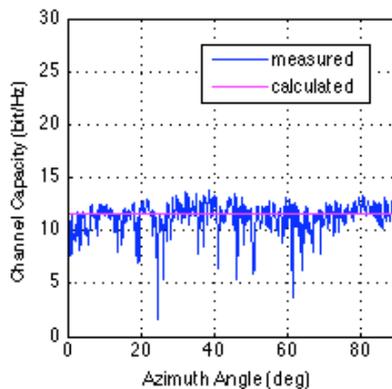
図8 SISO チャネルの受信電力特性と平均受信電力の計算値との比較

表3 実測チャネルのkファクタ

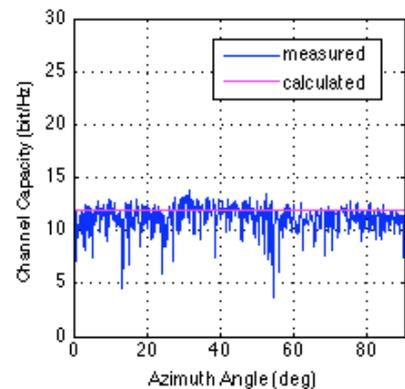
測定チャネル		k-factor (dB)	測定チャネル		k-factor (dB)
SISO	R=5m	12.38	MIMO R=10m	h11	4.61
	R=10m	4.60		h12	5.79
	R=15m	5.75		h21	1.95
		h22		4.50	
MIMO R=5m	h11	8.21	MIMO R=15m	h11	5.00
	h12	8.71		h12	7.55
	h21	9.88		h21	2.22
	h22	10.64		h22	5.52



(a) R=5m



(b) R=10m



(c) R=15m

図9 SISO チャネルの伝送容量特性

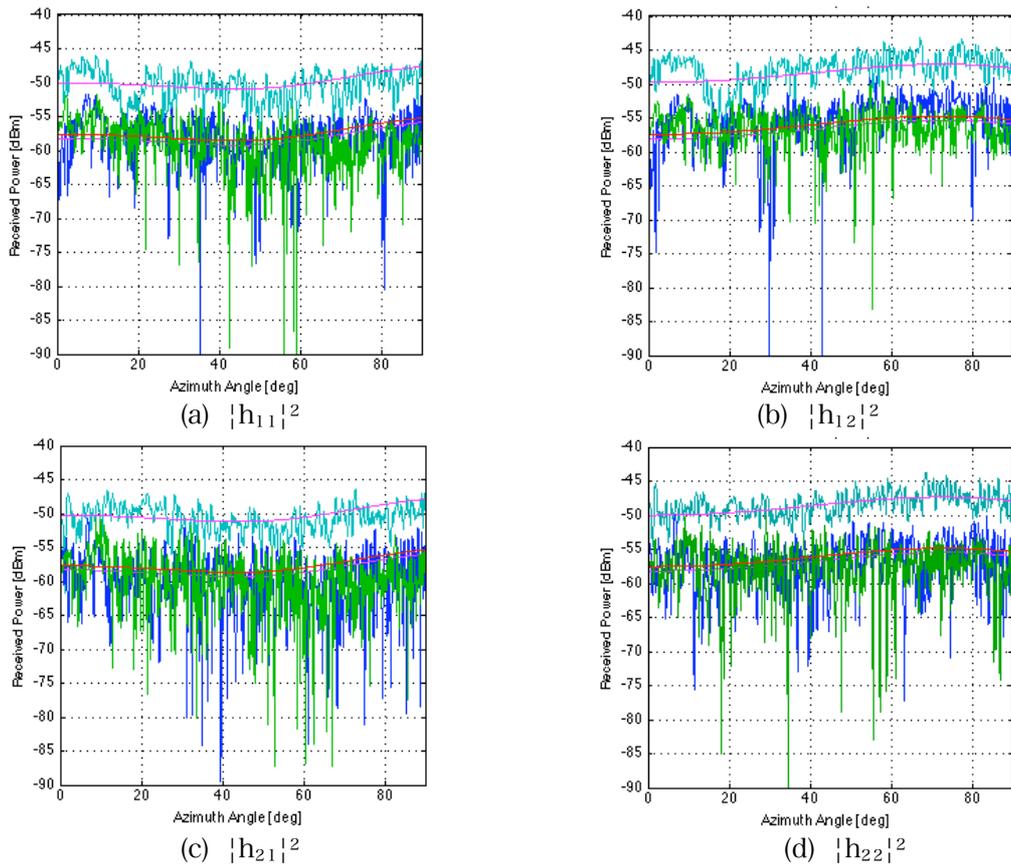
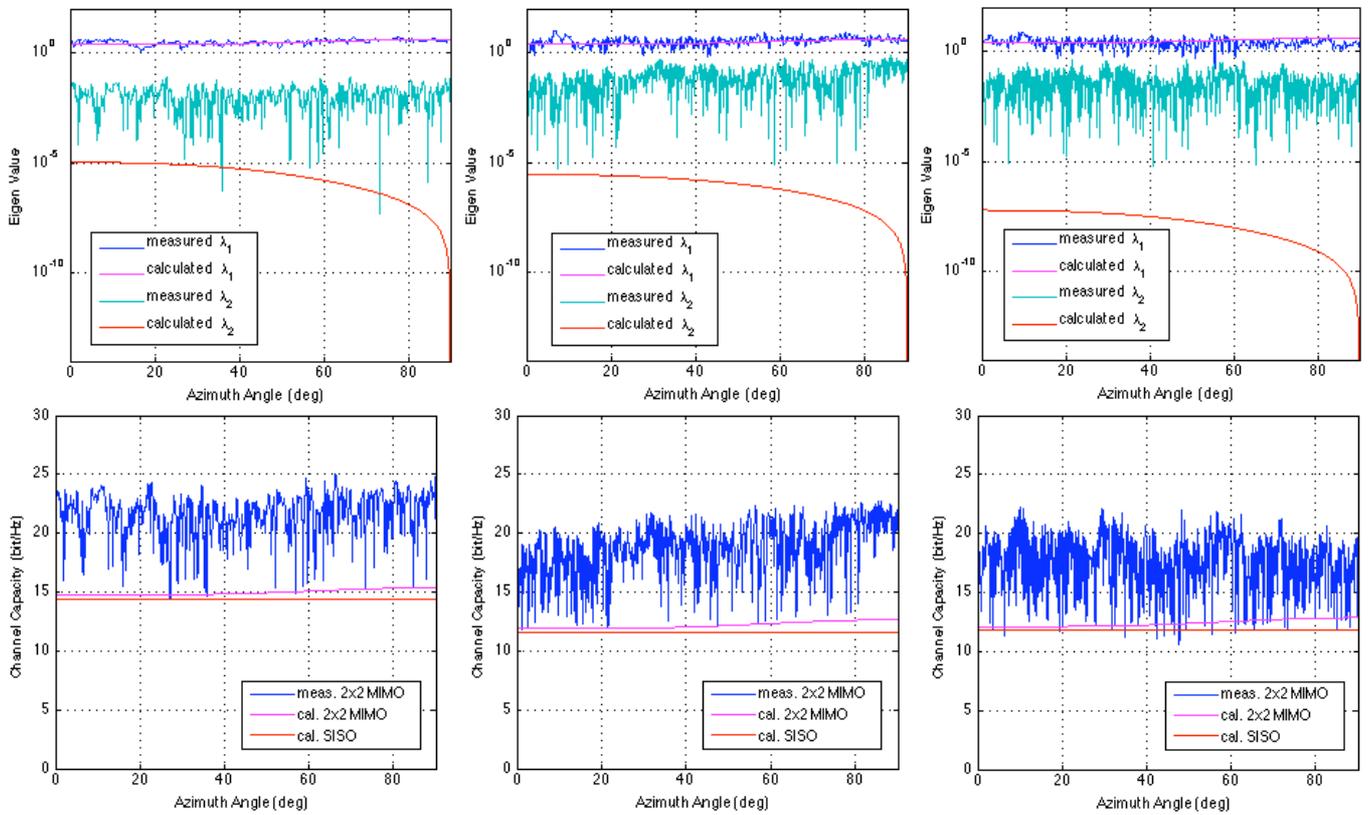


図 10 2x2-MIMO チャンネルの受信電力特性 (—R=5m, —R=10m, —R=15m)



(a) R=5m

(b) R=10m

(c) R=15m

図 11 2x2-MIMO チャンネルの固有値および伝送容量特性

参考文献

すなわち、図 8 に示す SISO の伝送容量と図 11 に示す 2x2-MIMO の伝送容量を比較すると、SISO の計算推定値は実測値とほぼ一致しているが、図 11(a)~(c) に示した第 2 固有値の違いにより、2x2-MIMO の伝送容量実測値は計算値よりも大幅に増加していることが確認できる。このことは、起伏のあるグラウンドのような平面大地上での MIMO チャネルの評価モデルは、直接波と大地面反射波の 2 波からなる平面大地モデルでは不十分であり、この伝送容量増大（第 2 固有値増加）を説明できる伝搬モデルが必要であることを示している。それには、今回考慮した 2 波以外のパスを考慮に入れなければならないが、大地面の起伏に起因する散乱波、グラウンド周辺の建物あるいは散乱体の影響、移動台車を動かす際の人体の影響などを検討する必要がある。

5. まとめ

本稿では、舗装されていない（多少の起伏がある）平面大地上で端末間通信を行う場合に、2x2-MIMO チャネルの特性、並びに伝送容量特性について検討した結果について論じている。特に、通常の平面大地モデル（直接波+大地面正規反射波の 2 波モデル）により推定したチャネル特性と実測値の比較を行い、多少の起伏がある平面大地であっても SISO チャネル特性の推定には十分有用であることを確認すると共に、MIMO チャネル特性と伝送性能の推定には不十分で、より多くの到来波を考慮できるチャネルモデルの提案が必要であることを明らかにした。

文献 [7] では、水平面内アレイ構造の MIMO アンテナ系では水平面内に電波反射物が存在すれば MIMO 効果が期待できることを明らかにしており、今回の実測結果で確認された MIMO 容量増大効果が遠方反射体や散乱体の影響であるのかについても検討が必要と考えられる。

大地面の凹凸の効果を扱う手法、大地面での正規反射波以外のパスを考慮する手法など、検討すべきモデルには様々なアプローチが考えられるが、舗装されていない平面大地上ですれ違う端末間 MIMO チャネルおよび伝送性能が簡易かつ有効に推定できる伝搬モデルの開発が望まれる。これらの検討が今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、実験に協力頂いた研究室の学生諸氏に感謝致します。測定に使用したベクトル・ネットワークアナライザは文部科学省の平成 22 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」に採択された「劣通信環境下でのアドホック情報通信ネットワーク基盤に関する研究」プロジェクトの購入品である。

- [1] 高橋,北村,巳波, “劣通信環境下における災害救助エージェントの組織,” 情報処理学会論文誌, vol. 53, no. 11, pp.2379-2387, 2012.
- [2] 藤原,巳波, “すれちがい通信を利用した災害時避難誘導法,” 信学論 (B),vol.J96-B,no.6, pp.580-588,2013.
- [3] T. Spyropoulos, K. Psounis, and C. S. Raghavendra, “Single-copy routing in intermittently connected mobile networks,” Proc. of IEEE SECON'04, pp.235-244, Oct. 2004.
- [4] Y. Kitamura, S. Nosaka, H. Kishino, and Y. Okuda, “Trekkling Navigation System Using Opportunistic Communication,” Proc. 5th Int. Conf. on Agents and Artificial Intelligence, 1, pp.427-430, 2013.
- [5] 伊藤昌也, 西山大樹, 加藤寧, “DTN と MANET の性能比較のためのフィールド実験報告,” 信学総大, vol.2013_通信, no.2, p.116, 2013.
- [6] 小川恭孝, 大鐘武雄, 西村寿彦, “MIMO による超高速化,” 信学ソサエティマガジン, no.11, 冬号, pp.32-38, 2009.
- [7] 多賀登喜雄, “見通し伝搬環境での端末間すれ違い通信における 2x2 MIMO チャネル特性の検討,” 信学技報, AP2014-51, pp.19-24, (2014-07).
- [8] Simon R. Saunders, Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems 1st Ed., JOHN WILEY & SONS, LTD, Chap.3, p.38 1999.
- [9] 守倉正博, 久保田周治 (監修), 改訂版 802.11 高速無線 LAN 教科書, (株) インプレス, 東京都, 2005 年.