

屋内 MIMO 伝搬路の時間変動特性解析

水谷 慶[†] 阪口 啓[†] 高田 潤一[†] 荒木 純道[†]

[†] 東京工業大学 大学院理工学研究科
〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1
E-mail: kmiz@ap.ide.titech.ac.jp

あらまし MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) システムで、最適な伝送方式と言われる SVD(Singular Value Decomposition)-MIMO システムは、受信側で推定した伝搬路情報を送信側にフィードバックして空間を直交化するビーム形成を行うが、時間的に変動する伝搬路においては、フィードバックに要する時間的な遅延により、送信ウェイトと実際の伝搬路との不整合が生じ、固有モード間干渉による特性劣化が発生する。本稿では、5 GHz 帯屋内無線 LAN 環境において、静的、動的な状況下での時間的な MIMO 伝搬測定を行い、取得したデータを用いて時間変動のある伝搬路における SVD-MIMO システムの伝送容量特性を解析したので報告する。

キーワード MIMO, SVD, フィードバック, 伝搬測定, 時間変動, 伝送容量

Analysis on Temporal Variation of Indoor MIMO Channels

Kei MIZUTANI[†], Kei SAKAGUCHI[†], Jun-ichi TAKADA[†], and Kiyomichi ARAKI[†]

[†] Graduate School of Engineering, Tokyo Institute of Technology
2-12-1, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550 Japan
E-mail: kmiz@ap.ide.titech.ac.jp

Abstract SVD-MIMO (Singular Value Decomposition Multiple-Input Multiple-Output) system is the optimal MIMO transmission by means of transmit (Tx) and receive (Rx) beamforming based on the knowledge of the channel state information (CSI) both at the transmitter and receiver. In practical systems, Tx weight is fed back from the receiver to the transmitter with some delay, which causes mismatch between the weight and the real channel if the channel is not static but time-varying. In the result, performance of the SVD-MIMO transmission degrades due to inter-eigenmode interference. This paper reports a temporally-continuous MIMO channel measurement in a 5 GHz band indoor wireless LAN environment. In this measurement, two scenarios were assumed, static and dynamic, to investigate the effect of the temporal variation, and the channel capacity of SVD-MIMO systems in time-varying channel was analyzed.

Key words MIMO, SVD, feedback, channel measurement, temporal variation, channel capacity

1. ま え が き

MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) システムは、送信機、受信機ともに複数のアンテナを有することにより、高い周波数利用効率を得られる技術として近年盛んに研究され、実用化の段階となった。この MIMO システムの潜在能力を最大限利用するには、送受双方で伝搬路情報が既知である必要がある [1]。具体的には、伝搬路情報に基づき送受のビーム形成を行い、通信路を空間的に多重することによって、空間という資源を有効利用している。これは、MIMO 固有モード伝送 [2]、E-SDM(Eigenbeam-Space Division Multiplexing) [3]、SVD(Singular Value Decomposition)-MIMO [4] などと呼ばれ

ている。しかしながら、実際の通信システムでは、特に送信側において予め伝搬路情報が既知であるという仮定が成り立たない。現実的な方法として、受信側で推定した伝搬路情報をフィードバックして、次の送信時に使用するというシステムが考えられる。ここで、伝搬路が静的でなく時間的に変動するような場合、フィードバックの前後で伝搬路情報が異なるため、最適なビーム形成を行うことができなくなる。したがって、MIMO システム、特にクローズドループ型のシステムを実用化するには、伝搬路の変動特性がシステムの性能に与える影響を考慮しなければならない [5]。

そこで筆者らは、文献 [6] で開発した MIMO ソフトウェア無線 (SDR) テストベッドに実装したリアルタイム伝搬測定システ

ム [7] を用いて動的伝搬路の測定を行い、その特性を解析した。本測定システムの仕様は、現行の 5 GHz 帯無線 LAN システム (IEEE802.11a [8]) に準拠した OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) を MIMO に拡張したものであり、次期標準の IEEE802.11n にも適用可能である。文献 [9] では、時間的に変動する伝搬路で送信ウェイトをフィードバックすると、その遅延の影響により固有モード間の直交性が崩れ、干渉による伝送容量損失が生じることを示した。本稿ではフィードバック遅延の大小により、特性の劣化量がどのように変化するかを解析したので報告する。

2. SVD-MIMO システムの伝送容量

送信アンテナ数 m_t 、受信アンテナ数 m_r の MIMO-OFDM システムを考える。ここで、周波数領域で各サブキャリアごとの処理に着目すると、伝搬路は十分狭帯域であるとみなせるので、以後、単一のサブキャリアについて話を進める。

ある時刻 t において、送信信号 $s(t) \in \mathcal{C}^{m_t \times 1}$ を $\mathbf{H}(t) \in \mathcal{C}^{m_r \times m_t}$ の応答行列で表される MIMO 伝搬路で送信した時の受信信号 $\mathbf{r}(t) \in \mathcal{C}^{m_r \times 1}$ は

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

のように表される。ここで、 $\mathbf{n}(t) \in \mathcal{C}^{m_r \times 1}$ は、平均 0、分散 σ^2 の加法的白色ガウス雑音である ($E[\mathbf{nn}^H] = \sigma^2 \mathbf{I}_{m_r}$ 、 \mathbf{I}_{m_r} は単位行列、 $[\cdot]^H$ は複素共役転置)。簡単のため、総送信電力は、全ストリーム等しく P に分配されるものとする ($E[\mathbf{ss}^H] = P\mathbf{I}_{m_t}$)。また、以後、送信アンテナ数、受信アンテナ数は、今回使用した測定システムに即して $m_t = m_r = m$ とする。

2.1 理想的な SVD-MIMO システム

まず、フィードバック遅延のない理想的な SVD-MIMO システムについて述べる。SVD-MIMO システムでは、MIMO 応答行列 $\mathbf{H}(t)$ を特異値分解することにより、送受で使用するウェイトを求める。

$$\mathbf{H}(t) = \mathbf{U}(t)\mathbf{D}(t)\mathbf{V}^H(t) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{U}(t) = [\mathbf{u}_1(t), \dots, \mathbf{u}_m(t)] \in \mathcal{C}^{m \times m}$ 、 $\mathbf{V}(t) = [\mathbf{v}_1(t), \dots, \mathbf{v}_m(t)] \in \mathcal{C}^{m \times m}$ は、それぞれ受信、送信のウェイト行列であり、 $\mathbf{D}(t) = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \dots, \sqrt{\lambda_m})$ は、対角要素に特異値を持ち、特異値の自乗は、直交分割されたストリーム (固有モード) の利得に対応する。すなわち、送受でビーム形成を行った時、MIMO 応答行列は等価的に

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}}(t) &= \mathbf{U}^H(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{V}(t) \\ &= \mathbf{D}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

と表すことができる。受信信号 $\mathbf{y}(t) \in \mathcal{C}^{m \times 1}$ は、

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) &= \mathbf{U}^H(t)\{\mathbf{H}(t)\mathbf{V}(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)\} \\ &= \mathbf{D}(t)\mathbf{s}(t) + \mathbf{U}^H(t)\mathbf{n}(t) \\ &= \tilde{\mathbf{H}}(t)\mathbf{s}(t) + \tilde{\mathbf{n}}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、 $\tilde{\mathbf{n}}(t) = \mathbf{U}^H(t)\mathbf{n}(t)$ である。これより、第 i 固

有モードの信号対雑音電力比 (SNR) は、

$$SNR_i = \frac{P\lambda_i}{\sigma^2} \quad (5)$$

伝送容量は、

$$C_i = \log_2(1 + SNR_i) \quad (6)$$

のように求められる。

2.2 フィードバック遅延のある SVD-MIMO システム
次に、 τ のフィードバック遅延がある SVD-MIMO システムを考える。すなわち、時刻 t において、時刻 $t - \tau$ で求めた送信ウェイト $\mathbf{V}(t - \tau)$ を使用する。式 (3)、(4) は、それぞれ

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{H}}(t; \tau) &= \mathbf{U}^H(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{V}(t - \tau) \\ &= \mathbf{D}(t)\mathbf{V}(t)^H\mathbf{V}(t - \tau) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(t) &= \mathbf{U}^H(t)\{\mathbf{H}(t)\mathbf{V}(t - \tau)\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t)\} \\ &= \mathbf{D}(t)\mathbf{V}^H(t)\mathbf{V}(t - \tau)\mathbf{s}(t) + \mathbf{U}^H(t)\mathbf{n}(t) \\ &= \tilde{\mathbf{H}}(t; \tau)\mathbf{s}(t) + \tilde{\mathbf{n}}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ここで、伝搬路の時間変動により $\mathbf{V}(t)$ と $\mathbf{V}(t - \tau)$ が等しくなくなると、伝搬路と送信ウェイトの間で不整合が生じ、固有モード間で次式の利得を持った干渉が発生する。

$$G_{ij} = |\mathbf{v}_i^H(t)\mathbf{v}_j(t - \tau)|^2 \quad (9)$$

ここで、 G_{ij} は第 j 固有モードから第 i 固有モードへの干渉の度合を示す。これより、フィードバック遅延のある SVD-MIMO システムの信号対干渉・雑音電力比 (SINR) は、

$$\begin{aligned} SINR_i &= \frac{P\lambda_i G_{ii}}{\sigma^2 + \sum_{j=1, j \neq i}^m P\lambda_j G_{ij}} \\ &= \frac{SNR_i G_{ii}}{1 + SNR_i(1 - G_{ii})} \end{aligned} \quad (10)$$

のように表される。特に、高 SNR の時は、

$$SINR_i \simeq \frac{G_{ii}}{1 - G_{ii}} \quad (11)$$

のように近似することができるため、時間変動による直交性の崩れが SNR に関わらず特性を支配してしまうことがわかる。式 (6) と同様に、伝送容量は

$$C_i = \log_2(1 + SINR_i) \quad (12)$$

で求められる。

2.3 ZF 干渉キャンセラ型フィードバック SVD-MIMO システム

他の固有モードからの干渉を、ZF (Zero-Forcing) のような干渉キャンセラで抑圧する SVD-MIMO システムが提案されている [10]。式 (8) において、 $\tilde{\mathbf{H}}(t; \tau)$ の一般逆行列 $\tilde{\mathbf{H}}^\dagger(t; \tau)$ を用いさせることにより、干渉を除去することができる。

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}}(t) &= \tilde{\mathbf{H}}^\dagger(t; \tau)\{\tilde{\mathbf{H}}(t; \tau)\mathbf{s}(t) + \tilde{\mathbf{n}}(t)\} \\ &= \mathbf{s}(t) + \tilde{\mathbf{H}}^\dagger(t; \tau)\tilde{\mathbf{n}}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、雑音強調により SINR は、

$$SINR_i(t) = \frac{P}{\tilde{\mathbf{h}}_i(t)\tilde{\mathbf{h}}_i^H(t)\sigma^2} \quad (14)$$

となる。ここで、 $\tilde{\mathbf{h}}_i(t)$ は、 $\tilde{\mathbf{H}}^\dagger(t; \tau)$ の第 i 行成分を表す。伝送容量は、式 (12) で求められる。

3. 伝搬測定実験

実測データによる特性評価を行うため、以下のような伝搬測定実験を行った。

3.1 測定システム

測定システムの構成を図 1 に示す。送信機には、予め OFDM 変調を行ったトレーニング信号波形を FPGA 内のメモリテーブルに記憶させておき、周期的にアドレスを巡回させることにより、0.4 ms 周期で同じ波形を繰り返し DA 変換器から出力する。トレーニング信号は、IEEE802.11a のプリアンブルを MIMO 用に拡張したものを使用する。拡張プリアンブルは、2 OFDM シンボル長のショートプリアンブル、64 OFDM シンボル長のロングプリアンブルで構成され、それぞれフレーム同期、伝搬路推定に使用される。なお、ロングプリアンブルは、IEEE802.11a のロングプリアンブル (2 OFDM シンボル) を 32 次のアダマール系列で拡散し、送信アンテナ間で直交化させている。DA 変換器からのベースバンド出力は、5 GHz 帯にアップコンバートして 4 素子のアレーアンテナから送信する。受信機では、アレーアンテナで受信した信号をベースバンドにダウンコンバートした後、AD 変換器に入力する。AD 変換後の信号は、FFT、伝搬路推定の処理を行うが、このトリガタイミングを送信信号の周期と同期させることにより、フレーム同期処理に起因する処理速度の低下、同期誤りなどの影響を取り除いている。伝搬路推定は、4 ms 周期で行い、データはハードディスクに逐次記録する。なお、送信機、受信機のハードウェア制御は、ソケットサーバー機能を有する MIMO-SDR 制御プログラムが行っており、2.4 GHz 帯無線 LAN などのネットワーク経由でリモート制御が可能である。また、送信機、受信機のローカル信号、クロック信号は、周波数安定度 10^{-11} のルビジウム発振器に同期させている。

3.2 測定環境

測定は、図 2 に示すような広さ 6×3.5 m、高さ 2.5 m の室内で行った。部屋の中央にはテーブルが置かれており、測定装置 (送信機、受信機) は、このテーブルの下に設置した。測定中、金属製のドアは 2 箇所とも閉じた状態にした。実際の無線 LAN 環境を模擬するため、送信アンテナは、床から 0.8 m の高さの台の上に、受信アンテナは、床から 0.7 m の高さのテーブル上に見通しとなるように設置し、それぞれアクセスポイント、ユーザ端末を想定した。送信、受信アンテナはともに、半波長間隔の線形アレーとし、ブロードサイド方向が向き合う形で設置した。アンテナ素子は垂直偏波のスリープダイポールアンテナを使用した。なお、測定中の室内の様子は、窓側に設置したビデオカメラの映像をキャプチャし、測定データとともに保存した。主な測定諸元を表 1 に示す。

表 1 測定諸元

中心周波数	5.06 GHz
アレーアンテナ	半波長間隔線形アレー
アンテナ数	4 (Tx) \times 4 (Rx)
アンテナ素子	垂直スリープダイポール
送信信号	拡張 IEEE802.11a プリアンブル
トレーニング信号長	64 OFDM シンボル
伝搬路推定周期	4 ms
測定時間	10 s

今回は比較のため、静的環境と動的環境の 2 種類のシナリオを用意した。前者 (Static) は、部屋を閉め切って室内には動くものが何もない状態で測定を行い、後者 (Walking) は、伝搬路を変動させるため約 1 m/s の速度で人が歩行しながら測定を行った。図 2 中の一点破線は、Walking シナリオにおいて歩行者の歩いた経路であり、線上の数字は測定時刻に対する歩行者の位置を示している。この経路では、見通しの遮へいによるシャドウイングが発生するため、見通し領域 (フレネルゾーン) を破線で示している。

4. 測定結果

測定したデータを用いて、伝搬損失の時間変動、時間相関、および SVD-MIMO システムの伝送容量を解析した。

4.1 伝搬損失の時間変動

両シナリオにおける伝搬損失の時間変動特性を図 3, 4 に示す。図 3 は、送信アンテナ 1、受信アンテナ 1 における 1 サブキャリアについて、図 4 は、全送受信アンテナの組合せにおける全サブキャリアの平均値をそれぞれ示している。Static の場合は、大きな変化はなくほぼ一定の値となっているのに対し、Walking の場合は瞬時的に変動しているのがわかる。特に送受信アンテナ間の見通し領域 (フレネルゾーン) を通過する際、シャドウイングにより伝搬損失が大きくなっているのがわかる。

4.2 MIMO 応答行列の自己相関

次に、フィードバック遅延 τ に対する MIMO 応答行列の変動を示す基準として自己相関係数 $\rho_{ijk}(\tau)$ を以下の式で求めた [11]。

$$\rho_{ijk}(\tau) = \left| \frac{A[\mathbf{H}_{ijk}(t)\mathbf{H}_{ijk}^*(t-\tau)]}{\sqrt{A[\mathbf{H}_{ijk}(t)\mathbf{H}_{ijk}^*(t)]A[\mathbf{H}_{ijk}(t-\tau)\mathbf{H}_{ijk}^*(t-\tau)]}} \right| \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{H}_{ijk}(t)$ はサブキャリア k における MIMO 応答行列の i 行 j 列成分、 $[\cdot]^*$ は複素共役を表し、 $A[\cdot]$ は測定時刻 $t=4 \sim 9$ (1250 スナップショット) の標本平均である。図 5 は、Static および Walking において見通し内を通過しない場合 ($t=4 \sim 5$) と通過する場合 ($t=7 \sim 8$) の 3 つのケースについてその自己相関特性を示している。Static の場合、自己相関係数はほぼ 1 であり、フィードバック遅延による影響はほとんどないものと考えられる。一方、Walking の場合は、見通しを通過するか否かで特性が大きく異なっている。

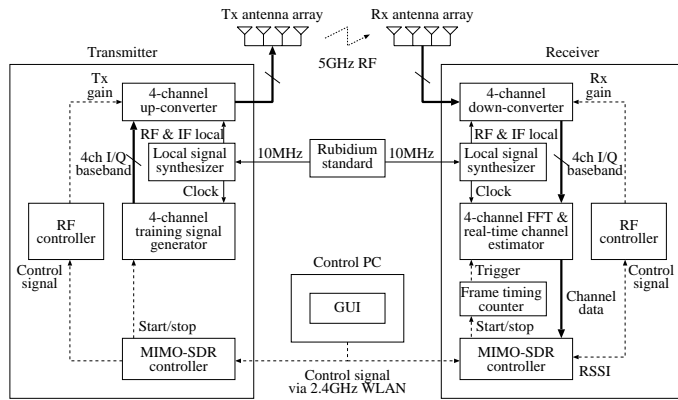


図 1 測定システムの構成

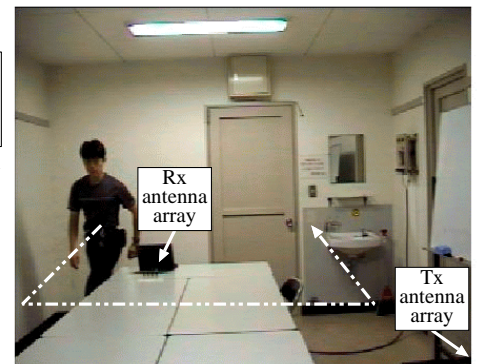
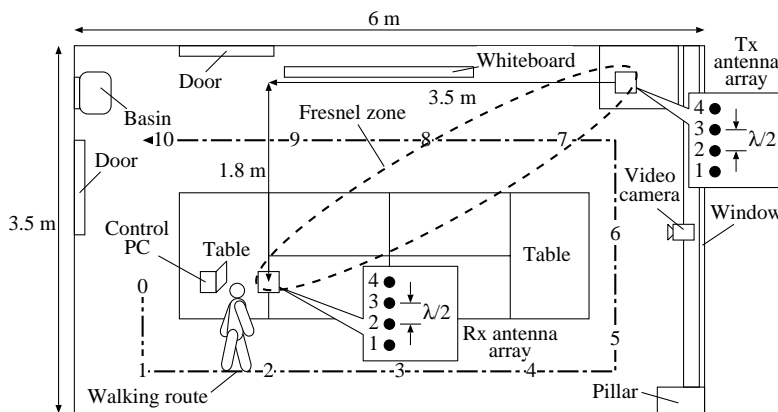


図 2 測定環境

4.3 時間変動がある伝搬路における伝送容量

今回測定した伝搬路において、SVD-MIMO 伝送を行ったときの伝送容量を図 6(Static)、図 7(Walking) に示す。ここでは、平均受信 SNR を 30, 20, 10 dB とした時のフィードバック遅延量に対する伝送容量を、ZF 干渉キャンセラを使用する場合 (SVD+ZF) と使用しない場合 (SVD) で求めた。τ = 0 の時が、フィードバック遅延のない理想的な場合である。なお、SVD+ZF の漸近値として、SVD ではなく受信側で ZF 処理を用いた適応伝送の伝送容量 (ZF) も合わせて表示している。Static シナリオでは、伝搬路の時間相関が高いことから伝送容量の劣化はほとんどなく、ZF と比較して SVD-MIMO システムの性能が活かされることがわかる。一方で、Walking シナリオでは、特に SVD のみの場合にフィードバック遅延による影響が大きく、SNR が 30 dB の時は 8 ms で ZF の特性を下回る。また、フィードバック遅延が 20 ms 以上になると、伝送容量が 15 bps/Hz 付近で収束しており、SNR がそれ以上高くなっても伝送容量の向上は期待できない。この特性劣化は、ZF 干渉キャンセラを併用することによって改善されるが、SNR が 10 dB のところでは雑音強調の影響が逆に大きくなり、再び特性が逆転している。

5. まとめ

5 GHz 帯 MIMO-OFDM 無線 LAN システムの室内におけ

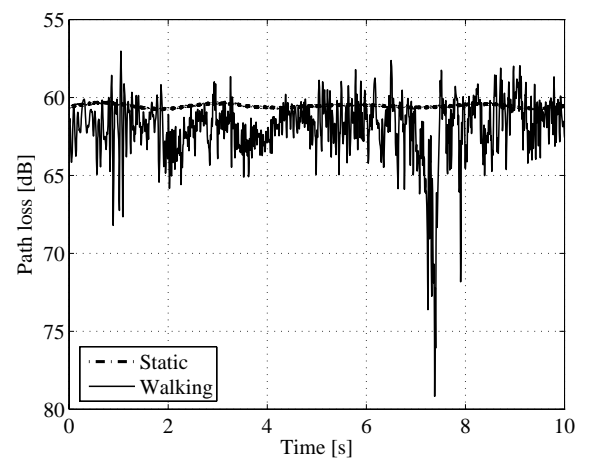


図 3 伝搬損失の時間変動特性 (1 サブキャリア)

る使用を想定して、静的な環境、人が歩くような動的環境の両シナリオで伝搬路の時間的な変動特性を測定した。本測定において取得した伝搬データを用いて、フィードバック遅延のある現実的な SVD-MIMO システムの伝送容量を求め、伝搬路の時間変動に起因する固有モード間干渉によって、大きく特性が劣化することがわかった。特に高 SNR の場合は、ZF のみで受信した時の特性をも下回るため、SVD-MIMO 単体での使用は得

文 献

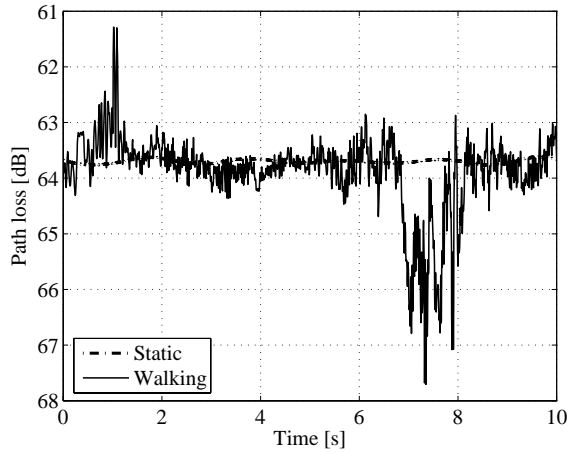


図 4 伝搬損失の時間変動特性 (平均値)

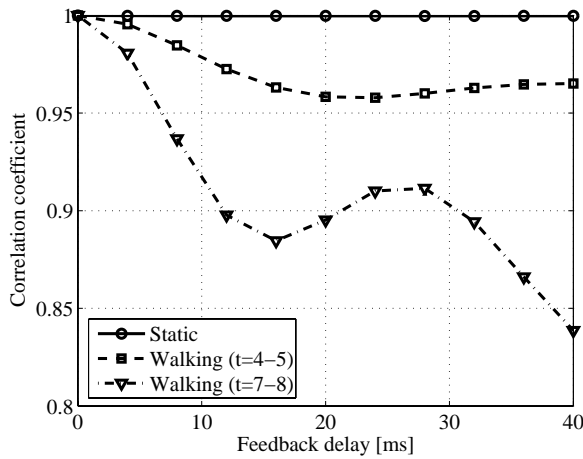


図 5 MIMO 応答行列の自己相関

策ではなく、ZF などの干渉キャンセラを併用することが必須である。

- [1] I.E. Telatar, "Capacity of multiantenna gaussian channels," Euro. Trans. Telecommun., vol.1, no.6, pp.585-595, Nov./Dec. 1999.
- [2] 阪口啓, ティンシーホー, 荒木純道, "MIMO 固有モード通信システムの構築と測定実験結果," 信学論 (B), vol.J87-B, no.9, pp.1454-1466, Sept. 2004.
- [3] 大鐘武雄, 西村寿彦, 小川恭孝, "MIMO チャ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, Sept. 2004.
- [4] G. Lebrun, J. Gao and M. Faulkner, "MIMO transmission over a time-varying channel using SVD," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol.4, no.2, pp.757-764, March 2005.
- [5] S. Ting, K. Sakaguchi and K. Araki, "Performance analysis of MIMO eigenmode transmission system under realistic channel and system conditions," IEICE Trans. Commun., vol.E87-B, no.8, pp.2222-2232, Aug. 2004.
- [6] 阪口啓, 水谷慶, 高田潤一, 荒木純道, "5 GHz 帯 MIMO ソフトウェア無線機の構築," 信学技報, SR2005-8, 2005 年 5 月.
- [7] 水谷慶, 阪口啓, 高田潤一, 荒木純道, "5 GHz 帯 4x4 MIMO-OFDM ハードウェアを用いたリアルタイム伝搬特性測定," 信学技報, WBS2004-117, AP2004-298, RCS2004-385, MoMuC2004-168, MW2004-295, March 2005.
- [8] IEEE, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band," IEEE Std 802.11a-1999, 1999.
- [9] 水谷慶, 阪口啓, 高田潤一, 荒木純道, "リアルタイム伝搬測定にもとづく MIMO 固有モード間相関解析," 2005 信学ソ大, B-1-247, Sept. 2005.
- [10] S.H. Ting, K. Sakaguchi and K. Araki, "A Robust Adaptive MIMO Eigenmode Transmission System with ZF BeamSpace Interference Canceller," Proc. VTC 2005-Spring, May 2005.
- [11] D.P. McNamara, M.A. Beach, P.N. Fletcher and P. Karlsson, "Temporal variation of multiple-input multiple-output (MIMO) channels in indoor environments," Proc. IEE Int. Conf. Antennas Propagat., vol.2, pp.578-582, April 2001.

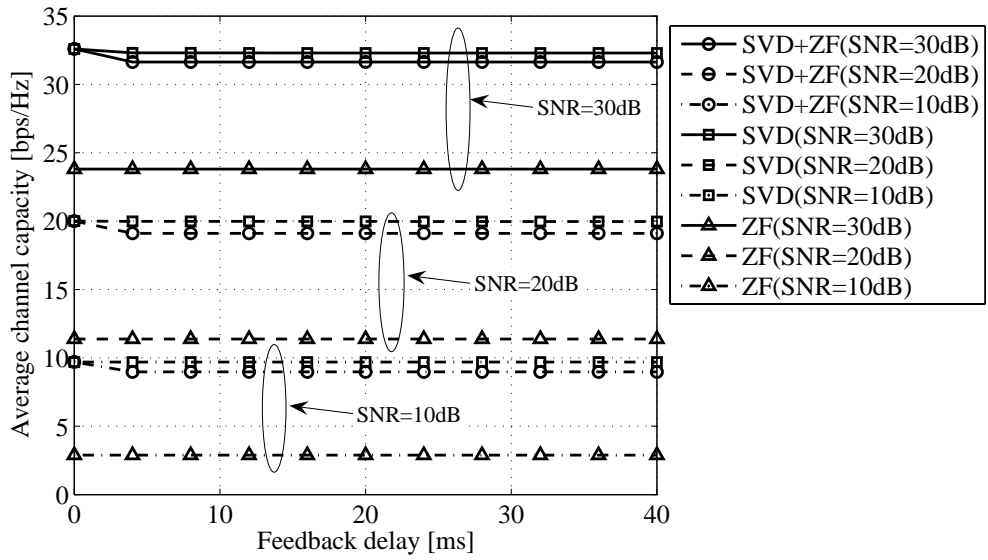


図 6 Static シナリオにおける伝送容量

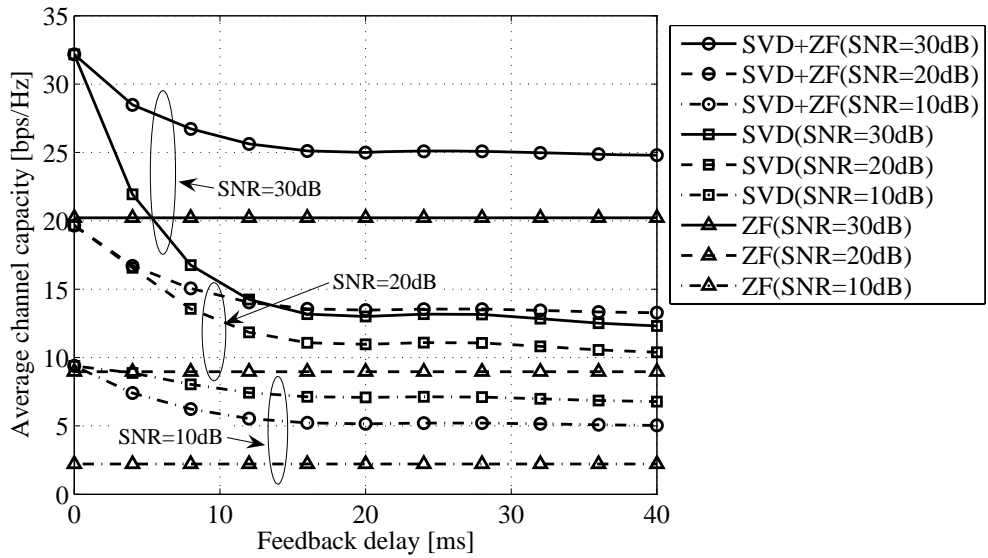


図 7 Walking シナリオにおける伝送容量