

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560475

研究課題名(和文)空間分割多重MIMO-OFDMシステムにおける送信ダイバーシチ構成法

研究課題名(英文)Transmit Diversity Schemes for Spatial Multiplexing MIMO-OFDM Systems

研究代表者

佐波 孝彦(Saba, Takahiko)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：60293742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、空間多重(SM)を用いる直交周波数分割多重(OFDM)システムにおいて、ダイバーシチ利得が得られる伝送手法を検討した。SM-OFDMシステムにおいて伝送速度を落とさずに信頼性の向上を実現するために、相互重畳伝送(MST)およびその計算量削減を目的とした修正MST(MMST)を提案した。提案手法では、異なる二つのサブキャリアのシンボルを重み付けした後、相互に重畳する。重畳されたシンボルは二つのシンボルを含み、二つのサブキャリアで伝送されるため、受信機でダイバーシチ利得が得られる。その結果、MSTやMMSTは伝送速度を落とさずに信頼性の高いSM通信を実現できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have studied a transmission scheme to obtain a diversity gain in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems using spatial multiplexing (SM) transmission. We have proposed mutual superposition transmission (MST) in order to realize reliable SM-OFDM systems without reducing the transmission speed. In addition, we have proposed modified MST (MMST) to reduce the computational complexity required for demodulation. In the proposed MST, two data symbols of two different subcarriers are mutually superposed on respective subcarriers after being weighted. Since each of superposed symbols contains two data symbols and is transmitted on each subcarrier, a diversity gain is obtained at a receiver. As a result, we have demonstrated that the proposed MST and MMST achieve reliable SM transmission without reducing the transmission speed.

研究分野：無線通信

キーワード：MIMO OFDM 空間多重 ダイバーシチ

1. 研究開始当初の背景

無線 LAN や WiMAX の普及に伴い、多入力多出力 (MIMO: multiple-input multiple-output) 伝送を用いる直交周波数分割多重 (OFDM: orthogonal frequency division multiplexing) に関する技術が盛んに研究されている [1][2]. MIMO-OFDM は、複数のアンテナから異なる情報信号を送信する空間多重 (SM: spatial multiplexing) 方式と、複数のアンテナから同一の情報信号を送信する送信ダイバーシチ方式の二つに大別できる.

SM は、信号対雑音電力比 (SNR: signal-to-noise power ratio) の大きい良好なチャネル環境において、伝送速度の向上のために用いられる. 一方、送信ダイバーシチは通信の信頼性向上を図るために用いられる. SM による高速通信が期待できないような劣悪なチャネル環境下では、送信ダイバーシチを用いるほうがシステムのスループットを向上できる場合も多く、SM による伝送速度向上と送信ダイバーシチによる信頼性向上の間にはトレードオフがある [2].

2. 研究の目的

MIMO 伝送において、最大の通信容量を達成するためには SM の使用が望まれる. しかし、実際の通信システムはフェージングや有相関チャネル等、しばしば劣悪なチャネル環境での通信を余儀なくされるため、SM と送信ダイバーシチの両方の利点が重要となる. そこで本研究では、SM-OFDM システムにおいてダイバーシチを実現し、速度向上と信頼性向上を同時に実現すべく、周波数領域のシンボル二つを相互に重畳させる伝送方式を提案する.

従来、複数の信号を重畳させて信号を送信する手法に重畳変調がある [3]. 通常の重畳変調では、複数のシンボルを重畳させた信号を単一チャネルで送信し、受信機で繰り返し処理により復調する. これに対し提案手法では、送信機で選択した二つのシンボルを相互に重畳させた信号を、二つ以上のチャネルで送信する. これにより、1 シンボルが複数のチャネルで伝送されることになり、送信ダイバーシチが得られる. 受信機では、シンボルの復調と SM の信号分離を最尤検波 (MLD: maximum likelihood detection) により一度に処理する. 本手法を用いることで、高速かつ信頼性の高い通信システムの実現を目指す.

3. 研究の方法

(1) SM-OFDM システム

本研究では、送受信機に複数のアンテナをもつ SM-OFDM システムを想定する. 送信機では、各アンテナで N_c サブキャリア分の情報シンボルが生成される. その後、アンテナごとに OFDM 変調されて送信される. 受信機では、OFDM 復調の後、空間的に多重化されたシンボ

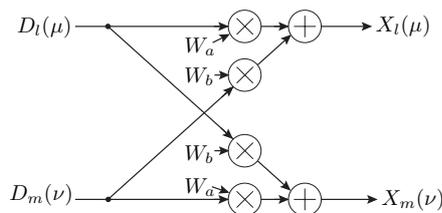


図1 相互重畳伝送 (MST)

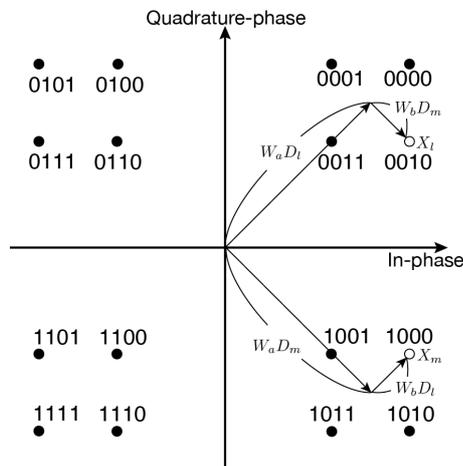


図2 重畳シンボルの信号点配置

ルに対しサブキャリアごとに信号分離および復調を行う. したがって、送受信アンテナ数が 2 の場合であれば、サブキャリアごとに二つの情報シンボルが同時に推定される.

(2) 相互重畳伝送

本研究では、送信機で周波数領域のシンボル二つを相互に重畳させて伝送する手法を提案する. この手法を相互重畳伝送 (MST: mutual superposition transmission) と呼ぶ. このとき、重畳するシンボルペアは、同一アンテナの異なるサブキャリアから選択する場合 (Type 1)、異なるアンテナの同一サブキャリアから選択する場合 (Type 2)、異なるアンテナの異なるサブキャリアから選択する場合 (Type 3) の 3 種類が存在する. 図 1 に提案する MST の処理を示す. 図中の l, m はアンテナ番号、 μ, ν はサブキャリア番号を表す. $D_l(\mu)$ は、 l 番目のアンテナの μ 番目のサブキャリアの情報シンボル、 $X_l(\mu)$ は重畳後の送信シンボルである. 今、 l, m 番目のアンテナ、 μ, ν 番目のサブキャリアをペア (Type 3) とすると、二つの情報シンボル $D_l(\mu)$ と $D_m(\nu)$ はそれぞれ異なる重み W_a, W_b を乗算されて重畳される. また、図 1 では $l = m$ のとき Type 1 のペア、 $\mu = \nu$ のとき Type 2 のペアを表せる. W_a, W_b は以下の式によって決定される. また、図 2 に MST による重畳後のシンボルの信号点配置の例を示す.

$$W_a(\theta) = \cos \theta, \quad W_b(\theta) = \sin \theta$$

図 3 に、MST を適用した SM-OFDM の送受信

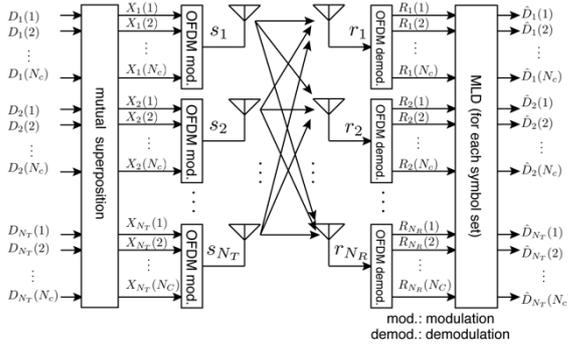


図3 MSTを用いたSM-OFDMの送受信機構成

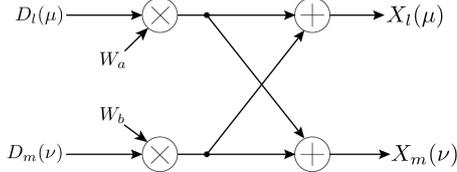


図4 修正相互重畳伝送 (MMST)

機構成を示す。ここでは、例として送受信アンテナ数が2の場合を説明する。提案手法ではOFDM変調の前に選択された2シンボルをペアとして相互に重畳を行い、受信機ではOFDM復調の後に、重畳されたシンボルの復調とSMの信号分離を行うためにMLDを施す。したがって、二つのサブキャリアから合計四つのシンボルが同時に推定されることになり、SMによる通信速度の向上とダイバーシチによる信頼性向上の両方が期待できる。

(3) 計算量に対する考察

本研究で提案するMSTの問題点は、受信機の復調時にダイバーシチ利得を得るために、MLDが必要となるため、計算量負荷が増大することである。これは本方式が、シンボルを相互に重畳して伝送することに起因する。本研究では、計算量を複素乗算回数で評価することにする。送信アンテナ数 N_t 、受信アンテナ数 N_r 、OFDMのサブキャリア数 N_c 、変調多値数が M である通常のSM-OFDMシステムにおけるMLDの複素乗算回数は、

$$C_{SM} = M^{N_t} (N_r + 1) N_r N_c$$

となる。一方、MSTを用いたSM-OFDMでは、

$$C_{MST} = M^{2N_t} (2N_r + 1) N_r N_c + 2N_r N_r N_c$$

となる。変調方式にQPSKを用いた送受信アンテナ数2のシステムでは、複素乗算回数はそれぞれ $C_{SM} = 96N_c$ 、 $C_{MST} = 2568N_c$ となる。したがって、計算量はアンテナ数や変調多値数に応じて指数的に増加する。

(4) 計算量削減のための改良型MST

MLDにおける計算量の削減には、探索する候補シンボルの数を減らす手法が一般的である。そこで、本研究では、MSTに修正を加

表1 シミュレーション諸元

変調方式	QPSK or 16QAM
サブキャリア数	128
IFFTポイント数	128
標準化レート	40 [M sample/sec]
ガードインターバル長	32 [sample]
パッケージサイズ	2パイロット + 30 [OFDM symbol]
チャンネルモデル	指数減衰型4波レイリーフェージング
正規化ドップラー周波数	10^{-4}
チャンネル推定	最小二乗法
誤り訂正	たたみ込み符号
符号化率	1/2
拘束長	9
インタリーバ	ブロックインタリーバ

えることで、計算量の削減を目指す。

図2の第1象限では、 W_b を乗算された D_m (下位2ビット)が、 W_a を乗算された D_l (上位2ビット)の周りに位置している。逆に第4象限では、 W_b を乗算された D_l (下位2ビット)が、 W_a を乗算された D_m (上位2ビット)の周りに位置している。本研究では、上位2ビットに相当するシンボルをベースレイヤシンボル、下位2ビットに相当するシンボルを拡張レイヤシンボルと呼ぶことにする。

ここでシンボルを相互に重畳する際、図4のようにベースレイヤと拡張レイヤのシンボルがそれぞれ同一となるように、修正を加える。本研究では、これを修正MST (MMST: Modified MST) と呼ぶ。このように重畳することで受信機でのMLDではベースレイヤと拡張レイヤのシンボルを分けて推定することができ、MLDにおける探索数を制限することが可能になる。すなわち、まずベースレイヤシンボルの推定を行い、ベースレイヤシンボルの候補を P 個に絞り込んだ後、 P 個のベースレイヤシンボルの周りのみで、拡張レイヤシンボルを探索するのである。このような修正をすることにより、計算量の削減が可能になる。MMSTを用いることにより複素乗算回数は、

$$C_{MMST} = (1 + 2P) M^{N_t} N_r N_c + (1 + P) M^{N_t} N_r N_c + 2N_r N_r N_c$$

となり、QPSKを用いた送受信アンテナ数2のシステムでは $C_{MMST} = 1384N_c$ ($P = 8$) まで削減することが可能になる。

4. 研究成果

(1) 変数 θ の決定

提案手法の有効性を評価するために、計算機シミュレーションを行った。シミュレーション諸元を表1に示す。提案手法では、二つのシンボルを重畳する際の二つの重みの比によってシステムの誤り率特性が変化する。そのためまず、重み W_a 、 W_b を決定するため

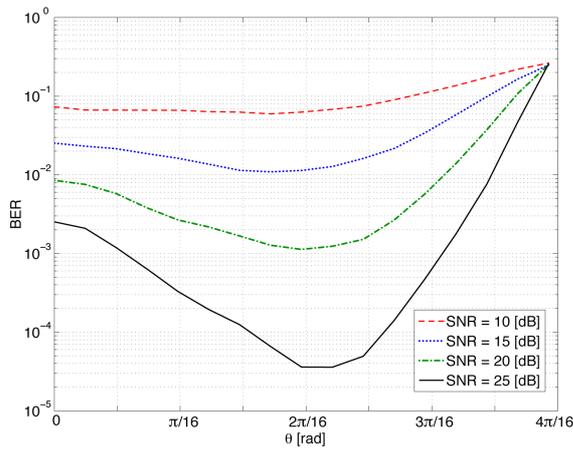


図5 変数 θ に対する BER 特性

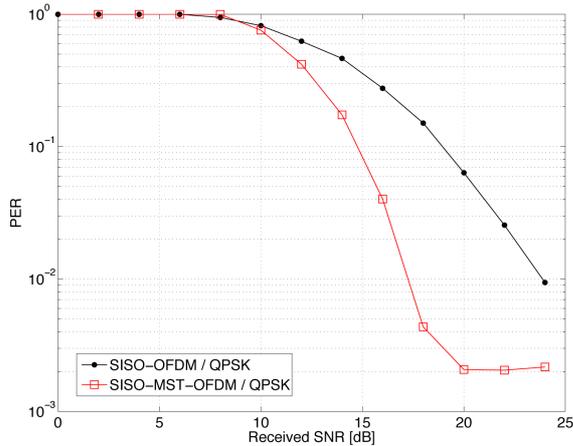


図6 SISO-OFDMシステムにおける PER 特性

の変数 θ に対するビット誤り率 (BER: bit error rate) 特性を求めた。図5は、いくつかの SNR における変数 θ 対 BER 特性を示している。提案する MST は、MIMO システムのみならず単入力単出力 (SISO: single-input single-output) システムにも適用できる。ここでは、提案手法の基本的な誤り率性能を調査するため、誤り訂正符号を用いない SISO-OFDM システムにおける BER 特性を求めた。変調方式は QPSK、サブキャリア数 $N_c = 128$ 、チャンネルモデルは 4 波指数減衰レイリーフェージング、正規化ドップラー周波数は 0.0001 とした。ただし、SISO-OFDM システムでは Type 1 の MST のみが適用可能であり、 μ と ν の関係は、 $\nu = \mu + N_c/2$ ($1 \leq \mu \leq N_c/2$) とした。図5より、SNR が大きくなると $\theta = 0.46$ 付近で BER が最小となることがわかる。これは、重畳したシンボルの信号点配置 (図2) において、シンボル間のユークリッド距離が $\theta = 0.46$ 付近で最大となるためである。そのため、以降のシミュレーションでは変数 θ の値として $\theta = 0.46$ を用いる。

(2) SISO-OFDM システムにおける性能

次に、SISO-OFDM システムにおけるパケット誤り率 (PER: packet error rate) 特性を明らかにする。図6は、MST を適用した場合としなかった場合の SISO-OFDM システムにお

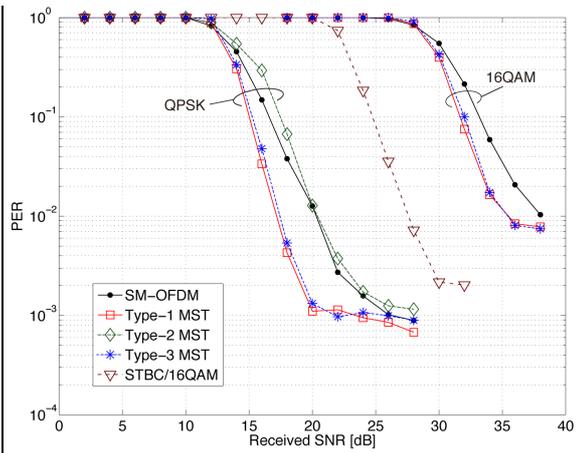


図7 MIMO-OFDMシステムにおける PER 特性

ける PER 特性である。変調方式は QPSK とした。□のプロットは、Type 1 MST を適用した SISO-OFDM システム、●は MST を適用していない通常の SISO-OFDM の PER である。図6より、システムの伝送速度はどちらも同じであるにもかかわらず、MST を適用したシステムの PER 特性は大幅に改善されていることがわかる。MST を適用することにより、 $PER = 10^{-2}$ 付近において、約 7 [dB] のダイバーシチ利得が得られていることがわかる。

(3) MIMO システムにおける性能

次に MIMO-OFDM システムにおける特性を明らかにする。図7は、SM-OFDM システムに MST を適用した場合の PER 特性を示す。変調方式は、QPSK または 16QAM とした。□のプロットは、重畳するシンボルペアを同一アンテナの異なるサブキャリアから選択した場合 (Type 1)、◇のプロットは、異なるアンテナの同一サブキャリアから選択した場合 (Type 2)、*のプロットは、異なるアンテナの異なるサブキャリアから選択した場合 (Type 3)、●のプロットは MST を用いない通常の SM-OFDM の PER 特性を示している。さらに比較として、MIMO において送信ダイバーシチを得る手法の一つである時空間ブロック符号 (STBC: space-time block coding) 伝送を用いた場合の特性を▽のプロットで示す。

図7より、提案手法はいずれの場合も、通常の SM-OFDM より PER 特性を改善できており、特に Type 3 の MST を用いた場合の PER 特性が最も優れている。Type 3 の MST を適用することにより、 $PER = 10^{-2}$ 付近において、どちらの変調方式を用いた場合でも、2.5 [dB] 以上のダイバーシチ利得が得られていることがわかる。これは、シンボルペアを伝送するチャンネルの独立性が高まり、より大きなダイバーシチ効果を得られることが理由であると考えられる。一方、Type 2 の MST は通常の SM-OFDM とほぼ同等の特性を示す。これは、複数のアンテナからの送信信号が足し合わさって受信される SM システムにおいて、異なるアンテナの同一サブキャリア間でのシンボルの重畳は、効果が小さいことを示して

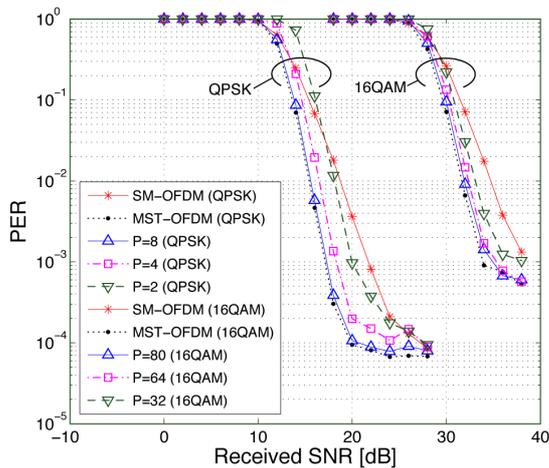


図8 SM-OFDMシステムのPER特性比較

いる。

一方、MSTを用いるシステムは、STBCシステムとの比較においても優れていることがわかる。STBCシステムは、伝送速度を上げずにダイバーシチ利得のみを得る手法のため、変調方式に16QAMを用いたSTBCシステムが、QPSKを用いた提案システムと同じ伝送速度になることに注意する。Type 3のMSTを用いたシステムは、 $PER = 10^{-2}$ 付近において、STBCシステムに比べて、10 [dB]近いダイバーシチ利得が得られていることがわかる。

(4) 最後に、MMSTの特性を明らかにする。図8は、SM、MSTおよびMMSTを用いたOFDMシステムのPER特性の比較である。パケットサイズは2パイロット+10 OFDMシンボルとし、MSTはType 3を用いている。MMSTにおけるベースレイヤの候補数は、QPSKを用いた場合 $P=2, 4, 8$ とし、16QAMを用いた場合 $P=32, 64, 80$ とした。原理的にMMSTでは、QPSKで $P=16$ 、16QAMで $P=256$ のとき全シンボル候補を探索することになり、MSTと計算量が同一になり、特性も同一になる。

図8よりMSTはSMに対して、 $PER = 10^{-2}$ 付近において、どちらの変調方式を用いた場合でも、2.5 [dB]以上のダイバーシチ利得が得られていることがわかる。一方、MMSTでは、QPSKを用いた場合 $P=8$ 、16QAMを用いた場合 $P=80$ でMSTと同等のPER特性が得られることがわかる。このときの受信機におけるMLDの複素乗算回数は、QPSKを用いた場合 $C_{SM} = 12,288$ 、 $C_{MST} = 328,704$ 、 $C_{MMST} = 177,152$ ($P=8$) となり、MSTはSMに対して26.75倍の乗算回数となるのに対し、MMSTは14.4倍に抑えることが可能になる。一方、16QAMを用いた場合MSTの複素乗算回数は、SMの427倍となるのに対し、MMST ($P=80$) は134倍に抑えることが可能になる。したがって、MMSTは、MSTの複素乗算回数をQPSKでは約1/2、16QAMでは約1/3に減らすことが可能になる。

(5) 以上、本研究では、SM-OFDMシステムにおいて伝送速度を維持しつつダイバーシチ

利得を得て信頼性の向上が可能となる相互重畳伝送 (MST) 法およびその計算量削減を目的とした修正相互重畳伝送 (MMST) を提案した。MSTでは、周波数領域のシンボル二つを相互に重畳させ送信することで、一つの情報シンボルが二つ以上のチャンネルで伝送される。その結果、受信機においてMLDを用いることにより送信ダイバーシチ利得が得られ、PER特性を大幅に改善できる。特にType 3のMSTを用いたMIMO-OFDMシステムは、伝送速度向上と信頼性向上の両立が可能になることを明らかにした。更に、MSTの計算量削減を目的としたMMSTは、MLDを2階層で行えるため、計算量を減らすことが可能になる。MMSTは、計算量を削減しつつもMSTと同等なPER特性を達成することが可能となるため、今後、様々な高速無線通信に応用が可能と考えられる。

<引用文献>

- [1] H. Bolcskei, "MIMO-OFDM wireless systems: basics, perspective, and challenges," IEEE Wireless Commun., vol. 13, no. 4, pp. 31-37, Aug. 2006.
- [2] L. Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 49, no. 5, pp. 1073-1096, May 2003.
- [3] P. A. Hoeher and T. Wo, "Superposition modulation: myths and facts," IEEE Communication Magazine, vol. 49, no. 12, pp. 110-116, Dec. 2011.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

- (1) Kei Kaiho and Takahiko Saba, "Modified mutual superposition transmission with complexity-reduced detection for spatial multiplexing OFDM systems," IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC2014 Fall), Vancouver (Canada), 2014年9月14~17日.
- (2) Takahiko Saba, "Mutual superposition transmission for spatial multiplexing OFDM systems," IEEE Vehicular Technology Conference Spring (VTC2014 Spring), Seoul (Korea), 2014年5月18~21日.
- (3) 安川正浩, 佐波孝彦, "SDM-OFDMにおける送信ダイバーシチを得るための相互重畳伝送法," 電子情報通信学会総合大会 (B-5-85), 岐阜大学 (岐阜県岐阜市), 2013年3月19~22日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐波 孝彦 (SABA, Takahiko)

千葉工業大学・情報科学部・教授

研究者番号: 60293742