

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：12605
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760353
 研究課題名（和文） 時空間偏移変調に基づくマルチアンテナ伝送方式に関する研究
 研究課題名（英文） Space-Time Shift Keying Transmission in Multiple-Antenna Systems

研究代表者
 杉浦 慎哉（SUGIURA SHINYA）
 東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
 研究者番号：30394927

研究成果の概要（和文）：送受信端末で複数のアンテナ素子を用いる Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) システムを対象として、受信機にて低演算量復号を実現しながら、高信頼と高速レートのトレードオフを柔軟にとることができる方式を提案した。また、チャンネル容量に近い性能を得るための効率的なシステムパラメータ設計手法を示した。さらに、提案方式に適した接続型誤り訂正符号の設計方法を考案した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a novel Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) technique, called Space-Time Shift Keying (STSK), which is capable of striking a flexible tradeoff between the diversity gain and the transmission rate. We also presented an efficient optimization algorithm of the system's design parameters. Furthermore, the serially-concatenated STSK architecture was proposed, which allows us to attain a near-capacity performance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：無線通信、信号処理、符号理論、MIMO、空間変調

1. 研究開始当初の背景

無線通信の分野では、スマートフォン等の普及により急増する通信量需要を満たすために、高レート通信を実現することが急務の課題となっている。また、多重伝播路によって生じるフェージングの影響を克服し、高信頼通信を同時に実現することが不可欠である。これらの課題を解決するためのアプローチとして、情報ビットを時間と空間の次元に渡って符号化し、複数のアンテナを用いて時空間符号を送信する MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 方式が精力的に検討されてきた。これまでに様々な方式が考案されてきたが、例えば代表的な MIMO 方式である空間多重は送信アンテナ数に比例して通信容

量を増大することができる。一方、STBC (Space-Time Block Coding) はダイバーシティ利得を増大し、フェージングの影響を克服することが可能である。しかしながら、これら従来の MIMO 方式において、実用上の観点から下記の問題点を克服すべきであると考える。

- (1) 空間多重では、送信レートを増大と引き換えに受信機での演算負荷が大きくなるため、簡易な受信機を構成することが困難である。また、一般に送受信機で同程度のアンテナ数が必要となり、また、ダイバーシティ利得も犠牲となるため、信頼性が低下する。

- (2) STBC ではダイバーシティ利得を向上させることができる一方、送信レートが犠牲となる。実用上、エネルギー効率性のよくない変調方式を採用しなければならず、エネルギー利用効率の低下が避けられない。
- (3) 空間多重の多重化利得と STBC のダイバーシティ利得の両方を同時に実現しながら、低い受信演算量を達成することが困難である。また、符号の次数 (= アンテナ数) によっては、時空間符号の生成が制限される。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では無線通信システムにおいて複数のアンテナ素子を送受信端末で用いる MIMO 方式を対象に、任意の送受信アンテナ数に対して高速と高信頼のバランスを柔軟にとることができる時空間符号コンセプトである時空間偏移変調方式 (STSK: Space-Time Shift Keying) を実現し、将来の無線通信システムに必要な高速高信頼の伝送方式開発を目的とする。

3. 研究の方法

研究代表者は、本研究の先行研究として上記課題を解決するポテンシャルを持つ新しい MIMO 用変調コンセプトである時空間偏移変調を開発してきた。本方式は、分散行列アクティベーションという新しい符号コンセプトを導入することにより、従来の変調方式 (PSK, QAM 等) に加えてさらなる情報を送信信号に載せることができる。

本研究では、上記時空間偏移変調方式において未解決であった分散行列の効率的設計手法の提案に取り組んだ。また、STSK 独自の数式モデルに着目することにより、検出性能を劣化することなしに演算量を大幅低減するための復号アルゴリズム開発を進めた。さらに、チャンネル容量に近い性能を実現するため、接続符号に対応した軟判定型復号法を検討した。それらの具体的な研究方法を以下に示す：

- (1) 分散マトリックスの効率的設計手法の開発：変調信号点の影響を考慮した理論的チャンネル容量に焦点を当てることで、計算負荷の高いランダムサーチを用いることなく、チャンネル容量を最大化する分散マトリックスの効率的な設計方法を開発する。これにより STSK システムの性能限界の大幅な向上を達成する。このとき、これまでは困難であった探索領

域が大きい場合でも現実的な計算時間での収束を必要条件とする。

- (2) STSK 符号の復号の低演算化：STSK では信号を多重化しないため、簡易な相関検出器を用いた復号が原理的に可能となる。このとき STSK 独自の数式モデルに着目することで、従来では難しかった、検出性能を劣化することなしに演算量を大幅低減するためのアルゴリズムを開発し、その原理を明確にする。MIMO システムを対象とした相関検出器では、干渉の影響により性能の劣化が大きいことが知られているが、STSK では空間多重方式と異なり多重化による干渉の影響がない。そのため、相関検出直後の判定アルゴリズムを工夫することにより、性能劣化の抑制を試みる。
- (3) 接続符号の復号に対応した低演算復号機の設計：提案の STSK 方式を、チャンネル容量に近い性能を達成可能な接続符号に適用するため、軟値出力が可能な STSK 検出機を開発する。このとき、複雑な接続符号構造においても実現可能な演算量の範囲で復号処理が行えるように、低演算量化も同時に検討する。具体的には、相関検出後の信号列に対して、分散マトリックスの効果を考慮した数式モデル化を行い、その信号列の一部に対して軟判定検出を適用する。

4. 研究成果

2011 年度の主な成果は以下の通りである。

- (1) 分散行列の効率的設計手法：STSK 方式では、あらかじめ送信機に割り当てられた分散行列のセットを用いて符号化を行うが、それら分散行列の効率的設計手法についてはこれまでに明らかにされていなかった。ここでは、最適化問題の目的関数として符号化利得を考え、STSK 信号の性質を考慮した適切な数式変形を行うことにより、探索空間を大幅に削減することに成功した。これにより、従来の最適化手法に比べて、実現性能を劣化することなく、約 1/40 の演算時間で分散行列の設計を完了することが可能となった。この結果は、送受信アンテナ数の大きい大規模 MIMO に対応した STSK システムを構成する場合に特に有効である。
- (2) 復号の低演算化：従来の STSK 検出器では最尤復号法を利用することが一般的であり、復号演算量の削減が課題となっ

ていた。本項目では、STSK 符号特有の信号構成に着目し、相関検出器と最尤検出器を併用して用いることにより、復号演算量を大幅に低減した硬判定検出器を開発した。本検出器では、最尤復号法とほぼ同程度の誤り率特性を維持しながら、検出演算量を 1/10~1/100 に抑えることに成功した。本技術は、受信演算量が問題となる高レート STSK システムに対して特に有効である。

さらに、2012 年度の主な成果は以下の通りである。

- (3) 接続符号に対応した軟判定型復号器の低演算化：接続符号構成を持つ STSK システムを対象として、受信機にて利用可能な軟判定型の低演算量信号検出器を提案した。ここでは特に、前年度開発の硬判定検出器を軟判定型に一般化した。また、演算量をさらに削減するため、Markov chain Monte Carlo (MCMC) 法を適用し、大幅な性能向上を実現した。数値シミュレーションにより、高レートの場合に特に演算量削減幅が大きいことを確認した。提案手法により、ターボ符号や low-density parity-check (LDPC) 符号などの強力な誤り訂正符号を用いる際の繰り返し復号に対応可能となるため、より実用的な符号化 STSK の構成が可能となった。
- (4) チャネル容量に近い性能を得るシステムの設計手法：複数の STSK 符号ブロックを用意し、それらを線型的に組み合わせることにより、幅広い信号対雑音比の領域においてチャネル容量に近い性能を実現可能なシステムの設計手法を提案した。特に、チャネル容量をコスト関数として、設計パラメータである分散マトリックスによる偏微分値を理論的に導き出すことに成功した。これにより、信号ポイントを考慮した制約付きチャネル容量を直接最大化するようにシステム設計を行うことができるようになった。結果として、従来方式と比べて大

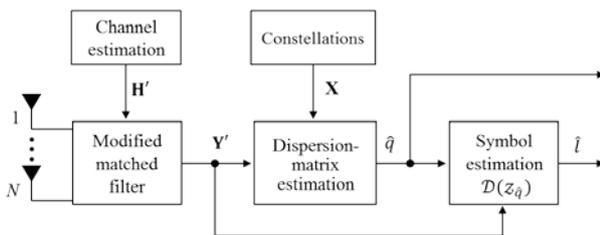


図 1. 受信機構成

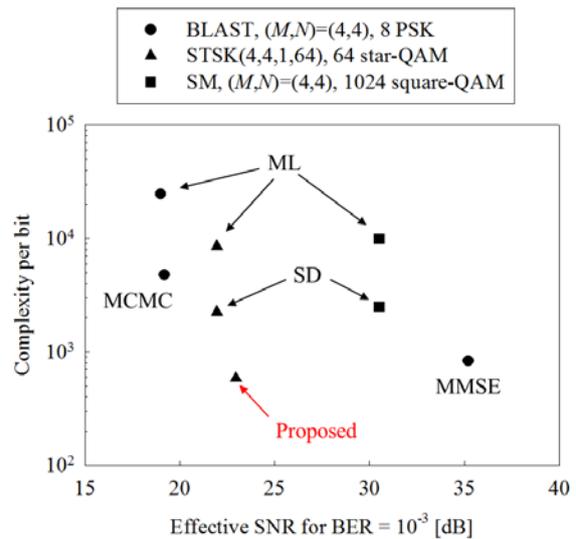


図 2. 受信機の性能比較

幅に低い探索コストで確実に準最適なシステムパラメータの設計が可能となった。

以下では特に、項目(2)の内容に焦点を当て、そこで得られた結果を示す。詳しくは成果リストに挙げた雑誌論文(3)および学会発表①を参照されたい。従来の空間多重型 MIMO システムにおいて、受信機で単純な Matched filter に基づいた簡易検出器を用いた場合、各送信アンテナからの干渉の影響で性能が大きく劣化することが知られている。一方で、本研究の対象とする STSK-MIMO 方式では、空間多重によるパラレルストリーム構成を利用していないため、原理的に Matched filter ベースの検出器の利用が可能である。ここでは特に、STSK 受信機にて Matched filter 操作を実施した後、複素シンボルと分散行列のインデックスを独立して検出することにより、復号性能を劣化することなく、受信機演算量の大幅な削減が可能となる方式を提案した。(図 1)

図 2 に、送受信アンテナがそれぞれ 4 本であるようなシステムを考え、MIMO 方式として空間多重 (BLAST)、空間変調 (SM)、および時空間偏移変調 (STSK) の 3 方式を比較した。いずれも 12 ビット/シンボルのレートとし、横軸に 10^{-3} の誤り率を達成する SNR 値を、縦軸に復号演算量をとった。図より、STSK を対象とした提案復号方式は、最尤推定方式 (ML) および、Sphere decoding (SD) アルゴリズムと比べて受信品質を損なうことなく、一桁以上の演算量低減を実現できていることがわかった。また、BLAST や SM など他の MIMO 方式と比べた場合も同様のメリットが確認できた。

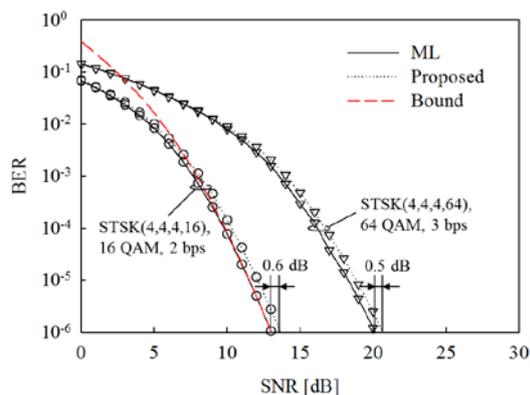


図3. 提案受信機のビット誤り率
(4x4 STSK-MIMO 方式)

次に、図3に提案復号方式と最適な Maximum Likelihood (ML) 復号方式との性能比較結果を示す。図2の場合と同様に、送受信アンテナ数がそれぞれ4本の MIMO システムを考え、2ビット/シンボル、および、3ビット/シンボルの二つの STSK システムのビット誤り率を計算した。また、図の“Bound”は ML 復号の理論上界を示している。結果より、いずれの送信レートの場合も、提案受信方式は最適受信機から 1dB の範囲内の性能を達成できていることが確認でき、Matched filter 操作による性能ロスがほとんどないことが確認できた。

以上、STSK-MIMO 構成の無線通信送受信機に有用である要素技術について検討を行い、それぞれ重要な知見が得られた。今後の展望として、STSK 方式を近年注目を集めている大規模 MIMO (Massive MIMO) 方式へ適用することが挙げられる。Massive MIMO は数 100 ~ 数 1000 のアンテナ素子を用いて高速通信を実現することを目指しているが、空間多重を利用した場合には受信機での復号演算量が極めて高くなることが予想される。また、増大したリンク数に応じてチャネル推定にかかる負担も増える。これに対し、本研究で考案した STSK-MIMO 方式は低演算量検出が可能であり、また、チャネル推定を必要としない非同期検出 MIMO システムの構成が容易であることがわかっている (下記の雑誌論文(3)を参照)。詳細な検討は今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- (1) S. Sugiura and L. Hanzo, “On the joint optimization of dispersion matrices and constellations for near-capacity irregular precoded space-time shift keying,” IEEE Transactions on

Wireless Communications, vol. 12, no. 1, pp. 380–387, 2013. (査読有)
DOI: 10.1109/TWC.2012.120412.120718

- (2) S. Sugiura, C. Xu, S. X. Ng, and L. Hanzo, “Reduced-complexity iterative-detection aided generalized space-time shift keying,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 61, no. 8, pp. 3656–3664, 2012. (査読有)
DOI: 10.1109/TVT.2012.2206065

- (3) S. Sugiura, C. Xu, S. X. Ng, and L. Hanzo, “Reduced-complexity coherent versus non-coherent QAM-aided space-time shift keying,” IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 11, pp. 3090–3101, 2011. (査読有)
DOI: 10.1109/TCOMM.2011.100411.110154

- (4) S. Sugiura, “Dispersion matrix optimization for space-time shift keying,” IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 11, pp. 1152–1155, 2011. (査読有)
DOI: 10.1109/LCOMM.2011.100611.111770

[学会発表] (計2件)

- ① 杉浦慎哉, Lajos Hanzo, “時空間偏移変調に基づくユニバーサル時空間符号,” 電子情報通信学会総合大会, 岡山大学, 2012年3月20–23日, B-1-224. (2012.3.23)
- ② S. Sugiura, C. Xu, and L. Hanzo, “Reduced-complexity QAM-aided space-time shift keying,” in IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2011), Houston, Texas, USA, 5–9 Dec. 2011. (2011.12.7)

[その他]

ホームページ等

http://www.tenure-track-tuat.org/scholar/technology/post_20.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉浦 慎哉 (SUGIURA SHINYA)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 30394927

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし