

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26709029

研究課題名（和文）シャノン限界に迫る低計算量な空間結合符号化変調方式の創出

研究課題名（英文）Low-Complexity Spatially Coupled Coded Modulation Approaching the Shannon Limit

研究代表者

竹内 啓悟 (Takeuchi, Keigo)

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：30549697

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,300,000円

研究成果の概要（和文）：誤りなしの情報伝送を達成可能な伝送レートの上限であるシャノン限界に迫るレートを実現する方式として、空間結合に基づく符号化変調方式の提案を行った。主たる成果として、反復復調法において、信号ブロックにおける一部の復調誤りが他の信号の復調結果に悪影響を与える誤り伝播が決して発生せず、全信号の復調に成功するという「空間結合効果」がなぜ働くのかを直観的かつ厳密に証明した。また、空間結合の応用先として、通信路推定やFaster-than-Nyquist信号伝送等の理論解析を行った。

研究成果の概要（英文）：As a scheme realizing a transmission rate that approaches the Shannon limit supremum of rates such that error-free transmission is achievable, spatially coupled coded modulation has been proposed. The main result is to provide an intuitive and rigorous proof of spatial coupling effect in iterative demodulation all signals can be successfully demodulated, with no occurrence of error propagation, meaning that demodulation errors in part of signals affect demodulation performance for the other signals. Also, as applications of spatial coupling, channel estimation and faster-than-Nyquist signaling were theoretically analyzed.

研究分野：情報通信工学

キーワード：情報通信工学 情報理論 符号理論 符号化変調 空間結合

1. 研究開始当初の背景

スマートフォンやタブレット等の無線通信機器の普及に伴い、低受信電力で高い情報伝送効率を達成する通信方式の構築が求められている。伝送効率の改善手段として、帯域幅の拡大と複数の送受信アンテナを使用する multiple-input multiple-output (MIMO) 空間多重化とが主に用いられてきた。しかし、これらの方法による効率改善だけでなく、近年は1送信シンボルで複数の情報ビットを送信する高次変調による伝送効率の改善も重要な課題となっている。

通信方式の学術的立場では、この問題は誤り訂正符号化と高次変調とを組み合わせた符号化変調の問題に帰着される。実用的な符号化変調方式として、符号器と変調器との間にインターリーバを挟んだビットインターリーブ符号化変調 (BICM) 方式が知られている。BICM の利点として、次の2点がある。

- (i) インターリーバで符号器の出力ビット系列をランダムに並び替えることで、符号器と変調器との設計を分離できる。
- (ii) 確率伝播法 (BP) に基づく低計算量な反復復調・復号 (IDD) アルゴリズムで効率的に復号できる。

以後、IDD を行わない場合の符号化変調を単に BICM と呼び、IDD を行う場合を BICM-IDD と明記することにする。

しかしながら、実用的な誤り訂正符号を使った BICM-IDD では、シャノンの情報理論に基づく符号化変調の伝送効率の理論限界であるシャノン限界を達成できない。そのため、受信電力を増加させることなく伝送効率を改善する余地があった。

本研究では、(1)シャノン限界に迫る低計算量な通信方式を構築する手段である空間結合の理解を深めること、(2)BICM-IDD の二つの利点を維持しつつ、シャノン限界に迫る低計算量な通信方式である空間結合 BICM-IDD を構築すること、(3)実用的な通信システムへの応用を検討することで、空間結合に基づく手法の有効性を確かめることを目指した。

2. 研究の目的

(1) 空間結合

符号理論の分野で提案された空間結合とは、準最適な BP 復号アルゴリズムの性能をベイズ最適な最大事後確率 (MAP) 復号の性能まで改善するための、システムの結合方法を表す固有名詞である。空間結合の提案により、計算量の面で一般に実行困難な MAP 復号の性能が、単なる机上の空論ではなく、低計算量な反復アルゴリズムで達成可能という現実味を帯びた性能限界となった。

本研究の第一目的は、空間結合系における各セクションでの符号長が十分に長いとき、セクション数に関わらず、正しいメッセージは誤りなくどこまでも伝

播するという非自明な主張を直観的かつ数学的に厳密に証明することである。

(2) 空間結合 BICM-IDD

本研究の第二目的は、空間結合の理論解析の詳細を知らなくても設計できるような符号器と変調器との図式設計手法を確立することによって、シャノン限界に迫る伝送効率を達成する空間結合 BICM-IDD を構築することである。

(3) 空間結合の応用

本研究の第三目的は、いくつかの先端無線通信システムに対して従来の手法と空間結合を適用した場合との間で性能比較を行い、空間結合の有効性を確かめることである。

具体的なシステムとして、研究開始当初は複数の送受信アンテナを使用する MIMO 空間多重システムと周波数領域等化器を使った広帯域シングルキャリア伝送システムとを検討していた。受信方式として、通信路推定、周波数領域等化、マルチユーザ検出、反復復調・復号、の4つの操作をまとめて行う当時も現時点でも最先端の受信方式を仮定して、従来法と提案手法との性能比較を行うことを目指していた。

3. 研究の方法

- (1) 符号分割多元接続 (CDMA) システムの場合には、最適な MAP 復調法の性能が自由エネルギーと呼ばれるポテンシャル関数の大域的安定解によって特徴付けられることが知られていた。本研究では、この性質は系に寄らない普遍的な性質であることに着目して、ポテンシャル関数に基づいて MAP 解の特徴付けを行った。この定式化は、ポテンシャル関数の微分に相当する密度発展方程式によって MAP 解を特徴付けていた従来の定式化と異なる。

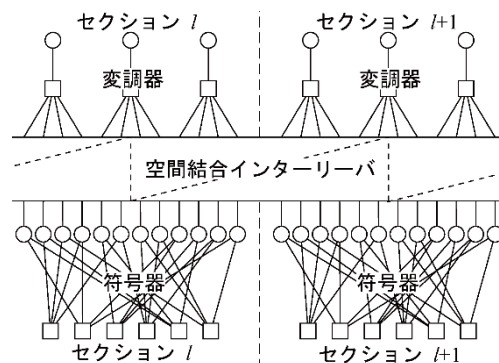


図1: 空間結合 BICM-IDD

- (2) ここでは、空間結合 BICM-IDD の具体的な構成例を与える。図1は符号長 12 の LDPC 符号器と変調レート 4 ビット/シンボルの変調器とから成る空間結合 BICM-IDD を示す。各セクションで 12

個の丸で描かれた符号語が一番下の四角で示された6個の符号制約式を満たすように生成される。変調器は4個の符号化ビットと一番上に丸で描かれた送信シンボルとを一対一に対応付ける。空間結合 BICM-IDD の場合、符号化ビットから伸びる枝と変調器から伸びる同数の枝とが以下で述べるように一対一に接続される。従来の BICM-IDD ではセクション毎に独立に枝が接続されるため、各セクションの符号語が別のセクションの変調器に送られることはなかった。それに対して空間結合 BICM-IDD では、各セクションの符号化ビットは隣接するセクションに位置する変調器に一樣かつランダムに送られる。したがって、空間結合 BICM-IDD システムは一次元の鎖構造をしている。空間結合の重要な点は、鎖の両端付近での反復復号が成功するように両端のいくつかの符号語を既知のビット系列で置き換えることである。BP 復号では、図1に示された各枝を通じてメッセージの交換が行われる。結合により、両端付近での正しい復号結果に関するメッセージが鎖の中央に向かって伝搬していく。

結合なしの場合の BICM-IDD は EXIT チャート法と呼ばれる手法を使って解析されてきた。BP 復号の際に復号器と復調器とから送られるメッセージの分布がそれぞれ単一のパラメータによって表現できる場合、それら二つのパラメータを縦軸と横軸とに取った EXIT チャート上で BICM-IDD の特性を解析することができる。しかし、空間結合を行った場合はセクション毎に独立なパラメータが必要となるため、セクション数に比例する数のパラメータが必要となり、それらを平面図上に書くことは不可能である。そこで、セクション数が無限大という空間結合で想定される極限を仮定して、空間結合 BICM-IDD の特性を元の EXIT チャート上で理解するための理論を構築した。

- (3) マルチユーザ検出に空間結合を応用する部分は先行研究で解決済みであった。そこで、特に通信路推定に注目して、空間結合の有効性を評価した。

当初の予定にはなかったが、周波数領域等化に空間結合を応用する前段階として、faster-than-Nyquist (FTN) 信号伝送と呼ばれる通信方式を MIMO システムに適用した場合の性能解析を行った。FTN とは、ナイキストレートよりも速いレートで信号を送信することによって伝送効率を高める一方で、通信路自体に遅延広がりがなくても、受信側で等化処理が必要となる方式である。

4. 研究成果

- (1) 雑誌論文 で、ポテンシャル関数による MAP 解の特徴付けに基づいて、空間結合系における各セクションでの符号長が十分に長いとき、セクション数に関わらず、正しいメッセージは誤りなくどこまでも伝播するという非自明な主張を直観的かつ数学的に厳密に証明することに成功した。結果として、空間結合系において誤り伝播が決して発生しない理由は、古典力学における力学的エネルギー保存則を使って初等的な方法で理解可能であることが分かった。

Kudekar らは空間結合 LDPC 符号の場合に主張自体が正しいことを厳密に証明していた。しかしながら、彼らの証明は直観性に乏しかったために、他の問題に証明を応用するのが困難であった。本研究には空間結合が持つ普遍的な性質を明らかにしたという意義がある。今日、本研究で提案したポテンシャル関数に基づく方法は、空間結合系を解析する際の標準的な手法として定着している。

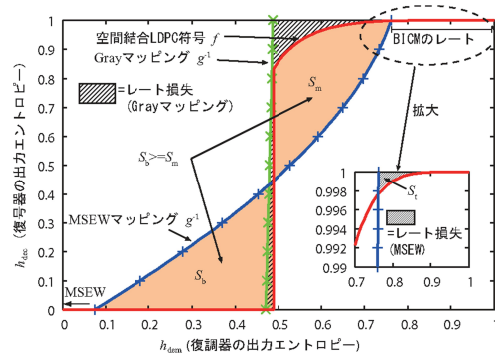


図2: EXIT チャート

- (2) 図2は符号器で空間結合 LDPC 符号を使用し、変調器で Gray または最大二乗ユークリッド重み (MSEW) マッピングを使用した 16 QAM の場合の EXIT チャートである。復号に成功するのは十分な反復後に復号器の出力エントロピーが 0 に収束するときである。従来の BICM-IDD では、Gray マッピングのように、横軸上を除いて二曲線が交点を持たないときに復号に成功する。したがって、MSEW マッピングの場合は拡大図に示すように交点が存在するため、従来の BICM-IDD は復号に失敗する。

雑誌論文 で、空間結合 BICM-IDD は、二曲線が交点を持つ場合にも、復号に成功する場合があることを示した。具体的には、二曲線で囲まれた三領域の面積を下から順に S_b , S_m , S_t とすると、空間結合 BICM-IDD は $S_b \geq S_m$ の場合に復号に成功する。さらに、変調レートを Q とすると、シャノン限界からのレート損失は $Q S_t$ に等しい。したがって、面積 S_t を最小

化すべきという変調器の設計基準が得られた。

図2から明らかのように、反復復号をしない場合のBICMの達成可能レート(図2に示されたBICMのレート)を最小化すると拡大図中に示された交点が右側に移動する。結果として、面積 S_t が限りなく小さくなり、空間結合BICM-IDDはシャノン限界に迫る伝送効率を達成できる。以上まとめると、BICMのレートを“最小化”すべきという変調器の逆説的な設計基準が得られた。

- (3) 雑誌論文 で、ブロックフェーディング通信路を仮定して、同時通信路推定・復号問題に空間結合BICMを適用し、理論的かつ数値的に従来のBICMに対する提案手法の有効性を実証した。

雑誌論文 で、MIMOにFTN信号伝送を適用した場合の性能を情報理論的に解析した。FTN信号伝送は、従来の方式とは異なり、QPSKでもシャノン限界を達成できることを示した。

時間的な都合で、FTN信号伝送に空間結合を応用する検討は行えなかったため、シャノン限界に迫るFTN信号伝送方式の受信方式に空間結合を利用することは、興味深い今後の検討課題である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

K. Takeuchi and C.-K. Wen, “Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation Signal Detection via the Conjugate Gradient Method,” accepted for publication in Proc. 18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun. (査読有)

S. Zhang, C.-K. Wen, K. Takeuchi, and S. Jin, “Orthogonal Approximate Message Passing for GFDM Detection,” accepted for publication in Proc. 18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun. (査読有)

K. Takeuchi, “Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation-Based Signal Recovery from Unitarily Invariant Measurements,” accepted for publication in Proc. 2017 IEEE Int. Symp. Inf. Theory. (査読有)

K. Takeuchi, “Asymptotic Optimality of QPSK Faster-than-Nyquist Signaling in Massive MIMO Systems,” IEICE Trans. Fundamentals., vol. E99-A, no. 12, pp. 2192-2201, Dec. 2016. DOI: 10.1587/transfun.E99.A.2192 (査読有)

K. Takeuchi, “Second-Order Optimality of Generalized Spatial Modulation for MIMO Channels with No CSI,” IEEE Wireless Commun. Lett.,

vol. 4, no. 6, pp. 613-616, Dec. 2015. DOI: 10.1109/LWC.2015.2475742 (査読有)

K. Takeuchi, “Spatial Modulation Achieves Information-Theoretically Optimal Energy Efficiency,” IEEE Commun. Lett., vol. 19, no. 7, pp. 1133-1136, Jul. 2015. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2433271 (査読有)

K. Takeuchi, T. Tanaka, and T. Kawabata, “Performance Improvement of Iterative Multiuser Detection for Large Sparsely Spread CDMA Systems by Spatial Coupling,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 61, no. 4, pp. 1768-1794, Apr. 2015. DOI: 10.1109/TIT.2015.2400445 (査読有)

S. Horio, K. Takeuchi, and T. Kawabata, “Iterative Channel Estimation and Decoding via Spatial Coupling,” IEICE Trans. Fundamentals., vol. E98-A, no. 2, pp. 549-557, Feb. 2015. DOI: 10.1587/transfun.E98.A.549 (査読有)

K. Takeuchi, “A Generalization of Threshold Saturation: Application to Spatially Coupled BICM-ID,” in Proc. 2014 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, pp. 2316-2320, Jul. 2014. DOI: 10.1109/ISIT.2014.6875247 (査読有)

[学会発表](計11件)

K. Takeuchi and C.-K. Wen, “Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation Signal Detection via the Conjugate Gradient Method,” accepted for presentation at 18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun., Hokkaido Univ., Sapporo, Hokkaido, 3-6 Jul., 2017.

S. Zhang, C.-K. Wen, K. Takeuchi, and S. Jin, “Orthogonal Approximate Message Passing for GFDM Detection,” accepted for presentation at 18th IEEE Int. Workshop Sig. Process. Advances Wirel. Commun., Hokkaido Univ., Sapporo, Hokkaido, 3-6 Jul., 2017.

K. Takeuchi, “Rigorous Dynamics of Expectation-Propagation-Based Signal Recovery from Unitarily Invariant Measurements,” accepted for presentation at 2017 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Aachen, Germany, 25-30 Jul. 2017.

竹内啓悟, C.-K. Wen, 「近似的期待値伝播法による超ナイキストレート信号の反復等化」, 第39回情報理論とその応用シンポジウム, 高山グリーンホテル(岐阜県高山市)2016年12月13日~16日.

竹内啓悟, 「大規模MIMOに対する超ナイキストレートQPSK信号伝送の漸近最適

性」,第 38 回情報理論とその応用シンポジウム,下電ホテル(岡山県倉敷市),2015 年 11 月 24 日~27 日.

竹内啓悟,「MIMO 通信路に対する空間変調の 2 次最適性」,第 38 回情報理論とその応用シンポジウム,下電ホテル(岡山県倉敷市),2015 年 11 月 24 日~27 日.

小林裕和,竹内啓悟,「AMP アルゴリズムに基づく大規模 MIMO のデータと通信路の反復推定」,第 38 回情報理論とその応用シンポジウム,下電ホテル(岡山県倉敷市),2015 年 11 月 24 日~27 日.

竹内啓悟,「8PSK 空間結合ビットインターリーブ符号化変調の EXIT チャート解析」,第 37 回情報理論とその応用シンポジウム,宇奈月ニューオータニホテル(富山県黒部市),2014 年 12 月 9 日~12 日.

竹内啓悟,「空間結合の基礎~応用事例を通して~」,電子情報通信学会信号処理研究会,チュートリアル講演,立命館大学(大阪府大阪市),2014 年 8 月 28 日.

K. Takeuchi, "A Generalization of Threshold Saturation: Application to Spatially Coupled BICM-ID," 2014 IEEE Int. Symp. Inf. Theory, Honolulu, USA, Jun. 29-Jul. 4, 2014.

堀尾修平,竹内啓悟,「空間結合に基づく反復通信路推定の性能改善」,電子情報通信学会情報理論研究会,別府国際コンベンションセンター(大分県別府市),2014 年 5 月 16 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 啓悟 (TAKEUCHI Keigo)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30549697