

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360170

研究課題名(和文)ターボ原理に基づく分散ワイヤレスネットワーク構築法～相関ネットワークへの展開

研究課題名(英文)COConnect All by Turbo NETworks-2: Extension to Correlation Networks (COATNET-2)

研究代表者

松本 正(Matsumoto, Tadashi)

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40452114

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円、(間接経費) 4,590,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、先行プロジェクトCOATNET(2010年3月に終了)における成果と方法論を協調通信ネットワークに展開した。特に、ネットワーク上で伝送される信号列の間に存在する相関をターボ原理により積極的に利用することで、ネットワーク全体の効率を大幅に改善するための各種技術を提案した。以下の3種のワークパッケージ：

WP1：リレー協調通信、WP2：グラフ表現を用いた分散ネットワークの構成法、WP3：具体的なシグナリング・信号処理方式の検討から成り、後述するようにそれぞれ大きな成果を上げた。

研究成果の概要(英文)：The objectives COATNET-2 has, as an extension of its successor project, COATNET, and three work packages in the project: (1) Wireless Cooperative Communications, including Relaying, (2) Protocol and Scheduling Techniques Design for Distributed Wireless Network, and (3) Design of Practical Transmission Chain and Signal Processing Techniques. The targets of each Work Packages follow the major results of the successor project, COATNET, and the major aim of COATNET-2 is to identify how we can best utilize the information sequence correlation caused by the network. We finally found that the cooperative network, as a whole, can be seen as a distributed source-channel code where regardless of each link's transmission is lossless or lossy. By applying the framework of the lossless/lossy distributed source-channel coding theorem, it has been shown that the proposed network design and processing techniques can achieve much higher efficiency than the conventional techniques.

研究分野：通信工学

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：相関情報源 低密度パリティ検査符号 リンク間相関 時間相関 EXIT 解析 ターボ原理 協調通信 ネットワーク符号

1. 研究開始当初の背景

近年になり地球温暖化問題に伴う省エネルギー技術研究の機運が高まっているが、情報通信産業は全世界の二酸化炭素排出量の2%を占めている。このため、シャノン限界に迫る優れた電力効率を達成する伝送方式を開発することは、エネルギー問題に大きく貢献できる通信技術基盤を確立すると言う意味で、その意義は極めて大きい。

1948年にシャノンにより確立された情報理論は、通信の電力効率および周波数利用効率の限界(シャノン限界)を与えるとともに、それに任意に近い性能を有する伝送法(符号化法)の存在を示したものである。1990年代に入り、シャノン限界に迫る符号化法として、ターボ符号や低密度パリティ検査(LDPC)符号が知られるようになった。このため、これらの符号は多くの応用分野で用いられるようになった。

本研究課題に先行した「ターボ原理に基づく分散ワイヤレスネットワーク構築法に関する研究(COATNET: COConnect All by Turbo NETworks)」(基盤研究B)では、ターボ原理の大規模分散ワイヤレスシステムの諸問題への適用を主眼として遂行され、多くの成果を達成した。それと同時に、「ネットワーク全体を、面的に冗長度を持った符号とみなす」というアイデアが生まれた。さらにこの問題を考察した結果、一部のリンクに誤りを許容する協調通信は、ネットワーク情報理論における「相関のある情報源の符号化の問題」に帰着することが判明した。

そこで本研究課題では、今後の産業基盤として注目を集めている「分散ワイヤレスネットワーク全体の最適化(電力効率、周波数利用効率の最大化)」に焦点を当て、多ユーザ間での通信に対する情報理論(ネットワーク情報理論)を理論基盤として、以下の研究課題に取り組むこととした。

- (1) 達成可能な伝送速度(レート)の理論的説明: 「達成可能な伝送速度(レート)の領域」を説明することは、伝送方式の設計の上で強固な基盤を与える。ネットワーク形態や情報源の相関、チャンネルの状態などの条件を踏まえた理論的検討を進め、レート領域の問題に解を与える。
- (2) 分散ワイヤレスネットワーク伝送アルゴリズムの開発: 分散ワイヤレスネットワークにおける、相関のある複数情報源の効率的な伝送アルゴリズム(チャンネル符号化・ネットワーク符号化)を確立する。宛先における復号処理の中での、相関に関する知識の有効な利用法を明らかにする。
- (3) レートの理論限界に迫る分散符号の構成: 上述の伝送アルゴリズムのもとでレートの理論限界に迫る分散情報源・チャンネル符号・ネットワーク符号の構成を目指す。新規性は、

- ・ 宛先で受信されるデータ間に生じる相関

- ・ 複数情報源が持つ相関

をターボ原理に取り込むことを前提とした高性能符号化方式設計を行うことにある。本課題研究はCOATNETプロジェクトの成果を継承することから、COATNET-2プロジェクトと称することになった。

2. 研究の目的

上述のような研究開始当初の背景の下で、本課題研究では次のワークパッケージ(WP)を定義した。各WPの目標を以下に整理して示す。

WP1: 協調リレー通信(平成23、24年度)

いくつかの協調中継方式に対して、研究課題で述べた諸問題に取り組んできた。特に、直交チャンネル中継、複数送信者による同時送信を許容する中継、補助情報の効果とオーバーヘッドの解析に重点を置いて検討を進めた。

WP2: グラフ表現を用いた分散ネットワークの構成法(平成24、25年度)

WP1の概念を拡張し、複数の送信者が自己の送信データを有するとともに、周辺局に対する中継局としても動作する場合を想定して、研究課題で諸問題に取り組んだ。特に、“Code-on-Graph for Network-on-Graph”のようにネットワーク全体を符号とみなす場合、グラフ表現分散ネットワークのための適応的スケジューリングに重点を置いて検討を進めた。WP1と同様、各フェーズにおける中継リンクのCSIを宛先に中継するためのオーバーヘッドを含めた効率を明らかにし、サイドチャンネルへのレート配分の最適化を図ることを検討に含めた。

WP3: 具体的なシグナリング・信号処理方式の検討(平成24、25年度)

WP3では具体的なシグナリング方式を含むワイヤレス伝送技術を含めた、最適分散ワイヤレスネットワークの構成法を明らかにした。つまり、WP1と2で明らかにした各方式に対して、さらにワイヤレス区間の信号伝送に必要な(等化器などの)信号処理部分を結合させ、これらもターボループに取り込んだ。その上でレート領域を導出するとともに、送信側の処理であるプリコーディングの影響を多次元EXIT解析によって収束特性を解析し、限界に漸近し得る電力配分、符号化・信号処理アルゴリズムを明らかにした。

3. 研究の方法

上述のような問題を確率伝播アルゴリズムにより解決し、理論限界に迫る構成を明らかにするためには、相互情報量伝達特性の最適化が必要となる。その最適性の評価方法として、EXIT(Extrinsic Information Transfer)チャートが有用であることが知ら

れている。本課題研究の申請時以前から、本研究グループ(代表、分担)は EXIT チャートやその多次元への拡張、実際に収束特性を実証する Trajectory 法、Projection 法を熟知しており、本研究課題でもそれを駆使した方法を主に、相関の影響が EXIT チャートへ与える影響について深く考察した。

4. 研究成果

WP 毎に、成果を分類して以下に示す。

- (1) WP1: 研究方法でも述べたように、同一の送信者から分散ワイヤレスネットワークを経由して、複数フェーズに亘ってデータの宛先で受信されるデータ間には相関が生じる。具体的には、送信局と中継局の間のリンク(以下、イントラリンクと称する)の誤り率が相関値の低下を招く。例えば、中継局において復元した情報系列を再度インターリーブによって別の系列にマッピングして再符号化して宛先局へ送信するシステムを考える。このシステムは、分散ターボ符号と見ることができるので、受信側ではその復号動作(つまり、送信局から送られた信号に対する復号器と、中継局から送られた信号に対する復号器間で対数尤度比を交換し合う、繰り返し復号)を行えば、ターボ符号の特性に類似の復号特性が得られるはずである。この原理に基づいて、WP1 では以下の成果を上げた。

宛先局でイントラリンクの誤り率(相関)を推定するアルゴリズムの確立: 宛先局における二つの復号器出力である事後対数尤度比をバイナリ判定し、両者の結果が異なるビット数をカウントして全情報ビット数との比を求めれば、イントラリンクの誤り率に等しい。この処理を繰り返し毎に行うことで精度よくイントラリンクの誤り率が推定できることを明らかにした。

具体的符号化・復号アルゴリズムの確立: チャンネル符号として、メモリ数1の畳み込み符号と、符号化率1の再帰的畳み込み符号(アキュムレータと呼ばれる)をインターリーブを介して接続させ、内部符号入出力ビットを適当な比率で交代させる極めて簡単な構造を提案した。これによって、内部符号と外部符号の EXIT 曲線を接近させることが可能で、鋭いターボクリフを発生させることに成功した。この構成を送信局と中継局で用い、宛先局における復号結果として得られる外部対数尤度比を(1)で述べたイントラリンクの誤り確率を反映するように変更しながら、復号器間で交換することで、イント

ラリンクの誤りが訂正できることを明らかにした。交代比率をイントラリンクの誤り率に応じて変化させることで、EXIT 曲線上の収束トンネルを開かせることが可能となった。この発見が、「協調通信ネットワーク全体を相関のある情報源符号化と見なす」という発想の原点になった。

「協調通信ネットワーク全体を情報源符号化と見なす」という上述の結論に基づき、中継局からの符号化データをヘルパーチャネルとみなす、ヘルパー付き情報源符号化に関する主定理を適用することで、ネットワーク全体のレート領域を導くことが可能なことを明らかにした。これによって、補助情報の効果とオーバーヘッドの解析が明らかになった。さらに、求めたレート領域上で受信信号電力対雑音電力比の確率分布を積分することで、ネットワーク全体の場所的劣化確率(アウトージ確率)を求めることに成功した。

さらに、上述(3)の結果を相関のある多元情報源に対する符号化法に拡張し、ヘルパー付きチャネルへの符号化あり、なしの場合について検討した。その結果、任意の情報源アルファベットサイズに対して2元線形符号を用いて符号化する手法を提案し、特に非正則低密度パリティ検査符号を用いるとき、多元線形符号に基づく先行研究を上回る性能を達成した。さらにこの結果を、無線分散ネットワークの更なる高度化で必要となる情報源の出力が順序つき確率変数列である場合に適用して性能解析を行い、誤り確率の正確な上界を導出した。

- (2) WP2: グラフ表現を用いた分散ネットワークに関して、適応的スケジューリングとオーバーヘッドの低減を目的として検討を進めた。以下の成果を得た。

中継局における適応量子化: 適応的に送信スケジューリングを行うグラフ表現分散ネットワークに関し、分散ネットワーク中における中継局処理として、受信信号を2ビットに量子化する方式を提案した。量子化処理を有歪情報源符号化とみなし、量子化閾値をネットワークの伝搬路状態に応じて適応的に最適化することで、通信宛先におけるビット誤り率特性を大幅に低減可能であることを明らかにした。また、適応しきい値制御に係る演算量を大幅に低減することにも成功した。

オーバーヘッドの低減: グラフ表現を

用いた分散ネットワークをフェージング環境に適用する場合の欠点の一つに、中継局においてネットワーク符号化の対象とする送信局の識別コードを付加し、これに強力な誤り訂正符号で保護しなければならない点にある。ネットワーク符号を用いたグラフ表現分散ネットワークの利点は、ネットワークが巨大になる場合に得られるため(ネットワーク全体を低密度パリティマトリクス符号: LDGM 符号 (Low Density Generator Matrix 符号)と見ることができるため)、この欠点を解決する方法として、中継局が識別コードを付加するのではなく、宛先局がネットワーク符号化を必要とする送信局識別コードをフィードバックする方式を提案した。この方式によって直接リンク(送信局-宛先局リンク)で誤りが検出されなかった送信局をネットワーク符号化の対象から除去することを可能とした。これによって、誤り伝搬の除去が可能となった。

- (3) WP3: 「協調通信ネットワーク全体を情報源符号化と見なす」ことによって得られた、WP 1 と 2 の結果を具体的な広帯域伝送技術の中で活用するためには、送信局においてユーザ毎、周波数毎の電力配分を最適配分する(以下、この機能をプリコーディングと称する)ことが必要となる。ここで重要となることは、電力配分が、マルチユーザに対する宛先局での繰り返し処理の収束を保証しなければならない点にある。バックホールネットワークなどから得られるサイド情報によって、送受信局間のチャネルインパルスレスポンス情報が送信側で既知の場合に対して、この問題に対して、以下の結果を得た。

EXIT チャートの拘束条件付き最適化: EXITチャート上の複数のポイントを拘束条件とする電力最小化問題を解決した。これによって、全体の送信電力を最小にしつつ、各ユーザが外部符号と内部符号の復号器 EXIT チャートが有限の乖離幅を保ちながら(具体的には、繰り返し数に制限を設ける)かつ外部符号の事後相互情報量を限りなく1に近づける(誤り確率を限りなくゼロにできる)ことを可能とした。この問題は複数の局所最適点を有するため、グローバル最適解を解析的に得ることは困難な問題となる。この問題を解決するために、最適化目的関数を凸関数近似するためのパラメータを導入し、この値を繰り返し処理の中で修正しながら逐次的に最適解を得るアルゴリ

ズムを開発した。また、その収束特性を評価し、パラメータ修正変分量の最適値を明らかにした。

直交周波数分割多重方式に基づくマルチユーザ多入力多出力(Multiple Input Multiple Output: MIMO)送受信システムを対象に、特に基地局間干渉を考慮した、様々なマルチセルシナリオについて検討を進めた。基地局毎の送信電力制限が存在する下での重み付き総和レート最大化問題は、前述(1)の等化器の収束を制約条件とする電力最小化問題の逆問題と言える。(1)と同様にこの問題は非凸となっているので解析的求解は至難となる。この問題を解決するための効率的アルゴリズムを導出し、計算機シミュレーションによって提案アルゴリズムの効果と優位性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 21 件: 査読有なもののみを示す。)

2013 年 4 月 ~ 2014 年 3 月末

- Y. Takano, K. Anwar and T. Matsumoto, "Spectrally Efficient Frame Format-Aided Turbo Equalization with Channel Estimation", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 62, No. 4, May 2013, pp. 1635-1645
- A. Irawan, K. Anwar, and T. Matsumoto, "Combining-after-Decoding Turbo Hybrid ARQ by Utilizing Doped-Accumulator", IEEE Communications Letters, Vol. 17, No. 6, June 2013, pp. 1212-1215
- X. He, X. Zhou, K. Anwar, and T. Matsumoto, "Estimation of Observation Error Probability in Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Letters, Vol. 17, No. 6, June 2013, pp. 1073-1076
- X. Zhou, P.-S. Lu, K. Anwar and T. Matsumoto, "Correlated Sources Transmission in Orthogonal Multiple Access Relay Channel: Theoretical Analysis and Performance Evaluation," IEEE Transactions on Wireless Communications, DOI: 10.1109/TW.2014.130598
- P.-S. Lu, X. Zhou, K. Anwar and T. Matsumoto, "Joint Adaptive Network-Channel Coding for Energy-Efficient Multiple Access Relaying," IEEE Transactions on Vehicular Technology, DOI: 10.1109/TVT.2013.2292508
- K. Wu, K. Anwar and T. Matsumoto, "BICM-ID-Based IDMA using Extended Mapping," IEICE Transactions on Communications (印刷中)
- S. Qian, M. Cheng, K. Anwar and T.

Matsumoto, "On Outage Probability of Correlated Sources Transmission over Nakagami Fading Channels," IEE Electronics Letters (印刷中)

北村康裕、衣斐伸介、三瓶誠一、"XOR符号化パリティを用いたこう符号化率ターボ符号" 信学論(B) vol. J97-B, 2014, pp. 151-161

Mirza Golam Kibria, Hidekazu Murata, and Susumu Yoshida, "An Efficient Algorithm for Weighted SUM-Rate Maximization in Multicell OFDMA Downlink", IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E97-A, No1, 2014, pp. 69-77

Mirza Golam Kibria, Hidekazu Murata, "Performance of Partitioned Vector Quantization with Optimal Feedback Budget Allocation", IEICE Trans. Communications, 印刷中

2012年4月~2013年3月末

畑本浩伸, 衣斐信介, 三瓶政一, "無線メッシュネットワークにおける2ホップ並列協力中継伝送方式," 信学論(B), , vol.J94-B, no.4, pp.601-614, Apr. 2011

M. Kotani, S. Kawamoto, M. Isaka, "Granular gain of low-dimensional lattices from linear block codes", 信学論 (B) vol. vol. 95E-A, pp. 2168-2170
K. Anwar and T. Matsumoto, "Spatially Concatenated Codes with Turbo Equalization for Correlated Sources", IEEE Transaction Signal Processing VOL. 60, NO. 10, OCTOBER 2012, pp. 5572-5577

K. Fukawa, S. Ormsub, A. Tolli, K. Anwar, and T. Matsumoto, "EXIT-constrained BICM-ID Design using Extended Mapping", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Vol.1, No. 40

DOI: 10.1186/1687-1499-2012-40

M. Cheng, X. Zhou, K. Anwar and T. Matsumoto, "Simple Relay Systems with BICM-ID Allowing Intra-link Errors", IEICE Transaction on Communications, Vol.E95, (B12) pp.3671-3678

X. Zhou, X. He, K. Anwar and T. Matsumoto, "GREAT-CEO: larGe scale distRibuted dEcision mAKing Technique for Wireless Chief Executive Officer problems", (Invited Paper) IEICE Transaction on Communications, vol. E95, B(12), pp. 3654-3662

X. Zhou, M. Cheng, K. Anwar and T. Matsumoto, "Distributed Joint Source-Channel Coding for Relay Systems Exploiting Source-Relay Correlation and Source Memory", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, DOI: 10.1186/1687-1499-2012-260

2011年4月~2012年3月末

V. Tervo, T. Matsumoto, and P. S. Lu, "Distributed Joint Source-Channel Coding for Correlated Sources Using Non-systematic Repeat-Accumulate Based Codes", Wireless Personal Communications, Springer, Published on-line: 27 March 2012
DOI: 10.1007/s11277-012-0579-5

岩田翔兵, 井坂元彦 " 相関のある多元情報源に対する二元線形符号による符号化 ", 信学論(B) vol. 95J-B, pp. 100-109

Juha Karjalainen, Antti Tolli, Marian Codreanu, Markku Juntti, and Tad Matsumoto, "EXIT Chart-Based Power Allocation for Iterative. Frequency Domain MIMO Detector", IEEE Transaction Signal Processing, VOL. 59, NO. 4, pp. 1624-1641, April, 2011

② 畑本浩伸, 衣斐信介, 三瓶政一, "無線メッシュネットワークにおける2ホップ並列協力中継伝送方式," 信学論(B), vol.J94-B, no.4, pp.601-614, April 2011

[学会発表](計 36 件: 極めて多数なため、査読有で代表的なもののみを示す。)

Mirza Golam Kibria, Hidekazu Murata and Susumu Yoshida, "Coordinated Linear Precoding in Down Link Multicell MU MISO Network" IEEE VTC 2013 Fall, Sept 2-5, 2013, Las Vegas (USA)

T. Matsumoto, "Paradigm Shift in Turbo Processing: from Point-to-Point to Network", Keynote Speech, European Wireless 2013, April 16-18, 2013, Guildford, UK

2012年4月~2013年3月末

M. Cheng, K. Anwar and T. Matsumoto, "Outage Analysis of Correlated Source Transmission in Block Rayleigh Fading Channels", IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)-Fall 2012, Canada, Sept. 2012 in proceedings

2011年4月~2012年3月末

Lin Shan, Hidekazu Murata, Sonia Aissa, Susumu Yoshida, "Hybrid network coding and cooperative relaying schemes for bi-directional communication systems", Proc. the 73rd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2011-Spring), May 18, 2011, Budapest, Hungary

[図書](計 2 件)

井坂 元彦、数理工学事典(分担共著)朝倉書店、2011年出版

梶勇一(編著), 岩田賢一, 葛岡成晃, 井坂元彦、「情報・符号理論」オーム社 2014年出版予定

[産業財産権]

出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕ホームページ等

<http://www.jaist.ac.jp/is/labs/matsumoto-lab/en/projects/coatnet.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 正 (Matsumoto Tadashi)

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40452114

(2) 研究分担者

コイル アンワル (Khoirul Anwar)

北陸先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：20535372

村田 英一 (Murata Hidekazu)

京都大学大学院・情報学研究科・准教授

研究者番号：60252475

井坂 元彦 (Isaka Motohiko)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：50351739

衣斐 信介 (Ibi Shinsuke)

大阪大学大学院・工学研究科・助教

研究者番号：10448087

(3) 連携研究者：なし