

# 博士学位論文審査要旨

2012年9月4日

論文題目： Coding-Spreading on Sparse Graph for Gaussian Multiple-Access Channel  
(ガウス型多重接続通信路に対する疎グラフに基づく符号化・拡散法)

学位申請者： Guanghui Song (宋 光輝)

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 渡辺 陽一郎

副査： 理工学研究科 教授 程 俊

副査： 独立行政法人 情報通信研究機構 主任研究員 李 還幫

要 旨：

本論文は、多重接続通信路に対するマルチユーザ符号化の研究成果をまとめたものである。多重接続通信路は多数の入力端子と1つの出力端子を持つ通信路モデルである。各入力端子から同時に伝送された送信信号は通信路で重ね合わされ、受信機(復号器)で受信される。復号器は受信信号から各ユーザの信号を分離し、各ユーザの信号に含まれる誤りを訂正しなければならない。本研究では、ガウス型多重接続通信路に対するユーザ分離のための拡散列の構成と誤り対策のための通信路符号の構成を検討する。この通信路の通信路容量に近い符号化率での高速、かつ任意に低い誤り率の高信頼通信を可能にする、最適な拡散列と最適な通信路符号の構成法を解明する。

本研究では、ガウス型多重接続通信路に対して、既存の IDMA (interleave-division multiple-access) 方式において、最適な拡散列およびインタリーブの構成を提案する。そのため、拡散、インタリーブおよびガウス型多重接続通信路を IDMA 通信路と見なす。予め与えられた信号対雑音電力比に対して、IDMA 通信路容量は、 $K$  ユーザ拡散・インタリーブ (SI: spreading-interleave) 行列で唯一決定される。SI 行列の行ベクトル(または、列ベクトル)がペアワイズに直交のとき、IDMA 通信路の通信路容量を最大となることが示される。よって、最適な拡散列および最適なインタリーブは、直交 SI 行列から構成できることが明らかになる。

次に、通信路符号として RA (repeat-accumulate) 符号を IDMA システムに適用したマルチユーザ RAID (repeat-accumulate interleave-division) 通信システムにおいて、任意に低い誤り率を有する高信頼性の通信を可能にする、RA 符号の最適符号化率と拡散列の最適な長さを解析で求める。理論解析のため、その RAID システムの送信器を疎グラフ符号と見なし、 $K$  ユーザ RAID システムの送信器を1つのファクターグラフで示す。そのグラフより、従来のシングルユーザ符号用の不動点理論を拡張し、それを RAID システムに適用できる。従来のシングルユーザ符号用の不動点理論では、ファクターグラフでの相互情報量の伝達を単一変数で表している。それに対して、本研究では、システムの連立方程式を解くため、もう1つの補助変数を導入し、双変数不動点解析法を提案する。補助変数の導入で、符号化率と拡散長がそれぞれ陽に不動点で表すことができる。システムの誤り率が最小不動点により決まるため、任意に低い誤り率を有する、RA 符号の最適符号化率と拡散列の最適な長さを解析で求めることができる。

さらに、ガウス型多重接続通信路のための有限域拡散法を提案する。EXIT を用いて理論解析を行う。EXIT 関数の漸近的な傾きは、 $s$  が大きくなるにつれて傾きも大きくなっていることが分かる。そして、この EXIT 関数の漸近的な傾きは、低ビット誤り率の区間で、ビット誤り率曲線

の傾きの絶対値にほぼ等しいことが解析で分かる。これは、情報ビット数  $s$  が大きくなると、ビット誤り率が低くなることを示唆している。

以上、本研究では、疎グラフの視点からガウス型多重接続通信路のマルチユーザ符号化を検討し、通信路容量に近い符号化率で、かつ任意に低い誤り率の通信を可能にする、最適な拡散列と最適な通信路符号の構成法を理論的に解明した。

よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2012年9月4日

論文題目： Coding-Spreading on Sparse Graph for Gaussian Multiple-Access Channel  
(ガウス型多重接続通信路に対する疎グラフに基づく符号化・拡散法)

学位申請者： Guanghai Song (宋 光輝)

審査委員：

主査： 理工学研究科 教授 渡辺 陽一郎

副査： 理工学研究科 教授 程 俊

副査： 独立行政法人 情報通信研究機構 主任研究員 李 還幫

要 旨：

本論文提出者は、2009年4月より本学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程に在籍し、各年度において優れた研究成果を挙げている。また、日本語に関しては語学試験に合格し、英語に関しては国際学会で論文を発表しているため、十分な語学力を有していることが認められる。

本論文の主たる内容は、IEICE Trans. Fundamental, vol.E95-A, no.3に掲載され、また IEEE Trans. Communications (1 編)に掲載されることが決まっている。これらの業績により十分な評価を得ている。

2012年7月28日午後2時より約1時間40分にわたって提出論文に関する学術講演会(博士論文公聴会)が開催され、種々の質疑討論が行われたが、論文提出者の説明により十分な理解が得られた。

さらに、講演会終了後、審査委員により論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、十分な学力を有することが確認できた。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： Coding-Spreading on Sparse Graph for Gaussian Multiple-Access Channel  
(ガウス型多重接続通信路に対する疎グラフに基づく符号化・拡散法)

氏名： Guanghai Song (宋 光輝)

要旨：

本論文は、多重接続通信路に対するマルチユーザ符号化の研究成果をまとめたものである。多重接続通信路は多数の入力端子と1つの出力端子を持つ通信路モデルである。各入力端子から同時に伝送された送信信号は通信路で重ね合わされ、受信機（復号器）で受信される。復号器は受信信号から各ユーザの信号を分離し、各ユーザの信号に含まれる誤りを訂正しなければならない。本研究では、ガウス型多重接続通信路に対するユーザ分離のための拡散列の構成と誤り対策のための通信路符号の構成を検討する。この通信路の通信路容量に近い符号化率での高速、かつ任意に低い誤り率の高信頼通信を可能にする、最適な拡散列と最適な通信路符号の構成法を解明する。

本論文は6章から構成される。

第1章は、論文の導入である。ガウス型多重接続通信路に対する符号化・拡散法に関する研究の動機および従来法の問題点を述べ、それらの問題を克服するための解決手法を提案する。さらに、本論文での提案法の新規性および有効性について概括する。

第2章では、多重接続通信路を用いて情報伝送方式の一つ IDMA (interleave-division multiple-access) の基礎について述べる。 $K$ ユーザの IDMA システムで、送信側では、各ユーザが1情報ビットずつ拡散を行い、複数ビットの拡散後インタリーブ（並び替え）を行い、多重接続通信路に送信する。受信側では、重ね合わせた各ユーザの信号を受信し、各ユーザの情報ビットを検出する。

第3章、第4章と第5章は本論文の中心になる部分である。

第3章では、ガウス型多重接続通信路に対して、既存の IDMA 方式で、最適な拡散およびインタリーブ法がいかなるものか、また、なぜ IDMA 方式が CDMA (code-division multiple-access) 方式より優れているのかについて調べる。この章は、これらの問題を解決するため、最適な拡散列およびインタリーブの構成を提案する。

最適な拡散列およびインタリーブを構成するため、拡散、インタリーブおよびガウス型多重接続通信路を IDMA 通信路と見なす。予め与えられた信号対雑音電力比 (SNR: signal-to-noise ratio) に対して、IDMA 通信路容量は、 $K$ ユーザ拡散・インタリーブ (SI: spreading-interleave) 行列で唯一決定される。SI 行列の行ベクトル（または、列ベクトル）がペアワイス (pairwise) に直交するとき、IDMA 通信路の通信路容量を最大となることが示される。よって、最適な拡散列および最適なインタリーブは、直交 SI 行列から構成できることが明らかになる。

また、IDMA 方式が CDMA 方式より優れている理論根拠を解明するため、各ユーザのインタリーブをランダムにし、各ユーザの拡散列を同様の2元系列を持つとする。そのとき、SI 行列の列相関（または行相関）の期待値を最小となるときに拡散列が最適であることを明らかにする。

さらに、このとき、IDMA を用いた通信路容量が、従来の CDMA 通信路容量より大きくなることを理論解析で示す。その理由は、1 回の伝送情報ビット数が多くなると、SI 行列が疎行列になり、その列相関（または行相関）の期待値が低くなることを意味する。疎行列を持つ IDMA の拡散・インタリーブは、実際、疎グラフ符号となる。

第 4 章では、符号化率と拡散長のトレードオフについて述べる。通信路符号を IDMA システムに適用したものを符号化 IDMA システムと呼ぶ。マルチユーザ符号化 IDMA システムでは、各ユーザの拡散・インタリーブは、主に各ユーザの信号分離の役目を果たしているに対して、通信路符号は、雑音対策のものである。高信頼性の通信を確保しながら、可能な限りに高符号化率かつ低拡散長での高速な通信を実現する。

この章では、通信路符号として RA (repeat-accumulate) 符号を IDMA システムに適用したマルチユーザ RAID (repeat-accumulate interleave-division) 通信システムについて述べる。理論解析のため、1 回の伝送情報ビット数が十分多いと仮定する。その RAID システムの送信器を疎グラフ符号と見なし、 $K$  ユーザ RAID システムの送信器を 1 つのファクターグラフで示す。ファクターグラフが多変数関数の因子分解の様子を表すグラフであり、そのグラフより、従来のシングルユーザ符号用の不動点理論を拡張し、それを RAID システムに適用できる。従来のシングルユーザ符号用の不動点理論では、ファクターグラフでの相互情報量の伝達を単変数で表している。それに対して、本研究では、システムの連立方程式を解くため、もう 1 つの補助変数を導入し、双変数不動点解析法を提案する。補助変数の導入で、符号化率と拡散長がそれぞれ陽に不動点で表すことができる。システムの誤り率が最小不動点により決まるため、任意に低い誤り率を有する高信頼性の通信を可能にする、RA 符号の最適符号化率と拡散長の最適な長さを解析で求めることができる。解析結果は、計算機シミュレーションと一致していることを確認した。提案法は、従来の EXIT (extrinsic information transfer) チャート解析より計算量が遥かに低減される。本研究で提案した双変数不動点解析法は、レギュラー LDPC (low-density parity-check) 符号を用いる IDMA システムにも適用する。

第 5 章では、ガウス型多重接続通信路のための有限体拡散法を提案する。従来の CDMA や IDMA 法の単一情報ビットを 2 元拡散列を用いて拡散することに対して、有限体拡散法では、複数ビットを有限体上の元とし、有限体上で多元拡散列を用いて拡散を行う。この手法では、各ユーザの  $s$  個の情報ビットは有限体  $GF(2^s)$  上の元へ変換される。そして有限体上で多元拡散を行う。拡散後の多元系列は 2 元系列に変換され、インタリーブを通して通信路に送信する。受信側では、重ね合わされた各ユーザの送信信号を受信し、疎グラフに基づき繰り返し検出により各ユーザの情報ビット列を検出する。

本研究では、有限体拡散法の有効性を示すため、EXIT 解析を行う。EXIT 関数の漸近的な傾きは、 $s$  が大きくなるにつれて傾きも大きくなっていることが理論解析で分かる。これは、 $s$  が 1 より大きいときに複数の情報ビットから有限体の元への変換による利得が得られ、 $s$  が大きくなると、この利得も大きくなることを示している。

さらに、この EXIT 関数の漸近的な傾きは、低ビット誤り率の区間で、ビット誤り率曲線の傾きの絶対値にほぼ等しいことが解析で分かる。これは、情報ビット数  $s$  が大きくなるとビット誤り率曲線の傾きの絶対値が大きくなること、すなわち、ビット誤り率が低くなることを示唆している。最後に、情報ビット数  $s$  が 2 以上であれば、有限体拡散法が、単一ユーザの BPSK (binary phase shift keying) 変調を用いた場合と比較して低いビット誤り率を達成することを示す。

第 6 章は、論文のまとめである。既存の IDMA システムでは、通信路容量を最大にする最適な拡散列および最適なインタリーブを導き、次に、符号化 IDMA システムでは、最適符号化率と拡

散列の最適な長さを解析で求めた。さらに、複数の情報ビットを同時拡散する有限体拡散法を提案し、その有効性を確認した。

本研究では、疎グラフの視点からガウス型多重接続通信路のマルチユーザ符号化を検討し、通信路容量に近い符号化率で、かつ任意に低い誤り率の通信を可能にする、最適な拡散列と最適な通信路符号の構成法を理論的に解明した。