

論文の内容の要旨

論文題目	Serially Concatenated Signal Codes Based on Repeat-Accumulate Structure (和訳：Repeat-Accumulate構造に基づく直列接続信号符号)
学位申請者	高井 真人

自動車や昇降機など、多種多様な製品をネットワークに接続し、マルチメディアコンテンツや大量のセンサデータを活用した新たなビジネスモデルへの転換が、今後製造業でさらに進んでいくと考えられる。このような転換を支える基盤技術として、低遅延でありながら、高信頼かつ高速な通信を実現する変調方式および強力な符号化方式が求められている。従来、符号化と変調はそれぞれ独立に提案され、これらを統合し、高い誤り訂正能力を実現する設計法として符号化変調が用いられてきたが、近年、デジタルフィルタによって、変調信号に直接的に誤り訂正能力を付与する信号符号が、その優れた性能と拡張性から、高い注目を集めている。特に、並列接続型二元ターボ符号を基にし、これを信号符号へと拡張したターボ信号符号は、通信路容量に漸近する強力な誤り訂正能力に加えて、既存システムで用いられる直交位相振幅変調よりも小さいシェイピング損失を実現可能であり、低遅延・高信頼・高速な通信システムを実現可能な技術として期待されている。しかしながら、ターボ信号符号の理論的復号特性はこれまで明らかでない上、その設計法は確立されておらず、符号解析法の確立、さらに解析に基づいた符号の探索が急務であった。そこで本研究では、まず符号器構成が簡単であり、また解析が容易な、直列接続型の二元 Repeat-Accumulate (RA) 符号を基にしたRA信号符号を提案し、RA信号符号の解析法、低演算量復号法をそれぞれ提案する。さらにRA信号符号の符号化利得をさらに高めるために、空間結合を用いた空間結合RA信号符号を提案し、この漸近的復号特性を明らかにすると共に、低遅延復号法を提案する。本論文の構成は以下の通りである。

まず、第2章では、従来の信号符号である信号符号、ターボ信号符号について述べ、その復号演算量が入力信号の大きさに比例して指数関数的に大きくなることや、漸近的解析および符号設計が為されていないといった問題をそれぞれ明らかにする。

第3章では、本論文で新たに提案するRA信号符号の符号化、復号について述べる。RA信号符号では、従来のターボ信号符号と異なり、パリティ検査式を満たす符号生成を行うことで、二部グラフに基づいたSum-Product復号が可能であることを示す。一方で、この復号演算量は従来のターボ信号符号と同等となってしまう、伝送速度の向上に伴い、復号演算量が指数的に増大してしまうことを明らかにする。そこでフーリエ変換によってチェックノード演算を効率化するFFT-BP (Fast-Fourier-Transform Based Belief Propagation) 復号と、グラフ内での伝播メッセージを削減することで、演算を効率化するEMS (Extended Min-Sum) 復号をそれぞれ提案し、これらの復号法によって、ターボ信号符号と異なり、高伝送速度領域においても実用的な演算量で復号可能であることを示す。

さらに符号の解析手法として、モンテカルロ密度発展法 (MC-DE: Monte-Carlo Density Evolution) によって本信号符号が解析可能であることを明らかにし、MC-DEによってRA信号符号のパラメータを最適化する。これらの解析結果より、提案したRA信号符号には、符号化利得のさらなる改善の余地があることを明らかにする。また計算機シミュレーションにより、RA信号符号はターボ信号符号の1/4の演算量で同等のシンボル誤り率を達成できることを明らかにする。

第4章では、さらなる符号化利得の獲得のために、RA信号符号を拡張した空間結合RA信号符号を提案する。MC-DEを用いた解析によって、空間結合RA信号符号の符号化利得の改善を明らかにするとともに、空間結合RA信号符号のパラメータ最適化を行う。計算機シミュレーションにより、空間結合RA信号符号が有限符号長領域においてもRA信号符号に比べて優れた誤り率特性を示すことを明らかにする。

また、本章では空間結合によって復号遅延が大きくなることを示した上で、復号遅延を抑制するために、符号の部分系列から逐次復号を進めていく窓復号法を提案する。窓復号のパラメータによる符号化利得への影響を、MC-DEによって解析し、RA信号符号と同一の復号遅延で、より優れた有限符号長の誤り率特性が得られることを計算機シミュレーションによって明らかにする。

第5章では、本論文を総括し、これらの提案を通して、低遅延・高速・高信頼な通信が実現可能であることを述べると共に、提案解析手法および提案復号法が、より広い一般の低密度パリティ検査 (LDPC: Low-Density Parity Check) を基とした信号符号に対しても適用可能であることを述べる。さらに、今後の課題、将来の展望について述べ、本論文をまとめる。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 高井 真人

審査委員主査 石橋 功至

委員 山尾 泰

委員 藤井 威生

委員 八木 秀樹

委員 小島 年春

委員 落合 秀樹

委員

本博士論文では、低遅延・高信頼・高速な通信システムの実現を目指し、新たな誤り訂正符号であるRepeat-Accumulate (RA) 信号符号の提案、その解析法と低演算量な復号法の確立、さらに空間結合の導入による性能の向上を、それぞれ達成している。

まず第一章では本論文の背景について説明している。近年、様々な製品が制御情報やコンテンツ配信など、異なる用途で通信を利用しはじめており、製品を通してユーザに付加的なサービスを提供するといったビジネスモデルの転換が起きている。今後あらゆる製品が通信を介して様々なサービスを提供するようになると考えられ、低遅延・高信頼・高速な通信の実現が急務であることを述べている。符号と変調は通信の信頼性と伝送速度を決定する最も基本的で重要な要素であるが、多くの場合これらはそれぞれ独立に提案・設計が行われてきた。符号と変調を統一的に設計する従来手法として、符号化変調方式について述べた上で、デジタルフィルタを利用して変調信号に直接的に誤り訂正能力を付与する信号符号とよばれる手法が近年注目されていることに言及している。特に、ターボ信号符号は小さいシェイピング損失と高い符号化利得を獲得できるため、低遅延・高信頼・高速な通信の実現が期待できることを示す一方で、その理論的復号特性は研究されておらず、符号の設計法も確立されていないといった問題点を明らかにしている。また、伝送速度の増加に比例して復号演算量が指数関数的に増大する問題点を述べている。これらの研究背景を述べた上で、本研究のモチベーションを明確にし、本研究の新規性について明らかにしている。

第二章では、従来の信号符号とターボ信号符号について符号化と復号の詳細を述べた上で、伝送速度を増加させると復号演算量が爆発的に増大する問題点を明らかにしている。また、従来方式の中でも優れた復号特性をもつターボ信号符号について、理論的復号特性と符号設計法が明らかでないことを述べ、信号符号の解析・設計法および低演算復号法の必要性を示している。

第三章では、本論文の提案方式であるRA信号符号について述べている。はじめに、RA信号符号は従来のターボ信号符号と異なり、パリティ検査式を満たす符号生成により、二部グラフに基づくSum-Product復号が利用できることを示している。そこで、RA信号符号による高伝送速度領域実現のため、フーリエ変換を利用してチェックノード処理の演算量を削減したFFT-BP(Fast-Fourier-Transform Based Belief Propagation)復号と復号時の伝搬メッセージを切詰めることで復号演算量を大幅に削減するEMS(Extended Min-Sum)復号を提案している。また、提案符号の理論的復号特性を解析するため、モンテカルロ密度発展法(MC-DE: Monte-Carlo Density Evolution)を提案しており、MC-DEの解析に基づく効率的な符号設計法を構築している。解析結果から、RA信号符号の符号化利得に改善の余地があることも明らかにしている。計算機シミュレーションによって、有限の符号長領域でRA信号符号はターボ符号と比較して低い復号演算量で同等のシンボル誤り率を達成することを示し、EMS復号によって高い伝送速度領域でも現実的な復号演算量で復号できることを明らかにしている。

第四章では、RA信号符号を拡張した空間結合RA信号符号を提案し、さらなる符号化利得の向上が可能であることを、MC-DEによる解析および計算機シミュレーションによる有限符号長領域の誤り率特性評価によって明らかにしている。また、空間結合化に伴い復号遅延が増加する問題を明らかにした上で、符号の部分系列を逐次的に復号することで復号遅延を低減する窓復号法を提案している。MC-DEによって、窓復号による復号遅延低減効果と理論的復号特性のトレードオフを解析したうえで、RA信号符号と同じ復号遅延で符号化利得が改善することを計算機シミュレーションによって明らかにしている。

最後に、第五章では本論文の総括として、提案方式によって低遅延・高信頼・高速な通信が実現できることを述べ、提案の解析法と復号法は一般の低密度パリティ検査に基づく信号符号にも応用でき、産業的価値だけでなく、高い学術的価値を持ち合わせていることを述べている。また、本研究分野の今後、将来の課題、展望についても述べ、本博士論文の立ち位置を明確に記している。

本論文について、令和元年5月20日に公聴会および最終審査会を開催して、学位授与の審査を行った。審査の結果、本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。