

平成22年 6月17日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2009

課題番号：20760554

研究課題名 (和文) 将来の惑星探査に向けた LDPC 符号化装置の研究開発

研究課題名 (英文) Study of low density check code for the future of a new planetary probe mission

研究代表者

富木 淳史 (TOMIKI ATSUSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 助教

研究者番号：50455466

研究成果の概要 (和文)：

近年、符号化方式の中で低密度パリティ検査 (LDPC) 符号は最も処理利得が大きく、飛躍的な伝送容量の改善効果とロバストネス向上をもたらすことが期待されている。そこで本研究では将来の惑星探査に不可欠な、超遠距離通信の要素技術である誤り訂正符号に、このLDPC符号化装置を適用する研究をおこなった。

その結果、探査機へアップリンクのコマンド回線、およびダウンリンクのテレメトリ回線において、LDPC符号を使用することで、符号化利得を改善できることがわかった。

研究成果の概要 (英文)：

Low density parity code have been achieved to expect highest coding gain of any error correction coding and to realize the purpose of high reliability data transmission, improving the communication data rate in deep space. This investigation adopts LDPC encoder and decoder for the future of a deep space telecommunication system. The LDPC would be high processing gain than the conventional error correction, enable us to high performance in up-link and down-link.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	3,000,000	900,000	3,900,000
21年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：深宇宙通信、惑星探査、符号化装置、LDPC 符号

1. 研究開始当初の背景

ア) 探査機を打ち上げから惑星へと送り込み、科学観測を達成するには、探査機を惑星軌道上で自在に遠隔操作し、人類の貴重な財

産となる観測成果を地球へ送らなくてはならない。しかし探査機と地球局との超遠距離通信は、超微弱な信号と雑音との戦いでもある。探査機の送信信号電力はロケットの打ち

上げ能力によってほぼ決まり、これまで以上に増大することは難しくなっている。このことから誤り訂正符号による符号化利得によってカバーしてきた歴史的経緯がある。誤り訂正符号とは通信路上で発生する符号誤りを検出し、冗長データから再送せずとも訂正することのできる符号化処理である。

イ) 深宇宙通信システムの標準化団体である CCSDS(The consultative committee for space data systems)では、2004年にリードソロモン符号と畳み込み符号の組み合わせ符号に加えて、ターボ符号が採用された。そして現在、低密度パリティ検査 (low density parity check:LDPC) 符号が従来の符号化の中で最も処理利得が大きく、シャノンの理論的限界 ($E_b/N_0 = -1.59$ dB) に漸近することのできる誤り訂正符号として脚光を浴びている。シャノンの理論的限界は 1948年にシャノン(C.E. Shannon)は、白色ガウス雑音の存在下において、周波数帯域幅 $W(\text{Hz})$ と信号対雑音電力比 S/N によって与えられるあるチャンネル容量 $C(\text{bit/s})$ 以下で通信する限り、伝搬路誤りを任意に小さくできる符号化方式が存在することを証明した。帯域幅を大きくした極限、 $C/W \rightarrow 0$ のとき E_b/N_0 が $\ln 2$ (-1.6 dB)となり、これをシャノン限界と呼ばれている。この低密度パリティ検査符号はデータの特定のビット同士を足しあわせた値が、送受信の前後で変化が無いことを調べてビット誤りを検出、訂正するパリティ・チェック符号の1つ。1962年に米国マサチューセッツ工科大学の R.G.Gallager が開発した。1993年に開発されたターボ符号が繰り返し処理を用いて高いエラー訂正能力を持つことから繰り返し処理を用いる誤り訂正符号の研究が盛んになり、1996年に再発見された。そして LDPC 符号は陸上高速移動通信をはじめとして、衛星デジタルテレビ規格、次世代ローカルエリアネットワーク規格、海底ケーブルの光通信規格、量子通信、ハードディスクの信号処理回路など、信頼性が要求される通信路において、飛躍的な伝送容量の改善効果とロバストネス向上をもたらすことが示され、LDPC 符号を標準規格として採用する動きが活発化している。

ウ) LDPC 符号は高い処理利得以外に、これまでよりも符号化および復号の処理回路を簡素化と、並列化による高速動作が可能という 2 つの特徴をもつ。

2. 研究の目的

将来の木星以遠の深宇宙探査は、大口径反射鏡アンテナや大出力増幅器による送信電力の増大が要求されるものの、搭載重量や電源確保の制約などから、等価等方放射電力

(EIRP)を増大させて通信品質を向上させることは難しいため、従来技術で深宇宙通信システムを構築しようとする場合、地上系アンテナは、これまで以上に大型化し、その建設には莫大なコストを必要とする。

このため惑星探査の超遠距離通信において誤り訂正符号に LDPC 符号化装置を適用することができれば、観測成果を地球へ送信する際の通信速度の改善、信頼性の向上などにより、打ち上げや次世代深宇宙局の建設コスト削減に寄与することができる。

長期にわたる観測ミッション遂行では、探査機本体やローバのプログラム書き換えなど、通信システムの柔軟性と品質の向上によって、観測データの量と、質そのものを改善することで、より大きな科学観測成果がもたらされることが期待されている。

そこで本研究では将来の惑星探査に不可欠な、超遠距離通信の要素技術として、誤り訂正符号に着目し、LDPC 符号化装置を適用するための研究をおこなった。

3. 研究の方法

そこで本研究では将来の惑星探査に不可欠な、超遠距離通信の要素技術として、誤り訂正符号に着目し、LDPC 符号化装置の設計試作、評価を行う。そのために以下の LDPC 符号の伝送特性を明らかにする。

ア) 符号化率と符号長および符号化利得の関係性を明らかにする。例えばアップリンクで探査機のプログラム書き換えをおこなうような信頼性を必要とする場合や、低利得アンテナでも確実にコマンドを通したい場合、またダウンリンクで高速に高解像度の画像などを落としたいなど場合など、各運用状況に対する要望に応じて、最適な符号化率と符号長の組み合わせを明らかにする。

イ) 復号方法の違いによる計算量やハードウェア規模、符号化利得の関係を明らかにする。LDPC 符号の代表的な復号方法として Sum-product 復号法やこれを簡略した Min-sum 復号法、Bit-serial BP 復号法などの復号方法があり、それぞれにトレードオフがある。よって復号方法やアルゴリズムの違いによって生じるハードウェア規模、繰り返し復号の回数、符号化利得などの処理性能を総合的に明らかにする。

ウ) 宇宙用 FPGA(field programmable gate array)への実装を目的とした、ハードウェア規模、アルゴリズムの最適化をおこなう。また実装した LDPC 符号化装置をテストベッドに組み込み評価、検証をする。探査機に半導体デジタル回路を搭載する場合、宇宙放射線によってソフトウェアやラッチアップを

生じる。耐放射線デバイスはハードウェア規模に大幅な制約がある。宇宙用として唯一生産されているアンチヒューズ FPGA に実装しなくてはならないため、パフォーマンスだけでなく実装の容易さや、アルゴリズムの最適化が不可欠である。最終的にテストベッドへ組み込み評価をおこない、シミュレーションと比較することで妥当性を検証する。

3. 1 LDPC 符号の伝送特性のシミュレーションによる評価

ア) 評価方法の確立するため、宇宙用 LDPC 符号化装置のシミュレーション系をワークステーション上に構築する。シミュレーション系が正しく動作しているかどうかを、その他の通信シミュレータと比較検証する。

イ) 符号化率、ブロック長、復号方法ごとの符号化利得と計算量のシミュレーション比較から、各探査ミッションに最適な符号化率、符号長を選択する。

ウ) LDPC 符号の符号化利得が従来の符号化以上の処理効果が得られているかどうかを、比較の通信シミュレータを用いて比較する。

3. 2 LDPC 符号化装置のハードウェア開発。

ア) 符号化装置を評価するテストベッドの構築。

これらのテストベッドは、ベクトル信号発生装置、任意波形発生装置、ノイズ発生装置、スペクトルアナライザ、パワーメータ、高速デジタルオシロスコープから成る。

イ) LDPC 符号化処理装置のアルゴリズム評価および最適化、宇宙用 FPGA を使用することを念頭に置いた符号化、復号化処理のハードウェア規模を見積り。

FPGA 開発環境を用いて論理合成、モデルベースのシミュレーションからアルゴリズムの最適化をおこなう。

ウ) LDPC 符号化処理装置の FPGA への実装と検証、および試作。

FPGA 開発ツールで論理合成した LDPC 符号化装置のコードは、FPGA ブレッドボード上に書き込むことで内部に論理回路を形成する。

エ) テストベッドを用いて LDPC 符号化処理装置の性能評価する。

テストベッドに組み込んだ FPGA ブレッドボードを符号化処理装置として動作させ、平均ビット誤り率(BER)を用いて符号化利得の性能評価をする。

3. 3 試作ハードウェアとシミュレーションの比較。

試作した LDPC 符号化処理装置の要素技術や IP を用いて高周波 (RF) 系を含めた符号化器/復号器の伝送特性の評価を行い、各プ

ロジェクトと協力して衛星搭載用トランスポンダ、地上系の通信システムの改良・拡張(次世代深宇宙局の設備等)などのプロジェクトへ提案する。

4. 研究成果

CCSDS で標準化された代表的な符号化形式として、探査機へアップリンクの命令回線で使用される BCH 符号、およびダウンリンクのテレメトリ回線で使用される畳み込み符号が挙げられる。Regular LDPC 符号、BCH 符号、および畳み込み符号、それぞれの符号化利得についてビット誤り率(BER)を用いて評価するために、シミュレーション系を構築した。それらを比較した結果、命令回線のような 64bit 程度の短い符号長では、LDPC 符号は BCH 符号に比べ約 3.9 dB の符号化利得が大きく、一方のテレメトリ回線では LDPC 符号(符号長 4096 bit)の方が畳み込み符号(符号化率 1/2, 拘束長 7, 軟判定ビタビ復号)に比べ約 2.6 dB 符号化利得が大きいことがわかった。このことは従来の符号化形式から LDPC 符号に変えることで、一定の距離であれば通信速度を改善でき、通信速度が一定ならば通信距離を、利得分だけ改善できることがわかった。これは BPSK 変調を仮定した場合 BCH 符号に比べ、同じ伝送帯域でも誤り訂正によって約 1.4 倍の通信速度の改善効果がある。同様に LDPC 符号(ブロック長 4096 bit)であれば畳み込み符号よりも約 1.3 倍の通信速度の改善となる。

実装コストやハードウェア損失を評価するため、シミュレーション系による評価と並行して、LDPC 符号化装置のハードウェア実装のためのテストベッドを構築した。テストベッドは、AD・DA 変換器とデジタルアップダウンコンバータを持つプログラマブルロジックデバイスボードを PC に組み込み白色ガウス雑音を重畳することで S/N を設定できるようにしている。この他に、上記シミュレーション系の妥当性を検証するために、通信シミュレータを構築し、従来の符号化方式との比較評価をおこなった。

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 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

富木淳史, 戸田知朗, 小林岳彦, 梅比良正弘, 鹿子嶋憲一, 岩切直彦, “太陽系を超える次世代深宇宙通信への挑戦 - Ka 帯技術レベルの評価と開発シナリオ -,” 第 9 回 宇宙科学シンポジウム, 2009 年 1 月.

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/tech/deepspace/index.shtml>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富木 淳史 (TOMIKI ATSUSHI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究本部 助教

研究者番号：50455466

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：