

4-4 リピータモードによる誤り訂正符号の効果の実証実験

4-4 Transmission Experiments on OICETS Repeater Mode for Verification of Channel Coding Effect

岡本英二 荘司洋三 豊嶋守生 高山佳久

OKAMOTO Eiji, SHOJI Yozo, TOYOSHIMA Morio, and TAKAYAMA Yoshihisa

要旨

衛星-地上間光通信では、伝搬路における大気ゆらぎやビーム捕捉及び追尾誤差により受信光電力が変動し、伝送品質が劣化してしまう。10 Gbps を越える次世代の光衛星通信を実現するためには、この変動を収容するような効果的な通信路符号化などの適用が必須であると考えられた。そこで本研究では光衛星通信における強力な誤り訂正符号である LDPC (low-density parity check) 符号の適用を検討した。伝送装置に実装できるための計算機シミュレーションによる符号設計を行い、その結果を元にしてリアルタイム復号が可能な送受信装置を構築した。そして OICETS (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite) のリピータモードを用いて符号化データの伝送を行い、実証実験を実施した。オフライン復号解析の結果、限定的ながら効果が得られたことを確認した。さらに実験の結果を踏まえて、さらに符号化性能を上げるために必要な符号設計についての考察を行った。本稿では以上について報告する。

In satellite-to-ground laser communication, the received optical power often decreases by air turbulence, beam pointing error, and tracking error, resulting in a transmission quality deterioration. To avoid this, channel coding should be adopted in such laser communications. In this paper, we consider applying a low-density parity check (LDPC) code, one of the strong error correcting codes, for the Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite (OICETS) laser communication. A suitable code in terms of field programmable gate array (FPGA) implementation is designed by computer simulation analysis and based on these results, the three-mode realtime LDPC decoder is composed. Then, we carried out the demonstration experiment in which LDPC-encoded data were transmitted in uplink and downlink with the repeater mode of OICETS. As a result of its offline decoding analysis, we found that the channel coding effect was obtained in a limited way. Finally, from this result, we consider a better code design for the satellite-to-ground laser communication to improve the performance.

[キーワード]

OICETS リピータモード, 誤り訂正符号, LDPC 符号, 伝送実験

OICETS repeater mode, Error correcting code, LDPC code, Transmission experiment

1 まえがき

通信の大容量化への需要を満たすシステムの1つとして、地球規模での大容量ネットワークが構築でき、地球上の災害にも強く、高い直進性による高秘匿性を有する光衛星通信が近年注目されている。しかしながら光無線通信は、特に長距離伝

搬時に伝搬路における大気ゆらぎなどにより電波とは異なる減衰を受け品質が劣化してしまうことが報告されている。2006年に実施された OICETS (Optical Inter-orbit Communications Engineering Test Satellite) -地上間実験^[1]においては、同期外れを除外しても上り・下りリンクとも受信光信号の強度が変動することが明らか

になっている [2]。このように 10 Gbps を越える次世代の光衛星通信を実現するためには、この変動を収容するような効果的な通信路符号化の適用が必須であると考えられた。文献 [3] では、OICETS 伝搬路に対して様々な符号化を施す検討が行われ、ターボ符号適用の効果があることが示された。そこで本研究ではこの検討を元に、2008 年度の OICETS 実験において効果的な通信路符号化を設計し、実証実験を行うことを目的として検討を行った。ここで強力な通信路符号化手法にはターボ符号 [4] と LDPC (low-density parity check) 符号 [5] がある。両者には大きな特性差はないが、LDPC 符号では実装の容易化ならびにパケット構成との親和性の高さ、符号長などの設計変更の容易さがあるため、今回は LDPC 符号を用いるものとした [6]。

本稿では以下、**2** で LDPC 符号について概説し、**3** で伝送装置に実装できる、OICETS に適した LDPC 符号の設計と計算シミュレーションによる検討結果を述べる。そして **4** にて OICETS 上りリンクの伝送誤りの影響を明らかにし、**5** で OICETS のリピータモードを用いた伝送系の構築、**6** で実証実験の結果について説明し、**7** で符号化性能を上げるために必要な符号設計についての考察を行う。最後に **8** にてまとめを述べる。

2 LDPC 符号と Sum-product 復号

LDPC 符号は繰り返し復号処理を行う誤り訂正符号の一種で、非常に疎なパリティ検査行列により定義される線形ブロック符号である。LDPC 符号とその復号法である Sum-product アルゴリズムの組み合わせは非常に高い誤り訂正能力を持ち、符号長が十分長い場合にはターボ符号より優れており、シャノン限界に迫る性能を持つ。さらに、ターボ符号と比べて復号演算量が少なく、様々な符号化率や符号長への拡張が容易であることが挙げられる。また、符号の配列がランダムなためインターリーバの効果は符号語内に含まれており、バースト誤りの訂正能力が高い。LDPC 符号には検査行列の各列の重みが一定である Regular LDPC と一定でない Irregular LDPC が

あり、一般には良い列重みと行重みの分布を持つ Irregular LDPC 符号が Regular LDPC より優れたビット誤り訂正能力を持つことが知られている。ただし、Irregular LDPC 符号はランダム配置ではないため、符号長や次数の選択によってはエラーフロアが生じることがある。本研究では種々の設定の LDPC 符号を実装し実験により評価することを目的としているため、構築の容易さを重視し Regular LDPC 符号を用いることにした。

以下に LDPC 符号の代表的な復号法である Sum-product 復号法について説明する。Sum-product 復号法には確率領域 Sum-product 復号法と対数領域 Sum-product 復号法があるが、本研究では数値計算上での取り扱いがしやすくハードウェアの実装に向けた対数領域 Sum-product 復号法を用いた。以下にそのアルゴリズムを説明する。

BPSK 変調時の符号長 N の 2 値送信ビット列を x 、受信信号列を r とすると、加法的白色ガウス雑音 (additive white Gaussian noise: AWGN) 通信路を通して受信された場合の対数尤度比 (log likelihood ratio: LLR) は次式により定義される。

$$\lambda_n = \ln \frac{P(r_n | x_n = 0)}{P(r_n | x_n = 1)} = \ln \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(r_n - 1)^2}{2\sigma^2}\right\}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(r_n + 1)^2}{2\sigma^2}\right\}} \quad (1)$$

$$= \frac{-(r_n - 1)^2 + (r_n + 1)^2}{2\sigma^2} = \frac{2}{\sigma^2} r_n \quad (1 \leq n \leq N)$$

ここで σ^2 は雑音の分散である。情報長を K とした場合、パリティ検査行列 H は $(N-K)$ 行 N 列となる。このパリティ検査行列に対応して図 1 のようなタナーグラフが構成できる。タナーグラフ

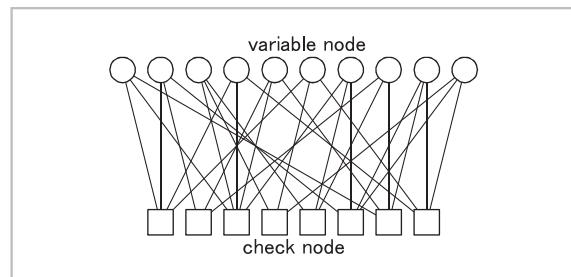


図 1 タナーグラフの例

フの上部は変数ノード (variable node) といい、検査行列の列数 N に等しいノード数を持ち、ノード n は第 n 列目に相当する。同様に下部はチェックノード (check node) といい、行数 ($N-K$) に等しく、ノード m は第 m 行目に相当する。そしてパリティ検査行列の m 行 n 列の要素を $H_{m,n}$ とすると、 $H_{m,n} = 1$ に対応する変数ノード n とチェックノード m 間が接続される。ここで変数ノードの LLR を $u_{m,n}$ 、チェックノードの LLR を $v_{m,n}$ とする。 $u_{m,n}$ を事前 LLR と呼び、初期値を 0 とする。各行の $H_{m,n} = 1$ を満たす (m,n) を用いて外部 LLR $v_{m,n}$ を次式によって全ての行に対して更新する。

$$v_{m,n} = \left\{ \prod_{n' \in N_m, n'} \text{sign}(\lambda_{n'} + u_{m,n'}) \right\} f \left\{ \sum_{n' \in N_m, n'} f(\lambda_{n'} + u_{m,n'}) \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\text{sign}(x)$ 、 $f(x)$ はそれぞれ次式で定義される。

$$\text{sign}(x) \equiv \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$f(x) = \ln \frac{e^x + 1}{e^x - 1} = \ln \left(\tanh \left(\frac{x}{2} \right) \right) \quad (4)$$

(4) 式で定義された関数 f を Gallager の f 関数と呼ぶ。次に、(2) 式で更新された外部 LLR $v_{m,n}$ を用いて事前 LLR $u_{m,n}$ を次式により全ての列に対して更新する。

$$u_{m,n} = \sum_{m' \in M_n, m'} v_{m',n} \quad (5)$$

その後、 $n \in \{1, \dots, N\}$ について次式の計算を行い、一時推定語 $\hat{c} = (\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_n)$ を計算する。

$$\hat{c}_n = \begin{cases} 0, & \text{if } \text{sign} \left(\lambda_n + \sum_{m' \in M_n} v_{m',n} \right) = 1 \\ 1, & \text{if } \text{sign} \left(\lambda_n + \sum_{m' \in M_n} v_{m',n} \right) = -1 \end{cases} \quad (6)$$

ここで求めた一時推定語が線形符号の符号語条件

$$\hat{\mathbf{c}} \mathbf{H}^T = \mathbf{0} \quad (7)$$

を満たせば、復号結果として出力し繰り返し処理を終了する。満たさなかった場合は、この処理を繰り返す。最大繰り返し回数に達しても式 (7) を満たさなかった場合はその時点での推定語を復号結果として出力する。

本研究では、光衛星通信において高い誤り訂正

能力を獲得することと、実装が相対的に容易な線形符号であることから、この Sum-product アルゴリズムを用いた LDPC 符号を適用した。この場合、実装のためには Sum-product アルゴリズムの変数の量子化が必要となるが、これは性能と所要メモリ及び演算量のトレードオフとなる。そこで以下にシミュレーションによりその関係を明らかにする。

3 FPGA 実装のための量子化の影響および実装に適した符号設計

2 のように LDPC 符号の Sum-product 復号は軟値を用いるため、小数の演算が必要となる。計算機シミュレーションにおいては一般に復号計算に用いる LLR は浮動小数点変数として計算を行うが、実装時には変数のメモリ長の制限から量子化を行う必要がある。この量子化による劣化の影響を確認するため、計算機シミュレーションにより量子化に必要なビット数の評価を行った [7]。復号器の中で量子化を行ったパラメータは、LLR 導出の主要な変数である (1) 式の通信路値 λ_c 、(5) 式の対数事前値 $u_{m,n}$ 、(2) 式の対数外部値 $v_{m,n}$ の 3 つである。(6) 式の事後 LLR はこれらの和により算出されるため量子化操作は行わなかった。まず量子化を行わないときの、これらのパラメータの値の分布を確認した。符号長 1032、レート 0.502、 $E_b/N_0 = 2$ dB、(4) 式の Gallager 関数の最大値 x を 10、繰り返し復号演算 7 回目のときの λ_c 、 $u_{m,n}$ 、 $v_{m,n}$ 、事後 LLR の絶対値の分布を図 2 に示す。この例の場合 λ_c は $x = 10$ 、 $u_{m,n}$ 、 $v_{m,n}$ は $2x = 20$ 付近まで分布することが分かった。この結果を元に量子化のシミュレーションを行う。 λ_c 、 $u_{m,n}$ 、 $v_{m,n}$ に対しそれぞれ量子化のビット数を n とし、最大値を m とする。すると値の数は 2^n 個になり、範囲は $-m \sim m$ となる。 λ_c 、 $u_{m,n}$ 、 $v_{m,n}$ への m をいずれも 8 とし、復号最大繰り返し回数を 40 回として、符号長 1032、レート 0.502 としたときのビット誤り率 (bit error rate: BER) 特性を図 3 に示す。結果より量子化ビット数が 8 ビット以上であればほぼ量子化無しの場合と同様の特性になることが分かった。 $m = 8$ 、 $n = 8$ の場合は、量子化 1 ステップ辺りの差は $2m/2^n = 0.0625$ である。次

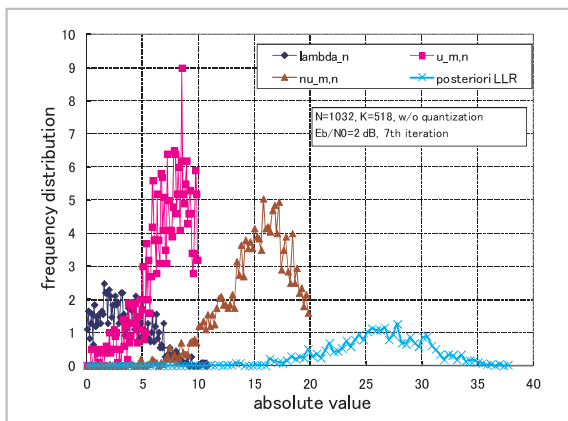


図2 復号過程における λ_c 、 $u_{m,n}$ 、 $v_{m,n}$ 、事後LLRの分布

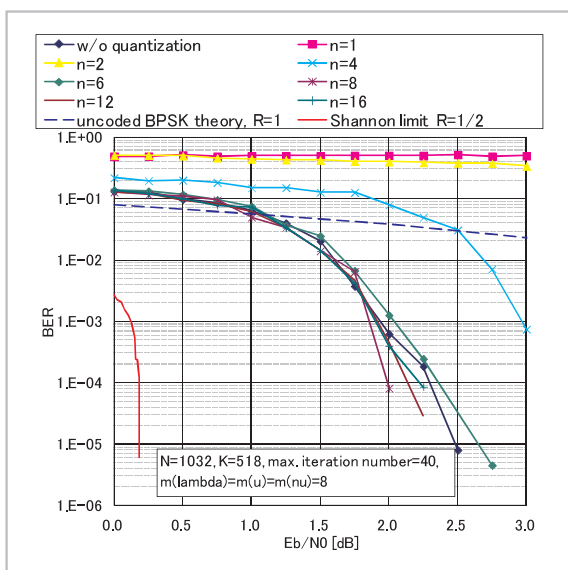


図3 量子化ビット数に対するBER特性

に、 $n = 8$ ビットとして m の値を変化させた場合のBER特性を算出した。図4に示すように、全体的にそれほど大きな差は出ていないことが分かるが、 m を8以上にすれば問題ないことが分かる。

最後に Gallager 関数の範囲を2のべき乗にしたときの特性、および5で述べる(912,458)符号の量子化に対する特性の確認を行った。変調方式はBPSK、通信路値 λ_c 、対数事前値 $u_{m,n}$ 、対数外部値 $v_{m,n}$ に対しそれぞれ量子化のビット数を $n = 8$ 、最大値を $m = 8$ とし、復号最大繰り返し回数を40回としたときのAWGN通信路における特性を図5に示す。図に示すように、いずれのBER特性もほぼ一致していることが分か

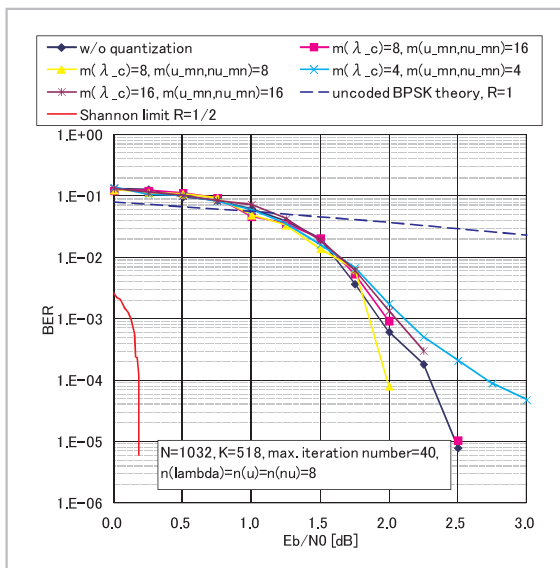


図4 パラメータの範囲mに対するBER特性

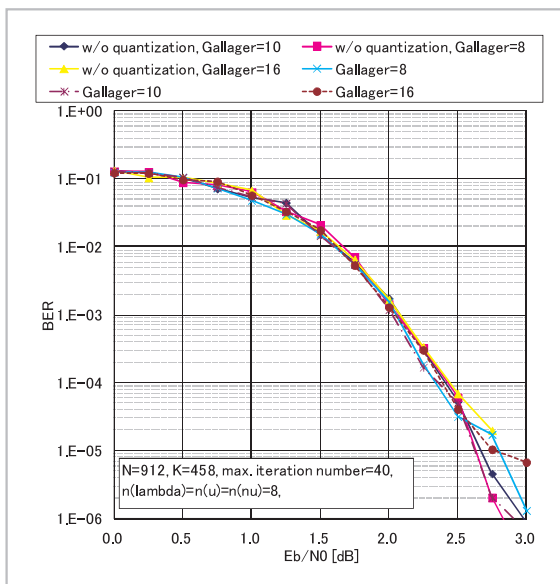


図5 (912,458) LDPC 符号の量子化、Gallager 関数の範囲に対するBER特性

り、Gallager 関数の範囲はある程度大きければ変化はないことが分かった。これより、量子化のビット数は $n = 8$ 、最大値 $m = 8$ で、Gallager 関数の範囲も8でよいことが分かった。

以上より、本シミュレーションの結果からは、LDPCの符号化において量子化のビット数は8、パラメータの範囲は $-8 \sim 8$ 、Gallager 関数の上限値も8とすれば概ね劣化なく復号できることが分かった。

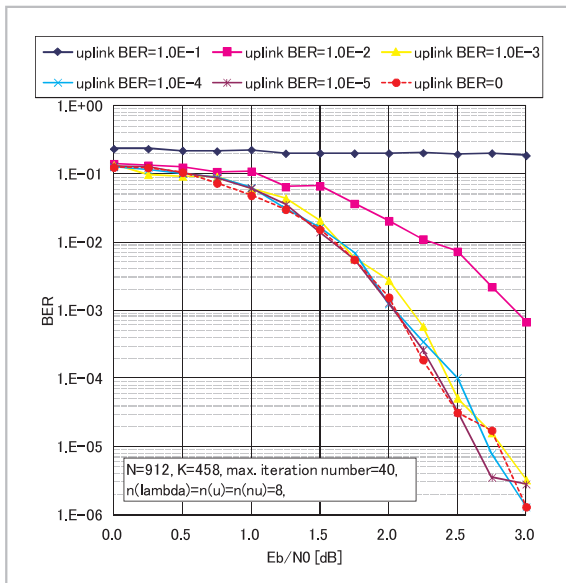


図6 上りリンクのビット誤りを考慮した折り返しリンクのBER特性

4 OICETS 折り返しリンクにおける上りリンク誤りの影響

OICETSの光衛星間通信機器(LUCE: Laser Utilizing Communication Equipment)の折り返しリンクにおいては、上り信号が衛星搭載機器において一旦硬判定される。そこでその影響についてシミュレーションにより検討を行った。LDPC符号伝送の場合、通信路の途中における硬判定の影響は以下の通りと考えられる。上りリンクの硬判定で誤ったビットが折り返されて地球局で受信された場合、正常な判定の場合と比べ受信信号の通信路値 λ_c の符号が反転している点が異なる。そこで、上りリンク硬判定のビット誤り率をパラメータとして、横軸に下りリンクの E_b/N_0 dB、縦軸に折り返し通信全体のBER特性としたシミュレーションを行った。変調方式はBPSK、量子化のビット数は $n=8$ 、最大値 $m=8$ 、復号最大繰り返し回数を40回として、下りリンクがAWGN通信路とした場合の結果が図6である。図より上りリンクのビット誤り率が 10^{-3} 以下であれば、LDPCの誤り訂正能力により上りリンク無誤りのときとほぼ同じBER特性が得られることが分かった。この結果から判断すれば、上りリンクの所要品質は $BER=10^{-3}$ であるといえる。しかしながら実際の光通信ではパー

スト誤りが多く発生するので、その際の検討もさらに必要であろう。

5 OICETS 実験に適用するLDPC符号のモードの決定およびリアルタイム受信装置

3より実験時に用いるLDPCの実装の際8ビットの量子化を行うことで量子化しない場合の特性と同様の特性が得られることが分かった。また、[6]の文献より、装置に用いるFPGA(field programmable gate array)Xilinx XC4FX100F1152-11のリソースを最大限に使用すると符号長は912 bitが上限となり、符号化率や繰り返し回数はリソース使用率にあまり影響を与えないことが分かった。実験では、符号設定の違いが伝搬路や機器の特性変化、性能劣化に埋もれてしまうことを避けるために、性能の違いが明確なLDPC伝送設定を3つ定めることにした。まず、与えられたリソースの範囲で最高性能を期待する符号mode 1として、 $R \approx 0.5$ (912,458) #40を用いた。ここで#は最大復号繰り返し回数で、モードによらず全て40である。次に比較的特性差の観測が期待できる符号長・符号化率として、同符号化率で符号長が短い $R \approx 0.5$ (258,131)をmode 2とし、更にmode 2とほぼ同じ長さの符号長で、符号化率が高い $R \approx 0.8$ (252,206)をmode 3とした。この3 modeのAWGN通信路におけるBER特性を図7に示す。これより、上りリンクの所要性能である $BER=10^{-3}$ においてmode 1とmode 2で約0.7 [dB]、mode 2とmode 3で約1 [dB]の差が得られていることが分かる。よって機器の特性変化、性能劣化に埋もれても性能の差異が得られるmodeとして表1に示すこの3 modeをFPGAに実装することとした。図8に受信回路の外観図を示す。受信回路は1枚のボードにより構成されており、A/D変換器(A/D converter: ADC)と2個のFPGAが搭載されている。入力信号はADCにより最大6 GHzの周波数でサンプリングされ、8ビットのデジタルデータに変換される。その後前段のFPGA(XC5VVSX95)においてPPM復調、フレーム同期処理がなされ、後段のFPGA(XC4FX100)に入力される。図9に後段

の XC4FX100 による LDPC 復号処理部のブロック図を示す。図9中の番号は2の式番号である。このFPGAは150MHz程度で駆動され、2で述べた各式による Sum-product 復号処理が並列に実行される。そして誤り訂正後のデータが出力される。

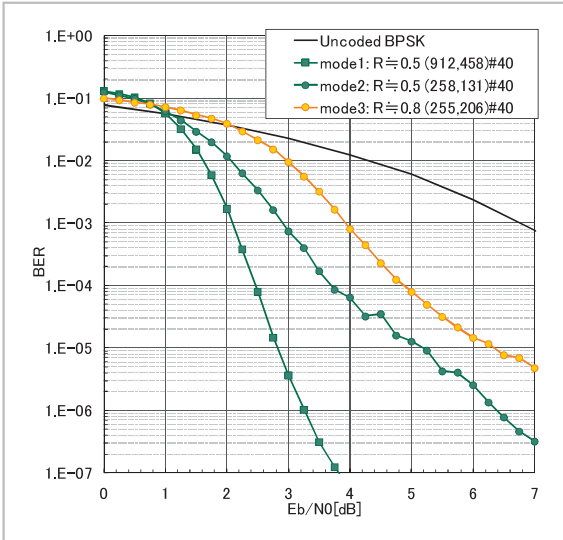


図7 OICETS 実験に用いる3モードのAWGNにおけるBER特性

表1 3mode (LDPC code for FPGA)

	Code rate R	Code length M	Info bit N	Num of iterations
mode1	about 0.5	912	458	40
mode2	about 0.5	258	131	40
mode3	about 0.8	252	206	40

6 実験系と実証試験の概要

設計したLDPC符号を用いてOICETSとの伝送実験を行った。図10に実験系を示す。送受信機はNICT小金井の光地上局に設置した。送信側ではオフラインで入力したLDPC符号データを2PPM変調し送信する。OICETSは複数の通信モードを備えているが、今回の実験においては図10に示すように地上局から受信した上り2.048Mbpsの2値PPM信号を硬判定復調し、これを下りのデータとして折り返し伝送するリピータモードを使用した。ただし、上りと下りで



図8 リアルタイム受信回路の外観図

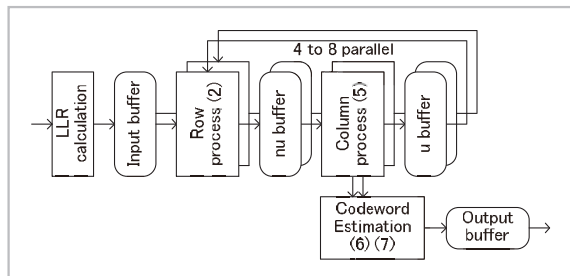


図9 FPGAによるLDPC復号処理のブロック図

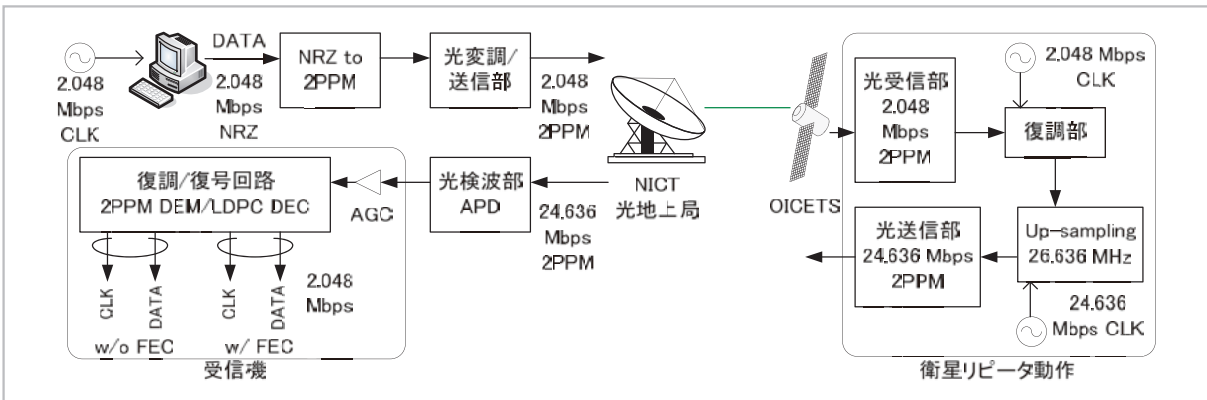


図10 OICETS リピータモードを用いたLDPC符号伝送の実験系

データレートなどの仕様が異なるため、衛星は上りデータを復調して得た NRZ データを、更に下りの基本クロックレートとなる 24.636 MHz でアップサンプリングし、このデータを下りの 24.636 Mbps の 2 値 PPM 信号として伝送する。地上局における受信機は、リアルタイムで下り信号の復調と復号処理を実行する。さらに復号器は復号結果として、LDPC 復号後のデータ (図 10 中 w/FEC) と LDPC 復号前の復調後データ (同 w/o FEC) を同時に出力する。これにより LDPC の誤り訂正の効果をリアルタイムで確認することが可能となる。

図 11 に実験で用いた伝送フレーム構成を示す。プリアンブル部はすべて 9 段の PN 系列より構成される。まず同期獲得用のユニークワード (UW) として 5 つの PN 系列が連続し、その後フレーム開始信号 (start frame delimiter: SFD) が挿入される。そして 2 つの PN 系列を用いて、ペイロード内の LDPC 符号語の mode 番号を通知する (mode identifier)。そしてペイロード部には LDPC 符号語が mode 毎に異なる数配置される。1 実験フレーム長を揃えるため、mode 1 から 3 でそれぞれ 575、1987、3366 符号語が挿入される。また LUCE は 15 段 PN 系列の BER を測定する機能を有しているため、上りリンクの BER を観測するためのパイロット PN 系列を 16 個ペイロードの後段に挿入する。この PN 系列は地上受信側でもオフラインにより BER 測定に使用できる。これらを 1 実験フレームとして送信する。送信機における送信は、予めオフラインで PC を用いて伝送フレームを作成しておく。OICETS-地上局間の通信リンクが確立した後に用意された伝送フレームを送信し、リピータモードで折り返された信号を受信し、外部出力から出てきたデータを蓄積装置に入力した。LDPC 符号の性能評価は蓄積装置のデータをオフラインで解析することによって行った。

7 実験結果

OICETS-地上間の通信実験は背景光の影響を防ぐために夜間である必要があり、また低軌道衛星であることから実験可能時間は 1 パスあたり 10 分未満となる。さらに種々の実験項目が予定

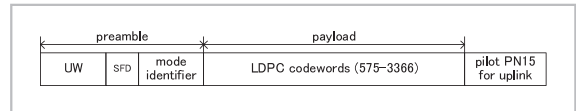


図 11 伝送フレーム構成

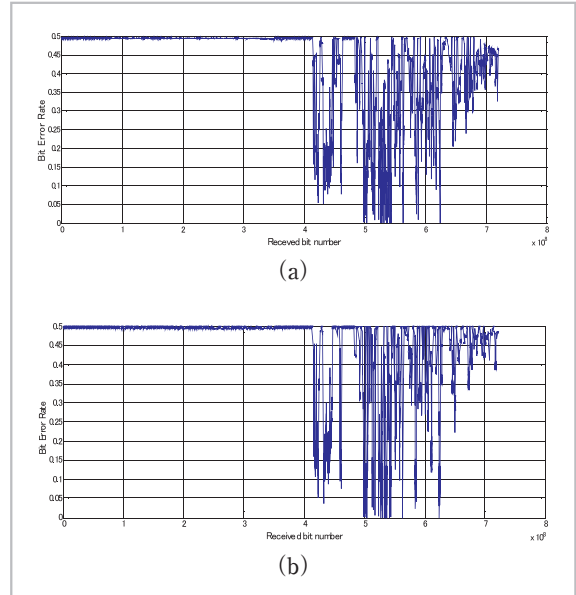


図 12 mode 1 の受信 BER 特性

(a) LDPC 復号前の受信データ
(b) LDPC 復号後の受信データ

されていたため、本符号伝送実験は数回のみ実施できた。このように限られたパスの中において、LDPC フレーム送受信実験は 3 度成功し、各 mode のフレームを受信装置に蓄積した。ただし 15 段 PN 系列を用いた上りリンク及び下りリンク BER 観測は実施できなかった。また mode 2 は測定は実施できたが有意な復号結果を得ることができなかった。その解析結果を以下に示す。

図 12 に 2008 年 12 月 18 日実施の mode 1 伝送時の、リアルタイム受信装置出力から解析した BER 特性を示す。図 12 (a)、(b) はそれぞれ無符号化、LDPC 復号のものである。横軸は伝送ビット番号すなわち時間軸であり、縦軸は実験 1 フレームあたりの BER である。BER の検出単位は (mode1 の観測ビット数 912) × (1 実験フレーム内の mode1 符号語数 575) であり、0.26 秒に相当する。図 12 (a) (b) の前半は同期獲得が得られておらずおよそ 0.5 の BER となっている。同期獲得後の後半部分は伝搬路状況に応じて変動しており、図 12 (a) (b) はほぼ同様の

BER 推移を示しているが、符号化により BER = 0 となった回数が (a) の 1 回から (b) の 6 回へと増加した。これは LDPC 符号の効果によるものであり、符号化の効果が確かめられた。しかし図 12 に示されているように BER は大きく変動しており、符号化の効果が限定的であることも明らかになった。これは光折り返しリンクの伝搬路変動周期が LDPC1 符号後の時間よりも長いためである。

次に図 13 に 2009 年 1 月 15 日実施の、mode 3 伝送時の BER 特性を示す。縦軸横軸は図 10 と同様であり、BER の検出単位は (mode3 の観測ビット数 255) × (1 実験フレーム内の mode3 符号語数 3366) の 0.42 秒である。図 13 (a) (b) の LDPC 復号による効果を比較すると、図では同様の推移であるがやや悪化したことが分かった。すなわち図中の最小 BER は図 13 (a) では 6.3×10^{-3} であったのが (b) では 1.6×10^{-2} となった。これは mode 3 の符号化率が高く、BER 検出単位内において平均的に LDPC 復号前の BER が高いことにより誤り訂正が効果的に働かず誤訂正を行ったためであると考えられる。したがって短符号長、高符号化率の設定は、想定される受信側の状態の適用範囲に検討が必要であることが分かった。

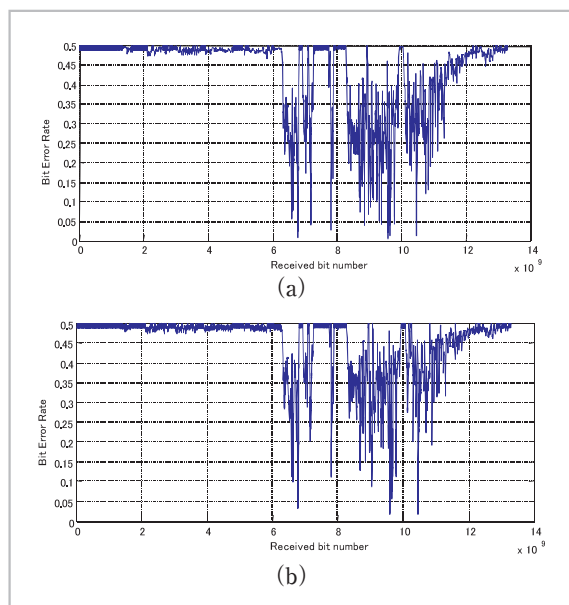


図 13 mode 3 の受信 BER 特性

- (a) LDPC 復号前の受信データ
- (b) LDPC 復号後の受信データ

以上から、限定的であるものの mode 1 における LDPC 符号化の効果が実験により確かめられた。また課題として実効的な符号長の伸長、強い誤り訂正効果すなわち低符号化率が必要であることが明らかになった。

8 特性改善のための符号構成の検討

7 のように衛星-地上間光通信の誤り訂正符号の効果を高めるには、実効的な符号語長を長くすることと、誤り訂正能力を上げることが必要である。しかし 5 で述べたように軟値復号を用いた場合、復号器の実装時に回路規模が大きくなってしまったため、符号長を伸ばすことに限界が生じてしまう。一方、[8][9]において、空間光伝送における誤り訂正符号には消失通信路のモデル化と硬値を用いた復号が有効であることが述べられている。消失通信路とは、受信側でエラーフリーとなる受信電力の閾値を設け、それを上回る場合正常受信、下回る信号は消失として取り扱う 2 値モデルである。この場合復号器は LLR などの軟値の算出が不要となり、復号器の計算量を低減できる。したがって衛星-地上間光通信における効果の高い誤り訂正符号の構成には、通信路を消失通信路として扱い、消失符号としての復号を行うことで計算量を削減し、インターリーブを用いて実効的な符号長を伸ばすことが有効であると考えられた。我々はこの検討に基づき、LDPC 符号の一種である長い LDGM (low-density generator matrix) 符号を用い、さらにインターリーブを介して実効的な符号長を大きく伸ばし、通信路を消失通信路として扱い、受信側で硬値を用いた線形復号を行うことが衛星-地上間光通信に有効であることを示した [10]。現在この検討に基づいた空間光伝送の実証を行うことを検討している。

9 まとめ

本研究では OICETS のリピータモードを用い、衛星-地上リンクでの誤り訂正符号の効果の実証を行うことを目的として検討を行った。強力な誤り訂正符号として今回は LDPC 符号に着目し、送受信機 FPGA 実装の際に 8 ビットで量子化することで量子化しない場合と同様の特性が得ら

れ、更にアップリンクで折り返されるときに所要品質は $BER = 10^{-3}$ であることを計算機シミュレーションにより明らかにした。そして実装時のリソースの使用率を考慮し、実験に用いる LDPC 符号の3つの mode を設計した。これらは符号性能の明らかな差異を得るために符号長と符号化率を比較的大きく異なるものにし、mode 1 に $R \approx 0.5$ (912,458)、mode 2 に $R \approx 0.5$ (258,131)、mode 3 に $R \approx 0.8$ (252,206) を選んだ。そして OICETS リピータモードにおいて符号伝送に成功し、限定的ながら mode 1 の符号化の効果を確認した。そして課題としてインターリーバを介した長い実効符号長が必要なことが明

らかになったため、今後の光衛星通信において、硬判定線形処理に基づく符号を設計することを予定している。

謝辞

JAXA のご関係各位に感謝申し上げます。本研究の送受信機の実装に関しては日本コントロールシステム株式会社各位のご協力をいただきました。また本研究の一部は大幸財団、科研費 23560450 の援助を受けて行われました。深謝いたします。

参考文献

- 1 M. Toyoshima, K. Takizawa., T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, H. Kunimori, T. Jono, Y. Takayama, M. Mokuno, and K. Arai, "Results of Ground-to-Space Optical Communications Experiments using a Low Earth Orbit Satellite," LEOS Annual meeting pp. 80–81, Oct. 2006.
- 2 M. Toyoshima, T. Takahashi, K. Suzuki, S. Kimura, K. Takizawa, T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, H. Kunimori, T. Jono, Y. Takayama, and K. Arai, "Ground-To-Satellite Laser Communication Experiments," IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine, Vol. 23, No. 8, pp. 10–18, 2008.
- 3 K. Takizawa, M. Toyoshima, T. Kuri, W. Klaus, M. Toyoda, and H. Kunimori, "Error Correction Coding Design for Ground-to-OICETS Laser Communications," 50th Uchu Kagaku Gijutsu Rengo Koenkai Koenshu, 2D15, 2006.
- 4 C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding," Proc. of ICC'93, Geneva, Switzerland, pp. 1064–1070, May 1993.
- 5 R. G. Gallager, "Low Density Parity Check Code," IRE Trans. Inform. Theory, IT-8, pp. 21–28, Jan. 1962.
- 6 T. Tanaka, M. Abe, M. Morimoto, Y. Kadoike, E. Okamoto, Y. Shoji, and M. Toyoshima, "Development of LDPC codes by the gallager composition method on FPGA," Proc. Int'l Conf. on Space Optical Systems and Applications, ICSOS2009-29, p. 5, Feb. 2009.
- 7 Y. Kadoike, E. Okamoto, Y. Iwanami, Y. Shoji, M. Toyoshima, Y. Takayama, and H. Kunimori, "LDPC code design for OICETS experiments in 2008," Proc. Int'l Conf. on Space Optical Systems and Applications, ICSOS2009-41, p. 6, Feb. 2009.
- 8 H. Henniger, "Packet-Layer Forward Error Correction Coding for Fading Mitigation," Proceedings of SPIE Free-space laser communications VI, Vol. 6304, pp. 630419.1-630419.8, Sep. 2006.
- 9 V. Roca and C. Neumann, "Design, Evaluation and Comparison of Four Large Block FEC Codecs, LDPC, LDGM, LDGM Staircase and LDGM Triangle, plus a Reed-Solomon Small Block FEC Codec," INRIA Research Report RR-5225, June 2004.
- 10 Y. Yamashita, E. Okamoto, Y. Iwanami, Y. Shoji, M. Toyoshima, and Y. Takayama, "A Markov-based satellite-to-ground optical channel model and its effective coding scheme," IEICE Trans. Commun., Vol. E95-B, No. 1, pp. 254–262, Jan. 2012.

(平成 24 年 3 月 14 日 採録)



おかもと えいじ
岡本英二
名古屋工業大学准教授
博士 (情報学)
通信方式
okamoto@nitech.ac.jp



しょうじ しょうぞう
莊司洋三
ネットワーク研究本部
ネットワークシステム総合研究室
プランニングマネージャー
博士 (工学)
ミリ波通信システム、光電波融合通信
システム、コヒーレント光通信システ
ム、有無線仮想化
shoji@nict.go.jp



とよしまり お
豊嶋守生
ワイヤレスネットワーク研究所
宇宙通信システム研究室室長
博士 (工学)
衛星通信、大気ゆらぎ、レーザ通信、
量子暗号
morio@nict.go.jp



たかやま よしひさ
高山佳久
ワイヤレスネットワーク研究所
宇宙通信システム研究室主任研究員
博士 (工学)
非線形光学、位相共役光学、フォト
ニック結晶、電磁波解析、宇宙光通信
takayama@nict.go.jp