

100Gbps超級光コア・メトロネットワーク向け誤り訂正技術

杉原堅也* 松本 渉***
 宮田好邦** 杉原隆嗣***
 久保和夫**

Error Correction Technologies for Optical Transmission beyond 100Gbps

Kenya Sugihara, Yoshikuni Miyata, Kazuo Kubo, Wataru Matsumoto, Takashi Sugihara

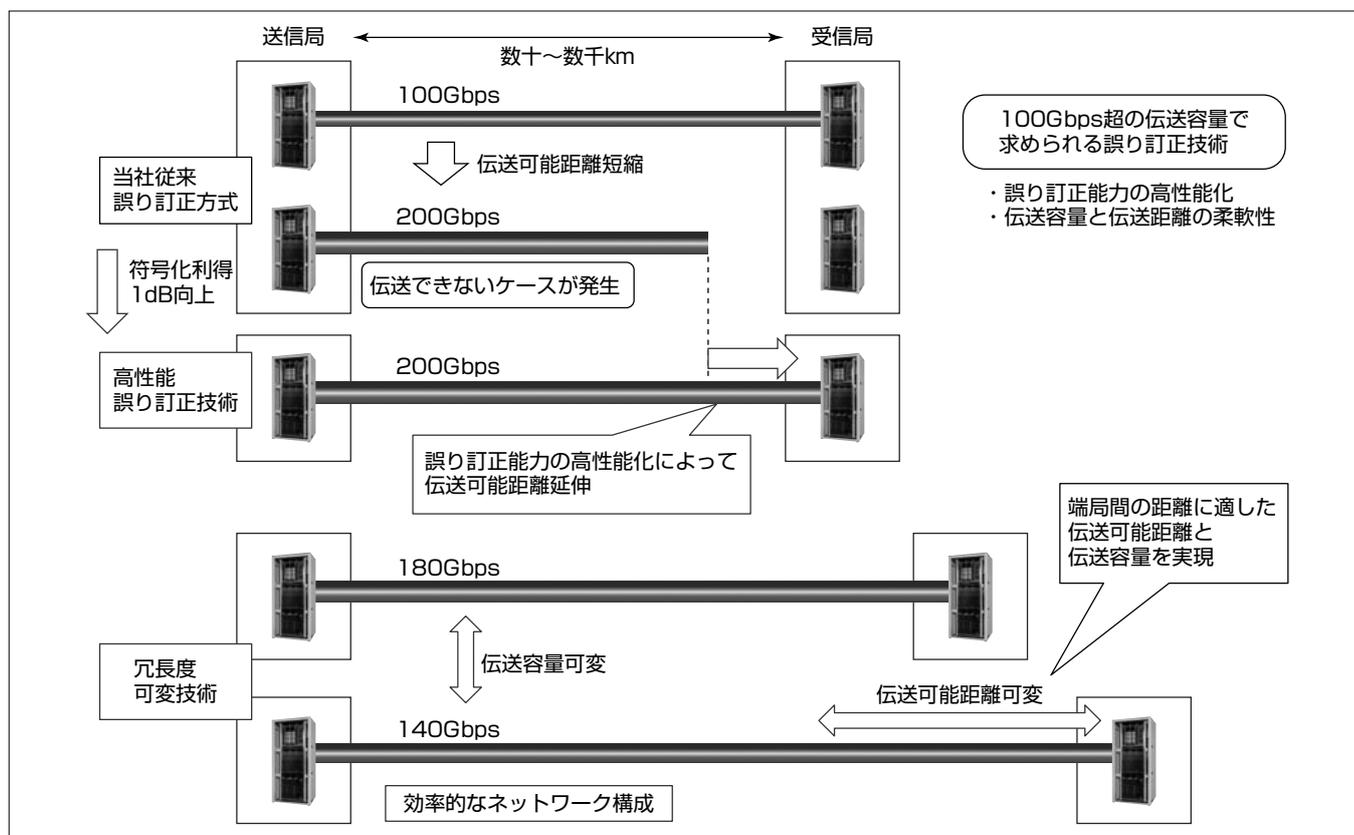
要 旨

スマートフォンの普及や映像配信サービスの拡大などを背景に、通信トラフィックは増大し続けている。今後も、年率1.4倍で増加するという予測もあり、コア・メトロネットワークや海底ケーブルネットワークの大容量化への要求が拡大している。これらを支える光波長多重伝送装置(Wavelength Division Multiplexing: WDM)では、1波長当たり100Gbpsを超える大容量化の検討が始まっている。

光通信の大容量化に必須な技術の1つである誤り訂正技術では、大容量化によって増大する伝送路雑音の影響に対応するため、誤り訂正能力の高性能化が要求されている。誤り訂正能力の高性能化によって伝送可能距離を延伸でき、中継器を増やさず大容量化できるなど効率的なネットワークが実現できる。

光通信では、誤り訂正後のビット誤り率を 10^{-15} 以下という極めて低い値にすることが要求される。大容量化によって雑音の影響が増大した環境で、この要求を実現することが課題であった。そこで、LDPC(Low-Density Parity-Check)符号の性能劣化要因を分析して、これに基づく改良に加えてBCH(Bose Chaudhuri Hocquenghem)符号と組み合わせることで、目標性能を実現した。その結果、三菱電機の従来方式に比べて符号化利得を約1dB向上させた。

さらに、誤り訂正能力に関する冗長ビット数を可変にして、トレードオフの関係にある伝送可能距離と伝送容量とを柔軟に調整可能とした。これによって、ネットワークの要求に応じて効率的なシステムを構築することができる。



100Gbps超の高速伝送を実現する誤り訂正技術

100Gbpsを超える伝送速度では100Gbpsと比べて伝送可能距離が短縮される。例えば、従来100Gbpsで伝送可能であった端局間でも200Gbpsでは伝送できないケースが発生する。誤り訂正技術の高性能化で伝送距離を延伸することによって、200Gbps通信が可能なエリアが広がる。また、冗長度可変技術によって伝送距離を伝送速度100~200Gbpsに対応して柔軟に調整すれば、伝送距離に応じた効率的な伝送容量のネットワークが構成できる。

1. ま え が き

スマートフォンの普及や映像配信サービスの拡大などを背景に、通信トラフィックが増大し続けている。今後も、年率1.4倍で増加するという予測もあり、コア・メトロネットワークや海底ケーブルネットワークへの大容量化要求は更に強まっている。これらを支えるWDMでは、従来の1波長当たり10Gbpsや40Gbpsから、1波長当たり100Gbps又は2波長で100Gbpsといった大容量システムへの移行が始まっている⁽¹⁾。さらに、1波長当たり100Gbpsを超える更なる大容量化の検討が既に始まっており、各要素技術の議論や方式提案が活発になっている。

本稿では、光通信の大容量化に必須な要素技術の1つである誤り訂正技術の誤り訂正能力の高性能化技術と、伝送容量と伝送距離とを柔軟に調整する冗長度可変技術について述べる。

2. 高性能誤り訂正技術

100Gbps長距離伝送は、デジタルコヒーレント技術によって実現した⁽²⁾。超高速LSI(Large Scale Integration)のデジタル信号処理で信号波形歪み(ひずみ)が低減でき、また偏波多重QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)などの多値位相変調方式が可能となり、周波数利用効率が向上している。

100Gbpsを超える大容量化の実現のため、変調方式を従来のQPSKから16QAM(16-ary Quadrature Amplitude Modulation)等の周波数利用効率がより高い方式を採用することが有力視されている。しかし、QPSKに比べて16QAMでは送信ビットを表す信号点間の距離が狭まり、伝送中に光信号が受ける雑音の影響が大きくなる。したがって、ビット誤りが増加して伝送可能距離が短縮してしまう。そこで、誤り訂正技術の高性能化が必要となる。

2.1 誤り訂正技術

誤り訂正技術は、データ送信時に冗長なビットを付加して送信することで伝送時に発生したビット誤りを受信側で訂正する技術である。どのような冗長ビットを付加するかは誤り訂正方式によって異なる。訂正可能なビット誤りの数や信号対雑音比劣化への耐性、つまり誤り訂正能力は、誤り訂正方式によって異なる。冗長ビットはパリティビットと呼び、通信対象のデータビットを情報ビットと呼ぶ。冗長ビットの数を情報ビットの数で割った値を冗長度と呼ぶ。

光通信では、極めて低いビット誤り率の通信品質が求められる。光通信での誤り訂正方式の性能は、誤り訂正処理後に残留するビット誤り率が 10^{-15} となる誤り訂正前のQ値(光信号品質の尺度)と、誤り訂正技術を用いない場合にビット誤り率が 10^{-15} となるQ値との差で評価されて、この差の絶対値を符号化利得(Gross Coding Gain : GCG)と呼ぶ。

呼ぶ。GCGから冗長に伝送したパリティビット分の帯域ペナルティ $10\log_{10}(1 + \text{冗長度})$ を差し引いた値をネット符号化利得(Net Coding Gain : NCG)と呼ぶ。

2.2 技術課題と誤り訂正方式

デジタルコヒーレント方式は高性能な誤り訂正方式である軟判定誤り訂正技術との親和性が高く、その中でも高性能かつデジタル回路での高速処理が可能なLDPC符号が誤り訂正方式として広く採用されている。しかし、LDPC符号を含む多くの誤り訂正方式では、伝送路の信号対雑音比を高くしても高確率でビット誤りが残留するエラーフロア現象が発生する(図1)。一方、誤り訂正後のビット誤り率を 10^{-15} 以下と極めて低くすることがシステム要求としてあり、エラーフロアの除去が高性能化に向けた課題である。

エラーフロア除去のため、BCH符号をLDPC符号と組み合わせた接続符号が提案されている。ここでも、基本方式として接続符号を用いる(図2)。しかし、エラーフロアの高い従来のLDPC符号を用いるとBCH符号の冗長度を上げる必要があり、LDPC符号に割り当てる冗長ビットが相対的に減少して接続符号が性能劣化するという問題がある。そこで、高性能な空間結合LDPC符号⁽³⁾を用いて、さらに、パリティ検査行列に規則的な行置換を施して性能劣化要因を回避した“多重空間結合型”と呼ぶLDPC符号を提案して⁽⁴⁾、エラーフロアの軽減を図る(図1)。

これらの対策によって、エラーフロアを誘因するLDPC符号単体の誤り訂正後残留誤りのビット数を16以下に抑えることができ、訂正可能ビット数が16で冗長度が僅か0.78%のBCH符号でエラーフロアが除去できることを確認した。

2.3 性能評価結果

今回の誤り訂正方式を、計算機シミュレーションで性能評価した(図3)。LDPC符号の符号長は38,400ビット、情報ビット長が30,832ビットで、これに16ビット訂

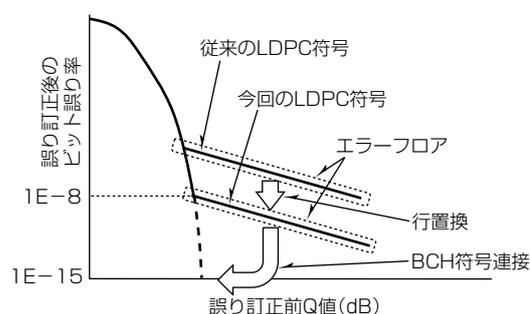


図1. エラーフロアと誤り訂正方式

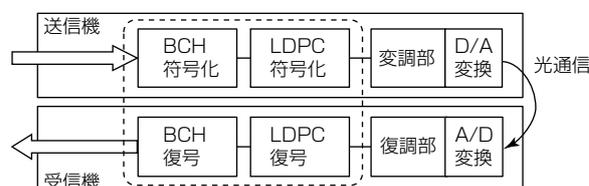


図2. 誤り訂正方式(LDPC+BCH接続符号)の構成

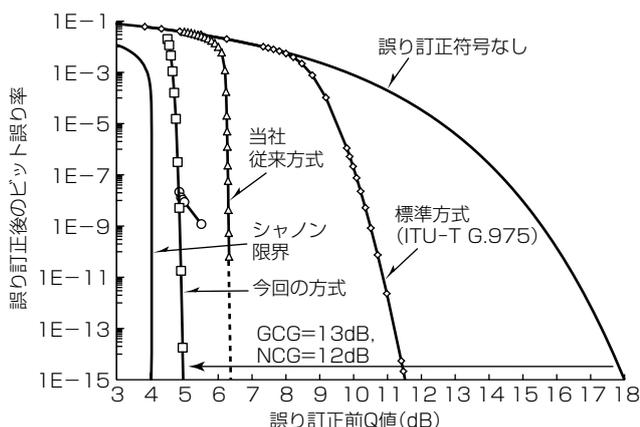


図3. シミュレーション結果

正BCH符号を接続させて、OTU4V(Optical-channel Transport Unit 4V)フレームに適した符号長38,400ビット、情報長30,592ビット、冗長度25.5%の接続符号を構成した。シミュレーション条件は、AWGN(Additive White Gaussian Noise)通信路として、4ビット軟判定、繰り返し32回の δ -min復号法⁽⁴⁾を用いている。

図3から、エラーフロアが除去されたことが分かる。誤り訂正後ビット誤り率 10^{-15} における誤り訂正前Q値は約5dBであり、GCG 13dB、NCG 12dBが得られた。ITU-T G.975標準方式に対して約6dB、当社従来の3重接続方式⁽⁵⁾に対してNCGが約1dB向上して、理論的に到達可能な上限であるシャノン限界に約1dBまで迫る高い性能となっている。

3. 冗長度可変技術

大容量化のために変調方式をQPSKから16QAMにすると、周波数利用効率が倍になるが、雑音耐性は大きく下って伝送可能距離も大きく短縮されてしまう。変調方式の違いによる伝送可能距離のギャップは大きく、16QAMで伝送可能か否かが周波数利用効率を大きく左右する(図4)。

このトレードオフに柔軟性を持たせることができれば、誤り訂正能力を伝送距離などの条件に適した性能として、十分な通信品質を確保した条件の下で伝送容量をできる限り向上させるネットワーク構成が可能となる。図4に、100Gbps伝送では十分近い距離にあり、200Gbps伝送では遠い位置にある端局同士を140Gbpsで伝送する例を示す。このような柔軟性を実現する技術として、冗長度を可変にして誤り訂正能力と伝送容量を適用環境に応じて調整できる冗長度可変技術を提案する。今後の大容量化に向けて重要となる技術である。

3.1 冗長度

誤り訂正技術では、パリティビットと呼ばれる冗長ビットを多く伝送するほど高い誤り訂正能力が得られる。先に述べたとおり、パリティビット数を実質的な通信データビット数で割った値を冗長度と呼び、多くの場合は百分率

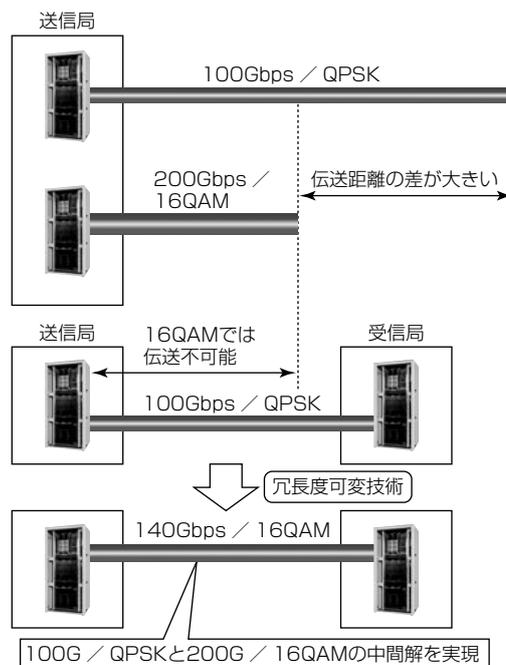


図4. 冗長度可変技術

(%)で表現する。冗長度が高いと伝送される情報は相対的に小さくなり、伝送容量が低下する。QPSKと16QAMとにある周波数利用効率と伝送可能距離のトレードオフのギャップを埋めるには、冗長度を可変にして、伝送するビット内のパリティビットが占める割合を調整可能にすればよい。

3.2 技術課題

誤り訂正技術の冗長度可変に関する研究開発事例は古くからあり、例えば移動体無線通信では、様々な環境で効率的な通信を可能にする必須技術となっている。しかし、移動体無線通信で用いられる畳み込みターボ符号は冗長度を容易に可変にできる一方で、効率的な高速処理が難しく、光通信の高速な伝送速度に対応するとLDPC符号の数倍の回路規模が必要となる。光通信では、100Gbpsの高速な伝送速度を実現するため、高速処理に適したLDPC符号が広く用いられているが、LDPC符号は冗長度を容易に可変にはできない。性能劣化と回路規模増大化を抑制しつつ、LDPC符号の冗長度を可変にすることが課題である。

3.3 冗長度可変技術

冗長度可変技術実現のためには、フレーム構成も可変にする必要がある。そこで、従来のOTUkVフレームと互換性を持つOTN(Optical Transport Network)転送フレーム構造可変方式⁽⁶⁾を用いる。図5(a)のように、OTU4Vフレームのペイロードには80のTS(Tributary Slot)がアサインされている。その一部をTS単位で可変のパリティビット領域とすることで、冗長度が調整可能となる。

このフレーム構成に適した冗長度可変技術では、符号長を一定に保ちながらパリティビット数を増減させる必要がある。LDPC符号はパリティビット検査行列の列数が符号長に対応して行数がパリティビット長に対応するため、一

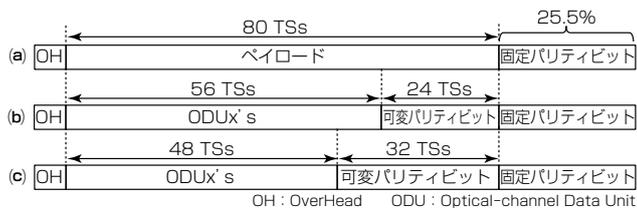


図5. OTN転送フレーム構造可変方式

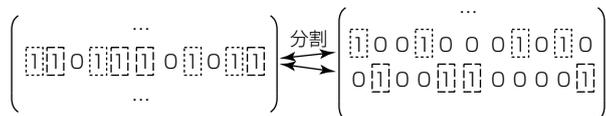


図6. LDPC符号の行分割方式

表1. 冗長度可変誤り訂正方式の諸元

	情報ビット数	パリティビット数	符号長	冗長度	可変パリティビット領域
原レート	30,592	7,808	38,400	25.5%	-
レートA	27,552	10,848	38,400	39.4%	8TS
レートB	24,512	13,888	38,400	56.7%	16TS
レートC	21,472	16,928	38,400	78.8%	24TS
レートD	18,432	19,968	38,400	108.3%	32TS
レートE	15,392	23,008	38,400	149.5%	40TS

部の行を分割して行数を増やす行分割方式による冗長度可変技術がこのフレーム構成に適している(図6)。LDPC符号の冗長度可変は一般的に性能劣化を伴うが、行分割方式にはLDPC符号の性能劣化要因となり得るタナーグラフの短閉路を減らす特長があるため比較的性能劣化が小さい。また、分割する行の選択、分割行の要素“1”の分配の仕方を注意深く検討することで性能劣化を抑えられる。なお、行分割方式はセレクトタ等の小規模回路の追加で実装できる⁽⁷⁾。

3.4 誤り訂正方式と性能評価結果

2.2節で述べたLDPC符号に行分割方式を適用して冗長度可変誤り訂正方式を構成した。表1に示すように、パリティビット数を3,040ビット刻みで可変とした。OTU4Vフレームには4個の符号語が格納されるため、8TS単位での可変パリティビットとなる。従来のOTU4Vフレームは100Gbps伝送を前提としており、8TSは10Gbpsに相当して、200Gbps伝送に2つのOTU4Vフレームを用いる場合は、この方式によって100Gbpsから200Gbpsの伝送容量を20Gbps単位で可変にできる。

各冗長度における性能を2.3節と同じ条件で評価した。図7にシミュレーションで得た誤り訂正後ビット誤り率 10^{-8} における誤り訂正前Q値から推定したGCGとNCGを示す。

冗長度増加によるNCGの向上幅が飽和する一方で、GCGは原レートと比べてレートAで0.9dB、レートEで4.5dB向上した。この方式ではフレーム長を従来OTU4Vフレームと同じにしているため冗長度増加による帯域ペナルティはなく、NCGよりもGCGが伝送性能に対して重要である。この評価で高い性能は確認できたが、実運用では伝送路の条件に応じて様々な性能劣化が発生する。条件に

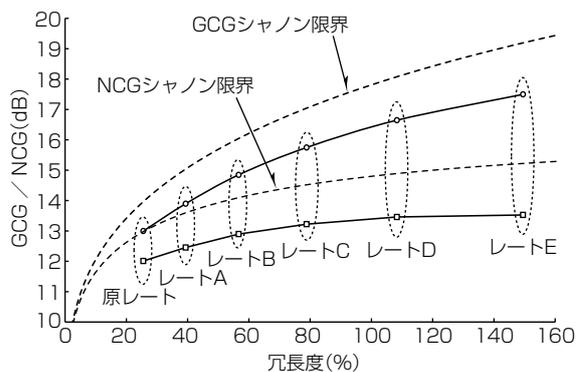


図7. 冗長度可変誤り訂正方式の性能評価結果

よっては高い性能が発揮できない可能性も考えられ、今後の検討課題である。

4. むすび

大容量化で重要な誤り訂正技術について、NCGを1dB向上させる高性能化技術と、伝送容量を100Gbpsから200Gbpsの間で可変とする冗長度可変技術を述べた。大容量化による高雑音環境に対応でき、100Gbps超級の伝送が実現できる。

この研究成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究“光トランスパレント伝送技術の研究開発(λリーチ)”によって得られたものである。

参考文献

- (1) 宇藤健一, ほか: 三菱電機の光通信技術への取組み, 三菱電機技報, 89, No. 6, 323~327 (2015)
- (2) 能松 忍, ほか: 40G/100Gbps大容量光通信装置, 三菱電機技報, 86, No. 6, 319~322 (2012)
- (3) Kudekar, S., et al.: Threshold saturation via spatial coupling: Why convolutional LDPC ensembles perform so well over the BEC, IEEE Trans. Inform., 57, No. 2, 803~834 (2011)
- (4) Sugihara, K., et al.: A spatially-coupled type LDPC code with an NCG of 12 dB for optical transmission beyond 100 Gb/s, OFC/NFOEC2013, OM2B.4 (2013)
- (5) Miyata, Y., et al.: A triple-concatenated FEC using soft-decision decoding for 100Gb/s optical transmission, OFC/NFOEC2010, OThL3 (2010)
- (6) Kametani, S., et al.: A study of rate-adaptive forward error correction in OTU framing, OECC2013, Thr2 (2013)
- (7) Sugihara, K.: A practicable rate-adaptive FEC scheme flexible about capacity and distance in optical transport networks, OFC2016, M3A.5 (2016)