

光アクセスネットワークにおける適応変調の実装と低消費電力化に関する研究

研究代表者 カーリヤワサム アミラ 九州大学大学院システム情報科学研究院・助教

1 はじめに

COVID-19 の感染拡大以降に普及した新たな技術やサービスの多くは情報通信技術に支えられている。これらの進展により通信トラフィックは急増し、通信ネットワークのさらなる高速化が求められている。一方で、地球温暖化をはじめとする環境・エネルギー問題の深刻化により通信ネットワークの消費電力増加に対する懸念が高まっている。通信ネットワークにおける消費電力は 2030 年には日本国内の総電力消費量の約 10% を超えるとされ、さらに 2050 年にはその約 100 倍に達する可能性が指摘されている。これは社会的に重大な課題として認識されつつある [1]。

通信ネットワークの中でも特に電力消費が大きいのはネットワークの末端にあたるアクセスネットワークである。これは光アクセス装置や無線基地局といった大量の伝送装置が稼働しているためである。情報通信技術を基盤とする情報化社会の持続可能性を確保するうえでアクセスネットワークの低消費電力化は極めて重要な課題である。

従来の光アクセスネットワークではユーザが光回線を共用する PON (Passive Optical Network) 方式が採用されている。PON は最も遠距離にある加入者に対応できるように設定されており、すべての加入者が同一のビットレートで通信を行っている。しかし、近年では通信トラフィックの需要に応じて各加入者のビットレートを動的に変化させる「適応変調技術」の導入が世界的に検討され始めている。ただし、これらの技術の主たる目的は通信速度の向上であり、適応的制御とアクセスネットワーク全体の消費電力との関係性は十分に解明されていない。さらに、適応的制御技術を用いた低消費電力化の実践的な取り組みはほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では PON において局舎から近い加入者における余剰電力を有効活用し、誤り訂正処理を適応的に制御することにより PON 全体の省電力化を図る。具体的には伝送距離に応じて適切な誤り訂正機能を選択することで加入者装置 (ONU) の符号化・復号化回路にかかる負担を軽減し、ネットワーク全体の消費電力削減を目指す。

2 適応型誤り訂正

2-1 光アクセスネットワークにおける誤り訂正

(1) はじめに

光アクセスネットワークにおけるトラフィック需要の増加に対応するため、50 Gbit/s の光ネットワーク (PON) が標準化され、さらなる伝送速度の向上に関する研究も進められている [2]。現在の PON においては、ピーク伝送速度が主に光伝送路損失によって制限されている。このため従来の強度変調直接検出 (IM-DD) 方式の PON で伝送速度を 10 Gbit/s を超えて向上させるには高度なデジタル信号処理技術および先進的な光受信器が必要となる [3]。

一方で、通信ネットワーク全体の消費電力はトラフィックの増加に伴い世界的に拡大しており、2050 年には 260,000 TWh に達すると予測されている [1]。ネットワークの持続可能性を確保するためには電力消費全体の約 80% を占めるアクセスネットワークにおいて厳格な電力削減が求められている。

現在の PON では、必要最小限の光パワーを受けている ONU (加入者回線終端装置) はごくわずかであり、大多数の ONU は低損失な伝送路で局舎に繋がっている。こうした伝送路損失や通信経路における変動を考慮し、柔軟な伝送レートを実現する PON の構想が提案・検討されている。具体的には、直交周波数分割多重 (OFDM) [4]、ビットインターリーブ [5]、適応符号化および変調 [6]、[7] などの技術によって柔軟性を高め、ネットワーク全体のスループット向上を目指す研究が進められている。最近では確率的符号整形と低密度パリティチェック (LDPC) による前方誤り訂正 (FEC) を組み合わせた適応レート PON も報告されている [8]。これらの研究は柔軟な伝送速度を活用してネットワークの高速化を実現することに焦点を当てているが、一方

で柔軟性を利用した電力消費削減に関する研究はほとんど例がない [9] [10] [11] [12] [13]。本研究では多くの ONU が過剰な光パワーを受けている現状に着目し、この余剰パワーを活用して FEC の電力消費を削減する手法について検討した。FEC は ONU の電力消費において大きな割合を占めるため ONU ごとの光路損失に応じて適切な FEC 冗長度を設定することで実現可能な電力削減効果について評価を行った。

(2) Reed-Solomon (RS) 誤り訂正符号の原理

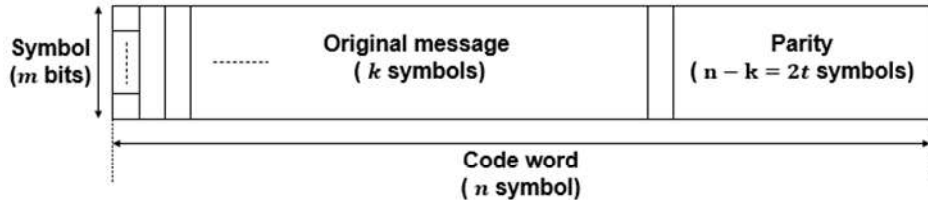


図1 RS フレーム構成

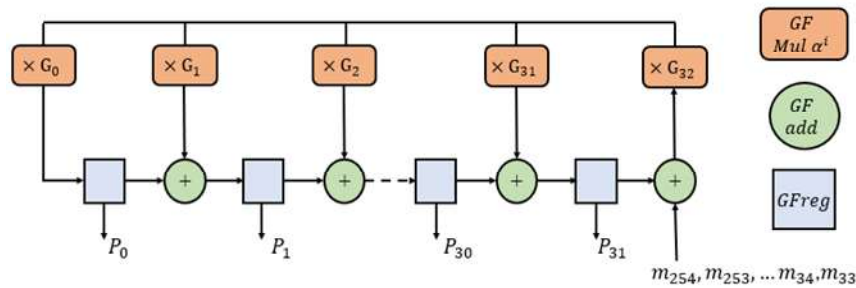


図2 RS 符号化器の構成, G_i : 生成多項式の係数, m_i : 元のデータ多項式の係数, P_i : 出力パリティ多項式の係数, $GF_{mul} \alpha^i$: GF 乗算, GF_{add} : GF 加算, GF_{reg} : レジスタ処理

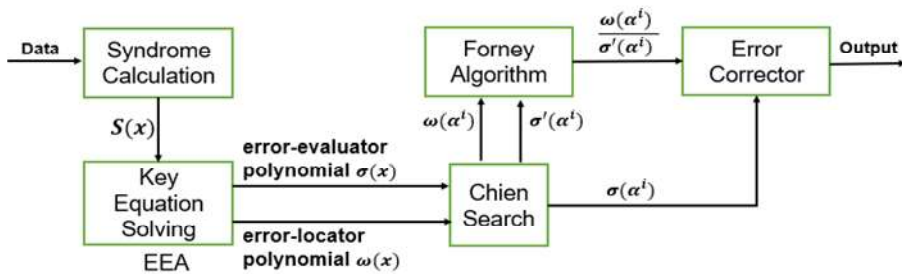
表1 各演算の消費電力

GF operator	Function	Computational complexity	Power consumption (pJ)
GF_{inv}	Inverse of a GF element	m XOR	$0.4 m$
GF_{mul}	Multiplication of two unspecified GF elements	$m(m-2)/2$ XOR	$0.4 m(m-2)/2$
$GF_{mul} \alpha^i$	Multiplication by a specific GF element α^i	m^2 AND $3(m-1)^2/2$ XOR	$0.4 (m^2 + 3(m-1)^2/2)$
GF_{add}	GF addition	m ROM read	$8 m$
GF_{reg}	Register storage	m REG write	$2 m$
GF_{mem}	Memory storage	m RAM read & write	$10 m$

図1にRS符号化されたフレーム構造を示す。RS符号はパラメータ (n, k, t) によって定義され [14], [15], 符号化前後のシンボル数をそれぞれ k および n で表す。ここで t は訂正可能なシンボル数を示し, $t = (n - k)/2$ と定義される。符号率 R は $R = k/n$ により表される。RS符号はガロア体 $GF(2^m)$ の値を取り、各シンボルは m ビットで構成される。図2にRS符号化器のアーキテクチャを示す。符号化中に必要なガロア体(GF)演算の数は採用される回路アーキテクチャに依存する。図2の G_i は生成多項式の係数, m_i は元のデータ多項式の係数, P_i は出力パリティ多項式の係数をそれぞれ表す。符号化処理には $2nt$ 回のGF乗算 ($GF_{mul} \alpha^i$) およびGF加算 (GF_{add}), レジスタ処理 (GF_{reg}) 演算が必要となる。RS符号の復号にはさまざまな手法が存在する。中でも拡張ユークリッドアルゴリズム (EEA) [11] は、訂正能力 $t > 3$ を超える場合において最も少ない計算量で復号が可能とされている。

復号プロセスではまず受信信号に基づきシンドローム多項式 $S(x)$ を計算し、次に EEA を用いて鍵方程式を解くことで誤り評価多項式 $\sigma(x)$ および誤りの位置特定多項式 $\omega(x)$ を導出する（図 3）。誤りの位置は Chien 検索アルゴリズムにより $\omega(x)$ の根を求めることで特定される。誤りの位置が判明した後は Forney アルゴリズムを用いて各誤りの位置における誤り値を求める。最終的に検出された誤りの位置およびその値に基づいて受信した符号語を訂正する。

情報ビットあたりの計算複雑度（CCIB）式（1）は異なる RS 符号化パラメータにおけるデジタル電力消費を見積もるために用いることができる。これは訂正能力 t 、符号率 R 、シンボル長 m の関数として次のように



に表される [12]。なお、GF 演算における電力消費は具体的な回路実装に依存する。電力消費を評価する式は変数 t 、 m および R によって決定される。0.18 μ m CMOS 設計を仮定した場合の各演算の消費電力を表 1 に示す [13]。

図 3 拡張ユークリッドアルゴリズムによる復号化

$$CCIB(dec) = \frac{1}{m} \left[\frac{1-R}{2R} (4t+1) GFmul + \frac{1}{R} (4t-1) GFmul ai \right] + \frac{1}{m} \left[\left(\frac{1}{R} (4t-1) + \frac{1-R}{2R} (4t+1) \right) GFadd + \frac{1-R}{R} GFinv \right] + \frac{1}{m} \left[\left(\frac{1}{R} (4t-1) + \frac{1-R}{2R} (6t+1) \right) GFreg + GFmem \right] \quad (1)$$

（3）RS 符号の誤り訂正能力

加算性白色ガウス雑音（AWGN）環境におけるバイナリ信号に対する RS 符号の誤り訂正性能を評価した結果を図 4 に示す [14]、[15]。ここで、 E_b は 1 ビットあたりの受信エネルギー、 N_0 は雑音のパワースペクトル密度を表す。また E_b/N_0 はこれらの比をデシベル（dB）単位で表したものである。ビット誤り率（BER）に関するグラフからさまざまな誤り率における RS 符号の符号化利得を比較・抽出することができる。具体的にはビット誤り率 10^{-15} において RS (255, 247)、RS (255, 239)、RS (255, 223) それぞれで 4.5dB、5.6dB、6.6dB の符号化利得が得られる。

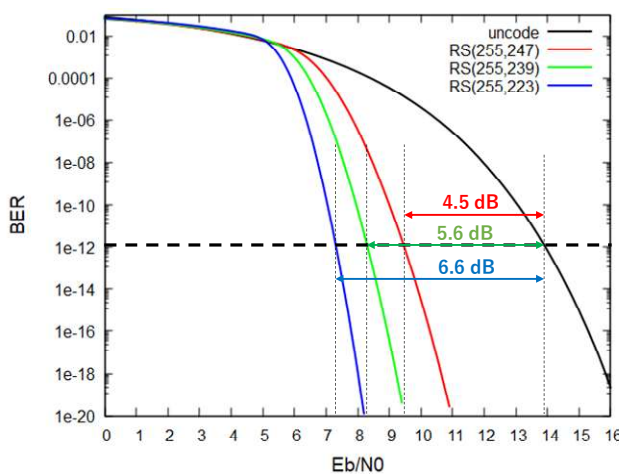


図 4 RS 符号の誤り訂正能力

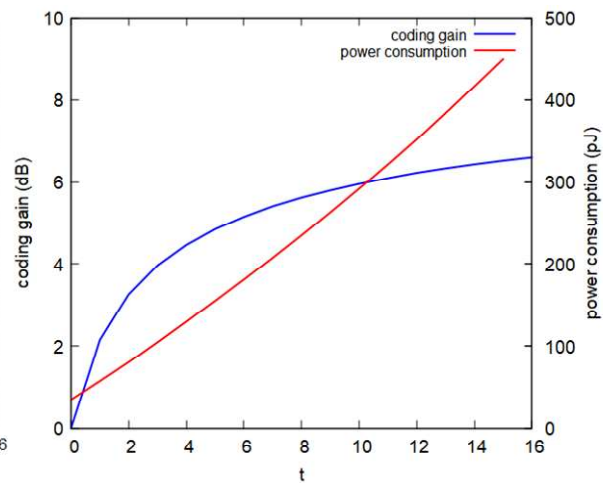


図 5 RS 符号の符号化利得と消費電力の関係

(4) 誤り訂正能力と消費電力の関係

電力消費量の評価式(式(1))に基づき RS 符号における電力消費と冗長度との関係を明らかにした(図 5)。訂正能力 t の増加に伴い RS FEC の誤り訂正性能が向上し、これに伴って符号化利得も増加する。一方で電力消費量も急激に増加する傾向が見られる。特に注目すべき点はある閾値を超える冗長度において電力消費が t に比例して線形に増加する一方で、符号化利得が次第に飽和し始めるという現象である。

(5) 適応型 RS 符号による省電力化の可能性

PON では ONU と OLT 間の距離に応じて受信感度を満たすための符号化利得の要件が異なる。一方、現在広く展開されている PON システムでは誤り訂正に RS (255, 223) 符号化が用いられており、この方式は最大 20km の受信距離に対応している。

短距離 ONU では余剰な受信光パワーを活用することで RS 符号の符号化・復号化に伴う電力消費の削減が可能である。本研究では ONU までの距離に応じて異なる RS 符号化方式を選択し、近距離の ONU には冗長度の低い RS 符号を適用することで必要最低限の符号化利得で感度要件を満たすことを目指す。冗長度が低い RS FEC は高冗長度のものに比べて消費電力が著しく低いため、各 ONU に対して最適な冗長度を選択することで全体として大幅な電力削減が期待できる。

本研究では 10G-EPON システムにおいて FEC 符号化器・復号化器による電力削減効果を算出した。その結果を図 6 に示す。この計算では、PON に 32 台の ONU が接続されていると仮定し、ネットワークのパラメータは表 2 に示した。

図 6 において赤線は各距離における RS 符号化・復号化時の、情報ビットあたりの電力消費量を示している (0.18 μ m CMOS 設計を仮定した場合)。現行の PON システムでは固定の RS (255, 223) 符号が用いられているため、距離に関係なく消費電力は一定であり、これは実線で示されている。一方、破線は距離に応じて FEC 冗長度を適応的に変更した場合の電力消費量を示しており、本研究では RS 符号の冗長度を 2 ビットから 16 ビットの範囲で変化させている。

たとえば、距離が 4.73km 未満の範囲では 2 ビットの冗長度を持つ RS 符号が使用されており、この場合 ONU は過剰な受信光パワーにより冗長度の削減が可能である。この条件下での RS 符号化器・復号化器の消費電力は 1 ビットあたり 57.5pJ であり、固定の RS (255, 223) 復号化器の消費電力 (1 ビットあたり 449.5pJ) と比較して最大で 87.2%の電力削減が可能となる。

距離が増加すると光路損失の補償のため、RS 符号の冗長度も増加させる必要がある。その結果、距離の増加に伴い電力削減効果は徐々に減少する。

レイリー分布関数 [16] に基づいてシミュレーションされた ONU の距離分布が紫色の棒グラフで示されて

表 2 計算パラメータ

パラメータ	値
ONU台数	32
最大伝送距離	20 km
Rayleigh 分布 σ	5
ファイバ損失	0.22 dB/km
ビットレート	10 G
下り波長	1580 nm
OLT送信パワ	2 dBm
ONU受信感動	-28 dBm
RS符号冗長度	$t = 2 \sim 16$

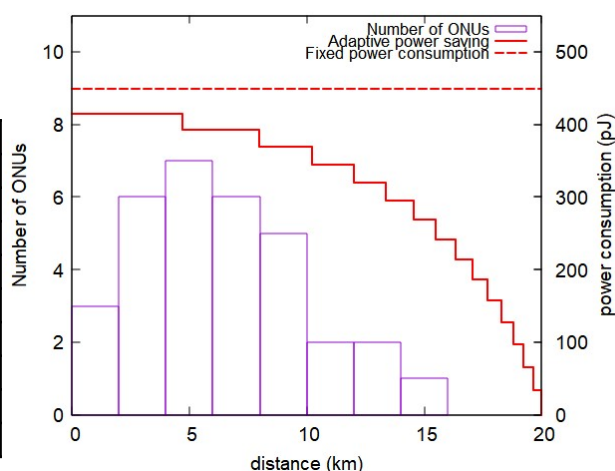


図 6 適応型 FEC によって得られる消費電力改善量

いる。

シミュレーションの結果、適応型 RS 符号化を用いた場合の ONU における FEC 符号化器・復号化器の平均電力消費量は 1 ビットあたり 88.8 pJ であった。これに対し、固定の RS (255, 223) 方式を採用した場合の消費電力は 1 ビットあたり 449.5 pJ であり、適応型 FEC 方式によって FEC 復号化器の平均消費電力を 80.2%以上削減できることが確認された。

2-2 適応型 RS FEC の消費電力

(1) RS 符号器および復号器の消費電力

表 3 ハードウェアの使用率

Resources	Utilization in Decoder		
	RS (255,247)	RS (255,239)	RS (255,223)
Look-up tables (LUT)	2504	4798	9352
Flip-flops (FF)	1195	2258	4402
Block RAM (BRAM)	8	16	32
Input and output resources (IO)	27	27	27
Global clock buffer (BUFG)	1	1	1

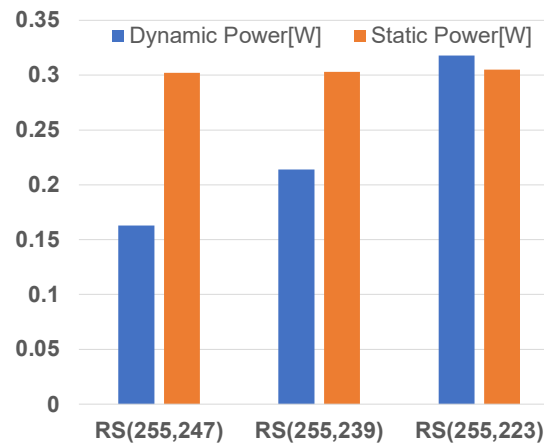


図 7 各 RS 復号化器の消費電力

本研究で適応型 FEC を用いる PON のハードウェアエミュレーションを行い、ONU 復号化器の消費電力を測定した。標準化されたパラメータに従い FEC フレームのフレーム長を 255 バイトとした。標準符号タイプに加え、RS (255, 247) および RS (255, 239) の 2 種類の符号タイプを考慮し、消費電力を算出した。RS 復号化器の消費電力を測定するにあたり、まず MATLAB/Simulink 上で復号化器を構築し、その後 Verilog HDL (ハードウェア記述言語) を用いてコードを作成した。このコードを FPGA (Xilinx VC709) に実装し、復号時の消費電力を測定した。FPGA はパーソナルコンピュータ (PC) に接続され「FPGA in the Loop」構成で使用された。RS 復号化器の性能評価にはランダムデータを符号化して FEC フレームを PC 上で生成し、それにランダムな誤りを加えて FPGA に入力、復号化させた。誤り訂正の精度は符号化器入力と復号化器出力のデータ比較により検証した。

RS 復号化器のリソース使用率は表 3 に示す。IO (入出力) および BUFG (グローバルクロックバッファ) は回路構成上の制約により一定だったが、LUT (ルックアップテーブル)、FF (フリップフロップ) や BRAM (ブロック RAM) の使用量は FEC の冗長度が減少するにつれて少なくなった。実験においては消費電力の多い順に LUT (+FF)、BRAM、IO、BUFG であることが確認された。したがって、FEC の冗長度を削減することで回路サイズが縮小され、全体の消費電力削減につながる。

図 7 には 3 種類の RS 復号化器における消費電力の測定結果を示す。これらの値は、Vivado FPGA 設計ツールの消費電力レポートから取得した。静的消費電力は待機時の電力を示し、動的消費電力は 1 符号語 (255 バイト) を復号化する際の消費電力である。静的電力はほぼ一定だったが、リソース使用率の違いに応じて FEC の冗長度が減ると動的電力も減少した。最も大きな場合、動的消費電力は約 49% 低減した。

(2) PON における省電力化

本検討で用いた PON ハードウェアエミュレータの構成を図 8 に示す。このエミュレータを使用して 32 の ONU を持つ PON における 10G-EPON 下り伝送の FEC 復号化器の消費電力を解析した。簡略化のため実験系におけるすべての雑音を無視した。エミュレータでは FEC 利得による伝送路損失の十分な補償を仮定した。

PON における ONU の距離分布は統計データ [16] に基づいてレイリー分布 $f(x; \sigma) = \{x/\sigma^2\} \exp\{-x^2/2\sigma^2\}$ に近似することができる。本研究では光回線終端装置 (OLT) と ONU 間の距離を伝送距離と仮定する。レイリ

一分布の標準偏差 σ の値を変えることで ONU の距離分布を変えることができる。本研究では 3 つの加入者密度を模擬するため 1, 3, 5 の σ 値を使用しそれぞれ 1km, 3km, 5km で加入者密度のピークが発生した。次に標準的な PON 構成における ONU RS 復号化器の消費電力を最大伝送距離が 20km であるこれらの距離分布を用いて求めた。

ビットあたりの RS 復号化器の消費電力 P_{bit} は実験的に測定された動的消費電力を用いて、式 (2) に示すように計算した。

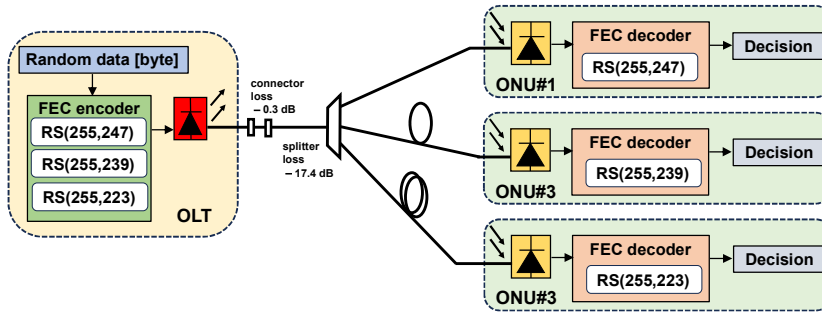


図 8 PON ハードウェアエミュレータの構成

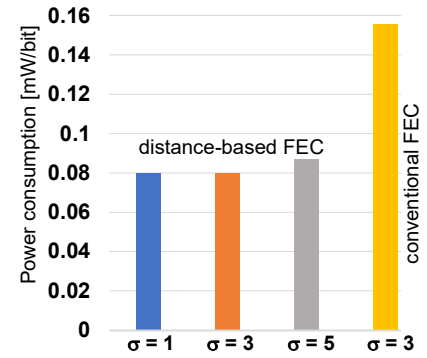


図 9 RS 復号化器の消費電力

$$P_{bit} = \frac{\text{dynamic power [RS(255, k)]}}{255 \times 8} \quad (2)$$

次に図 8 の伝送モデルを使用して各 ONU の受信電力を計算した。受信電力と受信感度を比較して、各 ONU の FEC 冗長度を選択した。次に RS 復号化器のビットあたりの消費電力を 32 個の ONU すべてについて計算し、平均した。

図 9 に RS 復号化器の電力消費量の計算結果を比較のため示す。RS 復号化器の平均電力消費量はすべての 3 つの加入者密度において 0.08 mW/bit であった。従来の PON は各 ONU で RS (255, 223) 復号化が行われているが、距離ベースの FEC を採用した場合、ビット当たりの電力消費量が 48%以上削減された。レイリー分布に基づく電力節約のわずかな違いは次のように観察された。 $\sigma = 1$ と $\sigma = 3$ では 48.7%, $\sigma = 5$ では 44.2%。このわずかな違いは加入者密度の変動により各加入者密度における RS 符号類の使用率に違いが生じたためである。本検討では伝送距離 11km まで RS (255, 247) を、11.1~15.5km の範囲では RS (255, 239) を、15.6~20km の範囲では RS (255, 223) を採用した。各 RS 符号の使用率は次のようになっていた。 $\sigma = 1$, RS (255, 247) は 100%, $\sigma = 3$ RS (255, 239) は 100%, $\sigma = 5$ RS (255, 247) は 84.375%, RS (255, 239) は 9.375% および RS (255, 223) は 6.250%。

3 まとめ

本研究では PON における ONU の誤り訂正処理に起因する電力消費量を削減する可能性について検討した。具体的には、伝送距離に応じた適切な FEC 方式の選択により実現可能な省電力化についてシミュレーションおよび実験を通じて分析を行った。

RS 符号を用いた場合、伝送距離に応じて RS 符号の冗長度を適応的に選択する方式を提案した。その結果、伝送距離が 4.73 km 未満の場合、ONU における FEC 復号化器の電力消費を最大 87.2%削減可能であることがシミュレーション結果からわかった。さらに、32 台の ONU を有する PON 環境において FEC 冗長度を 1 ビット単位で変化させることが可能であれば、ONU あたりの平均電力消費量を最大 80.2%削減できることがわかった。

FPGA によるハードウェアエミュレーションを通じて提案方法の実装可能性を検討した。ハードウェア制約のもとで、異なる 3 種類の冗長度を持つ RS 符号対象とした検討を行ったところ、RS 復号化器の動的電力消費は冗長度に大きく依存することを確認できた。これら 3 種類の RS 符号の電力測定値を用い、伝送距離に応じた符号選択を行った場合における電力節約量を算出した結果、32 台の ONU を持つ PON において加入者見積密度分布の標準偏差が $\sigma = 1$ および $\sigma = 3$ の場合は、それぞれ 48.7%, $\sigma = 5$ の場合は 44.2%の電力削減が可

能であることが分かった。

今後の課題としてはこれらの研究成果を実用的なシステムに実装するための方法論の確立，実装時における回路規模の最適化，ならびに動的帯域幅割り当てとの連携を含む上り伝送モデルの検証に注力する予定である。

【参考文献】

- [1] “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol. 3)”，国立研究開発法人科学技術復興機構，低炭素 社会戦略センター，令和 3 年 2 月。
- [2] IEEE 802.3 ETHERNET WORKING GROUP <https://www.ieee802.org/3/>
- [3] R. Borkowski et al., "FLCS-PON—an opportunistic 100 Gbit/s flexible PON prototype with probabilistic shaping and soft-input FEC: operator trial and ODN case studies," in Journal of Optical Communications and Networking, vol. 14, no. 6, pp. C82-C91, June 2022, doi: 10.1364/JOCN.452036.
- [4] N. Cvijetic, "OFDM for Next-Generation Optical Access Networks," in Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 4, pp. 384-398, Feb.15, 2012, doi: 10.1109/JLT.2011.2166375
- [5] D. Suvakovic et al., "A Low-Energy Rate-Adaptive Bit-Interleaved Passive Optical Network," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 8, pp. 1552-1565, Aug. 2014, doi: 10.1109/JSAC.2014.2335331.
- [6] E. S. Chou and J. M. Kahn, "Adaptive Coding and Modulation for Robust Optical Access Networks," in Journal of Lightwave Technology, vol. 38, no. 8, pp. 2242-2252, 15 April15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2963276.
- [7] V. E. Houtsma and D. T. van Veen, "Investigation of Modulation Schemes for Flexible Line-Rate High-Speed TDM-PON," in Journal of Lightwave Technology, vol. 38, no. 12, pp. 3261-3267, 15 June15, 2020, doi: 10.1109/JLT.2020.2976959.
- [8] R. Borkowski et al., "Operator Trial of 100 Gbit/s FLCS-PON Prototype with Probabilistic Shaping and Soft-Input FEC," 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC), Bordeaux, France, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECOC52684.2021.9606115.
- [9] S. B. Wicker, Error control systems for digital communication and storage, Prentice Hall, 1995.
- [10] S. Lin, D. J. Costello Jr., Error Control Coding, Second Edition, Prentice Hall, 2004.
- [11] H. Lee, M.-L. Yu, L. Song, “VLSI design of ReedSolomon decoder architectures”, IEEE Int. Symp. Circuits and Systems, vol.5, pp.705-708, May 2000.
- [12] L. Biard, D. Nogu  t, “Choice and Implementation of a Reed-Solomon Code for Low Power Low Data Rate Communication Systems”, IEEE Radio and Wireless Symp., pp.365-368, Jan. 2007.
- [13] C. Desset, “Selection of channel coding for low-power wireless systems”, Vehicular Tech. Conf., vol.3, pp.1920- 1924, Apr. 2003.
- [14] Ziemer, R. E., and R. L., Peterson. Introduction to Digital Communication. 2nd ed. Prentice Hall, 2001.
- [15] Sklar, Bernard. Digital Communications: Fundamentals and Application. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Prenruce-Hall PTR, 2001.
- [16] F. Vacondio, J.-C. Antona, G. de Valicourt, A. Ghazisaeidi, S. Bigo, J. Fickers, P. Chancelou, Y. Pointurier, and O. Bertran-Pardo, “Flexi- ble TDMA access optical networks enabled by burst-mode software defined coherent transponders,” Proc. 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), London, UK, paper We.1.F.2, Sept. 2013. DOI: 10.1049/cp.2013.1404

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
光アクセスネットワークにおける適用誤り訂正による省電力化に関する一検討	電子情報通信学会光通信システム研究会技術研究報告 OCS2023-66	2024年1月
適応型 FEC 搭載 PON の復号化電力に関する考察	電子情報通信学会 2024 年総合大会	2024年3月
Power saving control method with adaptive FEC decoder in optical access network	IEICE Communications Express	2024年9月
Adaptive Reed-Solomon Error Correction For Energy-efficient Optical Access Network	Kyushu University & University of Twente Joint Workshop on DeepTech	2024年9月
Proposal of FFT-based Kramers-Kronig Receiver for FSO Communication System	30th OptoElectronics and Communications Conference/ International Conference on Photonics in Switching and Computing 2025 (OECC/PSC2025)	2025年6月