

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | Proposal and Demonstration of Compressed Shaping - A Joint Source-Channel Coding in Fiber-Optic Communications -  |
| Author(s)    | 吉田, 剛   |
| Citation     | 大阪大学, 2022, 博士論文  |
| Version Type |   |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/88057">https://hdl.handle.net/11094/88057</a>   |
| rights       |   |
| Note         | やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。 |

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

## 論 文 内 容 の 要 旨

|   |  |
|---|--|
| 氏 名 ( 吉 田 剛 )   |  |
| 論文題名  | Proposal and Demonstration of Compressed Shaping<br>– A Joint Source–Channel Coding in Fiber-Optic Communications –<br>(圧縮シェイピングの提案と実証<br>– 光ファイバ通信における情報源-通信路結合符号化方式 –) |
| <p>論文内容の要旨</p> <p>Backbone fiber-optic communications carries high-throughput data traffics over a long distance as an essential infrastructure in data driven intelligent society. Channel coding techniques such as multilevel modulation, forward error correction (FEC), and probabilistic shaping (PS) have continuously improved the data throughput for handling the growing traffic demands. On the other hand, investigations of source coding are fewer. In this thesis, we proposed a novel joint source–channel coding scheme, called compressed shaping, for realizing both data compression and PS simultaneously. As a high performance and low complexity implementation of this novel coding, we introduced hierarchical distribution matching (DM). Through the numerical simulation and experiment, the proposed compressed shaping showed a better system performance or a lower power consumption in backbone fiber-optic communications carrying dynamically variable source traffics.</p> <p>This thesis is organized as follows. Chapter 1 is the introduction of the thesis, where the background and motivation of this research in this thesis are overviewed. Chapter 2 summarizes the fundamentals in communication technologies in fiber-optic communication networks. For example, system configuration, signal formats, digital signal processing (DSP), and system performance are overviewed. Chapter 3 reviews the fundamentals of information theory for coding. We introduce mathematical and statistical fundamentals, channel coding, source coding, and a communication system described with the information theory.</p> <p>Chapter 4 presents the essence of this thesis, i. e., the concept of compressed shaping, which is a realization of joint source–channel coding. After explaining the theoretical background, the suitable system model in backbone fiber-optic communication systems is illustrated. It is noted that the compressed shaping is a novel fundamental concept and is potentially useful in other applications. Chapter 5 describes the proposed hierarchical DM, which is a core function in the compressed shaping and is also useful for PS coding. The hierarchical DM showed superior performance of a 0.3 dB gap from the theoretical limit under limited circuit resources. Chapter 6 shows the performance of the compressed shaping. The compressed shaping was combined with the bit-interleaved coded modulation scheme as a standard solution. We assumed and simulated source nonuniformities resulting from dynamic variations in traffic volumes. A better performance or smaller power consumption was obtained, compared with a conventional coding and modulation scheme in backbone fiber-optic communications. In this chapter, we also report implementation and demonstration of the compressed shaping based on the hierarchical DM onto the latest field programmable gate array. We further implemented a hierarchical DM circuitry for higher than a 1-Tb/s throughput or 262144-ary quadrature amplitude modulation. The proposed technique is suitable for implementing DSP on large scale integration (LSI), achieving a high performance with a small circuit size and a low power consumption.</p> <p>Chapters 7 and 8 present techniques supporting the compressed shaping. Chapter 7 regards the performance evaluation for systems with PS and FEC. We proposed a code-independent performance metric of asymmetric information for characterizing the post-FEC performance without actual decoding. We also introduced techniques for evaluating the FEC efficiently and monitoring the performance of in-service systems. In Chapter 8, we propose the cooperation with multilevel coded modulation with the compressed shaping for significantly reducing the power consumption in high-order quadrature amplitude modulation systems. This power consumption reduction is achieved by reducing the throughput of soft-decision FEC, which could consume a dominant power in DSP-LSI. Chapter 9 summarizes the thesis and gave future outlooks related to this research.</p> |  |

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 ( 吉 田 剛 ) |     |       |           |
|---------------|-----|-------|-----------|
|               | (職) | 氏     | 名         |
| 論文審査担当者       | 主 査 | 教 授   | 井 上 恭     |
|               | 副 査 | 教 授   | 滝 根 哲 哉   |
|               | 副 査 | 教 授   | 丸 田 章 博   |
|               | 副 査 | 教 授   | 馬 場 口 登   |
|               | 副 査 | 教 授   | 三 瓶 政 一   |
|               | 副 査 | 教 授   | 宮 地 充 子   |
|               | 副 査 | 教 授   | 鷲 尾 隆     |
|               | 副 査 | 教 授   | 駒 谷 和 範   |
|               | 副 査 | 准 教 授 | 五 十 嵐 浩 司 |

## 論文審査の結果の要旨

光ファイバ基幹網では、アクセスネットワークからの多種多様なデータが集約され 100 Gbit/s を超える大容量データがやり取りされる。近年、スマートフォンや IoT センサの普及などサービスの多様化により、アクセスネットワークでのトラフィック量は動的に変化するため、光ファイバ基幹網にも動的にトラフィック変動するデータが流入する。しかしながら、大容量光伝送系ではビットレートの動的制御が技術的に困難であり、更に情報源符号化を光信号速度で回路実装するのも難しい。そのため現状では、ダミービットを埋め込んでビットスクランブルを行うという非効率な処理で動的トラフィック変動に対応している。

一方、近年の光ファイバ伝送では、多値直交振幅変調や軟値誤り訂正符号など高度通信路符号化技術が実システム導入されている。更には、伝送符号の確率密度分布を最適化する確率分布整形(probabilistic shaping: PS)技術も検討されている。PS 符号化では低強度符号の生起確率を高くすることで低パワー化を実現する。この手法は、生起確率によって符号長を制御する情報源符号化技術にも深く関連している。

本論文は、「圧縮シェイピングの提案と実証 –光ファイバ通信における情報源-通信路結合符号化方式–」と題し、情報源-通信路結合符号化を達成する圧縮シェイピングを光ファイバ伝送に適用した研究成果をまとめたものである。PS 技術を用いた圧縮シェイピングと高効率回路実装のための階層化分布整合を提案し、その有効性を示している。具体的な内容は以下である。

- (1) PS 技術を用いた圧縮シェイピング：生起確率の高いビット列を低強度符号にマッピングする PS 技術を適用した圧縮シェイピングを提案している。PS 方式に生起確率によるソート機能追加という簡易な構成で実現される。
- (2) PS 符号化回路実装のための階層化分布整合：PS 高性能化には、PS 符号化のための分布整合における符号長拡大が必須であるが、その実装には回路の大規模化が要求される。この課題に関し、階層化分布整合を提案し、回路規模を 1/100 以下に削減可能なことを示し、さらに field programmable gate array (FPGA) 実装を行っている。
- (3) 階層化分布整合を用いた圧縮シェイピングの性能評価：圧縮シェイピングを階層化分布整合で実装した回路の性能を数値計算・実験で評価している。従来より動的トラフィック時の性能が大きく改善することが示されている。
- (4) 圧縮シェイピング関連技術：PS 符号化変調や圧縮シェイピングを用いた伝送システムの性能評価メトリックを提案し、その有効性を示している。さらに、マルチレベル符号化変調への適用による受信特性改善効果も示している。

以上のように、本論文は圧縮シェイピングの提案と光ファイバ伝送への適用に関する研究成果をまとめたものである。この成果によって、光ファイバ伝送での圧縮シェイピングの有効性が示され、光ファイバ伝送における情報源-伝送路結合符号化が初めて実現された。伝送技術と情報理論の融合領域を開拓した成果と言え、工学的・学問的な見地から非常に意義深い。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。