

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560386

研究課題名（和文） 高セキュリティ化・経済化を実現する光アクセス網に関する研究

研究課題名（英文） Optical access networks for realizing security enhancement and economization

研究代表者

辻岡 哲夫（TSUJIOKA TETSUO）

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40326252

研究成果の概要（和文）：本研究では、異なるチップレートの拡散符号が混在する場合であっても直交性を維持できる新しい光直交符号を開発し、光アクセス網における高セキュリティ化と経済化を実現する柔軟な光 CDMA システムを構築することを目的とした。まず、符号長、符号重み、チップレート比などの設計条件を与えた場合に得られる最大の符号語数の理論上界を明らかにした。また、計算機探索により符号の存在可能性を示すと同時に、ビット誤り率の理論的な厳密解を求めた。次に、計算機探索に頼らない代数的な符号の構成法を検討し、BIBD 系列を階層的に利用することで符号設計が行えることを示した。

研究成果の概要（英文）：The goal of this research is to develop new optical orthogonal codes for flexible optical CDMA systems, with strict orthogonal property, even when variable chip rate codes are simultaneously used in an optical access network, for realizing both security enhancement and economization. It has been obtained that the theoretical upper bounds on the code sizes of the variable chip rate OOCs when the code parameters of code length, code weight, chip rate ratio are given. The code search results show the feasibility and availability of the proposed codes. The accurate bit error performance can be given by the theoretical analysis. Moreover, we have considered some code construction methods for the proposed codes by not code search but algebraic scheme. Then, we have shown that some approaches of code construction of the proposed codes, like hierarchical use of the BIBD (Balanced Incomplete Block Design) sequence.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，通信・ネットワーク工学

キーワード：光加入者網，光 CDMA，光直交符号

1. 研究開始当初の背景

近年、安心・安全を支える高度なセキュリティ技術が重要となっている。現行の光アク

セス網では、セキュリティ確保が必要な通信コネクションについては暗号化を適用し、対応が取られている。しかしながら、端末側の処理で十分なセキュリティの向上を図った

としても、通信路上での対策が不十分であれば、通信システム全体でのセキュリティ強度が低下することになる。

これまで、光 CDMA システムの検討については、主に三つの流れがある。それらは、(1)可変長符号（可変ビットレート）、(2)可変重み符号（不均一ビット誤り率）、(3)多次元化（時間拡散と周波数拡散の組み合わせ）である。これらに加えて、チップレートを可変にすることで、高セキュリティ化を実現でき、更に、システム更新時の経済化を図ることも可能となる。可変チップレートの光 CDMA システムについては、他研究者による既存検討がなく、本研究が初めての取り組みであった。

2. 研究の目的

本研究では、光アクセス網における高セキュリティ化と経済化を目的としている。上位層での暗号化ではなく、物理層でのセキュリティ確保は、CPU 処理やプロトコルに非依存である特徴を有する。光 CDMA は、全光処理で多元接続が可能であり、電気変換による速度のボトルネックがないことから物理層での高セキュリティ化との親和性が良い。本研究では、全ユーザで同じチップレートをを用いずに直交性を確保できる新しい光直交符号を開発し、高セキュリティ化と経済化を実現しつつ、マルチメディア通信に適した柔軟な光 CDMA システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、光アクセス網の高セキュリティ化・経済化のためにはどのような光 CDMA システムが望ましいのかを常に考えながら、可変チップレートの光直交符号の検討を進めた。光直交符号には、符号長、重み、相互相関パラメータ（干渉量： λ ）、所要符号語数、チップレート比、階層化のレベル数など多くの設計パラメータが存在するが、容易な条件から順に、様々な条件について検討した。

ビットレートについては、まず、ビットレートが等しい場合の検討を進め、計算機による符号探索、符号語数の上界式の導出、ビット誤り率特性の計算を行った。続いて、ビットレートが異なる場合についても同様の検討を行った。ビット誤り率特性については、これまで検討が少なかったチップ同期が取れていない現実的な条件下における厳密解析に取り組んだ。符号長、符号重み、チップレート比、符号語数を変えながら、符号が存在する条件の範囲を明らかにし、実現可能性を調べた。

符号設計法の検討については、符号探索を必要としない代数的な設計手法を確立することを目指した。拡大体に基づいた系列で

ある既存の BIBD (Balanced Incomplete Block Design) 系列の利用を試みるころから始めた。本研究における符号の特徴であるチップレートが混在しても符号語間の直交関係を維持できるという条件に適用可能なように、BIBD 系列を拡張することを試みた。得られた符号設計法については、その妥当性を検証し、計算機探索結果と同等の符号が構成できることを確認した。

4. 研究成果

本研究課題における研究成果について、説明する。

まず、ビットレートが等しい場合において、直交性の条件が最も厳しい Strict な光直交符号について、符号の存在範囲を光パルス間隔の分布に基づいて解析した。チップレート比、チップレート種類数、符号長、符号重みを与えた場合に得られる最大の符号語数を理論的に明らかにした。また、ビット誤り率特性について、チップ同期が取れているという最悪条件下で解析して得られた上界式を図 1 に示す。図中、 L はチップレート数、 U はアクティブユーザ数、 n は符号長、 w は符号重み、 k はチップレート比である。

$$\text{BER}(\text{level } l) = \frac{1}{2} \sum_{\substack{\text{for all } n_i \text{ combinations such that} \\ \sum_{i=1}^L n_i = n, \text{ and } n_i \leq n_i^* - 1}} \left(\frac{U_i - 1}{u_i} \right)^{w_i} \left(1 - \frac{w_i}{2n_i} \right)^{n_i - w_i} \prod_{i=1}^L \left(\frac{U_i}{u_i} \right)^{w_i} \left(1 - \frac{w_i}{2n_i} \right)^{n_i - w_i}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{2} \sum_{\substack{\text{for all } n_i \text{ combinations such that} \\ \sum_{i=1}^L n_i = n, \text{ and } n_i \leq n_i^* - 1}} \left(\frac{U_i - 1}{u_i} \right)^{w_i} \left(1 - \frac{w_i}{2n_i} \right)^{n_i - w_i} \prod_{i=1}^L \left(\frac{U_i}{u_i} \right)^{w_i} \left(1 - \frac{w_i}{2n_i} \right)^{n_i - w_i}$$

L : The number of levels
 U_i : The number of active users at level i
 u_i : The number of interference users at level i
 w_i : Code weight at level i
 k_i : Proportion of chip rate at level i to level 1

図 1 ビット誤り率特性の上界式

次に、計算機探索によって実際の符号を見出し、その実現可能性を示すとともに、ビット誤り率特性の評価を計算機シミュレーションと理論解析の両面から行った。過去の文献では、チップ同期が取れている最悪ケースでのビット誤り率特性を組み合わせ論によって評価している。本研究では、チップ同期が取れていない場合での厳密な解析を行い、より実際の性能に近い特性を得ることに成功した。具体的には、チップレートが異なる場合の相互相関特性を求め、アクティブユーザ数に応じた多重重み込み積分を行い、光相関器の出力値がしきい値を超える確率を理論的に導出した。数値積分の結果と計算機シミュレーションの結果の比較から、解析結果の妥当性を示した。図 2 に、チップレートが 3 種類の場合のビット誤り率特性の厳密解析について例示する。チップレート比は 1:2:4、符号長はそれぞれ 400, 800, 1600 であり、

符号重みは4とした。アクティブユーザ数は各チップレートで15ずつであり、合計45ユーザがネットワークを利用している条件としている。図から、厳密解析結果が、シミュレーション値に一致していることがわかる。

l	n_l	w_l	$ C_l $	k_l
レベル1	400	4	15	1
レベル2	800	4	15	2
レベル3	1600	4	15	4

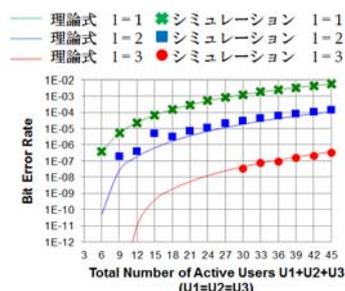


図2 ビット誤り率特性の厳密解析例

更に、計算機探索ではなく、代数的に光直交符号を設計する検討を行った。まず、BIBD法を階層的に利用することを検討した。BIBD系列は、拡大体に基づく系列であり、最適な等チップレートの光直交符号の設計を瞬時に完了させることができる。異なるチップレートが混在する場合に拡張するため、二つのアプローチを検討した。一つは、複数のBIBD系列から最適な組み合わせを選択する手法であり、もう一つは、遅いチップレートから順に階層的に設計する手法である。検討の結果、階層的な手法の方が高効率であり、多くの符号語数が得られることがわかった。図3は、遅いチップレートから順に階層的に設計する手法について示している。まず、BIBD系列に基づいて最も遅いチップレートの符号 C_1 を設計した後(図3(a))、 C_1 から一部の符号を除去し、その除去領域を拡張して速いチップレートの符号 $C_2 \sim C_3$ の設計に利用する(図3(b))。

また、パルス間隔分布の自由度の拡大の観点で、階層化手法による符号設計について検討した。低速チップレートの符号語数が多いと、高速チップレートの符号の設計の自由度が小さくなり、トレードオフの関係がある。最適な光直交符号を構成するBIBDパラメータを計算機探索で列挙し、符号の設計効率を示すことで、自由度の拡大に適した具体的なパラメータを見出した。また、符号重みが偶数の方が、奇数の場合よりも高効率であることを確認した。符号長が長いほど自由度の拡大に対する低速チップレートの符号語数の減少を小さく抑えられることがわかった。

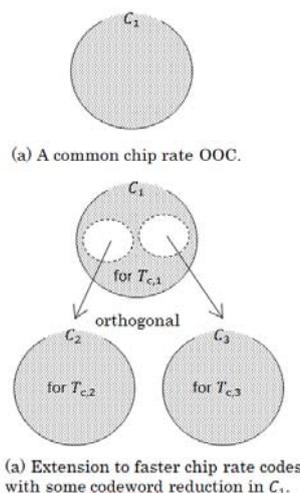


図3 符号構成法

次に、BIBD法の階層的利用の妥当性を検証するため、計算機探索による結果から得られた符号とパルス間隔分布の比較を行った。計算機探索では、符号長と符号重み以外は制約を与えない条件とした。比較結果から、階層化BIBD法と計算機探索のそれぞれで得られた符号はその構造が酷似していることが確認され、階層化BIBD法のアプローチが理論的設計法として妥当であることを示された。更に、符号設計パラメータとして導入した自由度と符号語数の関係についても明らかにし、可変チップレート光直交符号の設計におけるパラメータ設定条件を明らかにした。

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)

[学会発表] (計10件)

- (1) 山本裕美, 辻岡哲夫, “可変チップレート光直交符号のビット誤り率特性の理論解析,” 信学技報, vol. 110, no. 269, CS2010-45, pp. 49-54, 2010年11月.
- (2) 田中俊矩, 辻岡哲夫, “動き補償予測誤差に基づいて適応レート選択とレート推定を行う Distributed Video Codingの性能評価,” 第33回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, 29.2, pp. 600-605, 2010年12月.
- (3) 辻岡哲夫, 山本裕美, “可変チップレート光直交符号の設計法に関する一検討～BIBD法の階層化利用の試み～,” 信学技報 CS2010-87, pp. 91-95, 2011年3月.
- (4) Tetsuo Tsujioka, Hiromi Yamamoto, “Performance Analysis of Optical

Orthogonal Codes with Variable Chip Rates,” Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC 2011), ONS-04, Kyoto, Japan, June 2011.

- (5) 辻岡哲夫, 山本裕美, “可変チップレート光直交符号の設計法に関する一検討～パルス間隔分布の非対称性による諸問題～(招待講演),” 信学技報, vol. 111, no. 117, CS2011-15, pp. 29-34, 2011年7月.
- (6) 辻岡哲夫, 山本裕美, “可変チップレート光直交符号の設計法に関する一考察～パルス間隔分布に基づいた自由度の拡大について～,” 第34回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, 2.4.1, pp. 115-120, 2011年12月.
- (7) Tetsuo Tsujioka, Hiromi Yamamoto, “Design of Optical Orthogonal Codes with Variable Chip Rate for Flexible Optical CDMA Systems,” Proceedings of International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2012), pp.1156-1161, Phoenix Park, Korea, Feb. 2012.
- (8) 辻岡哲夫, “ビットレートが異なる可変チップレート光直交符号の検討,” 信学技報, vol. 112, no. 118, CS2012-25, pp. 11-15, 2012年7月.
- (9) Tetsuo Tsujioka, “A Study on Code Construction of Optical Orthogonal Codes with Variable Chip Rates,” Proceedings of 2012 International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA2012), pp. 571-575, Honolulu, USA, Oct 2012.
- (10) 辻岡哲夫, “マルチビットレートかつマルチチップレートな光直交符号に関する検討,” 信学技報, vol. 113, no. 114, CS2013-14, pp. 35-39, 2013年7月.

[その他]

ホームページ等

<http://www.comm.info.eng.osaka-cu.ac.jp/~tsujioka/research/ocdma.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻岡 哲夫 (TSUJIOKA TETSUO)

大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：40326252

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし