

# 光・電波融合型防犯センサネットワークの構築

研究代表者

小室 信喜

千葉大学統合情報センター 准教授

## 1 はじめに

通信機能を備えたさまざまなモノを接続し、モノとモノとの間で、自律的に情報のやり取りを実現するという IoT (Internet of Things) およびその周辺技術の開発が加速している。デバイス間の通信を無線マルチホップネットワークにより実現することによって、さまざまな環境情報をリアルタイムに低コストで収集することができる。IoT 技術をシステムの一部として利用することによって、環境モニタリング、防犯・防災、医療、ホームネットワーク、スマートグリッド向けスマートメータリングなどさまざまな分野への応用が期待できる。アプリケーションによってネットワーク構成などが異なるため、昨今ではヘテロジニアス IoT が注目されつつある [1][2]。低トラフィックセンサと高トラフィックセンサが混在するヘテロジニアスな環境では、高トラフィックセンサが通信帯域を圧迫し、ネットワーク全体の通信特性の低下をまねくおそれがある [3]。そのため、(1) 高トラフィックセンサと低トラフィックセンサとの間の干渉低減、(2) 高トラフィックセンサの情報伝送速度を向上、が重要である。

一方、我々の生活空間であるラスト 10m をカバーできる情報通信方式として、可視光通信や赤外線を利用した光無線通信が着目されている [4]-[7]。光無線通信では法規制問題がなく、技術的にも人間的にも人にやさしい、電波を用いる既存の無線通信と干渉することなく共存可能である、などの特徴を持つ。既存の無線通信と光無線通信を融合することにより、課題 (1) が解決できると期待されるが、情報伝送速度の高速化や信頼性の向上が課題である。

無線光通信におけるスループット向上法として、直交系列を用いた符号シフトキーイング (Code Shift Keying: CSK) が検討されている [8][9]。直交系列を用いた CSK は変調に用いる直交系列数を増やすことによって 1 系列当たりの情報ビット数を増加させることができる。しかし、系列数を増やすには系列長を長くする必要があるので、それによってスループットが低下するおそれがある。一方、小室らは、これまでの研究において、電波による無線通信において、非直交 CSK を用いることにより、従来の CSK 方式よりもスループットを改善できることを示してきた [10][11]。

本研究では、電波による無線通信で用いる非直交 CSK を光無線通信向けに拡張し、光無線通信におけるスループット向上法として、非直交 CSK を用いた光無線通信を提案する。提案方式では、光無線通信向けの直交系列対を接続することにより、システムチックに非直交系列を生成する方法を考案する。接続系列を用いることにより、従来の CSK と比べ、約 3 倍の系列を用いることができる。しかし、符号間干渉により、性能が劣化するおそれがある。そこで、本研究では、提案方式のスループットの理論式を導出し、その効果を明らかにする。

## 2 非直交 CSK 光無線通信方式

### 2-1 システム構成

#### (1) 非直交系列構成方法

提案方式では、要素となる直交系列を  $M_{con}$  個接続することにより非直交系列を構成する。提案方式では、接続数を  $M_{con}$ 、要素となる直交系列数を  $M_{os}$  とすると、1 つの非直交系列あたりの情報ビット数は  $\log_2(2^{M_{con}} M_{os})$  ビットである。また、直交系列長を  $L_{os}$  とすると非直交系列長  $L_f$  は  $L_{os} M_{con}$  である。

#### (2) システム構成

図 1 に提案方式の構成を示す。送信側と受信側では、+1 と -1 からなる同一種類の直交系列のセットを用意する。送信側では、まず  $\log_2(2^{M_{con}} M_{os})$  ビットのデータを  $\log_2 M_{os}$  ビットと  $M_{con}$  ビットに分割する。 $\log_2 M_{os}$  ビットのデータに応じて  $M_{os}$  個の直交系列の中から 1 つの直交系列を選択する。次に、 $M_{con}$  ビットのデータに応じて、直交系列を接続する際の極性を決定する。次に、送信側では、+1 の値のチップを +1 のパルス、-1 の値のチップを 0 として、信号を伝送する。

受信側では、送信側で用いる直交系列を同じ系列を参照系列（「+1」「-1」で構成される系列）として用いる。受信信号をチップ間隔ごとに Avalanche Photo Diode (APD) を用いて光電変換する。光電変換した電気信号は、各直交系列  $OS_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M_{os}$ ) に対応した  $M_{os}$  個の拡散系列復調器へ分配され、要素系列毎に受信信号と各直交系列との相関を取る。各直交系列の相関値の絶対値の和を求め、その値が最も大きくなる系列を、送信された系列の要素系列であると判断し、 $\log_2 M_{os}$  ビットのデータを復調する。その時の相関出力値の正負から接続パターンの極性を判定し、 $M_{con}$  ビットのデータを復調する。

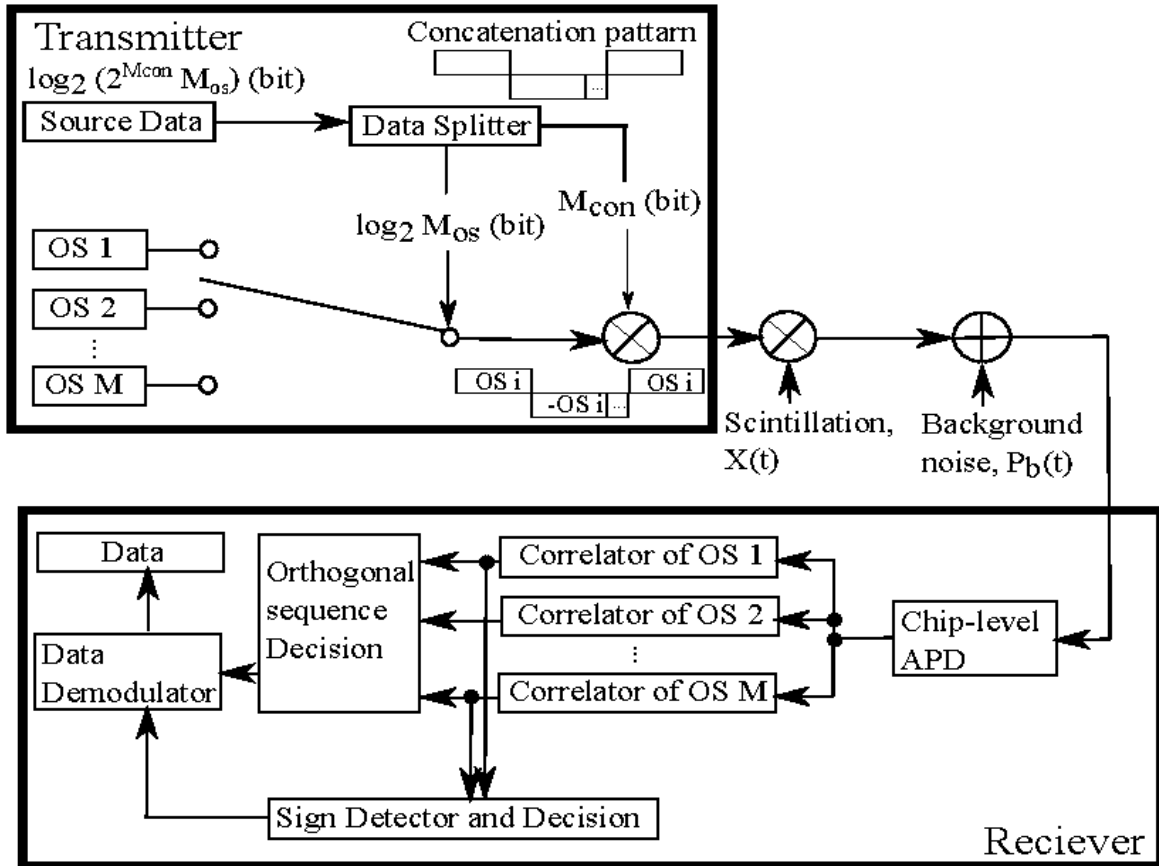


図 1：提案システムの構成

(3) 非直交系列と送信信号の例

図 2 に提案方式で用いる非直交系列と送信信号の例を示す。この例は、 $M_{os}=4$ 、 $M_{con}=3$  の場合である。直交系列を接続するパターンが (+ - -) の極性を接続する場合、図 2 に示すような非直交系列が構成される。次に、+1 の値を持つチップを +1 のパルス (Mark)、-1 の値を持つチップを 0 (space) として、送信信号を構成する。

2-2 性能解析

非直交 CSK を用いた光無線通信のスループットの理論式を導出する。誤り率特性は 1 チップ時間に APD の光入射面から吸収される光子数をポアソン分布に従うものとし、APD 出力はガウス近似する。また、シンチレーション、背景光、変調消光比、信号光によるショット雑音、暗電流によるショット雑音として APD 表面漏れ電流、APD バルク漏れ電流、電子回路の熱雑音を考慮し、フレーム同期が取れているものと仮定する。本解析で用いる記号を表 1 に示す。

表 1：本解析で用いる記号

| 記号              | 記号の意味                                      |
|-----------------|--|
| $T_c$           | チップ長                                       |
| $G$             | 平均 APD 利得                                  |
| $F$             | 過剰雑音指数                                     |
| $Me$            | 変調消光比                                      |
| $\eta$          | 量子効率                                       |
| $e$             | 電荷素量                                       |
| $\sigma_{th}^2$ | 熱雑音の分散                                     |
| $\sigma_s^2$    | シンチレーションの対数分散                              |
| $P_b$           | 背景光電力                                      |
| $P_w$           | シンチレーションと背景光の影響を除いた受信光電力                   |
| $h$             | プランク定数                                     |
| $\lambda_s$     | 光子の吸収率<br>( $= \frac{\eta P_w}{hf}$ )      |
| $\lambda_b$     | 背景光による光子吸収率<br>( $= \frac{\eta P_b}{hf}$ ) |
| $I_b$           | APD のバルク漏れ電流の平均値                           |
| $I_s$           | APD の表面漏れ電流の平均値                            |

1 フレームを正しく判定する確率  $P_c$  は、次式のように表される。

$$P_c = \int_0^\infty P(X) \left[ 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1(X)}{\sqrt{2\sigma_1^2}} \right) \right] \times (1 - P_{os}(X)) dX,$$

ここで、 $\operatorname{erfc}(x)$  は誤差補関数である。 $P(X)$  はシンチレーション  $X$  の確率密度関数であり、

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2 X}} \exp \left[ -\frac{\left( \ln X + \frac{\sigma_s^2}{2} \right)^2}{2\sigma_s^2} \right]$$

で表される。対数分散  $\sigma_s^2$  はは大気の状態や伝送距離により決定される。 $\mu_1(X)$ 、 $\sigma_1^2(X)$  は、それぞれ要素後列の極性に対する平均値と分散であり、

$$\begin{aligned} \mu_1 &= GT_c \left( \frac{L_f}{2} \lambda_s X + \frac{L_f}{2} \frac{\lambda_s X}{Me} + \lambda_b \right) \\ \sigma_1^2 &= G^2 FT_c \left[ \frac{L_f}{2} \lambda_s X + \frac{L_f}{2} \frac{\lambda_s X}{Me} + L_f \lambda_b + \frac{2I_b}{e} \right] + \frac{2I_s T_c}{e} + 2\sigma_{th}^2 \end{aligned}$$

で表される。 $P_{os}(X)$  は、送信された直交系列の推定を誤る確率である。直交系列  $x_1$  が送信されたとき、 $P_{os}(X)$  は、次式のように表される。

$$P_{os}(X) = 1 - \int_{-\infty}^\infty f(x_1) \left[ \int_{-\infty}^{x_1} f(x_{j \neq 1}, X) dx_j \right]^{M_{os}-1} dx_1,$$

ここで、 $f(x_j)$ は、直交系列  $x_j$ の相関器出力に関する確率密度関数であり、

$$f(x_j, X) = \underbrace{g(|q_j|, X) \otimes \cdots \otimes g(|q_j|, X)}_{M_{con} \text{ times}}$$

$$g(q_j, X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2(X)}} \exp \left[ -\frac{(q_j - \mu_j(X))^2}{\sqrt{2\sigma_j^2(X)}} \right]$$

$q_j$ は  $j$  番目の相関器の出力であり、 $\mu_j(X)$ 、 $\sigma_j^2(X)$ は、それぞれ  $q_j$ の平均値、分散であり、次式で表される。

$$\mu_1 = GT_c \left( \frac{L_f}{2} \lambda_s X + \frac{L_f}{2} \frac{\lambda_s X}{Me} + \lambda_b \right)$$

$$\mu_{j(j \neq 1)} = GT_c \left( \frac{L_f \lambda_s X}{Me} + \lambda_b \right)$$

$$\sigma_j^2 = G^2 FT_c \left[ \frac{L_f}{2} \lambda_s X + \frac{L_f}{2} \frac{\lambda_s X}{Me} + L_f \lambda_b + \frac{2I_b}{e} \right] + \frac{2I_s T_c}{e} + 2\sigma_{th}^2$$

以上より、提案方式のスループットは、次式で表される。

$$\eta_D = \frac{((\log_2 M_{os} + M_{con})P_c)^{\frac{L_{bit}}{\log_2 2^{M_{con}} M_{os}}}}{L_f}$$

ここで、 $L_{bit}$ は、1パケット当たりのビット数である。

### 2-3 性能評価

Sequence Inversion Keying (SIK) 方式、直交系列用いた CSK 方式および提案方式のスループットを評価する。数値諸元を表 2 に示す。

表 2：数値諸元

| 名前               | 記号           | 値  |
|------------------|--------------|--|
| レーザ波長            | $f$          | 830 (nm)                                 |
| チップ長             | $T_c$        | $4.0 \times 10^{-4}$ ( $\mu\text{sec}$ ) |
| 平均 APD 利得        | $G$          | 100                                      |
| 背景光電力            | $P_b$        | -45.0 (dBm)                              |
| APD のバルク漏れ電流の平均値 | $I_b$        | 0.1 (nA)                                 |
| APD の表面漏れ電流の平均値  | $I_s$        | 10 (nA)                                  |
| 変調消光比            | $Me$         | 100                                      |
| 受信機における雑音温度      | $T_r$        | 300 (K)                                  |
| 負荷抵抗             | $R_L$        | 1030 ( $\Omega$ )                        |
| シンチレーションの対数分散    | $\sigma_s^2$ | 0.1                                      |
| 電荷素量             | $e$          | $1.6^{-19}$ (C)                          |
| 量子効率             | $\eta$       | 0.6                                      |
| 有効電離率            | $k_{eff}$    | 0.02                                     |

図3に送信レーザーパワーに対するスループットを示す。要素系列と接続数 $(M_{os}, M_{con})=(8, 3)$ ,  $(8, 4)$   $(16, 2)$ ,  $(32, 1)$ とした場合の提案方式、 $M_{os}=32$ とした場合の直交CSKおよび、 $L_f=32$ 、 $M_{os}=1$ とした場合のSIK方式のスループットを示す。図より、提案方式のスループットは、従来方式であるSIK方式や直交CSK方式よりも高いスループットを達成できることがわかる。また、提案方式は、 $(M_{os}, M_{con})=(8, 3)$ のときに最もスループットが高くなることがわかる。

図4に、シンチレーションの対数分散に対するスループットを示す。要素系列と接続数 $(M_{os}, M_{con})=(8, 3)$ ,  $(8, 4)$   $(16, 2)$ ,  $(32, 1)$ とした場合の提案方式、 $M_{os}=32$ とした場合の直交CSKおよび、 $L_f=32$ 、 $M_{os}=1$ とした場合のSIK方式のスループットを示す。図より、提案方式のスループットは、従来方式であるSIK方式や直交CSK方式よりも高いスループットを達成できることがわかる。また、シンチレーションの影響が少ない領域において、提案方式は、 $(M_{os}, M_{con})=(8, 3)$ のときに最もスループットが高くなることがわかる。

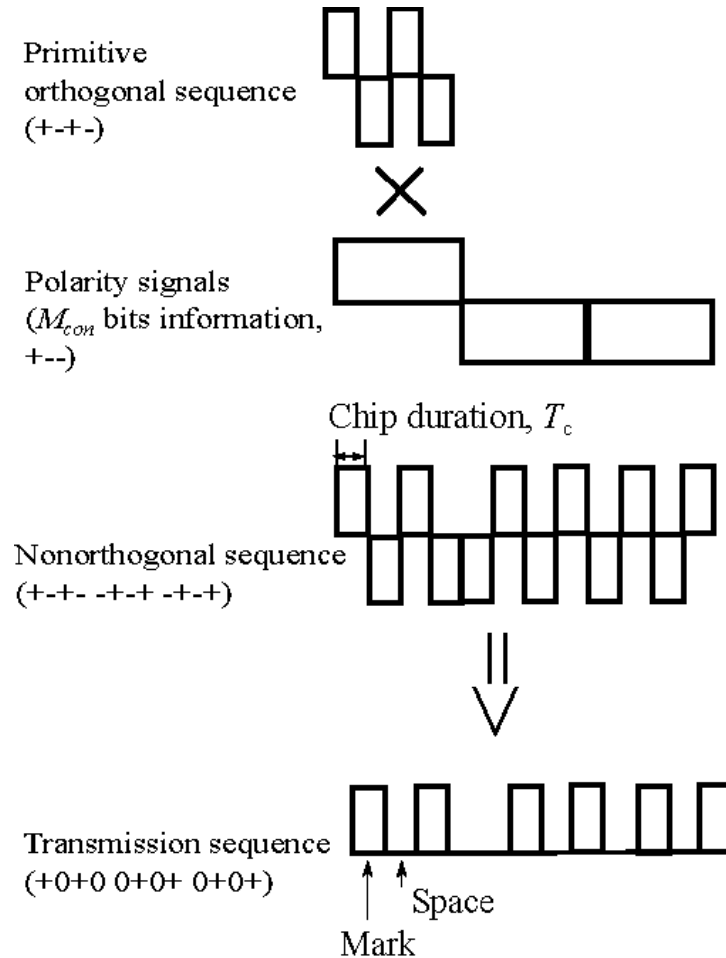


図2：非直交系列の例

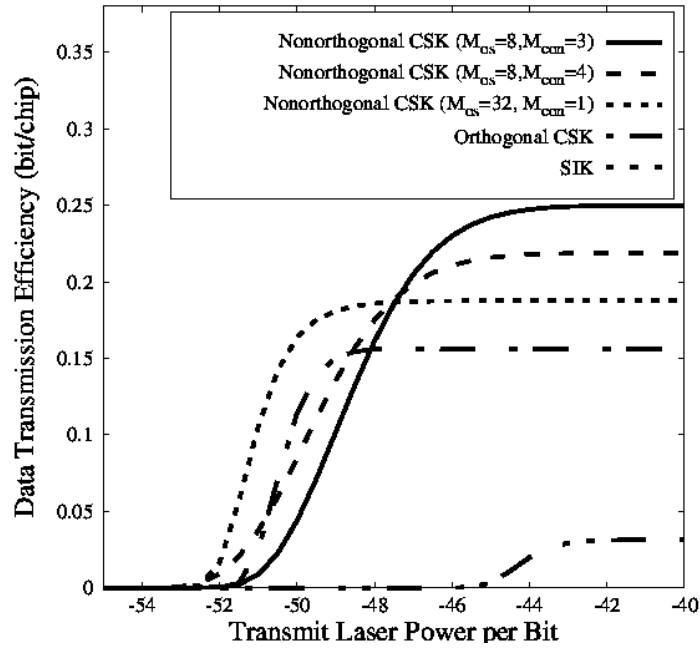


図 3: 送信レーザー光電力に対するスループット

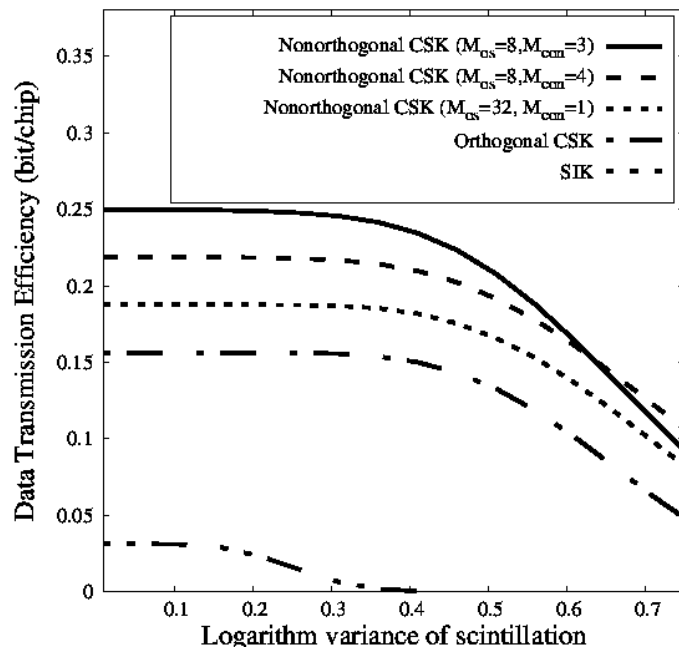


図 4: シンチレーションの対数分散に対するスループット

### 3 まとめ

本研究では、光無線通信におけるスループット向上法として、非直交 CSK を用いた光無線通信を提案した。提案方式では、光無線通信向けの直交系列対を接続することにより、システムチックに非直交系列を生成する方法を考案した。本研究では、提案方式のスループットの理論式を導出し、提案方式の有効性を評価した。その結果、提案方式は従来方式よりも高いスループットを達成できることを示した。

## 【参考文献】

- [1] T. Qiu, et al., "How Can Heterogeneous Internet of Things Build Our Future: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.20, no.3, pp.2011-2027, 2018.
- [2] M. S. Akbar, H. Yu, S. Cang, "TMP: Tele-Medicine Protocol for Slotted 802.15.4 With Duty-Cycle Optimization in Wireless Body Area Sensor Networks," IEEE SENSORS JOURNAL, vol. 17, No. 6, pp. 1925-1936, Mar. 2017.
- [3] K. Tomita, N. Komuro, "Duty-Cycle Control Achieving High Packet Delivery Ratio in Heterogeneous Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Oct. 2019.
- [4] H.M. Kwon, "Optical Orthogonal Code-division Multiple-access system -- Part I: APD Noise and Thermal Noise," IEEE Trans. Communications, vol.42, no.7, pp.2470--2479, July 1994.
- [5] Y. Qiu, et al., "Visible Light Communication based on CDMA Technology," IEEE Wireless Communications, vol.25, no.2, pp.178--185, Apr. 2018.
- [6] M.Y. Liu, et al., "Throughput Performance Analysis of Asynchronous Optical CDMA Networks with Channel Load Sensing Protocol," IEEE Photonics Journal, vol.9, no.3, June 2017.
- [7] M. Hadi, M.R. Pakravan, "Analysis and Design of Adaptive OCDMA Passive Optical Networks," Journal of Lightwave Technology, vol.35, no.14, pp.2853--2863, 2017.
- [8] C.P. Hsieh, et al., "A Bipolar-bipolar Code for Asynchronous Wavelength-time Optical CDMA," IEEE Trans. Communications, vol.54, no.7, pp.2572--2578, July 2006.
- [9] S. Takayanagi, et al., "Optical-wireless Enhanced Code-shift-keying with IM/DD," Proc. APCC, 14-PM1-C, Oct. 2015.
- [10] N. Komuro, et al., "CSK/SSMA ALOHA System with Nonorthogonal Sequences," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E87-A, No. 10, pp. 2564-2570, Oct. 2004.
- [11] N. Komuro, et al., "Nonorthogonal CSK/CDMA with Received-Power Adaptive Access Control Scheme," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E91-A, No. 10, pp. 2779-2786, Oct. 2008.

## 〈発表資料〉

| 題名  | 掲載誌・学会名等  | 発表年月    |
|---|---|---------|
| Duty-cycle Control Achieving High Packet Delivery Ratio in Heterogeneous Wireless Sensor Network          | IEEE Global Conference on Consumer Electronics            | 令和元年10月 |
| Intensity Modulation Direct Detection Optical Wireless Communication with Nonorthogonal Code Shift Keying | IEEE Global Conference on Consumer Electronics            | 令和元年10月 |
| Parallel Optical Wireless Communication System with Concatenated CSK                                      | Workshop on Optical Wireless Communication for Smart City | 令和元年12月 |