

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データ伝送効率向上法として、直交系列を用いた符号シフトキーイング (Code Shift Keying: CSK) 方式が検討されている [8] [9] [10]。直交系列を用いた CSK 方式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、それによってデータ伝送効率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 方式よりもデータ伝送効率を改善できることを示してきた [11] [12]。

本研究では、光・電波融合型無線センサネットワークについて、特に光無線通信の情報伝送速度向上に着目する。本研究では、電波による無線通信で用いる非直交 CSK 方式を光無線通信向けに拡張し、光無線通信におけるデータ伝送効率向上法として、非直交 CSK 方式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。また、データ伝送効率のさらなる向上法として、符号による光無線通信において有効性を発揮する並列組み合わせ伝送 [10] と非直交 CSK 方式を組み合わせた方式を考案する。本研究では、提案方式のデータ伝送効率およびビット誤り率を導出し、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 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。

並列組み合わせ伝送を用いる場合、 M_{os} 個の直交系列の中から m 個の系列を選択し、さらに M' 個の接続パターンによって接続することによって、複数個の系列を同時に送信する。組み合わせ数が増加することによって、データ伝送速度を向上させるというものである。

2-2 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いる。送信側では、まずソースデータを $\log_2(M_{os} C_m)$ ビットのデータと $m(M_{con} + \log_2 M_a)$ ビットのデータに分

割する。 $\log_2(M_{os}C_m)$ ビットのデータに応じて M_{os} 個の直交系列の中から m 個の直交系列を選択する。次に、 $m(M_{con}+\log_2 M_a)$ ビットのデータに応じて、直交系列の接続パターンを決定する。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。ただし、並列組み合わせ伝送を行わない場合は、 $m=1$, $M_a=1$ である。

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、その値の大きい順に m 個の系列を、送信された系列の要素系列であると判断し、 $\log_2(M_{os}C_m)$ ビットのデータを復調する。得られた m 個の相関出力値から接続パターンの極性を判定し、 $m(M_{con}+\log_2 M_a)$ ビットのデータを復調する。

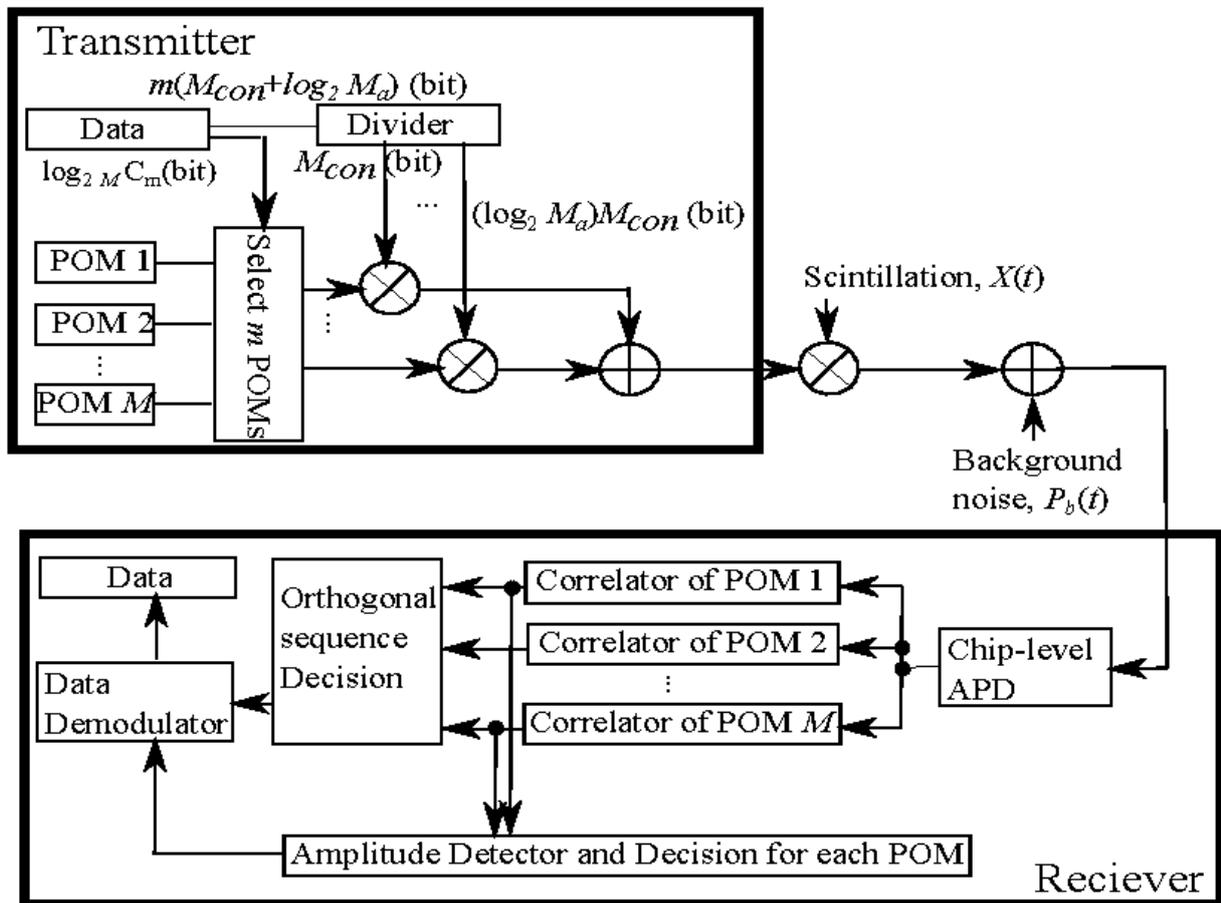


図 1: 提案システムの構成

2-3 非直交系列および送信信号の例

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、 $M_{os}=4$, $m=1$, $M_{con}=3$, $M_b=1$ 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。

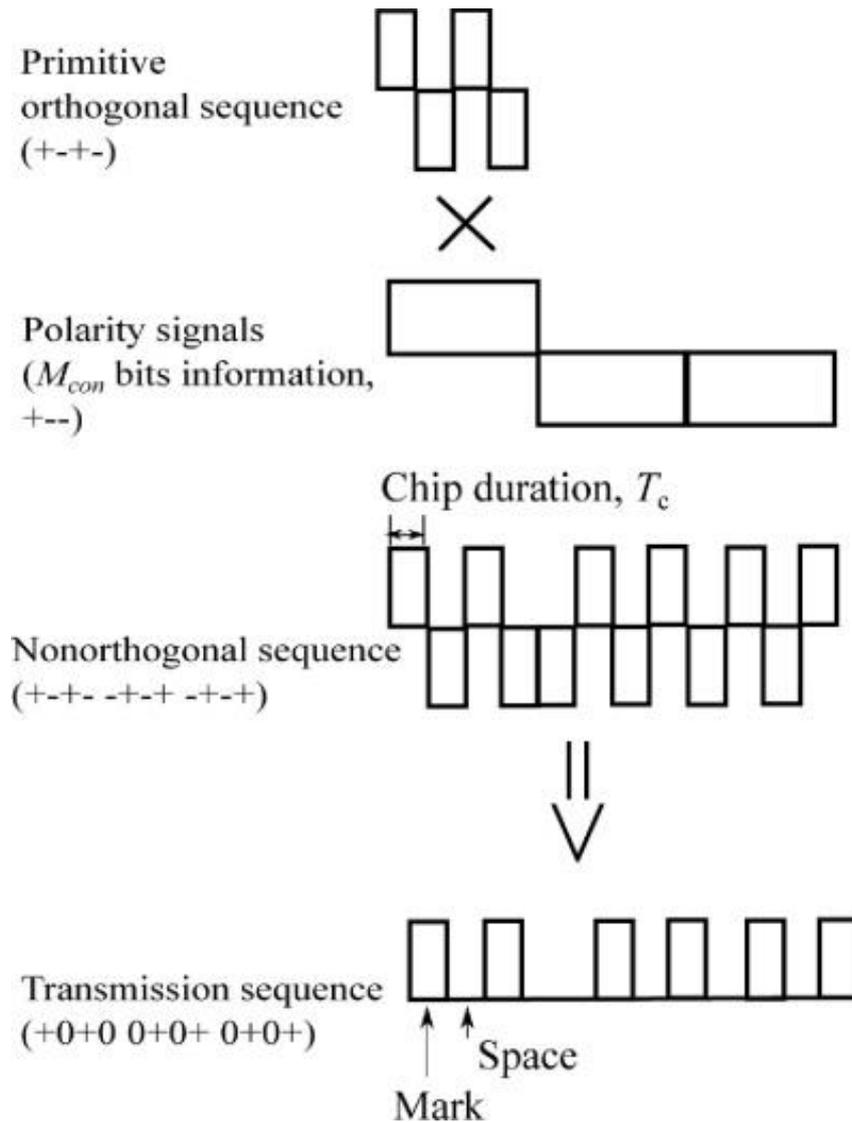


図2:非直交系列及び送信信号の例

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ビット誤り率およびデータ伝送効率を評価する。数値諸元を表 2 に示す。

図 3 に送信レーザーパワーに対するビット誤り率を示す。要素系列と接続数(M_{os}, M_{con})=(8, 3), (8, 4), (32, 1)とした場合の提案方式、直交 CSK 方式($L_f=32, M_{os}=32$)および、SIK 方式($L_f=32, M_{os}=2$)のビット誤り率を示す。実線、破線、点線は理論値、プロットはシミュレーション値を示す。図より、提案方式のビット誤り率は、従来方式である SIK 方式や直交 CSK 方式よりも低い誤り率を達成できることがわかる。また、提案方式は、 $M_{con}=4$ のときに最もビット誤り率が良いことがわかる。

図 4 に送信レーザーパワーに対するデータ伝送効率を示す。要素系列と接続数(M_{os}, M_{con})=(8, 3), (8, 4), (32, 1)とした場合の提案方式、直交 CSK 方式($L_f=32, M_{os}=32$)および、SIK 方式($L_f=32, M_{os}=2$)のデータ伝送効率を示す。実線、破線、点線は理論値、プロットはシミュレーション値を示す。図より、提案方式のデータ伝送効率は、従来方式である SIK 方式や直交 CSK 方式よりも高い伝送効率を達成できることがわかる。また、提案方式は、 $M_{con}=3$ のときに最もデータ伝送効率が良いことがわかる。

図 5 に、並列組み合わせ伝送を取り入れた場合における、選択する組み合わせ系列数 m に対する CSK 方式のデータ伝送効率を示す。要素系列と接続数(M_{os}, M_{con}, M_a)=(7, 3, 4), (7, 4, 4), (15, 2, 2), (31, 1, 1)とした場合の提案方式および直交 CSK 方式($L_f=31, M_{os}=31$)とした場合の SIK 方式のデータ伝送効率を示す。図より、従来方式である直交 CSK 方式のデータ伝送効率は 1.0 以下であるのに対し、提案方式のデータ伝送効率は 1.0 を超えることがわかる。また、提案方式は、(M_{os}, m, M_{con}, M_a)=(7, 7, 3, 4)のときに最もデータ伝送効率が高く、1.67 に達することがわかる。

図 6 に多元接続環境下における、送信レーザーパワーに対するビット誤り率を示す。要素系列と接続数(M_{os}, M_{con})=(7, 3), (7, 4), (31, 1)とした場合の提案方式、直交 CSK 方式($L_f=31, M_{os}=31$)および、SIK 方式($L_f=31, M_{os}=2$)のビット誤り率を示す。実線、破線、点線は理論値、プロットはシミュレーション値を示す。図より、提案方式のビット誤り率は、従来方式である SIK 方式や直交 CSK 方式よりも低い誤り率を達成できることがわかる。また、提案方式は、(M_{os}, M_{con})=(7, 3)のときに最もビット誤り率が良いことがわかる。

表2 数値諸元

Name	Symbol	Value
Laser wavelength	F	830 (nm)
Chip duration	T_c	4.0×10^{-4} (μsec)
Average APD gain	G	100
Background noise	P_b	-45.0 (dBm)
Bulk leakage current	I_b	0.1 (nA)
Surface leakage current	I_s	10 (nA)
Modulation extinction ratio	Me	100
Receiver noise temperature	T_r	300 (K)
Receiver load resistor	R_L	1030 (Ω)
Scintillation logarithm	σ_s^2	0.1
Elementary charge	E	1.6×10^{-19} (C)
Quantum efficiency	η	0.6
Effective ionization ratio	k_{eff}	0.02

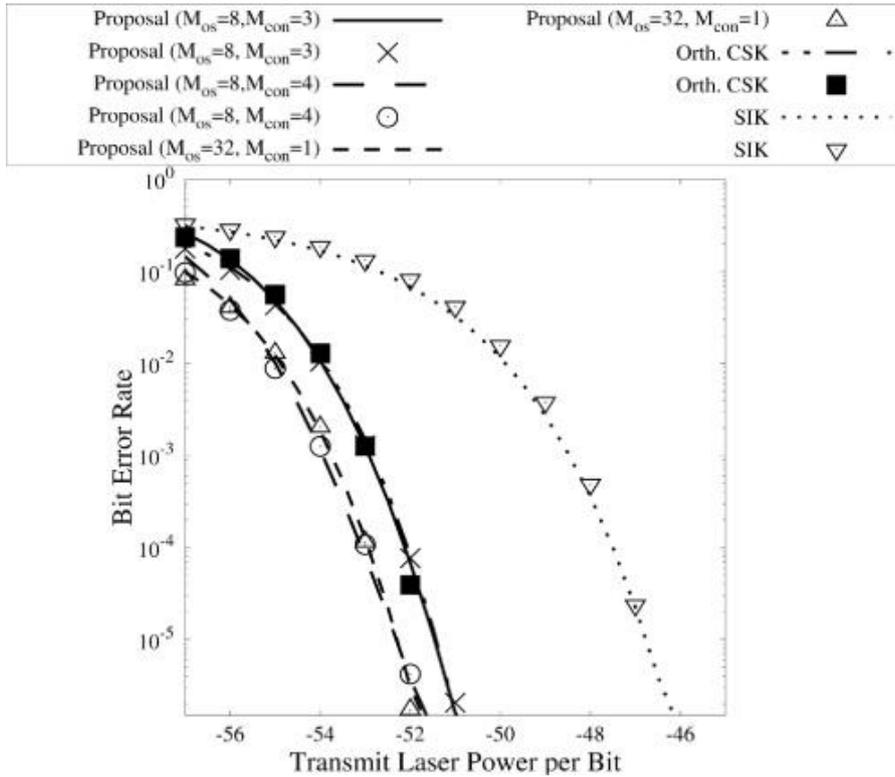


図 3: 提案方式、直交 CSK 方式および SIK 方式のビット誤り率

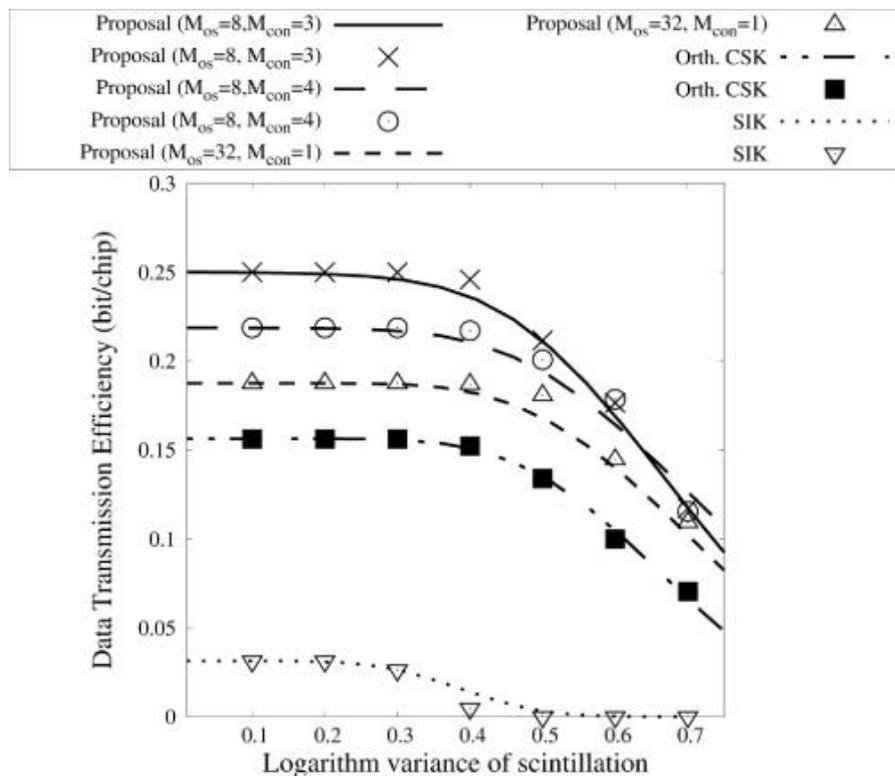


図 4: 提案方式、直交 CSK 方式および SIK 方式のデータ伝送効率

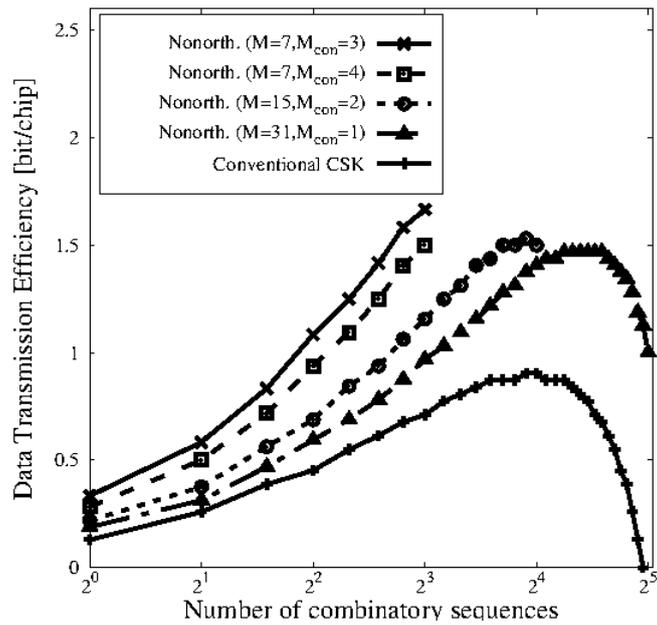


図 5: 提案方式および直交 CSK 方式における並列組み合わせ伝送の効果

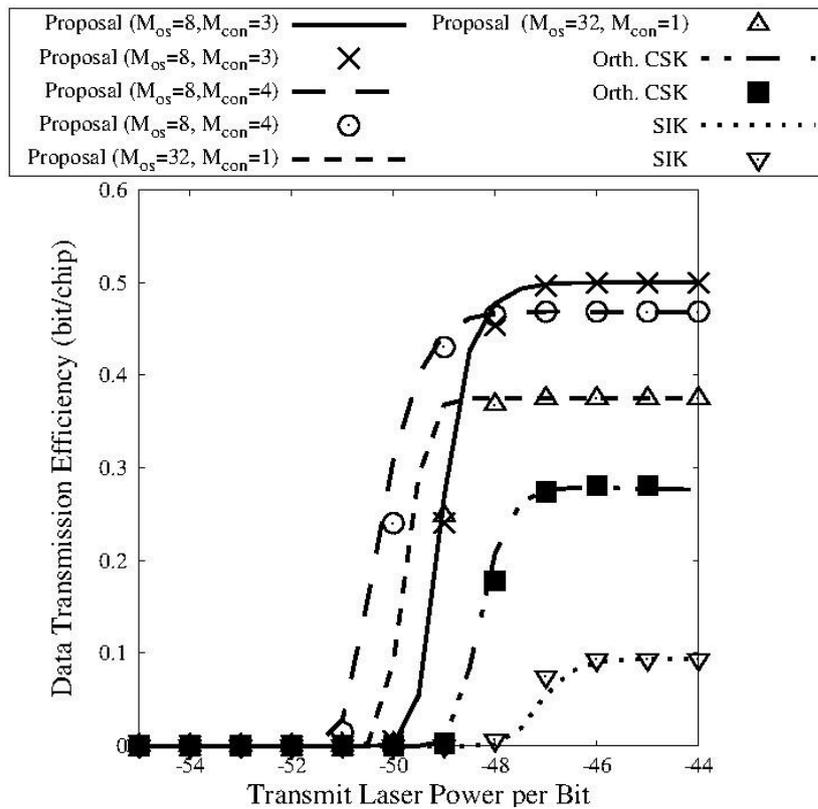


図 6: 符号分割多元接続環境下における提案方式、直交 CSK 方式および SIK 方式のデータ伝送効率

4 まとめ

本研究では、本研究では、光・電波融合型無線センサネットワークについて、光無線通信の情報伝送速度向上に着目し、非直交 CSK 方式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。また、データ伝送効率のさらなる向上法として、符号による光無線通信において有効性を発揮する並列組み合わせ伝送と非直交 CSK 方式を組み合わせた方式を考案した。本研究では、提案方式のデータ伝送効率およびビット誤り率を導出し、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伝送効率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] T. Tokunaga, H. Habuchi, and Y. Kozawa, "New Two-Layered Pseudo-Noise Code for Optical-Wireless Code-Shift Keying/SCDMA." Proc. International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications (IWSDA), pp.149–153 (2017).
- [11] N. Komuro, et al., "CSK/SSMA ALOHA System with Nonorthogonal Sequences," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E87-A, No. 10, pp. 2564-2570, Oct. 2004.
- [12] 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
Parallel Optical Wireless Communication System with Hierarchical Nonorthogonal Code Shift Keying	International Conference on Telecommunications and Communication Engineering (ICTCE)	令和2年12月
Duty Cycle Control Method Considering Buffer Occupancy for IEEE 802.15.4-Compliant Heterogeneous Wireless Sensor Network	Applied Sciences, vol. 11, no. 4	令和3年2月
Nonorthogonal CSK/SS ALOHA system under MANET environment	Elsevier ICT Express	令和3年3月
Design and analysis of optical wireless code shift keying with nonorthogonal sequences	OSA Continuum, vol.4, no.5	令和3年5月
Data Transmission Efficiency of the Nonorthogonal CSK-used Optical Code Division Multiple Access System	IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)	令和3年9月
Markov-chain Analysis Model based Active Period Adaptation Scheme for IEEE 802.15.4 Network	IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)	令和3年9月