

1000台規模のIoTシステムを実現する 非同期パルス符号多重通信APCMA

大阪大学 大学院情報科学研究科

教授 若宮直紀

2023年2月2日

6Gと大規模IoT

ターゲットエリア

超低消費電力・低コスト

- 環境発電による長期稼働
- ビットあたりのコスト低減

超多数接続

- 平方kmあたり1,000万デバイス

超カバレッジ

- 遠隔地もカバー
- 空・海・宇宙への展開

超簡易

- Kbpsのデータレート
- 軽量アルゴリズム

超高セキュリティ

- 安全、堅牢、秘匿、強靱なセキュリティ

超高信頼通信

- 幅広いユースケースにおける品質保証
- 10億分の1の packet loss 率

超低遅延

- 1ms以下程度の超低遅延
- 常時安定した低遅延性

ユーザーの高移動性

- 超高速移動への対応

詳細な状態管理

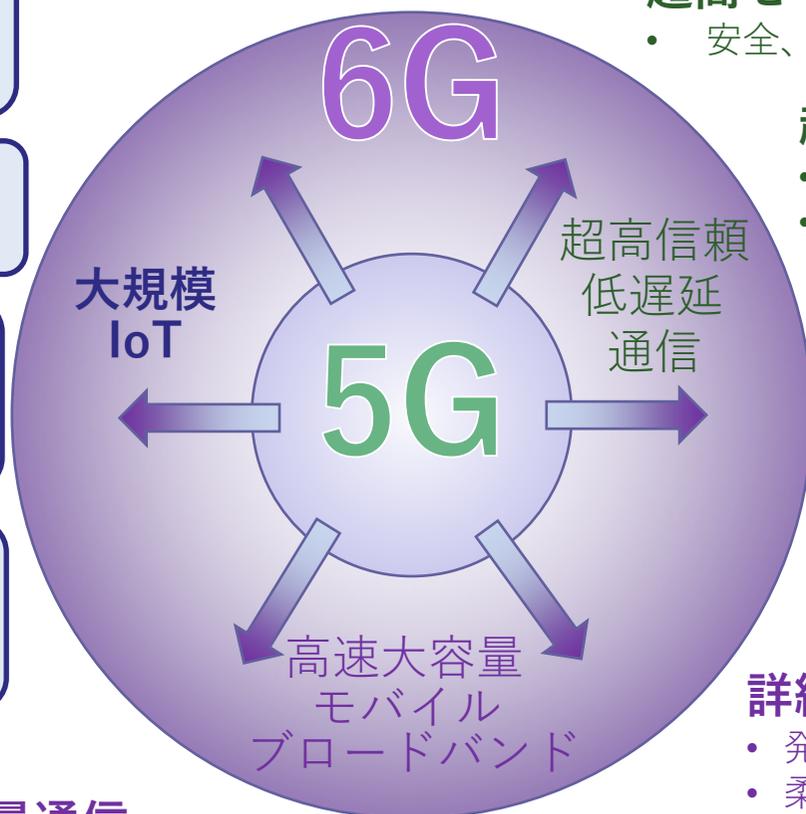
- 発見と最適化
- 柔軟な適応制御

超大容量通信

- 平方kmあたり1ペタbit

超高速通信

- 最大100Gbps超



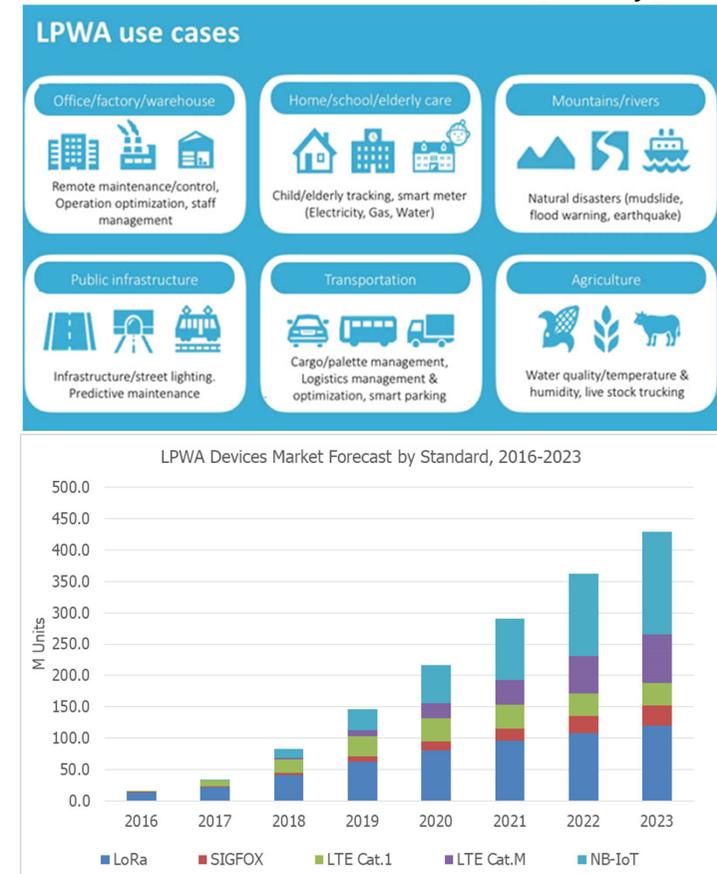
大規模IoT向け通信技術

- LPWA (Low Power Wide Area)
 - LoRa、Sigfoxなど
 - 応用例：山火事の監視、農作物の管理、石油パイプライン監視、子供の見守りなど
 - 実用的なデバイス数は高々200台程度
 - 特に高密度環境では、衝突、干渉により通信成功率が著しく低下

- 非同期パルス符号多重通信APCMA

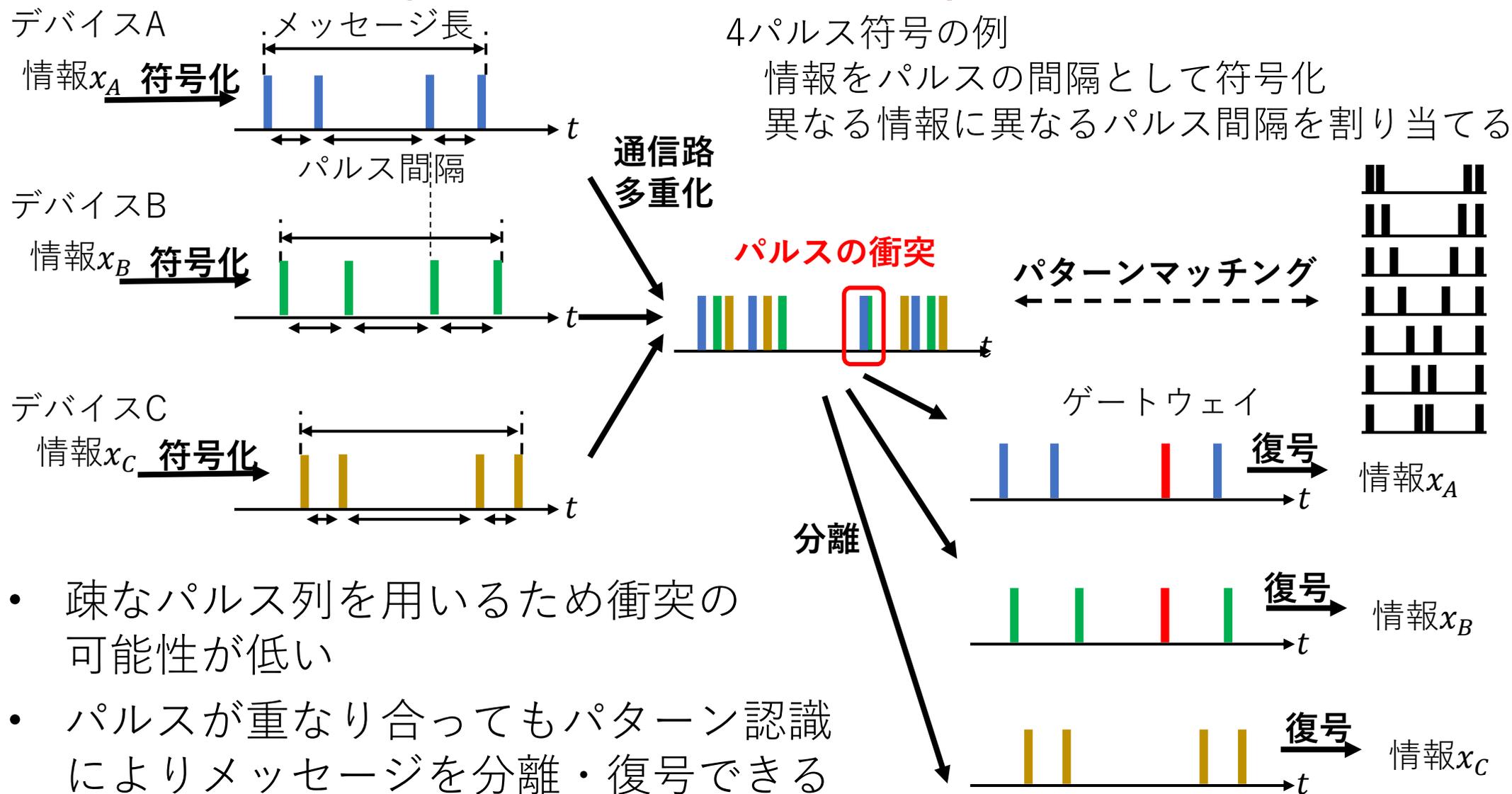
- 非常にまばらなパルス列を使用
- 高い拡張性（数万デバイス）、長距離送信、低消費電力、低価格
- デバイス1500台での通信実験に成功

[Activity]



[IoT Business News]

非同期パルス符号多重通信APCMA (Asynchronous Pulse Code Multiple Access)



- 疎なパルス列を用いるため衝突の可能性が低い
- パルスが重なり合ってもパターン認識によりメッセージを分離・復号できる
- 同一周波数帯でキャリアセンス無しに同時送信できる

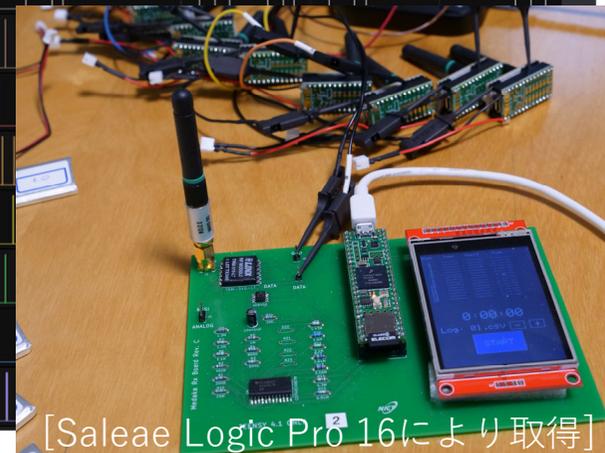
実機実験の様子

- 送信機15台のパルスが多重されたパルス列信号を受信
- 復調アルゴリズムにより信号を分離してメッセージを復調

Logic 2 [Logic Pro 16 - Connected]
File Edit Capture Measure View Help

9パルス信号（アドレス部5パルス+データ部5パルス）、デューティ比0.06%

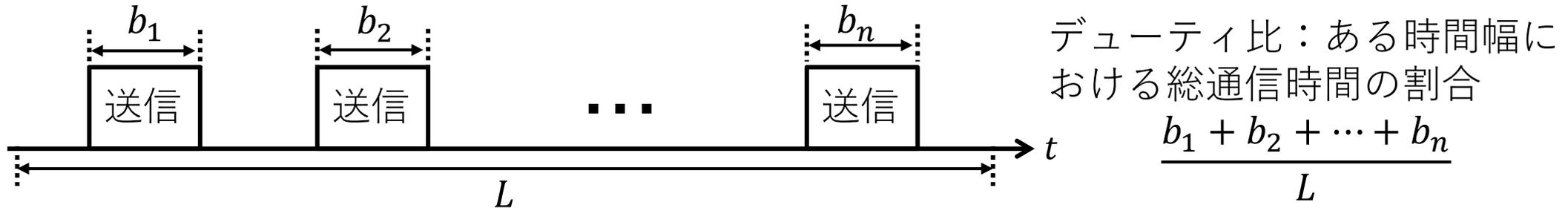
受信機



[Saleae Logic Pro 16により取得]

既存技術との比較：デューティ比と送信間隔

- 無線通信標準規格（ARIB STD-T108等）では、デューティ比に制限

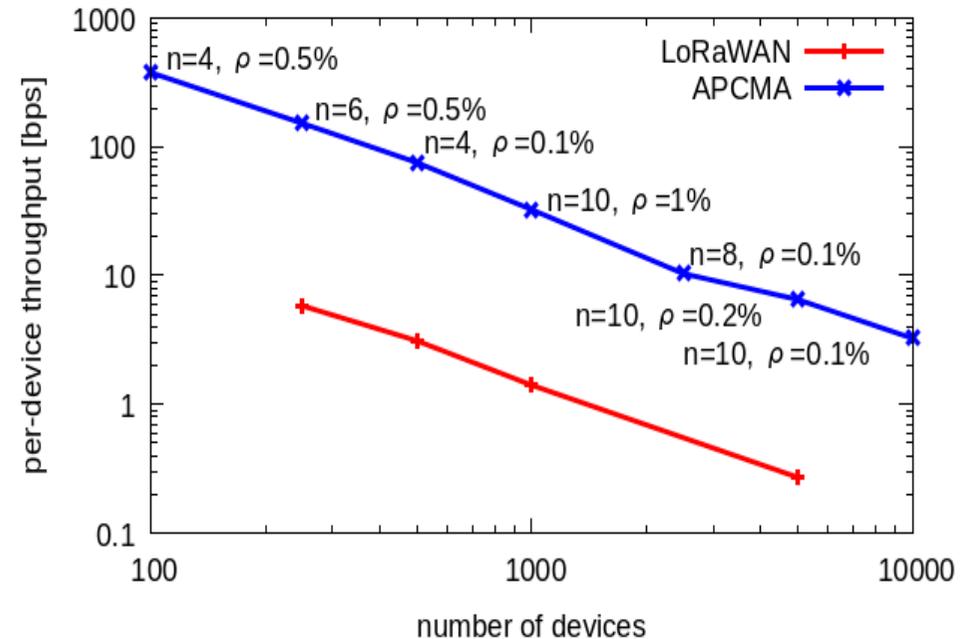
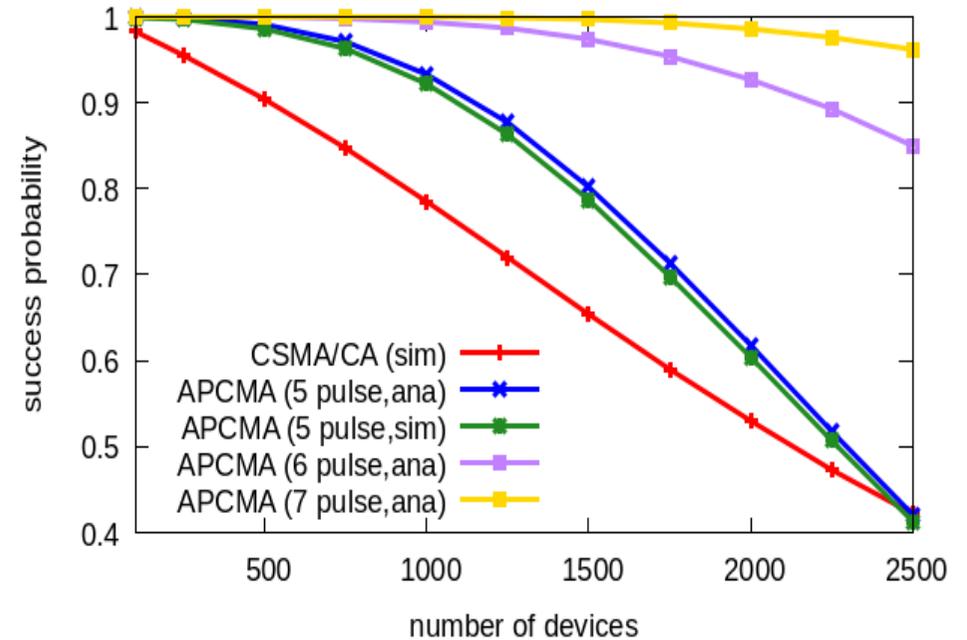


例) デューティ比制限0.1%の場合、通信できるのは1時間あたり3.6秒

- LoRaWAN
 - メッセージあたり11バイト、送信時間371ミリ秒
 - 1時間あたり9.7回（6分に1回）しか送信できない
 - さらに衝突により受信できるメッセージ数が減少する
- APCMA
 - メッセージあたり11バイト、送信時間2ミリ秒（ 512μ 秒 \times 4パルス）
 - 1時間あたり1800回（2秒に1回）送信できる
 - 衝突による影響を受けにくい

既存技術との比較：性能

- 解析やシミュレーションでの評価
- CSMA/CAより高い通信成功率
 - メッセージ送信前にキャリアセンス
+ランダム待機による衝突回避
 - IoT向けIEEE 802.11.ahなどで使用
 - 特に台数が多い場合に顕著な差
- LoRaWANよりも高いスループット
 - APCMAと同様にキャリアセンスの無いALOHA方式を使用
 - 一桁以上高いスループット

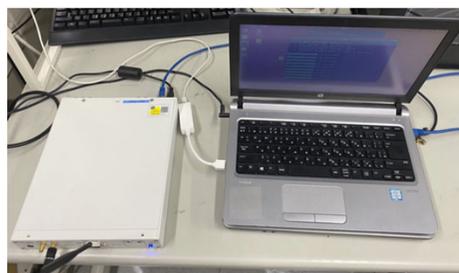


既存技術との比較：性能

- 実機実験での評価



送信機 (STM32L433)
技術適合証明取得済
(TELEC認証)



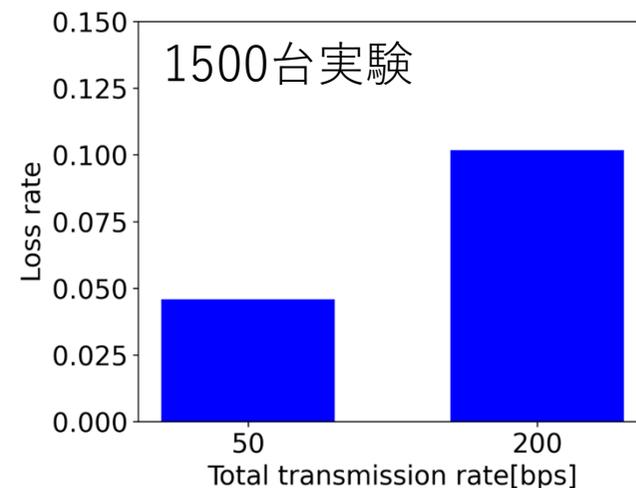
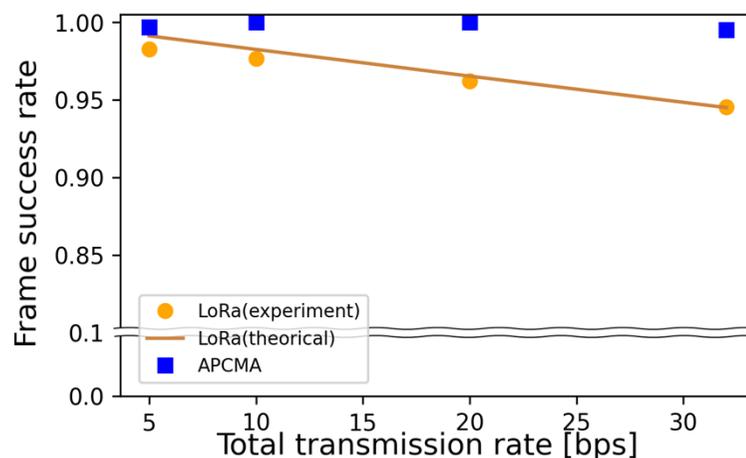
受信機 (USRP x310)



送信機1500台

パラメータ	設定可能な値
変調方式	OOK, CSS (SF : 7, 10, 12)
符号化方式	4パルス, 5パルス, 6パルス
データサイズ	12~24 bit
チャンネル	920 MHz帯 (1ch~5ch, 24ch~61ch)
帯域幅	100, 125, 250, 1000 kHz
送信電力	1 mW, 20 mW
連続休止期間	50 ms~
パルス幅	128 μ s~40.96 ms

LoRaとの比較
(50台, 250kHz)



500台実機実験の様子

送信機 500 台での大規模無線通信実験による実証

超高密度IoTを実現する 非同期パルス符号多重通信 APCMA

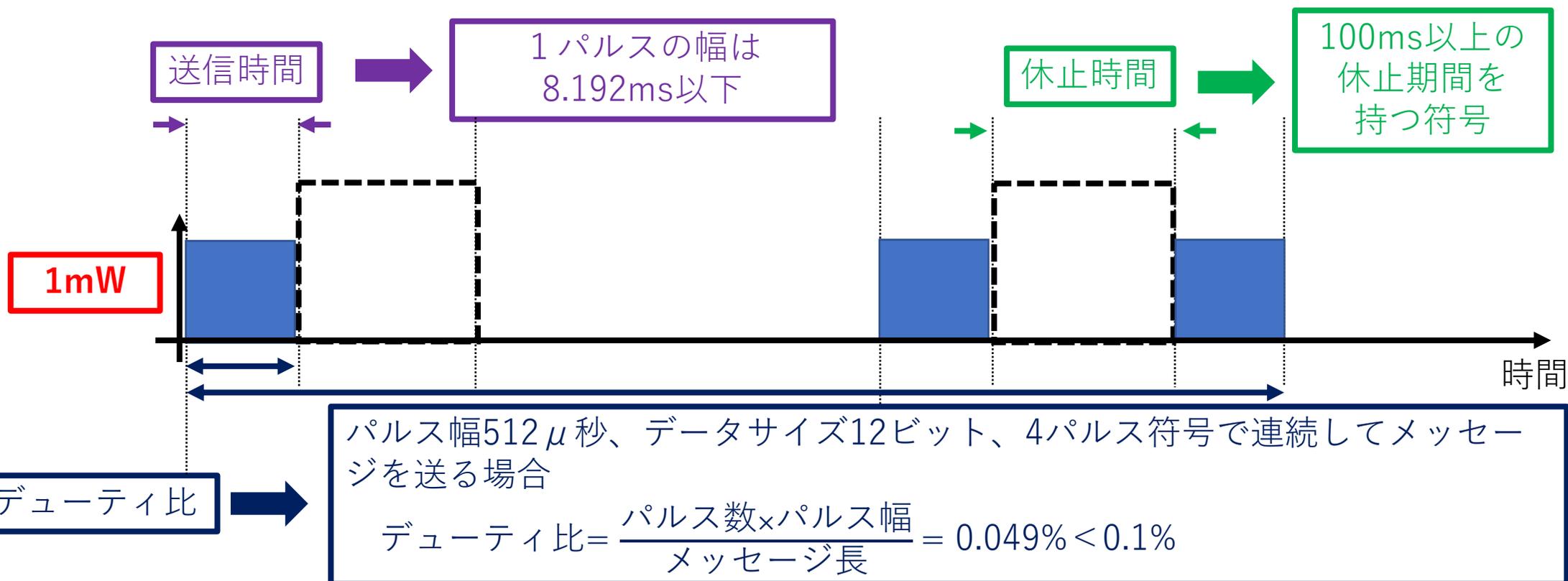
東京理科大学 長谷川幹雄

大阪大学 若宮直紀

情報通信研究機構 Ferdinand Peper, Kenji Leibnitz

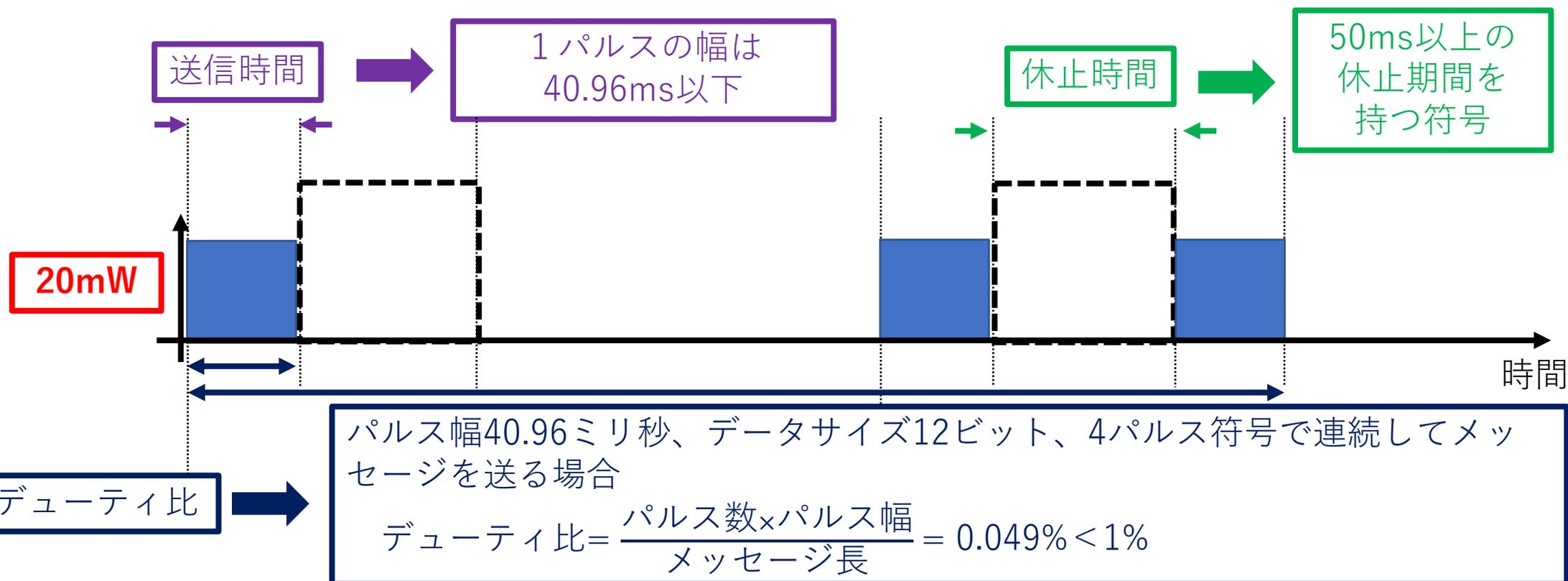
ARIB STD-T108対応 (500台)

	空中線電力	周波数帯域	帯域幅	送信時間制限	休止時間	デューティ比
規定	1mW以下	916MHz~916.8MHz 922.4MHz~928.0MHz	~1000kHz	100ms以下	100ms	0.1%以下
実装	1mW	916MHz~916.8MHz 922.4MHz~928.0MHz	125~1000kHz	128~8192us	100ms以上	0.1%以下



ARIB STD-T108対応 (1000台)

	空中線電力	周波数帯域	帯域幅	送信時間制限	休止時間	デューティ比
規定	20mW以下	920.6MHz~923.4MHz	~200kHz	4s以下	50ms	1%以下
実装	20mW	920.6MHz~923.4MHz	100, 125kHz	~40.96ms	50ms以上	1%以下



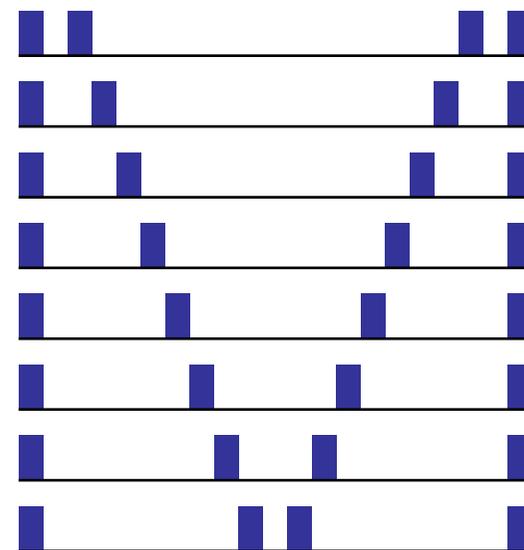
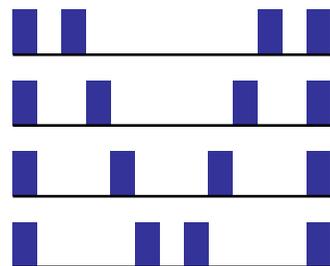
APCMAの特徴・既存技術との比較

- パルス符号の応用により、多数端末／高密度通信におけるパケット衝突を大幅に改善
- 既存のIoT向け無線通信（LPWA）は長距離低消費電力が特徴であり、提案技術は加えて多数端末通信が実現可能
- キャリアセンス不要のためリアルタイムな伝送が可能
- 送信機の設計が簡易になるため、実装コストの低減も期待される
- パルス数は送信するデータ量（ビット数）に依存しないため、帯域使用効率が高い

－ ただしメッセージは長くなる

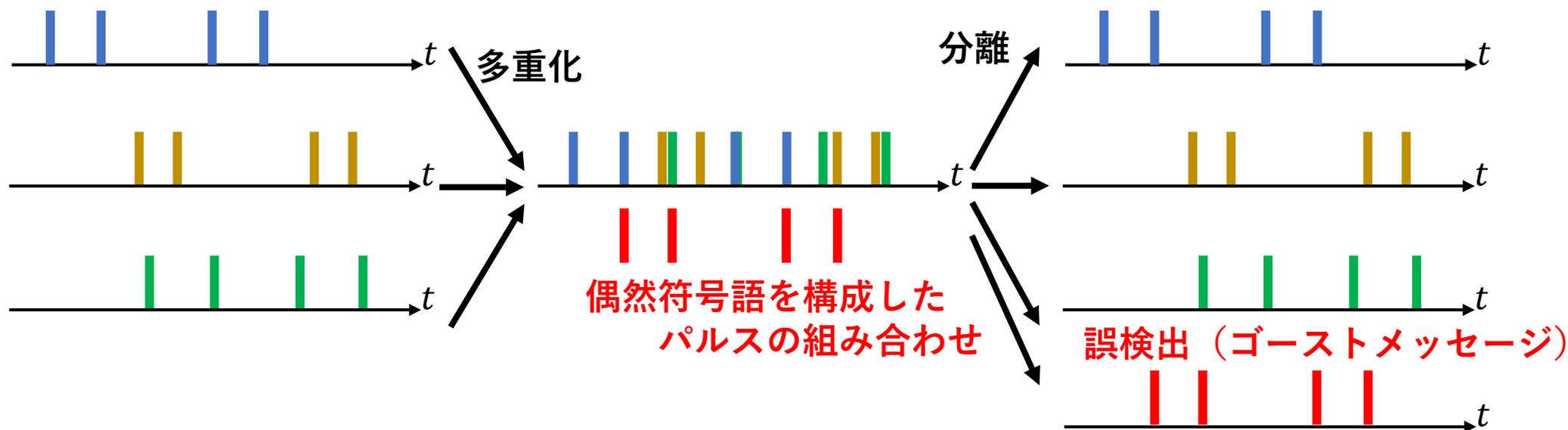
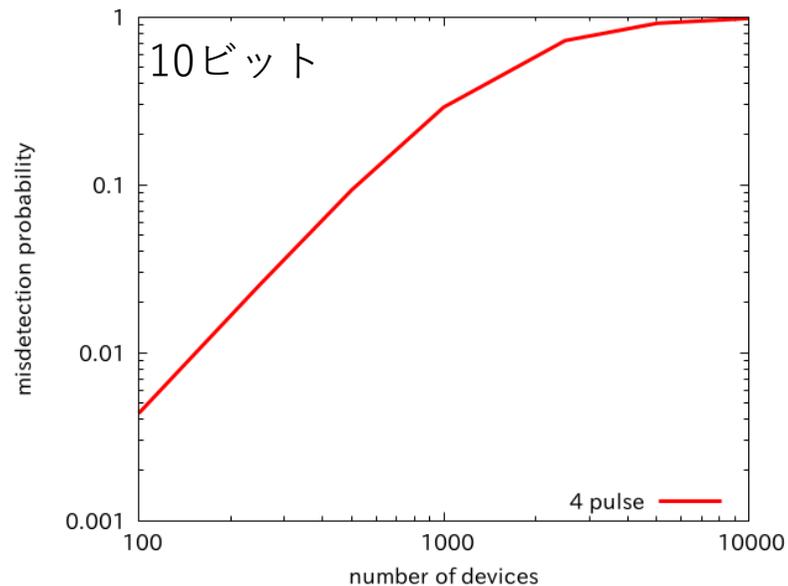
3ビットの場合、
8パターンの符号

2ビットの場合、
4パターンの符号



APCMAの性能向上

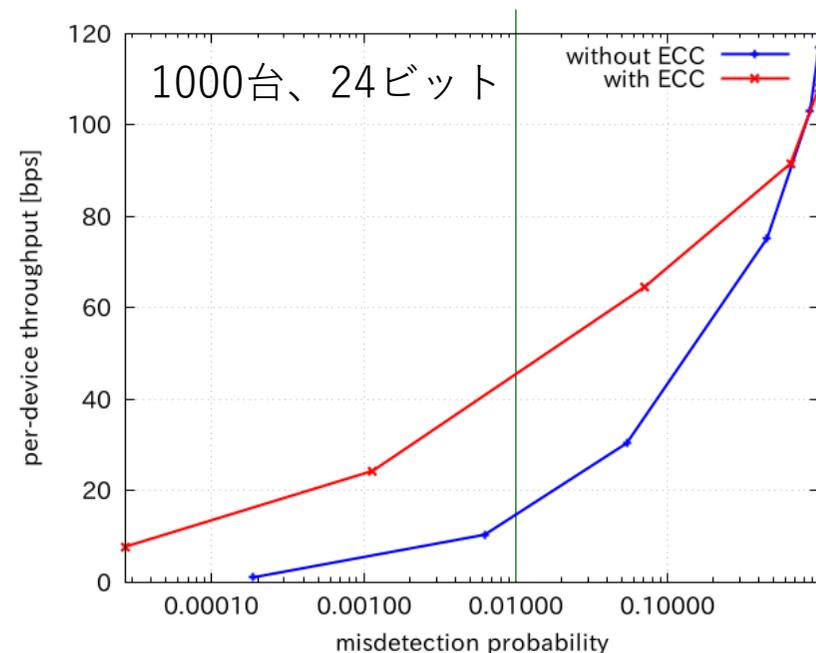
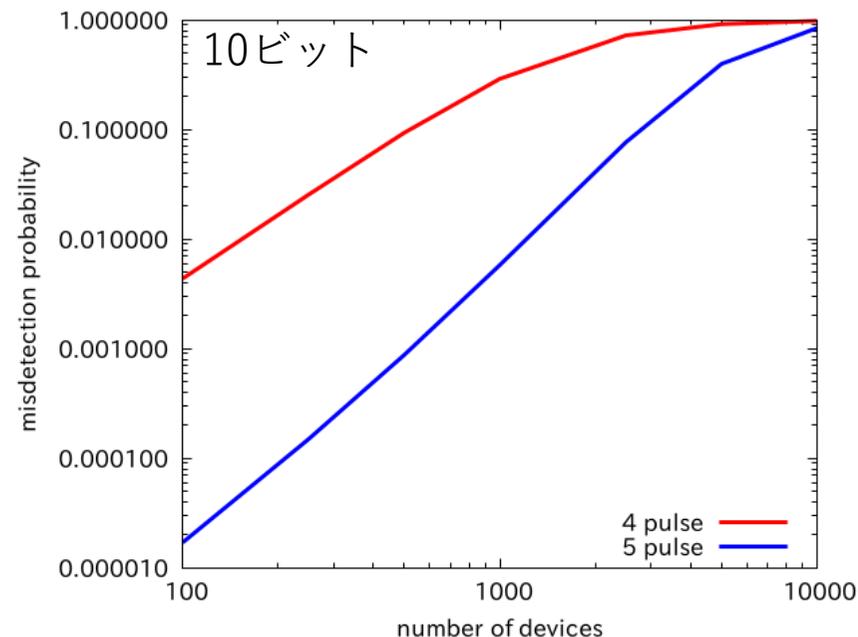
- パターンマッチングで分離・復号するために、デバイス数、通信量が増えると実際には送信されていないメッセージ（ゴーストメッセージ）を誤検出してしまふ
- スループットと誤検出率には正の相関
- 誤検出率を低減することで多数のデバイスによるデータ通信におけるデータレート向上が期待できる



新技術による解決

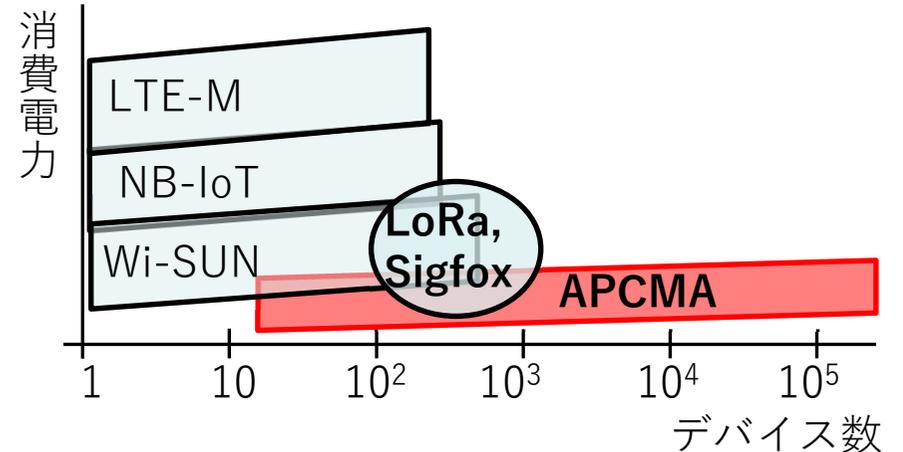
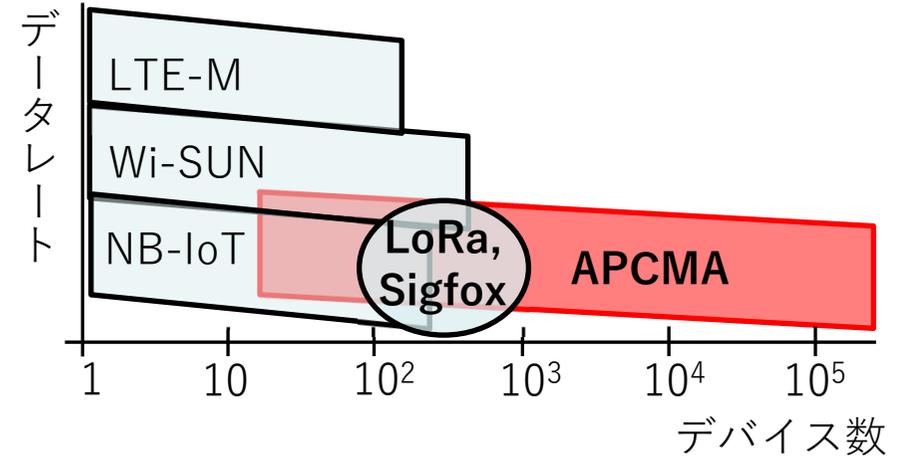
- よりパルス数の多い符号の生成
 - パルス数が多いほど偶然の一致の可能性が下がるため誤検出を抑制できる
- より多様な符号語の生成
 - 符号語間の差を大きくすることで、ゴーストメッセージの発生を抑制できる
- 誤り訂正符号との組合せ
 - 符号語に誤り訂正符号の冗長ビットを付加することでゴーストメッセージを検出、除去できる

これら新技術によってデータレートが向上



想定される用途

- 多数のIoTデバイスによる監視
 - メータ監視
 - 大規模集会や医療機関での体調管理
 - 工場での機器管理
 - 構造物や施設のモニタリング
- モノの追跡
 - バイオ医薬品の温度管理
 - 商品の盗難防止
 - 建設現場での資材管理
- 僻地でのIoT導入
 - 山火事の監視
 - 海洋の水温・潮流モニタリング
 - 魚群管理
 - 農作物の生育状態把握



実用化に向けた課題

- 応用先の要件に合わせた設計/開発
 - デバイス数、データレート/通信速度、フィールドサイズ、等の要件定義
- 製品化に向けたチップ化/パッケージ化
 - コストが問題
- 3月にYRPで1000台規模のフィールド実験を実施予定

企業への期待

- 実応用における多数デバイス通信（IoT等）のニーズ/要件の抽出
 - 応用先システムイメージ
 - デバイス数、データレート/通信速度、フィールドサイズ、等
- 実フィールドにおける実験/実証
 - 街中、工場内、等
- 製品化のための共同研究
 - チップ化、パッケージ化、等

- 随時デモ実施可能
- 4月以降、貸出キットを提供予定

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：通信プログラム及びパルス符号列の割り当て方法
- 出願番号：特願2023-13137
- 出願人：国立研究開発法人情報通信研究機構、学校法人東京理科大学、
国立大学法人大阪大学
- 発明者：ペパーフェルディナンド、ライプニッツケンジ、長谷川幹雄、
若宮直紀

- 関連特許
 - 発明の名称：通信方法およびネットワークシステム
 - 出願番号：特願2018-134365

本技術に関する文献リスト

学術論文

- [1] N. Wakamiya, K. Leibnitz, F. Peper, M. Hasegawa, “Evaluation and optimization of asynchronous pulse code multiple access,” Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 13, no. 2, pp. 318-323, 2022.
<https://doi.org/10.1587/nolta.13.318>
- [2] F. Peper, K. Leibnitz, C. Tanaka, K. Honda, M. Hasegawa, K. Theofilis, A. Li, N. Wakamiya, “High-Density Resource-Restricted Pulse-Based IoT Networks,” IEEE Transactions on Green Communications and Networking, vol. 5, no. 4, pp. 1856-1868, 2021. <https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3090044>
- [3] C. Tanaka, K. Honda, A. Li, F. Peper, K. Leibnitz, K. Theofilis, N. Wakamiya, M. Hasegawa, “Performance evaluation of pulse-based multiplexing protocol implemented on massive IoT devices,” Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 12, no. 4, pp. 726-737, 2021. <https://doi.org/10.1587/nolta.12.726>
- [4] C. Tanaka, F. Peper, M. Hasegawa, “Application of APCMA protocol to power packet networks for multiplexing power packet transmissions,” Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 11, no. 4, pp. 433-445, 2020.
<https://doi.org/10.1587/nolta.11.433>

国際会議

- [1] K. Leibnitz, F. Peper, K. Theofilis, M. Hasegawa, N. Wakamiya, “Evaluating Multiple-Access Protocols: Asynchronous Pulse Coding vs. Carrier-Sense with Collision Avoidance,” MobiQuitous2021, vol. 419, pp. 693-706, 2021.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-94822-1_45
- [2] N. Wakamiya, K. Leibnitz, F. Peper, M. Hasegawa, “Evaluation and Optimization of Asynchronous Pulse Code Multiple Access Scheme,” Nonlinear Science Workshop, 2021.
- [3] C. Tanaka, K. Honda, A. Li, F. Peper, K. Leibnitz, K. Theofilis, N. Wakamiya, M. Hasegawa, “Performance evaluation of pulse-based multiplexing protocol implemented on massive IoT devices,” Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 12, no. 4, pp. 726-737, 2021. <https://doi.org/10.1587/nolta.12.726>
- [4] C. Tanaka, F. Peper, M. Hasegawa, “Application of APCMA protocol to power packet networks for multiplexing power packet transmissions,” Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. 11, no. 4, pp. 433-445, 2020.
<https://doi.org/10.1587/nolta.11.433>

本技術に関する文献リスト

国内学会

- [1] 本多顕太郎, 中村敦, 塩塚阜平, ペパーフェルディナンド, ライプニッツ賢治, 若宮直紀, 長谷川幹雄, “500台の送信機を用いた高密度通信方式APCMAの実証,” 信学技報電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 122, no. 243 (SR2022-65), pp. 105-108, 2022.
- [2] 塩塚阜平, 本多顕太郎, ライプニッツケンジ, ペパーフェルディナンド, 若宮直紀, 前田慶博, 長谷川幹雄, “多数LoRaデバイスを用いた性能評価および最適パラメータの探索に関する考察,” 電子情報通信学会 技術研究報告, 2023.
- [3] 中村敦, 本多顕太郎, ペパーフェルディナンド, ライプニッツ賢治, 若宮直紀, 長谷川幹雄, “高密度IoT向けCSS-APCMA方式のGNU Radio/USRPを用いた性能評価,” 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 122, no. 66 (CSS2022-21), pp. 106-110, 2022.
- [4] K. Leibnitz, F. Peper, N. Wakamiya, M. Hasegawa, “On Asynchronous Pulse Coding and Carrier Sense Multiple Access,” 電子情報通信学会 総合大会, N-2-9, 2022.
- [5] 若宮直紀, ライプニッツ賢治, ペパーフェルディナンド, 長谷川幹雄, “非同期パルス符号多重通信APCMAにおけるメッセージ分割・結合による性能向上,” 電子情報通信学会 総合大会, N-2-10, 2022.
- [6] 本多顕太郎, 中村敦, F. Peper, K. Leibnitz, K. Theofilis, 若宮直紀, 長谷川幹雄, “CSS-APCMA方式を実装した500台の送信機を用いた高密度通信の性能評価,” 電子情報通信学会 総合大会, N-2-11, 2022.
- [7] 中村敦, F. Peper, 本多顕太郎, K. Leibnitz, K. Theofilis, 若宮直紀, 長谷川幹雄, “チャープスペクトル拡散を用いたAPCMA方式のGNU Radio/USRPを用いた性能評価,” 電子情報通信学会 総合大会, N-2-12, 2022.
- [8] 本多顕太郎, 田中智恵美, 李傲寒, ペパーフェルディナンド, セオフィリスコンスタンティノス, 若宮直紀, 長谷川幹雄, “Massive IoTにおけるAPCMA方式の実装と性能評価,” 電子情報通信学会 総合大会, N-2-4, 2021.
- [9] F. Peper, K. Leibnitz, K. Theofilis, M. Hasegawa, C. Tanaka, K. Honda, A. Li, N. Wakamiya, “High-Density Wireless Networks based on Asynchronous Pulse Code Multiple Access (APCMA),” 電子情報通信学会 総合大会, N-2-1, 2021.
- [8] 若宮直紀, ライプニッツ賢治, ペパーフェルディナンド, 長谷川幹雄, “非同期パルス符号多重通信APCMAの基本特性評価,” 電子情報通信学会 総合大会, N-2-3, 2021.

本研究は、大阪大学 大学院情報科学研究科、東京理科大学 工学部 電気工学科、情報通信研究機構との共同研究によるものであり、総務省 SCOPE（JP205007001）の受託研究として行っています。

お問い合わせ先

大阪大学

共創機構 イノベーション戦略部門 知的財産室

<TEL> 06-6879-4861

<e-mail> tenjikai@uic.osaka-u.ac.jp