

令和元年5月27日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04361

研究課題名(和文) Massive Connect IoT 高効率同期無線ネットワークの実験的実証

研究課題名(英文) Experimental Evaluation and Demonstration of Massive Connect IoT with High-Efficiency Synchronous Wireless Network

研究代表者

亀田 卓 (Kameda, Suguru)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：10343039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：Massive Connect IoT の実現のために、準天頂衛星システム(QZSS)や全地球測位システム(GPS)の測位信号によって得られる時刻情報や位置情報を基に送信タイミング制御を行うことで実現できる高効率な上りリンク同期スペクトラム拡散・符号分割多元接続(SS-CDMA)通信を提案している。QZSS や GPS から得られた測位信号を基にして、各端末がどの程度の時刻精度で送信タイミング制御できるかを実験的に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線通信ネットワークにおいて、ネットワーク内のすべてのノード(端末・基地局)が時刻同期を行った上で信号の送受信を行う方式はこれまでもいくつかの提案があるものの、その実現性を通信実験により実証した例にはほとんどない。さらに、高精度な位置情報を活用して同期通信を行う先行研究例は見当たらず、本研究の独創性は非常に高いと考える。また、高精度時刻・位置情報そのものが無線通信のみならず幅広い分野に活用可能である。本研究を通じて時刻・位置情報の活用可能性を実験により実証することで、今後の新たな学問分野の開拓のきっかけになる可能性を秘めている。

研究成果の概要(英文)：To realize Massive Connect IoT, we have proposed uplink synchronous spread spectrum code division multiple access (SS-CDMA) communication by using high-accurate transmission timing control method. The proposed transmission timing control method can be achieved by getting time and position information from the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) and the Global Positioning System (GPS). Based on the positioning signals obtained from QZSS and GPS, we experimentally verified to what degree of accuracy each terminal can control transmission timing.

研究分野：無線通信工学

キーワード：IoT タイミング制御 スペクトラム拡散 符号分割多元接続(CDMA) 準天頂衛星システム(QZSS) 全地球測位システム(GPS) 時刻情報 位置情報

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

情報通信ネットワークは、今日まで高速・大容量化を中心に研究開発が進められており、近年では LTE-A (Long Term Evolution Advanced) に代表される新しい移動通信ネットワークが整備されつつある。今後は人間同士の情報伝達という従来の枠組みを超え、交通・農業・電力などあらゆる分野において、社会基盤として M2M (Machine to Machine) や IoT (Internet of Things) の利用が進むと想定される。膨大な量のセンサで計測された幅広いデータを解析することで新たなサービスを生み出す、いわゆるビッグデータの活用が期待され、無線通信ネットワークも個々のサイズは小さいが膨大な量のパケットがやり取りされる“Massive Connect IoT”へと進展すると考える。Massive Connect IoT ではこれまでの周波数資源の高効率利用（高速・大容量化）に加え、低機能な端末（センサ）から頻りにパケットが発生するため、アクセス制御技術の簡素化や高効率化が求められる。また、端末は頻りに起動し送信を行うため、初期同期捕捉などのオーバーヘッド（消費電力）はできるだけ小さい方が望ましい。

### 2. 研究の目的

申請者らはこれまで Massive Connect IoT のための高効率同期 SS-CDMA (Spread Spectrum Code Division Multiple Access) 無線通信ネットワークを提案してきた。上りリンク（端末→基地局）では、CDMA と Flame Slotted ALOHA を組み合わせて大容量化可能な方式を提案している。従来の非同期 CDMA 方式の上りリンクでは、端末間が非同期であるため各端末信号間の直交性劣化によって生じる干渉により高効率通信が難しかった。一方、提案方式では準天頂衛星システム (QZSS) や全地球測位システム (GPS) からの測位信号によって得られるナノ秒オーダーの時刻情報やメートルオーダーの位置情報を基に、上りリンク同期 SS-CDMA 通信を行う。端末は高精度位置情報を基に得られる基地局までの距離から算出される送信タイミング調整量と高精度時刻情報に基づく送信タイミングの制御を行う。各端末が送信した上りリンク信号は基地局受信時点においては同期が実現されているため、理想チャネル容量に対してほぼフルロードの高効率 SS-CDMA 通信が実現できる。さらに、時刻同期を用いることで端末・基地局間の初期同期捕捉の簡素化も可能となり、低消費電力化に大きく寄与できる。

これまで、内閣府が計画する QZSS 安否確認システムへの適用を考慮した設計・評価を行ってきた。この場合、端末はスマートフォンなど、基地局は通信衛星を経由した先の地上のハブ局であり、内閣府が目標としている 1 時間あたり 300 万端末からの情報収集が可能であることを示した。

本研究課題では、QZSS/GPS 測位信号を基に端末がどの程度の時刻精度で送信タイミング制御可能であるか、フィールド試験によって実証することを目指す。

### 3. 研究の方法

提案方式の有効性を示すためには、提案方式において最も特徴的である時刻・位置情報を基にした送信タイミングの制御を実験的に実証することが重要である。この実証のために、研究当初は以下の 3 フェーズで実験と評価を行う計画を立案した：

【フェーズ 1】QZSS/GPS 同期発振器の時刻・位置情報の実測評価

【フェーズ 2】任意波形発生器などの信号発生器を用いた送信タイミング制御の実測評価

【フェーズ 3】ソフトウェア無線機 (USRP) に実装した送信機を用いたフィールド試験

フェーズ 3 については計画通りに進まない場合には測定器を用いるなどの複数の対策も検討していた。

### 4. 研究成果

【フェーズ 1】QZSS/GPS 同期発振器の時刻・位置情報の実測評価

QZSS/GPS 同期発振器の個体差や天空率によって変化する可視衛星数・水平精度低下率 (HDOP) の違いなどによる同期性能評価を行った。

さらに、QZSS や GPS から得られる時刻情報・位置情報を同時に測定することで、受信タイミング同期評価を行った。同一の QZSS・GPS 受信機から出力される時刻情報である PPS (pulse per second) 信号から測定される端末時刻偏差と、位置情報 (緯度・経度・高度) により算出される伝搬遅延算出誤差を同時に測定した。衛星到達タイミング誤差は、各測定時刻における端末時刻偏差と伝搬遅延算出誤差の和によって算出した。測定はオープンスカイ環境にて、4 つの受信機を同一の場所に設置することにより行った。その結果、99.98 % の端末で、高密度なユーザ多元接続が可能となる 50 ns 以内の衛星到達タイミング誤差を達成可能であることが明らかとなった。

【フェーズ 2】任意波形発生器を用いた送信タイミング制御の実測評価

フェーズ 3 の進捗が早いこと、実装ならびに実測評価に関してはフェーズ 2 の内容を省略することとした。

一方、フェーズ 2 の検証においては本研究課題開始後の追加課題として、SS-CDMA と同様に高密度多元接続が可能な過負荷伝送方式の一つである非直交多元接続 (NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access) による高効率化の可能性について、理論検討ならびに計算

機シミュレーションによる検証を行った。

NOMA は複数のユーザ端末 (UE: User Equipment) の信号を電力軸に重畳し、同一周波数上で同時通信を可能とする技術であり、非直交 UE 間のチャンネル利得差が大きい場合にシステム容量とユーザ間公平性を両立可能であり、従来の直交多元接続 (OMA: Orthogonal Multiple Access) と比較し改善できる。しかし、NOMA を実装するためには送信機の電力増幅器の非線形歪みによる伝送品質の劣化、ならびに上りリンクにおける各 UE の独立したフェージングによる受信点における干渉 (MAI: Multiple Access Interference) の発生が課題となる。そこで本研究課題では、まず送信機内部の電力増幅器の非線形歪みに対して UE に適用する変調多値数ごとの低ビット誤り率 (BER) を実現可能な送信 EVM (Error Vector Magnitude) 性能を示した。また上りリンクにおいて、独立したフェージングチャンネルに起因する MAI の発生を抑制するため、周波数領域送信等化 (Pre-FDE) の適用を提案し、低 BER の通信が実現できることを明らかにした。

[フェーズ 3] USRP に実装した送信機を用いたフィールド試験

USRP への送受信機の実装を主に行った。しかし USRP の GPS モジュールの性能が不十分であることが分かったため、実装にマイコンと FPGA を用いたシステムの構築に着手した。

送信機において最も重要な送信タイミング制御システムは、QZSS・GPS 受信機、送信タイミング算出部、遅延制御部の 3 点から構成される。QZSS・GPS 受信機以外の送信タイミング算出部と遅延制御部はハードウェア構成とした。送信タイミング制御システムは携帯端末に接続して使用することを前提とし、さらに搭載する動作クロックの値は高速であることが望ましいものであるため、今後のシステムの小型化・高速化を鑑み LSI (Large-Scale Integrated Circuit) 化可能な FPGA ロジックにて実装した。FPGA ボードは Altera 製の FPGA チップである Cyclone V を搭載した Terasic 製 C5GX を用いた。

本送信機を用いてフィールド実験を行った結果、使用想定環境下における最大送信制御時間に相当する遅延量 6 ms の際の送信タイミング制御誤差が 30 ns 以内に収まると推定されるクロック周波数誤差は 100 MHz に対して 5 ppm 以内であることが分かった。本結果から、提案システム実現に十分なタイミング制御精度を確保可能であると考察できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- [1] S. Kameda, A. Taira, Y. Miyake, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, "Evaluation of synchronized SS-CDMA for QZSS safety confirmation system," *IEEE Trans. Veh. Technol.* (早期公開済). (査読有)  
<https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2905530>
- [2] S. Kameda, K. Ohya, H. Oguma, and N. Suematsu, "Experimental evaluation of synchronized SS-CDMA transmission timing control method for QZSS short message communication," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E102-B, no.8, August 2019 (早期公開済). (査読有)  
<https://doi.org/10.1587/transcom.2018EBP3166>
- [3] S. Kameda, K. Ohya, T. Takahashi, H. Oguma, and N. Suematsu, "Random access control scheme with reservation channel for capacity expansion of QZSS safety confirmation system," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E102-A, no.1, pp.186-194, Jan. 2019. (査読有)  
<https://doi.org/10.1587/transfun.E102.A.186>
- [4] S. Kameda, K. Ohya, R. Shinozaki, H. Oguma, and N. Suematsu, "Experimental evaluation of synchronization accuracy considering sky view factor for QZSS short message synchronized SS-CDMA," *IEICE ComEX*, vol.7, no.9, pp.322-327, Sept. 2018. (査読有)  
<https://doi.org/10.1587/comex.2018XBL0082>

[学会発表] (計 23 件)

(国際会議)

- [1] K. Mayama, K. Akimoto, S. Kameda, and N. Suematsu, "Evaluation of link level performance considering EVM of transmit signal for downlink NOMA," 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2018), Kyoto, Japan, Nov. 2018.  
<https://doi.org/10.23919/APMC.2018.8617620>

- [2] H. Oguma, R. Kawai, T. Asai, M. Motoyoshi, S. Kameda, and N. Suematsu, “Transmitting timing calculation unit with CPU on FPGA for QZSS short message SS-CDMA communication,” SmartCom 2018, SR2018-60, Bangkok, Thailand, Oct. 2018.
- [3] K. Mayama, K. Akimoto, S. Kameda, and N. Suematsu, “Uplink non-orthogonal multiple access with single-carrier frequency domain equalization,” SmartCom 2018, SR2018-63, Bangkok, Thailand, Oct. 2018.
- [4] R. Kawai, H. Oguma, S. Kameda, and N. Suematsu, “Construction of transmission timing control system using FPGA for QZSS short message synchronized SS-CDMA communication,” International Conference on ICT Convergence 2017 (ICTC 2017), Jeju Island, Korea, Oct. 2017.  
<https://doi.org/10.1109/ICTC.2017.8190972>
- [5] S. Kameda, K. Ohya, H. Oguma, and N. Suematsu, “QZSS short message synchronized SS-CDMA communication,” 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017), Sendai, Japan, Sept. 2017 (招待講演).
- [6] K. Ohya, S. Kameda, H. Oguma, and N. Suematsu, “Experimental evaluation of transmission timing control method for QZSS short message synchronized SS-CDMA communication,” 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2017), Milan, Italy, July 2017.  
<https://doi.org/10.1109/ICUFN.2017.7993809>
- [7] K. Ohya, S. Kameda, H. Oguma, A. Taira, N. Suematsu, T. Takagi, and K. Tsubouchi, “Experimental evaluation of timing synchronization accuracy for QZSS short message synchronized SS-CDMA communication,” 27th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2016), Valencia, Spain, Sept. 2016.  
<https://doi.org/10.1109/PIMRC.2016.7794636>

(国内学会・研究会など)

- [8] 真山 健大, 秋元 浩平, 亀田 卓, 末松 憲治, “上り回線非直交多元接続 (NOMA) における周波数領域送信等化を用いるシングルキャリア伝送の一検討,” 信学技報, RCS2018-239, March 2019.
- [9] 小熊 博, “Internet of Things: データ収集からセキュリティまで,” 富山大学次世代スーパーエンジニア養成コース 電機システム工学特論 (メカトロニクスと AI/IoT), 2018 (チュートリアル講演).
- [10] 真山 健大, 秋元 浩平, 亀田 卓, 末松 憲治, “下り回線非直交多元接続 (NOMA) における EVM を考慮した受信特性の評価,” 信学技報, RCS2018-91, July 2018.
- [11] 真山 健大, 秋元 浩平, 亀田 卓, 末松 憲治, “下り回線非直交多元接続 (NOMA) における不完全 SIC 時の通信路容量の評価,” 信学技報, SR2017-109, Jan. 2018.
- [12] 河合 怜, 小熊 博, 大屋 慶, 亀田 卓, 末松 憲治, “QZSS ショートメッセージ SS-CDMA 通信の実験的評価 —FPGA を用いた送信タイミング制御システムの構築—,” 信学技報, SR2017-15, May 2017.
- [13] 大屋 慶, 亀田 卓, 小熊 博, 末松 憲治, 高木 直, 坪内 和夫, “QZSS ショートメッセージ同期 SS-CDMA 通信における送信タイミング制御の実験的検討,” 信学技報, SR2016-109, March 2017.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：末松 憲治

ローマ字氏名：(SUEMATSU, Noriharu)

所属研究機関名：東北大学

部局名：電気通信研究所

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：20590904

研究分担者氏名：本良 瑞樹  
ローマ字氏名：(MOTOYOSHI, Mizuki)  
所属研究機関名：東北大学  
部局名：電気通信研究所  
職名：助教  
研究者番号 (8桁)：40736906

研究分担者氏名：小熊 博  
ローマ字氏名：(OGUMA, Hiroshi)  
所属研究機関名：富山高等専門学校  
部局名：電子情報工学科  
職名：教授  
研究者番号 (8桁)：40621909

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。