

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：15401
 研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
 研究期間：2017～2022
 課題番号：16KK0139
 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（国際共同研究強化）

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

研究代表者
 亀田 卓（Kameda, Suguru）
 広島大学・ナノデバイス研究所・教授

研究者番号：10343039
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,800,000円
 渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：基課題（基盤研究（B））においては、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した。本研究課題においては、基課題の発展課題として、送信タイミング制御の精度が同期SS-CDMAのチャネル利用効率に与える影響の検討、ならびに高密度多元接続が可能で過負荷伝送方式の適用検討を国際共同研究で実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案方式の高精度な位置・時刻情報を用いた無線通信ネットワークの構築技術は、その実現性を通信実験により実証した先行研究は見当たらず、本提案方式の独創性や先進性は非常に高い。また、航法衛星システム分野は多数の国や地域が航法衛星システムの構築・保有を目指し競争している状況であり、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。よって、より高精度な時刻・位置情報の高度利用の可能性が広がると予想される。本国際共同研究を通じて、世界に先駆けて時刻・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）：In the original project (Scientific Research (B)) related to this project, we aimed to demonstrate how accurately a terminal can control the timing of transmission based on QZSS/GPS positioning signals by field trials. In this project, as an extension of the original project, we have investigated the effect of the transmission timing control accuracy on the channel utilization efficiency of synchronized SS-CDMA and the overloaded transmission method that enables high-density multiple access.

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

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、研究者個人に帰属します。

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

情報通信ネットワークは、高速・大容量化を中心に研究開発が進められており、研究開始当時は 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った。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ていた。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ていた。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)から頻繁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、端末は頻繁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と考えていた。

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。

基課題(基盤研究(B))においては、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した。この実証のために、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。

一方、航法衛星システム分野(高精度時刻・位置情報)の研究開発動向は、既に普及している米国の GPS 以外にも多数の国や地域が航法衛星システムの構築・保有を目指し研究開発を進めている状況である。国際共同研究によって海外の研究者とともに急速に進展する本分野の研究開発動向の情報共有をしつつ、知的財産を確保した上で共同研究を進めることが必要不可欠となっている。そこで、貴課題で検討しているテーマのいくつかについて、国際共同研究にて進めることとした。

3. 研究の方法

本研究課題においては、基課題の 3 つのフェーズのうち実証フェーズ 2 における発展課題として送信タイミング制御の精度が同期 SS-CDMA のチャネル利用効率に与える影響の検討、ならびに実証フェーズ 3 における発展課題として高密度多元接続が可能な過負荷伝送方式の適用検討を国際共同研究で実施した。

4. 研究成果

[フェーズ 2 (発展課題)] 送信タイミング制御の精度が同期 SS-CDMA のチャネル利用効率に与える影響の検討

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、送信タイミング制御の精度が同期 SS-CDMA のチャネル利用効率に与える影響について、検討を行った。

複数ノードが一つのアクセスポイントノード(AP)に対して上り回線通信を行うことを想定する。M 系列を巡回して生成される直交 M 系列を拡散符号に用いると、符号間同期ずれが最大 n チップの場合、隣接する他の n 個の拡散符号は多元接続に利用できない。このことを踏まえ、符号間同期ずれの最大値を最大送受信間距離差、送信タイミングオフセット、拡散符号間許容同期ずれ割合をパラメータとして数式化することにより、チャネル利用効率を導出した。

導出した式から得られるチャネル利用効率の数値計算例を図 1 に示す。以下の 3 条件について比較した:(a) 下り回線信号に同期、(b) 時刻同期信号に同期、(c) 時刻同期信号への同期に加

え送受信ノード間距離に応じた送信時刻制御を適用(時空間同期). 横軸はセル半径, 縦軸はチャネル利用効率である. チップレート $R_c = 10$ [Mchip/s], 拡散符号間許容同期ずれ割合 $p_c = 0.2$, 送信タイミングオフセット $\tau_o = 50$ [ns] とした. 条件 (a) に対して条件 (b) では, セル半径が小さい領域ではチャネル利用効率の差が 2 倍以下であるが, セル半径が大きくなるにつれて差が 2 倍に収束する. また, 条件 (c) はセル半径に関係なくチャネル利用効率が一定であるが, 送信タイミングオフセットとチップレートに依存することを明らかにした.

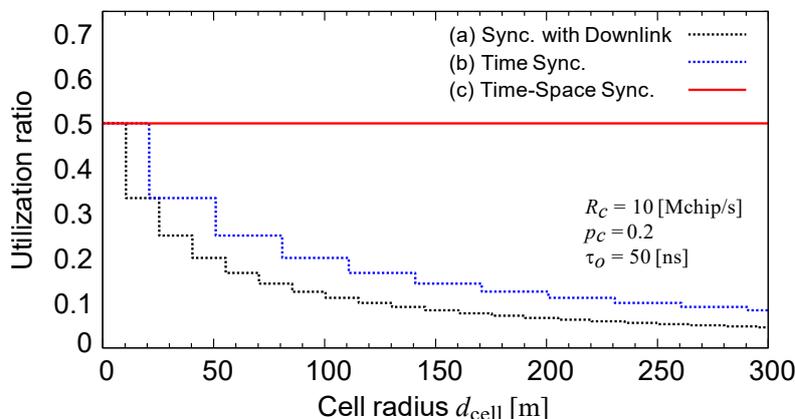


図1 チャネル利用効率の数値計算例

[フェーズ 3 (発展課題)] 高密度多元接続が可能な過負荷伝送方式の適用検討

フェーズ 3 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る. 非直交 UE 間のチャ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や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) の発生などが大きな課題となる.

そこで本研究課題では, まず時間同期の不完全性として送信ノード信号間の受信タイミング誤差, 周波数同期の不完全性として送信ノード信号間の周波数偏差に着目した. 受信タイミング誤差および周波数偏差が存在する場合, 一方の信号に対して他方の信号の位相が回転して受信されるため, 理想的なコンスタレーションから崩れ, リンクレベル特性が劣化することが考えられる. そこで, 受信タイミング誤差および周波数偏差を考慮したリンクレベル特性を評価し, 受信タイミング誤差および周波数偏差の影響について検討を行った. その結果, 受信タイミング誤差と周波数偏差を考慮した場合, 受信タイミング誤差による位相オフセットと周波数偏差を正しく推定できず, リンクレベル特性が大幅に劣化することが明らかになった. また, プリアンブルが重ならない時間が増加することで特性が改善することが分かった. 以上を踏まえて, 受信タイミング誤差による位相オフセットと周波数偏差を高精度に推定する手法としてプリアンブルを時間分割で送信することを提案し, その有効性についてリンクレベルシミュレーションを通じて評価した. 提案手法により受信タイミング誤差による位相オフセットと周波数偏差を高精度に推定でき, BER 10^{-3} を達成可能であることを示し, 提案手法の有効性を明らかにした.

次に, チャネル推定の不完全性として, 送信等化におけるチャネル推定の時刻ずれに着目した. 上り回線 NOMA では, 独立したフェージングにより適切な受信電力で信号が受信できないため, 送信等化を適用する必要がある. 送信等化では, チャネル推定の時刻ずれにより, 等化が不完全となり, リンクレベル特性が劣化することが考えられる. そこで, 送信等化を適用した上り回線 NOMA においてチャネル推定の時刻ずれを考慮したリンクレベル特性の評価を行った. 狭帯域上り回線 NOMA では, チャネル推定の時刻ずれが 1.3 ms 以内であれば, ビット誤り率 (BER) 10^{-3} を達成可能であり, 無線 LAN を想定した広帯域上り回線 NOMA では, チャネル推定の時刻ずれが 1.1 ms 以内であれば, BER 10^{-3} を達成可能であることを示した.

以上より, チャネル推定および同期の不完全性を考慮した上り回線 NOMA のリンクレベル特性について検討を行い, 同期の不完全性を高精度に補償する手法の有効性とチャネル推定の時刻ずれの許容量を明らかにした.

これらの成果を基に, NICT, 東北大学, 東京大学など他の研究機関を加えた共同研究 (NEDO) へ発展させることができた.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kameda Suguru, Ohya Kei, Shinozaki Ren, Oguma Hiroshi, Suematsu Noriharu	4. 巻 7
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Synchronization Accuracy Considering Sky View Factor for QZSS Short Message Synchronized SS-CDMA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 322 ~ 327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2018XBL0082	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KAMEDA Suguru, OHYA Kei, TAKAHASHI Tomohide, OGUMA Hiroshi, SUEMATSU Noriharu	4. 巻 E102-A
2. 論文標題 Random Access Control Scheme with Reservation Channel for Capacity Expansion of QZSS Safety Confirmation System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 186 ~ 194
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.186	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KAMEDA Suguru, OHYA Kei, OGUMA Hiroshi, SUEMATSU Noriharu	4. 巻 E102-B
2. 論文標題 Experimental Evaluation of Synchronized SS-CDMA Transmission Timing Control Method for QZSS Short Message Communication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 1781 ~ 1790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2018EBP3166	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kameda Suguru, Taira Akinori, Miyake Yuji, Suematsu Noriharu, Takagi Tadashi, Tsubouchi Kazuo	4. 巻 68
2. 論文標題 Evaluation of Synchronized SS-CDMA for QZSS Safety Confirmation System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 4846 ~ 4856
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2019.2905530	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoT: 時空間同期を用いた超多数端末同時接続技術
3. 学会等名 IEEE 広島支部主催講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoTのための時空間同期を用いた同期SS-CDMAのUSRP実装
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤坂 瀬玲菜, 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoT のための時空間同期を用いた同期 SS-CDMA の実装と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会革新的無線通信技術に関する横断型研究会（MIKA 2022）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoT のための時空間同期を用いた同期 SS-CDMA
3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suguru Kameda
2. 発表標題 Synchronized SS-CDMA Using Space-Time Synchronization for Massive Connect IoT
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤坂 瀨玲菜, 亀田 卓, 安田 哲, 志賀 信泰
2. 発表標題 [技術展示] 無線双方向時刻比較技術 (Wi-Wi) の時刻同期オフセット実測評価
3. 学会等名 電子情報通信学会スマート無線研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 スマート無線と Beyond 5G
3. 学会等名 電子情報通信学会スマート無線研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoT: 時空間同期を用いた同期SS-CDMAの実装と評価
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 時刻同期や時空間同期の適用による同期SS-CDMAチャネル利用効率改善効果の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoTのための時空間同期を用いた同期SS-CDMA
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoTのための同期SS-CDMAの実装と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会革新的無線通信技術に関する横断型研究会（MIKA 2021）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 Massive Connect IoTのための時空間同期を用いた同期SS-CDMA
3. 学会等名 電子情報通信学会第2回支部CoEシンポジウム（中国支部）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下 ちひろ, 亀田 卓
2. 発表標題 時刻同期誤差の影響を考慮した同期SS-CDMA誤り率特性の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会スマート無線研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kei Yoshida, Suguru Kameda, Noriharu Suematsu
2. 発表標題 Effect of Estimation Timing Error on Pre-TDE for Narrowband Uplink NOMA
3. 学会等名 2020 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田 圭, 亀田 卓, 末松 憲治
2. 発表標題 Massive Connect IoTにおける上り回線NOMA:時間領域送信等化の時刻ずれの影響
3. 学会等名 信学技報, SR2019-111, 2019年12月.
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 真山 健大, 秋元 浩平, 亀田 卓, 末松 憲治
2. 発表標題 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
3. 学会等名 信学技報, SR2017-109
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真山 健大、秋元 浩平、亀田 卓、末松 憲治
2. 発表標題 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: 多値変調方式の評価
3. 学会等名 信学総大, B-5-83
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真山 健大、秋元 浩平、亀田 卓、末松 憲治
2. 発表標題 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
3. 学会等名 信学技報, RCS2018-91
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真山 健大、秋元 浩平、亀田 卓、末松 憲治
2. 発表標題 下り回線非直交多元接続 (NOMA) における送信 EVM を考慮した誤り率特性の評価
3. 学会等名 信学ソ大, B-5-46
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mayama Kenta, Akimoto Kohei, Kameda Suguru, Suematsu Noriharu
2. 発表標題 Uplink Non-orthogonal Multiple Access with Single-Carrier Frequency Domain Equalization
3. 学会等名 SmartCom 2018, 信学技報, SR2018-63 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mayama Kenta, Akimoto Kohei, Kameda Suguru, Suematsu Noriharu
2. 発表標題 Evaluation of Link Level Performance Considering EVM of Transmit Signal for Downlink NOMA
3. 学会等名 APMC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真山 健大、秋元 浩平、亀田 卓、末松 憲治
2. 発表標題 上り回線非直交多元接続 (NOMA) における周波数領域等化を用いるシングルキャリア伝送の一検討
3. 学会等名 信学技報, RCS2018-239
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Tomohiro Yoneda, Yoshihiro Nakabo, Nobuyuki Yamasaki, Masayoshi Takasu, Masashi Imai, Suguru Kameda, Hiroshi Oguma, Akinori Taira, Noriharu Suematsu, Tadashi Takagi, Kazuo Tsubouchi	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Japan	5. 総ページ数 43
3. 書名 VLSI Design and Test for Systems Dependability, Springer, Chapter 9 "Responsiveness and Timing," pp. 351-393, 2019.	

1. 著者名 Kazuo Tsubouchi, Suguru Kameda, Hiroshi Oguma, Akinori Taira, Noriharu Suematsu, Tadashi Takagi	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer Japan	5. 総ページ数 17
3. 書名 VLSI Design and Test for Systems Dependability, Springer, Chapter 23 "Extended Dependable Air: Use of Satellites in Boosting Dependability of PublicWireless Communications," pp. 675-691, 2019.	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	レイチャウデューリ ダイパンカー	米国ラトガース大学・WINLAB・Director	
	(Raychaudhuri Dipankar)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Rutgers, The State University of NJ		