

令和 6 年 6 月 8 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01319

研究課題名（和文）Massive Connect IoT志向のゼロオーバーヘッド同期無線全二重通信

研究課題名（英文）Zero-Overhead Synchronized Wireless Full-Duplex Communication for Massive Connect IoT

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：同期捕捉などのオーバーヘッドを極限まで削減する試みとしてゼロオーバーヘッド同期無線全二重通信アーキテクチャを提案した。各ノードが送信した上り回線信号は AP 受信時点においてすでに同期捕捉が実現されているため、同期のためのオーバーヘッド削減による高効率化が期待できる。ゼロオーバーヘッド同期無線全二重通信アーキテクチャに必要となる、2端末が時刻同期用信号を基に同時に上り回線通信を行う無線通信システムの高機能化のための検討を行った。特に、ソフトウェア無線機への実装では、これまでよりも広帯域である変調帯域幅100 MHzとする実装を行うことで、システムのより一層の高速化や高効率化の可能性を示した。

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）：We proposed a zero-overhead synchronous wireless full-duplex communication architecture in an attempt to reduce overhead such as synchronous acquisition to the utmost limit. Since synchronous acquisition of uplink signals transmitted by each node has already been achieved at the time of AP reception, the overhead for synchronization can be reduced, and thus higher efficiency can be expected. We have investigated the possibility of developing a highly functional wireless communication system in which two terminals simultaneously perform uplink communication based on time synchronization signals, which is necessary for a zero-overhead synchronous wireless full-duplex communication architecture. In particular, the implementation of the system on a software radio with a modulation bandwidth of 100 MHz, which is a wider bandwidth than the previous system, shows the possibility of further increasing the speed and efficiency of the system.

研究分野：無線通信工学

キーワード：Massive Connect IoT ゼロオーバーヘッド 無線全二重 時空間同期

### 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、近年では第5世代移動通信システム（5G）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。次世代の情報通信ネットワークは5Gやモノのインターネット（IoT）がより一層進展し、ネットワークそのもののインテリジェンスが向上する。そして、膨大な数のノードから得られた多種多様なビッグデータの解析により新たな価値を生み出す“Massive Connect IoT”へ進化し、交通・農業・電力など様々な分野において社会基盤となると考えられる。Massive Connect IoTにおける無線通信システムは、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、低機能なノード（センサ搭載端末など）から頻繁にパケットが発生するためにアクセス制御技術の簡素化や高効率化が高い水準で求められる。ノードは頻繁に起動し送信を行うため、同期捕捉などのオーバーヘッドは可能な限り削減すべきである。

申請者はこれまで Massive Connect IoT のための高効率同期符号分割多元接続（CDMA）無線通信システムを提案してきた。多数のノードがアクセスポイント（AP）へ同時に通信を行う上り回線のために全地球測位システム（GPS）や準天頂衛星システム（QZSS）などの全球測位衛星システム（GNSS）から送信される測位信号によって得られるナノ秒オーダの時刻情報やメートルオーダの位置情報を基に同期 CDMA 通信を行うことを提案しフィールド実験により実証してきた。

### 2. 研究の目的

本研究では従来の提案を拡張し、無線通信におけるオーバーヘッド削減の可能性を明らかにすることを学術的な問いとして、図1に示すゼロオーバーヘッド同期無線全二重通信システムの検討を行う。各ノードは無線全二重通信を用いて AP から下り回線で送信される時刻・周波数基準信号や測距信号を基に時刻同期や距離推定を行い、それを基に上り回線における送信タイミング制御を行う。各ノードが送信した上り回線信号は AP 受信時点においてすでに同期捕捉が実現されているため、同期のためのオーバーヘッドの極限まで削減することによる高効率化が期待できる。

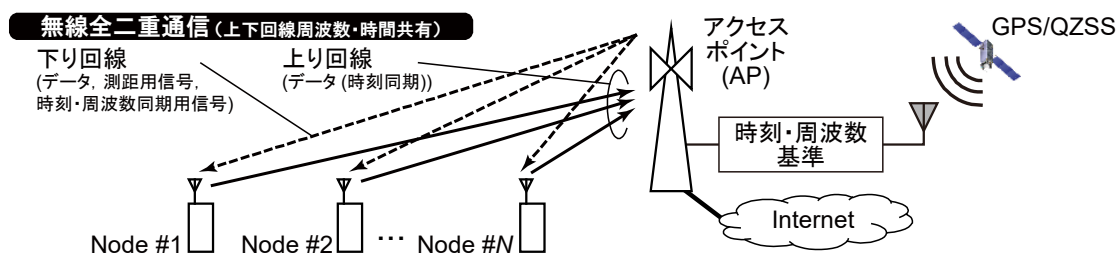


図1 ゼロオーバーヘッド同期無線全二重通信システム

### 3. 研究の方法

本研究の目的は、これまで提案してきた同期 CDMA 無線通信システムのさらなる高効率化を目指し、ゼロオーバーヘッド同期無線全二重通信アーキテクチャを検討することである。具体的には、以下の2つの課題を設定し検討を行う。

#### ■ 課題 1: ノード間同期ゼロオーバーヘッド無線通信アーキテクチャ

無線通信システムの極限までの高効率化を目指しゼロオーバーヘッドを実現するノード間同期無線通信アーキテクチャの検討を行う。

#### ■ 課題 2: 超過密多元接続のためのゼロオーバーヘッド無線信号処理技術

上り回線の超過密多元接続環境においてもゼロオーバーヘッドにて無線信号処理可能とする送受信系の検討を行う。

### 4. 研究成果

#### ■ 課題 1: ノード間同期ゼロオーバーヘッド無線通信アーキテクチャ

無線通信システムの極限までの高効率化を目指しゼロオーバーヘッドを実現するノード間同期無線通信アーキテクチャの検討に必要な不可欠な時刻同期技術の評価として、GNSS 同期発振器の時刻・位置情報の実測評価を行った。GNSS 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 GNSS 受信機から出力される時刻情報である pulse per second (PPS) 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。伝搬遅延算出誤差は Low Earth Orbit (LEO) 衛星を受信基準とした。GNSS 受信機として、GNSS モジュール GT-902PMGG を用いた。各受信機か

ら位置情報を含むログデータを取得すると同時にオシロスコープ DSO9254A (10GSa/s) を用いて各受信機の PPS を測定することにより、伝搬遅延算出誤差と端末時刻偏差を測定した。測定環境としては、天空率が 95.3%、76.5%、39.0% である 3 か所とした。

衛星信号受信誤差は天空率 95.3% で 23 ns、天空率 76.5% で 29 ns、天空率 39.0% で 60 ns であった。また、伝搬遅延算出誤差は天空率 95.3% で 5 ns、天空率 76.5% で 15 ns、天空率 39.0% で 33 ns であった。この評価結果から、60 ns 程度の時刻同期精度を実現できる可能性があることが明らかになった。

■ 課題 2: 超過密多元接続のためのゼロオーバーヘッド無線信号処理技術

超過密多元接続のためのゼロオーバーヘッド無線信号処理技術の実証のために、ソフトウェア無線機 USRP X310 を 2 台用いて実装した同期 CDMA 通信機能のビット誤り率 (bit error rate: BER) 特性評価を、チップレートを変化させながら行った。図 2 に測定系のブロック図を示す。本実験は広島大学ナノデバイス研究所東棟 5 階実験室にて行った。今回の実験では端末間同期のみ無線接続で行い、その他は有線接続を用い、USRP の制御は LAN ケーブルと Ubuntu PC を直接接続し行った。

本研究ではチップレートを 12.5 Mchip/s、20 Mchip/s、50 Mchip/s、100 Mchip/s の 4 種類に変化させて、仮想的に 100 端末同時送信実装を行った。MATLAB で作成した信号  $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$  を USRP (1)、(2) から送信し、USRP (1) で受信する。その後、受信した信号を PC に取り込み、MATLAB を用いて  $c_1(t)$ 、 $c_2(t)$  をマッチトフィルタ (matched filter: MF) に通し逆拡散処理した信号と MATLAB で作成した信号と比較して BER を算出する。

送信信号  $c_1(t)$  と  $c_2(t)$  を以下のように作成した。はじめに、USRP の動作が安定するのを待つために 1,000 chip 分の無信号部分を設けた。次に、信号の到着時刻を求めるためのプリアンプルとして、13 次 M 系列を 1 周期分作成した。プリアンプルの末尾に時刻ずれが発生した場合に干渉を防ぐために 10 chip 分の無信号部分を付け加えた。さらに、通信部分としてランダムに作成した 100 種類の  $10^4$  bit 分の binary phase-shift keying (BPSK) 信号を 11 次 M 系列から位相シフトさせながら作成した 100 個の直交 M 系列 (周期 2,048) で拡散した  $2.048 \times 10^7$  chip 分を作成し、 $c_1(t)$  と  $c_2(t)$  に 50 チャンネルずつ振り分けた。

雑音を付加する部分は MATLAB を用いてオフライン処理を行った。USRP で受信した信号のプリアンプル部分を取り出し、13 次 M 系列から作成した MF に通して相関ピーク位置を確認した。次に、この相関ピークを用いて通信部分を取り出して、MATLAB 上で雑音を加えてから、各チャンネルを拡散するときに用いた 11 次直交 M 系列から作成した MF にそれぞれ通す。その後、MF の出力結果を復調し、MATLAB で作成した通信部分の信号と照らし合わせ、1 ビットあたりの電力に対する 1 Hz あたりの雑音電力密度の比である  $E_b/N_0$  ごとの BER を計算し、評価を行った。

以上の評価系を用いた実測評価の結果、チップレートが 12.5 Mchip/s、20 Mchip/s、50 Mchip/s、100 Mchip/s の場合は、BER  $10^{-3}$  において  $E_b/N_0$  が BPSK 同期検波理論値よりもそれぞれ約 1.1 dB、0.6 dB、1.2 dB、3.0 dB 劣化していたが、いずれも BER  $10^{-3}$  以下を実現できることを確認できた。以上、実測結果より、2 台の USRP から合計 100 本の信号をチップレート 100 Mchip/s まで上げて送信した場合の劣化は約 3.0 dB 程度であり、超過密多元接続のためのゼロオーバーヘッド無線信号処理技術の実現可能性を明らかにした。

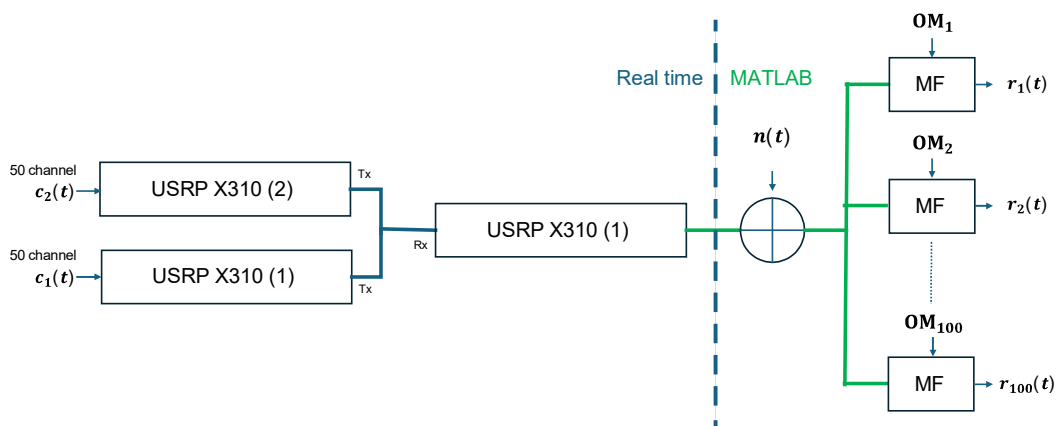


図 2 USRP X310 を 2 台用いた同期 CDMA 通信機能評価系のブロック図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 赤坂 瀬玲菜, 亀田 卓
2. 発表標題 Wi-Wiを用いた同期SS-CDMA通信機能のUSRPへの実装
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 2023年

1. 発表者名 Akasaka Serena, Kameda Suguru, Yasuda Satoshi, Shiga Nobuyasu
2. 発表標題 Implementation and Evaluation of Synchronized SS-CDMA Using Wireless Two-Way Interferometry (Wi-Wi)
3. 学会等名 The 14th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤坂 瀬玲菜, 亀田 卓
2. 発表標題 〔ポスター講演〕時空間同期を用いた同期SS-CDMA通信機能の実装と評価
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 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大内 駿輝, 畑木 達也, 赤坂 瀬玲菜, 亀田 卓, 安田 哲, 志賀 信泰
2. 発表標題 〔ポスター講演〕無線双方向時刻比較技術 (Wi-Wi) の時刻同期オフセットの実測評価: 距離依存性の考察
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 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Serena Akasaka, Suguru Kameda
2. 発表標題 Implementation and Evaluation of Synchronized SS-CDMA
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Biomedical Engineering and International Workshop on Nanodevice Technologies 2023 (ISBE 2023/IWNT 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 赤坂 瀨玲菜, 大内 駿輝, 畑木 達也, 亀田 卓
2. 発表標題 [ 技術展示 ] Wi-Wiを用いた同期SS-CDMA通信機能のUSRPへの実装：多チャネル化の基礎検討
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 2023年

1. 発表者名 赤坂 瀨玲菜, 亀田 卓
2. 発表標題 Wi-Wiを用いた同期SS-CDMA通信機能のUSRPへの実装：仮想300端末環境による評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 亀田 卓, 赤坂 瀨玲菜, 大内 駿輝, 畑木 達也, 安田 哲, 志賀 信泰
2. 発表標題 Wi-Wiを用いた同期SS-CDMA通信機能の実装と評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 亀田 卓
2. 発表標題 [ 依頼講演 ] 時空間同期を用いた無線通信システムの高度化
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 2024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 高山 彰悟, 亀田 卓, 末松 憲治
2. 発表標題 異種無線IoTシステムにおけるDual-CTSを用いたマルチホップ動的ルーティング手法の提案
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 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 北 寛登, 小熊 博, 亀田 卓, 末松 憲治
2. 発表標題 低天空率環境下のGPS/QZSS/BeiDouによる衛星信号受信誤差の評価
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

〔図書〕 計0件

〔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
研究 分担者	末松 憲治  (Suematsu Noriharu)  (20590904)	東北大学・電気通信研究所・教授   (11301)	
研究 分担者	小熊 博  (Oguma Hiroshi)  (40621909)	富山高等専門学校・その他部局等・教授   (53203)	
研究 分担者	本良 瑞樹  (Motoyoshi Mizuki)  (40736906)	静岡理工科大学・理工学部・准教授   (33803)	

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 University		