

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業 研究成果報告書



令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04127

研究課題名（和文）無人航空機基地局(UAV-BS)を用いる省電力無線通信ネットワークの研究

研究課題名（英文）Low Power Wireless Communications Network using Unmanned Aerial Vehicle-Base Station (UAV-BS)

研究代表者

安達 宏一（Adachi, Koichi）

電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・准教授

研究者番号：50789914

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、無線通信機能を搭載した無人航空機（UAV）の導入を検討し、新たな無線アクセスプロトコルを提案した。提案手法では、UAVに複数のアンテナ素子を搭載し、生成したビームにより仮想セクタを形成する。その仮想セクタをUAVを動的に配置することにより時間的に切り替えることで、多数端末との通信を実現した。計算機シミュレーションならびに理論解析により従来のオムニアンテナを用いた場合と比較して大幅に通信特性を向上できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無人航空機（UAV）の無線通信ネットワークへの導入は、広大な通信エリアをカバーする無線センサーネットワークや災害時の迅速なネットワーク復旧に関して非常に有効である。本研究課題で提案した手法は、簡易ながらも優れた通信特性を実現できることから様々な用途へと適用が可能であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research introduced an unmanned aerial vehicle (UAV) to the wireless communication system and proposed an access protocol. In the proposed protocol, the UAV is equipped with a uniform linear array (ULA). The UAV creates a virtual sector by beamforming. The virtual sector is switched by dynamically placing and rotating the UAV, and hence many mobile nodes can communicate with the UAV. The computer simulation results and analytical results have elucidated that the proposed protocol can improve the transmission quality compared to the conventional protocol where an omni-antenna is mounted at the UAV.

研究分野：無線通信

キーワード：ULA 無線アクセスプロトコル UAV センサーネットワーク 無線資源割当

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。

1．研究開始当初の背景

モノのインターネット（IoT：Internet-of-Things）や無線センサネットワークの普及に伴い、様々なシステムに無線通信が適用されている。これらの通信システムにおいては、無線端末が限られたバッテリーを用いて通信を行う。また、多数の無線端末が自律分散的に通信を行うため、パケット衝突が発生しやすいため、周波数利用効率の劣化を招く。近年、無人航空機（UAV）に通信機能を搭載し、移動可能な基地局（UAV-BS）として用いる検討が盛んに行われている。UAV-BS は通信エリア内に動的配置することができるため、無線通信ネットワークの端末トポロジーに合わせた最適な基地局配置が可能となる。それにより、固定基地局を用いる無線通信ネットワークに比べて大幅な低消費電力化が可能となると考えられている。しかしながら UAV-BS もバッテリー駆動となるため複雑な信号処理や機器を搭載することが難しい。そのため UAV-BS 自身の省電力化並びに簡易化も必須で、従来の固定基地局を想定とした無線通信ネットワークとは大きく異なる新たなアプローチが必要不可欠であった。

2．研究の目的

本研究では、限られたバッテリー容量で動作するような無線端末が存在する無線通信システムにおいて、近年無線通信システムへの導入が世界的に注目されている無人航空機（UAV）に着目し、UAV の特徴を活かした無線アクセス方式ならびに無線通信方式を提案することを目的とする。

3．研究の方法

前章で述べた目的の達成のために、UAV-BS が通信エリア内を動的に動くことができるという点や方向を任意に変更できるという点を取り入れた、今までの無線通信ネットワークにはなかった新たな自由度を用いた回転角分割多元接続（RADMA：Rotational Angle Division Multiple Access）と呼ばれる通信方式と UAV-BS の軌跡決定方法を提案した。

4．研究成果

（1）回転角分割多元接続（RADMA）の提案

図 1 に示すように、UAV-BS に実装されたアレイアンテナによりカバレージエリア全体をオーバーラップする仮想セクタへと分割する。カバレージエリア内に存在する無線ノードはデータパケットを送信せず待機するスリープモードにあると仮定する。UAV-BS から受信したビーコン信号の電力が予め設定された閾値より大きいときに限り、無線ノードはアクティブモードへと切り替わりデータパケットの送信を開始する。UAV-BS に実装されたアレイアンテナのメインローブとサイドローブから構成される仮想セクタは、高いアンテナ利得を得ることが出来るため、仮想セクタ内に存在する無線ノードと UAV-BS 間のチャネル利得を向上させることが出来る。この時、無線ノードがアクティブモードへと切り替わる閾値を適切に設定することにより、高いアンテナ利得を持つ無線ノードが各仮想セクタ内のみに存在することになる。一方で、UAV-BS からのビーコン信号の電力が閾値に達しなかった無線ノードはスリープモードを維持し、RADMA により時間的に切り替わる次の仮想セクタまで待機する。

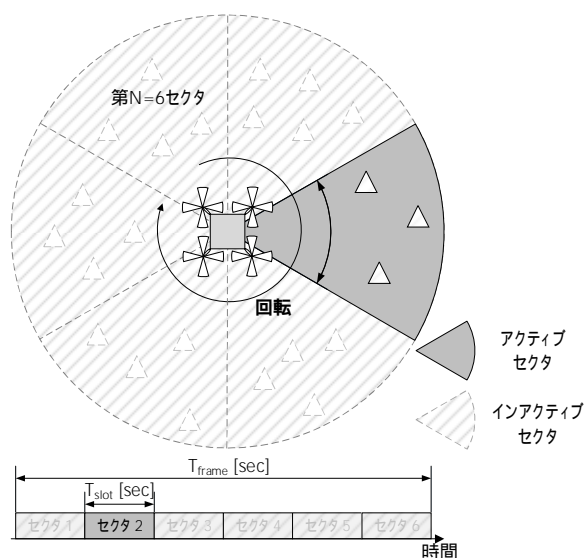


図 1．回転角分割多元接続（RADMA）

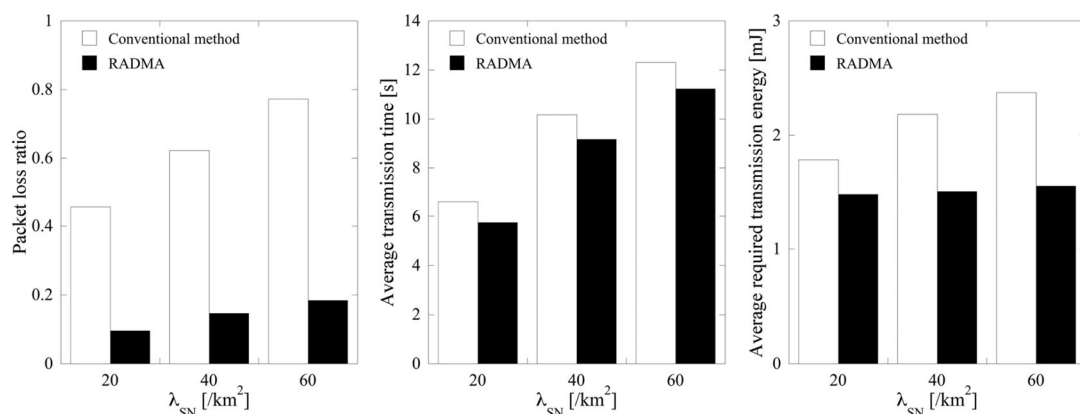


図 2 . 無指向性アンテナを用いた場合と RADMA を用いた場合の特性評価

カバレッジエリア内に存在する全無線ノードがデータパケットを送信できるようにするためには、仮想セクタを時間的に切り替える必要がある。UAV-BS は通信方向を適応的に制御することができるため、UAV-BS を物理的に特定の回転角で回転させることで仮想セクタを時間的に切り替えることができる。仮想セクタに存在する全ての無線ノードのデータパケット送信が完了してから UAV-BS を回転させるものとする。仮想セクタはアレイアンテナのメインローブとサイドローブビームにより形成されるため、小さい回転角度で UAV-BS を回転させることで全ての無線ノードは、アンテナ利得が最大となる仮想セクタで通信を行う可能性が高くなる。しかしながら、全カバレッジエリアに対して仮想セクタを提供するためには各仮想セクタの形成時間を短くしなければならない。一方で、より大きい回転角度で回転させた場合、無線ノードは最大のアンテナ利得を得ることが出来ない可能性が大きくなるものの、各仮想セクタの形成時間は長くすることが出来る。従って、各無線ノードが得ることのできるアンテナ利得を最大化するためには適切な値に設定する必要がある。図 2 に提案した RADMA を用いた場合と従来の無指向性アンテナを用いた UAV-BS を通信エリア内に配置した場合のパケット損失率、平均所要送信時間、平均所要送信電力を示す。グラフから分かるように、RADMA を用いることによりパケット損失率、平均所要送信時間、平均所要送信電力を大幅に低減できていることが分かる。RADMA による特性改善効果は、計算機シミュレーションのみではなく、理論解析によっても明らかにされている。

(2) UAV-BS の動的配置と RADMA を組み合わせることによる特性改善

本研究課題ではさらに、セクター化された K-means クラスタリングに基づいたシンプルながら有効性の高い UAV-BS 軌跡決定方法を提案した。この軌跡決定法は、K 平均法クラスタリングに基づく方法を拡張したものである。K 平均法を実行する前に、図 3 に示すように、領域を同じサイズの 9 つのセクタに分割する。各クラスターの初期重心 (セントロイド) は、各セクタ領域内でランダムに生成するものとする。UAV-BS は隣接セクタ内の次のセントロイドに飛ぶだけでよいため、最適な訪問順序を見つけるためのアルゴリズムは不要となる。このようにして、軌道を簡単に形成することができる。図 4 に示すように、提案した軌跡決定方法を用いることで従来の手法と比較して大幅に送信パケットが損失してしまうアウトージ確率を低減できていることが分かる。

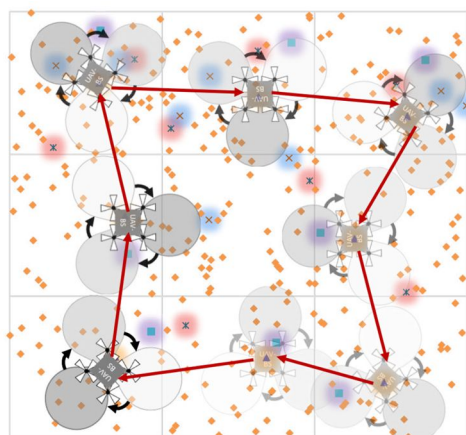


図 3 . セクター化 K 平均法による UAV-BS の軌跡決定方法と RADMA の組み合わせ

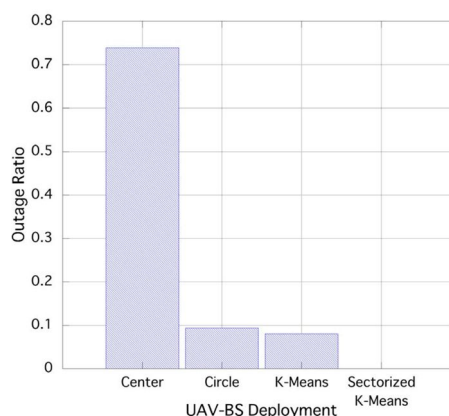


図 4 . アウトージ確率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Hendrik Lumbantoruan and Koichi Adachi | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Array Antenna Equipped UAV-BS for Efficient Low Power WSN and Its Theoretical Analysis | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 IET Commun. | 6. 最初と最後の頁 1-14 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/cmu2.12238 | 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 - |

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Lumbantoruan and K. Adachi |
| 2. 発表標題 Trajectory and Communication Protocol for Efficient Data Collecting in UAV-Enabled WSN |
| 3. 学会等名 The 34th IEEE Int. Conf. on Information Netw. (ICIN 2020)（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 J. Kawakami, H. Lumbantoruan, and K. Adachi |
| 2. 発表標題 NOMA Based UAV Relay Communication Protocol in Cellular Network |
| 3. 学会等名 APSIPA ASC 2019（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Lumbantoruan and K. Adachi |
| 2. 発表標題 Array Antenna for Power Saving of Sensor Nodes in UAV-BS Enabled WSN |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会（RISING） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Lumbantoruan and K. Adachi |
| 2. 発表標題 Outage Probability Analysis of Sensor Nodes Served by Multi-antenna UAV-BS |
| 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 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 川上純平, ルンバントルアンヘンドリック, 安達宏一 |
| 2. 発表標題 NOMAを用いるUAVリレー通信に適した通信プロトコルの検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム(RCS)研究会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hendrik Lumbantoruan, 安達宏一 |
| 2. 発表標題 UAV-BS無線通信ネットワークにおける無線端末の省電力化に関する研究 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム(RCS)研究会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Lumbantoruan, K. Adachi, T. Z. Hui Ernest, R. P. Sirigina, and A. S. Madhukumar |
| 2. 発表標題 Outage Probability Analysis of Sensor Nodes by an ULA Equipped UAV-BS |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 H. Lumbantoruan and K. Adachi |
| 2. 発表標題 Array Antenna for Power Saving of Sensor Nodes in UAV-BS enabled WSN |
| 3. 学会等名 nt. Conf. on Computing, Networking and Commun. (ICNC) 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 川上純平, 安達宏一 |
| 2. 発表標題 セルラーネットワークにおけるアレイアンテナ及びCoMP送信による干渉軽減を用いたUAV配置に関する検討 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会無線通信システム(RCS)研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 川上純平, 安達宏一 |
| 2. 発表標題 アレイアンテナによる干渉軽減及びCoMP接続によるUAV接続性に関する検討 |
| 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 2020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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|

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 | | | |
|---------|----------------------------------|--|--|--|
| シンガポール | Nanyang Technological University | | | |