

# 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

ヘンドリックルンバントルアン 安達 宏一

† 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  
〒182-8585 東京都 調布市 調布ヶ丘 1-5-1  
E-mail: †{hendrik,adachi}@awcc.uec.ac.jp

あらまし 無線センサネットワーク (WSN) では、一度配置された無線センサノードの再充電やバッテリー交換を行うことが困難であるため、低消費電力の通信技術が必要となる。無線ノードのバッテリー寿命を延ばすために、本稿では無人航空機基地局 (UAV-BS) をデータ収集センターとして利用する。多数の無線ノードが自律分散的に UAV-BS へとパケットを送信することにより生じるパケット衝突を回避するために、回転角分割多元接続 (RADMA) を提案する。RADMA では、UAV-BS に実装した複数のアンテナ要素からなるアレイアンテナのメインローブにより仮想セクタを形成する。更に、特定の回転角度で UAV-BS を水平面方向に回転させることで、時間的に仮想セクタを切り替える。RADMA では仮想セクタ内に存在する無線ノードのみ通信可能とするため、同時に通信を行う無線ノードの数を制限することで無線ノード間の信号衝突を回避することができる。アレイアンテナの高い利得により無線ノードからの受信信号電力を増加させることができるため、無線ノードはより高いレートでデータパケットを送信することができ送信時間の短縮が可能となる。これにより、必要な送信エネルギーを削減することができる。計算機シミュレーションにより、提案する RADMA を用いることで、従来のオムニアンテナを用いた UAV-BS を利用する場合と比較して、無線ノードの所要エネルギーを 1/100 程度まで削減できることを示す。

キーワード マルチアクセス方式, UAV, アレイアンテナ

## Power Saving of Ground Terminals in UAV-BS Wireless Communication Network

Lumbantoruan HENDRIK and Koichi ADACHI

† The University of Electro-Communications Advanced Wireless and Communication Research Center  
1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8585  
E-mail: †{hendrik,adachi}@awcc.uec.ac.jp

**Abstract** A low power consumption communications techniques are required for sensor nodes (SNs) in wireless sensor networks (WSNs) as it is difficult to charge the power supply once deployed. In order to prolong the network lifetime utilizing unmanned aerial vehicle-base station (UAV-BS) as a data fusion center, a rotational angle division multiple access (RADMA) is proposed in this paper. In RADMA, *virtual sectors* are formed by the UAV-BS equipped with multiple antenna elements. By rotating the UAV-BS with an appropriate time interval, the switching virtual sectors are created in order to cover the whole coverage area. By RADMA, the signal collision among the SNs can be avoided by limiting the number of active SNs that are within the virtual sector. Since the received signal power from SNs can be enhanced by the high array antenna gain, the SNs can transmit its data packets at a higher rate that results in the shorter transmission time. Thus, the required transmission energy can be reduced since the SNs are able to transmit in a shorter time without abundant repetitions. Numerical results validate the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words** Multi access schemes, UAV, array antenna

## 1. はじめに

多数の無線センサノードを観測対象領域に配置する無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Network) では、情報伝送用の配線だけでなく、各無線センサノードの電源供給用の配線もないことが一般的である。そのため、無線センサノードは電池駆動式となる。電池交換は容易でないため [1]、無線センサノードは電池交換をせず数年間連続動作可能であることが求められる。無線センサネットワークの長寿命化には、無線センサノードの低消費電力化が必須である。

多数の無線端末が存在する無線通信ネットワークでは集中制御が現実的でない。そのため、各無線端末は搬送波感知多重アクセス/衝突回避方式 (CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) に代表されるランダムアクセス方式に基づいて自律分散的に通信を行う [2]。ランダムアクセス方式では無線端末数が多くなるほど送信されるデータパケット同士が衝突する確率が高くなる。パケット衝突が発生した場合には、データパケットの再送が必要となる。そのため、余剰なエネルギーが消費される。従って、無線センサネットワークのような多数の無線ノードが存在する環境においても、通信効率に悪影響を与える再送時間と余剰なエネルギー消費が発生しないような方法が必要となる。

近年、無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) に無線通信機能を持たせることで、基地局 (BS: Base Station) として動作させる低コストで簡易かつ動的に配置できる UAV-BS に注目が集まっている [3]。UAV-BS は次のような様々な利点を持つ。まず、従来の固定基地局と比較してより高い位置に配置されるため、通信リンクが見通し (LoS: Line of Sight) 環境となる確率が高くなる [4]。また、固定基地局と異なり動的に配置できるため、無線端末の近傍やトラフィック量に応じて UAV-BS を適応的に配置することで通信距離を短縮することが可能となる。通信距離の短縮により伝搬損失を削減することができるため、所望の通信品質を達成するのに必要となる送信電力を削減することが出来る。したがって、無線センサネットワークの動的な情報集約局として UAV-BS を使用することで、通信品質を確保しつつ所要送信電力を低減するための有効なアプローチだと推測させる [5]。

無線センサネットワークのエネルギー消費を節約するために、無線ノードをアクティブ状態になる前にスリープ状態にさせる通信メカニズムが存在する [6]。このメカニズムでは、無線ノードはデフォルトでスリープモードであり、UAV-BS から受信したビーコン信号の電力が特定の閾値を超えるとアクティブモードになり、送信を開始する。送信が終わるとまたスリープモードに戻る。移動中の UAV-BS と無線ノード間のチャンネルが激しく変動するため、パケットロスが発生する可能性が存在する [7]。したがって、低いアウトージ確率でアクティブモードになった無線ノードがデータを正常に送信できることを確保するために、UAV-BS を適切に配置する必要がある。

本稿では、UAV-BS を用いる無線通信ネットワークにおいて、高効率かつ低消費エネルギーの通信を目指して回転角分割多元

接続 (RADMA: Rotational Angle Division Multiple Access) を提案する。本手法では、アレイアンテナを UAV-BS に実装する。アレイアンテナにより形成されるメインローブとサイドローブを仮想セクタとし、その仮想セクタ内に存在する無線ノードのみが通信を行うとする。これにより、一度に UAV-BS と通信を行う無線ノードの数を制限することが出来る。また、仮想セクタは全体の通信エリアに比べて狭いため、同一仮想セクタ内に存在する無線ノード同士が互いに送信信号を検出できる可能性を高くすることができる。したがって、隠れ端末問題等によるデータパケット衝突を回避することができ、高効率な通信を実現可能となる。また、仮想セクタ内に存在する無線ノードがアレイアンテナの高利得を得ることができるため、より高伝送レートでの通信が可能となる。そのため、より短時間で送信することができ、送信に消費される電力を削減することができる。したがって、低消費エネルギーの通信を実現可能となる。UAV-BS は一定の位置で回転することにより、仮想セクタを時間的に切り替えることで、全ての無線ノードをカバーすることが出来る。計算機シミュレーション結果より、カバレッジエリア全体を一度にカバーする無指向性アンテナを実装する従来方法に比べ、提案手法 RADMA が各無線ノードの消費エネルギーを 100 倍まで削減することができたと明らかになった。

本稿の構成は以下のようになっている。まず、第 2 章で UAV-BS を用いる無線通信ネットワークの概要並びにシステムモデルを述べた後に、提案する RADMA の動作法について説明する。第 3 章で計算機シミュレーションにより提案手法により得ることのできるエネルギー削減効果を明らかにする。第 4 章はまとめである。

## 2. システムモデル

### 2.1 システムの概要

本稿で提案する RADMA を用いる UAV-BS 無線通信システムのモデルを図 1 に示す。地上に配置された  $K$  個の無線ノードが UAV-BS へとデータパケットを送信する。無線ノードの集合を  $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$  と表記する。無線ノード  $k$  の二次元座標上の位置は  $\mathbf{w}_k = (x_k, y_k) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  で与えられ、全無線ノードがカバレッジエリア内にランダムに配置されているものとする。各無線ノードは  $S$  [KB] のデータパケットを無指向性アンテナを用いて送信するとする。

### 2.2 Rotational Angle Division Multiple Access (RADMA)

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ッ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。カバレッ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

チャン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が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。

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 の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  $\theta_{RT} \in \{0, 2\pi\}$  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が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  $\theta_{RT}$  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  $\theta_{RT}$  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  $\theta_{RT}$  を適切な値に設定する必要がある。

仮想セクタ  $\ell$  内に存在する無線ノードの集合  $\mathcal{K}_\ell$  は次式で与えられる。

$$\mathcal{K}_\ell = \{k | P_{k,\ell} \geq \Gamma_{th}\} \quad (1)$$

ここで、 $P_{k,\ell}$  は無線ノード  $k$  が仮想セクタ  $\ell$  から受信したビーコン信号の受信電力を表し、 $\Gamma_{th}$  は予め設定された閾値である。仮想セクタ内に存在する無線ノードのみがデータ通信を行うため、複数の無線ノードが同時にデータパケットを送信する確率を低減することができる。また、仮想セクタが通信エリア全体に比較して狭いため、同一仮想セクタに存在するアクティブ無線ノード間の距離が短く互いの送信信号を検知可能となる確率が高くなる。それにより、隠れ端末による信号衝突の確率を低減することができる。したがって、再送毎に消費される余剰なエネルギーや再送時間を回避することができるため、高効率かつエネルギー利用効率の優れた通信システムを実現可能となる。

### 2.3 チャンネルモデル

本稿では、各無線ノードと UAV-BS 間の通信チャンネルとして距離に依存する伝搬損失と対数正規分布するシャドウイング損失を考慮する。無線ノード  $k$  と UAV-BS 間の距離減衰には次式で与えられる自由空間伝搬損失モデルを用いる。

$$L_k = \left( \frac{4\pi f_c d_k}{c} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 $f_c$  は搬送波周波数 [Hz]、 $c$  は光速 [m/s] を表す。無線ノード  $k$  と UAV-BS 間の距離  $d_k$  は次式のように書くことができる。

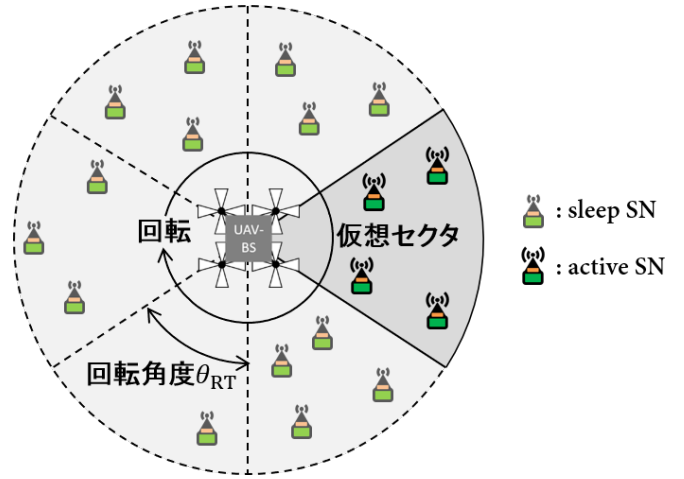


図1 RADMA を用いる UAV-BS 無線センサネットワーク

$$d_k = \sqrt{\|\mathbf{w}_{UAV} - \mathbf{w}_k\|^2 + H_{UAV}^2}, \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{w}_{UAV} \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$  と  $H_{UAV}$  は順に UAV-BS の 2 次元位置と高度を表す。

上りリンクチャンネルのモデルでは、シャドウイング損失と閉塞損失は見通し内 (LoS) リンクに比べ見通し外 (NLoS: Non-Line-of-Sight) リンクの方が高い。そのため、無線ノードと UAV-BS 間の LoS と NLoS のリンクを別々に考慮する必要がある [8]。各通信リンクが LoS リンクとなる確率は無線ノードと UAV-BS 間の仰角、周囲環境、および無線ノードと UAV-BS の相対位置に依存する。無線ノード  $k$  に対する LoS リンクの発生確率は次式で与えられる [8]。

$$P_{LoS,k} = \alpha(75 - \theta_k)^\beta, \quad (4)$$

ここで、 $\theta_k = \sin^{-1}(H/d_k)$  は無線ノード  $k$  と UAV-BS 間の仰角を表し、 $\alpha$  と  $\beta$  は環境に依存する定数である。

対数正規分布に従うシャドウイング損失  $\psi_k$  [dB] は次式で定義される [9]。

$$\psi_{k,dB} = \begin{cases} \psi_{LoS,k} \sim \mathcal{N}(\mu_{LoS,k}, \sigma_{LoS,k}^2) & \text{LoS} \\ \psi_{NLoS,k} \sim \mathcal{N}(\mu_{NLoS,k}, \sigma_{NLoS,k}^2) & \text{NLoS} \end{cases}, \quad (5)$$

ここで、

$$\begin{cases} \sigma_{LoS,k} = k_1 \exp(-k_2 \theta_k) \\ \sigma_{NLoS,k} = g_1 \exp(-g_2 \theta_k) \end{cases}, \quad (6)$$

$\mu$  と  $\sigma^2$  は順にシャドウイング損失の平均と分散を表す。 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $g_1$ 、 $g_2$  は環境に依存する定数である。

UAV-BS には、直線状に等間隔  $\Delta$  で  $N$  個のアンテナ素子を配列する等間隔リニアアレイアンテナ (ULA: Uniform Linear Array antenna) を実装する。ここで、 $\Delta$  は搬送波周波数で正規化されるアンテナ素子間距離である。アレイアンテナ軸に対する到来方向 (DoA: Direction of Arrival)  $\phi_k$  で無線ノード  $k$  から送信される信号に対するアンテナ利得は次式で与えられる [10]。

$$G_{R,k} = \left| \sum_{n=0}^{N-1} g(\theta_k, \phi_k) e^{-j2\pi n \Delta \sin \theta_k \cos \phi_k} \right|^2, \quad (7)$$

ここで、 $g(\theta_k, \phi_k)$  は無線ノード  $k$  から送信された信号に対するアレイアンテナを構成するアンテナ素子の指向性を表す。本原稿では、アンテナ素子として、指向性が次式で与えられる半波長ダイポールアンテナを使用する [10]。

$$g(\theta_k, \phi_k) = \sqrt{1.64} \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta_k\right) / \sin \theta_k. \quad (8)$$

式 (8) より、 $g(\theta_k, \phi_k)$  の最大値を得るために  $\theta_k$  が  $\pi/2$  となる必要がある。しかし、 $\theta_k = \pi/2$  を得るには、UAV-BS を無線ノード  $k$  と同じ高度に配置する必要があるため、現実的ではない。したがって、垂直配置の代わりに特定の傾斜角  $\theta_{\text{tilt}}$  でアンテナ素子を配置することを考える。本稿では、図 2 に示すように、アンテナ素子の指向性のメインビームがカバレッジエリア半径の中心に向けるように傾斜角  $\theta_{\text{tilt}}$  を設定する。この場合、傾斜角  $\theta_{\text{tilt}}$  が次式のように書くことができる。

$$\theta_{\text{tilt}} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{r/2}{H_{\text{UAV}}}. \quad (9)$$

式 (9) を式 (7) と式 (8) に代入すると以下の式が得られる。

$$G_{R,k} = \left| \sum_{n=0}^{N-1} g(\theta_k, \phi_k) e^{-j2\pi n \Delta \sin(\theta_k + \theta_{\text{tilt}}) \cos \phi_k} \right|^2, \quad (10)$$

$$g(\theta_k, \phi_k) = \sqrt{1.64} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta_k + \theta_{\text{tilt}})\right)}{\sin(\theta_k + \theta_{\text{tilt}})}. \quad (11)$$

最終的に、無線ノード  $k$  と UAV-BS 間のチャネル利得を次式のように書くことができる。

$$h_k = \frac{G_T G_{R,k}}{L_k \psi_k}, \quad (12)$$

ここで、 $G_T$  は各無線ノードの送信アンテナ利得を表す。 $\psi_k = 10^{\psi_{k,\text{dB}}/10}$  である。

#### 2.4 伝送レート

UAV-BS における無線ノード  $k$  の受信信号電力対雑音電力比 (SNR: Signal power to Noise power Ratio)  $\gamma_k$  は次式のように定義する。

$$\gamma_k = \frac{P_{R,k}}{N_0} = \frac{P_T}{BN_0} \frac{G_T G_{R,k}}{L_k \psi_k}, \quad (13)$$

ここで、 $P_T, B, N_0$  は順に各無線ノードの固定送信電力、帯域幅と雑音スペクトル密度を表す。無線アクセスプロトコルとして IEEE 802.11 を採用するため、UAV-BS は無線ノードとのチャネルに応じて異なる伝送レートを提供することが可能となる。UAV-BS における高いアンテナ利得  $G_{R,k}$  による高い SNR を実現できるため、無線ノードがより高い伝送レートで通信することが可能となる。また、高 SNR が通信に必要な最低 SNR を超えることができるため、アウトエージとなる確率を低減することが可能となる。

#### 2.5 受信成功に必要な条件

無線ノード  $k$  が仮想セクタ  $\ell$  内に存在するとする。信号衝突

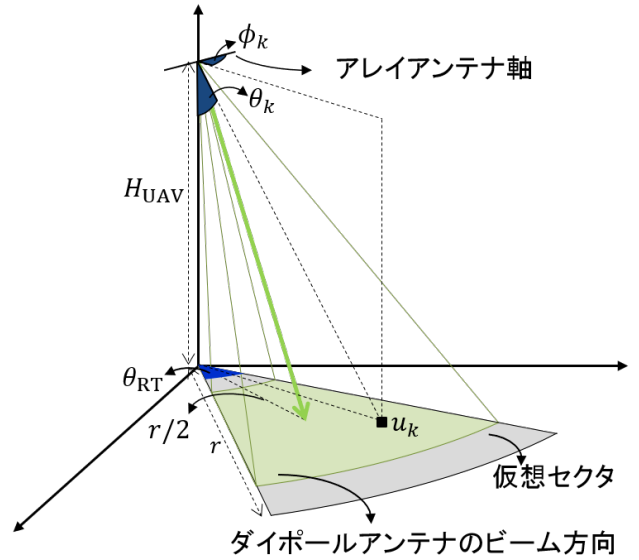


図 2 アンテナ素子を傾斜角  $\theta_{\text{tilt}}$  で配置するモデル

が発生すると、UAV-BS における無線ノード  $k$  の受信信号電力対干渉雑音電力比 (SINR: Signal power to Interference plus Noise power Ratio)  $\text{SINR}_k$  は次式で与えられる。

$$\text{SINR}_k = \frac{\frac{P_T}{B} h_k}{\frac{P_T}{B} \sum_{k' \in \mathcal{K}_\ell} h_{k'} I(k, k') + N_0}, \quad (14)$$

ここで、 $I(k, k')$  は無線ノード  $k$  と無線ノード  $k'$  が互いにキャリアセンス (CS: Carrier Sense) 可の有無を示す関数である。無線ノード  $k'$  において無線ノード  $k$  の送信信号電力が  $-97$  [dBm] 以下の場合、無線ノード  $k'$  は無線ノード  $k$  の送信信号を CS 不可能とする。 $I(k, k')$  は次式で与えられる。

$$I(k, k') = \begin{cases} 1 & \text{無線ノード } k' \text{ が無線ノード } k \text{ を CS 不可} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}, \quad (15)$$

本研究では、フレーム (信号) を最初に送信した無線ノードを希望無線ノードとする。フレーム衝突が発生しても、以下の条件が満たされれば希望無線ノードから送信されたフレームは復号可能と仮定する。

$$\min\{\text{SINR}_k\} \geq \rho_{\text{th},k}, \quad (16)$$

ここで、 $\rho_{\text{th},k}$  は無線ノード  $k$  に特定の伝送レートが割り当てられるための所要 SNR である。

### 3. 数値結果

シミュレーションに用いるパラメータを表 1 に示す。 $60 \times 60$  [m<sup>2</sup>] のカバレッジエリアに 10 または 20 個の無線ノードを一様分布に従い配置する。UAV-BS は 20[m] の高度でカバレッジエリアの中心に配置する。無線ノードはランダムアクセスプロトコルとして IEEE 802.11g を採用し UAV-BS に通信を行う。搬送波周波数  $f_c$  は 2.4 [GHz] とし、帯域幅  $B$  は 20 [MHz] とする。無線ノードの送信アンテナ利得  $G_T$  を 0 [dBi] に設定する。各無線ノードはパラメータとして  $S$  [KB] の

表 1 シミュレーション諸元

パラメータ	値
カバレッジエリア	$60 \times 60$ [m <sup>2</sup> ]
無線ノードの数	$K = 10, 20$
無線ノードのアンテナ利得	$G_T = 0$ [dBi]
無線ノードの送信電力	$P_T = 0.5$ [mW]
無線ノードのデータパケット	$S = 12.5, 100$ [KB]
UAV-BS の位置	$(x, y, z) = (30, 30, 20)$ [m]
UAV-BS のアンテナ素子数	$N = 3$
正規化アンテナ素子間距離	$\Delta = 0.5$
回転角度	$\theta_R = \frac{\pi}{6}, \frac{2\pi}{3}$ [radian]
搬送波周波数	$f_c = 2.4$ [GHz]
帯域幅	$B = 20$ [MHz]
雑音電力密度	$N_0 = -174$ [dBm/Hz]
$k_1, k_2, g_1, g_2$	10.39, 0.05, 29.06, 0.03
$\mu_{LoS}, \mu_{NLoS}$	1, 10 [dB]
$\alpha, \beta$	0.6, 0.11

表 2 伝送レートと所要 SNR の範囲

SNR の範囲 [dB]	伝送レート [Mbps]
$4 \leq \text{SNR} < 6$	1
$6 \leq \text{SNR} < 8$	2
$8 \leq \text{SNR} < 10$	5.5
$10 \leq \text{SNR} < 12$	18
$12 \leq \text{SNR} < 16$	24
$16 \leq \text{SNR} < 20$	36
$20 \leq \text{SNR} < 21$	48
$21 \leq \text{SNR}$	54

送信したいデータパケットを持ち、固定に設定された 0.5 [mW] の送信電力  $P_T$  で送信する。UAV-BS に実装するアンテナ素子数  $N$  を 3 とし、正規化アンテナ素子間距離  $\Delta$  を 0.5 とする。提案手法 RADMA では、UAV-BS の回転角度  $\theta_R$  を 30 と 120 [degree] に設定する。本稿では初期検討として、接続先仮想セクタ決定には閾値  $\Gamma_{th}$  を用いるのではなく、最大の受信信号電力を得ることの出来る仮想セクタを選択できるものとした。すなわち、 $\ell^* = \arg \max_{\ell} P_{\ell,k}$ 。

各無線ノードは無線ノードと UAV-BS 間のチャネル状態に応じて適応的に伝送レートを選択できるものとする。表 2 には、チャネル状態 (SNR) と伝送レートの対応を示す。また本稿では、通信に必要な最小の SNR を 4 [dB] とした。すなわち、無線ノードと UAV-BS 間の SNR が 4 [dB] を下回った場合、信頼性のある通信が出来なくなり無線ノードはアウトージ状態となったという。性能比較のために、UAV-BS がカバレッジエリア全体を一度にカバーする無指向性アンテナを実装する場合を従来法とする。図 3 ~ 図 6 において、回転角度  $\theta_{RT}$  が 360 [degree] の場合は従来法の特徴を示す。

図 3 に RAMDA における回転角度  $\theta_{RT}$  に対するアウトージ確率の特性を示す。図 3 より、提案手法はアウトージ確率を 12.5% から 0% に抑えることができる。これは、2.2 節で述べたように、仮想セクタ内に存在する無線ノードはアレイアンテナの高い利得を得ることができるため、達成可能な SNR が増加し必要とする最低 SNR を下回る確率が低くなるためである。

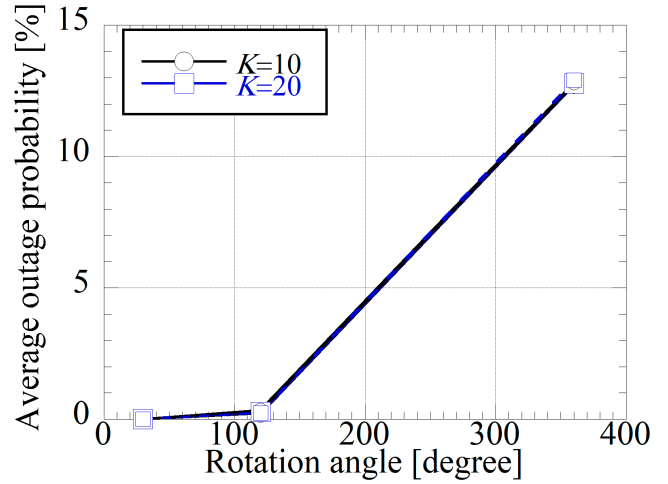


図 3 アウテージ確率の特性

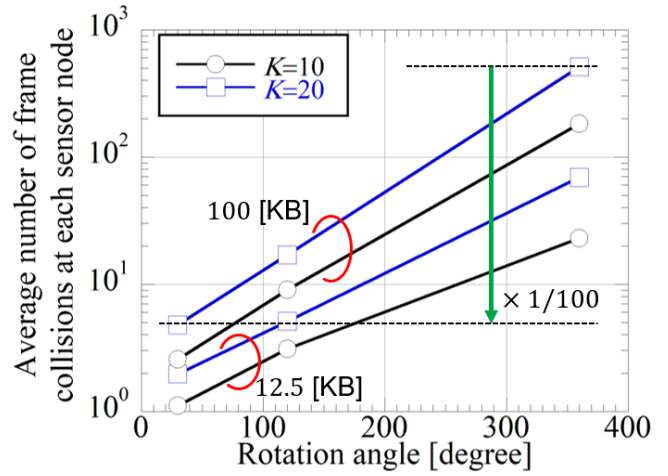


図 4 衝突回数の特徴

図 4 にデータパケット送信が完了するまで各無線ノードに発生したフレーム衝突回数の平均値の特性を示す。図 4 より、従来法では無線ノード数やデータパケットが増加するにつれ発生するフレーム衝突回数の平均値が増加する傾向がある。しかし、提案手法では、無線ノード数やデータパケットによらずフレーム衝突回数の平均値を低減することができる。これは、全ての無線ノードを一度にカバーするのではなく仮想セクタという狭い領域ごとに通信を行うことで一度に通信を行う無線ノードの数を制限することができ、同一仮想セクタ内に存在する無線ノード間の距離が短く互いの送信信号を検出可能となり隠れ端末問題を大幅に低減することができるためである。より小さい回転角  $\theta_{RT}$  で UAV-BS を回転させるときに、形成された仮想セクタ数が増加するにつれて各仮想セクタに存在するアクティブ無線ノードの数をさらに減らすことができるため、式 (14) に示すように、衝突が発生したとしても干渉信号数の低減により式 (16) に示す受信成功に必要な条件を満たす確率が増加する。したがって、提案手法は 120 [degree] の回転角度  $\theta_{RT}$  と比較して 30 [degree] の回転角度  $\theta_{RT}$  と設定した場合の方がフレーム衝突回数を抑制する性能が優れていることが分かる。

図 5 にデータパケットが送信完了となるまでの所要送信時間

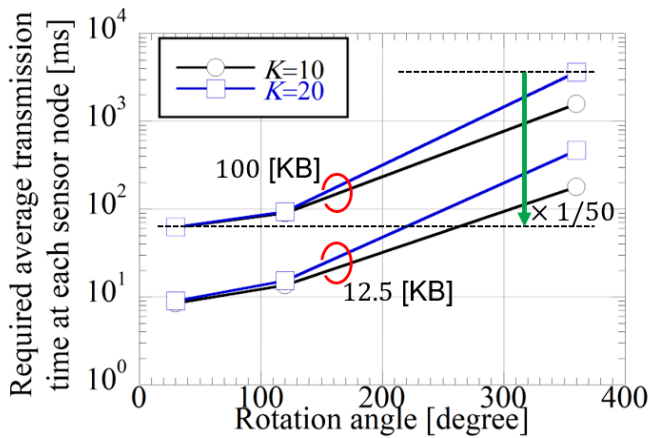


図5 送信時間の特性

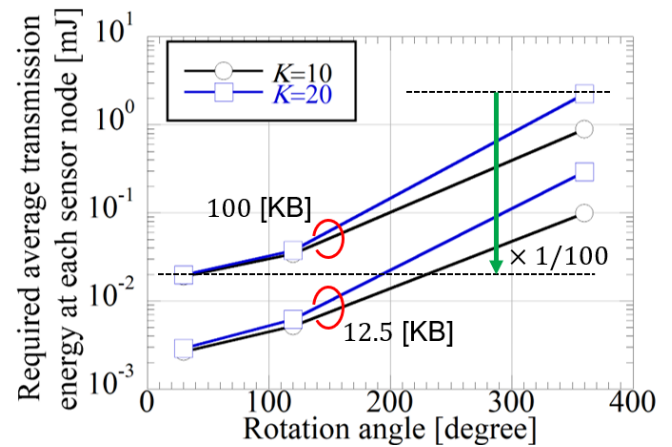


図6 送信エネルギーの特性

の特性を示す。図5より、提案手法は従来方と比較して所要送信時間を短縮することができる。これは、再送回数を低減できただけでなく、無線ノードがより高い伝送レートで送信することができ送信時間を短縮できたためである。2.2節で述べたように、UAV-BSを小さい回転角度 $\theta_{RT}$ で回転させた場合、全てのアクティブ無線ノードが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ため、提案手法は120 [degree]の回転角度 $\theta_{RT}$ と比較して30 [degree]の回転角度 $\theta_{RT}$ と設定した方が送信時間を短縮させる性能が優れていることが分かる。

図6にデータパケットが送信完了となるまでの送信エネルギーの特性を示す。図6より、従来法に比べて提案手法はデータパケットを送信するのに必要とする送信エネルギーを削減することができる。これは、衝突回数と干渉信号数の低減および高伝送レートの通信による送信エネルギーに比例する送信時間を短縮できたためである。

#### 4. まとめ

本稿では、モビリティの高いUAV-BSを活用したマルチアクセス方式RADMAを提案し、計算機シミュレーションにより評価を行った。カバレッジエリア全体を仮想セクタにより部分的に分割することでUAV-BSにランダムアクセスするアクティブ無線ノードの数を制限することができるため、隠れ端末問題と信号衝突問題を回避することができる。また、UAV-BSに実装するアレイアンテナの高い利得により無線ノードの達成可能なSNRを向上させることができるため、アウトージ確率を低下させることができる。再送信回数の低減による再送信時間の短縮とより高い伝送レートの割り当てによって、短縮された送信時間に比例する送信エネルギーを削減することができる。無線ノード数 $K$ を20とデータパケット $S$ を100 [KB]と設定した場合、計算機シミュレーション結果より、提案手法RADMAは従来法と比較してアウトージ確率を0%、フレーム衝突回数を1/100、送信エネルギーを1/100に低減できることが明らかになった。したがって、提案手法RADMAはUAV-BSを用いる無線センサネットワークにおける高効率かつ低消費エネルギーの通信を実現可能とする。

#### 謝 辞

本研究の一部はJSPS KAKENHI Grant Number JP18K04127によって行われた。

#### 文 献

- [1] B. J. Lakshmi and M. Neelima, "Maximising wireless sensor network life time through cluster head selection using hit sets," in *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, pp. 328-331, Mar. 2012.
- [2] N. Shahin, R. Ali, and Y. Kim, "Hybrid slotted-CSMA/CA-TDMA for efficient massive registration of IoT devices," *IEEE J. and Mag.*, vol. 6, pp. 18366-18382, Mar. 2018.
- [3] Y. Zeng, R. Zhang, and T. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016.
- [4] R. Sun, "Dual-band non-stationary channel modeling for the air-ground channel," Ph.D. dissertation, University of South Carolina, Jul. 2015.
- [5] A. E. A. A. Abdulla, Z. M. Fadlullah, H. Nishiyama, N. Kato, F. Ono, and R. Miura, "An optimal data collection technique for improved utility in UAS-aided networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, pp. 736-744, May 2014.
- [6] S. Say, H. Inata, J. Liu, and S. Shimamoto, "Priority-based data gathering framework in UAV-assisted wireless sensor networks," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 14, pp. 5785-5794, Jul. 2016.
- [7] N. Ahmed, S. S. Kanhere, and S. Jha, "On the importance of link characterization for aerial wireless sensor networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 52-57, May 2016.
- [8] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, "Modeling air-toground path loss for low altitude platforms in urban environments," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Austin, TX, USA, pp. 2898-2904, Dec. 2014.
- [9] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis and M. Debbah, "Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage," *IEEE Commun.*, vol. 20, no. 8, pp.1647-1650, Aug. 2016.
- [10] A. F. Molisch, "Wireless communications, second edition," 2011.