

衛星 IoT システムにおける利用可能チャンネルの偏りを考慮した Slotted ALOHA 方式の送信制御

岡田 啓^{†a)} 熊澤 完介^{††} 松井 宗大^{†††} 立神 光洋^{†††}
五藤 大介^{†††} 糸川喜代彦^{†††} 山下 史洋^{†††} 片山 正昭[†]

Slotted ALOHA Based Transmission Control Considering Available Channel Bias in Satellite IoT Systems

Hiraku OKADA^{†a)}, Kansuke KUMAZAWA^{††}, Munehiro MATSUI^{†††}, Koyo TATEGAMI^{†††},
Daisuke GOTO^{†††}, Kiyohiko ITOKAWA^{†††}, Fumihiko YAMASHITA^{†††},
and Masaaki KATAYAMA[†]

あらまし 920 MHz 帯 LPWA を用いた衛星 IoT システムでは、端末は地上ネットワークへの干渉を避けるために利用可能なチャンネルが制限される。この制限は端末の場所に依存するため、利用可能チャンネルに偏りが生じ、スループット劣化の要因となる。本論文では Slotted ALOHA 方式において利用可能チャンネルの偏りによるスループット劣化を軽減する送信制御を提案する。提案送信制御では、チャンネルへの送信優先度を表すチャンネル重みと送信抑制を表す抑制率を導入する。端末数と各端末の利用可能なチャンネルが既知な場合の理想制御と未知な場合の適応制御について検討する。これらの送信制御をシミュレーションにより評価を行い、利用可能チャンネルの偏りによる影響を防ぎ、高スループットを達成できることを明らかにする。

キーワード 衛星 IoT システム, Slotted ALOHA 方式, 送信制御, 920 MHz 帯 LPWA

1. ま え が き

農作物や森林の監視、物流状況の把握等、さまざまな用途で小型端末からのデータ収集が考えられている。地上ネットワークの使用が困難な地域での活用も期待されており、データ収集の手段として衛星通信によるインターネットへの接続を提供する衛星 IoT システムが検討されている [1]~[3]。更に、地上ネットワークで利用されている 920 MHz 帯 Low Power Wide Area (LPWA) を衛星 IoT システムに用いることで、地

上ネットワークの端末との共通化が可能となる [4]。

衛星 IoT システムの課題として、より多くの地上にいる端末が接続できる通信衛星へのアクセス方式がある。通信衛星の広大な通信エリアにより、衛星にアクセスする端末間でのキャリアセンスが不可能である。また、端末から通信衛星へと通信距離が長く応答に時間がかかるために 920 MHz 帯 LPWA で用いられている確認応答を使用することができない。これらの制約条件を満たすため、端末から通信衛星へのアクセス方式として、各端末が自律してパケット送信を行うランダムアクセス方式の Slotted ALOHA (SA) 方式や Contention Resolution Diversity Slotted ALOHA (CRDSA) 方式が検討されている [1], [3], [5]。

本システムにおいて、920 MHz 帯 LPWA を端末に用いた場合、920 MHz 帯 LPWA を用いている地上ネットワークと共存することによる課題もある。920 MHz 帯 LPWA では複数のチャンネルが提供されている [6]。しかし、本システムの端末が地上ネットワークで使用されている同じチャンネルを用いると、地上ネットワー

[†]名古屋大学未来材料・システム研究所, 名古屋市
Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††}名古屋大学工学研究科, 名古屋市
Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{†††}日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所, 横須賀市
NTT Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation, 1-1 Hikarinooka, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan

a) E-mail: hiraku@m.ieice.org

DOI:10.14923/transcomj.2022JB3039

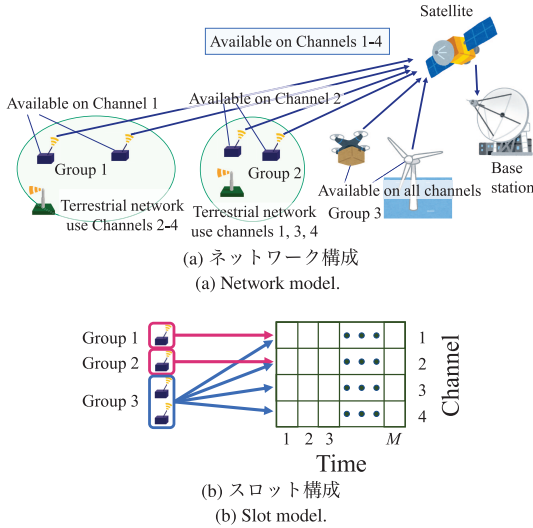


図1 920MHz帯LPWAを用いた衛星IoTシステム
Fig. 1 Satellite IoT system using 920 MHz LPWA.

クの端末に干渉を与えてしまう。そのため、キャリアセンスを行うなど、地上ネットワークが使用しているチャンネルを把握し、これらのチャンネルを本システムでは用いないよう制限することになる。本システムの端末は広範囲に配置されており、配置される場所により地上ネットワークが利用しているチャンネルも異なる(図1)。そのため、本システムで利用可能なチャンネルは端末の場所に依存することになり、利用可能チャンネルが異なる端末が混在する。チャンネルへの送信パケット数に偏りが発生し、あるチャンネルでは送信パケット数が過多となりパケット衝突が発生しやすく、あるチャンネルでは送信パケット数が少なくパケットを送信する余裕がある状態となりスループットが劣化する。筆者らの知る限りでは、この920 MHz帯LPWAを使用する衛星IoTシステムに特有の利用可能チャンネルの偏りによるスループット劣化は従来の研究では考慮されていない。

そこで本論文では、920 MHz帯LPWAを用いた衛星IoTシステムにおいて、従来のランダムアクセス方式で考慮されなかった利用可能チャンネルの偏りによるスループット劣化を軽減する送信制御を提案する。利用可能チャンネルの偏りによる影響に着目するため、本論文では簡単なランダムアクセス方式であるSA方式を用いる。提案する送信制御では、チャンネルへの送信優先度を表すチャンネル重みにより各チャンネルに送信されるパケット数の偏りを防ぐ。更に、送信パケット数

表1 記号一覧

Table 1 Notation list.

C	number of channels
$c_i = (\dots c_{ij} \dots)^T$	channel available vector for group i
M	number of time divisions
K_i	number of terminals for group i
g_i	offered load for group i
G	offered load for whole system
G_j	offered load for channel j
\mathcal{G}	transmitting load
\mathcal{G}_j	transmitting load for channel j
$w = (\dots w_j \dots)^T$	channel weight vector
γ_j	suppression ratio for channel j
p_{ij}	transmission probability for group i to channel j
μ	average of generating load for each channel
S	throughput
u_j	channel usage rate for channel j
a	bias ratio
$x^{(k)}$	x at the k th iteration for adaptive control
\hat{x}	estimated value of x
\bar{x}	predicted value of x

が過多となる状況を防ぐために、送信抑制を表す抑制率を導入する。まずは、端末数及び各端末の利用可能チャンネルを基地局で把握している場合における送信制御(理想制御と呼ぶ)について検討する。そして、端末数及び各端末の利用可能チャンネルを基地局が知らない場合において、チャンネル利用率を測定して適応的に送信制御(適応制御と呼ぶ)することを検討する。これらの送信制御をシミュレーションにより評価を行い、スループットが向上することを示す。

なお、本論文で用いる記号を表1に示す。

2. 関連研究

通信衛星を用いてIoT端末からデータを収集するシステムが検討されている[1]~[3]。文献[1],[7]では、IoTをサポートする衛星通信について、アプリケーションからアクセス方式、ネットワーク技術まで広い視点で議論されており、文献[2]では衛星の軌道や地上ネットワークとの互換性について検討されている。Low Earth Orbit (LEO)衛星でのリソース割り当てについて、文献[8]~[10]で検討されている。

一方、衛星IoTシステムでのアクセス方式について、文献[3]で網羅的に議論されている。文献[11],[12]では遅延時間の観点からLoRaを用いた地上と衛星のハイブリッドネットワークにおける低遅延アクセス方式を提案している。衛星と地上ネットワークの統合ネットワークでのアクセス方式においてSoftware Defined Network (SDN)を用いたアーキテクチャを文献[13]で

は提案している。文献[14]ではエネルギー効率の観点から LoRa に新しいスケジューリングを組み合わせたアクセス方式を提案している。複数のチャンネルを用い、干渉除去によりスループットを大幅に向上するアクセス方式を文献[15]では提案している。文献[16]では、ランダムアクセス方式を高効率化するための強化学習について検討している。このように、衛星 IoT システムにおけるアクセス方式については様々な観点から研究されているが、本論文のように利用可能チャンネルの偏りによる影響についてはこれまで考慮されていない。

3. システムモデル

想定している 920 MHz 帯 LPWA を用いる衛星 IoT システムのネットワーク構成を図 1(a) に示す。このシステムは、多数の端末と中継用通信衛星、地上に配置される基地局により構成される。本研究では通信衛星として高度 500 km 程度で地球を周回する低軌道衛星を想定している[4]。端末が衛星にアクセスできるのは衛星が端末上を周回し通信エリア内となる時間のみの制限があり、衛星 1 局当たり 1 日に数回アクセス可能となる。本論文では簡単化のために、各端末が衛星と通信できる時間は同じであり、かつ通信可能となるタイミングはどの端末も同じと仮定する。

端末は地上で利用されている 920 MHz 帯 LPWA と同等のものを想定する。衛星へのアクセスは SA 方式を用いる。端末は周回している衛星の通信エリア内に入ると、チャンネルと時間で分割されたスロットに同期してパケット送信を行う(図 1(b))。ここで、920 MHz 帯に割り当てられている利用可能な周波数チャンネルの数を C とする。端末が衛星の通信エリア内となる時間の分割数を M とすると、スロット数は $C \cdot M$ となる。なお、簡単化のため、パケットの長さはスロット長と同一と仮定する。衛星で受信したパケットはいったん蓄えられ、X バンドを使用した Multi-Input Multi-Output (MIMO) フィーダーリンクを通して一括して基地局へ中継する[4]。

端末は地上ネットワークと同一のチャンネルを使用すると地上ネットワークに干渉を与えるため、このチャンネルを用いないこととする。各端末はその場所によって利用可能チャンネルが異なる。ここで、利用可能なチャンネルが同じ端末の集合をグループと定義する。グループ i が利用可能なチャンネルを表すチャンネル利用可否ベクトルを $\mathbf{c}_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iC})^T$ と定義し、その要素 c_{ij} はグループ i がチャンネル j を利用可能なとき

1, 利用不可のとき 0 とする。なお、 T は転置を示す。例えば、図 1 において、各グループの利用可否ベクトルは

$$\mathbf{c}_1 = (1, 0, 0, 0)^T, \mathbf{c}_2 = (0, 1, 0, 0)^T, \mathbf{c}_3 = (1, 1, 1, 1)^T$$

となる。

各端末は衛星の通信エリア内に入るたびにパケットを 1 個生成し、4. や 5. で述べる送信制御に従って、そのパケットをスロットに同期して衛星に送信する。ここで、1 スロット当りに発生するパケット数を発生負荷 (offered load) と定義する。グループ i の端末数を K_i とし、グループ i の時間分割数で正規化した発生負荷を g_i とすると、

$$g_i = \frac{K_i}{M} \quad (1)$$

となる。システム全体での 1 スロット当りに正規化した発生負荷 G は、

$$G = \frac{1}{C \cdot M} \sum_i K_i = \frac{1}{C} \sum_i g_i \quad (2)$$

となる。

4. 理想制御

SA 方式に送信制御を行い、チャンネル利用偏りによるスループット低下を防ぐ手法を検討する。本章では、端末数及び各端末の利用可能チャンネルを基地局で把握している場合において、達成することができる最大のスループット特性を得ることを目指す。この送信制御を理想制御と呼ぶ。なお、実際には各端末が自身の利用可能チャンネルを基地局に通知することで、基地局はこれを把握することができる。例えば、送信される各パケットのヘッダに利用可能チャンネルの情報を付加することが考えられる。付加する情報はチャンネル数に等しいビット数あればよいため、そのオーバーヘッドも無視できる。また、各端末の衛星との通信に利用できるチャンネルも変化することが想定されるが、1 日に数回アクセス可能となる状況においてその変化量は少ないと予想される。

チャンネル重みと抑制率を用いた送信制御を行う。利用可能チャンネルの偏りに起因する各チャンネルへの送信パケット数の不均一を防ぐために、各チャンネルへの送信優先度を表すチャンネル重みを用いる。チャンネル重みは要素数がチャンネル数と等しいベクトルで表され、端

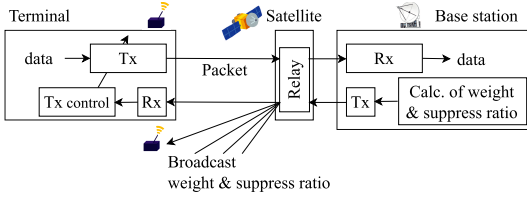


図2 理想制御のブロックダイアグラム
Fig. 2 Block diagram of ideal control.

末が属するグループに依らず定義することで、制御に必要な情報量を減らす。また、一般に SA 方式では送信パケット数が過多となるとスループットの劣化が生じるため、文献 [17] で用いられている手法をもとに抑制率を導入し、送信過多を防ぐためのパケット送信抑制を行う。

4.1 理想制御の送信制御手法

理想制御のブロックダイアグラムを図2に示す。この手法では、各端末の利用可能なチャンネルと端末数よりチャンネル重みと抑制率を算出する。基地局は算出したチャンネル重みと抑制率を衛星経由で端末へ通知する。すなわち、衛星は端末のいるエリア上空に来たときにブロードキャストにて全端末へチャンネル重みと抑制率の情報を送信する。端末は衛星から通知された各チャンネルに対するチャンネル重みと抑制率から送信確率を算出し、それに従い送信するか送信抑制するか、送信する場合は送信するチャンネルを決め、スロットを選択する。

チャンネル重みベクトルを $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_C)^T$ と定義し、 w_j はチャンネル j に対するチャンネル重みを示す。また、チャンネル j の抑制率を γ_j で表す。このとき、グループ i に所属する端末がチャンネル j に送信する確率 p_{ij} は、

$$p_{ij} = \frac{c_{ij}w_j}{\mathbf{c}_i^T \mathbf{w}} (1 - \gamma_j) \quad (3)$$

と表される。この送信確率において、グループ i は全チャンネルの送信確率を合計しても 1 未満になることがあり、その場合、グループ i に所属する各端末は $1 - \sum_{j=1}^C p_{ij}$ の確率で送信を抑制する。また、送信する場合は p_{ij} に従ってチャンネルを選択し、選んだチャンネルから送信するスロットを選択する。この送信制御の疑似コードを Algorithm 1 に示す。なお、式 (3) において、 $c_{ij}w_j$ はグループ i が利用可能なチャンネルのみ送信することを表し、 $\mathbf{c}_i^T \mathbf{w}$ はグループ i で利用可能

Algorithm 1 Transmission control for a user of group i

```

1:  $v \leftarrow$  random value from 0 to 1
2:  $q \leftarrow 1 - \sum_{j=1}^C p_{ij}$ 
3: if  $v < q$  then
4:   Suppress packet transmission
5: else
6:   for  $j \leftarrow 1$  to  $C$  do
7:      $q \leftarrow q + p_{ij}$ 
8:     if  $v < q$  then
9:        $t \leftarrow$  random integer value from 1 to  $M$ 
10:      Transmit a packet at timeslot  $t$  on channel  $j$ 
11:     break
12:   end if
13: end for
14: end if

```

なチャンネル重みの総和を表しており、 $\frac{c_{ij}w_j}{\mathbf{c}_i^T \mathbf{w}}$ によりグループ i における相対的な送信確率を算出する。

図1の場合を例にすると、 $\mathbf{w} = (0.1, 0.1, 0.4, 0.4)^T$ 、 $\gamma_j = 0 (j = 1, 2, 3, 4)$ のとき、送信確率は、

$$\begin{aligned} p_{1,1} &= 1, & p_{1,2} &= 0, & p_{1,3} &= 0, & p_{1,4} &= 0, \\ p_{2,1} &= 0, & p_{2,2} &= 1, & p_{2,3} &= 0, & p_{2,4} &= 0, \\ p_{3,1} &= 0.1, & p_{3,2} &= 0.1, & p_{3,3} &= 0.4, & p_{3,4} &= 0.4 \end{aligned}$$

となる。利用可能なチャンネルとチャンネル重みを考慮して、送信確率が算出されていることが分かる。

4.2 チャンネル重み

各チャンネルへ送信されるパケット数の偏りを防ぐようにチャンネル重みを決定する。送信抑制を行う前のチャンネル j に送信されるパケット数の期待値をチャンネル j の発生負荷 G_j と定義する。これは、各グループがチャンネル j に送信する 1 スロット当りのパケット数の期待値の総和で求められるので、

$$G_j = \sum_i g_i \cdot \frac{c_{ij}w_j}{\mathbf{c}_i^T \mathbf{w}} \quad (4)$$

となる。各チャンネルの発生負荷について、その偏りを最小化したいため、チャンネル重みは次式により求めれば良い。

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= \arg \min_{\mathbf{w}} \sum_j^C |G_j - \mu| \\ &= \arg \min_{\mathbf{w}} \sum_j^C \left| \sum_i^C g_i \cdot \frac{c_{ij}w_j}{\mathbf{c}_i^T \mathbf{w}} - \mu \right| \end{aligned} \quad (5)$$

ただし、 μ は各チャンネルの発生負荷の平均値であり、

$$\mu = \frac{1}{C} \sum_j G_j = \frac{1}{C} \sum_j \sum_i g_i \cdot \frac{c_{ij} w_j}{c_i^T w} = G \quad (6)$$

である。

式 (5) において最小化項が 0 となる時、各チャンネルに送信されるパケット数の期待値は均一になる。このときのチャンネル重み w は以下の連立方程式の解として得られる。

$$\begin{cases} \sum_i g_i \cdot \frac{c_{i1} w_1}{c_i^T w} = G \\ \sum_i g_i \cdot \frac{c_{i2} w_2}{c_i^T w} = G \\ \dots \\ \sum_i g_i \cdot \frac{c_{iC} w_C}{c_i^T w} = G \end{cases} \quad (7)$$

逆に、この連立方程式が解けないとき、各チャンネルに送信されるパケット数に偏りが残ることになる。その場合は適切な最適化アルゴリズムを用いて式 (5) よりチャンネル重みを計算する。

4.3 抑制率

送信過多を防ぐためにパケットの送信抑制を行う。1 スロット当りに各チャンネルに実際に送信されているパケット数を送信負荷 (transmitting load) \mathcal{G} と定義する。スループット S は 1 スロット当りに送信に成功する平均パケット数と定義すると、

$$S = \mathcal{G} e^{-\mathcal{G}} \quad (8)$$

で求められる [18]。スループットが最大となる送信負荷を考える。式 (8) より、送信負荷 $\mathcal{G} = 1$ のとき、最大スループット $1/e$ が得られる。送信負荷が 1 より大きくなるとスループットが低下するため、各チャンネルへの送信負荷が 1 以下となるように送信抑制を行う。

各チャンネルにおいて、そのチャンネルの発生負荷を 1 以下に抑えるための抑制率 γ_j は

$$\gamma_j = 1 - \min\left(1, \frac{1}{G_j}\right) \quad (9)$$

となる。この抑制率により、 G_j が 1 以下のとき抑制率は 0 となり送信を抑制しないが、 G_j が 1 を超えるとき抑制率は $1 - 1/G_j$ となり、この値に従い送信を抑制する。チャンネル j の送信負荷を \mathcal{G}_j とすると、

$$\mathcal{G}_j = (1 - \gamma_j) \cdot G_j \quad (10)$$

となる。チャンネル j の発生負荷 G_j が 1 を超えるとき、送信負荷は

$$\mathcal{G}_j = (1 - \gamma_j) \cdot G_j = \left\{1 - \left(1 - \frac{1}{G_j}\right)\right\} \cdot G_j = 1 \quad (11)$$

となり、1 以下に抑えられていることが分かる。なお、チャンネル重みにより各チャンネルの発生負荷が均一になっている場合は、抑制率はチャンネルごとに求める必要はなく、全てのチャンネルで同一の抑制率を用いれば良い。

4.4 スループット解析

理想制御におけるスループット特性を求める。式 (5) において最小化項が 0 となる時のみを考慮する。このとき、連立方程式 (7) より各チャンネルの発生負荷は G となる。更に式 (9) 及び式 (11) より、各チャンネルの発生負荷が 1 以下のときは抑制率は 0 であり送信負荷は G である。各チャンネルの発生負荷が 1 を超えるとき、送信負荷は 1 になる。よって、スループットは式 (8) より

$$S = \begin{cases} G e^{-G} & (G \leq 1) \\ e^{-1} & (G > 1) \end{cases} \quad (12)$$

となる。この式より、理想制御では利用可能チャンネルの偏りの影響を防ぎ、スループットが最適化されることが分かる。

5. 適応制御

理想制御では基地局は端末数及び各端末の利用可能チャンネルを把握していることを想定していた。しかし、各端末が自身の利用可能チャンネルを基地局に通知する必要がある。そこで、この通知を必要とせず、端末数及び各端末の利用可能チャンネルを基地局が知らない場合において、基地局がチャンネル利用率を測定して適応的に送信制御する適応制御について検討する。

5.1 適応制御の送信制御手法

適応制御のブロックダイアグラムを図 3 に示す。こ

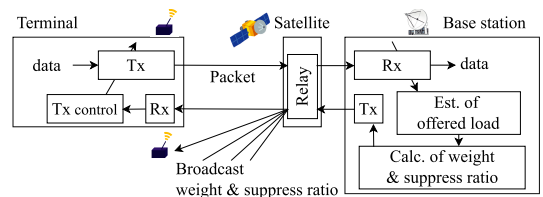


図 3 適応制御のブロックダイアグラム

Fig. 3 Block diagram of adaptive control.

の手法では、基地局はスロットの使用状況からチャネル利用率を測定し、チャネル利用率から送信負荷及び発生負荷を推定し、チャネル重みと抑制率を算出する。算出したチャネル重みと抑制率を衛星経由で端末へブロードキャストにより通知する。端末は理想制御のときと同様、衛星から通知された各チャネルに対するチャネル重みと抑制率から送信確率を式 (3) を用いて算出し、それに従い送信するか送信抑制するか、送信する場合は送信するチャネルを決め、スロットを選択する。送信制御の疑似コードは Algorithm 1 と同様である。

端末が衛星の通信エリア内に入るたびに、チャネル重みと抑制率を繰り返し更新することで、理想制御と同等の性能を達成することを目指す。ここで、 k 回目の更新時におけるチャネル重みを $w^{(k)} = (w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_C^{(k)})^T$ 、チャネル j の抑制率を $\gamma_j^{(k)}$ で表す。

5.2 チャネル利用率の測定と送信負荷・発生負荷の推定

チャネル利用率を、各チャネルにおいてスロットへ 1 パケット以上送信された割合と定義する。衛星では各スロットにおいてパケットが送信されたかどうかを観測することで、各チャネルの利用率を測定することができる。そこで、衛星が端末の通信エリア内に入るたびに各チャネルの利用率を測定する。

チャネル利用率の測定値を用いて、送信負荷を推定する。各スロットに送信されるパケット数がポアソン分布に従うと仮定すると、チャネル j のチャネル利用率 u_j は送信負荷 G_j を用いて

$$u_j = 1 - e^{-G_j} \quad (13)$$

と表される。ここで、 k 回目の更新時におけるチャネル j の利用率の測定値を $\hat{u}_j^{(k)}$ とする。このとき、送信負荷の推定値 $\hat{G}_j^{(k)}$ は

$$\hat{G}_j^{(k)} = -\ln(1 - \hat{u}_j^{(k)}) \quad (14)$$

で算出できる。また、 k 回目の更新時に観測されるチャネル利用率は、 $k-1$ 回目に算出した抑制率に従い地上端末がパケットを送信した結果である。そのため、チャネル j の発生負荷の推定値 $\hat{G}_j^{(k)}$ は

$$\hat{G}_j^{(k)} = \frac{\hat{G}_j^{(k)}}{1 - \gamma_j^{(k-1)}} \quad (15)$$

で求められる。

5.3 チャネル重みと抑制率の更新

チャネル重みにより、各チャネルの発生負荷を等しくする。チャネル j の発生負荷の推定値 $\hat{G}_j^{(k)}$ は $k-1$ 回目のチャネル重みに従って送信されている。これを考慮して k 回目において各チャネルの発生負荷が等しくなるための条件は

$$\frac{\hat{G}_1^{(k)}}{w_1^{(k-1)}} \cdot w_1^{(k)} = \frac{\hat{G}_2^{(k)}}{w_2^{(k-1)}} \cdot w_2^{(k)} = \dots = \frac{\hat{G}_C^{(k)}}{w_C^{(k-1)}} \cdot w_C^{(k)} \quad (16)$$

となる。式 (3) により送信確率を求める際、チャネル重みは各チャネル間の相対的な値のみ依存する。よって、式 (16) の各項が 1 に等しいとすると、各チャネルにおける重みの更新式は

$$w_j^{(k)} = \frac{w_j^{(k-1)}}{\hat{G}_j^{(k)}} \quad (17)$$

となる。ただし、チャネル重みは次式により正規化する。

$$\sum_j w_j^{(k)} = 1 \quad (18)$$

式 (17) はチャネルの推定発生負荷が大きいほどチャネル重みをより小さく、逆に推定発生負荷が小さいほどチャネル重みを大きくすることになる。

式 (17) で計算されるチャネル重みを考慮し、 k 回目のチャネル j への発生負荷の予測値 $\tilde{G}_j^{(k)}$ は

$$\tilde{G}_j^{(k)} = \frac{\hat{G}_j^{(k)}}{w_j^{(k-1)}} \cdot w_j^{(k)} \quad (19)$$

となる。式 (9) と同様に、抑制率の更新式は

$$\gamma_j^{(k)} = 1 - \min\left(1, \frac{1}{\tilde{G}_j^{(k)}}\right) \quad (20)$$

となる。

6. 数値例

提案する送信制御をシミュレーションにより評価する。

6.1 シミュレーション条件

雑音等の影響がなく通信失敗はパケット衝突のみに

表2 シミュレーション諸元
Table 2 Simulation settings.

number of samples	10000
number of channels, C	10
number of time divisions, M	108
bias ratio, a	0.5, 1.0, 2.0

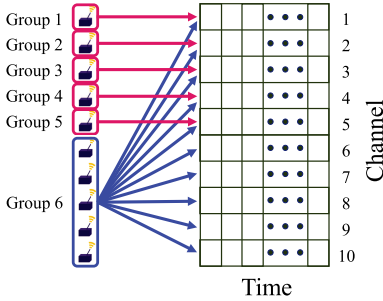


図4 利用可能チャンネルの偏りモデル
Fig.4 Model of available channel bias.

よって生じるという仮定でシミュレーションを行う。シミュレーション諸元を表2に示す。衛星 IoT システムで利用できるチャンネル数 C は 10 とする。衛星が高度 500 km 程度、通信エリアの半径は 450 km 程度を想定し、端末が衛星の通信エリア内となる時間は一律 54 s であるとする。スロットの時間長を 500 ms とし時間分割数 M は 108 とする。

端末における利用可能チャンネルの偏りのモデルを図4に示す。端末はグループ1から6までに分割される。グループ1から5はそれぞれチャンネル1から5のみ利用可能である。グループ6は全てのチャンネルを利用可能とする。グループ1から5はそれぞれ等しい端末数が属し、その発生負荷も等しく $g_1 = g_2 = \dots = g_5$ とする。利用可能チャンネルの偏りを変化させるため、1チャンネルしか利用できないグループ1から5の発生負荷の和と全てのチャンネルが利用できるグループ6の発生負荷の比をパラメータとする。この偏りの比を a とすると

$$a = \frac{\sum_{i=1}^5 g_i}{g_6} \quad (21)$$

と定義される。偏りの比が $a = 0$ のとき、全てのチャンネルが利用可能であるグループ6のみ負荷が発生するため、利用可能チャンネルの偏りが無い。シミュレーションでは各グループの発生負荷が与えられた値に等しくなるよう、式(1)を用いて端末数を決めている。偏りの比は 0.5, 1.0, 2.0 を用いる。図5に送信制御

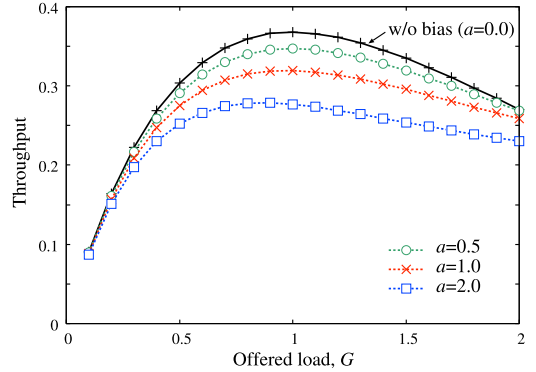


図5 送信制御を用いない場合における利用可能チャンネルの偏りの影響
Fig.5 Influence of available channel bias without transmission control.

を用いない場合における、利用可能チャンネルの偏りがスループットへ与える影響を示す。式(8)と同様、スループットは1スロット当りに送信に成功する平均パケット数である。偏りが無い場合 ($a = 0$) と比べ、偏りによりスループットが劣化していることが分かる。また、偏りの比が大きければ大きいほど、1チャンネルしか利用できないグループ1から5の発生負荷が大きくなり、利用可能チャンネルの偏りによる影響が大きくなっていく。

シミュレーションを 10000 回行い、理想制御と適応制御を行った場合の平均スループットを評価する。送信に成功したパケットを数え、それをスロット数と試行回数で割ることで1スロット当りの平均スループットを算出する。それぞれチャンネル重み、抑制率のみを用いた場合についても評価し、チャンネル重みや抑制率がスループット特性に与える影響についても検討する。また、比較のため、送信制御を行わなかった場合についても示す。

6.2 理想制御の性能評価

まず始めに理想制御の性能評価を行う。図6に理想制御における $a = 1.0$ の場合のスループット特性を示す。この図には、理想制御(チャンネル重みと抑制率の両方を適用)、チャンネル重みのみ、抑制率のみ、及び送信制御を行わない場合の特性が示してある。また、式(12)による解析結果も示してある。この解析結果は理想制御のシミュレーション結果と一致しており、理想制御が利用可能チャンネルの偏りの影響を防いでいることが分かる。なお、本論文では簡単なランダムアクセス方式である SA 方式を用いていたため、最大ス

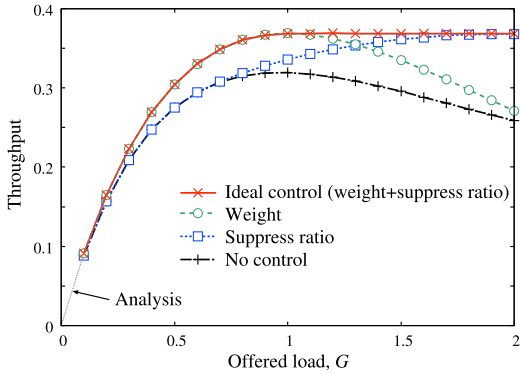


図6 理想制御のスループット特性 ($a = 1.0$)
 Fig. 6 Throughput performance of ideal control ($a = 1.0$).

スループットは $1/e$ となる。920 MHz 帯 IoT 向け地上ネットワークにおいても、非力な IoT 端末に対して複雑なアクセス制御を必要としない簡易なランダムアクセス方式である ALOHA 方式が使われている [19]。このため、最大スループットが $1/e$ ではあるが、有効性はあると判断する。次に、チャンネル重みのみを用いた場合に着目すると、利用可能チャンネルの偏りを防ぎ各チャンネルの送信負荷が均一になっているため、発生負荷 G が 1 までは理想制御と同じ特性である。しかし、発生負荷が高くなると送信過多の状態になっており、スループット特性が劣化している。また、抑制率のみを用いた場合、各チャンネルの送信負荷に偏りがあるために発生負荷が低いと送信制御を行わない場合と同等の特性になっている。一方、発生負荷が高くなるとスループットが最大になるように各チャンネルでパケットの送信を抑制しているため、スループット特性が理想制御に近づく。

理想制御を用いた場合と用いなかった場合の各チャンネルのスループット特性を図7に示す。ここで、 $G = 1$ 、 $a = 1.0$ としている。送信制御を用いなかった場合、チャンネル 1 から 5 とチャンネル 6 から 10 でスループット特性に差が生じている。これに対し、理想制御を用いることで各チャンネルのスループット特性が均一になっている。このことから利用可能チャンネルの偏りの影響を防いでいることが分かる。

図8に、偏りの比を変えたときのスループット特性を示す。偏りの比が 0.5 と 1.0 の場合、理想制御のスループット特性は同じである。これに対し、偏りの比が 2.0 の場合は低発生負荷で特性が劣化している。今回のシミュレーション条件では $a \leq 1$ のとき、式 (5)

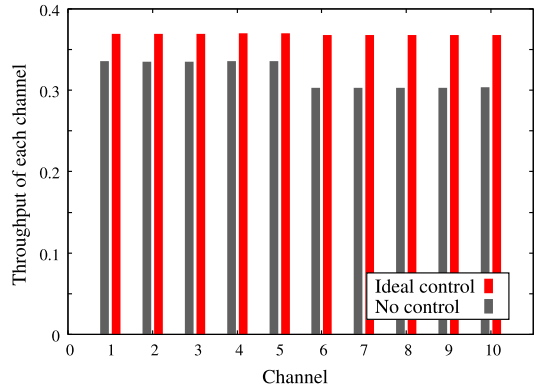


図7 理想制御における各チャンネルのスループット特性 ($G = 1, a = 1.0$)

Fig. 7 Throughput performance of ideal control for each channel ($G = 1, a = 1.0$).

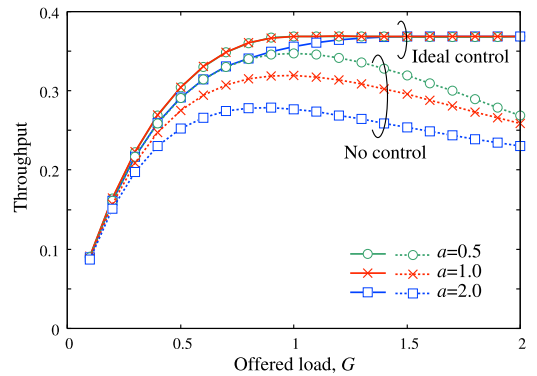


図8 偏りの比を変えたときの理想制御のスループット特性

Fig. 8 Throughput performance of ideal control for different bias ratio.

において最小化項が 0 となり、連立方程式 (7) の解が得られる。偏りの比が 2.0 の場合、各チャンネルの発生負荷に偏りが残るため、特性劣化が生じている。

6.3 適応制御の性能評価

次に、適応制御の性能を評価する。図9に、 $a = 1.0$ のときのスループット特性を示す。理想制御のとき (図6) と同様、適応制御においても利用可能チャンネルの偏りや高発生負荷時における送信過多を防ぎ、高いスループット特性を達成している。チャンネル重みや抑制率のみを用いた場合も、理想制御のときと同様の結果が得られている。

また、偏りの比を変えたときの適応制御と理想制御のスループット特性を図10に示す。適応制御と理想制御のスループット特性はほぼ一致しており、適応制

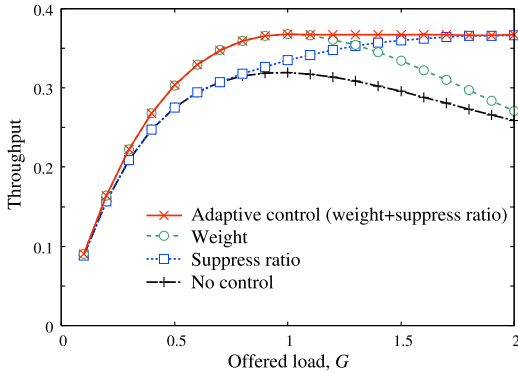


図9 適応制御のスループット特性 ($a = 1.0$)

Fig. 9 Throughput performance of adaptive control ($a = 1.0$).

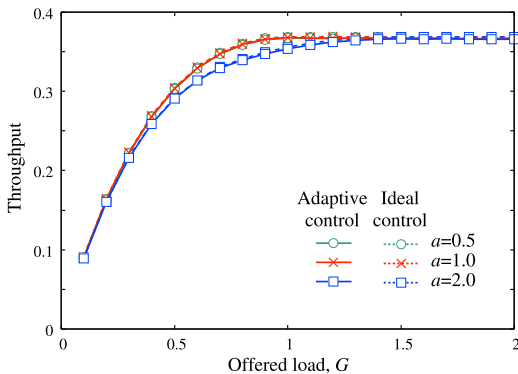


図10 偏りの比を変えたときの適応制御と理想制御のスループット特性

Fig. 10 Throughput performance of adaptive and ideal controls for different bias ratio.

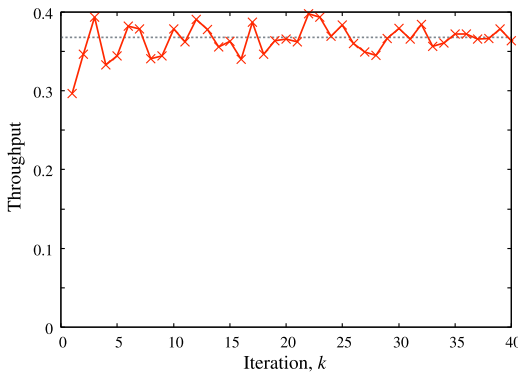


図11 更新回数に対するスループット特性 ($G = 1, a = 1.0$)

Fig. 11 Throughput performance as a parameter of the number of iteration ($G = 1, a = 1.0$).

御を用いてもスループットの最適化を図ることができる。

最後に、適応制御の収束速度を調べるため、更新回数に対するスループット特性を図 11 に示す。ここで、

$G = 1, a = 1.0$ であり、適応制御におけるチャンネル重みの初期値は全チャンネルで一定、抑制率の初期値は 0 としている。また、破線は収束後のスループット特性である。この図より、数回程度の更新でスループット特性が収束していることが分かる。

7. む す び

本論文では、920 MHz 帯 LPWA を用いた衛星 IoT システムにおいて、利用可能チャンネルの偏りによる影響を和らげる SA 方式のための送信制御を提案した。提案した送信制御では、チャンネル重みを導入することで各チャンネルの送信負荷を均一にすることができ、抑制率により適切な送信負荷を維持することができた。端末数と各端末の利用可能なチャンネルが既知な場合の理想制御と未知な場合の適応制御の両方を検討した。シミュレーションにより評価した結果、どちらの手法においても利用可能チャンネルの偏りによる影響を防ぎ、高発生負荷時でも高いスループットを達成することを明らかにした。

本論文で提案した理想制御は解析結果からスループットを最適化していることが分かる。適応制御では端末から送信制御に必要な情報を基地局に伝える必要がないのにもかかわらず、各チャンネルの利用率を測定するだけで理想制御とほぼ同じスループット特性が得られている。このため、送信制御のためのオーバーヘッドが少なく、また端末の利用可能チャンネルの偏りに依らず高スループット特性を達成する適応制御は、衛星 IoT システムにおいて有効であるといえる。なお、本論文で提案した送信制御はスループットが最大となる送信負荷が分かれば他のランダムアクセス方式にも適用可能である。例えば、干渉除去により高いスループットが得られる CRDSA 方式を用いることで、最大スループットの向上が見込める。

文 献

- [1] M.D. Sanctis, E. Cianca, G. Araniti, I. Bisio, and R. Prasad, "Satellite communications supporting internet of remote things," *IEEE Internet Things J.*, vol.3, no.1, pp.113–123, Feb. 2016.
- [2] Z. Qu, G. Zhang, H. Cao, and J. Xie, "LEO satellite constellation for Internet of Things," *IEEE Access*, vol.5, pp.18391–18401, 2017.
- [3] T. Ferrer, S. Céspedes, and A. Becerra, "Review and evaluation of MAC protocols for satellite IoT systems using nanosatellites," *Sensors*, vol.19, no.8, 2019.
- [4] F. Yamashita, D. Goto, Y. Kojima, M. Matsui, K. Itokawa, K. Yoshizawa, Y. Fujino, C. Kato, and M. Nakadai, "920-MHz IoT platform via LEO satellite employing feeder-link MIMO technol-

- ogy,” IEICE International Conference on Emerging Technologies for Communications, 2020.
- [5] ETSI EN 301-545-2, “Digital video broadcasting (DVB); second generation DVB interactive satellite system (DVB-RCS2); part 2: lower layers for satellite standard,” 2012.
- [6] ARIB STD-T108 1.4 版, “920MHz 帯テレメータ用, テレコントロール用, 及びデータ伝送用無線設備,” 2021.
- [7] J.A. Fraire, S. Céspedes, and N. Accettura, “Direct-to-satellite IoT - a survey of the state of the art and future research perspectives,” *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks*, pp.241–258, 2019.
- [8] A. Ivanov, M. Stoliarenko, S. Kruglik, S. Novichkov, and A. Savinov, “Dynamic resource allocation in LEO satellite,” *Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. (IWCMC)*, pp.930–935, 2019.
- [9] J. Du, C. Jiang, J. Wang, Y. Ren, S. Yu, and Z. Han, “Resource allocation in space multiaccess systems,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol.53, no.2, pp.598–618, April 2017.
- [10] W. Usaha and J.A. Barria, “Reinforcement learning for resource allocation in LEO satellite networks,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B*, vol.37, no.3, pp.515–527, June 2007.
- [11] C. Wang, L. Liu, H. Ma, and D. Xia, “LST-MAC: A low-latency hybrid MAC protocol for LEO satellite supported IoT,” *IEEE 25th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, pp.480–487, 2019.
- [12] C. Wang, L. Liu, H. Ma, and D. Xia, “A joint optimization scheme for hybrid MAC layer in LEO satellite supported IoT,” *IEEE Internet Things J.*, vol.8, no.15, pp.11822–11833, Aug. 2021.
- [13] L. Yan, X. Ding, and G. Zhang, “Dynamic channel allocation aided random access for SDN-enabled LEO satellite IoT,” *J. Commun. Inf. Netw.*, vol.6, no.2, pp.134–141, June 2021.
- [14] R. Ortigueira, J.A. Fraire, A. Becerra, T. Ferrer, and S. Céspedes, “RESS-IoT: A scalable energy-efficient MAC protocol for direct-to-satellite IoT,” *IEEE Access*, vol.9, pp.164440–164453, 2021.
- [15] D.T.C. Wong, Q. Chen, X. Peng, and F. Chin, “Multi-channel pure collective aloha MAC protocol with decollision algorithm for satellite uplink,” *IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pp.251–256, 2018.
- [16] X. Liu, H. Zhang, K. Long, A. Nallanathan, and V.C.M. Leung, “Deep dyna-reinforcement learning based on random access control in LEO satellite iot networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol.9, no.16, pp.14818–14828, Aug. 2022.
- [17] H. Okada, M. Saito, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, and A. Ogawa, “CDMA ALOHA systems with modified channel load sensing protocol for satellite communications,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E79-A, no.12, pp.2035–2042, Dec. 1996.
- [18] L. Kleinrock and F. Tobagi, “Packet switching in radio channels: Part I – carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics,” *IEEE Trans. Commun.*, vol.23, no.12, pp.1400–1416, Dec. 1975.
- [19] M.A.M. Almuha, W.A. Jabbar, N. Sulaiman, and S. Abdulmalek, “A survey on LoRaWAN technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions,” *Electronics*, vol.11, no.1, art.no.164, 2022.

(2022 年 12 月 16 日受付, 2023 年 2 月 13 日再受付,
3 月 9 日早期公開)



岡田 啓 (正員: シニア会員)

平 7 名大・工・電子情報学科学卒。平 9 同大大学院博士課程前期課程了。平 11 同大大学院博士課程後期課程了。工博。同年日本学術振興会特別研究員。平 12 名大・助手, 平 18 新潟大・助教授, 平 21 埼玉大・准教授, 平 23 名大・准教授, 現在に至る。無線通信システム, 無線ネットワーク, 車車間通信, 可視光通信等の研究に従事。IEEE, ACM 各会員。平 8 電気・電子情報学術振興財団・猪瀬学術奨励賞, 平 10 本会学術奨励賞, 平 26 本会通信ソサイエティ ComEX Best Letter Award, 令 2 IEEE CCNC Best Paper Award 受賞。



熊澤 完介 (学生員)

令 4 名大・工・電気電子情報工卒。現在同大大学院博士前期課程在学中。衛星通信の研究に従事。



松井 宗大 (正員)

平 10 名古屋大学工学部情報工科学卒。平 12 名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程了。同年日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所に入社。平 26 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所に加入, 現在に至る。日本電信電話株式会社に入社以来, ソフトウェア無線や光通信, 無線 LAN の研究に従事。現在は, 衛星通信の研究に従事。平 17 電子情報通信学会学術奨励賞を受賞。



立神 光洋 (正員)

平 31 福井大・工卒。令 3 同大学院博士課程前期課程了。令 3 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所入社。以来, 衛星通信に関する研究に従事。



五藤 大介 (正員)

平 22 静岡大・工・システム卒。平 24 名大大学院博士課程前期課程了, 令 2 同大学院博士課程後期課程了。平 24 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所入社。以来, 衛星通信技術における信号処理及びアンテナ技術に関する研究に従事。平 28 電子情報通信学会学術奨励賞。



糸川喜代彦 (正員)

平 10 筑波大学第三学群工学システム学類卒。平 12 同大学院理工学研究科修士課程了。同年東日本電信電話(株)入社, NTT アクセスサービスシステム研究所に配属。以来無線 LAN, 準ミリ帯加入者系無線, 災害対策用無線システム及び 10G-EPON システム等の研究開発を担当。現在衛星通信システムの研究に従事。



山下 史洋 (正員: シニア会員)

平 8 京大・工・電子通信卒。平 10 同大学院修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。以来、衛星通信用変復調技術、衛星 MIMO/IoT 技術の研究、B5G/NTN 技術の研究、離島・災対・船舶衛星通信インフラシステムの実用化開発に従事。現在、同社アクセスサービスシステム研究所衛星通信グループリーダー、ネットワークイノベーションセンタ無線エントランスグループリーダーを兼務。主幹研究員。工博。平 15 年度 IEEE PIMRC 論文賞、平 16 年度学術奨励賞。令和元年度電波功績賞 電波産業会会長表彰受賞。令和元年度衛星通信研究専門委員会委員長。現在、同委員会顧問。



片山 正昭 (正員: フェロー)

昭 56 阪大・工・通信卒。昭 61 同大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大助手。平元阪大・講師。平 4 名大・講師。平 5 助教授。平 13 教授。現在、名大・未来材料・システム研究所・教授(工学研究科情報・通信工学専攻担当)。1995 年 10 月より 1996 年 4 月まで、名大工学部との学術交流協定により、米国ミシガン大学アンアールバ校工学部電気電子計算機科学科に滞在。制御と通信の融合、スマートコミュニティ実現のための通信技術の活用、光通信システム、電力線通信システム、宇宙システムのための無線通信、宇宙システムを活用した通信システム等の研究に従事。IEEE シニア会員。東海支部支部長(元)、高信頼制御通信研究専門委員会委員長(前)、ワイドバンドシステム研究専門委員会副委員長(元)、ソフトウェア無線研究専門委員会副委員長(元)。昭 61 篠原記念学術奨励賞。平 11, 13, 18 本会通信ソサイエティー功労感謝状受賞。平 18, 令元電波の日経務省東海総合通信局長表彰。著書、「Power Line Communications (共著)」、「無線通信工学(編著)」、「電力線通信システム(監修)」等。