

# IEEE 802.11 マルチホップネットワークを用いた データ伝送時の消費電力量解析

通阪 航<sup>†</sup> 長谷川 剛<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1 番 5 号  
<sup>††</sup> 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山 1 番 32 号  
E-mail: <sup>†</sup>{t-wataru,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年、無線技術の向上にともない、無線ネットワークを利用したインターネットアクセスが一般的となっている。無線ネットワークを利用する端末はバッテリー駆動で用いられることが多いため、消費電力を考慮したネットワーク制御が求められる。IEEE 802.11 無線 LAN 規格は複数のデータレートを持ち、それぞれ変調方式、消費電力、通信可能距離などが異なるため、データレートや送信電力によって通信距離やビットエラー率などが変動する。したがって、状況に応じたデータレート選択が重要となる。本稿では、IEEE 802.11 無線 LAN 規格に基づく無線マルチホップネットワークを対象とし、データ伝送時の消費電力量解析を行うことにより、データレートの選択が消費電力量に与える影響を考察する。解析の結果、ビットエラー率が低い環境では低いデータレートを用いたデータ伝送を行うことにより、消費電力量を約 5 – 10% 削減できることを示す。

キーワード IEEE 802.11, マルチホップネットワーク, 消費電力, 変調方式

## Power consumption analysis of data transmission in IEEE 802.11 multi-hop networks

Wataru TOORISAKA<sup>†</sup>, Go HASEGAWA<sup>††</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University  
Yamadaoka 1-5, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan  
<sup>††</sup> Cybermedia Center, Osaka University  
Machikaneyama 1-32, Toyonaka-shi, Osaka, 560-0043, Japan  
E-mail: <sup>†</sup>{t-wataru,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, <sup>††</sup>hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

**Abstract** In this report, we give the mathematical analysis of power consumption in data transmission over IEEE 802.11-based wireless multihop networks. In the analysis, we consider the detailed behavior of CSMA/CA with RTS/CTS to calculate the power consumption. We also take the effect of the data rate into account, which has various values of power consumption, bitrate, modulation method, and transmission distance. The analysis results show that there is some situations where we should intentionally choose a data rate with low bitrate when we minimize the power consumption. For example, our analysis shows that we can decrease the power consumption by around 5-10% especially when the bit error rate is comparatively small.

**Key words** IEEE 802.11, multi-hop networks, power consumption, modulation method

### 1. ま え が き

近年、無線技術の向上にともない、無線ネットワークを利用したインターネットアクセスが一般的となっている。無線ネットワークの特長の一つに無駄な配線がないことが挙げられる。一方、これらの端末はバッテリー駆動で使われることが多いため、消費電力を考慮したネットワーク制御が求められる。無

線機器においては、無線通信が消費する電力が機器全体の消費電力のおよそ 10% から 50% を占めることが報告されており [1], [4], [9], 無線通信の消費電力を削減することが機器全体の消費電力を削減するうえで重要である。さらには、高いネットワーク性能を維持しながら消費電力を抑えることも重要である。また、無線ネットワークの中には無線 LAN のようなアクセスポイント型の他に、無線メッシュネットワーク、センサネッ

トワーク、アドホックネットワークのようなマルチホップネットワークも登場しており、近年注目を集めている。本稿では無線マルチホップネットワークの消費電力とネットワーク性能に焦点を当て、特に IEEE 802.11 無線 LAN 規格によって構築されるマルチホップネットワークを対象とする。

IEEE 802.11 無線 LAN 規格は複数のデータレートを持ち、それぞれ変調方式、消費電力、通信可能距離などが異なる。従来研究においては、データレートを適応的に選択するレート選択アルゴリズムが提案されており、中でも ARF [8], [10] や、RBAR [8], AARF [8], [10] などがよく知られている。しかし、ARF 及び RBAR はアプリケーションのスループットを最大化することのみを目的として設計されており、消費電力は考慮されていない。さらに、これらの既存手法は 1 ホップのアクセスポイント型ネットワークにおける利用を前提としており、マルチホップネットワークは対象とされていない。消費電力について解析を行っているものには [2], [5], [7], [11] などがあるが、これらもマルチホップネットワークを考慮していない。

一般に、無線伝送技術においては、通信距離が短くなると消費電力は小さくなる。しかし、無線マルチホップネットワークにおいては、1 ホップの通信距離を短くすると目的ノードまでのホップ数が増加するため、消費電力が増大する可能性がある。また、高いデータレートでデータ伝送を行うことにより、データフレームを送出するために必要な時間が短縮されるため、1 ホップのデータ伝送のために必要な消費電力は削減されるが、一般的に高いデータレートをを用いることで通信可能距離が短くなるため、低いデータレートでのデータ伝送よりも送信端末から受信端末までのホップ数が増加し、消費電力が増大する可能性がある。さらに、消費電力を低減するために送信電力を小さくすると、ビットエラー率が高くなるため、データフレームを正しく受信できない確率が高まる。フレームロスが発生すると送信端末からデータフレームの再送が必要となるため、送信回数が増えることによって消費電力が増大する。

一方、より高いデータレートで用いられる変調方式は 1 シンボルにより多くのビット情報が含まれるため、単位時間あたりに伝送可能なビット数が多い。しかし、シンボルあたりのビット数が多くなるとシンボルが密接するため、ノイズやひずみなどによるエラーが起こりやすくなる。以上のように、無線マルチホップネットワークにおける消費電力解析を行うためには、複雑に関係する要素を考慮する必要がある。

IEEE 802.11 無線 LAN で用いられる MAC プロトコルである CSMA/CA 方式では、バックオフアルゴリズムを採用しており、データフレームの伝送の前にランダムな待ち時間が発生する。また、フレーム損失が起こった場合、バックオフによる待ち時間は大きくなる。さらに、衝突を回避する方法として RTS/CTS コマンドが用いられることがある。これらの CSMA/CA 方式における複雑な挙動も、IEEE 802.11 無線 LAN 規格に基づく無線マルチホップネットワークにおける消費電力に大きな影響を与える。

そこで本稿では、IEEE 802.11 マルチホップネットワークを用いたデータ伝送時の消費電力解析を行う。特に、MAC プロトコルである CSMA/CA 方式の詳細な挙動や、変調方式によるシンボルエラー率の違い、IEEE 802.11 無線 LAN 規格

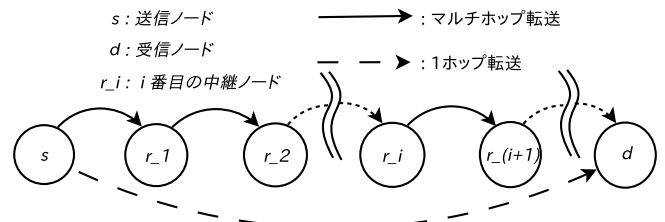


図 1 無線マルチホップリレーによるデータ伝送の様子

が持つ複数のデータレートの違いを考慮する。また、実在する無線 LAN のネットワークインターフェースの仕様に基づく解析結果の数値例を示すことによって、無線マルチホップネットワークにおいて変調方式やデータレートの違いが消費電力に与える影響を明らかにし、高いデータレートが利用できる場合においても、意図的に低データレートでのデータ伝送を行うことにより、消費電力を削減できる場合があることを示す。

以下、2. 章では、IEEE 802.11 マルチホップネットワークにおけるデータ伝送時の消費電力の数学的解析手法について述べる。3. 章では、2. 章の解析結果の数値例を示し、IEEE 802.11 マルチホップネットワークにおける様々な要素が消費電力に与える影響について考察する。最後に 4. 章において、本稿のまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 無線マルチホップネットワークにおけるデータ伝送の消費電力解析

本章では、無線マルチホップネットワークにおいてデータを伝送する際の消費電力解析を行う。本稿における無線マルチホップネットワークは、IEEE 802.11 無線 LAN 規格に基づくものであり、RTS/CTS コマンドを利用した CSMA/CA 方式によってデータフレームの伝送を行う。IEEE 802.11 無線 LAN 規格では用いることができるデータレートが複数あり、データレートによって送信電力や最大送信距離、変調方式などに違いがある。そのため、IEEE 802.11 無線 LAN 規格に基づく無線マルチホップネットワークにおいてデータ伝送を行う際には、1 ホップの距離が性能に大きな影響を与える。本稿では、その性質に着目するために、図 1 に示すような送信端末  $s$  と受信端末  $d$  の間が  $L$  [m] 離れており、その間をマルチホップリレーによってデータ伝送を行う状況を想定する。ここで、送信端末  $s$  以外にデータを送信するノードはいないものとし、干渉は発生しないと仮定する。また、送受信端末間の直線上には中継端末が無限に存在し、任意の場所に存在するノードを中継ノードとして選択することができるものとする。以降、2.1 節で CSMA/CA 方式に基づく 1 ホップのデータ伝送について述べる。その後、2.2 節において 1 ホップのデータ伝送における消費電力を、2.3 節においてマルチホップでのデータ伝送における消費電力についての解析結果をそれぞれ示す。

### 2.1 CSMA/CA 方式に基づく 1 ホップのデータ伝送

まず最初に、1 ホップのデータ伝送に着目し、CSMA/CA 方式の挙動を考慮した、データ伝送にかかる消費電力を算出する。データサイズ  $S_{DATA}$  [bytes] のデータを送信端末から受信端末まで伝送するとし、データフレームサイズを  $S_f$  [bytes]

であるとする、送信されるデータフレーム数  $n_f$  は以下の式で表される。

$$n_f = \left\lceil \frac{S_{DATA}}{S_f} \right\rceil \quad (1)$$

また、各データレートにおいて用いられる変調方式が  $l$  [bits] を符号化して 1 つのシンボルとしているとすると、1 つのデータフレームにおけるシンボル数  $n_s$  は以下となる。

$$n_s = \left\lceil \frac{8S_f}{l} \right\rceil \quad (2)$$

$l$  の値は変調方式によって異なり、例えば Binary Phase Shift Keying (BPSK) では 1 [bit], Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) では 2 [bits] である。

IEEE 802.11 MAC に基づいた RTS/CTS コマンドを用いる CSMA/CA 方式でのデータ送信における、ノード  $r_i$  とノード  $r_{i+1}$  との間のデータフレームの送受信の様子を図に示す。図 2(a) はデータフレーム損失が発生しない場合であり、図 2(b) はデータフレームの損失が発生する場合を示している。図 2(a) において、ノード  $r_i$  でデータフレームの伝送要求が発生すると、DIFS およびバックオフ時間 ( $BO_1$ ) を待った後に、RTS コマンドをノード  $r_{i+1}$  に送信する。ノード  $r_{i+1}$  はそれを受信すると、SIFS 時間だけ待機した後、CTS コマンドを送信する。CTS コマンドを受信したノード  $r_i$  は、SIFS 時間だけ待機し、データフレームの送信を開始する。データフレームを受信し終えたノード  $r_{i+1}$  は、SIFS 時間だけ待ってから ACK フレームをノード  $r_i$  に返す。ACK フレームをノード  $r_i$  が受け取った時点で送信が完了する。

図 2(b) においては、ノード  $r_i$  においてデータフレームの伝送要求が発生すると、DIFS およびバックオフ時間 ( $BO_1$ ) を待った後に、RTS コマンドをノード  $r_{i+1}$  に送信する。ノード  $r_{i+1}$  はそれを受信すると、SIFS 時間だけ待機した後、CTS コマンドを送信する。CTS コマンドを受信したノード  $r_i$  は、SIFS 時間だけ待機し、データフレームの送信を開始するが、その途中でデータフレームが損失すると、ノード  $r_{i+1}$  はデータフレームを受信できないため、ACK フレームを  $r_i$  に送信しない。ノード  $r_i$  は再送タイムアウト時間だけ待っても ACK フレームを受信できなければデータフレームが損失したと判断し、DIFS およびバックオフ時間 ( $BO_2$ ) を待った後、再び RTS コマンドをノード  $r_{i+1}$  に送信し、データフレームの再送を行う。以降フレームが損失しなくなるまで同じ挙動を繰り返す。図 2(b) 中の  $BO_j$  は、同一データフレームの  $j$  回目の送信、つまり、 $(j-1)$  回連続でデータフレームの損失が起こった後のデータフレーム再送の前に必要なバックオフ時間を表している。

## 2.2 1 ホップのデータ伝送における消費電力量

上述した挙動をもとに、1 つのデータフレームを 1 ホップ送信する際に必要な消費電力量を算出する。図 2(a)、図 2(b) において、データフレームの送信要求が発生してから CTS フレームを受信するまでの期間をオーバーヘッド区間 (overhead phase)、および CTS フレームを受信してからデータフレームに対する ACK フレームを受信するまで、またはタイムアウトが発生するまでの期間をデータフレーム送信区間 (dataframe transmission phase) とする。以降の解析では簡単のため、RTS、

CTS、ACK フレームは伝送時に損失しないものとする。また、IEEE 802.11 無線 LAN 規格のデータフレームにおいては、フレームチェックシーケンス (FCS) が採用されており、受信した FCS 値と、受信側で計算した FCS 値が異なった時、ビットエラーが起こったと判断し、そのデータフレームを廃棄する。この際、エラービットの回復処理は行われない。したがって、1 ビットでもビットエラーが起こればデータフレームが損失したとみなされる。つまり、1 つのフレームを送信した際にそれが損失する確率 (フレーム損失確率) は、全てのシンボルが損失せず送信成功する事象の余事象確率に相当する。1 つのシンボルの損失確率を  $p_s$  とすると、データフレームの損失確率  $p_f$  は、

$$p_f = 1 - (1 - p_s)^{n_s} \quad (3)$$

と表すことができる。1 つのデータフレームの送信が  $x$  回目で成功する確率を  $q_x$  とすると  $q_x$  は、

$$q_x = p_f^{x-1}(1 - p_f) \quad (4)$$

と表せる。ノード  $r_i$  において 1 つのデータフレームをノード  $r_{i+1}$  に送信完了するまでの平均データフレーム送信回数を  $e$  とすると、 $e$  は以下ようになる。

$$\begin{aligned} e &= \lim_{x \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^x i p_f^{i-1} (1 - p_f) \\ &= \frac{1}{1 - p_f} \end{aligned} \quad (5)$$

次に、バックオフ時間について考察する。IEEE 802.11 無線 LAN 規格におけるバックオフ時間は、チャネルの空きを待っていた複数の端末が同時に送信を開始することを防ぐために、データフレームの送信前にランダムに設定される待ち時間のことであり、その長さは  $[0, CW]$  の範囲から一様に選ばれる乱数とスロット時間と呼ばれる固定時間  $T_{slot}$  との積である。 $CW$  は可変の値であり、再送回数に応じて変化する。具体的には、 $j$  回目の送信の際のバックオフ時間における  $CW$  の値を  $CW_j$  とすると、

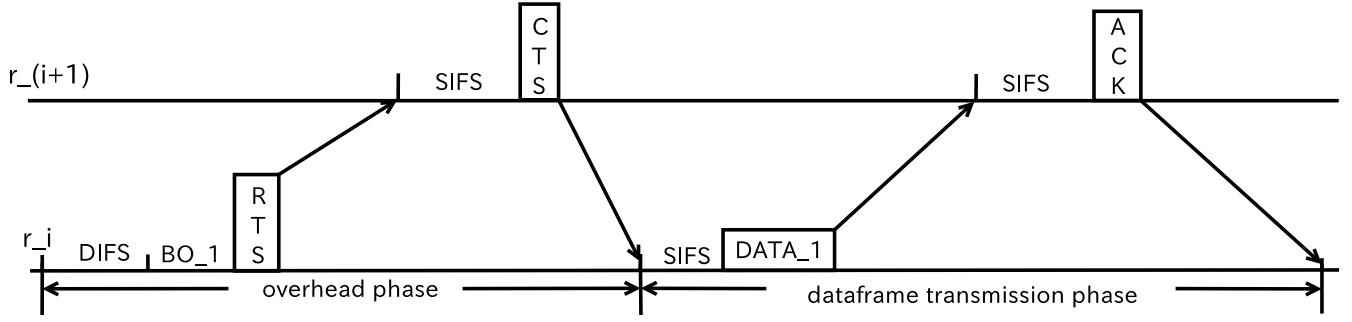
$$CW_j = \min(2^{j-1}CW_{min}, CW_{max}) \quad (1 \leq j) \quad (6)$$

となる。 $j$  回目のデータフレーム送信におけるバックオフ時間は  $[0, CW_j]$  の範囲からランダムに選択された数値が用いられるため、バックオフ時間の平均値は  $CW_j \cdot T_{slot}/2$  となる。なお、以降の解析では、簡単のため、 $CW_{max}$  は以下を満たすものとする。ただし、 $m$  は正の整数である。

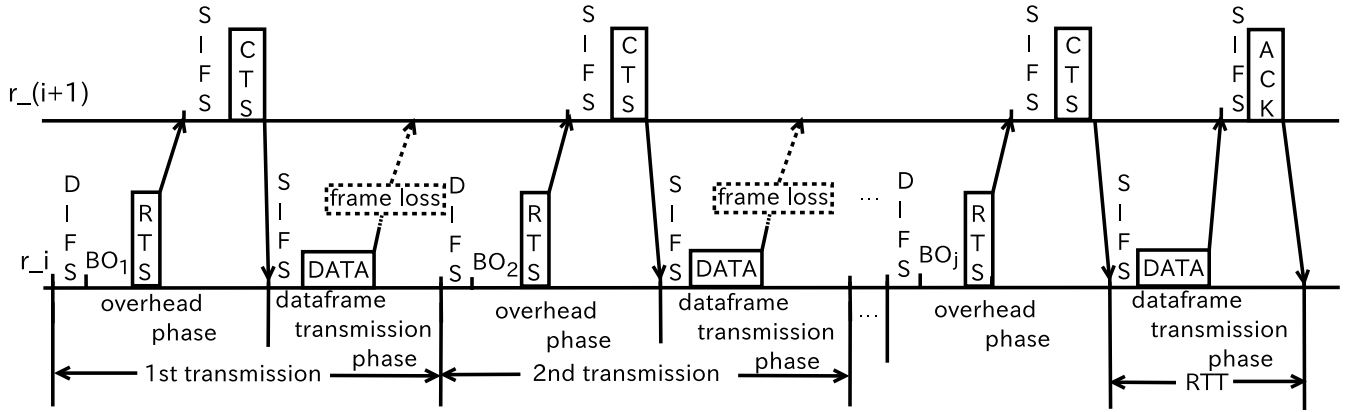
$$CW_{max} = 2^m CW_{min} \quad (7)$$

(4)、(6)、(7) 式を用いて、1 つのデータフレームの送信が成功するまでに必要なバックオフ時間の合計の平均値  $T_{BO}$  を以下のように求めることができる。

$$\begin{aligned} T_{BO} &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left( \sum_{j=1}^m \left\{ 2^{j-1} \frac{CW_{min} T_{slot}}{2} \cdot p_f^{j-1} (1 - p_f) \right\} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{j=m+1}^x \left\{ 2^m \frac{CW_{min} T_{slot}}{2} \cdot p_f^{j-1} (1 - p_f) \right\} \right) \quad (8) \end{aligned}$$



(a) フレーム損失のない場合



(b) フレーム損失のある場合

図 2 データフレームの送受信の様子

ここで、(8) 式のカッコ内の第 1 項を  $Q_1$ 、第 2 項を  $Q_2$  とする、

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \{(2p_f)^{j-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p_f)\} \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \{(2p_f)^{j-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p_f)\} \\
 &= \frac{CW_{\min} T_{slot} (1-p_f)}{2} \sum_{j=1}^m (2p_f)^{j-1} \\
 &= \begin{cases} \frac{CW_{\min} T_{slot} (1-p_f)}{2} \cdot \frac{(2p_f)^m - 1}{2p_f - 1} & (\frac{1}{2} < p_f < 1) \\ \frac{m CW_{\min} T_{slot} (1-p_f)}{4} & (p_f = \frac{1}{2}) \\ \frac{CW_{\min} T_{slot} (1-p_f)}{2} \cdot \frac{1 - (2p_f)^m}{1 - 2p_f} & (0 < p_f < \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p_f) \sum_{j=m+1}^x p_f^{j-1} \\
 &= 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p_f) \left( \sum_{j=1}^x p_f^{j-1} - \sum_{j=1}^m p_f^{j-1} \right) \\
 &= 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p_f) \left( \frac{1-p_f^x}{1-p_f} - \frac{1-p_f^m}{1-p_f} \right) \\
 &= 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} (p_f^m - p_f^x) \\
 &\rightarrow 2^{m-1} p_f^m CW_{\min} T_{slot} \quad (x \rightarrow \infty) \quad (10)
 \end{aligned}$$

となる。したがって、(8)、(9)、(10) 式より、

$$T_{BO} = Q_1 + 2^{m-1} p_f^m CW_{\min} T_{slot} \quad (11)$$

となる。

ノード  $i$  からノード  $i+1$  への送信で消費される電力は、オーバーヘッド区間およびデータフレーム送信区間において、必要な電力とその区間の長さをかけることで得られる。ここで、IEEE 802.11 無線 LAN 規格で用いることのできるデータレートが  $K$  種類あるものとし、それぞれのデータレートにおけるビット送出レートを  $d^{(k)}$  ( $1 \leq k \leq K$ ) と表す。(5)、(11) 式を用いて、データレート  $d^{(k)}$  で 1 つのデータフレームを送信する際の消費電力量  $E_t^{(k)}$  は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 E_t^{(k)} &= \frac{1}{1-p_f} \left\{ P_s (T_{DIFS} + T_{SIFS}) \right. \\
 &\quad \left. + P_t \cdot \frac{S_{RTS}}{d^{(k)}} + P_r \cdot \frac{S_{CTS}}{d^{(k)}} \right\} \\
 &\quad + \left( P_s \cdot 2T_{SIFS} + P_t \cdot \frac{S_{DATA}}{d^{(k)}} + P_r \cdot \frac{S_{ACK}}{d^{(k)}} \right) \\
 &\quad + \left( \frac{1}{1-p_f} - 1 \right) \left\{ P_s \left( T_{RTO} - \frac{S_{DATA}}{d^{(k)}} \right) \right. \\
 &\quad \left. + P_t \cdot \frac{S_{DATA}}{d^{(k)}} \right\} + P_s T_{BO} \\
 &= \frac{P_s}{1-p_f} \left\{ T_{DIFS} + (1-p_f) T_{BO} \right. \\
 &\quad \left. + (3-2p_f) T_{SIFS} + p_f \left( T_{RTO} - \frac{S_{DATA}}{d^{(k)}} \right) \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{P_t}{d^{(k)}(1-p_f)}(S_{RTS} + S_{DATA}) \\
& + \frac{P_r}{d^{(k)}} \left( \frac{S_{CTS}}{1-p_f} + S_{ACK} \right) \quad (12)
\end{aligned}$$

ここで、 $P_t$ 、 $P_r$  はそれぞれフレームを送信、受信するのに必要な電力であり、 $P_s$  は送受信を行っていない待機中に消費する電力である。 $T_{SIFS}$ 、 $T_{DIFS}$  はそれぞれ SIFS 時間、DIFS 時間、 $T_{RTO}$  は再送タイムアウト時間、 $S_{RTS}$ 、 $S_{CTS}$ 、 $S_{ACK}$  はそれぞれ RTS、CTS、ACK フレームのフレームサイズである。

### 2.3 マルチホップでのデータ伝送における消費電力量

次に、マルチホップリレーによる送受信端末間のデータ伝送にかかる電力量を算出する。データレート  $d^{(k)}$  でデータフレームを伝送したときに使われる送信電力および 1 ホップの通信距離をそれぞれ  $P_t^{(k)}$  [W]、 $r^{(k)}$  [m] とする。これらは  $0 \leq P_t^{(k)} \leq \hat{P}_t^{(k)}$ 、 $0 \leq r^{(k)} \leq \hat{r}^{(k)}$  を満たし、 $\hat{P}_t^{(k)}$ 、 $\hat{r}^{(k)}$  はそれぞれデータレート  $d^{(k)}$  で伝送を行った場合における最大送信電力と最大通信距離を表す。ここで、最大電力よりも小さい電力でデータ伝送を行ったときの通信電力と通信距離との関係が以下のように決定されるとする。

$$P_t^{(k)} = \hat{P}_t^{(k)} \cdot \left( \frac{r^{(k)}}{\hat{r}^{(k)}} \right)^\alpha \quad (13)$$

これを  $r^{(k)}$  について変形すると、

$$r^{(k)} = \hat{r}^{(k)} \cdot \left( \frac{P_t^{(k)}}{\hat{P}_t^{(k)}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (14)$$

となる。これは 1 ホップの通信距離が送信電力の比の  $1/\alpha$  乗に比例することを意味する。

送受信端末間の距離が  $L$  [m] であるとき、ホップ数  $h$  は、

$$h = \left\lceil \frac{L}{r^{(k)}} \right\rceil \quad (15)$$

(12)、(14)、(15) 式を用いてと表せる。 $n_f$  個のフレームをマルチホップで伝送した場合の消費電力量  $E_t^{(k)}(n_f, L)$  を求めると、以下ようになる。

$$E_t^{(k)}(n_f, L) = n_f \cdot E_t^{(k)} \times \left\lceil \frac{L}{r^{(k)}} \right\rceil \quad (16)$$

## 3. 数値解析

### 3.1 パラメータ設定

送受信端末間の距離  $L$  を 1000 [m] とする。式 (11) に示したバックオフ時間の決定のためのパラメータとして、 $m = 10$ 、 $CW_{min} = 15$  とする。IEEE 802.11 無線 LAN 規格における各種フレームのサイズ、および総データサイズを表 2(a) に示すように設定した。DIFS、SIFS 時間および RTO、スロット時間については表 2(b) に示す。再送タイムアウト時間  $T_{RTT}$  は、FreeBSD の実装 [6] にならって 5RTT とした。各データレートにおける最大通信可能距離及び最大送信電力は、Cisco Aironet IEEE 802.11a/b/g 無線 CardBus アダプタ [3] におけるデータを用いており、表 2 にその値をまとめている。

### 3.2 解析結果

図 3 は、送信電力を 20 [mW] として各データレートをを用い

表 1 パラメータ設定

項目	サイズ	項目	長さ
$S_{ACK}$	40 bytes	$T_{DIFS}$	34 $\mu$ s
$S_{RTS}$	40 bytes	$T_{SIFS}$	16 $\mu$ s
$S_{CTS}$	40 bytes	$T_{slot}$	9 $\mu$ s
$S_{DATA}$	100 Kbytes	$T_{RTO}$	5 RTT
$S_f$	1000 bytes		

(a) データおよび各フレームサイズのパラメータ

(b) 各時間のパラメータ

表 2 IEEE 802.11g 屋外での無線 LAN ネットワークインターフェース [3] における最大通信距離と最大送信電力

データレート [Mbps]	1	6	11	18	54
最大通信可能距離 [m]	610	396	304	183	76
最大送信電力 [mW]	100	100	100	50	20

てデータ伝送を行った場合における、フレーム損失率と総消費電力量の関係を示している。図から、より高いデータレートをを用いてデータ伝送を行うことにより、消費電力量を抑えることができることがわかる。これは、データ伝送により高いデータレートをを用いることで、データ伝送にかかる時間を短縮できるためである。

図 4 は、ある 2 つのデータレートに着目し、消費電力量が等しくなる時の、それぞれのデータレートにおけるシンボルエラー率の関係を示している。図 4 において、各グラフの左側 (上側) の領域においては 11 Mbps でのデータ伝送が有利であり、右側 (下側) の領域においては 6 Mbps でのデータ伝送が有利であることを意味する。例えば、11 Mbps、40 mW でのデータ伝送時に、シンボルエラー率が約 0.00075 以上である場合には、6 Mbps、20 mW でのデータ伝送を行った時のシンボルエラー率が 0.000001 以下であれば、6 Mbps のデータレートをを用いることによって、消費電力量を削減することができる。11 Mbps、20 mW の場合と 11 Mbps、40 mW の場合の結果の比較から、高いデータレートをを用いる際に送信電力を増大させてビットエラー率を低減させようとする、消費電力量が増大するため、低いビットレートをを用いる方が消費電力量を低減できる領域が拡大することがわかる。

次に、変調方式の違いがシンボルエラー率に与える影響を考慮した消費電力量の評価結果を示す。例えば、QPSK を用いて、BPSK を用いたときと同じシンボルエラー率を実現するためには、約 2 倍の送信電力でデータ伝送を行う必要があることが知られている [12]。ここでは、この性質を考慮してシンボルエラー率及びフレーム損失率の観点から、(16) 式によって得られる消費電力量について考察する。図 5 は QPSK と BPSK の送信電力とシンボルエラー率の関係の違いを考慮した、シンボルエラー率と総消費電力量の関係を示している。ここでは、変調方式に BPSK を用いる 6 Mbps のデータレートにおける送信電力 20 mW でのデータ伝送と、QPSK を用いた 11 Mbps のデータレートにおいて、送信電力を 2 倍の 40 mW としたデータ伝送における総消費電力量を比較している。図から、シ

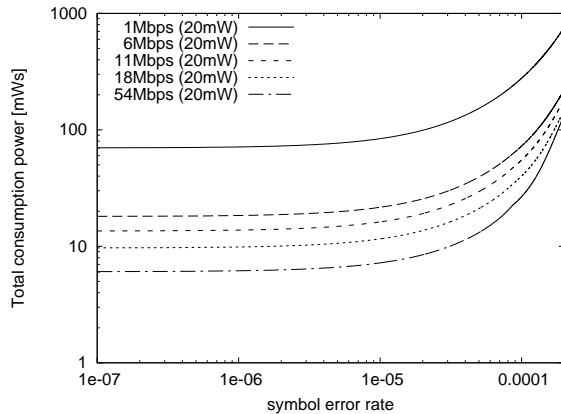


図 3 各データレートにおける 20 mW でのデータ伝送時のフレーム損失率と消費電力量の関係

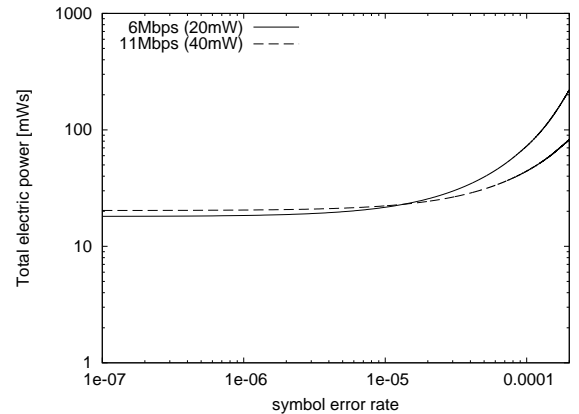


図 5 11Mbps (QPSK) vs 6Mbps (BPSK)

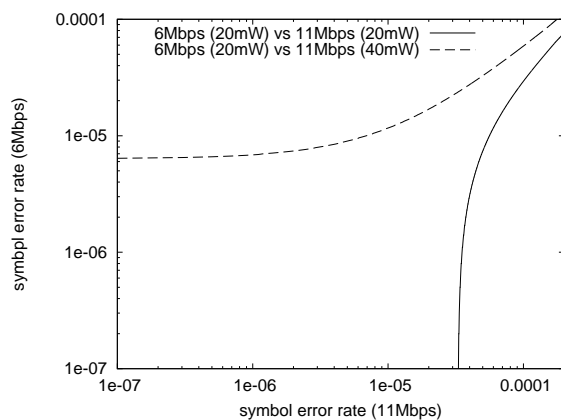


図 4 11 Mbps と 6 Mbps でのデータ伝送において消費電力量が等しくなる時のシンボルエラー率の変化

ンボルエラー率が約 0.00001 の付近でグラフが交差しているため、シンボルエラー率がこの値よりも低い状況にある時は、低ビットレートでのデータ伝送の方が消費電力量が低いということが分かる。これは、高いデータレートでデータ伝送を行い、データ伝送にかかる時間を短縮することによって削減された消費電力量に対して、シンボルエラー率を低減するために送信電力を大きくすることで増大した消費電力量が上回ったために、総消費電力量が逆転していると考えられる。この結果から、高いデータレートが利用できる環境においても、意図的に低いデータレートを利用することによって消費電力量を低減できる可能性が明らかとなった。

#### 4. まとめと今後の課題

本稿においては、IEEE 802.11 マルチホップネットワークにおけるデータ伝送時の消費電力量解析を行い、データレートの選択が消費電力量に与える影響を考察した。解析の結果、ビットエラー率が低い環境では低いデータレートをを用いたデータ伝送を行うことにより、消費電力量を約 5–10% の削減できることがわかった。本稿における解析では二種類の変調方式のみを考慮しているため、他の変調方式に関する解析を今後行う予定である。また、ACK フレームや RTS/CTS フレームの損失、データフレームの衝突なども考慮した解析を行っていきたいと

考えている。

謝辞 本研究の一部は総務省地球温暖化対策 ICT イノベーション推進事業 (PREDICT)、および独立行政法人情報通信研究機構委託研究によっている。ここに記して、謝意を示す。

#### 文 献

- [1] Yuvraj Agarwal. Dynamic power management using on demand paging for networked embedded systems, July 2005.
- [2] V. Baiamonte and C.-F. Chiasserini. Saving energy during channel contention in 802.11 WLANs. *Mob. Netw. Appl.*, 11:287–296, April 2006.
- [3] Cisco Aironet 802.11a/b/g wireless CardBus adapter. available at [http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/wireless/adapter/prodlit/cecbds\\_ds.html](http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/wireless/adapter/prodlit/cecbds_ds.html).
- [4] Atheros Communications. Power Consumption and Energy Efficiency Comparisons of WLAN Products. Technical report, Atheros, May 2003.
- [5] Mustafa Ergen and Pravin Varaiya. Decomposition of Energy Consumption in IEEE 802.11. In *Proceedings of ICC 2007*, pages 403–408, June 2007.
- [6] Gary R. Wright and W. Richard Stevens. 詳解 TCP/IP Vol.2 実装. Pearson Education Japan, 2002.
- [7] George Kuriakose, Sri Harsha, Anurag Kumar, and Vinod Sharma. Analytical models for capacity estimation of IEEE 802.11 WLANs using DCF for internet applications. *Wirel. Netw.*, 15:259–277, Feb 2009.
- [8] Mathieu Lacage, Mohammad Hossein Manshaei, and Thierry Turletti. IEEE 802.11 rate adaptation: A practical approach. In *Proceedings of MSWiM 2004*, pages 126–134, Oct 2004.
- [9] Vijay Raghunathan, Trevor Pering, Roy Want, Alex Nguyen, and Peter Jensen. Experience with a low power wireless mobile computing platform. In *Proceedings of ISLPED 2004*, pages 363–368, Aug. 2004.
- [10] Starsky H. Y. Wong, Hao Yang, Songwu Lu, and Vaduvur Bharghavan. Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks. In *Proceedings of MobiCom 2006*, pages 146–157, Sept. 2006.
- [11] 村田正幸 橋本匡史, 長谷川剛. 無線 LAN 環境における TCP の動作を考慮した消費電力モデルの提案. 電子情報通信学会技術研究報告, 110(339):1–6, December 2010.
- [12] 石井 聡. 無線通信とデジタル変調技術. CQ 出版社, 2005.