

特別研究報告

題目

IEEE 802.11 マルチホップネットワークにおける省電力手法が
ネットワーク性能に与える影響

指導教員

中野 博隆 教授

報告者

通阪 航

平成 23 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

IEEE 802.11 マルチホップネットワークにおける省電力手法が
ネットワーク性能に与える影響

通 阪 航

内容梗概

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きている．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，これらの端末の多くはバッテリー駆動であるため，消費電力を考慮したネットワーク制御が求められ，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が重要である．また，従来のアクセスポイント型の 1 ホップの無線ネットワークだけでなく，複数の無線基地局をマルチホップに接続することでネットワークを拡張可能な，無線マルチホップネットワークが近年注目を集めている．本稿では，その中でも，既存のデバイスによって容易に構築が可能な，IEEE 802.11 無線 LAN 規格 [1] に基づくマルチホップネットワークに着目した．

IEEE 802.11 は複数のデータレートを持っており，それぞれについて，符号化方法，消費電力，通信可能距離なども異なる．また，IEEE 802.11 に存在する複数の規格は異なる特性を持つ．さらに，同じ規格であっても，ハードウェア構成が異なると，消費電力や通信可能距離は大きく異なる．そのため，IEEE 802.11 無線 LAN における消費電力に関する議論を行う際には，実ハードウェアの仕様を考慮する必要がある．一方，無線技術の一般的な特性として，送信電力，通信可能距離及び，ビットエラー率などは複雑に関連している．すなわち，IEEE 802.11 無線 LAN を用いた無線マルチホップネットワークにおいては，消費電力を決定する要素が多く存在し，かつ，それらの要素が複雑な関係を持つ．そのため，消費電力を抑えたデータ転送を行うためには，これらの要素の関係を明らかにし，データ伝送時の消費電力を解析的に評価する必要がある．

そこで本報告においては，まず IEEE 802.11 無線 LAN 技術に基づく無線マルチホップネットワークにおけるデータ伝送を対象とし，その消費電力量解析を行った．具体的には，IEEE 802.11 で用いられる MAC プロトコルである CSMA/CA の詳細な挙動に基づき，1 ホップのデータ伝送における消費電力量を導出した．その後，送受信端末間でマルチホップによってデータを伝送した際の総電力量を明らかにした．さらに，実在する IEEE 802.11 無

線 LAN のネットワークインターフェースデバイスの消費電力データを利用し，解析結果を用いた消費電力量の評価を行った．

評価の結果，ネットワークにおけるフレーム損失率が等しい場合には，より高いデータレートをすることで，より小さい消費電力量が得られるが，低いデータレートをを使うほうが消費電力量を抑えることが出来る場合があることを明らかにした．

主な用語

IEEE 802.11 ，無線マルチホップネットワーク，CSMA/CA ，消費電力，ネットワークインターフェースデバイス，バックオフアルゴリズム

目次

1	はじめに	6
2	関連研究	8
2.1	Auto Rate Fallback (ARF)	8
2.2	Receiver-Based Auto-Rate (RBAR)	8
3	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量解析	10
3.1	CSMA/CA に基づく 1 ホップのデータ伝送	10
3.2	1 ホップ伝送における消費電力量	11
3.3	マルチホップ伝送における消費電力量	15
4	数値解析	17
4.1	パラメータ設定	17
4.2	数値解析結果	18
5	まとめと今後の課題	26
	謝辞	27
	参考文献	28

目 次

1	無線マルチホップリレーによるデータ伝送の様子	12
2	データフレームの送受信の様子	12
3	フレーム損失率と消費電力量の関係	20
4	IEEE 802.11g 屋外における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる 時のフレーム損失率の変化	21
5	IEEE 802.11g 屋外における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる 時のフレーム損失率の変化 (2)	22
6	IEEE 802.11g 屋内の場合におけるフレーム損失率と消費電力の関係	23
7	IEEE 802.11g 屋内における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる 時のフレーム損失率の変化	24
8	IEEE 802.11g 屋内における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる 時のフレーム損失率の変化 (2)	25

表 目 次

1	パラメータ設定	17
2	IEEE 802.11 の無線 LAN ネットワークインターフェース [2] における最大 通信距離と最大送信電力	18

1 はじめに

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きている。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となっていることが多いため、消費電力を考慮したネットワーク制御が求められる。また、IEEE 802.11 無線 LAN においては、無線通信が消費する電力が全体の 10% から 50% を占めることが報告されており [3-5]、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。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が重要である。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。本研究ではこの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 技術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 は複数のデータレートを持っており、それぞれ符号化方法、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、これらのデータレートを可変的に選択するレート変換アルゴリズムに関するものがあり、中でも最初に発表された ARF [6, 7] や、RBAR [6]、AARF [6, 7] などが知られている。しかし、この ARF 及び RBAR は IEEE 802.11 の DSSS 標準においてアプリケーションのスループットを最大化するようにのみ設計されており、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。

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量は小さくなるが、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、消費電力量は増大する可能性がある。また、高いデータレートをを用いると、データフレームを送出するのにかかる時間が短縮され、そのために必要な消費電力量は削減されるが、一般的に高いデータレートをを用いると通信可能距離が短いため、低いデータレートでのフレーム伝送よりもホップ数が増加し、消費電力量も増加する。さらには、消費電力量を低減するために送信電力を小さくすると、受信時のビットエラー率が高くなり、フレームを受信できない確率が高まる。その場合、送信端末からデータフレームの再送が必要となるため、消費電力量が増大する。したがって、無線マルチホップネットワークにおける消費電力量解析を行うためには、これら複雑に関係する要素を考慮する必要がある。

一方、IEEE 802.11 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．これあらの複雑な CSMA/CA の挙動も，IEEE 802.11 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量に大きな影響を与える．

そこで本稿では，IEEE 802.11 無線 LAN 技術に基づく無線マルチホップネットワークの消費電力量解析を行う．特に，MAC プロトコルである CSMA/CA の詳細な挙動や，IEEE 802.11 の持つ複数のデータレートによる電力消費量の違いを考慮した解析を行う．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データレートの選択が消費電力量に与える影響を明らかにする．

以下 2 章では関連研究について述べる．3 章においては，IEEE 802.11 無線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の数学的解析手法について述べる．4 章では，3 章の解析結果の数値例を示し，IEEE 802.11 におけるデータレート選択が消費電力量に与える影響について考察する．最後に，本稿のまとめと，今後の課題について述べる．

2 関連研究

スループット向上や消費電力量の低減などの観点から，IEEE 802.11 が持つ複数のデータレートを選択的に利用することによってスループットの向上や消費電力量の低減を図る，Rate Adaptation 手法が多数提案されている．本章では，その中でも初期の提案である Auto Rate Fallback (ARF) [6, 7] と，Receiver-Based Auto-Rate (RBAR) [6] について述べる．

2.1 Auto Rate Fallback (ARF)

ARF は，初期に提案された Rate Adaptation アルゴリズムであり，IEEE 802.11 の DSSS 標準においてアプリケーションのスループットを最大化するように設計されたものである．ARF において各送信ノードは，ある一定回数のフレーム送信に成功したら，次のフレーム送信機会からはより高いデータレートをを用いて送信を行う．一方，2 回連続で送信に失敗すると，次回以降に用いるデータレートを下げ，それと同時にタイマを起動する．このタイマが終了する，あるいは一定回数の送信に成功すると，次の送信機会からデータレートを再び高くし，タイマをリセットする．また，データレートを上げた直後のフレーム送信が失敗した場合には直ちにデータレートを元に戻す．

本手法は，無線ネットワークのチャネル環境の時間的変動が小さい場合には高い効果を発揮するが，チャネル環境が短時間で頻繁に変動する環境においては，データレートの変更アルゴリズムが有効に機能しないことが知られている．

2.2 Receiver-Based Auto-Rate (RBAR)

RBAR も，アプリケーションのスループットを最大化するよう設計されたアルゴリズムであるが，MAC プロトコルのコントロールフレームにおいて，新しいヘッダ領域を持つ必要がある．そのため，IEEE 802.11 のネットワークとは両立することは難しく，実用化されることはほとんどない．しかしパフォーマンスに関して言及する際には興味深いものである．この RBAR は RTS/CTS を用いたメカニズムであり，RTS フレームを受信したら，そのチャネル環境における SNR 値をもとに次のデータフレームのデータレートを計算して，その情報を CTS フレームの中に入れて送信する．そのため，その時のチャネルの状況において最適なデータレートを選択することができる．

しかし，最適なデータレートを計算するために使う SNR 値を，そのチャネル環境やノード配置などの状況に基づいて先に計算をする必要がある．また，隠れノードがある状況においてはチャネルの状況を把握しづらく，最適なデータレートを計算することが出来なくなる，といった問題が指摘されている．

これらの手法はともにスループットを最大化するものとして設計されており，消費電力量においては考慮されておらず，マルチホップネットワークについても考慮されていない．また，消費電力量について解析を行っているものには [8-11] などがあるが，これらもマルチホップネットワーク環境を考慮していない．

3 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量解析

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送信する際の消費電力量解析を行う．ここでいう無線マルチホップネットワークとは，IEEE 802.11 に基づくものであり，RTS/CTS コマンドを利用した CSMA/CA 方式でノード間のデータ転送を行う．IEEE 802.11 では使え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到達距離に違いがある．そのため，IEEE 802.11 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転送を行う際には，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転送を行うものとする．まず 3.1 節で CSMA/CA に基づく 1 ホップのデータ伝送について述べ，その後 3.2 節において 1 ホップの伝送における消費電力量について，3.3 節でマルチホップ伝送における消費電力量について解析する．

3.1 CSMA/CA に基づく 1 ホップのデータ伝送

まず最初に，1 ホップの伝送に着目し，CSMA/CA の挙動を考慮した，1 ホップのデータ伝送にかかる消費電力量を算出する．データサイズ S_{DATA} [bytes] のデータを送信するとし，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 は以下の式で表される．

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

802.11 MAC に基づいた RTS/CTS を用いる CSMA/CA でのデータ伝送における，ノード (r_i) とノード (r_{i+1}) との間のフレームの送受信の様子を図 2(a)，図 2(b) に示す．図 2(a) はデータフレームが損失しない場合であり，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 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 (BO₁) 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) においても，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 (BO₁) 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

ド r_{i+1} はそれを受信すると、SIFS 時間待機した後、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出来ない。つまり ACK フレームを r_i に送信することが出来ない。ノード r_i は再送タイムアウトの時間待って ACK フレームが返って来なければフレームが損失したと判断し、DIFS およびバックオフ時間 (BO₂) 待った後、RTS コマンドをノード r_{i+1} に送信し、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、 $(j - 1)$ 回連続でフレーム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を表している。

3.2 1 ホップ伝送における消費電力量

これらの挙動をもとに、 n 個のフレームを 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), 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、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とする。IEEE 802.11 の CSMA/CA においては、フレーム損失後のフレーム再送の際にもオーバーヘッドが発生する。ここで、RTS, CTS, ACK フレームは伝送時に損失せず、データフレームは伝送時に確率 p で損失するものとする。この時、データフレームの送信時に損失が発生せずに、送信が成功するまでの平均データフレーム送信回数を e とすると、ノード r_i において、 n 個のフレーム送信要求が発生してからオーバーヘッド区間が平均 en 回、損失せずにデータフレームを送信する回数が n 回、損失したデータフレームを再送する回数が平均 $n(e - 1)$ 回となる。ここで、1 つのデータフレームの送信が成功するまでに必要な平均送信回数 e を求める。1 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、 $x - 1$ 回目までは失敗で x 回目に成功するのだから、

$$q_x = p^{x-1}(1 - p) \quad (2)$$

と表せる。よって平均送信回数 e は、以下となる。

$$e = \lim_{x \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^x ip^{i-1}(1 - p) \quad (3)$$

この (3) 式を p 倍して (3) 式から引いて変形すると、

$$e - pe = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^x ip^{i-1}(1 - p) - \sum_{i=1}^x ip^i(1 - p) \right)$$

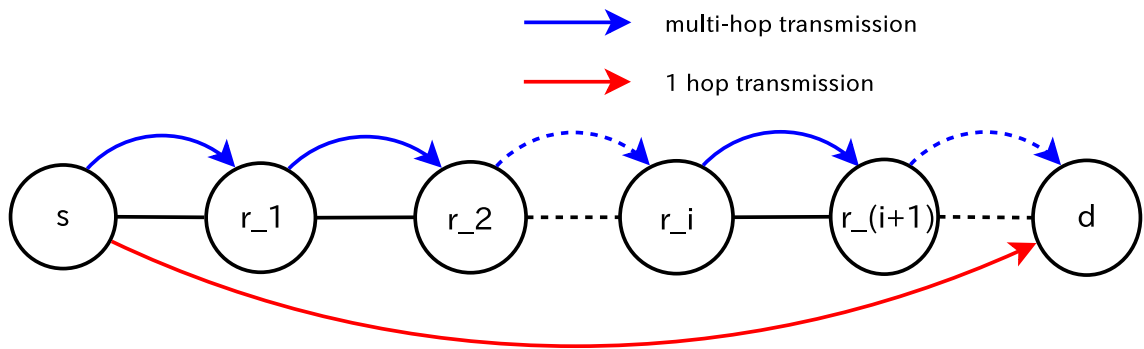
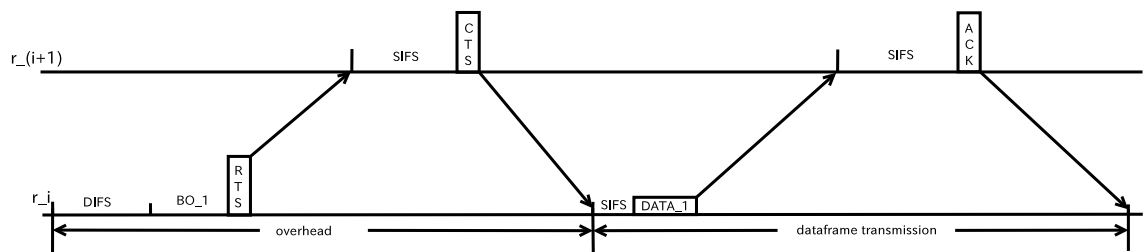
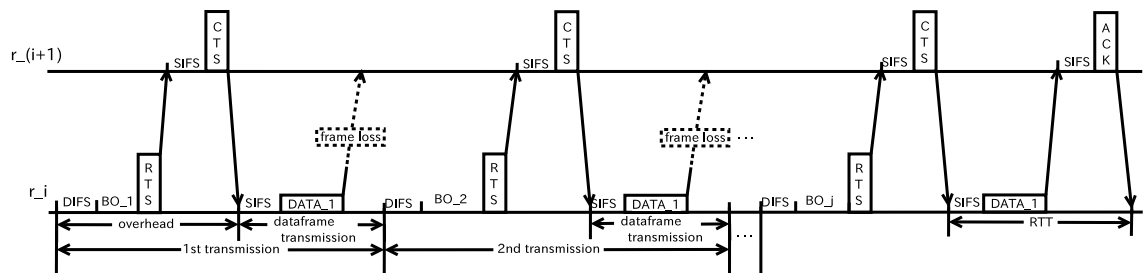


図 1: 無線マルチホップリレーによるデータ伝送の様子



(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

$$\begin{aligned}
(1-p)e &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^x ip^{i-1}(1-p) - \sum_{i=2}^{x+1} (i-1)p^{i-1}(1-p) \right) \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \left\{ \left((1-p) + \sum_{i=2}^x ip^{i-1}(1-p) \right) - \left(\sum_{i=2}^x (i-1)p^{i-1}(1-p) + xp^x(1-p) \right) \right\} \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \left((1-p) + \sum_{i=2}^x p^{i-1}(1-p) - xp^x(1-p) \right) \\
e &= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \sum_{i=2}^x p^{i-1} - xp^x \right) \\
&= \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^x p^{i-1} - xp^x \right) \\
&= \sum_{i=1}^{\infty} p^{i-1} - \lim_{x \rightarrow \infty} xp^x \\
&= \frac{1}{1-p}
\end{aligned} \tag{4}$$

となる．

次に，データフレームを再送する際にその値が変化するバックオフ時間について考察する．バックオフ時間とは，チャンネルの空きを待っていた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， $[0, CW]$ の範囲から一様に選ばれる乱数とスロットタイムと呼ばれる定数の積である． CW は可変の値であり， $CW_{\min} \leq CW \leq CW_{\max}$ の値を取る．また， CW の初期値は CW_{\min} で，フレームの損失が起こるたびに CW を 2 倍していき， CW_{\max} に達するとそれ以降は CW_{\max} となる．すなわち， 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，

$$CW_j = \min \{ 2^{j-1} CW_{\min}, CW_{\max} \} \quad (0 \leq j) \tag{5}$$

となる．また，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， x 回目の送信の際のバックオフ時間の平均値は $CW_j \cdot T_{slot}/2$ となる． T_{slot} とは，スロットタイムであり，バックオフ時間を設定する際に用いる定数値である．(2)，(5) 式を用いて，1 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 T_{BO} は下記のように求められる．なお，ここでは簡単のため，

$$CW_{\max} = 2^m CW_{\min} \tag{6}$$

としている．

$$T_{BO} = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\sum_{j=1}^m \{ 2^{j-2} CW_{\min} T_{slot} \cdot p^{j-1} (1-p) \} \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{j=m+1}^x \left\{ 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} \cdot p^{j-1} (1-p) \right\} \\
= & \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left\{ (2p)^{j-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p) \right\} \right. \\
& + \sum_{j=1}^x \left\{ 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} \cdot p^{j-1} (1-p) \right\} \\
& \left. - \sum_{j=1}^m \left\{ 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} \cdot p^{j-1} (1-p) \right\} \right) \quad (7)
\end{aligned}$$

ここで, (7) 式の \lim 中の第 1 項を Q_1 , 第 2 項と第 3 項を Q_2 とすると,

$$\begin{aligned}
Q_1 &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \left\{ (2p)^{j-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p) \right\} \\
&= \frac{CW_{\min} T_{slot} (1-p)}{2} \sum_{j=1}^m (2p)^{j-1} \\
&= \begin{cases} \frac{CW_{\min} T_{slot} (1-p)}{2} \cdot \frac{(2p)^m - 1}{2p - 1} & \left(\frac{1}{2} < p < 1 \right) \\ \frac{m CW_{\min} T_{slot} (1-p)}{4} & \left(p = \frac{1}{2} \right) \\ \frac{CW_{\min} T_{slot} (1-p)}{2} \cdot \frac{1 - (2p)^m}{1 - 2p} & \left(0 < p < \frac{1}{2} \right) \end{cases} \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_2 &= \sum_{j=1}^x \left\{ 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} \cdot p^{j-1} (1-p) \right\} \\
&\quad - \sum_{j=1}^m \left\{ 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} \cdot p^{j-1} (1-p) \right\} \\
&= 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p) \left(\sum_{j=1}^x p^{j-1} - \sum_{j=1}^m p^{j-1} \right) \\
&= 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} (1-p) \left(\frac{1-p^x}{1-p} - \frac{1-p^m}{1-p} \right) \\
&= 2^{m-1} CW_{\min} T_{slot} (p^m - p^x) \\
&\rightarrow 2^{m-1} p^m CW_{\min} T_{slot} \quad (x \rightarrow \infty) \quad (9)
\end{aligned}$$

となる. したがって, (7), (8), (9) 式より,

$$T_{BO} = Q_1 + 2^{m-1} p^m CW_{\min} T_{slot} \quad (10)$$

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. した

がって, (4), (10) 式を用いることにより, n 個のデータフレームを送信する際の消費電力量 $E_t(n)$ は以下ようになる.

$$\begin{aligned}
E_t^k(n) &= \frac{n}{1-p} \left\{ P_s(T_{DIFS} + T_{SIFS}) + P_t \cdot \frac{S_{RTS}}{d_k} + P_r \cdot \frac{S_{CTS}}{d_k} \right\} \\
&\quad + n \left(P_s \cdot 2T_{SIFS} + P_t \cdot \frac{S_{DATA}}{d_k} + P_r \cdot \frac{S_{ACK}}{d_k} \right) \\
&\quad + n \left(\frac{1}{1-p} - 1 \right) \left\{ P_s \left(T_{RTO} - \frac{S_{DATA}}{d_k} \right) + P_t \cdot \frac{S_{DATA}}{d_k} \right\} + n P_s T_{BO} \\
&= n \left[\frac{P_s}{1-p} \left\{ T_{DIFS} + (1-p)T_{BO} + (3-2p)T_{SIFS} + p \left(T_{RTO} - \frac{S_{DATA}}{d_k} \right) \right\} \right. \\
&\quad \left. + \frac{P_t}{d_k(1-p)} (S_{RTS} + S_{DATA}) + \frac{P_r}{d_k} \left(\frac{S_{CTS}}{1-p} + S_{ACK} \right) \right] \quad (11)
\end{aligned}$$

ここで, P_s は待機中に必要な電力, P_t, P_r はフレームを送信, 受信するのに必要な電力であり, 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, d_k はあるモード番号 k におけるデータレート, $S_{RTS}, S_{CTS}, S_{ACK}$ はそれぞれ RTS, CTS, ACK フレームのフレームサイズである.

3.3 マルチホップ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. IEEE 802.11 の無線 NIC は一般的にいくつかのデータレートが選択でき, それらを選択することで送信時の電力やデータレートを決定する. それぞれにおいては, 最大送信電力, 最大通信距離などが異なる. あるモード k を用い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 $0 \leq P_t^k \leq \max(P_t^k), 0 \leq r_k \leq \max(r_k)$ を満たし, $\max(P_t^k), \max(r_k)$ はそれぞれあるモード k を用い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, モード k において, 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.

$$P_t^k = \max(P_t^k) \cdot \left(\frac{r_k}{\max(r_k)} \right)^\alpha \quad (12)$$

そしてこれを r_k について変形すると,

$$r_k = \max(r_k) \cdot \left(\frac{P_t^k}{\max(P_t^k)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (13)$$

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.

また，送受信端末間の距離が L [m] であるとき， r_k を用いると，ホップ数 h は以下のよ
うに表せる．

$$h = \left\lceil \frac{L}{r_k} \right\rceil \quad (14)$$

(11) 式は 1 ホップでの消費電力量であり，(11)，(13)，(14) 式を用いてマルチホップの場合
の消費電力量を求めると，以下のようなになる．

$$E_t^k(n) = n \left[\frac{P_s}{1-p} \left\{ T_{DIFS} + (1-p)T_{BO} + (3-2p)T_{SIFS} + p \left(T_{RTO} - \frac{S_{DATA}}{d_k} \right) \right\} \right. \\ \left. + \frac{P_t^k}{d_k(1-p)} (S_{RTS} + S_{DATA}) + \frac{P_r}{d_k} \left(\frac{S_{CTS}}{1-p} + S_{ACK} \right) \right] \times \left\lceil \frac{L}{r_k} \right\rceil \quad (15)$$

4 数値解析

本章では, IEEE 802.11 無線 LAN の実在のネットワークインターフェースの仕様に基づき, 3.3 節で導出した, 無線マルチホップ伝送における消費電力量モデルの評価を行う. 4.1 節にて (10), (15) 式における各パラメータを設定し, 4.2 節において数値例を示し, IEEE 802.11 のデータレート選択がデータ伝送の消費電力量に与える影響について考察する.

4.1 パラメータ設定

送受信端末間の距離 L を 1000 [m] とする. 式 (10) 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, $m = 10$ とし, $CW_{min} = 15$ であるとする. IEEE 802.11 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 1(a) に示すように設定した. DISF, SIFS 時間および RTO, スロットタイムについては表 1(b) に示す. 再送タイムアウト時間 T_{RTT} は, FreeBSD[12] の実装にならって $5RTT$ とした. ここで, RTT とは図 2(a) におけるデータフレームを送信してから ACK フレームを受信するまでの時間と考え,

$$RTT = 2T_{SIFS} + \frac{S_f + S_{ACK}}{d_k} \quad (16)$$

とする. ここでは簡単のため, 送受信ノード間の伝搬遅延時間は無視している. IEEE 802.11 の各データレートにおける最大送信電力及び最大通信距離である P_t^k および r_k は, Cisco Aironet IEEE 802.11a/b/g 無線 CardBus アダプタのデータ [2], [13] を参照し, 表 2(a), 2(b) のように決定した. また, P_r, P_s に関しては, [2], [13], [14] における定常状態の電流の値を参考にし, さらに, 電圧が等しければ電流と電力は比例の関係にあることから, 以下のように仮定する.

$$P_r^k = \frac{1}{1.7} P_t^k \quad (17)$$

表 1: パラメータ設定

(a) データおよび各フレームサイズのパラメータ

項目	サイズ
S_{ACK}	40 bytes
S_{RTS}	40 bytes
S_{CTS}	40 bytes
S_{DATA}	100 Kbytes
S_f	1000 bytes

(b) 各時間のパラメータ

項目	長さ
T_{DIFS}	$34 \mu s$
T_{SIFS}	$16 \mu s$
T_{slot}	$9 \mu s$
T_{RTO}	5 RTT

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

(a) IEEE 802.11g, 屋外 [2]

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

(b) IEEE 802.11g, 屋内 [2]

データレート [Mbps]	1	6	11	18	54
最大通信距離 [m]	124	91	48	54	27
最大送信電力 [mW]	100	100	100	50	20

$$P_s^k = \frac{1}{2.7} P_t^k \quad (18)$$

4.2 数値解析結果

図 3 は、屋外における IEEE 802.11g の各データレートにおける最大送信電力と最大通信距離のデータ (表 2(a)) を用い、送信電力を 20 mW と設定した場合における、フレーム損失率 p と、すべてのデータ伝送のために必要となる電力量の関係を示している。図には、各データレートをを用いた場合の結果を示している。

この図より、フレーム損失率が等しければ、高いデータレートをを用いた方が消費電力量が小さくなることわかる。これは、データレートが大きくなることでフレーム送信に必要な時間が短くなるため、それによって消費電力量が抑えられるためだと考えられる。しかし、一般的に、データレートが異なると、変調方式などが異なるため、同じ電波環境においても、フレーム損失率は異なる。特に、高いデータレートで用いられる変調方式は、高いデータレートを実現するために、ロスに対する耐性を犠牲にしているため、同じ電波環境の下では、高いデータレートにおけるフレーム損失率は高くなる。

そこで、54 Mbps でのフレーム伝送における消費電力量よりも、それ以外のデータレートにおける消費電力量が小さくなる条件を明らかにするために、両データレートにおける消費電力量が等しくなる時の、フレーム損失率の関係を評価した。図 4 にその結果を示す。図の横軸は 54 Mbps でのフレーム伝送におけるフレーム損失率を表し、縦軸は比較対象であるデータレートにおける、消費電力量が等しくなる時のフレーム損失率を表す。すなわち、グ

ラフの線よりも左側の領域においては、54 Mbps でのフレーム伝送の方が消費電力量が小さいことを表している。図より、データレートが低いほうが有利になる領域は、データレートが小さくなるにつれて狭くなることがわかる。これは、図 3 に示すように、より低いデータレートを使った場合の消費電力量が大きいためである。

次に、54 Mbps と 18 Mbps でのフレーム伝送における消費電力量を比較する場合において、18 Mbps でのフレーム伝送で用いる送信電力を変化させた場合の結果を図 5 に示す。この図より、18 Mbps でのフレーム伝送における送信電力を小さくすることにより、54 Mbps でのフレーム伝送時よりも消費電力量が小さくなる領域が広くなり、5 mW に設定すると、フレーム損失率に関わらず、18 Mbps でフレーム伝送を行うことによって、低い送信電力が得られることがわかる。しかし、送信電力を小さくすると、送受信端末間のホップ数が増大する。本報告における消費電力量解析は、ホップ数の増大を考慮しているが、1 ホップの距離に関係なく、指定されたホップ数を実現するための中継ノードが存在することを仮定している。しかし、実際の環境においては、送受信間のホップ数の上限は、ノード配置やノード密度によって決定される。実際のノード配置などを考慮した消費電力量の評価は今後の課題としたい。

次に、IEEE 802.11g 屋内のデータである表 2(b) のデータを用いて、解析を行った。その結果を図 6-8 に示す。図 6、及び図 7 において、6 Mbps と 11 Mbps での結果が図 3、及び図 4 の結果と逆転している。これは、表 2(b) に示すように、IEEE 802.11g 屋内のデータにおいて、11 Mbps でのフレーム伝送における最大通信距離が他に比べて極端に短くなっていることが原因である。それ以外の点については、IEEE 802.11g 屋外の結果 (図 3~5) とほぼ同様の結果が得られた。これらの結果から、本節における評価結果において、データレート間に見られた関係は、他の無線 LAN のネットワークインターフェースカードにおいても見られるものと推測される。

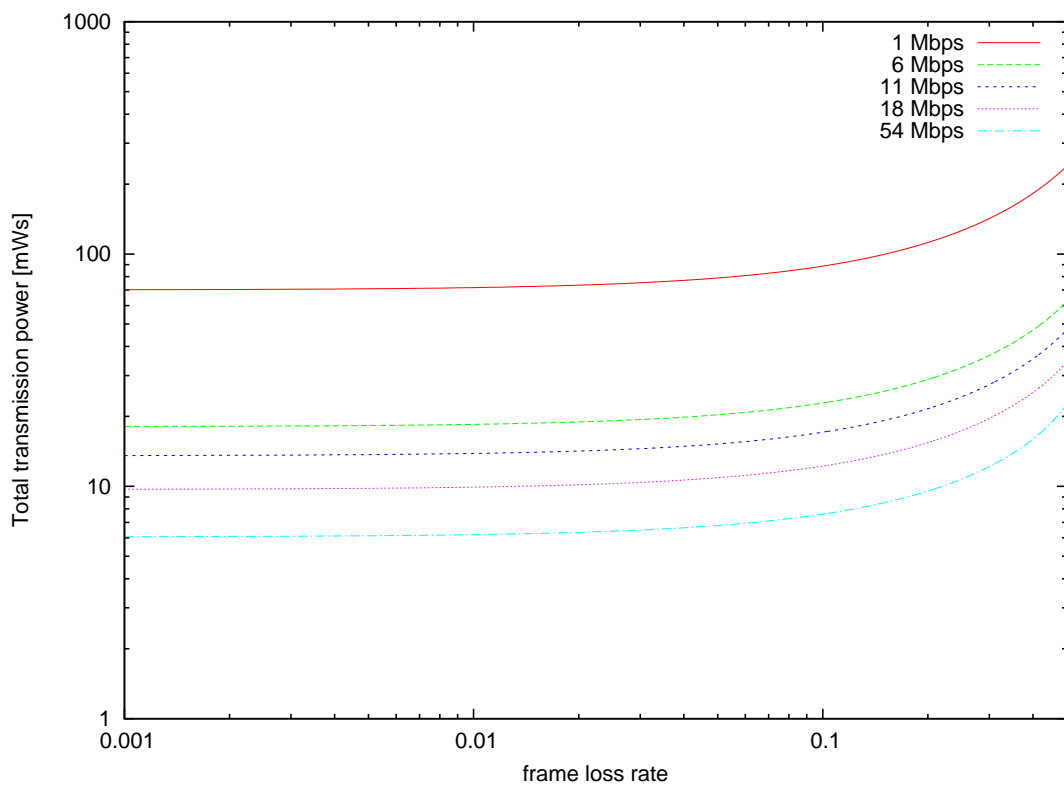


図 3: フレーム損失率と消費電力量の関係

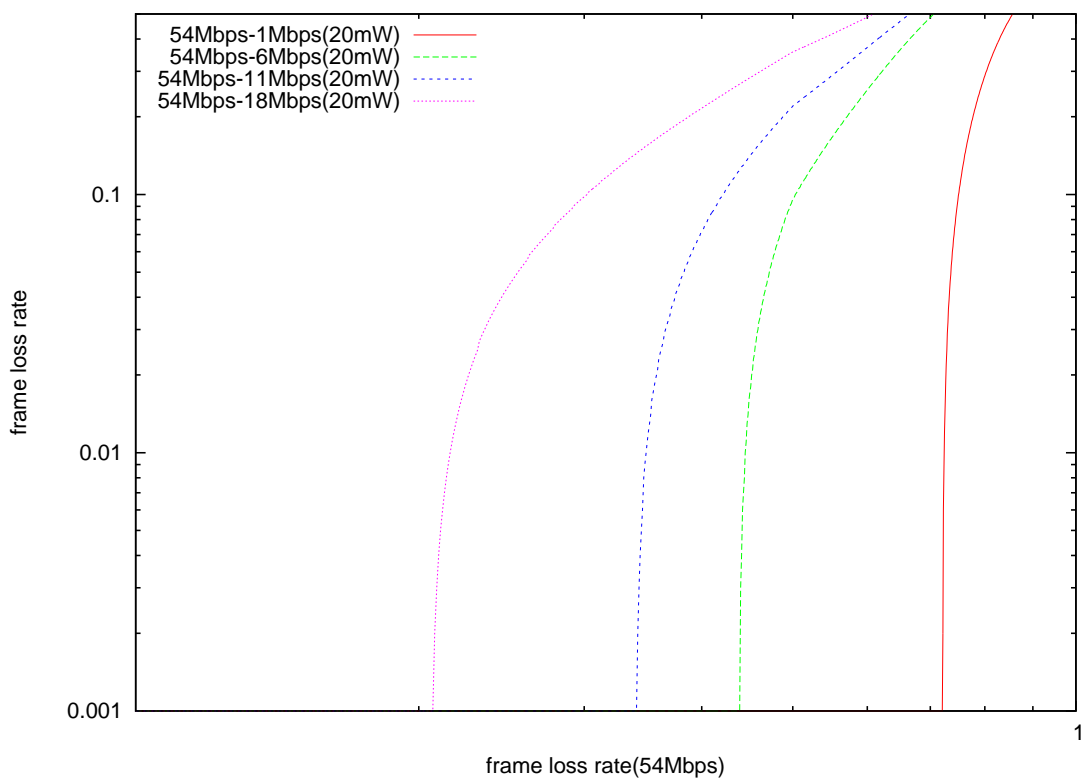


図 4: IEEE 802.11g 屋外における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる時のフレーム損失率の変化

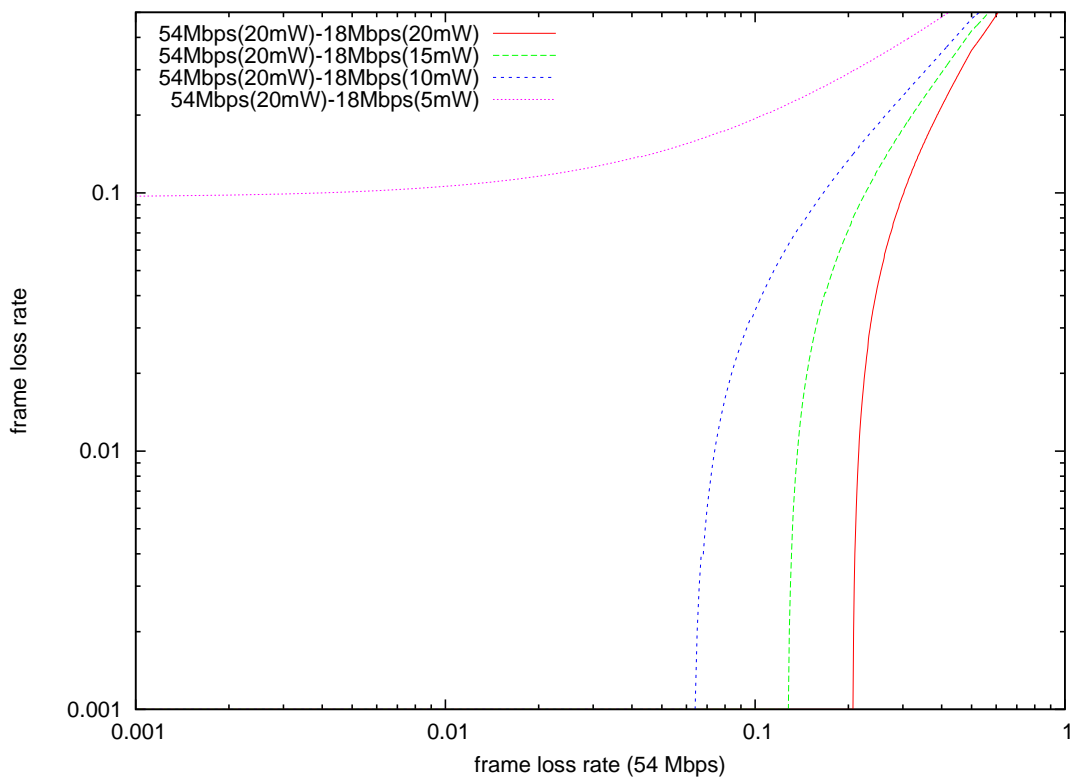


図 5: IEEE 802.11g 屋外における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる時のフレーム損失率の変化 (2)

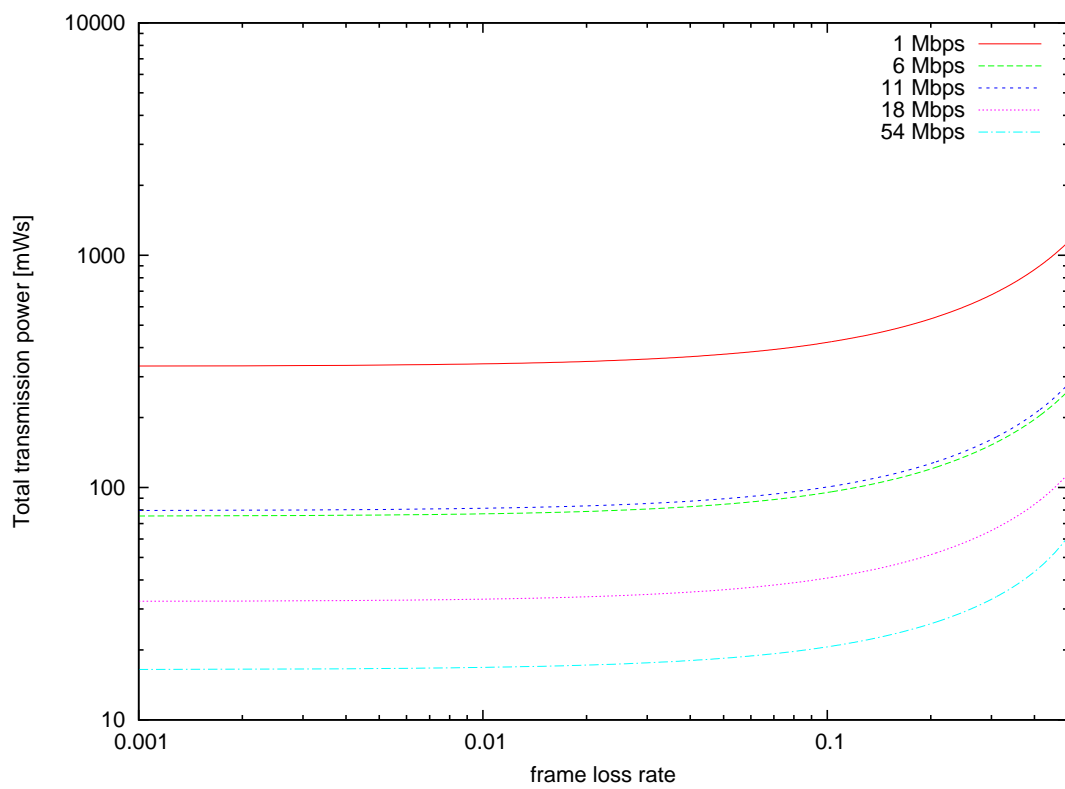


図 6: IEEE 802.11g 屋内の場合におけるフレーム損失率と消費電力の関係

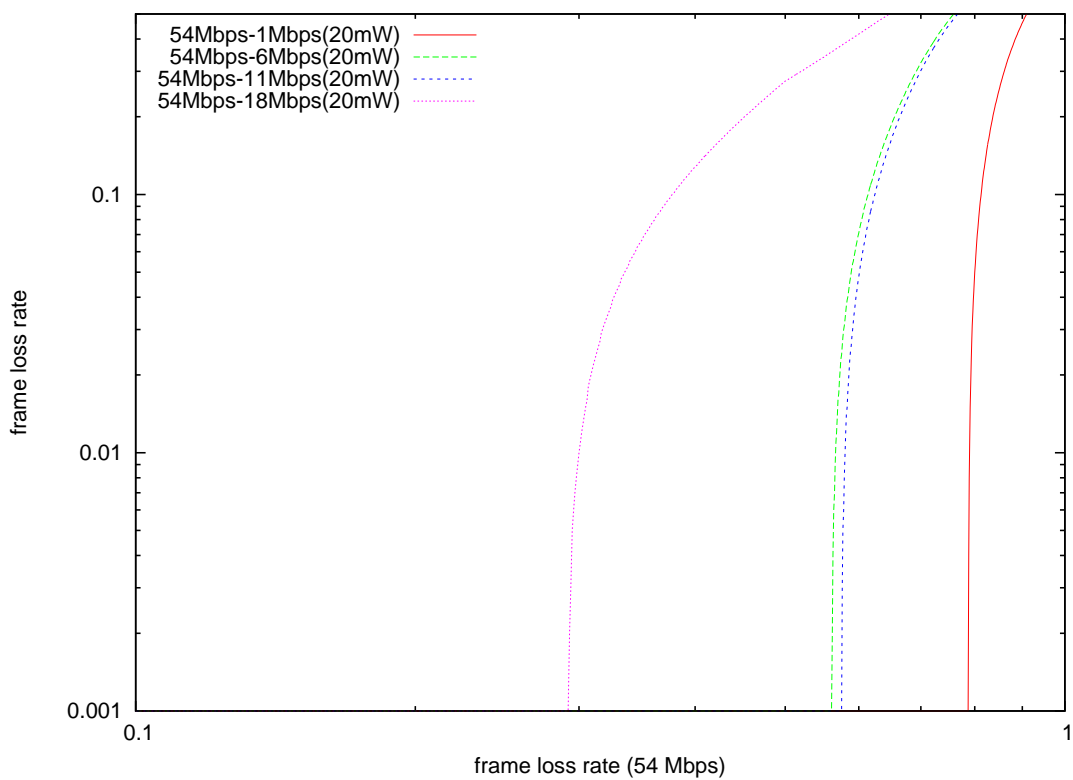


図 7: IEEE 802.11g 屋内における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる時のフレーム損失率の変化

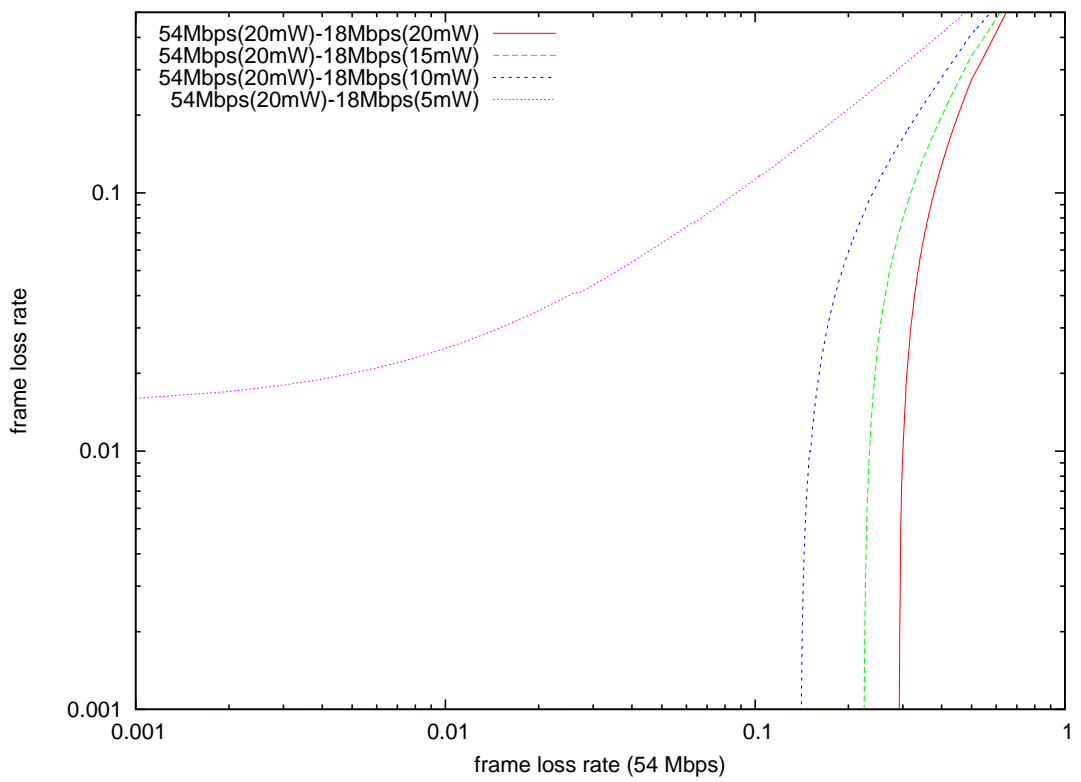


図 8: IEEE 802.11g 屋内における 54 Mbps での伝送時と消費電力量が等しくなる時のフレーム損失率の変化 (2)

5 まとめと今後の課題

本報告においては、IEEE 802.11 無線 LAN に基づくマルチホップネットワークを用いたデータ伝送における消費電力量の解析を行い、IEEE 802.11 のデータレートの選択が消費電力量に与える影響を評価した。評価の結果、ネットワークにおけるフレーム損失率が等しい場合には、より高いデータレートを使うことで、より小さい消費電力量が得られるが、低いデータレートを使うほうが消費電力量を抑えることが出来る場合があることを明らかにした。

今後の課題としては、各データレートにおけるフレーム損失率の関係を調べることで、より効率的なデータレートの選択手法を明らかにすることが挙げられる。また、データ伝送中のフレーム損失率を計測し、それに応じた適切なデータレート選択手法の提案なども行いたい。

謝辞

本研究に関して、温かいご指導ご鞭撻をいただきました、大阪大学 大学院情報科学研究科 中野博隆教授に心から感謝申し上げます。ならびに、大阪大学 大学院情報科学研究科 村田正幸教授にも熱心なご指導いただき、心から感謝いたしております。また、日頃から多大なるご助言ご指導を請け賜りました、大阪大学 大学院情報科学研究科 長谷川剛准教授にも、心から感謝の意を申し上げます。最後に、大阪大学 大学院情報科学研究科 中野研究室の皆様からもアドバイスをいただき、皆様のおかげで本報告を終えることができました。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.” IEEE Standard 802.11, June 1999.
- [2] Cisco Aironet 802.11a/b/g 無線 CardBus アダプタ. available at http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/wireless/adapter/prodlit/cecbs_ds.html.
- [3] A. Communications, “Power Consumption and Energy Efficiency Comparisons of WLAN Products,” tech. rep., Atheros, May 2003.
- [4] V. Raghunathan, T. Pering, R. Want, A. Nguyen, and P. Jensen, “Experience with a low power wireless mobile computing platform,” in *Proceedings of ISLPED 2004*, pp. 363–368, Aug. 2004.
- [5] Y. Agarwal, “Dynamic power management using on demand paging for networked embedded systems,” in *Proceedings of the 2005 Conference on Asia South Pacific Design Automation*, pp. 755–759, July 2005.
- [6] M. Lacage, M. H. Manshaei, and T. Turletti, “IEEE 802.11 rate adaptation: A practical approach,” in *Proceedings of MSWiM 2004*, pp. 126–134, Oct 2004.
- [7] S. H. Y. Wong, H. Yang, S. Lu, and V. Bharghavan, “Robust rate adaptation for 802.11 wireless networks,” in *Proceedings of MobiCom 2006*, pp. 146–157, Sept. 2006.
- [8] G. Kuriakose, S. Harsha, A. Kumar, and V. Sharma, “Analytical models for capacity estimation of IEEE 802.11 WLANs using DCF for internet applications,” *Wirel. Netw.*, vol. 15, pp. 259–277, Feb 2009.
- [9] V. Baiamonte and C.-F. Chiasserini, “Saving energy during channel contention in 802.11 WLANs,” *Mob. Netw. Appl.*, vol. 11, pp. 287–296, April 2006.
- [10] M. Ergen and P. Varaiya, “Decomposition of Energy Consumption in IEEE 802.11,” in *Proceedings of ICC 2007*, pp. 403–408, June 2007.
- [11] . 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, vol. 110, pp. 1–6, Dec. 2010.
- [12] “The FreeBSD Project.” available at <http://www.freebsd.org/>.

- [13] Cisco Aironet 802.11a/b/g ワイヤレス LAN クライアント アダプタ (CB21AG および PI21AG) インストレーション コンフィギュレーション ガイド. available at http://www.cisco.com/japanese/warp/public/3/jp/service/manual_j/wr/airoca/caicg/appendixA/winapAkh.html.
- [14] C. Andren, T. Bozych, B. Road, and D. Schultz, "PRISM power management modes: Application note AN9665," Feb. 1997.