

屋外での実機を用いたマルチレート無線 LAN のスループット測定と解析

岩木紗恵子[†] 村瀬 勉^{††} 小口 正人[†]

[†] お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

^{††} NEC 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: [†]saeko@ogl.is.ocha.ac.jp, oguchi@computer.org, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com

あらまし 近年, 伝送レートに応じて, 最適にアクセスポイント (AP) を割り当てるといった制御の研究が盛んに行われている. 無線 LAN システムにおいては一般にスループットなどの通信品質によってダイナミックに最適な伝送レート (マルチレート) を選択する. このスループットは, AP と端末間の距離などによって決まる. 距離と最適伝送レートの関係については, 干渉が無い理想的な状況に対しては, すでにシミュレーションにて, 距離に応じて離散的に伝送レートを変化させるべきであるという評価が行われている. しかしながら, 実際の利用状況では, 干渉は無視できない. そこで本研究では, 実際にマルチレートが有効に機能するような環境として, 実機を用いて屋外において, マルチレートの各伝送レートにおける距離とスループットの関係性を計測し, 既存のシミュレーション結果と比較した. その結果, スループットは, より距離に敏感に反応し, 連続かつ単調に減少することが明らかになった. さらに, シミュレーションとの差異を生じた要因である, 干渉による MAC 層におけるフレーム再送とキャリアビジーについて, 詳しく解析した.

キーワード 無線 LAN, スループット特性, マルチレート

Throughput Measurement on Multi-rate Wireless Local Area Network in outdoor

Saeko IWAKI[†], Tutomu MURASE^{††}, and Masato OGUCHI[†]

[†] Ochanomizu University Otuka 2-1-1, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610 Japan

^{††} NEC Corporation 1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa, 211-8666, Japan

E-mail: [†]saeko@ogl.is.ocha.ac.jp, oguchi@computer.org, ^{††}t-murase@ap.jp.nec.com

Abstract There are Access Point (AP) selective problems to which AP a new terminal should access. It is important to select APs corresponding to proper transmission rate. As for wireless LAN, the proper transmission rate can be selected in proportion to bit error. Though computer simulations have investigated the relationship between throughput and the distance from a terminal to an AP, real machine experiments have not evaluated the relationship. This paper measured throughput relative to the distance on each rate outdoors. The experimentally measured throughput was more sensitive than the simulation results and monotonically decreased as the distance from an AP increased. We consider two reasons for this mechanism: One is an increasing frame retransmission rate in the MAC layer, and the other is an increased frame transmission waiting time, as the carrier is considered noise. We have clarified the intimate relationship among throughput, the MAC frame retransmission rate, and the carrier busy state in poor radio conditions. This paper quantitatively investigates these two factors that reduce throughput.

Key words Wireless LAN, Throughput analysis, Multi-rate

1. はじめに

無線対応機器の普及とともに, 無線 LAN の急速な普及が進んでいる. 無線対応の移動端末の発展により, 屋外での無線

LAN の使用も増加しており, 公共スペースでの公衆無線 LAN サービスが幅広く展開されている. このような中で, アクセスポイント (AP) および端末は通信環境の異なる複数の端末に対して効率的な通信を行うため, 複数の伝送レートに対応して

いる．電波環境が良好な端末には高い伝送レートで，そうではない端末には低い伝送レートでの（マルチレート）通信を行うため，それぞれの端末は，電波環境に合わせて最適なスループットを得るような通信が可能となる．

一般に，AP と端末間の距離が離れるほど他の電波の影響を受け，自電波の減衰が原因で高い伝送レートでの通信ができなくなるため，伝送レートは低くすべきと考えられている．ある伝送レートでどの程度の距離まで通信ができるか，またその伝送レートでどの程度のスループットが得られるかの定量評価は，シミュレーションによりすでに行われている．このような数値を用いて，マルチレートを用いた無線 LAN の性能を最適化する技術が研究されている．例えば，新規端末が接続すべき AP を複数の接続可能な AP から選択する AP 選択問題 [1] [2] [3] [4] [5] [6] [8] では，伝送レートに応じた適切な選択が重要である．このようなマルチレートにおける AP 選択問題の多くが用いている距離と最適伝送レートの関係は，理論値あるいはシミュレーションにより決定された値である．シミュレーションにおける評価値としては，例えば，文献 [8] では，ビットエラーによる MAC フレームエラーが発生しない距離の閾値内では常に一定のスループットであるとしている．つまり距離に応じて階段状の通信容量を得られるというモデル化を行っている．

しかしながら，シミュレーションでは，実環境において発生する日常生活での雑音や近隣の他の無線 LAN 通信の干渉などは考慮されておらず，AP と端末間の距離が大きくなるにつれて階段状ではなく，連続かつ単調的にスループットが下がることが予測される．そこで本研究では，実機にて，どの伝送レートでどの程度までの距離の通信が可能であるか，AP と端末間の距離を変えることにより変化するスループット特性を観測し，既存のシミュレーションにおけるマルチレートモデルとの差異を考察する．

本稿の流れは以下のとおりである．まず，2 章で無線 LAN のマルチレートと既存研究の問題点について説明し，3 章ではスループット低下要因と実験概要を述べ，4 章で実験結果についての考察を提示する．最後に 5 章で本稿のまとめを述べる．

2. 関連研究と問題点

無線 LAN では，ビットエラーレートあるいはフレームエラーレートを適切な値に維持するために，複数の伝送レートが規定されており，ビットエラー状況に応じて適切な伝送レートが選択可能になっている．この選択は，標準では規定されていないため，各ベンダが独自に決定している．各ベンダの選択基準に関しては，詳細は公表されていないが，文献 [10] のような報告が 1 つのリファレンスになっている．これによれば，劣悪な電波環境により高速な伝送レートを維持できなくなった場合には，低速な伝送レートへ切り替え，電波環境が良好な場合には高い伝送レートへ変更を行うというマルチレート制御が行われている．このようなメカニズムにより，環境の異なる複数の端末を効率的に収容することができる．

マルチレートの規定値として，IEEE802.11b では 11，5.5，2，

1Mbps の 4 種類，IEEE802.11a/g では 54，48，36，24，18，12，9，6Mbps の 8 種類の伝送レートが定義されている．

文献 [8] では，IEEE802.11a において距離に応じて最適な伝送レートを選択する手法について述べられている．また，文献 [6] [7] では，新規端末の AP 選択の際に，その新規端末の伝送レートを考慮して，端末が満足できる最低限度のスループットと，移動可能距離を考慮しながら，システムスループットを最大化する手法について述べている．これらの研究において，伝送レートの決定は，文献 [8] で述べられている，AP と端末の距離に対して伝送レートがステップ状に変化する関数を用いている．具体的な数値は表 1 に示すとおりである．実効スループットは，該当する伝送レートを用いて IP パケットで通信を行ったときに，IP パケットのペイロードで転送できるスループットのことを意味しており，ns2 を用いたシミュレーションにより得られた結果である．また，文献 [9] においても，1 に示すように，シミュレーションによる距離とスループットの関係が述べられている．

表 1 伝送レート，距離と実効スループット

伝送レート (Mbps)	54	48	36	24	18	12	9	6
距離 (m)	5	7	9	20	25	40	50	60
スループット (Mbps)	26.1	24.4	20.4	15.3	11.9	8.5	5.8	4.7

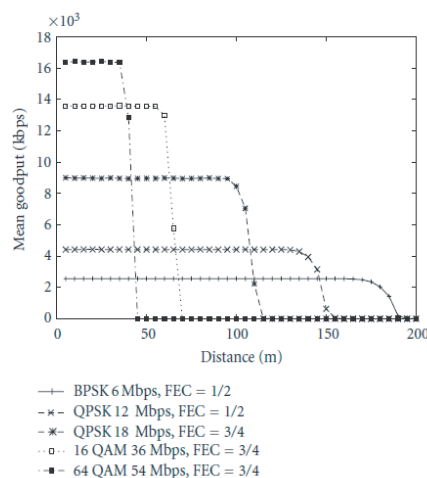


図 1 シミュレーションによるマルチレートのスループット

これらのシミュレーションによる実験では，電波の減衰およびフェージングについては考慮されているが，他の無線 LAN やその他のノイズによる干渉などを考慮した評価値にはなっていない．そのため，文献 [8] においては，MAC フレーム再送が発生しない距離においては常に一定のスループットで通信可能としているが，実環境では距離に応じて，干渉波の影響が大きくなり，スループットが低下するはずであると考えられる．まず，この特性を明らかにする必要がある．さらに，この特性を生じる要因である干渉波によるキャリアビジー待ち時間に関する定量的評価も必要である．本研究では，実機を用いた実験を行い，スループット特性およびスループット低下要因について定量的に明らかにしていく．

3. スループット低下要因

3.1 2つの要因

ここでは、スループット低下の原因となる、MAC 層の要因について述べる。MAC 層におけるスループット低下要因は、(1)MAC フレーム再送 (2) キャリアビジーの2点である。ノイズなどの影響により同じフレームが何度も送信されたり、ノイズがキャリアとみなされ、送信フレーム間隔が増大したりすると、送られるパケット数が少なくなるため、スループットが低下する。

MAC フレームの再送は、MAC フレーム送信に失敗したり、MAC フレームの ACK の送信に失敗したりして、送信側が ACK を受け取ることが出来なかったときに起こる。しかし、ACK フレーム自体の伝送レートは、ACK フレーム長がデータ長より短いため、データの伝送レートより同じか低いので、ACK フレーム自体の送信の失敗の可能性は低い。ビットエラーによりフレーム送信が失敗するが、ノイズの量が多くなればなるほど、ビットエラーは多くなると考えられる。ここでいうノイズとは、他の無線 LAN の電波を含む、日常生活を送る上では避けることの出来ないノイズである。多くの無線 LAN のシミュレーションによる研究では、レイリーフェージングのような電波衰弱モデルについては考慮されているが、実環境においては、他の無線 LAN の影響を抜きにして考えることは出来ない。

実環境においては、キャリアビジーの影響を考慮すべきである。IEEE802.11 の MAC 層の規格である CSMA/CA においては、衝突を避けるために、キャリアを検知すると待ち時間が発生する。送信側が、干渉波をキャリアと認識してしまうと、受信側がその信号をキャリアと認識していなくても、データを送信することが出来ず、待たなくてはならない。図2はこの様子を図示したもので、この様子は隠れ端末に似ている。同一無線 LAN 環境において、隠れ端末を認識するのが重要なように、他の無線 LAN に隠れている端末のキャリアを認識するのも重要である。

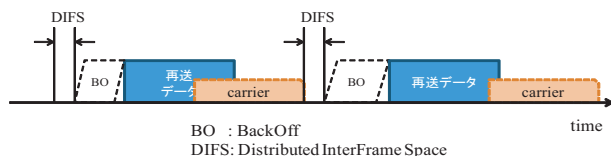


図2 フレーム再送時の無線アクセス制御（ノイズ有）

3.2 MAC フレーム再送にかかる時間とキャリアビジーの時間の計算方法

実験における観測値から、再送にかかる時間とキャリアビジーによる待ち時間が発生する時間を分けることは困難であるが、以下のような方法が考えられる。再送にかかる時間は、Contention Window(CW)の最小値(CWmin)と最大値(CWmax)が分かれば、見積もることが出来る。CWはCWmin ≤ CW ≤ CWmaxのランダムな値であり、CWとslottimeをかけたものがバックオフ時間となる。単純に再送が繰り返された

場合にかかる時間の期待値は、再送回数がN回の場合、式(1)で求めることが出来る。後述するMACフレームモニタで確認された送信時間から、式(1)の時間を引いたものが、キャリアによる待ち時間であると推定できる。

再送時間の期待値

$$= (DIFS + \text{フレーム送信時間}) \times N + (CW \text{ の合計}) / 2 \times \text{slottime} \quad (1)$$

表2 パラメータ

parameter	value
DIFS	34 μsec
slottime	20 μsec
CWmin	15
CWmax	1023

3.3 実験概要

ここでは、今回行った実験の概要や機器について説明する。無線 LAN の通信品質は、周囲の状況に大きく依存する。通信品質に影響を与える要因としては、他の無線 LAN からの干渉、建物や壁や乗り物や人物による電波の反射、電子機器などからの雑音などがあり、場所や時間により影響の大きさが異なる。一般に、屋内では性能を低下させる要因は小さく、屋外では大きい。今回は周囲からの影響が大きい屋外での実験結果について述べる。今回の実験では、大学のグラウンドを使用した。グラウンドの周りは、住居マンションやオフィスビルがあるため、実験で使用した AP 以外にもいくつも AP が観察される状況であった。屋内体育館でも実験を行ったが、体育館ではほぼ干渉波がない状況であった。グラウンドとその周辺の様子を図3に、実際に実験に使用した場所を図4に示す。



図3 グラウンドとその周辺



図4 実験場所

無線 LAN の AP と Ethernet Converter(EC) には、モバイルタイプの無線 LAN デバイスである市販の Planex 社 MZK-MF300N [12] を使用した。EC は、イーサネットのインタフェースと無線 LAN インタフェースを持つ無線 LAN 子機である。データ送信 PC から EC までは、イーサネットで通信を行い、EC のバッファにて速度変換のため一度蓄積した後に、無線 LAN にてアクセスポイントにデータを送る、という動作になる。EC を使用する場合には、注意すべき点として、このバッファスペースは限られているため、イーサネット側と無線 LAN 側のデータトラフィックのレートに差があれば、バッファオーバーフローが発生する可能性を考慮すべきということがある。

本機は、伝送レートを手動で固定することが出来る。また、電波強度の設定も可能である。CSMA/CA の詳細なパラメータは開示されていないため、後述のように、CWmin および CWmax は、予備実験から推定している。他のパラメータは IEEE802.11g 準拠のものである。パラメータを表 2 にまとめる。

無線 LAN の製品は、民生の市販品だけでも多くの種類の製品が使用可能である。そのほとんど全てが、電波環境に応じて伝送レートを自動で設定するオートレートフォールバック (ARF) のアルゴリズムを搭載している。この ARF には標準が無く、ベンダによって独自に実装されているが、そのアルゴリズムなどの情報は開示されていない。今回はこの ARF 機能を用いず、固定レートで実験を行った。つまり、ベンダ独自のフォールバックを行っていないため、本実験においては、他の製品 (ARF を用いない場合) で同様の実験を行ったとしても結果の差異は極めて小さいと考えられる。

スループットの計測は、次のようにして行った。まず、AP を接続した端末 (受信機) の位置を固定し、次に、EC を接続した端末 (送信機) の位置を 1m 単位で移動させる。端末の OS は Windows XP、スループットの測定には Iperf [13] を使用し、送信機から受信機に UDP パケットを送信する。トラフィックをキャプチャするために、送信機のすぐ横に、MAC フレームモニタをキャプチャする機器 [14] を搭載した端末 (モニタ端末) を設置した^(注1)。実際の計測の様子を図 5 に示す。



図 5 実験の様子

(注1): モニタ端末においては、プロミスカスモードで MAC フレームをキャプチャすることができ、MAC レベルでのエラーパケットも可能な限り (ヘッダが壊れていない限り) 収集することができる。今回は、送信機のすぐ横でキャプチャを行っているため、送信側のデータは、ほぼ取りこぼすことなく収集できていると考えられる。逆に、AP からのデータは、電波が弱い状況でキャプチャすることになるので、取りこぼす可能性があることに注意して計測結果を評価した。

実験環境の概略を図 6 に示す。今回は IEEE802.11g の 8 種類の伝送レートにおいて、実験計測を行った。なお、実機実験では、IEEE802.11g を用いており、シミュレーションでは、IEEE802.11a を用いている。IEEE802.11g と IEEE802.11a の仕様の違いにより、スループット特性において、ある伝送レートが有効な距離が若干異なるが、距離に対して階段状のスループット特性が導出される方法は同じであるため、この若干の違いは無視できると考えた。

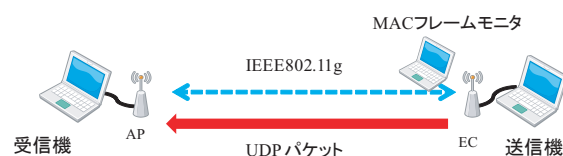


図 6 実験概要図

UDP パケットを送信する際、帯域幅を 200Mbps と十分な大きさに設定し、UDP パケット長は Iperf のデフォルトである 1470Byte で、1 回の計測につき 40 秒間の通信を行った。これは、通信の不安定な最初と最後の 5 秒間のスループットを破棄し、間の 30 秒間のスループットの平均を取るためである。スループットは 3 回の計測の平均値を採用している。また 1 回の計測につき、モニタ端末で、解析に十分であると考えられる 10000 パケットのキャプチャを行った。今回使用した Iperf のコマンドは以下のとおりである。

受信機: iperf -s -u

送信機 r: iperf -c (受信機の IP アドレス) -u -b 200M -t 40

4. 実機におけるスループット評価

4.1 実機におけるスループットと距離の関係

図 7 に、上記の実験環境におけるスループット観測の結果を示す。

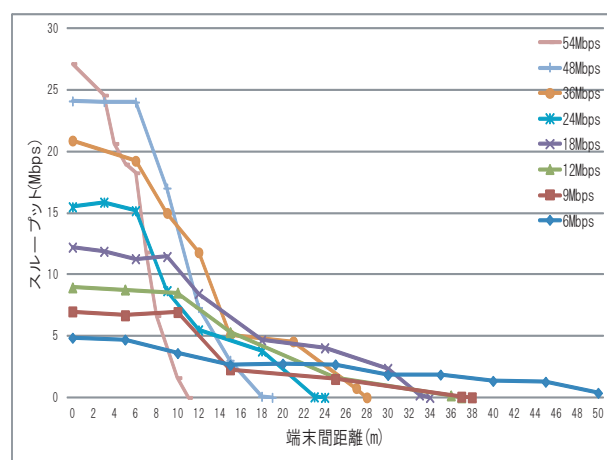


図 7 距離とスループット

シミュレーションによる階段状の結果とは異なり、干渉波の影響で、距離が離れるに従い、なだらかにスループットが低下した。4.3 節で後述するとおり、スループット低下の原因は

MAC フレーム再送, キャリアビジーであるが, シミュレーションにおいては, MAC フレームの再送については考慮されているため, シミュレーションと実機の大きな違いは, キャリアビジーの有無であると考えられる。なお, 屋内においても同様の実験を行ったところ, 同じスループットで通信可能な距離が大きく延びたが, スループット低下に関しては, 屋外での実験と同様の特性が得られている。

4.2 電波強度とスループットの関係

伝送レート 54, 24, 6Mbps における, 電波強度 15% の場合と, 電波強度 100% の場合での計測結果を図 8 に示す。電波強度を弱めた場合, スループットの特性は相似であることが分かる。今後の実験では, 電波強度 15% の場合で議論を行う。

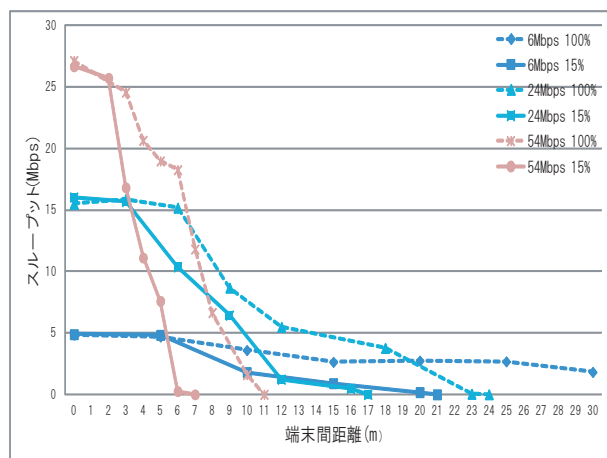


図 8 電波強度 15 % と 100 %

4.3 スループット低下原因

4.3.1 MAC フレーム再送率とスループット

この節では, MAC フレーム再送率と, スループットの関係について考察する。MAC フレーム再送は, シミュレーションにおいても, 実機においても, スループットを低下させる主な要因である。図 9 は, 実機における, MAC フレーム再送率とスループットの測定結果を示している。MAC フレーム再送率は, 式 (2) で計算される。MAC フレーム数は, モニタ端末により取得されたデータフレームのうち, 送信元が EC のアドレスのものを指し, 再送 MAC フレーム数とは, 送信機から送信された MAC フレームのうち, ヘッダ部のフレーム制御部分の Retry フラグが 1 となっているものを指す。図 9 は, 屋外における伝送レート 54Mbps, 電波強度 15% における結果である。距離 6m 地点で, スループットはほぼ 0 に落ちており, 6m 地点では MAC フレーム再送率が 85% というとても高い値であった。これ以上の距離では, ビットエラーが大きすぎるために, Iperf による接続を保つことが出来なかった。

$$\text{MAC フレーム再送率} = \frac{\text{MAC フレーム数}}{\text{再送 MAC フレーム数}} \times 100 \quad (2)$$

この図から, スループット特性の要因の一端を見ることが出来る。4m 地点でのスループットは, 0m 地点におけるスループットの半分未満であり, MAC フレーム再送だけがスループット低下の原因になるならば, MAC フレーム再送率は約 50% となるはずである。しかし, 実際は 35% という低い値である。したがって, キャリアビジーもスループット低下の大きな原因になっていると考えられる。

図 9 MAC フレーム再送率とスループット

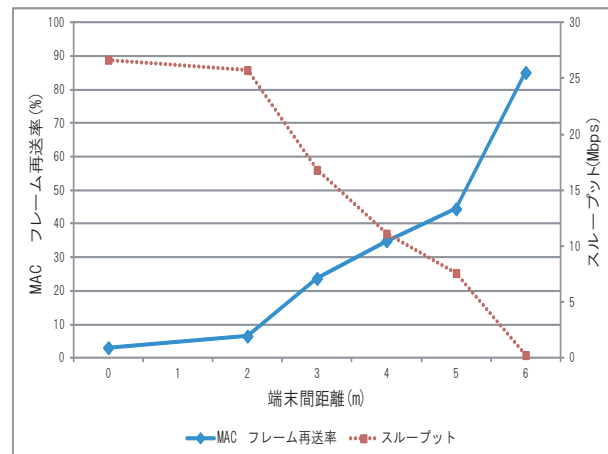


図 9 MAC フレーム再送率とスループット

4.3.2 キャリアビジーによる待ち時間の増加

キャリアビジーがスループット低下に影響することを証明する。直接キャリアビジーの時間を求めるのは困難なため, 再送にかかる期待値を計算することで, 間接的にキャリアビジーを求める。前述の通り, モニタ端末で観測されるパケット送信間隔には, フレームの再送, そしてキャリアビジーによる待ち時間が含まれると考えられる。図 10 に, 再送回数 N 回のフレームに対して, 3.2 節の式 (1) で求められる再送にかかる期待値 (実線) とモニタ端末で観測された実際にかかった時間である観測値 (ドット) を示す。このデータは, 伝送レート 54Mbps, 端末間距離 6m 地点におけるものである。再送遅延の期待値は, $CW_{max}=1023$ として計算した。本実験機では, CW_{max} 値は, 手動で変更および指定が出来ず, 情報開示もないため, 予備実験により CW_{max} を推定したが, さらに小さい CW_{max} である可能性もある。 CW_{max} が小さくなるほど, 再送遅延が小さくなるため, 相対的にキャリアビジーの影響は大きくなる。

図 10 において, 実線とドットの差がキャリアビジーと考えられ, ノイズが多く含まれる場合には, 観測値は期待値よりかなり大きな値を記録しており, 式 (4) による計算では, この平均の差分は約 20% であった^(注2)。シミュレーションにおいては, キャリアビジーによる待ち時間を考慮していないが, このように, 端末間距離が長くノイズが多く含まれるときにスループットを考える際は, キャリアビジーの影響を考慮する必要がある。

平均の差分

(3)

$$= \sum_{N=1}^{48} \left(\frac{\text{再送 } N \text{ 回の観測値} - \text{再送 } N \text{ 回の期待値}}{\text{再送 } N \text{ 回の期待値}} \times 100 \right) / 48$$

(注2): 今回の実験においては, 再送回数の最大値 (すなわちリトライアウト回数) は 48 回であった。この値は通常の市販 AP 等の機器においては, 極端に大きい値である。通常の再送回数は 7 回程度である。

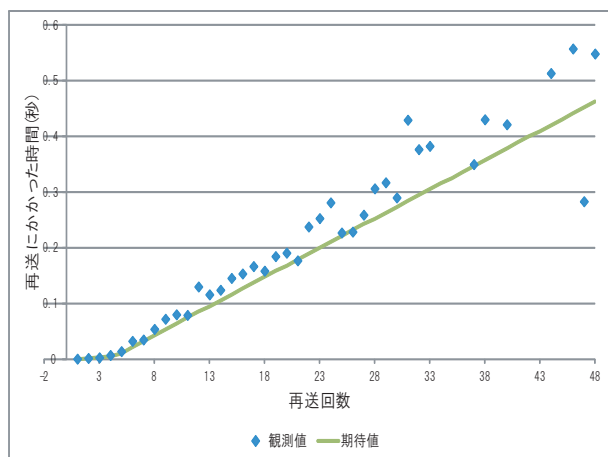


図 10 観測値と再送時間の期待値

5. おわりに

本稿では、IEEE802.11gにおいて、実機によるマルチレートの伝送レート別のスループット特性の調査を行った。その結果、どの伝送レートについても、シミュレーションにおける結果とは異なり、APと端末間の距離が離れるに従い、スループットは連続かつ単調に低下していくことを確認した。シミュレーションにおいては、レイリーフェージングなどの電波減衰を考慮してスループットを計算しているが、キャリアビジーによる待ち時間の発生によるスループット低下を考慮していないことが差異の原因である。屋外での実験では、キャリアビジーによる待ち時間は、20%も存在し、無視できないほど大きいことが判明した。従って、屋外を対象としている制御・評価におけるシミュレーションでのスループットの計算には、キャリアによる待ち時間を充分考慮すべきである。

謝辞

本研究は一部、独立行政法人情報通信研究機構の委託研究「新世代ネットワークを支えるネットワーク仮想化基盤技術の研究開発・課題ウ 新世代ネットワークアプリケーションの研究開発」によるものである。また本研究を進めるにあたり大変有用なアドバイスを頂いた神戸大学の太田能先生に深く感謝致します。

文 献

- [1] Y. Bejerano, S. J. Han: "Fairness and load balancing in wireless lans using association control", IEEE Transactions on Communication Technology, vol.15, no.3, Jun. 2007
- [2] G. Fanglu, C. Tzi-cker: "Scalable and Robust WLAN Connectivity Using Access Point Array", Proc. of IEEE DNS 2005 pp. 288, Jul. 2005.
- [3] H. Gong, K. Nahm, J. Kim: "Distributed fair access point selection for multi-rate IEEE 802.11 WLANs", Proc. of IEEE CCNC 2008, pp. 528-532, Jan. 2008.
- [4] Z. Yanxiao, S. Min, W. Jun, E. K. Park: "Throughput Measurement-Based Access Point Selection for Multi-rate Wireless LANs", WASA 2009, LNCS 5682, pp.509-518, 2009
- [5] M. Abusubaih, A. Wolisz: "On Access Point Selection in

IEEE802.11Wireless Local Area Networks", Proc. of IEEE WLN 2006, Nov.2006

- [6] S. Miyata, T. Murase, K. Yamaoka: "Characteristic analysis of an access-point selection for user throughput and system optimization based on user cooperative moving", IEEE CCNC2012 Jan. 2012.
- [7] S. Miyata, T. murase, K. Yamaoka: "An access-point selection algorithm for user QoS and system optimization by user cooperative moving", 2011 Network of the Future Conference (NoF'11), 2011.
- [8] F.Miki, D.Nobayashi, F. Yutaka, I. Takeshi: "Performance Evaluation of Multi-Rate Communication in Wireless LANs", Proc. IEEE CCNC 2010, Jan. 2010.
- [9] M.HosseinManshaei, "An Evaluation of Media-Oriented Rate Selection Algorithm for Multimedia Transmission in MANETs", EURASIP Journal onWireless Communications and Networking pp757-773, May 2005.
- [10] A. Kamerman, L. Monteban,: "WaveLAN-ii: a high-performance wireless LAN for the unlicensed band", Bell Labs Technical Journal, vol.2, no.3, pp.118-133, 1997.
- [11] IEEE 802.11, 1999 Edition, Available at <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-1999.pdf>
- [12] Planex MZK-MF300N
<http://www.planex.co.jp/product/router/mzk-mf300n/>
- [13] Iperf
<http://sourceforge.net/projects/iperf/>
- [14] AirPcap
<http://www.cacotech.com/products/airpcap.html>