

特集 | ワイヤレスセルラーネットワークにおけるTCPスループットの性能評価*

Performance Evaluation of TCP Throughput on Wireless Cellular Networks

三好 昌弘

Masahiro MIYOSHI

菅野 正嗣

Masashi SUGANO

村田 正幸

Masayuki MURATA

We present TCP performance evaluation model for the wireless cellular network, which is considered data link layer and communication error on the radio link. By using this model, we show that improving throughput at the data link layer level does not necessarily lead to the TCP throughput improvement. Therefore, the network parameter is provided after each influence of the data link/TCP layer is considered, and the TCP throughput can be improved. On the other hand, we propose FEC slide correct technique, which is changes error correction capability with noise level. By using this technique, we show the TCP throughput can be improved in every noise level.

Key words : Wireless cellular network, TCP, slotted ALOHA, ARQ, FEC

1. まえがき

近年、携帯電話をはじめとする無線端末からワイヤレスセルラーネットワークを介してインターネットにアクセスするモバイルインターネット技術が注目されている。このモバイルインターネット技術は、ここ数年で、急速に発展してきたため、その通信方式は、CDMA / TDMA 方式、回線交換 / パケット交換方式など様々な通信方式が存在している。しかし今後、ITUにおける次世代移動通信システム(IMT-2000)で国際標準化検討されているCDMA方式が、ワイヤレスセルラーネットワークの無線伝送方式として有力視されており、インターネットとの無線データ通信は、CDMAパケット交換方式によりTCPセグメントを通信する方式が主流となってゆくことが予想される。

このようなCDMAパケット交換方式を用いたワイヤレスセルラーネットワーク上でTCPセグメントを通信する場合、従来TCPが用いられてきた有線ネットワークに比べ、下記を考慮することが必要である。

- (1) 無線回線上で、通信誤りが頻繁に発生する。
- (2) CDMAパケット交換方式では、従来用いられてきたTDMA方式とは異なり、無線端末から任意のタイミングで基地局へアクセス可能となる。このためアップリンクでは、無線端末間のチャンネル競合が発生することになりスロット付きアロハ方式などのデータリンクプロトコルが用いられ、TCPセグメントは、その上位層で通信される。

従来、ワイヤレスセルラーネットワークのネットワ

ーク特性評価に関する研究は、CDMAパケット通信とTCPからのアプローチがなされてきた。CDMAパケット通信側からのアプローチは、主にスロット付きアロハ方式などのランダム多重アクセス方式を用いて、データリンク層レベルで解析、シミュレーションによる研究²⁾³⁾がなされてきた。しかし、これらの研究では、スロット付きアロハ方式で発生するパケット衝突の影響のみに着目したスループット、遅延評価にとどまっており、上位層にTCPを想定した場合には、これらのパケット衝突で発生するランダムな遅延時間がTCPの輻輳制御のベースになっているRTT(Round Trip Time)に与える影響を考慮してネットワーク特性を評価する必要がある。

一方、TCP側からのアプローチとしては、(1)であげた無線回線上の通信誤りがTCPの輻輳制御に与える影響について⁴⁾⁵⁾において検討されている。しかしこれらの検討では、TCPセグメントが通信誤りにより棄却されることによるRTTの変動にのみ着目した評価検討であり、下位層のスロット付きアロハ方式によるパケット棄却がRTTに与える影響については考慮されていない。つまりワイヤレスセルラーネットワークにおけるTCP性能評価において、データリンク層(スロット付きアロハ方式)の影響を考慮した検討はされていなかった。

このような状況の中、ワイヤレスセルラーネットワークからインターネットにアクセスする需要が急速に発展してきたこともあり、既存の実用化システムベ

* (社)電子情報通信学会の了解を得て、信学技報Vol.100 No.398, CQ2000-46(2000.10)より一部加筆して転載

スでの検討⁹⁾もされ、PHS(Personal Handy-phone System)で実測にもとづいたTCPスループット評価が報告されている。しかしその評価結果の分析は、データリンク層がTCP層に与える影響などの解析的なメカニズムが明らかになっていないため、スループット劣化のメカニズムなど踏み込んだ検討はなされておらず、実測結果の設計パラメータへのフィードバックなどもされていない。

そこで本稿ではワイヤレスセルラーネットワークにおけるTCP性能評価モデルを構築し、無線特有のデータリンク層、無線回線上の通信誤りがTCP層に与える影響について考察し、具体的なTCPスループット向上方法について示した。

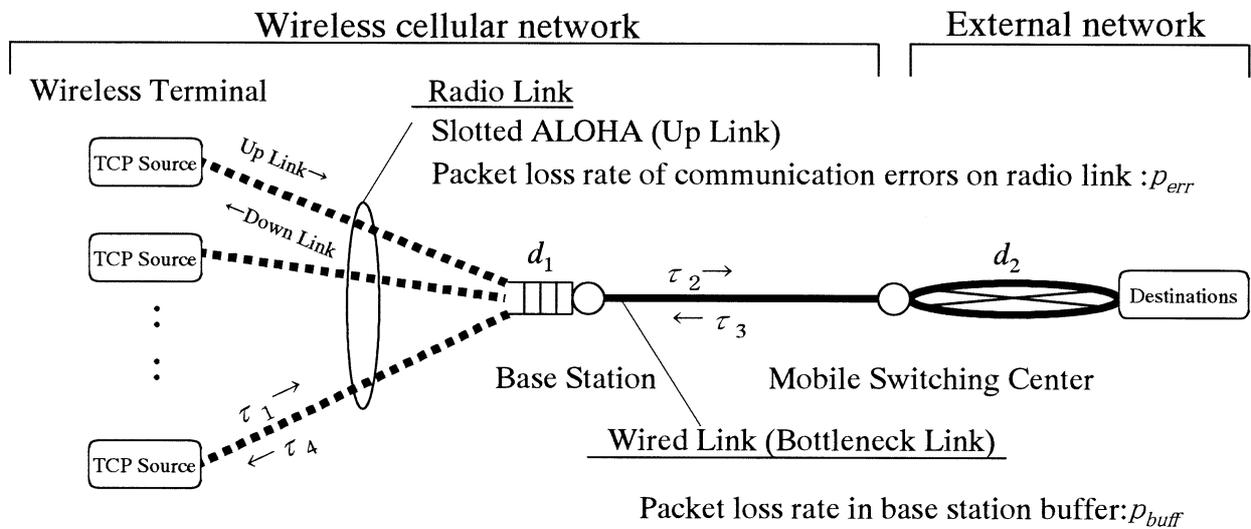
以下、2章でTCP性能評価のためのワイヤレスセルラーネットワークモデルについて解説し、3章では、解析モデルおよびシミュレーションモデルについて説明する。4章では、無線特有のデータリンク層、無線

回線上の通信誤りがTCP層に与える影響について考察する。最後に5章で、まとめと今後の研究課題について述べる。

2. TCP性能評価のための

ワイヤレスセルラーネットワークモデル

本稿でのネットワークモデルをFig. 1に示す。TCPセグメントは、各無線端末をSourceとして、外部ネットワークに接続されたDestinations宛てに通信される。ここでアプリケーションプロトコルはFTPとし、TCPセグメントは連続通信される。なおTCPのバージョンは、現在の実装において主流となっているRenoとする。以下、ネットワークモデルにおけるネットワーク構成、遅延時間、パケット棄却、アップリンク無線データリンク層(スロット付きアロハ方式)について説明する。



$\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$: propagation delay

d_1 : delay in bottleneck buffer, d_2 : delay on external network

Fig.1 The model of wireless cellular networks

[ネットワーク構成]

ワイヤレスセルラーネットワークは、

- ・無線端末：MT (Mobile Terminal)
- ・基地局：BS (Base Station)
- ・移動局交換局：MSC (Mobile Switching Center)

から構成され、移動局交換局を経由して外部ネットワークに接続される。ここで無線端末と基地局間が無線回線、基地局と移動局交換局間は有線回線である。

またIMT-2000を想定し、無線帯域 $B_1=2\text{Mbps}$ 、有線帯域 $B_2=125\text{kbps}$ とする。また本稿ではボトルネックリンクは有線回線にあるものとして、アップリンクの基地局と移動局交換局間とした。

[遅延時間]

ワイヤレスセルラーネットワークでの遅延時間の発生要因として、伝播遅延時間、ボトルネックのバッファでの滞在時間があげられる。本ネットワークモデル

では、各リンクでの伝播遅延時間、基地局バッファ滞在遅延時間をモデルとして組み込む。またワイヤレスセルラーネットワーク内での遅延時間ではないが、TCPネットワーク特性を考える上で、外部ネットワーク滞在遅延時間も遅延時間としてモデルに組み込む。

[パケット棄却]

ワイヤレスセルラーネットワークでのパケット棄却の発生要因として、通信誤りとバッファオーバーフローがあげられる。本ネットワークモデルでは、アップリンクの無線回線での通信誤り、ポトルネックリンクの基地局バッファでのオーバーフローによるパケット棄却をモデルとして組み込む。そしてこれらは独立に発生するものと仮定する。

なおダウンリンクでの通信誤りによるパケット棄却は、ACKが棄却されることになり、5章に示したように別途検討することとし、今回のモデルには組み込まない。また誤り訂正は、ARQ(Automatic Repeat Request)とFEC(Forward Error Correction)を想定して、4章でその影響について述べる。

[アップリンク無線データリンク層]

無線端末から基地局にアクセスするアップリンクは、無線端末間の競合が発生する。本ネットワークモデルのアップリンク無線データリンク層は、従来ワイヤレスセルラーネットワークにおいてCDMAパケット通信の検討で用いられてきたスロット付きアロハ方式²⁾⁾を用いる。

ここでデータリンク層のパケット棄却がTCP層へ与える影響を考える。データリンク層レベルの競合によるパケット棄却発生した場合は、データリンク層レベルで棄却パケットを再送するので、TCP層でのパケット棄却とはならない。

つまりデータリンク層のパケット棄却がTCP層へ与える影響は、パケット棄却ではなく、棄却パケット再送による伝播遅延時間として影響すると考える。

3. TCPモデル

本章では、ワイヤレスセルラーネットワーク上でTCPスループット評価のために導出した解析モデルと、検証に用いたシミュレーションモデルについて説明する。

3.1 解析モデル

文献⁷⁾で、TCP輻輳制御を解析モデル化してTCPウィンドウフロー制御が定常状態に達したときのスループット S_{TCP} 、およびウィンドウサイズ W を算出する¹⁾、

(2)式が知られている。本稿では、TCP輻輳制御はこの式を引用し、2章のワイヤレスセルラーネットワークモデルでの RTT, T_0, p を解析により導出し、(1)、(2)式に代入する。

$$S_{TCP} = \frac{1}{RTT\sqrt{\frac{2bp}{3}} + T_0 \min(1, \sqrt[3]{\frac{3bp}{8}})} (1+32p^2) \quad (1)$$

$$W = \frac{2+b}{3b} + \sqrt{\frac{2(1-b)}{3bp} + \left(\frac{2+b}{3b}\right)^2} \quad (2)$$

ここで S_{TCP} は定常状態でのTCPのスループット、 p はパケット棄却率、 b はdelayed ACKパラメータ(本稿では、一般的に用いられる値 $b=2$ とする。)、 RTT はラウンドトリップ時間、 T_0 はタイムアウト時間である。解析にあたって、(1)式の導出には期待値が用いられているため、ラウンドトリップ時間の期待値 $E[RTT]$ 、タイムアウト時間の期待値 $E[T_0]$ を導出する。さらに(1)式と同様に、トラヒックの発生はポアソン分布に従うものとし、算出するTCPスループットは定常状態の値である。以下 $E[RTT], E[T_0], p$ の導出方法を示す。

3.1.1 ラウンドトリップ時間の期待値： $E[RTT]$

2章のネットワークモデルでは、ラウンドトリップ時間の期待値 $E[RTT]$ は、ネットワーク上の遅延時間の総和、

$$E[RTT] = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + d_1 + d_2 \quad (3)$$

である。理想的なワイヤレスセルラーネットワークでは、有線回線の伝播遅延時間 t_2, t_3, t_4 と基地局バッファ滞在遅延時間 d_1 は、アップリンク伝播遅延時間 t_1 と外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 に比べて無視できるほど小さいので(3)式は、

$$E[RTT] = t_1 + d_2 \quad (4)$$

と近似できる。外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 は評価パラメータとして与えるので、アップリンク伝播遅延時間の期待値 $E[t_1]$ を解析により導出する。アップリンクのデータリンク層プロトコルスロット付きアロハ方式のスループット S_{ALOHA} に関しては、文献⁸⁾で、トラヒックの発生がポアソン分布に従い、(6)式にお

いて $N > nW$ のとき、印加トラヒック G 、パケット長 L を用いて、

$$S_{ALOHA} = \frac{G}{L} \exp(-G) \quad (5)$$

と表わされることが知られている。なお印加トラヒック G は、無線端末数 n 、TCP ウィンドウサイズ W 、各無線端末でのパケット送信間隔 N を用いて、(6) 式で表わすことができる。

$$G = \frac{nW}{N} \quad (6)$$

ここで i 回パケット衝突後に、送信成功する場合のアップリンク伝播遅延時間の期待値 $E[i]$ は、

S_{ALOHA} 、 L 、 N を用いて、

$$E[i] = (i+1)NL(1 - S_{ALOHA}) S_{ALOHA} \quad (7)$$

と表わすことができる。これらの総和を求めることで、アップリンク伝播遅延時間は、

$$E[i] = (i+1)NL(1 - S_{ALOHA}) S_{ALOHA} \quad (8)$$

と求めることができ、 $E[RTT]$ は、外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 を加えて 9 式で表わすことができる。

$$E[RTT] = (i+1)NL(1 - S_{ALOHA}) S_{ALOHA} + d_2 \quad (9)$$

3.1.2 タイムアウト時間の期待値： $E[To]$

文献⁹⁾で、TCPのタイムアウト時間 To は(10)式で表わされることが知られている。

$$To = rtt_old + 4rtt_var \quad (10)$$

ここで、外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 が一定の場合、 rtt_old 、 rtt_var にそれぞれの期待値を用いて、タイムアウト時間の期待値 $E[To]$ は、(11)式で表わすことができる。

$$E[To] = E[RTT] + 4 \sum_{i=0}^{\infty} |E[i] - E[i]| \quad (11)$$

3.1.3 パケット棄却率 P

2章のネットワークモデルで、パケット棄却は、無線回線上の通信誤り、およびボトルネックリンクのバッファで発生するとした。ここで、ネットワーク全体のパケット棄却率 P について考えると、本ネットワーク構成では、Fig. 2 のように無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 P_{err} 、基地局バッファでのパケット棄却率 P_{buff} が直列であるので、(12)式で表わすことができる。

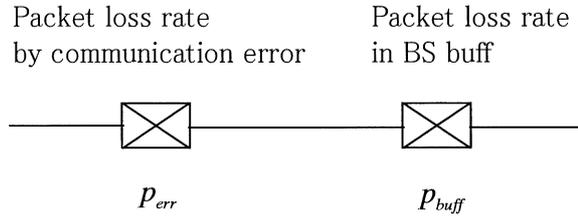


Fig.2 Deriving packet loss rate p

以上の解析結果より、(1)式にあてはめる $E[RTT]$ 、 $E[To]$ 、 P は、それぞれ(9)、(11)、(12)式で表わすことができ、2章のワイヤレスセルラーネットワークモデルにおけるTCPスループット S_{TCP} は、下記をパラメータとして解析的に求めることができる。

- ・無線端末数 n
- ・パケット長 (TCPセグメントサイズ) L
- ・各無線端末でのパケット送信間隔 N
- ・外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2
- ・無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 P_{err}
- ・基地局バッファでのパケット棄却率 P_{buff}

3.2 シミュレーションモデル

シミュレーションは、TCPネットワーク特性評価研究で用いられている ns 2¹⁰⁾ を使用した。

ns 2 でデータリンク層の伝播遅延を検討するには、CSMA / CD 等の遅延時間算出ライブラリをリンクする。今回の検討では、Fig. 3 のパケットフローにもとづいて、スロット付きアロハ方式のライブラリを作成し、ns 2 にリンクしてシミュレーションを行った。

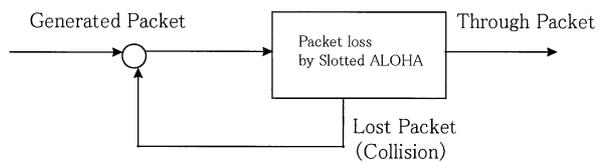


Fig. 3 The model of slotted ALOHA packet follow

3.3 解析、シミュレーション結果比較

解析、シミュレーションの比較結果を無線端末数が 5 ノードの場合 Fig. 4、30 ノードの場合 Fig. 5 に示した。

比較は、無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 P_{err} と、基地局バッファでのパケット棄却率 P_{buff} を合わせたネットワーク全体のパケット棄却率 P に対する TCP スループットについて行なった。

ここで P は、(12)式に示したように、 P_{buff} P_{err} のときは、 P_{buff} が支配的となり、逆に P_{err} P_{buff}

のとき P_{err} が支配的となる．4章で評価検討する場合には簡単のため P_{buff} または P_{err} のどちらかが十分大きい場合について考え， P_{buff} または P_{err} のどちらか一方を “0” として考ている．

今回の解析で引用したTCP輻輳制御モデル(1)式は，その導出仮定において近似を用いており，その誤差は $\pm 20\%$ といわれている．今回の比較結果 Fig. 4, Fig. 5 はその誤差範囲内であるといえる．ここで評価パラメータとして設定した値は Table 1 である．

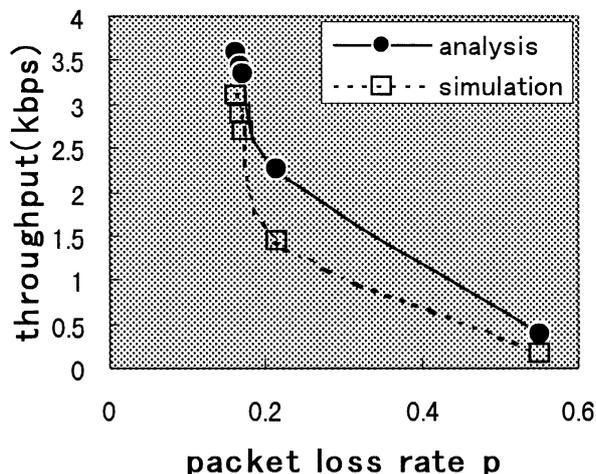


Fig.4 TCP throughput comparison (The number of wireless terminals is 5)

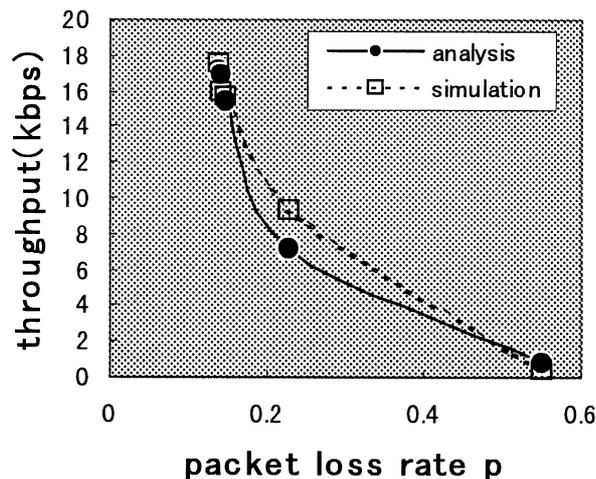


Fig.5 TCP throughput comparison (The number of wireless terminals is 30)

Table1 Parameter sets

Bandwidth of radio link	2 Mbps
Bandwidth of wired link	125 kbps
TCP segment size	100 bytes
Packet transmission interval N	70 packets (5 nodes) 35 packets (30 nodes)
TCP throughput External network delay d_e	100 ms

4. ワイヤレスセルラーネットワークの特徴が TCPスループットに与える影響の考察

本章では，3章で導出した解析モデルを用いて，ワイヤレスセルラーネットワークにおける無線特有のデータリンク層と，無線回線上的通信誤りが，TCPスループットに与える影響について考察し，具体的なスループット向上方法について検討する．

4.1 データリンク層がTCPスループットに与える影響

パケット送信間隔 N に対するスロット付きアロハ方式のスループット S_{ALOHA} と TCPスループット S_{TCP} のシミュレーション結果を Fig. 6, Fig7 に示す．

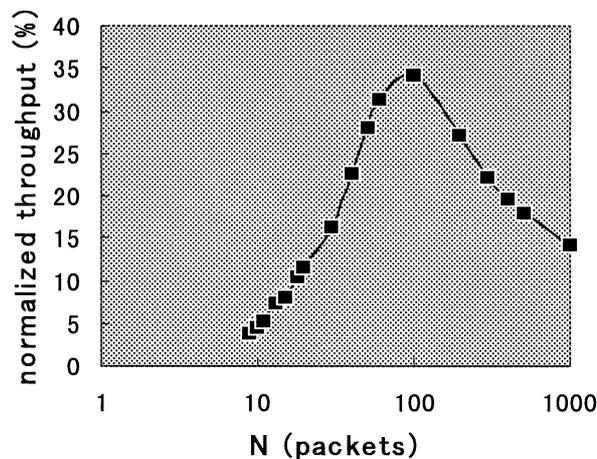


Fig. 6 Slotted ALOHA throughput S_{ALOHA}

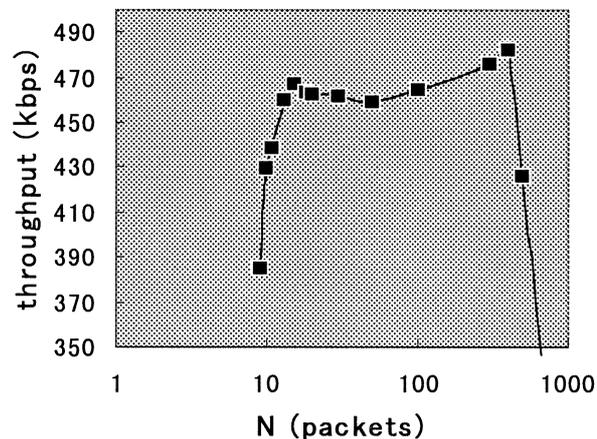


Fig. 7 TCP throughput S_{TCP}

Fig. 6 , Fig. 7 算出時のパラメータ

- 無線端末数 n : 30 (node)
- パケット長(TCPセグメントサイズ) L : 100 (bytes)
- 外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 : α (ms)
- 無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 P_{err} : 0

この図からわかるように、 S_{ALOHA} を最大にするパケット送信間隔 N で、 S_{TCP} は最大になっていない。これは S_{ALOHA} 最大するとき、TCP レベルでは流入するトラフィック量が、多くなりすぎて、基地局バッファでパケット棄却が発生し、 S_{TCP} が低下しているためである。このことからわかるように、データリンク層のパラメータ(ここではパケット送信間隔 N)は、TCPスループットにも影響を及ぼすため、単にデータリンク層だけでなく、TCP層のスループットを考慮した上で決める必要がある。

4.2 無線回線上の通信誤りがTCPスループットに与える影響

Fig. 8に示したように、無線回線上の通信誤りが頻繁に発生する状態では、TCPのタイムアウト制御により、スループットが急激に低下する。このため、通常ARQ,FECなどの誤り訂正手法を用いて、スループットの低下を防止する。

この誤り訂正手法に関する検討として、ARQよりFEC(Reed Solomor(127,117))のほうが、スループットが急低下するノイズレベル点がより小さいため有利であることが既に報告されている⁵⁾。しかし、FECを用いた場合、誤り訂正能力を上げると冗長符号が多くなり、通信時のオーバーヘッドが大きくなるため、ノイズレベルの低い領域では、かえってスループットが低下する問題がある。

そこで本稿ではスループット低下開始点だけでなく、FECのオーバーヘッドにも着目して、トレードオフの関係であるFECの誤り訂正能力と通信時のオーバーヘッドを、ノイズレベルに応じてコントロールすれば、全ノイズレベル領域で高いTCPスループットが得られることをFig. 8のFEC (slide correct)に示した。

Fig. 8算出時のパラメータ

- 無線端末数 n : 5 (node)
- パケット長(TCPセグメントサイズ) L : 100 (bytes)
- 各無線端末でのパケット送信間隔 N : 10 (packets)
- 外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 : 0 (ms)
- 基地局バッファでのパケット棄却率 P_{buff} : 0
- FEC(5 bit correct)はReed Solomor(127,117)を使用

- FEC(20 bit correct)はReed Solomor(127,87)を使用
- ARQの再送回数は1回、オーバーヘッドは5%

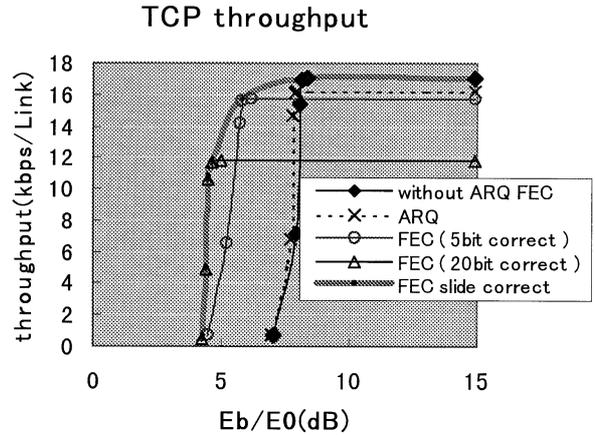


Fig.8 Comparison of error correcting method

ここで、Fig. 8は3章で導出した解析モデルで、無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 p_{err} を変化させて算出している。なおARQ,FECを用いた場合のノイズレベル E_b / E_0 に対する p_{err} の算出方法に関しては、⁵⁾を参照されたい。

ARQ,FECのパラメータに関して、ARQの再送回数は1回とし、通信時のオーバーヘッドは⁶⁾を参考に5%とした。また⁵⁾で明らかにされているようにARQ再送回数を増やしても、スループット劣化開始点はFECより勝ることはなかった。

同様にFECの誤り訂正能力を、20bit以上に増やしてもスループット劣化の様子は変わらなかった。

さらにパケット送信間隔 N をTCPスループットが最大($N = 400$)または最小($N = 75$)付近に変化させてもスループット劣化の様子は変わらなかった。

以上のように、従来、無線回線上の通信誤りでTCPスループットが低下する対策として、FECが有効とされてきたが、本稿で提案したFEC (slide correct)方式を用いれば、全ノイズレベル領域でTCPスループットを向上させることができる。

5. むすび

本稿では、ワイヤレスセルラーネットワークにおけるTCP性能評価モデルを構築し、無線特有のデータリンク層、無線回線上の通信誤りがTCP層に与える影響について検討した。その結果

- データリンク層レベルでスループットを向上させることが、必ずしもTCPスループット向上にはつながらず、データリンク / TCP層のそれぞれの影響

を考慮した上で、データリンク層パラメータを定めれば、TCPスループット向上できることを示した。

- ・無線回線上の通信誤りの対策でFECを用いた場合、誤り訂正能力を上げると、通信オーバーヘッドが大きくなり、ノイズレベルの低い領域では、かえってスループットが低下する問題があった。そこで本稿では、FEC(slide correct)方式を用い、全ノイズレベル領域でTCPスループットを向上できることを示した。

今回ACKは棄却されないとしたが、棄却される場合のTCP性能評価、また4.1項における*perr*の具体的な推定方法、4.2項におけるFEC(slide correct)方式の実現方法の検討は、今後の研究課題とする。

謝辞

本研究は、大阪大学大学院基礎工学研究科情報数理系専攻留学中の成果である。ここにご指導頂いた菅野正嗣先生、村田正幸先生に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) <http://www.itu.int/imt/>
- 2) 斎藤 将人, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "CDMA Slotted ALOHA方式のスループット特性に関する一検討," 信学技報 SST99-21, pp.37-42, July. 1999.
- 3) R. D. J. van Nee, R. N. van Wolfswinkel, R. Prasad, "Slotted ALOHA and code division multiple access techniques for land-mobile satellite personal communications," IEEE J. Select., Areas Commun., vol. 13, no. 2, pp.382-388, Feb. 1995.
- 4) P. Sinha, N. Venkitaraman, R. Sivakumar, V. Bhargavan, "WTCP: A Reliable Transport Protocol for Wireless Wide-Area Networks," Proceedings of ACM Mobicom99, pp.231-241, Aug. 1999.
- 5) 内藤 克浩, 岡田 啓, 斎藤 将人, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "無線環境下におけるTCPのスループット解析に関する一検討," 信学技報 SST99-90, pp.107-113, Feb. 2000.
- 6) 藤瀬 雅行, 川端 文雄, 今林 淳, 小野塚 信夫, 井戸上 彰, 加藤 聡彦, "PHS データ通信プロトコル(PIAFS)上でのTCP/IP通信実験," 信学技報 IN97-60, July 1997.
- 7) J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation," Proceedings of ACM SIGCOMM98, September 1998.
- 8) 小川 明, 山里 敬也共著, 「CDMA方式と次世代移動体通信システム」, トリケップス社, 1996.

9) W. R. Stevens, TCP/IP Illustrated Volume 1: The Protocols. Addison-Wesley, 1994.

10) <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



<著者>



三好 昌弘
(みよし まさひろ)

ポデー機器技術3部
車載LANに関する研究開発に従事。



菅野 正嗣
(すがの まさし)

大阪府立看護大・医療技術短期大学部 助教授 工学博士
通信ネットワークの設計・性能評価, 無線通信システムに関する研究に従事。



村田 正幸
(むらた まさゆき)

大阪大学サイバーメディアセンター 工学博士
待ち行列理論, システム性能評価, 広帯域通信網などの研究に従事。