

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

三好 昌弘† 菅野正嗣‡ 村田正幸†

†大阪大学大学院基礎工学研究科情報数理系専攻
〒560-8531 大阪府豊中市待兼山 1-3
Tel: 06-6850-6588, Fax: 06-6850-6589
E-mail: mmiyoshi@d3.dion.ne.jp, murata@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡大阪府立看護大学 医療技術短期大学部
〒583-8555 大阪府羽曳野市はびきの 3-7-30
Tel: 0729-50-2111, Fax: 0729-50-2131
E-mail: sugano@osaka-hsu.ac.jp

あらまし ワイヤレスセルラーネットワークにおけるデータリンク層としてスロット付きアロハ方式を採用し、無線回線の通信誤りの影響を考慮した TCP 性能評価モデルを構築し、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ないことを明らかにした。さらにデータリンク/TCP 層のそれぞれの影響を考慮してネットワークパラメータを定めれば、TCP スループットが向上できることも示した。一方、無線回線の通信誤り訂正手法としてノイズレベルに応じて誤り訂正能力を切り換えることによって、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。

キーワード ワイヤレスセルラーネットワーク、TCP、スロット付きアロハ方式、ARQ、FEC

Performance Evaluation of TCP Throughput on Wireless Cellular Networks

Masahiro Miyoshi † Masashi Sugano ‡ Masayuki Murata †

† Department of Infomatics and Mathematical Science,
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan
Tel: +81-6-6850-6588, Fax: +81-6-6850-6589
E-mail: mmiyoshi@d3.dion.ne.jp, murata@ics.es.osaka-u.ac.jp

‡ Osaka Prefecture College of Health Sciences,
3-7-30 Habikino, Habikino, Osaka 583-8555, Japan
Tel: +81-729-50-2111, Fax: +81-729-50-2131
E-mail: sugano@osaka-hsu.ac.jp

Abstract 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.

Keyword Wireless cellular network, TCP, slotted ALOHA, ARQ, FEC

1. はじめに

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)[1]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つ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、おもにスロット付きアロハ方式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ースでの検討 [6]もされ、PHS(Personal Handyphone 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し、具体的な TCP スループット向上方法について検討する。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(図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。

[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。

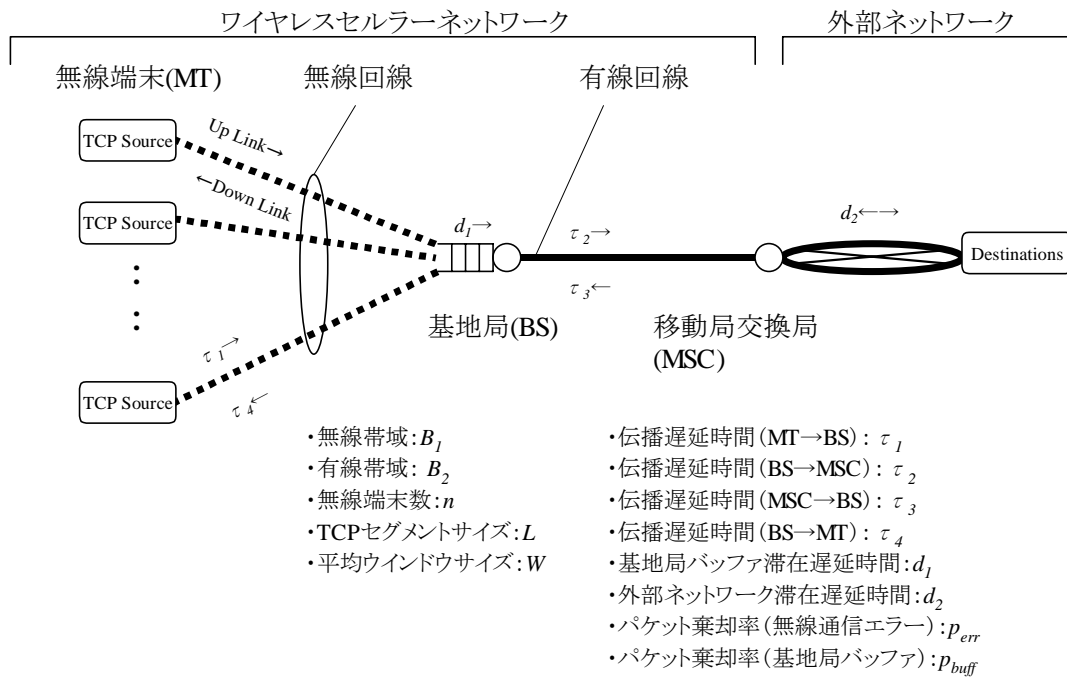
[遅延時間]

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上の通信誤り、ボ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



(図1) ワイヤレスセルラーネットワークモデル

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][3]を用いる。

ここでデータリンク層の packets 棄却在 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 packets 棄却発生した場合は、データリンク層レベルで棄却 packets を再送するので、TCP 層での packets 棄却とはならない。

つまりデータリンク層の packets 棄却在 TCP 層へ与える影響は、packets 棄却ではなく、棄却 packets 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 、 To 、 p を解析により導出し、(1)、(2)式に代入する。

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

$$W = \frac{2+b}{3b} + \sqrt{\frac{8(1-p)}{3bp} + \left(\frac{2+b}{3b}\right)^2} \quad (2)$$

ここで S_{TCP} は定常状態での TCP のスループット、 p は packets 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、 To 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 $E[To]$ 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 $E[RTT]$ 、 $E[To]$ 、 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、

$$E[RTT] = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + d_1 + d_2 \quad (3)$$

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 τ_2 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 τ_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、

$$E[RTT] \approx \tau_1 + d_2 \quad (4)$$

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 $E[\tau_i]$ 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 $N \gg nW$ 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 $E[\tau_i]$ は、 S_{ALOHA} 、 L 、 N を用いて、

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

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、

$$E[\tau_1] = \sum_{i=0}^{\infty} (i+1)NL(1-S_{ALOHA})^i S_{ALOHA} \quad (8)$$

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。

$$E[RTT] = \sum_{i=0}^{\infty} (i+1)NL(1-S_{ALOHA})^i S_{ALOHA} + d_2 \quad (9)$$

3.1.2 タイムアウト時間の期待値： $E[To]$

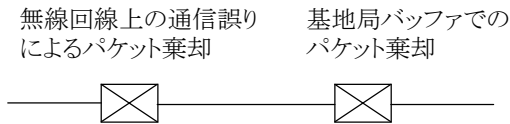
文献[9]で、TCP のタイムアウト時間 To は(10)式で表わされることが知られている。

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

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。

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

3.1.3 パケット棄却率 p



(図2)パケット棄却率 p の導出

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、(図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。

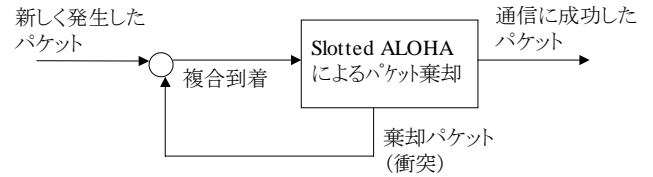
$$p = p_{err} + p_{buff} - p_{err} p_{buff} \quad (12)$$

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 ns2[10]を使用した。ns2 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、(図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、ns2 にリンクしてシミュレーションを行った。



(図3)スロット付きアロハ方式パケットフローのモデル

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(図4)、30 ノードの場合(図5)について示した。

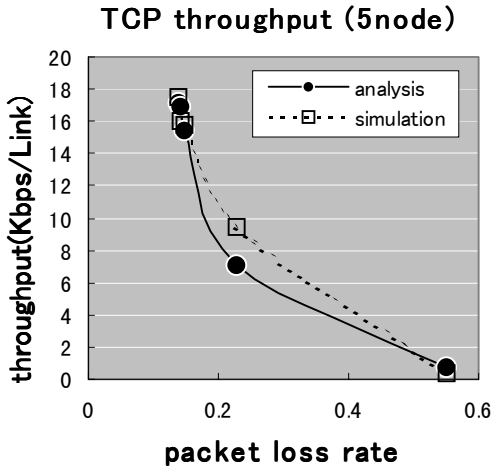
比較は、無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 p_{err} と、基地局バッファでのパケット棄却率 p_{buff} を合わせたネットワーク全体のパケット棄却率 p に対する TCP スループットについて行なった。

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} のときは 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} 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} どちらか一方を "0" として考えている。

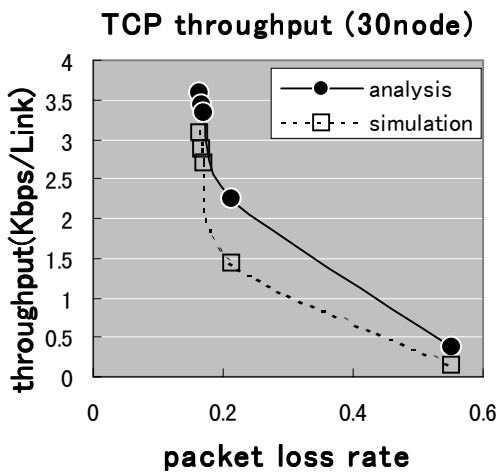
今回の解析で引用した TCP 輻輳制御モデル(1)式は、その導出仮定において近似を用いており、その誤差は $\pm 20\%$ といわれている。今回の比較結果(図4)、(図5)はその誤差範囲内であるといえる。ここで評価パラメータとして設定した値は(表1)である。

(表1) 解析、シミュレーション固定パラメータ

無線端末数 n	5node, 30node
パケット長 L	100bytes
パケット送信間隔 N	35packets (5node) 70packets (30node)
外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2	100ms



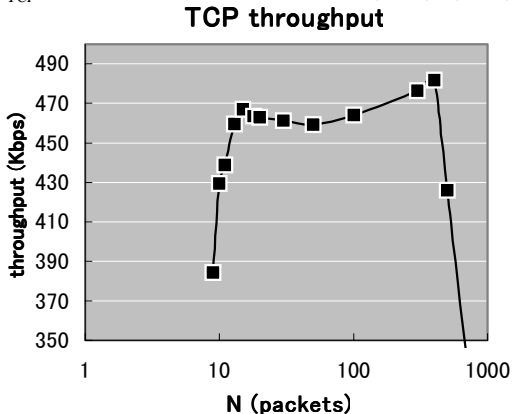
(図 4) TCP スループット比較(無線端末数 5)



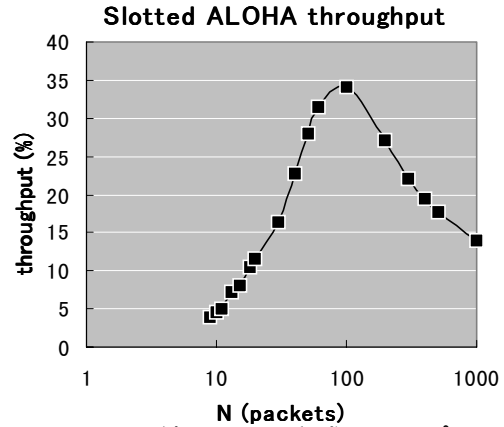
(図 5) TCP スループット比較(無線端末数 30)

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(図 6)、(図 7)に示す。



(図 6) TCP スループット S_{TCP}



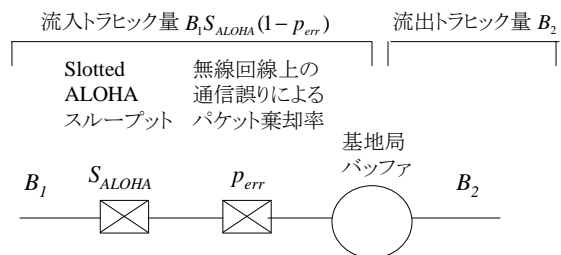
(図 7) スロット付きアロハ方式スループット S_{ALOHA}

(図 6)、(図 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 : 0 (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ヒック量が、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ことが必要である。下記に、TCP スループットが最大になるパケット送信間隔 N を解析推定する方法を示す。

[TCP スループットが最大となるデータリンク層パラメータの推定方法]



(図 8)基地局バッファでのトラヒックフロー

まず TCP レベルでパケット棄却が発生しない条件は、(図 8)に示したように、バッファに流入するトラヒック量と、流出するトラヒック量がつりあう条件

$$B_1 S_{ALOHA} (1 - p_{err}) = B_2 \quad (13)$$

であり、このとき(13)式から TCP スループットを最大とする S_{ALOHA} を求めることができ、さらに(5)、(6)式により、 S_{ALOHA} に対するパケット送信間隔 N を求めることができる。

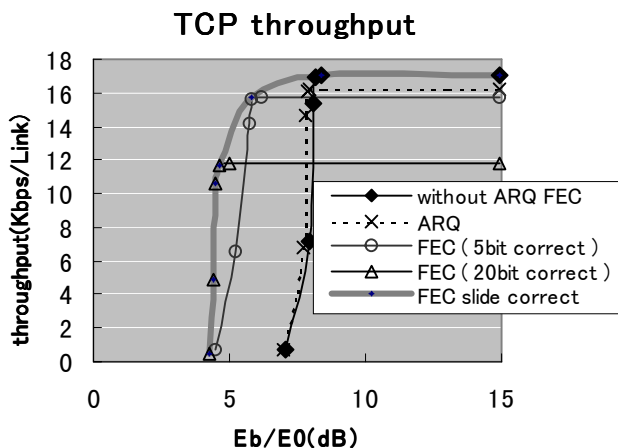
なお、(5)式が成立する前提として $N \gg nW$ であるので、ここでの TCP スループット最大点は、(図 6)の $N = 400$ の点とする。

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

(図 9)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 Solomon(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(図 9)の FEC (slide correct)に示した。



(図 9)ノイズレベルに対する TCP スループット

(図 9)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 Solomon(127,117) を使用
- FEC (20 bit correct) は Reed Solomon(127,87) を使用
- ARQ の再送回数は 1 回、オーバーヘッドは 5%

ここで、(図 9)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. まとめと今後の課題

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 における p_{err} の具体的な推定方法、4.2 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。

文献

- <http://www.itu.int/imt/>
- 齋藤 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-pp.42, July, 1999.
- 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.
- P. Sinha, N. Venkitaraman, R. Sivakumar, V. Bharghavan, “WTCP: A Reliable Transport Protocol for Wireless Wide-Area Networks,” Proceedings of ACM Mobicom99, pp.231-241, Aug. 1999.
- 内藤 克浩, 岡田 啓, 齋藤 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-pp.113, Feb. 2000.
- 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.
- 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.
- 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.
- W. R. Stevens, TCP/IP Illustrated Volume 1: The Protocols. Addison-Wesley, 1994.
- <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>