

研究速報

TCP スループットに対する無線層での FEC, ARQ 適用に関する一考察

内藤 克浩^{†a)}(学生員) 岡田 啓[†](学生員)
 山里 敬也^{††}(正員) 片山 正昭[†](正員)
 小川 明[†](正員)

Study on TCP Throughput with FEC and ARQ in a Wireless Link

Katsuhiro NAITO^{†a)}, Hiraku OKADA[†], *Student Members*,
 Takaya YAMAZATO^{††}, Masaaki KATAYAMA[†],
 and Akira OGAWA[†], *Regular Members*

[†] 名古屋大学大学院工学研究科, 名古屋市

Department of Information Electronics, Graduate School
 of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku
 Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 名古屋大学情報メディア教育センター, 名古屋市

Center for Information Media Studies, Nagoya University,
 Furo-cho Chikusa-ku Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: naito@ogawa.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらまし 無線環境下では, TCP の性能は著しく劣化することが知られている. 本研究では, 無線リンクにおいて誤り訂正機構を適用した場合の基礎的な理論解析を行い, 比較検討を行う. 結果より, TCP の性能改善には, 伝送誤りの発生分布に適した誤り訂正符号, 再送機構を利用する必要があることを示す.

キーワード TCP, インターネット, FEC, ARQ

1. ま え が き

急激な無線通信技術の発展とインターネットの普及により, 無線通信環境からのインターネットへのアクセス数が今後も増加すると考えられる. インターネットで利用されるアプリケーション(WWW, FTP, TELNET など)では, TCP (Transmission Control Protocol) が信頼性プロトコルとして多く利用されている. TCP は本来, 有線ネットワークで発展したプロトコルであり, セグメントの損失は主に輻輳^{ひくそう}により発生する場合が考慮されている [1], [2].

一方, 無線ネットワークでは, 有線ネットワークに比べ通信路状態が劣悪であるため, セグメント損は輻輳により発生するだけでなく, 無線リンクでの伝送誤りによっても発生する. そのため, 無線ネットワークでのセグメント損は有線ネットワークに比べより頻繁に発生する. また, 無線リンクでの伝送誤りは, AWGN 環境下で一樣ランダムに発生し, フェージング環境下では, 伝送誤りはバースト的に発生するが, そのバースト誤りはランダムに発生する特徴をもつ. セグメント損が頻繁に発生する場合, TCP の性能が

非常に劣化することが知られている [3], [4].

既存の研究では, 無線ネットワークにおける TCP の性能劣化の影響について, シミュレーション, 実測値などから議論が行われている [5]~[9]. また, 無線ネットワークでは, TCP の性能が非常に劣化するため, 無線リンクにおいて, FEC, ARQ などの誤り訂正機構を考慮したシミュレーションなどが行われている [10]. しかし, 既存の研究では, TCP の特性改善のために改良したプロトコルについて, シミュレーションなどは行われているが, そのプロトコルで利用される誤り訂正機構がどのような特性をもつかについては, 理論的な検討は行われていない.

そこで, 本研究では, AWGN (Additive White Gaussian Noise), Rayleigh フェージング環境に対して, 無線リンクで FEC (Forward Error Correction) として Reed Solomon 符号, ARQ (Automatic Repeat reQuest) として Go-Back-N 方式を適用した場合, TCP のスループット特性はどのように改善するのかについて, 解析的に比較検討を行う. また, TCP のスループットは筆者らが提案した解析手法 [11] を改良することで導出される.

2. ネットワークモデル

本研究では, 無線リンクでの伝送誤りによる TCP スループットの劣化について考える. ここで, 輻輳による TCP スループットの劣化は考慮しない. また, 無線リンクでの伝送誤りによるセグメント損は, ランダムに発生するため, 本研究ではセグメント損がランダムに発生する条件を考慮する. なお, TCP スループットの導出には, 筆者らが提案した解析手法 [11] を利用する. 提案した解析手法では, TCP の輻輳ウィンドウの変化を RTT (Round Trip Time) でのマルコフ連鎖としてモデル化を行い, マルコフ連鎖の定常状態からスループットを求める. マルコフ連鎖における遷移確率は, セグメント損率により決定される.

図 1 に仮定するネットワークを示す. 送信者において TCP セグメントは IP データグラムにカプセル化される. その後, 無線リンクにおいて F 個のフレームに分割されて送信される. フレーム内に誤りが発生した場合には, そのフレームは損失する.

本研究では, フレーム送信時間に比べフェージング間隔が長い, フレーム内での振幅が一定の条件を検討する. この条件を満たす例としてキャリア周波数が 2[GHz], 伝送速度が 384[kbits/s], フレーム伝送時間が 10[ms], 移動速度が歩行速度の条件がある. この条

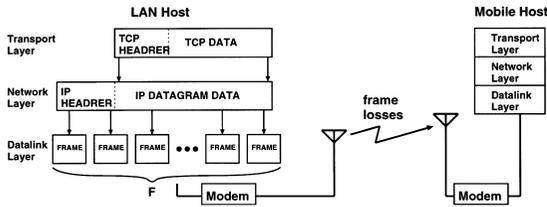


図1 移動ホストとLANホスト間のネットワーク

Fig.1 A TCP connection between mobile host and LAN host.

件では、ドップラシフト周波数が約 15[Hz] となり、フレーム送信時間に比べフェージング期間が長くなる。また、解析の簡単化のため、各フレームの振幅が独立である条件を検討する。そのため、各フレームは AWGN 環境下ではランダムに損失する条件、Rayleigh フェージング環境下では、各フレーム内で振幅は一定、各フレームの振幅の分布が Rayleigh 分布であり、各フレームの分布は独立である条件を考える。なお、FEC としてはブロック符号、ARQ としては Go-Back-N 方式を各フレームに適用するものとする。

3. スループットの導出

本章では、特定の分布を考えた TCP スループットの導出について述べる。情報ビット当りのエネルギーを E_b 、各フレームの振幅の確率密度関数を $f(\cdot)$ 、フレーム内での受信シンボルの振幅を A とする。また、受信シンボルの振幅が A のときの無線リンクでのビット誤り率を $p_b(A)$ とする。なお、本研究では、AWGN 環境下と Rayleigh フェージング環境下について考える。よって、AWGN 環境下では、確率密度関数は Delta 関数を適用し、レイリーフェージング環境下では、レイリー分布の確率密度関数を適用する。

筆者らが提案した TCP スループットの解析手法では、マルコフ連鎖の遷移確率を求めるために、セグメント損率が必要となる。よって、セグメント損率の導出について述べる。

3.1 誤り訂正機構を適用しないときの TCP スループット

フレームが正常に送信されるには、すべてのビットが誤りなく送信される必要がある。次に、1 フレームのビット長が L 、1 フレーム時間内において受信シンボルの振幅が A であるときの、フレーム損率を示す。

$$p_f(A) = 1 - (1 - p_b(A))^L \quad (1)$$

セグメントの送信が成功するのは、 F 個のフレーム

がすべて誤りなく送信できた場合である。 i 番目のフレームのフレーム損率を p_{f_i} 、確率密度関数を $f(A_i)$ とする。セグメント損率は次式で表される。

$$p = 1 - \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty \left(1 - \prod_{i=1}^F (1 - p_{f_i}(A_i)) \right) \times \prod_{i=1}^F f(A_i) dA_i \quad (2)$$

各フレームの分布は独立であるため、式 (2) は次式で表される。

$$p = 1 - (1 - \overline{p_f})^F \quad (3)$$

なお、 $\overline{p_f}$ はフレーム損率の平均値であり、次で表される。

$$\overline{p_f} = \int_0^\infty \{1 - (1 - p_b(A))^L\} f(A) dA \quad (4)$$

最後に、筆者らが提案した TCP スループットの導出手法から、TCP スループット B を得ることが可能となる。

なお、本研究での解析は、受信シンボルの振幅に対してビット誤り率を得ることで適用可能である。また、本解析では、ある条件でのビット誤り率が求まることで様々な条件に適用可能である。よって、他の変調方式についても、与えられた条件に対して、ビット誤り率が得られれば、容易に適用できる。

3.2 FEC 適用時の TCP スループット

本研究では、FEC としてブロック符号の利用を仮定している。誤り訂正符号による訂正可能ビット数を c とする。誤り訂正符号の影響を考慮したフレーム損率 $p_f(A)$ は、次式で表される。

$$p_f(A) = 1 - \sum_{i=0}^c \binom{L}{i} p_b(A)^i (1 - p_b(A))^{L-i} \quad (5)$$

次に、セグメント損率 p は次式で表される。

$$p = 1 - \int_0^\infty \cdots \int_0^\infty \left(1 - \prod_{i=1}^F (1 - p_{f_i}(A_i)) \right) \times \prod_{i=1}^F f(A_i) dA_i \quad (6)$$

$$= 1 - (1 - \overline{p_f})^F \quad (7)$$

$$\bar{p}_f = \int_0^\infty \left\{ 1 - \sum_{i=0}^c \binom{L}{i} \times p_b(A)^i (1 - p_b(A))^{L-i} \right\} f(A) dA \quad (8)$$

最後に、TCP スループットの導出手法から、TCP スループット B を得ることが可能となる。

3.3 ARQ 適応時の TCP スループット

フレーム損率 p_f を振幅 A の関数で表現すると次式で表される。

$$p_f(A) = 1 - (1 - p_b(A))^L \quad (9)$$

ARQ として、Go-Back-N 方式を利用した場合、1 個のフレームに対して、最高 R 回の再送が行える。つまり、 F 個のフレームに対して、最高 FR 回の再送を行うことが可能である。1 個のセグメントが正常に送信されるためには、 F 個のフレームが正常に送信される必要がある。よって、再送回数が制限された場合のセグメント損率 p は次式で表される。

$$p = \sum_{i=0}^{FR} \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \binom{F+i-1}{i} \times \prod_{j=1}^F (1 - p_{f_j}(A_j)) f(A_j) \times \prod_{k=F+1}^i p_{f_k}(A_k) f(A_k) dA_j dA_k \quad (10)$$

$$= 1 - (1 - \bar{p}_f^{R+1})^F \quad (11)$$

$$\bar{p}_f = \int_0^\infty \left\{ 1 - (1 - p_b(A))^L \right\} f(A) dA \quad (12)$$

ここで、TCP スループットの導出手法から TCP スループット B を得ることが可能である。しかし、ARQ の適用では、フレームの再送が行われているため、TCP 層での RTT (Round Trip Time) が ARQ を適用しない場合に比べて増加している。よって、再送フレームによる TCP 層での RTT の増加を考慮する必要がある。なお、TCP 層での RTT を RTT_s 、無線リンクでの RTT を RTT_f とする。

ここで、通信中に RTT_f は大きく変化しないと仮定する。この場合、図 2 において、フレームが損失しない場合の RTT_s と RTT_f の関係は次式で表される。

$$RTT_s = RTT_f \times (F + 2) \quad (13)$$

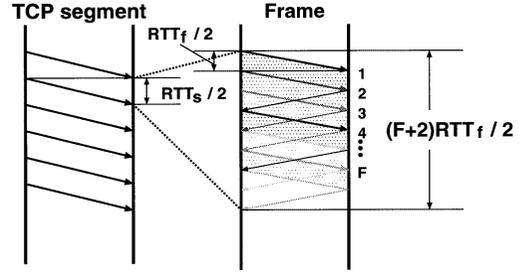


図2 無線リンクでのフレーム伝送の模式図
Fig.2 Transmission of frame in wireless link.

次に、 F 個のフレームを正常に送信するために、必要な再送フレーム数を h とする。 F 個のフレームを送信するために必要なフレーム数の分布関数 $G(p_f, h, F)$ は負の 2 項分布で表現可能である。ゆえに $G(p_f, h, F)$ は次式で表される。

$$G(p_f, h, F) = \binom{F+h-1}{h} (1 - p_f)^F p_f^h \quad (14)$$

提案手法から求めたスループットを B とすると、再送による RTT_s の影響を考慮したスループット B_{ARQ} は次式で表される。

$$B_{ARQ} = B \sum_{i=0}^{FR} \frac{F+2}{F+i+2} G(p_f, i, F) \quad (15)$$

4. 数値例

無線リンクでの変調方式を BPSK (Binary Phase Shift Keying) とする。このとき、 $\sqrt{2rE_b}$ で正規化した振幅が A のときのビット誤り率は

$$p_b(A) = Q \left(\sqrt{\frac{2A^2 r E_b}{N_0}} \right) \quad (16)$$

となる。なお、 E_b は情報ビット当りのエネルギーを示し、両側電力スペクトル密度が N_0 の AWGN を考慮する。また、 r は符号化レートを示す。よって、FEC の適用では、 r は FEC の符号化レートであり、それ以外では、 $r = 1$ である。

次に、TCP セグメントのサイズはデフォルトの 536[byte] とする。インターネットにアクセスする場合を考えているため、TCP セグメントは IP データグラムにカプセル化されて送信されるものとする。そ

のため、無線リンクで送信するデータ長は TCP セグメントと IP ヘッダの合計 576[byte] となる。また、受信者のバッファ容量は TCP セグメント 16 個と同量とする。誤り訂正符号には 5[bit] の誤り訂正能力をもつ Reed Solomon(127,117) 符号を利用するため、符号化レートは $r = 117/127$ となる。無線リンクでのフレーム長は 127[bit]、ARQ の最大再送数 R は 2, 5, 10, 20, 30 とする。

図 3 に AWGN 環境下でのスループット特性を示し、図 4 に Rayleigh フェージング環境下でのスループット特性を示す。FEC, ARQ を適用していない TCP 本来のスループット特性は、AWGN 環境下では E_b/N_0 の低下に従い急激に劣化することがわかる。また、フェージング環境下では、 E_b/N_0 の低下に伴い緩やかに劣化する傾向がある。しかし、スループット特性がよい領域では、実用上困難な E_b/N_0 が必要となる。図 3, 図 4 からわかるように、無線環境下において TCP の

利用を仮定した場合、無線リンクにおける誤り訂正機構は重要と思われる。

図 3 より、AWGN 環境下では、FEC を適用した場合は、ARQ を用いた場合に比べ低い E_b/N_0 でもスループット特性が劣化することがない。また、スループット特性の劣化は急激に起こる特徴がある。これは、FEC を適用した場合、誤り訂正符号は各フレームに対して独立に適用される。そのため、フレーム損の有無は、フレーム内で発生するビット誤り数と誤り訂正符号の訂正可能ビット数に依存する。AWGN 環境下では、ビット誤りは各フレームに対して一様に発生すると考えられ、フレーム内での平均ビット誤り数が、誤り訂正符号の訂正可能ビット数を超えない場合、フレーム損率は低くなる。また、フレーム内での平均ビット誤り数が、誤り訂正符号の訂正可能ビット数を超えた場合、フレーム損率は急激に高くなるためと考えられる。図 4 より、フェージング環境下で FEC を適用したスループット特性は、誤り訂正機構を適用しないときの TCP に比べ、最高で 3[dB] ほどの利得しか得られない。これは、フェージング環境下では、AWGN 環境下と同一の平均ビット誤り率であっても、そのビット誤りは、あるフレームでパースト的に発生すると考えられる。そのため、フレーム内でのビット誤り数が誤り訂正符号の訂正可能ビット数を超え、フレーム損が発生するためと考えられる。

図 3 より、AWGN 環境下で ARQ を適用した場合のスループット特性は、TCP 本来の特性に比べ、低い E_b/N_0 でもスループット特性が劣化することがない。また、スループット特性は、最大再送数 R の増加に伴い、緩やかに劣化する特性をもつ。これは、ARQ を適用したとき、フレームが損失した場合、その後のフレームで損失フレームの再送が行われるが、ビット誤りが各フレームに対して一様に発生する AWGN 環境下では、各フレームのフレーム損率が等しくなり、損失フレームに対する再送フレームが損失する可能性が FEC を適用した場合に比べ高くなるためと考えられる。また、ARQ では、フレームの再送を繰り返すほど、フレーム損率を低くできるため、最大再送数 R の増加に伴い、スループット特性は緩やかに劣化すると考えられる。図 4 より、フェージング環境下での ARQ を適用したスループット特性は、TCP 本来の特性、FEC を適用した場合の特性に比べ大きく改善している。これは、フェージング環境下では、あるフレームでビット誤りがパースト的に発生するため、再送フ

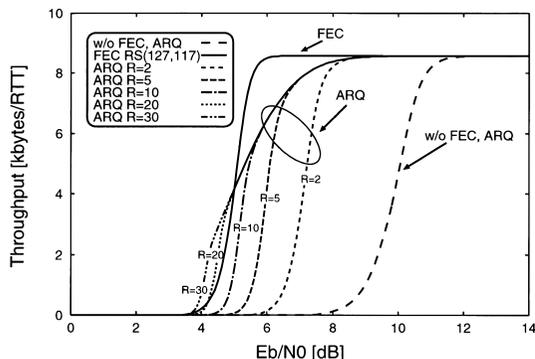


図 3 AWGN 環境下での TCP のスループット特性
Fig. 3 TCP throughput in AWGN environment.

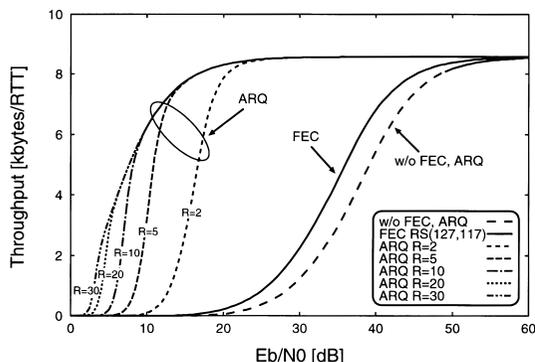


図 4 フェージング環境下での TCP のスループット特性
Fig. 4 TCP throughput in fading environment.

フレームではビット誤りが発生せず、フレーム再送が成功する可能性が高くなるためと考えられる。

なお、現実的には、フレームが連続的に送信されない条件以外では、フレーム間の振幅に相関があると考えられる。フレームの振幅分布に相関がある場合、損失フレームの再送を行う時点での、再送フレームの振幅は、損失フレームの振幅と近い値を示していると考えられる。よって、再送フレームも損失する可能性が高いと考えられる。一方、本研究で検討した、各フレームの振幅分布が独立である条件では、損失フレームの再送を行う時点では、再送フレームの振幅は損失フレームの振幅と異なると考えられる。よって、各フレームの振幅分布が相関をもつときに比べ、再送フレームが損失する可能性は低いと考えられる。このように、ARQ による誤り訂正は、各フレームの振幅が独立であるとき、最も有効であり、相関が大きくなるに従い、有効性が低くなると考えられる。なお、各フレームの振幅分布が相関をもつ場合、本研究で検討した ARQ の特性改善より劣化すると考えられる。しかし、その劣化は FEC と ARQ の特性改善の性質を逆転させることはないと推測される。

5. むすび

本研究では、無線リンクでの誤り訂正機構に対する基礎的な検討を行った。そして、FEC、ARQ を適用した場合の TCP スループットへの影響を解析的に明らかにした。その結果、無線ネットワークにおいて TCP を利用する場合、AWGN 環境では FEC が ARQ に比べ有効であり、Rayleigh フェージング環境では ARQ が FEC に比べ非常に有効であることがわかった。このことより、FEC は無線リンクでの伝送誤りが一様かつランダムに発生する環境に適していると思われる。また、ARQ は無線リンクでの伝送誤りがバースト的に発生し、そのバースト期間が無線リンクでのフレーム単位を大きく超えない環境に適していると思われる。

無線リンクにおいて誤り訂正機構を利用しない場合、TCP の性能は非常に劣化し実用上通信が不可能となると考えられる。よって、TCP を利用するためには、想定する利用環境の伝送路特性に合わせて誤り訂正機構を選択することが重要であり、より詳細な検討が必要と思われる。本研究では、AWGN 環境、Rayleigh フェージング環境と特性が大きく異なる環境について検討を行った。また、現実環境は、両方の確率的特性

をもち合わせる環境と思われ、更に本研究で検討した誤り訂正機構を改良して用いられるであろう。よって、本研究での検討は、今後の検討の基礎的なモデルとして広く適用可能と思われる。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究 B、通信・放送機構の創造的情報通信技術開発推進制度の公募課題、日本エリクソンの補助を受けて行われている。記して謝意を表する。

文 献

- [1] V. Jacobson, "Congestion avoidance and control," Proc. ACM SIGCOMM'88 pp.314-329, Aug. 1988.
- [2] K. Fall and S. Floyd, "Simulation-based comparisons of Tahoe, Reno, and SACK TCP," *comput. Commun. Rev.*, vol.26, no.3, pp.5-21, July 1996.
- [3] R. Caceres and L. Iftode, "Improving the performance of reliable transport protocols in mobile computing environments," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.13, no.5, pp.850-857, June 1995.
- [4] E. Amir, H. Balakrishnan, S. Seshan, and R.H. Katz, "Efficient TCP over networks with wireless links," *Proc. Hot Topics in Operating Systems*, pp.35-40, 1995.
- [5] T.V. Lakshman and U. Madhow, "The performance of TCP/IP for networks with high bandwidth-delay products and random loss," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.5, no.3, pp.336-350, June 1997.
- [6] F. Anjum and L. Tassiulas, "An analytical model for the various TCP algorithms operating over a wireless channel," *Proc. WCNC'99*, vol.2, pp.943-947, 1999.
- [7] A. Fieger and M. Zitterbart, "Transport protocols over wireless links," *Proc. Computers and Communications*, pp.456-460, 1997.
- [8] G. Xylomenos and G.C. Polyzos, "TCP and UDP performance over a wireless LAN," *Proc. IEEE INFOCOM'99*, vol.2, pp.439-446, 1999.
- [9] H. Balakrishnan, V.N. Padmanabhan, S. Seshan, and R.H. Katz, "A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.5, no.6, pp.756-769, Dec. 1997.
- [10] A. Chockalingam, M. Zorzi, and V. Tralli, "Wireless TCP performance with link layer FEC/ARQ," *Proc. IEEE ICC'99*, vol.2, pp.1212-1216, 1999.
- [11] 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*, RCS99-232, Feb. 2000.
- [12] The Internet Engineering Task Force, <http://www.ietf.org>.

(平成 12 年 3 月 21 日受付, 6 月 26 日再受付)