

無線 LAN におけるビット誤り率に基づく最適パケット長の導出

Bit Error Rate Aware Packet Length Control in Wireless LAN System

森 隆幸†
Takayuki Mori

山口 実靖‡
Saneyasu Yamaguchi

浅谷 耕一‡
Koichi Asatani

1. はじめに

無線ネットワークは有線ネットワークに比べ設置の容易さ等のメリットを持っており、LAN 環境等に普及している。しかし、無線 LAN 環境では通信障害が起りやすく、伝送誤りによるパケットロスが発生する可能性が高い。

パケット内にビット誤りが発生した場合はそのパケットを再送することが必要となる。誤りの少ないネットワークにおいてはパケットサイズを大きくし効率的に通信を行うことが好ましいが、誤りの多いネットワークではパケットサイズを小さくしパケットエラー率と再送の単位を小さくすることが好ましい。本稿ではクロスレイヤ技術[1]を用いて、無線層の誤り発生率情報を TCP/IP 層で取得し、それに応じて動的にパケット長を制御する環境を想定し、ビットエラー率に基づく最適パケット長導出方法を提案する。そして、シミュレーションにより本手法の有効性を示す。クロスレイヤ技術とは、OSI の階層構造を保ったまま任意のレイヤ間での情報伝達を可能とする技術である。これにより各無線 LAN インタフェース(WLAN IF1, WLAN IF2)の MAC 層がデータフレームの送信完了時またはデータフレーム廃棄時に再送回数をトランスポート層に通知する事が可能となる。

2. IEEE802.11b 無線システム

IEEE802.11b は 2.4GHz 帯を使用する無線 LAN システムの規格であり、主として DCF 方式が用いられる。DCF 方式は複数の端末が同一チャネルを効率的に共有できるように、チャネル使用状況を把握してフレーム送信を行う自律分散型の CSMA/CA 方式である。以下に IEEE802.11b において DCF 方式を用いる CSMA/CA 方式を説明する。

フレームの送信間隔として IFS が定義されている。IFS の長さには複数の種類が存在し、それらを使い分けることで送信延期の時間を制御する。IFS を用いることにより、フレームに対し優先度を与えることが可能となっている。

IFS は三種類定義されており、送信間隔が短い順に SIFS (Short IFS), PIFS (PCF IFS), DIFS (DCF IFS) がある。PIFS は PCF 用、DIFS は DCF 用の IFS である。短い IFS ほど高優先度となる。DCF において通常のデータフレームは、一番優先度が低い DIFS が用いられる。また受信確認である 802.11ACK には最も優先度が高い SIFS が使用される。

CSMA/CA では、チャネルのビジー状態からアイドル状態への移行を契機に、IFS+ランダム時間だけキャリアセンスを行う。そして継続してアイドルであることを確認した端末のみが信号の送信権を獲得する。IFS が短いとキャリアセンス時間が短くなるため、優先して信号の送信権を獲得することができる。

† 工学院大学大学院

‡ 工学院大学

IEEE802.11b の場合、送信端末は固定された DIFS 時間待ったあと、端末間の送信フレームの衝突を回避するためにランダム時間待ちフレームの送信を行い、バックオフ制御を行う。バックオフ時間は最小が 0 で、最大が規定の CW(Contention Window)の範囲の一様分布乱数により決定される。スロットタイムは $20\mu s$ であり、バックオフ時間は式(1)によって求められる。

$$\text{バックオフ時間} = \text{Random()} \times \text{スロットタイム} \quad (1)$$

(Random())は 0 から CW の一様分布乱数)

CW の最小値を CWmin, 最大値を CWmax とすると、CW は式(2)のように再送回数 n の増加に伴い、CWmax に達するまで増加する。

$$CW = (CW_{\min} + 1) \times 2^n - 1 \quad CW_{\min} \leq CW \leq CW_{\max} \quad (2)$$

一般的に最大転送回数 7 回(再送回数 6 回)であり、これを超えた場合フレームは無線層により破棄され TCP などの上位層による再送が行われることになる。

3. 従来研究

無線ネットワークにおける TCP 性能を向上させる研究として、TCP_Westwood 方式[2]や動的なパケット長制御[3]等がある。TCP_Westwood 方式は、ACK の情報を基に使用可能帯域を予測し輻輳制御をする事で、過剰な輻輳制御を抑制する手法であり、TCPW_BE(Bandwidth estimation)方式や、TCPW_RE(Range estimation)等がある。TCPW_BE 方式では、2 個の ACK の到着間隔に基づいて、使用可能帯域を見積る方式であるが、バーストのエラー発生時に見積もりが困難である欠点を持つ。TCPW_RE 方式は、測定期間中に到着した全ての ACK の到着間隔により、使用可能帯域を見積る方式であるが、ACK の到着が少ないと帯域の見積りが困難であると考えられる。また、TCP_Westwood 方式では、ACK 情報をもとに End-to-End で帯域見積もりをしているため、無線区間の通信状況を知ることが困難であるという欠点を持つ。

また、通信誤りが発生する無線ネットワークにおけるパケット長と通信性能の関係が[4]において評価されており、通信誤り率の低い環境では大きなパケット長による通信が好ましく、通信誤り率が高い環境ではより短いパケット間での通信が好ましいことが確認されている。

4. パケットロス率による最適パケット長の導出

無線環境において、ビット誤りによりパケット送信を失敗した場合、MAC 層で最大 7 回転送を試み、その転送回数は MAC 層で保持されている。この転送回数を受信端末に伝達する事で、受信端末はパケットロス率やビット誤り率予測する事が可能である。これに基づきパケット長を適切に制御する事により、より高い通信状態得られる事が期待される。以下に無線 LAN 環境における最適パケット長導出手法を示す。

ビット誤り率を p 、パケット長を x (ビット)、無線区間における転送回数を y 、転送回数が y となる確率を $Z(y)$ とすると、転送回数 $y = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ となる確率は式(3)のようになる。

$$Z(y) = (1 - (1 - p)^x)^{y-1} \times (1 - p)^x \quad (3)$$

ある1ビットにビット誤り率が発生しない確率が $1 - p$ であるため、 x ビットのパケットが全ビット誤りがなく正常に通信でき転送回数が1回となる確率は $(1 - p)^x$ となる。転送回数が2回となる確率は、1回目の通信においてビット誤りが発生する確率 $1 - (1 - p)^x$ と、2回目において、ビット誤りが発生しない確率が $(1 - p)^x$ の積であるため、 $(1 - (1 - p)^x) \times (1 - p)^x$ となる。以下同様にして、転送回数が3回~7回となる確率と、パケット通信が7回連続失敗する確率も求められる。

無線区間における最大転送回数7回通信失敗した場合、パケットロスが生じる。パケットロスが生じた場合、受信端末のTCP層が送信端末に再送要求を出す。TCP層による2回目の通信における無線区間でのパケット転送回数の発生確率は、同様に式(3)の $Z(8) \sim Z(14)$ となる。

以下、パケットロスが生じる毎に、TCP層により再送が行われるため通算パケット転送回数が n となる確率は、(3)の $Z(n)$ となる。

次に n 回目の通信においてフレーム通信に要する時間 $S(n)$ の導出方法を示す。

IEEE802.11bにおけるペイロード転送速度を a 、Macヘッダー転送速度を b とおくと、

$$S(n) = \text{DIFS} + (x/a) + (\text{Mac header size}/b) \times 2 + (\text{スロットタイム} \times \text{Random}()) + \text{SIFS} + (\text{MAC層 ACK size}/a) \quad (4)$$

となる。 $(\text{Random}())$ は、最小値0、最大値 CW の一様分布乱数。このうち、 $\text{Random}()$ の最大値 CW のみ転送回数 n に依存して変化し、その値は式(2)の通りである。 $\text{Random}()$ が一様分布であるため、 $\text{Random}() = (CW/2)$ とする事により $S(n)$ の期待値が求められる。よって、転送回数が n となった場合の平均送信遅延時間は、 $\sum_{k=1}^n S(k)$ である。これに式

(3)の転送回数が n となる確率 $Z(n)$ をかけることにより、平均パケット時間は $\sum_{k=1}^n (Z(k) \times (\sum_{l=1}^k S(l)))$ の様になる。

(4)より再送回数が n の場合の遅延時間を算出し、転送回数が n となる確率をかけ、それらの合計する事により、平均転送時間を求められる。

以上より、例えばビット誤り率 1.0×10^{-5} 、 5.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-4} 、 2.0×10^{-4} におけるパケット長とスループットの関係は図1の様になり、それぞれの最大スループットのパケット長は、334バイト、576バイト、993バイト、1500バイトとなる。

5. 評価

パケット長を100、200、500、1500バイトに固定した場合と、提案手法により最適パケット長を選択した場合の平均スループットは図2の“100”、“200”、“500”、“1500”、“提案手法”に示す(左のY軸を使用)。また、提案手法がそれぞれビット誤り率で選択したパケット長を同図の“最適パケット長”に示す(右のY軸を使用)。同図より、パケット長を1500バイトと固定した場合、高ビット誤り率の環境において高スループットが得られず、ビット誤り率 $2.0 \times$

10^{-4} の例では、提案手法がこれの2倍以上の性能となる。以上より、提案手法により、ビット誤り率に応じてパケット長を適切に制御する事が有効である事が確認された。

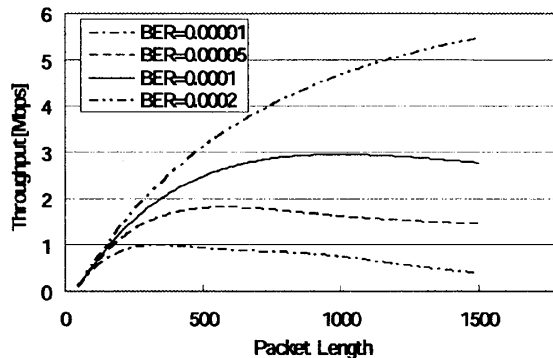


図1. 各ビット誤り率でのパケット長とスループットの関係

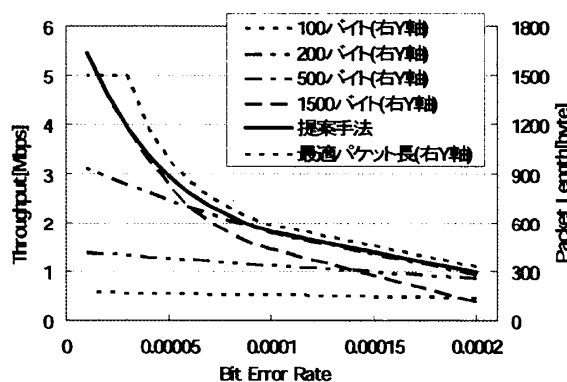


図2. 各パケット長と提案手法におけるスループット

おわりに

クロスレイヤ技術を用いることによって、ビット誤り率の測定と、それに応じた動的パケット長の制御が可能となる。本稿では、MAC層の誤り発生率情報をTCP/IP層で取得し、ビットエラー率に基づく最適パケット長導出方法を提案して評価した。評価の結果、提案手法はパケット長1500バイト固定の一般的な手法と比べ、最大時に2倍以上の性能を示し、その有効性が確認された。

今後は、より複雑なネットワークの環境への適用やハンドオーバーの考慮等を行う予定である。

参考文献

[1] S. Shakkottai et al., Cross-Layer Design for Wireless Networks, "IEEE Communications Magazine" Vol. 41, No. 10, pp. 74-80, October 2003.
 [2] B. K. F. Ng, M. Gerla, S. M. Y. Sanadidi, R. Wang, "Efficiency/friendliness tradeoffs in TCP Westwood," pp. 304-311, July 2002.
 [3] 森隆幸, 大澤篤史, 浅谷耕一, "有線・無線統合化ネットワークにおける動的パケット長制御に関する検討", 電子情報通信学会総合大会, Mar. 2006.
 [4] 有本 憲司, 鈴木 博, 府川 和彦, "干渉が支配的な高速フェージング移動無線環境下における最適伝送レートに関するネットワークシミュレーション ns-2 による解析", RCS2005-4