

無線 LAN 環境における バースト転送を利用した TCP フローの消費電力解析

Analysis of Power Consumption of a Single TCP Flow with Burst Transmission in a Wireless LAN Environment

橋本 匡史¹
Masafumi Hashimoto

長谷川 剛²
Go Hasegawa

村田 正幸¹
Masayuki Murata

大阪大学 大学院情報科学研究科¹
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

大阪大学 サイバーメディアセンター²
Cybermedia Center, Osaka University

1 まえがき

無線ネットワーク技術の発展とともに、無線機能を有した小型の端末(無線端末)を利用したインターネットアクセスが一般的になってきている。無線端末は通常バッテリー駆動であるため、駆動時間の長期化という観点から消費電力の削減は重要な課題である。

我々は [1] において、TCP の動作を考慮した消費電力モデルを提案した。本稿では、[1] において提案した消費電力モデルを拡張し、複数のデータセグメントをまとめてバースト転送した場合の消費電力モデルを構築する。数値解析により、バースト転送を利用することによって省電力効果が大きくなることを明らかにする。

2 TCP の動作を考慮した消費電力モデル

[1] においては、MAC レベルの消費電力モデルと TCP レベルの消費電力モデルを組合せることによって、無線 LAN において TCP データ転送を行った場合の消費電力がモデル化している。TCP レベルのモデルにおいては、TCP データ転送をスロースタートフェーズとそれ以外の定常フェーズに分け、さらに定常フェーズを TD 期間と TO 期間に分けて消費電力を解析している。なお、TD 期間は TCP の輻輳回避フェーズにおいてパケット廃棄が発生してから次に発生するまでの期間を表し、TO 期間はタイムアウトが発生している期間を表す。消費電力モデルの詳細については、[1] を参照されたい。

本稿では、[1] において構築した理想的なスリープをした場合の消費電力モデルを拡張することにより、バースト転送を利用してスリープした場合の消費電力モデルを構築する。具体的には、TD 期間において、図 1 に示すようなバースト転送を適用し、TD 期間における消費電力 J^{TD} の構成要素である、スリープ状態への遷移回数およびスリープ時間の期待値 ($E[N_{td}^s]$ および $E[T_{td}^s]$) を導出する。なお、無線 LAN においてはフレームが損失せず、有線ネットワーク区間においてデータセグメントが廃棄されると仮定して、消費電力モデルを構築する。その他の仮定は [1] の仮定をそのまま適用した。

2.1 バースト転送を利用してスリープした場合における TCP データ転送の消費電力モデル

TD 期間において、 m 個のデータセグメントをバースト転送する場合に送受信されるパケットシーケンスを図 1 に示す。通常 TCP の輻輳回避フェーズには、1 RTT 間

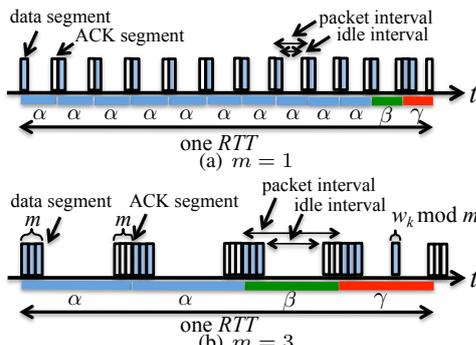


図 1 TD 期間におけるパケットシーケンス

に図 1(a) のようにパケットが送受信される。このとき、図 1(b) のように、データセグメントを m 個まとめてバースト転送するとパケットが送受信され、一つあたりのパケット間隔 (packet interval) が大きくなる。このように複数のデータセグメントをまとめてバースト転送することにより、省電力効果の向上とパケット送受信タイミングの推定が容易になることが期待できる。

k 番目のラウンドにおけるウィンドウサイズを w_k とすると、バースト転送をすることで w_k 個分のデータセグメントが m 個ずつ送信される。 w_k 個のデータセグメントが m で割り切れない場合は、その端数の ($w_k \bmod m$) 個のデータセグメントがまとめて送信される。なお、 $m=1$ はバースト転送を利用しない場合に相当する。パケット送受信が行われていない区間をアイドル間隔 (idle interval) とすると、スリープするためにはアクティブ状態からスリープ状態への遷移時間 (T^{as}) とスリープ状態からアクティブ状態への遷移時間 (T^{sa}) が必要となる。ここで、パケット間隔を図 1 のように α 区間、 β 区間および γ 区間の 3 つの区間に分類し、アイドル間隔においてスリープ可能である条件を求める。 γ 区間は、 k 番目のラウンドにおける輻輳ウィンドウにおいて、最後の ($m + (w_k \bmod m)$) 個のデータセグメントが送信されるパケット間隔を表し、 β 区間は γ 区間の一つ前のパケット間隔を表す。それ以外のパケット間隔はすべて α 区間とする。

以上の議論に基づき、各区間においてスリープ可能であるときの条件を求める。 k 番目のラウンドにおいては、その 3 つの区間の数の合計は $\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil$ である。したがって、各区間の時間はそれぞれ $\frac{RTT}{\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil}$ となる。 α 区間においては、 m 個のデータセグメントと m 個の ACK セグメントが送受信されるため、このときのアイドル間隔は $\frac{RTT}{\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil} - mT^t - mT^r$ となる。以上から、 α 区間でスリープ可能となるときに 1 となるステップ関数 $U_\alpha(k)$ を導入すると、 $U_\alpha(k)$ は以下のようになる。

$$U_\alpha(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{RTT}{\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil} - mT^t - mT^r > T^{as} + T^{sa} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

同様に、 β 区間および γ 区間においてスリープ可能である場合に 1 となるようなステップ関数をそれぞれ $U_\beta(k)$ および $U_\gamma(k)$ とすると、それらは次のように導出できる。

$$U_\beta(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{RTT}{\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil} - mT^t \\ & - (w_k - 1 - m(\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil - 1))T^r > T^{as} + T^{sa} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_\gamma(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } m > 1 \text{ and} \\ & \frac{\frac{RTT}{\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil} - (w_k - m(\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil - 1))T^t - T^r}{\lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil - \lceil \frac{w_k - 1}{m} \rceil + 1} \\ & > T^{as} + T^{sa} \\ 1 & \text{if } m = 1 \text{ and} \\ & \frac{RTT}{w_k - 1} - (w_k - w_{k-1} + 1)T^t - T^r > T^{as} + T^{sa} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

以降では、(1) 式、(2) 式および (3) 式を利用して、バースト転送を利用してスリープした場合における $E[N_{td}^s]$ および $E[T_{td}^s]$ を求める。

まず, $E[N_{td}^s]$ を導出する. k 番目のラウンドにおけるスリープ状態への遷移回数を N_k^s とし, r_{td} を TD 期間においてパケット廃棄が発生したときのラウンド番号とすると, $E[N_{td}^s]$ は $E[N_{td}^s] = \sum_{k=1}^{r_{td}+1} N_k^s$ となる. なお, $r_{td} = E[W]/2$ である.

次に N_k^s を決定する. $\lceil \frac{w_k}{m} \rceil = 1$ であるときは γ 区間が 1 つだけであり, γ 区間においてスリープできるならば $(\lceil \frac{w_k}{m} \rceil - \lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil + 1)$ 回スリープ状態へ遷移できる. $\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil > 1$ である場合は, $(\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil - 2)$ 個の α 区間と, β 区間と γ 区間がそれぞれ 1 つずつ存在する. したがって, N_k^s は次のように計算できる.

$$N_k^s = \begin{cases} U_\gamma(k) \left(\lceil \frac{w_k}{m} \rceil - \lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil + 1 \right) & \text{if } \lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil = 1 \\ U_\alpha(k) \left(\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil - 2 \right) + U_\beta(k) & \\ + U_\gamma(k) \left(\lceil \frac{w_k}{m} \rceil - \lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil + 1 \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

なお, $m = 1$ である場合は, バースト転送を利用しない場合であるため, N_k^s は以下のように計算できる.

$$N_k^s = \begin{cases} U_\alpha(k) w_{k-1} & \text{if } \lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil = 1 \\ (w_{k-1} - 1) U_\alpha(k) + U_\gamma(k) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

また, r_{td} 番目のラウンドにおいてスリープが可能であれば, $(r_{td} + 1)$ 番目のラウンドにおいてもスリープが可能である. このとき, スリープ状態には $\lceil E[W]/m \rceil$ 回遷移できる. したがって, $N_{r_{td}+1}^s$ は以下のように計算できる.

$$N_{r_{td}+1}^s = U_\alpha(r_{td}) \lceil E[W]/m \rceil \quad (6)$$

次に, $E[T_{td}^s]$ を求める. k 番目のラウンドにおけるスリープ時間を T_k^s とすると, N_{td}^s と同様に, $E[T_{td}^s] = \sum_{k=1}^{r_{td}+1} T_k^s$ と書くことができる.

次に T_k^s を決定する. $\lceil \frac{w_k}{m} \rceil = 1$ である場合は, γ 区間が 1 つだけであり, γ 区間でスリープ可能であればスリープ可能である. $\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil > 1$ である場合は, $(\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil - 2)$ 個の α 区間および β 区間と γ 区間がそれぞれ 1 つずつ存在する. このとき, それぞれの区間におけるスリープ時間の合計が k 番目のラウンドにおけるスリープ時間となる. したがって, T_k^s は以下のように計算できる.

$$T_k^s = \begin{cases} U_\gamma(k) \left(\frac{RTT}{\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil} - (w_k - m (\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil - 1)) T^t - T^r \right) & \\ - N_k^s (T^{as} + T^{sa}) & \text{if } \lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil = 1 \\ U_\alpha(k) \left(\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil - 2 \right) \left(\frac{RTT}{\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil} - m T^t - m T^r \right) & \\ + U_\beta(k) \left(\frac{RTT}{\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil} - m T^t - (w_{k-1} - m (\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil - 1)) T^r \right) & \\ + U_\gamma(k) \left(\frac{RTT}{\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil} - (w_k - m (\lceil \frac{w_{k-1}}{m} \rceil - 1)) T^t - T^r \right) & \\ - N_k^s (T^{as} + T^{sa}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

また, $(r_{td} + 1)$ 番目のラウンドにおいては, $\frac{2E[W]-1}{E[W]} RTT$ の間に $E[W]$ 個のデータセグメントが送信され, $E[W]$ 個の ACK セグメントが受信される. したがって, $T_{r_{td}+1}^s$ は以下のように計算できる.

$$T_{r_{td}+1}^s = U_\alpha(r_{td}) \left(\frac{2E[W]-1}{E[W]} RTT - \frac{E[W]}{2} T^t - E[W] T^r \right) - N_{r_{td}+1}^s (T^{as} + T^{sa}) \quad (8)$$

3 数値解析

3.1 パラメータ設定

図 2 の IEEE 802.11a 無線 LAN において, TCP を利用して無線端末から 100 MB のファイルを有線ホストへ転送するときの消費電力を評価する. また, 図 2 のアクセスポイントと有線ホストの間の有線ネットワーク間でデータセグメントが確率によって廃棄される. Atheros

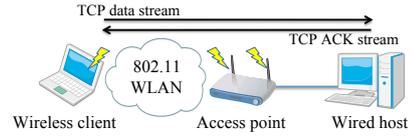


図 2 無線 LAN 環境

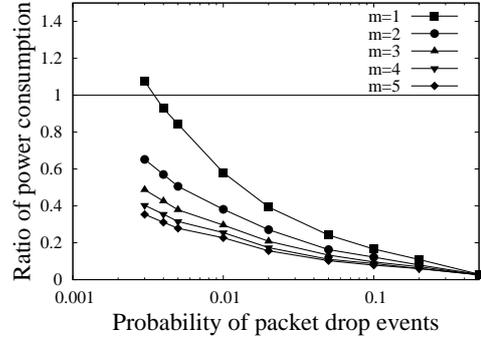


図 3 消費電力比 (RTT: 100 ms)

AR5004 チップのデータシート [2] より, 送信, 受信, アイドルおよびスリープ時の消費電力はそれぞれ 1.4 W, 0.9 W, 0.8 W および 0.016 W とした. また, アクティブ状態からスリープ状態へ遷移するときの消費電力はアイドル時と同様とし, スリープ状態からアクティブ状態へ遷移するときの消費電力は送信時と同様とした. T^{as} および T^{sa} はそれぞれ 1 ms とした. TCP データセグメントサイズは 1500 バイトとし, TCP ACK セグメントサイズは 40 バイト とした.

3.2 解析結果

スリープをしなかった場合の消費電力に対するバースト転送を利用してスリープした場合の消費電力の比を図 3 に示す. 図 3 の x 軸は有線ネットワーク区間におけるパケット廃棄イベントの発生確率を表し, バースト転送の際にまとめて送信するパケット数 m を変化させた場合の結果である. なお, $m = 1$ である場合はバースト転送を利用せずにスリープした場合に相当し, [1] における理想的にスリープした場合の結果に相当する.

図 3 より, RTT が大きくパケット廃棄イベントの発生確率が大きいほど省電力効果が大きいことがわかる. また, バースト転送においてまとめるパケット数 m が大きいほど省電力効果が大きいことがわかる. 例えば, パケット廃棄イベントの発生確率が 0.01 であるとき, $m = 1$ である場合は消費電力が 60%, $m = 2$ である場合は消費電力が 40% まで削減できている. これは, m によってスリープ時間をほぼ変わらないものの, m が大きいほどスリープ状態への遷移回数が少なくなり, 状態遷移にかかる消費電力が削減できたためである.

4 おわりに

無線 LAN 環境における TCP データ転送を行う際に, バースト転送を利用してスリープした場合の消費電力をモデル化した. 今後は, 消費電力モデルをマルチ MAC やマルチパス環境を想定したモデルに拡張したい.

謝辞

本研究の一部は, 独立行政法人 情報通信研究機構「新世代ネットワーク技術戦略の実現に向けた萌芽的研究」の支援による.

参考文献

- [1] 橋本 匡史, 長谷川 剛, 村田 正幸, “無線 LAN 環境における TCP の動作を考慮した消費電力モデルの提案,” 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2010-105), vol. 110, pp. 1–6, Dec. 2010.
- [2] Wistron NeWeb Corp., “CM9: WLAN 802.11 a/b/g mini-PCI Module.” available at <http://site.microcom.us/CM9.pdf>.