

[研究論文] 無線ネットワークにおける動的ペイロード長方式 の研究動向

池川隆司

神奈川工科大学非常勤講師
東京大学大学院数理科学研究科特任研究員
早稲田大学理工学術院総合研究所招聘研究員

Recent trend of payload size optimization schemes for wireless networks

Takashi IKEGAWA

Abstract

The payload size, which restricts the maximum size of the user-field for packets, is one of the essential control parameters for wireless networks because the link-level transmission delay is simply given by the packet size divided by link capacity and packet-corruption probability is approximately proportional to the packet size. Recently, many researchers have proposed the payload size optimization schemes for wireless networks. The main objective of this paper is to provide understanding of different packet size optimization approaches used in different types of wireless networks.

Keywords: payload size, wireless networks, optimization scheme, quality of service

1 はじめに

インターネットに代表されるパケット転送ネットワークでは、ペイロード長(パケットのユーザーデータフィールドの最大長)、ウィンドウサイズのような、QoS (Quality of Service) に影響を与える様々な制御パラメータが存在する¹⁾。制御パラメータのQoSへの最適化は、通信ネットワーク設計・管理において、重要な課題となっている。例えば、一般的なパケット転送ネットワーク²⁾、クロスレイヤー無線ネットワーク³⁾、工場用無線センサーネットワーク⁴⁾、無線ネットワーク制御システム⁵⁾、IoT (Internet of Things)⁶⁾で、この最適化問題を取り扱っている。

ペイロード長は、転送スロット長のような通信回線の特徴、送信局・受信局のメモリー管理の容易性、プロトコル仕様等の理由から、決定されてきた⁷⁾。例えば、IEEE 802.11系無線LAN(Local Area Network)のペイロード長(Maximum Transmission Unitと呼ばれている)は、技術的な理由ではなくプロトコル仕様上2312 bytesと定められている⁸⁾。

しかし、

- 通信回線でのパケットの転送時間は、パケット長を通信回線容量(速度)で割ることによって得られる¹⁾、
- パケットがビット誤りとなる確率は、パケット長にほぼ比例する²⁾、

ことより、ペイロード長はQoSに影響を与える。よって、ペイロード長は重要な制御パラメータの1つとして、考えられている。

ここ10年、無線LAN・セルラーネットワークのような無線ネットワークは、ユーザーに移动通信サービスを提供できるため、著しく普及した。しかし、無線ネットワークは、有線ネットワークと比べて、次のような負の特性を持つ。

C1: 伝送媒体としてオープンな空間を使っているため、ビット誤り率は平均的に高い。さらに、ビット誤り率は障害物や天候等により動的に変化する(劣悪な環境でのビット誤り率は 10^{-2} 程度となる)。

C2: 移動端末に電力を常時提供することは、困難である。

C3: 伝送速度は低い。例えば、無線センサーネットワークの回線速度は、数100 kbpsである。さらに、複数の端末が1つの伝送媒体を共有する場合、端末当たりの利用可能な伝送速度は小さくなる。

上記のような無線ネットワークの特性から近年、ペイロード長を制御して、QoSを最適化する方式が検討されている。文献9)では、無線センサーネットワークを対象としたペイロード長の最適化方式をサーベイしている。

本稿の目的は、無線センサーネットワークに限らず、多様な無線ネットワークを対象としたペイロード長の最適化方式の研究事例を紹介し、今後の課題を明らかにすることである。

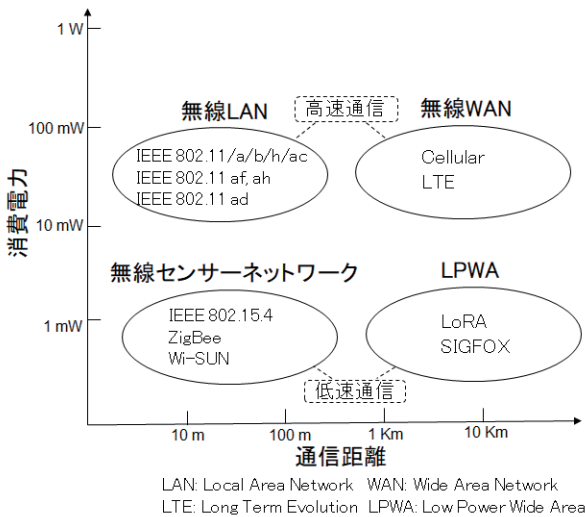


図1. 無線ネットワークの分類

【出典】文献 10) の図 4 をもとに改変

本稿の構成は次の通りである。2 節では、無線ネットワークを概観する。3 節では、QoS をグッドプット、エネルギー効率とした時のトレードオフ問題を、簡単な事例を使って説明する。さらに、数値例より QoS を最適化するペイロード長が存在することを示す。4 節では、動的ペイロード長方式の研究例を紹介する。5 節で、今後の課題を説明する。

2 無線ネットワーク

無線ネットワークは、1) シングルホップ/マルチホップのようなネットワーク構成、2) 変調方式、伝送速度のような物理層のパラメータ、3) メディアアクセス制御 (MAC: Media Access Control) のようなデータリンク層のパラメータ、4) マルチホップネットワークの場合ルーティング方式のようなネットワーク層のパラメータ、等の違いにより、様々な種類がある (例えば、文献 5) を参照)。

図 1 に、伝送距離と消費電力の観点から分類した無線ネットワークを示す。

無線ネットワークを利用するアプリケーションは、多種多様である。次に示すように、アプリケーションごとに、無線ネットワークに要求する QoS が異なる。

ロボットの遠隔操縦: ロボットの遠隔操縦では、(大容量の) 映像のリアルタイム (応答遅延時間が 100~200 msec) での転送サービスが、無線ネットワークに求められる¹¹⁾。すなわち、無線ネットワークには、高いグッドプットが要求される。

農場での環境モニター: 農場で温度や湿度をモニターするアプリケーションでは、多大な遅延時間は許容される。一方、半永久的に電池交換が不要、すなわち消費電力が小さい無線端末 (センサー) から構成される無線ネットワークが要求される¹²⁾。

前述したように、無線ネットワークが様々なアプリケーションをサポートするためには、アプリケーションの QoS に応じて、ペイロード長、ウィンドウサイズのような制御パラメータを最適化しなければならない。本稿では、この制御パラメータの中で、ペイロード長に焦点をあてる。

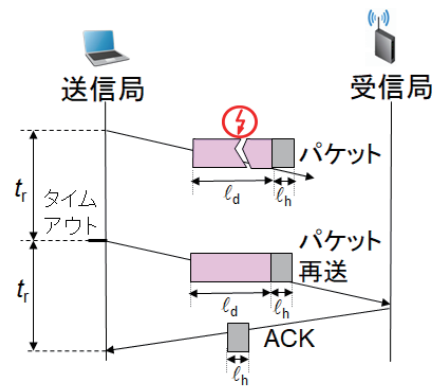


図2. Stop and Wait 再送方式でのパケットの送信例

3 トレードオフ問題

本節では、QoS をグッドプット、エネルギー効率とした時のトレードオフ問題を概説する。簡単な数値例より、最適なペイロード長が存在することを示す。

3.1 QoS をグッドプットとした場合

パケットがビット誤りにより廃棄された時、その廃棄パケットが誤り回復機能により再送される通信ネットワークでは、次に示すトレードオフが発生する。そのため、グッドプット (受信局が単位時間当たりに正しく受信する平均ビット数) を最適化するペイロード長が存在する。

- ペイロード長が非常に小さい場合、ビット誤りによるパケット廃棄はほとんど発生しない。よって、パケット当たりのオーバーヘッド (ヘッダ/トレーラ) が無視できないため、グッドプットは小さくなってしまふ。
- ペイロード長が非常に大きい場合、パケットは頻繁にビット誤りとなる。その結果、多数の無駄なパケット再送を引き起こしてしまふ、グッドプットは小さくなってしまふ。

よって、パケットがビット誤りにより廃棄され、廃棄パケットが再送されるシナリオでは、グッドプットはペイロード長に対して凸状となり、グッドプットを最大化するペイロード長が存在する。

例 1 1 つの回線・Stop and Wait 再送方式の場合

パケットは以下に示す Stop and Wait (SW) 方式により、再送される場合を考える (図 2 参照)。

- 送信局は、パケットを送信後、受信局からの ACK (Acknowledgement: 送達確認) の受信後、1 つの新しいパケットを送信する。
- 一定時間、受信局から応答がない場合 (タイムアウトが発生した場合)、パケットが廃棄されたとみなし、パケットを再送する。

解析の簡単化のため、以下の仮定を設ける。

- パケット送信後、その ACK を受信する時間 (応答遅延時間) を t_r とする。 t_r は固定値であり、

$$t_r = \frac{l_d + 2l_h}{\mu}$$

として与えられる。ここで、 l_d はペイロード長、 l_h はヘッダー長 (ACK 長と等しい)、 μ は回線速度である。

- タイムアウト値は t_r と等しい。

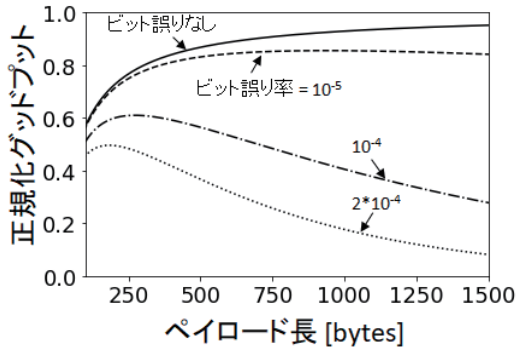


図3. 様々なビット誤り率におけるペイロード長に対する正規化グッドプット

3. パケットは確率 PER (Packet Error Rate) で廃棄され、パケットごとに独立に廃棄される。
4. ACK は廃棄されない。
5. ビット誤りは確率 p_b で発生する。よって、PER は

$$\text{PER} = 1 - (1 - p_b)^{\ell_d + \ell_h}, \quad (1)$$

として与えられる。

この時、回線速度 μ で正規化したグッドプット \mathcal{U}_g は、次式で与えられる。

$$\mathcal{U}_g = \frac{\ell_d}{\mu t_r (1 - \text{PER}) \sum_{n=1}^{\infty} n \text{PER}^n} \quad (2)$$

$$= \frac{\ell_d (1 - \text{PER})}{\mu t_r} = \frac{\ell_d (1 - p_b)^{\ell_d + \ell_h}}{\ell_d + 2\ell_h}. \quad (3)$$

図3に、ビット誤り率 p_b が $0, 10^{-5}, 10^{-4}, 2 \times 10^{-4}$ の時のペイロード長 ℓ_d に対する正規化グッドプット \mathcal{U}_g を示す。回線速度 μ を 11 Mbps、ヘッダ長 ℓ_h を 38 bytes とした。

図3より、ビット誤り率 p_b が高い時、正規化グッドプット \mathcal{U}_g はペイロード長 ℓ_d に対して、凸状となることがわかる。

\mathcal{U}_g を最大化するペイロード長を $\hat{\ell}_g (\triangleq \arg \max_{\ell(d)} \mathcal{U}_g)$ とする。 $\hat{\ell}_g$ は $\frac{\partial \mathcal{U}_g}{\partial \ell_d} = 0$ を満たすことが必要となる。 $p_b > 0$ の時、 $\hat{\ell}_g$ は次式で与えられる。

$$\hat{\ell}_g = -\ell_h + \sqrt{\ell_h^2 - \frac{2\ell_h}{\log(1 - p_b)}}. \quad (4)$$

前述の例で、 p_b が 10^{-5} と 10^{-4} の時の正規化グッドプット \mathcal{U}_g を最大化するペイロード長 $\hat{\ell}_g$ は、それぞれ 937 bytes、272 bytes である。よって、回線の状態が動的に変換する無線ネットワークでは (特徴 C1 参照)、回線の状態に応じて、ペイロード長を調整する必要がある。

注1 (4) 式は若干複雑である。そこで、(1) 式で与えられる PER を、次のように近似すると、

$$\text{PER} \approx 1 - e^{-p_b(\ell_d + \ell_h)}, \quad (5)$$

$\hat{\ell}_g$ の近似値は、次のように与えられる。

$$\hat{\ell}_g \approx -\ell_h + \frac{\sqrt{(\ell_h p_b)^2 + 2\ell_h p_b}}{p_b}. \quad (6)$$

$\ell_h p_b$ が十分小さい場合、 $\hat{\ell}_g$ は、

$$\hat{\ell}_g \approx -\ell_h + \sqrt{\frac{2\ell_h}{p_b}}, \quad (7)$$

として与えられる。

例えば、 p_b が 10^{-5} の時、(7) 式を使って得られる $\hat{\ell}_g$ は、936 bytes となる。よって、近似精度は良いことがわかる。

注2 IEEE 802.11 系無線 LAN では、複数の端末が一つの回線を効率良く共有するため、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) と呼ばれる MAC 方式を実装している。この MAC 方式では、

- 端末がパケットを送信する前に、現在、通信をしている他の端末がいないかを確認する、
- 他の端末が送信していない (つまり送信可能) であっても、ランダムに決められた時間待機して送信する、
- パケットを正しく受信した端末は、ACK を全端末へ送信する、
- 他の端末からパケット送信による衝突やビット誤りによりパケットが廃棄された場合、ACK の未受信により当該端末はパケット送信の失敗を検出する。この端末は、ランダムに決められた時間待って、再送を試みる、

のような手順を採用している。そのため、グッドプットの解は複雑となる (例えば文献 13) 参照)。

しかしながら、CSMA/CA 方式は、基本的に SW 方式の拡張であるため、IEEE 802.11 無線 LAN の性能の傾向は、図3のようになる。

CSMA/CA 方式の場合、複数の端末が (ほぼ) 同時にパケットを送信した場合、パケットの衝突が発生してしまう。ある端末のパケット送信によって衝突が発生し再送することになると、他の端末は、送信待機となってしまふ。よって、パケット衝突は、ペイロード長が大きいほど、ネットワーク全体へのグッドプットに大きな影響を与えてしまう。

Lin ら¹⁴⁾ は、このようなパケット衝突が発生するネットワークでは、ビット誤りが発生しない場合でも、グッドプットを最大化するペイロード長が存在することを示している。

注3 IEEE 802.11 系無線 LAN でのペイロード長は 2312 bytes と規定されている⁸⁾。図3より、無線回線の品質が悪い場合 (つまりビット誤り率 p_b が大きい場合)、IEEE 802.11 系無線 LAN のグッドプットは著しく劣化することがわかる。

一方、無線センサーネットワークの標準プロトコルである IEEE 802.15.4 では、ペイロード長を 127 bytes としている¹⁵⁾。無線センサーネットワークでは、機械対機械 (M2M) 通信を想定しているため、アプリケーションで発生するデータの長さは小さい¹⁶⁾。さらに、回線品質が悪い無線環境を想定すると、IEEE 802.15.4 で規定されているペイロード長は妥当である。

例2 1つの回線で再送がない場合

無線センサーネットワークのような小さい消費電力が求められるネットワークでは、パケットが廃棄されても再送されない (つまり誤り回復機能が実装されていない) ことが多い。この時の正規化グッドプット $\tilde{\mathcal{U}}_g$ は、

$$\tilde{\mathcal{U}}_g = \frac{\ell_d (1 - \text{PER})}{\ell_d + \ell_h}, \quad (8)$$

として与えられる。

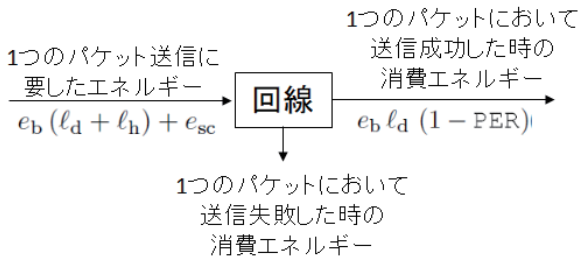


図4. 1つの無線回線でのエネルギーモデル

【出典】文献17)の図3をもとに改変

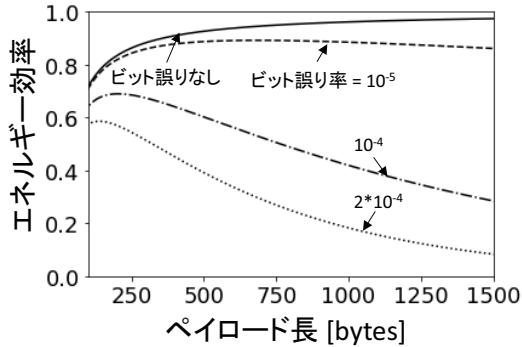


図5. 様々なビット誤り率におけるペイロード長に対するエネルギー効率

3.2 QoS をエネルギー効率とした場合

電力供給の難しい無線端末では、エネルギーの消費を抑える必要がある(特徴 C2 参照)。よって、無線ネットワークでは、エネルギー効率は最も重要な QoS としてあげられる。

例3 1つの回線の場合

無線ネットワークのエネルギーモデルは、ネットワーク構成、通信方式等の要因により、多種多様である。ここでは、文献17)で取り上げた1つの無線回線でのエネルギーモデルとエネルギー効率を概説する。

ある回線のエネルギー効率を \mathcal{U}_e とすると、 \mathcal{U}_e は次式で与えられる(図4参照)。

$$\mathcal{U}_e = \frac{e_b \ell_d (1 - \text{PER})}{e_b (\ell_d + \ell_h) + e_{sc}} = \frac{\ell_d (1 - p_b)^{\ell_d + \ell_h}}{e_b (\ell_d + \ell_h) + e_{sc}} \quad (9)$$

ここで、係数 e_b は1ビットを送信するために消費するエネルギーであり、係数 e_{sc} は1つのパケットを送信するためスリープモードから起動モードに切り替えるためのエネルギーと符号化に要するエネルギーの和である。

図5に、ビット誤り率 p_b が $0, 10^{-5}, 10^{-4}, 2 \times 10^{-4}$ の時のペイロード長 ℓ_d に対するエネルギー効率 \mathcal{U}_e を示す。係数 e_b と e_{sc} を、文献17)よりそれぞれ $1.85 \mu\text{J}$ 、 $24.86 \mu\text{J}$ とした。

図5より、QoS をグッドプットとした時と同様に、ビット誤り率 p_b が高い時、エネルギー効率 \mathcal{U}_e はペイロード長 ℓ_d に対して、凸状となることがわかる。

\mathcal{U}_e を最大化するペイロード長を $\hat{\ell}_e (\hat{\triangleq} \arg \max_{\ell^{(d)}} \mathcal{U}_e)$ とする。

$\hat{\ell}_e$ は $\frac{\partial \mathcal{U}_e}{\partial \ell_d} = 0$ を満たすことが必要となる。 $p_b > 0$ の時、 $\hat{\ell}_e$ は次式で与えられる。

$$\hat{\ell}_e = -\frac{e_b \ell_h + e_{sc}}{2e_b}$$

$$+ \sqrt{\frac{(e_b \ell_h + e_{sc})^2}{4e_b^2} - \frac{e_b \ell_h + e_{sc}}{e_b \log(1 - p_b)}} \quad (10)$$

前述の例で、 p_b が 10^{-5} と 10^{-4} の時のエネルギー効率 \mathcal{U}_e を最大化するペイロード長 $\hat{\ell}_e$ は、それぞれ 684 bytes、202 bytes である。よって、エネルギー効率を常に最適化するためには、回線の状態に応じて、ペイロード長を調整する必要がある。

4 動的ペイロード長方式の研究例

前節では、ある QoS に対して最適なペイロード長が存在することを述べた。(4)式と(10)式より、最適なペイロード長は、回線のビット誤り率 p_b に依存する。そこで、ビット誤り率を含む回線の状態を観測して、その状態に基づき、ペイロード長を最適化する方式が提案されている。

表1に動的ペイロード長方式の研究例を示す。

- E. Modiano¹⁸⁾: Modiano は、ビット誤り率の推定値 \bar{p}_b を最尤推定法を使って求めた。パケット長、パケット送信数、パケット再送数の観測値を、それぞれ ℓ 、 M 、 R とすると、 \bar{p}_b は、

$$\bar{p}_b = 1 - \left(\frac{M - R}{M} \right)^{\frac{1}{\ell}} \quad (11)$$

として与えられることを示した。この \bar{p}_b と(4)式を使って、最適なペイロード長を導出した。

注4 正確には、例1で導入した仮定と文献18)で用いた仮定が異なるため、文献18)の(1)式の各項の係数と本稿の(4)式のそれとは異なる。

- P. Lin 他¹⁴⁾: CSMA/CA と呼ばれる MAC 方式が実装されている IEEE 802.11 無線 LAN でのグッドプットの解は、複雑となる(注2参照)。

そこで、Lin 他は、機械学習を使って、ペイロード長とグッドプットの関係を求める方式を提案している。機械学習のアルゴリズムは、複数層パーセプションを採用している。

- Y. Sankarasubramaniam 他¹⁷⁾: Sankarasubramaniam らは、エネルギー効率の概念を提唱し、それを最大化するペイロード長の解を導出した(例3参照)。
- W. Dong 他¹⁹⁾: Dong らは、QoS としてオーバーヘッド率 \mathcal{U}_o を導入した。 \mathcal{U}_o は、送信した総バイト数を送信成功したバイト数で除算した値を意味し、

$$\mathcal{U}_o = \frac{\ell_d + \ell_h + \ell_o}{\ell_d (1 - \text{PER})} \quad (12)$$

として与えられる。ここで、 ℓ_o は動的ペイロード長方式の実装にあたってのオーバーヘッドである。

Dong らは、 \mathcal{U}_o を最小化する以下のアルゴリズムを提案している。

1. 送信局は一定数のパケットの送信後、ACK の受信数から、PER を推定する。
2. PER の推定値と現在のペイロード長より、(12)式の勾配値を求める。
3. その勾配値から、ペイロード長を増減させる。

なお、回線の利用効率を高めるために、複数の短いパケットを結合して転送する方式を採用している。

表 1. 動的ペイロード長方式の研究例

| 研究者 | 対象ネットワーク | QoS | 手法 |
|--|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
| E. Modiano ¹⁸⁾ | ワンホップ無線リンク | グッドプット | 最尤推定法を使ったビット誤り率の推定 |
| P. Lin 他 ¹⁴⁾ | 無線 LAN | グッドプット | 機械学習の利用 |
| Y. Sankarasubramaniam 他 ¹⁷⁾ | 無線センサーネットワーク | エネルギー効率 | エネルギー効率の概念の提唱 |
| W. Dong 他 ¹⁹⁾ | 無線センサーネットワーク | オーバーヘッド率 ^a | 無線リンクの動的推定と最適化 |
| A. Jamal 他 ²⁰⁾ | コグニティブ無線センサーネットワーク | 干渉レベル、遅延時間、ビット誤り率の条件を満たしつつエネルギー効率 | 拘束条件付きマルコフ決定過程の利用 |

^a再送がない場合のグッドプットの逆数にほぼ等しい(注 5 参照)。

注 5 \mathcal{U}_0 は、再送がない正規化グッドプット $\tilde{\mathcal{U}}_g$ の逆数と、ほぼ同じである ((8) 式参照)。よって、 \mathcal{U}_0 を最小化することは、 \mathcal{U}_g を最大化することと、ほぼ等価である。

- A. Jamal 他²⁰⁾: Jamal らは、コグニティブ無線センサーネットワークにおいて、選択された周波数帯 (チャンネル) に応じてペイロード長を調節する方式を、提案している。

コグニティブ無線センサーネットワークでは、様々な周波数帯を効率よく使用することを目的に、プライマリユーザー (Primary User: PU) とセカンダリユーザー (Secondary User: SU) が存在する。PU は、ある周波数帯の独占使用権を保持しているユーザーである。一方、SU はその周波数帯を独占使用権を保持していないユーザーである。SU は、PU に混信・干渉を与えない条件のもとで、周波数帯を利用できる。通常、センサー端末は SU となる²¹⁾。

コグニティブ無線センサーネットワークでは、以下のようなトレードオフが発生する。

- SU によって選択されている周波数帯を利用する頻度が少ない PU は、ペイロード長が大きいほど好ましい。
- 周波数帯が PU によって頻りに利用されている場合、PU と SU 同士の衝突を避けるために、小さいペイロード長が好ましい。

Jamal らは、上記の性質を利用して、干渉レベル、遅延時間、ビット誤り率の条件を満たしつつエネルギー効率を最大化する拘束条件付きマルコフ決定過程の枠組みを提案している。

5 課題

以下、動的ペイロード長方式について、今後の課題をあげる。

1. 無線ネットワークを使ったアプリケーションに対する QoS は、多種多様である。このような QoS を提供する無線ネットワークには、ペイロード長のみならず、ルーティング方式を含む様々なパラメータの複合的な組み合わせが必要である。すなわち物理層からトランスポート層までの制御パラメータを最適化するアプローチである、クロスレイヤーアプローチ²²⁾が有望である。このアプローチの検討が大きな課題である。
2. QoS を最適化するためには、無線ネットワークの状況をもとにしたフィードバック制御を実装しなければならない。よって、フィードバック制御のオーバーヘッ

ドを吟味する必要がある。無線センサーネットワークのように、低コストで低消費電力が求められるネットワークでは、このオーバーヘッドの削減が重要な課題である。

3. 無線 LAN のような、人対人・人対機械の通信が主流であるネットワークでは、数 10 Mbytes を超える巨大なデータを転送させることが必要となる。そのため、このようなネットワークではペイロード長を超える大きなデータを転送する場合、大きなデータを分割する機能を有している²³⁾。

Jelenković と Tan²⁴⁾ は、無線回線の状態に応じてデータ分割する方式を提案し、その有効性を確認している。一方、データ分割によって、パケットの回線への到着がバースト的となり、そのバースト的なパケット到着がネットワークに輻輳をもたらすことが知られている²⁵⁾。よって、データ分割を考慮したペイロード長の最適化手法の検討も課題である。

6 おわりに

本稿では、無線ネットワークにおける動的ペイロード長方式の研究事例を紹介するとともに、今後の課題を述べた。調査した範囲は限定的である。今後は、自動車アドホックネットワーク (VANET: Vehicular Ad-hoc Network)、遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Network)²⁶⁾ を含む多様な無線ネットワークの網羅的調査を行い、技術動向の明確化とそれにもとづく課題分析が課題である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP15K00139 の支援を受けました。

参考文献

- [1] J. Kurose and K. Ross: "Computer Networking: A Top-Down Approach", Pearson Education Limited, seventh edition (2016).
- [2] M. Schwartz: "Telecommunication Networks: Protocols, Modeling and Analysis", Addison-Wesley Publishing Company (1987).
- [3] B. Fu, Y. Xiao, H. Deng and H. Zeng: "A survey of cross-layer designs in wireless networks", IEEE Communications Surveys & Tutorials, **16**, 1, pp. 110 – 126 (2014).

- [4] V. C. Gungor and G. P. Hancke: “Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 10, pp. 4258–4265 (2009).
- [5] P. Park, S. C. Ergen, C. Fischione, C. Lu and K. H. Johansson: “Wireless network design for control systems: A survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **20**, 2, pp. 978–1013 (2018).
- [6] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash: “Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, **17**, 4, pp. 2347–2376 (2015).
- [7] A. S. Tanenbaum: “Computer Networks”, Prentice Hall PTR, third edition (1996).
- [8] B. P. Crow, I. Widjaja, J. G. Kim and P. T. Sakai: “IEEE 802.11 wireless local area networks”, *IEEE Communications Magazine*, **35**, 9, pp. 116–126 (1997).
- [9] M. Yigit, H. U. Yildiz, S. Kurt, B. Tavli and V. C. Gungor: “A survey on packet size optimization for terrestrial, underwater, underground, and body area sensor networks”, *Int. J. Communication Systems*, **31**, 11 (2018).
- [10] 横谷哲也: “IoTと通信ネットワーク技術”, *電子情報通信学会会誌*, **102**, 5, pp. 383–387 (2019).
- [11] 羽田靖史: “ロボットのための無線通信”, *電子情報通信学会会誌*, **102**, 6, pp. 514–516 (2019).
- [12] 高橋幹, 國澤良雄, 神谷尚保, 新保宏之: “アンライセンスバンドを使用するLPWA (Low Power Wide Area) 規格の最新動向”, *電子情報通信学会会誌*, **102**, 5, pp. 388–392 (2019).
- [13] P. Chatzimisios, A. Boucouvalas and V. Vitsas: “Influence of channel BER on IEEE 802.11 DCF”, *Electronics Letters*, **39**, 23, pp. 1687–1689 (2003).
- [14] P. Lin and T. Lin: “Machine-learning-based adaptive approach for frame-size optimization in wireless LAN environments”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **58**, 9, pp. 5060–5073 (2009).
- [15] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)”, *IEEE Std 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006)*, pp. 1–314 (2011).
- [16] 新熊亮一, 岩井孝法, 里田浩三: “5G研究のためのIoTトラヒックモデル”, *電子情報通信学会論文誌 B*, **J101-B**, 5, pp. 310–319 (2018).
- [17] Y. Sankarasubramaniam, I. F. Akyildiz and S. W. McLaughlin: “Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks”, *Proceedings of the First IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, 2003., pp. 1–8 (2003).
- [18] E. Modiano: “An adaptive algorithm for optimizing the packet size used in wireless ARQ protocols”, *Journal Wireless Networks*, **5**, 4, pp. 279–286 (1999).
- [19] W. Dong, C. Chen, X. Liu, Y. He, Y. Liu, J. Bu and X. Xu: “Dynamic packet length control in wireless sensor networks”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **13**, 3, pp. 1172–1181 (2014).
- [20] A. Jamal, C. Tham and W. Wong: “Dynamic packet size optimization and channel selection for cognitive radio sensor networks”, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, **1**, 4, pp. 394–405 (2015).
- [21] O. B. Akan, O. B. Karli and O. Ergul: “Cognitive radio sensor networks”, *IEEE Network*, **23**, 4, pp. 34–40 (2009).
- [22] I. Al-Anbagi, M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah: “A survey on cross-layer quality-of-service approaches in WSNs for delay and reliability-aware applications”, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, **18**, 1, pp. 525–552 (2016).
- [23] T. Ikegawa, Y. Kishi and Y. Takahashi: “Data-unit-size distribution model when message segmentations occur”, *Performance Evaluation*, **69**, 1, pp. 1–16 (2012).
- [24] P. R. Jelenković and J. Tan: “Dynamic packet fragmentation for wireless channels with failures”, *Proc. ACM MobiHoc’08*, pp. 73–82 (2008).
- [25] T. Ikegawa: “Effect of payload size on mean response time when message segmentations occur: Case of burst packet arrival”, *Proceedings of the 12th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, VALUETOOLS 2019*, New York, NY, USA, ACM, pp. 7–14 (2019).
- [26] 北須賀輝明他: “モバイルネットワーク”, 共立出版 (2016).