

IEEE802.11 と IEEE802.16 を収容する 無線アクセスネットワークにおけるパケット分配特性

滝 沢 泰 久^{†1} 谷 口 典 之^{†1}
山 口 明^{†1} 小 花 貞 夫^{†1}

携帯電話、無線 LAN システムなど無線システムの普及により、多様で異なる無線システムが混在する無線通信環境が構築されつつある。また、無線リソースの有効利用技術として、コグニティブ無線が提案されている。コグニティブ無線は、無線通信環境に応じて、適応的に多様な無線リソースを利用可能とする無線技術である。以上のことから、近い将来において異なる複数の無線メディアを収容したアクセスネットワークが構成されることが予想される。本論文では、このような無線メディアダイバーシティを想定し、異種の無線システムである IEEE802.11 と IEEE802.16 の無線インタフェースを備えた基地局と端末により構成されるアクセスネットワークにおいて、両インタフェースによる集約リンクへのパケット分配に関する特性を示す。さらに、その特性によって、ネットワーク全体の負荷を最小化し、遅延時間の削減とスループットの向上が可能であることを示す。

Characteristics of Packet Distribution in Wireless Access Networks Accommodating IEEE802.11 and IEEE802.16

YASUHISA TAKIZAWA,^{†1} NORIYUKI TANIGUCHI,^{†1}
AKIRA YAMAGUCHI^{†1} and SADA OOBANA^{†1}

In emerging wireless communication environments, a diversity of wireless systems will coexist using a diversity of applications. On the other hand, concern is increasing that the growing use of wireless systems will exhaust finite radio resources. Cognitive radio, which aims to optimize the utilization efficiency of radio resources by combining multiple wireless systems, has been proposed as a solution to this problem. Therefore, the wireless access network accommodating a diversity of wireless systems will emerge. In this paper, the wireless access network is assumed to be composed of base stations and terminals which are equipped with IEEE802.11 and IEEE802.16 wireless interfaces, and we show the network load has an optimal solution for the packet distribution to an interface when the packets in each node is distributed to both interfaces.

1. はじめに

近年、携帯電話、PHS、Wi-Fi および Bluetooth など多様な無線システムの利用拡大が進んでいる。さらに、IEEE802.16 の標準規格も進み、WiMAX や Mobile WiMAX による広域または中域の高速無線システムの利用も予想される。このように、無線通信環境は異なる周波数帯域や通信方式を持つ多様な無線システムが混在する環境となりつつある。一方、無線リソースは有限であるため、無線システムの利用拡大と多様化にともない、無線リソースの枯渇が懸念される。この問題を解決する技術として、コグニティブ無線技術が提案されている^{1)–4)}。コグニティブ無線 (Cognitive Radio) 技術は、無線機が周囲の電波利用環境を認識し、その状況に応じて無線機が複数の周波数帯域、タイムスロットなどの無線リソースならびに通信方式を適宜使い分け、ユーザの所望の通信容量を所望の通信品質で周波数の有効利用をはかりつつ伝送を行う無線通信技術である³⁾。

以上のことから、コグニティブ無線技術により多様な無線システムを収容した無線アクセスネットワークが構成されることが予想される。同様に、3GPP の AIPN (All-IP Network)⁵⁾ や ITU-T の NGN (Next Generation Network)⁶⁾ においても多様な通信メディアを収容・統合するネットワークアーキテクチャの検討が進められている。

本論文では、このような無線メディアダイバーシティを想定し、多様な無線システムが混在する無線通信環境において、ネットワークの観点から無線メディアダイバーシティの活用を議論する。すなわち、異なる複数の無線システムを装備した基地局と、同様に異なる複数の無線システムを装備した端末により構成されるネットワークにおいて、ネットワーク負荷の最小化について議論する。

本論文では、無線アクセスネットワークに収容される無線システムを、ノーマディックモバイル (Nomadic Mobile) 環境を想定して、以下のシステムとする。

- 最も普及している無線システムである IEEE802.11 (以降, 11)。
- 近年、実用化が進められ、利用拡大が期待される IEEE802.16 (以降, 16)。

11 のメディアアクセス制御は分散的に行われ、帯域が保証されない。一方、16 のメディアアクセス制御は基地局駆動で行われ、帯域が保証される。また、それぞれの性能は表 1 にあるように明らかに異なる。上記の異なる無線インタフェースを装備する基地局と端末から

^{†1} 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
ATR Adaptive Communications Research Laboratories

表 1 802.11g と 802.16 の性能

Table 1 Performance of IEEE802.11g and 802.16 wireless systems.

| | 802.11g | 802.16 |
|---------|------------|----------|
| 最大送信レート | 54 Mbps | 75 Mbps |
| 送信距離 | 20 ~ 200 m | 2 ~ 5 km |

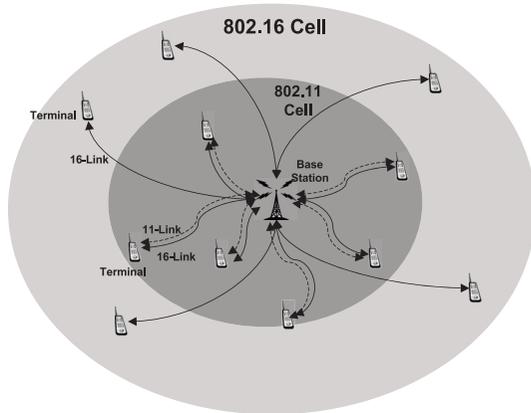


図 1 想定する無線アクセスネットワーク
Fig. 1 The assumed wireless access network.

構成される無線アクセスネットワークを次のような構成とする (図 1 参照)。

- 基地局は 16-基地局と 11-アクセスポイントの機能を有する。
- 端末は、11 および 16 を用いて基地局と通信可能である。
- 基地局において、11-カバレッジを内包する 16-カバレッジ全体に、端末をランダムに配置する。
- ネットワークは IP を想定し、データグラムの IP パケットネットワークとする。
さらに、上記無線アクセスネットワークにおいて、各端末の 11 と 16 インタフェースへのパケット分配を次のように行う。
- IP 層 (レイヤ 3) において、MAC 層 (レイヤ 2) から取得した無線リンクの負荷状況に応じて IP パケットを各無線リンクへ振り分ける。
- IP 層で集約された複数の無線リンクは、上位レイヤからは単一リンクとして見える透過性を提供する。

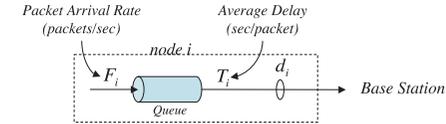


図 2 リンクコスト
Fig. 2 Link cost.

本論文では、定常状態のネットワークにおいて、上記パケット分配がネットワーク内の送信待機パケット数 (以降、ネットワーク負荷) を最小とする最適解を持つ基本特性を示す。また、その最適解においては、ネットワーク全体の平均遅延時間が減少し、スループットが向上することを示す。

以下、2章で、11-リンクと 16-リンクのパケット分配特性を示す。さらに、3章で、11-リンクと 16-リンクを集約したリンクのパケット分配特性を示し、ネットワーク全体としてのパケット分配特性を議論する。最後に、4章で関連研究について述べる。

2. 無線リンクのパケット分配に関する特性

2.1 リンクコスト

待ち行列理論に基づき、リンクの負荷状態をリンク内の平均待機パケット数 (キューに待機している平均パケット数と現在処理中の平均パケット数の和) とし、これをリンクコストとする。リンクコストが高い場合、リンク内に多数の待機パケットがありリンク負荷が高い。また、リンクコストが低い場合はリンク内の待機パケット数が少なく、リンク負荷が低い。リンクコストは、Little の定理により次のように求まる (図 2 参照)。

$$d_i = F_i \cdot T_i \tag{1}$$

d_i は端末 i におけるある無線インタフェースによる端末と基地局間リンクのコスト、 F_i は端末 i におけるある無線インタフェースによるリンクの平均パケット到着率、 T_i は端末 i におけるある無線インタフェースによるリンクの平均遅延時間である。遅延時間は端末にパケットが到着 (パケットが発生) してからパケットが送信完了するまでの時間である。したがって、遅延時間は、キューでの待機時間、メディアアクセス制御遅延時間、および通信遅延時間からなる。

2.2 11-リンクコストに関するパケット分配特性

11-リンクコストのパケット分配に関する依存性について述べる。

リンクへのパケット分配量は、リンクのパケット到着率 F_i である。式 (1) に基づくと、

リンクコストは、リンクに分配されたパケットの平均遅延時間の関数である。したがって、パケット分配に基づくリンクコストの特性を議論するため、平均遅延時間のパケット分配における依存性を解析する。平均遅延時間は次の 2 つの時間から構成される。

- キューでの待機時間
 - パケット送信のための処理時間（以降、パケットサービス時間）
- まず、パケットサービス時間のパケット分配に関する依存性を議論し、続いてキューでの待機時間の依存性を述べる。

11 におけるパケットサービス時間を次のようにモデル化する（図 3 参照）。

- パケットサービス時間を 11-スロットタイム（11b/g では $20 \mu\text{sec}$ ，11a では $9 \mu\text{sec}$ ，以降、スロット）に分割し、そのスロット数を時間として用いる。また、この時間内で発生するイベントはスロット単位で発生することとする。
- パケットサービス時間を送信試行までの待機期間であるバックオフ期間と送信試行期間の 2 つの期間に大別する。
- バックオフ期間では、アイドルイベント、ビジーイベント、衝突イベントが発生する。アイドルイベントは送信が発生せず、ビジーイベントはただ 1 つの送信が行われ、衝突イベントは 2 つ以上の送信が行われ衝突が発生する。
- 送信試行期間では、成功イベントまたは失敗イベントのいずれかが発生する。成功イベントは送信成功、失敗イベントは衝突による送信失敗に対応する。
- 端末 i における送信干渉領域（以降、セル i ）において、スロット単位のパケット送信試行回数を、平均（パケット送信試行率）が G_i であるポアソン分布とする⁷⁾⁻⁹⁾。 G_i は該当するセルにおける端末密度やトラフィック量に依存するパラメータである。
- セル i 内において、スロット単位のパケット到着率を F_i^c （以降、セル内パケット到着率）、端末 i におけるスロット単位のパケット到着率を F_i （以降、端末内パケット到着率）とする。また、 n_i をセル i の端末数とすると、 F_i はその期待値として $F_i = F_i^c/n_i$ である。 F_i^c と F_i は該当セル内の端末のトラフィック量を示すパラメータである。

バックオフ期間に要する時間 B の端末内パケット到着率 F_i に関する依存性を示すため、 B のパケット送信試行率 G_i に関する依存性を示し、その後 F_i の G_i に関する相関を述べる。

バックオフ期間はバックオフカウンタが 0 になるまでの期間である。バックオフカウンタはアイドルイベントの発生により 1 減ざられ、ビジーイベントまたは衝突イベントでは減ざられない。すなわち、アイドルイベントが発生するまでバックオフカウンタは減ざられない。ビジーまたは衝突のイベントが発生する確率を P_{bc} とすると、アイドルイベントに先立ち、

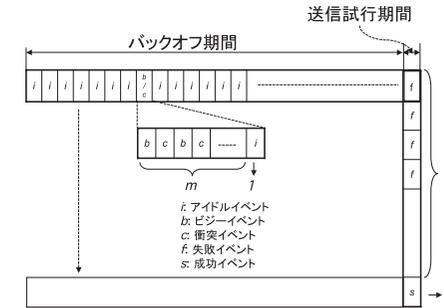


図 3 パケットサービス時間のモデル
Fig. 3 Model for packet service time.

ビジーまたは衝突のイベントが続けて m 回発生する確率は、幾何分布により $P_{bc}^m \cdot (1 - P_{bc})$ である。また、ビジーイベントまたは衝突イベントに要する時間を T_{bc} 、アイドルイベントに要する時間 T_{id} とすると、バックオフカウンタを 1 減じるのに要する時間の確率母関数 $M(z)$ は次のようになる。

$$M(z) = \sum_{m=0}^{\infty} P_{bc}^m (1 - P_{bc}) z^{mT_{bc} + T_{id}} = \frac{(1 - P_{bc}) z^{T_{id}}}{1 - P_{bc} z^{T_{bc}}} \quad (2)$$

$$P_{bc} = 1 - e^{-G_i} \quad (3)$$

$$T_{bc} = P_{bc} P_s T_s + P_{bc} (1 - P_s) T_c \quad (4)$$

$$T_{id} = 1 \quad (5)$$

$$T_s = DIFS + RTS + CTS + DATA + ACK + 3 \cdot SIFS \quad (6)$$

$$T_c = DIFS + RTS \quad (7)$$

$$P_s = G_i e^{-G_i} \quad (8)$$

T_s はパケット送信成功に費やす時間、 T_c はパケット衝突に費やす時間、 P_{bc} は 1 つ以上のパケットが送信される確率、 P_s はただ 1 つのパケットが送信される確率である。 $M(z)$ により、バックオフカウンタを 1 つ減じるのに要する時間の平均 \overline{M} は次のようになる。

$$\overline{M} = \left. \frac{dM(z)}{dz} \right|_{z=1} = N_{bc} T_{bc} + 1 \quad (9)$$

$$N_{bc} = \frac{P_{bc}}{1 - P_{bc}} \quad (10)$$

N_{bc} はバックオフ期間におけるビジーまたは衝突のイベントが連続発生す平均回数である．バックオフ期間はパケットの送信が成功するまで繰り返される．送信試行期間において，成功イベントに先立ち，失敗イベントが n 回続けて発生する場合，バックオフ期間が $(n + 1)$ 回繰り返され，その期間に費やされる時間の平均 K_n は次のようになる．

$$K_n = \sum_{i=0}^n \frac{2^i W}{2} \bar{M} = \frac{W(2^{n+1} - 1)(N_{bc}T_{bc} + 1)}{2} \quad (11)$$

$$N_{bc} = \frac{P_{bc}}{1 - P_{bc}} \quad (12)$$

W はコンテンションウィンドサイズである．送信試行期間で失敗イベントが発生する確率を P_{xc} とすると，成功イベントに先立ち， n 回続けて失敗イベントが発生する確率は $P_{xc}^n(1 - P_{xc})$ である．したがって，全バックオフ期間に費やす時間の平均 \bar{B} は次のようになる．

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \sum_{n=0}^{\infty} P_{xc}^n(1 - P_{xc})K_n = \frac{W(1 - P_{xc})(N_{bc}T_{bc} + 1)}{2} \times \left(\sum_{n=0}^{\infty} P_{xc}^n 2^{n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} P_{xc}^n \right) \\ &= \frac{W(N_{bc}T_{bc} + 1)}{2(1 - 2P_{xc})} \quad P_{xc} < \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (13)$$

$$P_{xc} = \frac{P_c}{P_{tx}} \quad (14)$$

$$P_c = 1 - (1 + G)e^{-G_i} \quad (15)$$

$$P_{tx} = 1 - G_i e^{-G_i} \quad (16)$$

送信試行期間は，バックオフカウンタが 0 (バックオフ期間の終了) になると，開始する．また，バックオフ期間と同様に，パケットの送信が成功するまで繰り返される．送信試行期間においてパケットが 1 つ以上送信される場合，全送信試行期間に要する時間の確率母関数 $A(z)$ は，次のようになる．

$$A(z) = \sum_{n=0}^{\infty} P_{xc}^n(1 - P_{xc})z^{nT_c + T_s} = \frac{(1 - P_{xc})z^{T_c}}{1 - P_{xc}z^{T_s}} \quad (17)$$

式 (17) に基づくと，全送信試行期間に要する時間の平均 \bar{A} は次のようになる．

$$\bar{A} = \left. \frac{dA(z)}{dz} \right|_{z=1} = N_{xc}T_c + T_s \quad (18)$$

$$N_{xc} = \frac{P_{xc}}{1 - P_{xc}} \quad (19)$$

N_{xc} は送信試行期間における平均衝突回数である．以上のことから，端末 i における平均パケットサービス時間 S_i は次のようになる．

$$S_i = \bar{A} + \bar{B} \quad (20)$$

さらに，平均パケットサービス時間 S_i のパケット送信試行率 G_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のように求まる．

$$\frac{dS_i}{dG_i} > 0 \quad (21)$$

$$\frac{d^2S_i}{dG_i^2} > 0 \quad (22)$$

すなわち，平均パケットサービス時間 S_i は，パケット送信試行率 G_i に関して下に凸の単調増加関数である．このことは，式 (20) をグラフ化した図 4 から示される．

さらに，平均パケットサービス時間 S_i の端末内パケット到着率 F_i への依存性を得るため， F_i と G_i との相関を求める．パケットサービス時間内におけるパケット送信試行平均回数は $S_i G_i$ である．一方，1 つのパケットが送信成功するまでの送信回数は $(N_{xc} + 1)$ であ

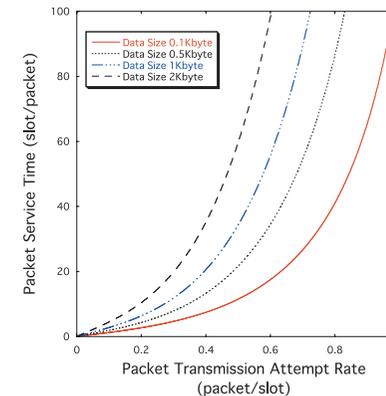


図 4 平均パケットサービス時間のパケット送信試行率に関する依存性
Fig. 4 Dependence of average packet service time on packet transmission attempt rate.

り, またパケットサービス時間内に到着する平均パケット数は $F_i^c S_i$ である. すなわち, パケットサービス時間内におけるパケット送信試行平均回数は $F_i^c S_i (N_{xc} + 1)$ として表される. 以上の関係から, セル内パケット到着率 F_i^c は次のようになる.

$$F_i^c = \frac{G_i}{N_{xc} + 1} \quad (23)$$

さらに, セル内パケット到着率 F_i^c のパケット送信試行率 G_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のように求まる.

$$\frac{dF_i^c}{dG_i} > 0 \quad (24)$$

$$\frac{d^2 F_i^c}{dG_i^2} < 0 \quad (25)$$

すなわち, セル内パケット到着率 F_i^c はパケット送信試行率 G_i に関して, 上に凸の単調増加関数である. このことは, 式 (23) をグラフ化した図 5 においても示される. したがって, 式 (24), (25) からパケット送信試行率 G_i のセル内パケット到着率 F_i^c への依存性は次のように示される.

$$\frac{dG_i}{dF_i^c} = \frac{1}{\left(\frac{dF_i^c}{dG_i}\right)} > 0 \quad (26)$$

$$\frac{d^2 G_i}{d(F_i^c)^2} = -\frac{1}{\left(\frac{d^2 F_i^c}{d(G_i)^2}\right)} > 0 \quad (27)$$

さらに, $F_i = F_i^c / n_i$ であることから, パケット送信試行率 G_i の端末内パケット到着率 F_i への依存性は次のように示される.

$$\frac{dG_i}{dF_i} > 0 \quad (28)$$

$$\frac{d^2 G_i}{d(F_i)^2} > 0 \quad (29)$$

以上のことから, 平均パケットサービス時間 S_i の, 端末内パケット到着率 F_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のように求まる.

$$\frac{dS_i}{dF_i} = \frac{dS_i}{dG_i} \frac{dG_i}{dF_i} > 0 \quad (30)$$

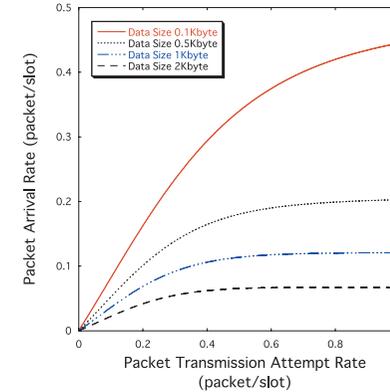


図 5 パケット到着率のパケット送信試行率に関する依存性
Fig. 5 Dependence of packet arrival rate on packet transmission attempt rate.

$$\frac{d^2 S_i}{d(F_i)^2} = \frac{d^2 S_i}{d(G_i)^2} \left(\frac{dG_i}{dF_i}\right)^2 + \frac{dS_i}{dG_i} \frac{d^2 G_i}{d(F_i)^2} > 0 \quad (31)$$

すなわち, 平均パケットサービス時間 S_i は端末内パケット到着率 F_i に関して下に凸の単調増加関数である.

次に, 端末 i におけるキューでの平均待機時間 W_i の端末内パケット到着率 F_i に関する依存性について議論する. キューでの平均待機パケット数を N_Q とすると, Little の定理から $N_Q = F_i W_i$ である. キューでの平均待機時間 W_i は, キューでの平均待機パケットをすべて処理する時間と, 各パケットの到着時における処理中のパケットの残余時間の合計の期待値 R との和であることから, 次式を得る.

$$W_i = N_Q S_i + R = F_i W_i S_i + R \quad (32)$$

パケット到着時に処理中のパケットの残余時間の期待値は $\overline{S_i^2}/2S_i$ であり, パケットサービス時間内に到着する平均パケット数は $F_i S_i$ である. ただし, $\overline{S_i^2}$ はパケットサービス時間の 2 次モーメントである. 以上のことから, 各パケットの到着時における処理中のパケットの残余時間の合計の期待値 R は $F_i \overline{S_i^2}/2$ となる. これを式 (32) に代入すると, キューでの平均待機時間 W_i に関して次式を得る.

$$W_i = \frac{F_i \overline{S_i^2}}{2(1 - F_i \cdot S_i)} \quad (33)$$

ここで, キューでの平均待機時間 W_i の端末内パケット到着率 F_i に関する依存性を求め

るため、上記のパケットサービス時間の 2 次モーメント $\overline{S_i^2}$ と端末内パケット到着率 F_i との相関について述べる。式 (9) の確率母関数 $M(z)$ から、バックオフカウンタを 1 減じるのに要する時間の分散 $V[M]$ は次のように求まる。

$$V[M] = \left. \frac{d^2 M(z)}{dz^2} \right|_{z=1} = \frac{P_{bc}(T_{bc})^2}{(1 - P_{bc})^2} \quad (34)$$

バックオフカウンタを 1 減じるのに要する時間の分散 $V[M]$ は各カウンタごとに独立であるので、全バックオフ期間に費やした時間の分散 $V[B]$ は $V[M]$ の総和から求まる。したがって、 $V[B]$ を、 \overline{M} から全バックオフ期間に費やした時間の平均 \overline{B} を求めた手順と同様に求めると次のようになる。

$$V[B] = \frac{W P_{bc}(T_{bc})^2}{2(1 - P_{bc})^2(1 - 2P_{xc})} \quad (35)$$

すなわち、全バックオフ期間に費やした時間の 2 次モーメント $\overline{B^2}$ は次のように求まる。

$$\overline{B^2} = \overline{B} + V[B] \quad (36)$$

さらに、式 (18) の確率母関数 $A(z)$ から全送信試行期間に費やした時間の分散 $V[A]$ は次のようになる。

$$V[A] = \left. \frac{d^2 A(z)}{dz^2} \right|_{z=1} = T_s(T_s - 1) + N_{xc}T_c(T_c - 1) + 2N_{xc}T_c(N_{xc}T_c + T_s) \quad (37)$$

すなわち、全送信試行期間に費やした時間の 2 次モーメント $\overline{A^2}$ は次のようになる。

$$\overline{A^2} = \overline{A} + V[A] \quad (38)$$

以上のことから、パケットサービス時間の 2 次モーメント $\overline{S_i^2}$ は次のように求まる。

$$\overline{S_i^2} = \overline{A^2} + \overline{B^2} \quad (39)$$

さらに、パケットサービス時間の 2 次モーメント $\overline{S_i^2}$ のパケット送信試行率 G_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のように求まる。

$$\frac{d\overline{S_i^2}}{dG_i} > 0 \quad (40)$$

$$\frac{d^2\overline{S_i^2}}{d(G_i)^2} > 0 \quad (41)$$

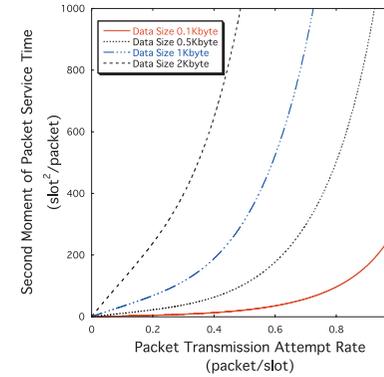


図 6 パケットサービス時間の 2 次モーメントのパケット送信試行率に関する依存性
Fig. 6 Dependence of 2nd moment of packet service time on packet transmission attempt rate.

すなわち、パケットサービス時間の 2 次モーメント $\overline{S_i^2}$ はパケット送信試行率 G_i に関して下に凸の単調増加関数である。このことは、式 (39) をグラフ化した図 6 においても同様の特性が示される。さらに、前述のパケット送信試行率 G_i とセル内パケット到着率 F_i^c との相関、およびセル内パケット到着率 F_i^c と端末内パケット到着率 F_i との相関から、パケットサービス時間の 2 次モーメント $\overline{S_i^2}$ の端末内パケット到着率 F_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のようになる。

$$\frac{d\overline{S_i^2}}{dF_i} > 0 \quad (42)$$

$$\frac{d^2\overline{S_i^2}}{d(F_i)^2} > 0 \quad (43)$$

式 (42), (43) に基づくと、キューでの平均待機時間 W_i の端末内パケット到着率 F_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のように求まる。

$$\frac{dW_i}{dF_i} > 0 \quad F_i S_i < 1 \quad (44)$$

$$\frac{d^2W_i}{d(F_i)^2} > 0 \quad F_i S_i < 1 \quad (45)$$

$F_i S_i$ は端末 i におけるリンク利用率であり、1 を超えることはない。したがって、キュー

での平均待機時間 W_i もまた端末内パケット到着率 F_i に関して、下に凸の単調増加関数である。

最後に、平均遅延時間 T_i とリンクコスト d_i の端末内パケット到着率 F_i に関する依存性を述べる。平均遅延時間 T_i は平均パケットサービス時間とキューでの平均待機時間の和である。平均パケットサービス時間 S_i 、キューでの平均待機時間 W_i のいずれも端末内パケット到着率 F_i に関して下に凸の単調増加関数であることから、それらの和である平均遅延時間 T_i もまた端末内パケット到着率 F_i に関して下に凸の単調増加関数である。すなわち、平均遅延時間 T_i の端末内パケット到着率 F_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のようになる。

$$\frac{dT_i}{dF_i} = \frac{dS_i}{dF_i} + \frac{dW_i}{dF_i} > 0 \quad (46)$$

$$\frac{d^2T_i}{d(F_i)^2} = \frac{d^2S_i}{d(F_i)^2} + \frac{d^2W_i}{d(F_i)^2} > 0 \quad (47)$$

続いて、リンクコスト d_i について議論する。上記式の結果を用いると、リンクコスト d_i の端末内パケット到着率 F_i に関する 1 次導関数および 2 次導関数は次のようになる。

$$\frac{dd_i}{dF_i} = T_i + F_i \frac{dT_i}{dF_i} > 0 \quad (48)$$

$$\frac{d^2d_i}{d(F_i)^2} = 2 \frac{dT_i}{dF_i} + F_i \frac{d^2T_i}{d(F_i)^2} > 0 \quad (49)$$

すなわち、11-リンクコスト d_i は、端末内パケット到着率 F_i に関して、下に凸の単調増加関数である。

2.3 16-リンクコストに関するパケット分配特性

16 においては、QoS がサポートされ、無線リンクの帯域保証が実施される¹²⁾。TDM において、帯域保証されたリンクは予約されたスロットである。この予約スロットへのパケット到着過程は、ポアソン過程として近似できることが知られている¹³⁾。また、リンクの帯域が保証されるため、パケット到着率とパケット処理時間の独立性が成立する。すなわち、16-リンクの負荷は端末密度などの他のリンクからの影響には依存せず、リンク自体へのトラフィック量（パケット到着率 F_i ）に依存する。このような 16-リンクのコスト d_i は、M/G/1 待ち行列に従って次のように求まる¹³⁾。

$$d_i = \frac{F_i}{C_i} + \frac{F_i^2 \cdot C_i \cdot \overline{S_i^2}}{2(C_i - F_i)} + \frac{F_i \cdot C_i \cdot A}{2(C_i - F_i)} \quad (50)$$

ただし、 C_i は帯域保証として予約されたリンクの通信容量、 $\overline{S_i^2}$ はパケット処理時間の 2 次モーメント、 A は帯域予約のための制御期間である。 C_i 、 A 、 $\overline{S_i^2}$ のいずれもパケット到着率 F_i とは独立であることから、 d_i の F_i に関する 1 次導関数と 2 次導関数は次のようになる。

$$\frac{dd_i}{dF_i} = \frac{1}{C_i} + \frac{C_i(2F_i \cdot \overline{S_i^2} + A)}{2(C_i - F_i)} + \frac{C_i \cdot F_i(F_i \cdot \overline{S_i^2} + A)}{2(C_i - F_i)^2} \quad (51)$$

$$\frac{d^2d_i}{d(F_i)^2} = \frac{C_i \cdot \overline{S_i^2}}{C_i - F_i} + \frac{C_i(2F_i \cdot \overline{S_i^2} + A)}{(C_i - F_i)^2} + \frac{C_i \cdot F_i(F_i \cdot \overline{S_i^2} + A)}{(C_i - F_i)^3} \quad (52)$$

式 (50)、(51)、(52) は、 $F_i < C_i$ において、いずれも正である。したがって、リンク容量内において、16-リンクコストも 11-リンクコストと同様にパケット到着率に関して下に凸の単調増加関数である。

3. 集約リンクコストとネットワークコスト

3.1 集約リンクコストのパケット分配特性

複数の無線リンクを併用する場合のコストを集約リンクコストと呼ぶ。端末 i の集約リンクコスト D_i は併用する複数のリンクの負荷状況（平均待機パケット数）を示す。すなわち、集約リンクの負荷は併用する各リンクのリンク内平均待機パケット数であるので、各リンクコストの和（図 7 参照）である。したがって、次のように求まる。

$$D_i = \sum_{k \in N(i)} d_i^k \quad (53)$$

$$F_i = \sum_{k \in N(i)} F_i^k \quad (54)$$

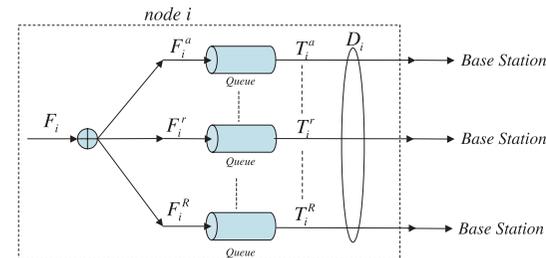


図 7 集約リンクコスト
Fig. 7 Aggregated link cost.

d_i^k は端末 i における無線インタフェース k による基地局までのリンクコスト, $N(i)$ は端末 i に装備されている無線インタフェースの集合, F_i^k は端末 i における無線インタフェース k によるリンクへのパケット到着率である.

11-リンクと 16-リンクを併用する場合, 端末 i における集約リンクコスト D_i は式 (53), (54) に従い, 次のようになる.

$$D_i = d_i^{11} + d_i^{16} \quad (55)$$

$$F_i = F_i^{11} + F_i^{16} \quad (56)$$

d_i^{11} は端末 i における 11-リンクコスト, d_i^{16} は端末 i における 16-リンクコスト, F_i^{11} は端末 i におけるパケット分配による 11-リンクへのパケット到着率, F_i^{16} は端末 i におけるパケット分配による 16-リンクへのパケット到着率である. 11-リンクコスト d_i^{11} はそのパケット到着率 F_i^{11} に関して下に凸の単調増加関数である. 一方, 16-リンクコスト d_i^{16} の 11-リンクへのパケット到着率 F_i^{11} に関する相関は, F_i は任意の分散を持つがその平均は定常状態とすると, 式 (55), (56) から, 次のようになる.

$$\frac{dF_i^{16}}{dF_i^{11}} = -1 < 0 \quad (57)$$

$$\frac{d^2 F_i^{16}}{d(F_i^{11})^2} = 0 \quad (58)$$

$$\frac{dd_i^{16}}{dF_i^{11}} = \frac{dd_i^{16}}{dF_i^{16}} \frac{dF_i^{16}}{dF_i^{11}} < 0 \quad (59)$$

$$\frac{d^2 d_i^{16}}{d(F_i^{11})^2} = \frac{d^2 d_i^{16}}{d(F_i^{16})^2} \left(\frac{dF_i^{16}}{dF_i^{11}} \right)^2 + \frac{dd_i^{16}}{dF_i^{16}} \frac{d^2 F_i^{16}}{d(F_i^{11})^2} > 0 \quad (60)$$

すなわち, 16-リンクコストは 11-リンクへのパケット到着率に関して下に凸の単調減少関数である. ここで, 集約リンクコストのパケット分配における凸性を議論する. 端末 i において, その集約リンクコストを F_i^{11} の関数とし, $D_i(F_i^{11})$ とすると, $D_i(F_i^{11})$ は次のようになる.

$$D_i(F_i^{11}) = d_i^{11}(F_i^{11}) + d_i^{16}(F_i^{11}) \quad (61)$$

$D_i(F_i^{11})$ が下に凸である必要条件は, 閉区間 $[0, F_i]$ において $D_i(0)$ と $D_i(F_i)$ の 2 点を結ぶ直線が $D_i(F_i^{11})$ よりつねに大きいことである (図 8 参照). したがって, 閉区間 $[0, F_i]$ において次式を満たす場合である.

$$H(F_i^{11}) = D_i(0) - D_i(F_i^{11}) + \frac{D_i(F_i) - D_i(0)}{F_i} F_i^{11} \geq 0 \quad (62)$$

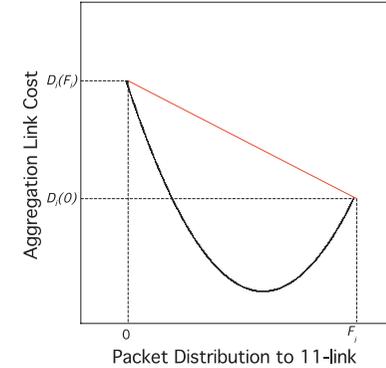


図 8 集約リンクコストの凸性

Fig. 8 Convex in aggregation link cost.

また, $H(F_i^{11})$ の F_i^{11} に関する 1 次導関数と 2 次導関数は次のようになる.

$$\begin{aligned} \frac{dH_i}{dF_i^{11}} &= \frac{D_i(F_i) - D_i(0)}{F_i} - \left(\frac{dd_i^{11}}{dF_i^{11}} + \frac{dd_i^{16}}{dF_i^{11}} \right) \frac{d^2 H_i}{d(F_i^{11})^2} \\ &= - \left(\frac{d^2 d_i^{11}}{d(F_i^{11})^2} + \frac{d^2 d_i^{16}}{d(F_i^{16})^2} \left(\frac{dF_i^{16}}{dF_i^{11}} \right)^2 + \frac{dd_i^{16}}{dF_i^{16}} \frac{d^2 F_i^{16}}{d(F_i^{11})^2} \right) \end{aligned} \quad (63)$$

さらに, 式 (57), (58), (59), (60) を上記式に適用すると次式を得る.

$$\frac{d^2 H_i}{d(F_i^{11})^2} < 0 \quad (64)$$

すなわち, $H(F_i^{11})$ の 1 次導関数 $H'(F_i^{11})$ は単調減少である. また, 平均値の定理により $H'(F_i^{11})$ は次のようになる.

$$\begin{aligned} \left. \frac{dD_i}{dF_i^{11}} \right|_{F_i^{11}=x} &= \frac{D_i(F_i) - D_i(0)}{F_i} \quad (0 < x < F_i) \\ \left. \frac{dH_i}{dF_i^{11}} \right|_{F_i^{11}=x} &= 0 \end{aligned} \quad (65)$$

さらに, 式 (1), (57), (58), (59), (60) から, $H'(F_i) < 0$, $H'(0) > 0$ が得られる. したがって, $H'(F_i^{11})$ は次のようになる.

表 2 $H(F_i^{11})$ の増減表

Table 2 Increasing and decreasing of $H(F_i^{11})$.

| | 0 | x | F_i |
|----------------|---|-----------------------|--------------|
| $H'(F_i^{11})$ | + | 0 | - |
| $H(F_i^{11})$ | 0 | \nearrow $H(x) > 0$ | \searrow 0 |

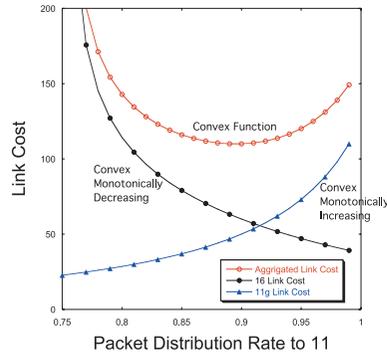


図 9 集約リンクコストの 11-リンクへのパケット分配に関する依存性

Fig. 9 Dependence of aggregated link cost on packet distribution to 11-link.

$$\begin{aligned}
 \frac{dH_i}{dF_i^{11}} &> 0 \quad 0 \leq F_i^{11} < x \\
 \frac{dH_i}{dF_i^{11}} &= 0 \quad F_i^{11} = x \\
 \frac{dH_i}{dF_i^{11}} &< 0 \quad x < F_i^{11} \leq F_i
 \end{aligned} \tag{66}$$

また、式 (1) を適用すると $H(x) > 0$ である。以上のことから、 $H(F_i^{11})$ は表 2 のように増減する。すなわち、 $H(F_i^{11})$ は閉区間 $[0, F_i]$ において $H(F_i^{11}) \geq 0$ である。したがって、 $D_i(F_i^{11})$ は下に凸である。同様に、集約リンクコストを 16-リンクへのパケット分配量の関数と見た場合においても、 $D_i(F_i^{16})$ は下に凸である。以上のことから、11-リンクと 16-リンクによる集約リンクコストは、11-リンクまたは 16-リンクへのパケット到着率に関して、下に凸の単調増加関数と下に凸の単調減少関数の和であり、それは下に凸の関数となる (図 9 参照)。以上のことから、集約リンクコストは 11-リンクまたは 16-リンクへのパケット到着率、すなわち、11-リンクと 16-リンクへのパケット分配に関して最適解が明らかに

存在する。

3.2 ネットワークコストのパケット分配特性

ネットワークコストは、ネットワークの負荷状況であるネットワーク内の平均待機パケット数である。したがって、ネットワークコスト E はネットワーク内の全端末の集約リンクコストの和であり、次のように求まる。

$$E = \sum_{i=1}^N D_i \tag{67}$$

N はネットワーク内の全端末数である。さらに、上記式を 11-リンクコストと 16-リンクコストに分離すると次式を得る。

$$E = \sum_{j=1}^{N^{11}} d_j^{11} + \sum_{k=1}^{N^{16}} d_k^{16} \tag{68}$$

N^{11} はネットワーク内の 11-リンク数、 N^{16} はネットワーク内の 16-リンク数である。さらに、式 (48)、(49) に基づくと、ネットワークの 11-リンク総コストのある 1 つの 11-リンクへのパケット到着率 F_i^{11} に関する相関は次のようになる。

$$\frac{d \left(\sum_{j=1}^{N^{11}} d_j^{11} \right)}{dF_i^{11}} > 0 \quad \frac{d^2 \left(\sum_{j=1}^{N^{11}} d_j^{11} \right)}{d(F_i^{11})^2} > 0 \tag{69}$$

すなわち、11-リンク総コストは、ある 11-リンクのパケット到着率に関して下に凸の単調増加である。同様に、16-リンク総コストもある 16-リンクのパケット到着率に関して下に凸の単調増加である。さらに、ネットワークの総パケット到着率 F は次のようになる。

$$F = \sum_{j=1}^{N^{11}} F_j^{11} + \sum_{k=1}^{N^{16}} F_k^{16} \tag{70}$$

すなわち、集約リンクコストと同様に、ネットワークコストは下に凸の関数となる。以上のことから、ネットワークコストにおいても、11-リンクおよび 16-リンクへのパケット分配に関して最小となる最適解が存在する。複数のインタフェースを持たない端末や、複数のインタフェースを持っているが基地局のセル外のため、1 つのリンクのみしか構成できない端末がネットワーク内に存在する場合、これらの端末ではパケット分配が発生しないため、

その集約リンクコストおよび各リンクコストは一定である。すなわち、ネットワークコストの下に凸性は維持される。よって、このような端末がネットワーク内に存在する場合も、同様に、ネットワークコストは 11-リンクおよび 16-リンクへのパケット分配に関して最小となる最適解が存在する。いい換えると、このような端末がある場合は、ネットワーク全体において、分配可能なパケット総数が減少するだけであり、最適となる分配位置は変わるが、最適解が存在する特性には変わりはない。

3.3 コスト最小化の効果

11-リンクにおいて、平均遅延時間とリンクコストの相関は、式 (46) から次のようになる。

$$\frac{dT_i^{11}}{dd_i^{11}} = \frac{dT_i^{11}}{dF_i^{11}} \frac{dF_i^{11}}{dd_i^{11}} = \frac{dT_i^{11}}{dF_i^{11}} \frac{1}{\left(\frac{dd_i^{11}}{dF_i^{11}}\right)} > 0 \quad (71)$$

すなわち、11-リンクにおいて、平均遅延時間 T_i^{11} はリンクコスト d_i^{11} に関して単調増加である。したがって、リンクコストが減少すると平均遅延時間も減少する。スループットは、 $F_i S_i < 1$ において、パケット到着率とパケットが送信に成功する確率から次のように求まる。ただし、電波環境によるパケット損失は F_i^{11} や G_i には非依存（独立）であることから、無視する。

$$U_i^{11} = F_i^{11} \left(\sum_{n=0}^{N^R} P_{xc}^n (1 - P_{xc}) \right) \quad (72)$$

U_i^{11} は端末 i における 11-リンクのスループット、 N^R は最大再送回数である。 U_i^{11} と F_i との相関、および 11-リンクの平均パケットサービス時間 S_i^{11} とリンクコストの相関は、それぞれ次のようになる。

$$\frac{dU_i^{11}}{dF_i^{11}} = \frac{dU_i^{11}}{dG_i} \frac{dG_i}{dF_i^{11}} > 0 \quad (73)$$

$$\frac{dS_i^{11}}{dd_i^{11}} = \frac{dS_i^{11}}{dF_i^{11}} \frac{dF_i^{11}}{dd_i^{11}} = \frac{dS_i^{11}}{dF_i^{11}} \frac{1}{\left(\frac{dd_i^{11}}{dF_i^{11}}\right)} > 0 \quad (74)$$

すなわち、11-リンクにおいて、 S_i^{11} は d_i^{11} に単調増加であり、 d_i^{11} が減少すれば S_i^{11} は減少する。リンク利用率は $F_i^{11} S_i^{11} < 1$ であるので、 S_i^{11} が減少すれば F_i^{11} をリンク利用率内で増やすことができる。この場合、式 (73) に基づき、スループットを向上させることができる。すなわち、リンクコストが減少すれば、スループットを向上させることが可能で

ある。

一方、16-リンクの平均遅延時間 T_i^{16} は、M/G/1 待ち行列に基づき次のように求まる¹³⁾。

$$T_i^{16} = \frac{1}{C_i^{16}} + \frac{F_i^{16} \cdot C_i^{16} \cdot \overline{(S_i^{16})^2}}{2(C_i^{16} - F_i^{16})} + \frac{C_i^{16} \cdot A^{16}}{2(C_i^{16} - F_i^{16})} \quad (75)$$

C_i^{16} は端末 i の 16-リンクの予約帯域、 $\overline{(S_i^{16})^2}$ は端末 i の 16-リンクのパケットサービス時間の 2 次モーメント、 A^{16} は 16 における帯域予約の制御期間である。式 (75) から、平均遅延時間の d_i^{16} に関する 1 次導関数を求めると次のようになる。

$$\frac{dT_i^{16}}{dd_i^{16}} > 0 \quad (76)$$

16-リンクの平均遅延時間は、リンクコストに関して単調増加関数である。すなわち、11-リンクと同様に、16-リンクにおいてもリンクコストが減少すると平均遅延時間が減少する。スループットは、 $F_i S_i < 1$ において次のように求まる。ただし、11-リンクと同様の理由から、電波環境によるパケット損失は無視する。

$$U_i^{16} = \frac{F_i^{16}}{C_i^{16}} \quad (77)$$

16-リンクのパケットサービス時間 $1/C_i^{16}$ はリンクの帯域が予約されているために一定である。すなわち、スループットはパケット到着率に依存するが、リンクコストには独立である。

以上の 11-リンクと 16-リンクのそれぞれのコストに関する平均遅延時間とスループットの相関から、ネットワークコストを最小化するパケット分配は、ネットワーク全体の平均遅延時間を減少させ、スループットを向上させることが可能である。

4. 関連研究

異なる無線システムにより構成される無線アクセスネットワークにおいて、現時点ではその解析モデルに関する研究は未着である。したがって、本論文で扱った問題を数理的に解析する関連研究はないと思われる。しかし、単一无線通信におけるマルチアクセス通信の性能を数理的に求める研究は多く実施されており、これを関連研究として述べる。

近年、マルチアクセス無線システムにおける通信のエンド-エンドの性能を数理モデルにより解析する研究が行われるようになってきている。文献 15), 16), 17) では IEEE802.11 の DCF におけるスループットの解析を行っている。いずれの文献においても、MAC 部分

の状態遷移にマルコフ連鎖モデルを適用することにより数理モデル化し、解析を実施している。文献 18), 19) においてはマルチアクセス通信を待ち行列によりモデル化し、遅延の解析を行っている。文献 18) では、衝突が発生しない Time Division Multiplexing (TDM) を前提とし、無線リンクを M/D/1 の待ち行列として解析を行っている。文献 19) は無線システムを CSMA/CA として、その無線リンクを G/G/1 の待ち行列としてモデル化し、解析を行っている。文献 18), 19) のいずれも、無線システムの MAC 部分を待ち行列により一般化および抽象化することで近似的に遅延特性を求めている。文献 20), 21) は IEEE802.11 の DCF を前提として、文献 18), 19) より MAC 部分をより正確にモデル化し、遅延解析を行っている。文献 20) は MAC 部分の状態遷移をマルコフ連鎖としてモデル化し、文献 21) ではバックオフアルゴリズムの分析から無線リンクを M/MMGI/1/K の待ち行列としてモデル化している。しかし、いずれの文献においても、解析対象はスループット、またはサービス時間であり、待ち行列での待機時間が含まれていない。

上記のいずれの研究も、単一の無線システムにおける性能解析である。したがって、本論文で扱っている無線メディアダイバーシティを想定した異なる複数の無線システムによる複数の無線リンクでの理論的解析は、検討されていない。

5. おわりに

本論文では、11-リンクおよび 16-リンクの負荷状態を示すリンクコストを定義し、11-リンクコストおよび 16-リンクコストのいずれもが、そのリンクへのパケット分配に対して下に凸の単調増加関数であることを示した。また、各リンクコストの和である集約リンクコスト、およびネットワークコストは任意のリンクへのパケット分配に対して下に凸の関数であり、すなわち、任意のリンクへのパケット分配に関して、そのコストを最小化する最適解が存在することを示した。さらに、その最適解においては、ネットワーク全体の平均遅延時間が減少し、スループットが向上することを示した。

今後は、このパケット分配特性に基づくパケット分配制御方式を検討する予定である。

謝辞 本研究は、総務省から委託された「コグニティブ無線通信技術の研究開発」により行われたものである。

参 考 文 献

- 1) Mittra III, J. and Maguire, Jr., G.: Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal, *IEEE Personal Communication*, Vol.6, No.4, pp.13-14 (1999).
- 2) Mittra III, J.: Cognitive Radio for Flexible Multimedia Communications, *Proc. MoMuC'99*, pp.3-10 (1999).
- 3) 原田博司: コグニティブ無線を利用した通信システムに関する基礎検討, 信学技報, SR2005-17, pp.117-124 (2005).
- 4) Berezdivin, R., Breining, R. and Raytheon, R.T.: Next-Generation Wireless Communications Concepts and Technologies, *IEEE Communications Magazine* (2002).
- 5) 3GPP TS 22.258, Service Requirements for the All-IP Network (AIPN); Stage 1, v2.0.0 (2005).
- 6) ITU-T, Y.2021 : NGN Release 1 (2006).
- 7) Ramaiyan, V., Kumar, A. and Altman, E.: Fixed Point Analysis of Single Cell IEEE 802.11e WLANs: Uniqueness, Multistability and Throughput Differentiation, *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Reviews*, Vol.33, Issue 1 (June 2005).
- 8) Kumar, A., Altman, E., Miorandi, D. and Goyal, M.: New Insights From a Fixed-Point Analysis of Single Cell IEEE 802.11 WLANs, *Networking, IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.15, Issue 3, pp.588-601 (2007).
- 9) Zheng, Y., Lu, K. and Fang, K.D.: Performance Analysis of IEEE 802.11 DCF in Imperfect Channels, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.55, Issue 5, pp.1648-1656 (2006).
- 10) Gross, D. and Harris, C.: *Fundamentals of Queueing Theory*, 2nd ed, John Wiley & Sons (1985).
- 11) Little, J.: A Proof of the Queueing Formula $L = \lambda W$, *Oper. Res. J.*, Vol.18, pp.172-174 (1961).
- 12) IEEE Std 802.16-2004, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems (2004).
- 13) Bertsekas, D. and Gallager, R.: *Data Networks*, Prentice Hall (1992).
- 14) Choi, Y. and Choi, S.: LLC-Level FEC Scheme in IEEE 802.11 WLAN, *Proc. IEEE APWCS 2005* (2005).
- 15) Wu, L. and Varshney, P.: Performance Analysis of CSMA and BTMA Protocol in Multi-hop Networks(I). Single Channel Case, Information Sciences, pp.159-177, Elsevier Sciences Inc. (1999).
- 16) Wang, Y. and Garcia-Luna-Aceves, J.J.: Collision Avoidance in Multihop Adhoc Networks, *Proc. IEEE MASCOTS'02*, pp.145-154 (2002).
- 17) Alizard-Shabdiz, F. and Subramaniam, S.: MAC Layer Performance Analysis of Multi-hop Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE GlobeCom'04*, Vol.5, pp.2781-2785 (2004).
- 18) Shrader, B., Sanchez, M. and Giles, T.C.: Throughput-delay Analysis of Conflict-free Scheduling in Multihop Ad-hoc Networks, *Proc. Adhoc'03* (2003).
- 19) Bisnik, N. and Abouzeid, A.: Queueing Network Models for Delay Analysis of Multihop Wireless Ad Hoc Networks, *Proc. IWCMC'06*, pp.773-778 (2006).

20) Sheu, S.-T. and Chen, J.: A Novel Delay-Oriented Shortest Path Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE ICC'01*, Vol.6, pp.1930-1934 (2001).

21) Ozdemir, M. and McDonald, A.B.: An M/MMGI/1/K Queuing Model for IEEE 802.11 Ad Hoc Networks, *Proc. PE-WASUN'04*, pp.107-111 (2004).

(平成 19 年 8 月 29 日受付)

(平成 20 年 6 月 3 日採録)



滝沢 泰久 (正会員)

1983 年京都工芸繊維大学工学部機械工学科卒業。同年日本ユニシス(株)入社。1990 年住友金属工業(株)入社。1998 年 ATR 環境適応研究所出向。2002 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所主任研究員。2008 年同研究所上級主任研究員。現在、無線ネットワークにおける自己組織化等の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



谷口 典之 (正会員)

2000 年立命館大学大学院理工学研究科博士課程前期課程修了。2003 年同大学院理工学研究科博士課程後期課程単位取得退学。同年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所入社。現在、コグニティブ無線ネットワーク技術の研究開発に従事。システム制御情報学, 日本知能情報ファジィ学, IEEE 各会員。



山口 明

1989 年早稲田大学工学部卒業。1991 年同大学院理工学研究科修了。以後, KDDI (旧 KDD) にて, 移動通信技術, ユビキタスネットワーク技術の研究開発に従事。2005 年より(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所にて, 無線通信技術の研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



小花 貞夫 (フェロー)

1976 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。1978 年同大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現 KDDI(株))入社。パケット交換方式, ネットワークアーキテクチャ, OSI プロトコル実装, データベース, ビデオテックス, 分散処理, ネットワーク管理, ITS の研究・開発に従事。2004 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所所長, アドホックネットワーク, ITS, センサーネットワークの研究開発に従事。工学博士。2001 年文部科学大臣章(研究功績者), 本会フェロー, 電子情報通信学会会員。