

複数無線通信リンク集約におけるリンクコスト最小化のための トラフィック制御方式の検討

滝沢 泰久[†] 谷口 典之[†] 山中佐知子[†]

山口 明[†] 小花 貞夫[†]

[†] 株式会社 国際電気通信基礎技術研究所

〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

E-mail: †{takizawa,taniguti,sachiko,yamaguchi,obana}@atr.jp

あらまし 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、無線通信の利用の多様化が急速に進んできている。さらに、ユビキタスセンサーネットワークにおいて ZigBee などの無線システムの利用も予想される。このように、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り、また、この環境において多様なアプリケーションの利用が期待されている。以上のことから、有限である周波数資源のさらなる有効利用が求められおり、その技術として、無線通信環境に依じて、適応的に多様な無線システムを利用可能とするコグニティブ無線が提案されている。本稿では、コグニティブ無線ネットワークにおいて、複数の異なる無線通信リンクをレイヤ 3 で同時に用いて集約する場合に関して、トラフィック制御の基本モデルを提示する。また、そのモデルに基づきリンクコストを最小化するトラフィック制御方式について議論する。

キーワード コグニティブ無線ネットワーク、リンク集約、トラフィック制御

A Study on Traffic Control Method for Link Cost Minimization in Radio Communication Link Aggregation

Yasuhisa TAKIZAWA[†], Noriyuki TANIGUCHI[†], Sachiko YAMANAKA[†],

Akira YAMAGUCHI[†], and Sadao OBANA[†]

[†] Advanced Telecommunications Research Institute International

2-2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0288 Japan

E-mail: †{takizawa,taniguti,sachiko,yamaguchi,obana}@atr.jp

Abstract The diversification of the use of wireless communication has been proceeding rapidly with the diffusion of cellular phone and wireless-LAN. In the emerging wireless communication environments various wireless systems coexist and various applications can be used. On the other hand, there is increasing concern that the growing use of wireless systems will exhaust the finite wireless resources. Cognitive radio has been proposed as a solution to this problem. Cognitive radio aims to optimize the efficiency of utilization of radio resources by switching communications among multiple radio systems. In this report, we introduce a basic model of traffic control in link aggregation of cognitive radio system including WAN and LAN radio access, and based on the model argues traffic control method.

Key words Cognitive Radio Network, Link Aggregation, Traffic Control

1. はじめに

近年、携帯電話、PHS、IEEE802系の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きている。さらに、IEEE802.16によるWiMAXやMobile WiMAXの標準規格も進み、広域または中域の無線システムの利用も予想される。このように、無線システムは急速に利用拡大と多様化が進み、無線通信環境は異なる周波数帯域や通信方式をも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従い、無線リソースの枯渇が懸念されつつあり、無線リソースである周波数の有効利用が求められている。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]～[3][7]～[9]。

文献[3]において、コグニティブ無線(Cognitive Radio)技術とは「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適宜学習等を取り入れつつ、ネットワーク側の協力を得ながらシステム内、システム間問わずに複数の周波数帯域、タイムスロット等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」と定義している。この定義に従い、本稿では異なる多様な無線システムが混在する無線通信環境をコグニティブ無線ネットワークと捉える。すなわち、コグニティブ無線技術は、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とのネットワークにおいて、複数の無線システムを、無線通信状況およびユーザ要求に応じて、適宜使い分け、または同時利用する技術と考える。

本稿では、コグニティブ無線ネットワークにおいて、異なる複数の無線リンクをレイヤ3で同時に用いて集約する場合に関して、トラフィック制御の基本モデルを示す。また、このモデルに基づき、リンクコストを最小化するトラフィック制御方式を議論する。

以下、2章にて想定するコグニティブ無線ネットワークについて述べる。3章で、異なる複数無線リンク集約におけるトラフィック制御の基本モデルを示す。さらに、4章では、基本モデルに基づき、リンクコストを最小化するトラフィック制御方式に関して議論する。

2. コグニティブ無線ネットワーク

現在、携帯電話に代表される広域カバレッジを有する無線システムの電波不感地対策/高トラフィックエリア対策として、カバレッジは狭いが高速伝送可能な無線LANなどのアクセスポイントを設置する構成が検討されて、実用化が進められている。この構成は、狭域カバレッジの無線システムの立場からは、モビリティを広域カバレッジの無線システムにより補われる。このように、カバレッジ/帯域などの特徴が異なる多様なシステムを、その特徴を生かして併用する傾向が、今後一層強まると予想される。

本稿では、上記の2無線システム(広域カバレッジの無線シ

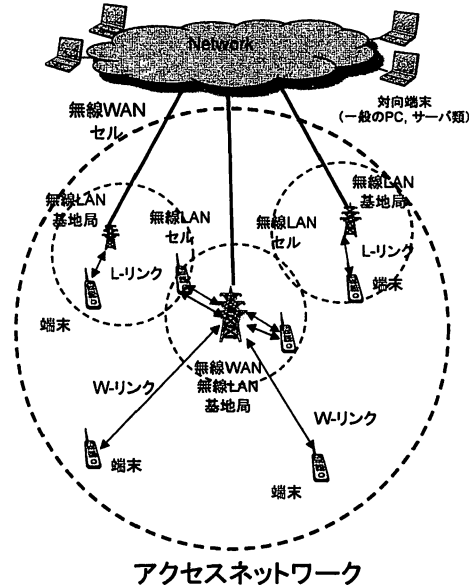


図1 コグニティブ無線ネットワークにおける端末と基地局間のリンク

Fig.1 Communication link in cognitive radio network.

ステム(以後、無線WANと略)、狭域カバレッジではあるが高速伝送可能な無線システム(以後、無線LANと略)が混在するネットワークを検討対象とし、そのネットワーク構成を以下に示す(図1参照)。

- 基地局は、無線WAN基地局機能と無線LAN基地局機能を有する基地局Aタイプと無線LAN基地局機能のみの基地局Bタイプの2種類とする。
- 無線WAN基地局のカバレッジ内に、数十程度の無線LAN基地局が一樣に分布するものとする。いずれの基地局も、共通のアクセスネットワークに収容される。
- 端末は、無線WAN基地局アクセス、無線LAN基地局アクセスの2種類以上の通信を同時に実施可能であり、トラフィックをそれらに分岐させる機能を有する。
- ネットワークはレイヤ3を想定し、データグラムネットワークとする。

3. トラフィック制御基本モデル

3.1 集約リンクの解析モデル

2章の構成において、基地局との通信リンクとして以下2つのリンクを定義する。

- W-リンク 無線WANにおける基地局と端末間の通信リンク。
- L-リンク 無線LANにおける基地局と端末間の通信リンク。

本節では、上記のリンクを、解析可能性の観点から、M/M/1待ち行列システム[4]として見なし、待ち行列の評価基準として用いられるリンク内待機トラフィック数をリンクコストとし

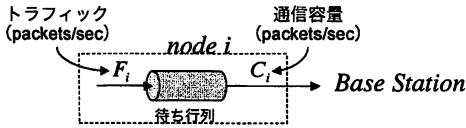


図2 単一リンク
Fig.2 Single link.

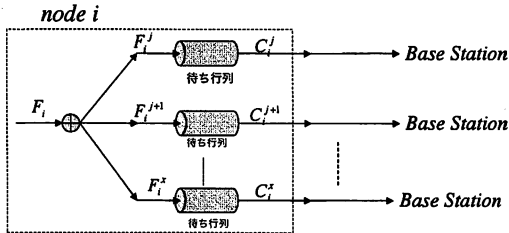


図3 複数リンク
Fig.3 Multiple link.

て論じる。このリンクコストは、その特性から、通信容量に応じてトラフィックを適切に分配すると小さくなることから、本稿ではトラフィック制御の評価基準として用いるものとする。

3.1.1 単一リンクのコスト

M/M/1 待ち行列システムに従い、データの到着間隔はポアソン過程であり、またそのデータの転送時間は指数分布に従うものとする。このとき、端末 i と基地局間のリンク j において、トラフィックの平均到着率を F_i (packets/sec)、通信容量を C_i (packets/sec) とすると、リンクコスト d_i はつぎのようになる (図2 参照)。

$$d_i = \frac{F_i}{C_i - F_i} \quad (1)$$

3.1.2 複数リンクのコスト

端末 i と基地局間の n 個のリンクにトラフィック F_i を分配 (振り分ける) して、トラフィックを転送する場合のリンクコストは次のように求まる (図3 参照)。

$$d_i = \sum_{j=1}^n \frac{F_i^j}{C_i^j - F_i^j} \quad (2)$$

ただし、 F_i^j は端末 i と基地局間のリンク j に振り分けられるトラフィックであり、 $\sum_{j=1}^n F_i^j = F_i$ を満たす。

3.1.3 リンクの通信容量

各リンクの通信容量 C_i^j は電波特性に強く依存するが、解析を容易にする観点から、端末 i と基地局間の W-リンク通信容量 C_i^w および L-リンクの通信容量 C_i^l を、それぞれのセル内のリンク数で該当無線システムの最大通信容量を割った容量とする。

3.1.4 集約リンクのコスト

式 (2) の複数リンクのコストに基づき、端末 i における W-リンクと L-リンクの集約したリンクコスト D_i は、次のようになる。

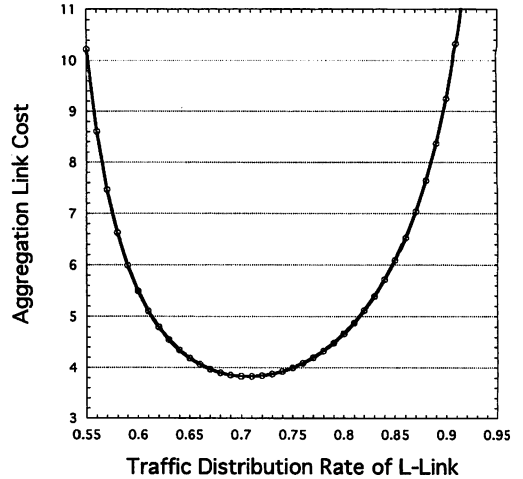


図4 集約リンクコストとトラフィック分配率の相関
Fig.4 Dependence of aggregation link cost on traffic distribution.

$$D_i = \frac{F_i^w}{C_i^w - F_i^w} + \frac{F_i^l}{C_i^l - F_i^l} \quad (3)$$

ただし、 F_i^w は端末 i における W-リンクへ分配されるトラフィック、 F_i^l は端末 i における L-リンクへ分配されるトラフィックであり、次式を満たす。

$$F_i^w + F_i^l = F_i \quad (4)$$

3.2 解析集約リンクの特性

3.2.1 トラフィック分配への依存性

3.1 節で述べた集約リンクコストは構成リンクへ分配するトラフィックの関数となり、その相関を図4に示す。図4は、W-リンク通信容量 C_i^w が 10packet/sec、L-リンク通信容量 C_i^l が 20packet/sec、トラフィック F_i が 20packet/sec における集約リンクコストのトラフィック分配率の依存性を表す。この図から分かるように、L-リンクへトラフィックの7割を分配する場合の近傍で、集約リンクコストが最小となる。すなわち、集約リンクコストを最小化するトラフィック分配率があることが分かる。

3.2.2 スループットと通信遅延

図5に、L-リンクへのトラフィック分配率 (以降、トラフィック分配率) がそれぞれ 0.6, 0.7, 0.85 の集約リンクにおけるスループットと通信遅延時間の相関を示す。各リンクの通信容量は図4と同様である。この図から分かるように、トラフィック分配率が0.7のケースは他のケースより、スループット向上し、かつ、通信遅延時間が小さくなる。トラフィック分配率が0.7のケースは図4から分かるように、リンクコストが最小となる近傍にある。すなわち、リンクコストを小さくすることにより、スループットを向上させ、通信遅延時間を抑制できる。

3.2.3 最小集約リンクコスト

式 (3) を L-リンクの分配されるトラフィック F^l の関数とし

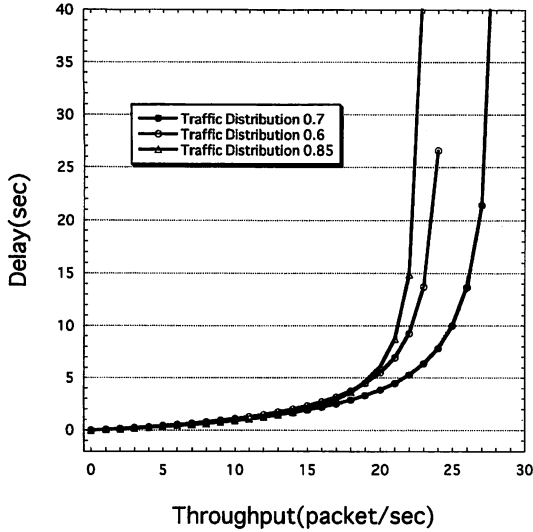


図5 集約リンクのスループットと通信遅延の相関

Fig. 5 Dependence of delay on throughput in aggregation link.

て見ると、次式を得る。

$$D_i''(F_i^l) \geq 0 \quad (5)$$

式(5)から、式(3)は凸単調増加関数であることを示す。さらに、下に凸単調増加関数の特性から、次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_i((F_i^l)^*)}{\partial F_i^l} (F_i^l - (F_i^l)^*) \\ + \frac{\partial D_i((F_i^w)^*)}{\partial F_i^w} (F_i^w - (F_i^w)^*) \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $(F_i^l)^*$ は集約リンクコストを最小とする L-リンクのトラフィック、 $(F_i^w)^*$ は集約リンクコストを最小とする W-リンクのトラフィックである。

式(6)は、制約条件として、 $(F_i^l)^* + (F_i^w)^* = F_i^l + F_i^w = F$ を満たすことから、式(6)は次式に等しい。

$$\frac{\partial D_i((F_i^l)^*)}{\partial F_i^l} = \frac{\partial D_i((F_i^w)^*)}{\partial F_i^w} \quad (7)$$

すなわち、L-リンクのリンクコストと W-リンクのリンクコストを等しくするように、トラフィックを分配すると集約リンクコストが最小となる。

4. トラフィック制御方式

4.1 変動環境におけるリンクコスト算出

M/M/1 に基づく各リンクのコストは式(1)により求まるが、この式は時間に非依存(計測時間が無限大)である定常状態の式である。一方、無線通信において次の項目は常に変動する可能性をもつ。

- トポロジーの変化、または無線環境の変化によりリンクの通信容量が大きく変動する。

- 多様なアプリケーションが混在することからトラフィック到着率が大きく変動する。

従って、式(1)を上記のような変動環境にそのまま適用することはできない。そこで、小さな時間区間 $(t, t + \Delta t]$ (以降、単に区間) において、区間内では定常状態であり、区間間では状態が遷移すると考えて、連続時間マルコフ連鎖を用いて時間の関数としてリンクコストを求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} P_0(t + \Delta t) &= (1 - F(t + \Delta t) \cdot \Delta t) \cdot P_0(t) \\ &+ C(t + \Delta t) \cdot \Delta t \cdot P_1(t) + o(\Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_n(t + \Delta t) &= F(t + \Delta t) \cdot \Delta t \cdot P_{n-1}(t) \\ &+ (1 - (F(t + \Delta t) + C(t + \Delta t)) \cdot \Delta t) \cdot P_n(t) \\ &+ C(t + \Delta t) \cdot \Delta t \cdot P_{n+1}(t) + o(\Delta t) \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $P_n(t + \Delta t)$ は時間 $t + \Delta t$ における待機トラフィック数が n である確率、 $F(t + \Delta t)$ は区間 $(t, t + \Delta t]$ におけるトラフィック平均到着率、 $C(t + \Delta t)$ は区間 $(t, t + \Delta t]$ における平均通信レートである。さらに、式(8)(9)において、両辺を Δt で割り、 $\Delta t \rightarrow 0$ の極限をとると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} &= \\ -F(t + \Delta t) \cdot P_0(t) + C(t + \Delta t) \cdot P_1(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} &= \\ F(t + \Delta t) \cdot P_{n-1}(t) \\ - (F(t + \Delta t) + C(t + \Delta t)) \cdot P_n(t) \\ + C(t + \Delta t) \cdot P_{n+1}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

Δt の各区間内では定常状態であるので、式(10)(11)は区間内ではそれぞれ 0 となることから、次式が得られる。

$$P_{n+1}(t) = \frac{F(t + \Delta t)}{C(t + \Delta t)} \cdot P_n(t) \quad (12)$$

上記式から、区間 $(t, t + \Delta t]$ におけるリンクコストは、端末 i のリンク j の区間 $(t, t + \Delta t]$ における平均待機トラフィック数が $Q_i^j(t + \Delta t)$ とすると、区間 $(t, t + \Delta t]$ の平均トラフィック到着率と平均送信レートから正規化された待機トラフィック数の期待値として、次のように求まる。

$$d_i^j(t + \Delta t) = \frac{F_i^j(t + \Delta t)}{C_i^j(t + \Delta t)} \{Q_i^j(t + \Delta t) + 1\} \quad (13)$$

従って、区間 $(t, t + \Delta t]$ における端末 i の集約リンクコストは次のように求まる。

$$\begin{aligned} D_i(t + \Delta t) &= \\ \frac{F_i^l(t + \Delta t)}{C_i^l(t + \Delta t)} \{Q_i^l(t + \Delta t) + 1\} \\ + \frac{F_i^w(t + \Delta t)}{C_i^w(t + \Delta t)} \{Q_i^w(t + \Delta t) + 1\} \end{aligned} \quad (14)$$

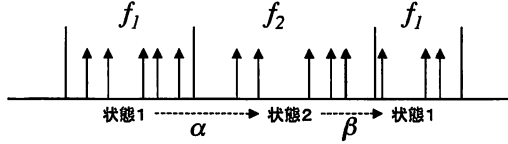


図6 マルコフ変調ポアソン過程のトラフィック到着

Fig. 6 Traffic arrival in markov modulated poisson process.

4.2 パースト性をもつトラフィックへの対応

3.1節におけるリンクコストは、トラフィック到着をポアソン過程としたM/M/1に基づいて求めている。しかし、パケットネットワークにおけるトラフィックはM/M/1と一致しない[10]といわれている。すなわち、実際のトラフィックを表現するのにポアソン過程では不十分である。本節では、実際のパケットネットワークのパースト性を考慮して、パースト性をもつマルコフ変調ポアソン過程 (Markov Modulated Poisson Process, 以降 MMPP) をトラフィックの到着過程とし、その場合の区間 $(t, t + \Delta t]$ におけるリンクコストを求める。サービス時間は平均 c の指数分布とし、リンクを MMPP/M/1 の待ち行列と見なす。

4.2.1 2状態の MMPP

トラフィック到着を2状態 (状態1と状態2) のMMPPとして考える。連続時間マルコフ連鎖の2状態はそれぞれが一つのポアソン過程に対応して、そのポアソン過程に従って指数分布の到着率 f_1, f_2 をもつ (図6参照)。また、それぞれの状態から他の状態への遷移率を α (状態1から状態2)、 β (状態2から状態1) とする。このようなMMPPは到着と状態の遷移は同時に発生しないことを前提とし、到着を伴わない遷移 C と到着を伴う遷移 D から構成され、それぞれは次のようになる。

$$C = \begin{bmatrix} -\alpha - f_1 & \alpha \\ \beta & -\beta - f_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$D = \begin{bmatrix} f_1 & 0 \\ 0 & f_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

4.2.2 MMPP/M/1における定常状態

無線通信リンクをMMPP/M/1として考えて、区間 $(t, t + \Delta t]$ における定常状態からリンクコストを求める。まず、状態1および2において、待機トラフィック数が1つ増える遷移率は D であり、待機トラフィック数が変化しない遷移率 B 、待機トラフィック数が1つ減る遷移率 A 、待機トラフィック数が1つ増える遷移率 D は、それぞれ次のようになる。

$$B = \begin{bmatrix} -\alpha - f_1 - c & \alpha \\ \beta & -\beta - f_2 - c \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$A = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \quad (18)$$

上記遷移率により、待機トラフィック数の遷移率 $V = (v_{ij}; i, j \in$

$N)$ (以降、推移速度) は、待機トラフィック数 i から j へ遷移する率を要素とする $i \times j$ の行列となり、次のようになる。

$$V = \begin{bmatrix} C & D & 0 & 0 & \cdots \\ A & B & D & 0 & \cdots \\ 0 & A & B & D & \cdots \\ 0 & 0 & A & B & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (19)$$

さらに、時刻 t において、待機トラフィック数が i から j とするイベントの発生確率 $P(t) = (p_{ij}(t); i, j \in N)$ (以降、推移確率) は $i \times j$ の行列なり、Kolmogorov の前方微分方程式から、次の式を得る。

$$P'(t) = P(t) \cdot V \quad (20)$$

区間内では定常状態であることを仮定していることから、式(20)は0となり、次式を得る。

$$\begin{aligned} p_{x0}(t) \cdot C + p_{x1}(t) \cdot A &= 0 \\ p_{x(n-1)}(t) \cdot D + p_{xn}(t) \cdot B \\ &+ p_{x(n+1)}(t) \cdot A = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)は初期の待機トラフィック数 i に依存しないことから、 $p(t) = (p_j(t); j \in N)$ とし、GI/M/1連続時間マルコフ連鎖の特性 (MMPP/M/1はGI/M/1の一種である) から $p(t)$ において次の式が成り立つ。

$$p_{n+1}(t) = p_n(t) \cdot R \quad (22)$$

従って、式(21)は式(22)を用いると次のようになる。

$$\begin{aligned} p_0(t)(C + R \cdot A) &= 0 \\ D + R \cdot B + R^2 \cdot A &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

ただし、 R は非負最小行列である。

4.2.3 MMPP/M/1におけるリンクコスト

R が求まれば、式(22)から4.1節と同様にしてリンクコストが算出できる。しかし、実際のネットワークにおいて、独立したマルコフ過程における他の過程へ遷移する確率 α および β に相当する属性を計測することは困難である。そのため、区間 $(t, t + \Delta t]$ において独立したマルコフ過程は遷移せず、区間で遷移が起こると仮定する。すなわち、区間 $(t, t + \Delta t]$ において独立したマルコフ過程における他の過程へ遷移する確率 α および β はそれぞれ0と考える。このよう仮定から R を求めると次のようになる。

$$R = \begin{bmatrix} \frac{f_1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{f_2}{c} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式(22)と(24)から分かるように、区間 $(t, t + \Delta t]$ において任意の独立したマルコフ過程の単独の特性でリンクコストが算出できる (状態1の場合は f_1/c 、状態2の場合は f_2/c をそれぞれ用いる)。すなわち、区間 $(t, t + \Delta t]$ において計測される

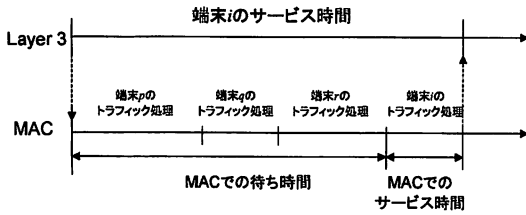


図7 レイヤ3のサービス時間
Fig.7 Service time in layer 3.

平均到着率, 平均送信レート, 平均待機トラフィック数は単独のM/M/1の特性であると想定する. 以上のことから, リンクは区間毎に独立したM/M/1により構成され, 区間で独立した異なるM/M/1に遷移すると考えることにより, 4.1節と同じ算出方法で疑似的に区間 $(t, t + \Delta t]$ のリンクコストを求めることができる.

4.3 レイヤ3のサービス時間

M/M/1の待ち行列では, サービス時間(トラフィックが処理される時間)は指数分布に基づいていると仮定する. 一方, 無線システムは通信メディアである周波数帯を同一セル内の他の端末および基地局と共有する. そのため, MAC(Media Access Control)レベルにおいて他の端末のサービス完了を待つ時間が発生する. レイヤ3におけるサービス過程は, 上記待ち時間を含む時間となる. この待ち時間は各端末および基地局の単独のサービス過程であることから, 個々の待ち時間は指数分布となる. 従って, レイヤ3におけるサービス過程は, 指数分布となる複数の処理により構成され(図7参照), 指数分布の処理の合算もまた指数分布となることから, 指数分布として考える(ただし, メディアアクセス制御に関わる遅延は考慮しない).

4.4 最小化集約リンクコストのためのトラフィック分配

前述の議論から, 各リンクは区間毎に独立したM/M/1により構成されると考えることにより, 区間毎に平均待機トラフィック数, トラフィック到着率, および平均送信レートをレイヤ3において計測し, その計測値から4.1節と同じ算出方法で疑似的に区間 $(t, t + \Delta t]$ のリンクコストを求めることができる. 従って, 式(25)に基づき, L-リンクおよびW-リンクに分配するトラフィック F_i^l, F_i^w を区間毎にL-リンクコストとW-リンクコストが等しくなるように, レイヤ3においてトラフィック制御することにより, 集約リンクコストを最小化し, スループット向上と通信遅延時間の抑制を可能とする.

$$\frac{F_i^l(t + \Delta t)}{C_i^l(t + \Delta t)} \{Q_i^l(t + \Delta t) + 1\} = \frac{F_i^w(t + \Delta t)}{C_i^w(t + \Delta t)} \{Q_i^w(t + \Delta t) + 1\} \quad (25)$$

5. おわりに

本稿では, コグニティブ無線ネットワークにおいて, 異なる複数の無線リンクをレイヤ3で同時に用いて集約する場合に関

して, トラフィック制御の基本モデルを示した. また, このモデルに基づき, リンクコストを最小化するトラフィック制御方式を以下の項目で議論した.

- 無線環境を想定し, 短期間における通信容量およびトラフィックの変動に対応するため, リンクコストを小さな時間区間で計測された平均待機トラフィック数, トラフィック到着率, 平均送信レートに基づき算出する.
- より現実的なトラフィックとしてバースト性の高いトラフィックへ対応するため, MMPPの到着過程のトラフィックを用いた, この場合においても, 小さな時間区間内では定常状態であり区間で状態が遷移する仮定により, リンクコストを異なるM/M/1の遷移としてリンクコストを疑似的に算出する.
- レイヤ3におけるサービス時間は, MACレベルのサービス時間の合算として考えて, その分布は指数分布である.
- 上記3項目に基づき, 集約リンクコストを最小化する(スループット向上と通信遅延時間の抑制)には, L-リンクとW-リンクのコストを等しくするようにトラフィックを分配する. 今後は, 上記の複数無線リンク集約のトラフィック制御方式をシミュレーションにより評価し, その有効性を検証する予定である.

謝辞 本研究は, 総務省から委託されている「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.

文 献

- [1] J. Mittra III, and G. Maguire Jr., "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", IEEE Personal Communication, Vol. 6, No. 4, pp. 13-14 1999.
- [2] J. Mittra III, "Cognitive Radio for Flexible Multimedia Communications", Proc. MoMuC'99, pp. 3-10, 1999.
- [3] 原田, "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] D. Gross and C. Harris, "Fundamentals of Queueing Theory 2nd ed", John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [5] J. P. Kelly, "Reversibility and Stochastic Networks", John Wiley & Sons, New York, 1979.
- [6] J. Walrand, "Probabilistic Look at Networks of Quasi-Reversible Queues", IEEE Trans Inf Theory, IT-29, pp. 825-831, 1983.
- [7] R. Berezdivin, R. Breining, and R. Topp, Raytheon, "Next-Generation Wireless Communications Concepts and Technologies", IEEE Communications Magazine March, 2002.
- [8] 山口他, "コグニティブ無線技術における通信経路制御技術の基礎検討", 信学会全国大会予稿集, B-5-126, 2006.
- [9] 滝沢他, "コグニティブ無線ネットワークにおけるマルチホップ端末連携に関する一考察", 信学技報, Vol.105, No. 281, pp. 79-84, 2005.
- [10] V. Paxson, and F. Floyd, "Wide Area Traffic: the Failure of Poisson Modeling", IEEE/ACM Trans Networking, 1995, (3) 3:226-244
- [11] 米倉, 中川, 恩田, 斉藤, "バーストトラフィックを入力とするネットワークにおける平均系内時間の近似解析", 信学論 (B), Vol. 185-B, No. 7, pp. 1021-1030, 2002.