

コグニティブ無線ネットワークにおける マルチホップアクセス経路トラフィック制御方式の性能評価

滝 沢 泰 久[†] 谷 口 典 之[†] 山 中 佐 知 子[†]
山 口 明[†] 小 花 貞 夫[†]

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、無線通信環境に応じて、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。我々は、コグニティブ無線ネットワークにおいて、基地局と端末との通信経路に加え、端末間のマルチホップ通信により新たに創出される通信経路を用いることにより、スループットを維持しつつ、遅延時間を減少されることを可能とするマルチホップアクセス経路の基本モデルとそれに基づくトラフィック制御方式を提案している。本稿では、上記トラフィック制御方式を概説し、そのシミュレーション評価について述べる。

Evaluation of Traffic Control Method for Multi-hop Access Route in Cognitive Wireless Networks

YASUHISA TAKIZAWA,[†] NORIYUKI TANIGUCHI,[†]
SACHIKO YAMANAKA,[†] AKIRA YAMAGUCHI[†] and SADA OOBANA[†]

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 wireless systems. We have proposed a traffic control method for a multi-hop access route using inter-terminal multi-hop communication in cognitive wireless network. In this report, we present proposed traffic control method for multi-hop access route in cognitive wireless network, and show its performance evaluation.

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きている。さらに、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)}。

我々は、文献 3) におけるコグニティブ無線の定義に基づき、コグニティブ無線ネットワークを、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として考え、さらに、基地局までのアクセス経路として端末間通信によるマルチホップアクセス経路を導入し、その基本的なモデルからマルチホップアクセス経路の有効性とそのトラフィック制御方式を提案した⁴⁾。

本稿では、マルチホップアクセス経路のトラフィック制御方式を概説し、シミュレーションによる性能評価からその有効性を示す。

2. コグニティブ無線ネットワーク

広域カバレッジの無線システム (以降、無線 WAN)、

[†] (株) 国際電気通信基礎技術研究所
ATR Adaptive Communications Research Laboratories

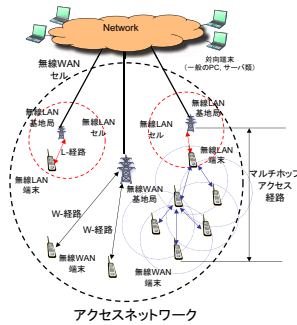


図 1 コグニティブ無線ネットワークにおける基地局アクセス経路
Fig. 1 Access routes in cognitive wireless network.

狭域カバレレッジではあるが高速伝送可能な無線システム（以降，無線 LAN）が混在するネットワークにおいて，以下に示す構成のネットワークをコグニティブ無線ネットワークとして想定する（図 1 参照）。

- 無線 WAN 基地局の無線システムを IEEE802.16（以降，802.16）とする。
- 無線 LAN 基地局の無線システムを IEEE802.11j（以降，802.11j）とする。
- マルチホップアクセス経路における端末間通信の無線システムは IEEE802.11g（以降，802.11g）とする。
- 無線 WAN 基地局セル内に，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，マルチホップ端末間通信の 3 種類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配させる機能を有する。
- ネットワークはレイヤ 3 を想定し，データグラムのパケットネットワークとする。

上記の構成において，基地局までの通信経路として以下 3 つの経路を定義する。

- W-経路 無線 WAN 基地局と端末の直接通信による経路。単一リンクからなる。
- L-経路 無線 LAN 基地局と端末の直接通信による経路。単一リンクからなる。
- マルチホップアクセス経路 端末間のマルチホップ通信による基地局までの通信経路。複数のリンクが連結して構成される。

3. マルチホップアクセス経路基本モデル

3.1 無線リンクにおけるリンクコスト

パケット到着間隔が指数分布であるリンクにおいて，

Little の定理⁵⁾ が成立するため，無線リンクのコストはその平均パケット到着率 F_i と平均遅延時間 T_{ij} から次のように求まる。

$$d_{ij} = F_i \cdot T_{ij} \quad (1)$$

また，上記の無線リンクによる木構造を形成するマルチホップアクセス経路において，その経路コストは経路を構成するリンクのコストの和となる。

3.2 ネットワークコスト

想定するコグニティブ無線ネットワークにおいて，ネットワーク全体の総コスト（以降，ネットワークコスト）は次のようになる。

$$G = D^W + D^L + D^M \quad (2)$$

ただし， D^W は各 W-経路のコストの総和， D^L は各 L-経路のコストの総和， D^M は各マルチホップアクセス経路のコストの総和である。

ネットワークコストはその値を小さくすると，ネットワーク全体のスループットが向上し，遅延時間が減少するメトリックである⁴⁾。

3.3 パケット分配特性

文献 4) は，802.11g/j および 802.16 の無線システムのリンクコストと経路コストはパケット到着率に関して凸単調増加関数であることを示している。

さらに，パケット到着率をマルチホップアクセス経路へのパケット分配率として見た場合，マルチホップアクセス経路の総コストはマルチホップアクセス経路へのパケット分配率に対して凸単調増加であり，一方，W-経路総コストおよび L-経路総コストは凸単調減少となる。ネットワークコストは凸単調増加関数と凸単調減少関数の和であるため，下向きの凸関数となり，パケット分配率に最適解が存在する。

4. マルチホップアクセス経路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

小さな時間区間 $(t, t + \Delta t]$ （以降，単に区間）におけるリンクコストは，Little の定理を用いて，次のように求める。

$$d_{ij}(t + \Delta t) = F_i(t + \Delta t) \cdot T_{ij}(t + \Delta t) \quad (3)$$

ただし $F_i(t + \Delta t)$ は端末 i の区間 $(t, t + \Delta t]$ におけるパケット到着率， $T_{ij}(t + \Delta t)$ はリンク ij の区間 $(t, t + \Delta t]$ における平均遅延時間である。

4.2 最小コスト経路探索

各端末において最小コスト経路を分散型非同期 Bellman-Ford⁶⁾ を用いて次のように探索する。

- 任意の端末 d または基地局 d が d から d までの経路コスト $D_d^d = 0$ として初期化し，近傍端末 s

へ配信する。近傍端末へ配信する情報を経路情報と呼び、送信先 IP アドレス、転送先 IP アドレス、および経路コストを含む。

- 経路情報を受信した近傍端末 s は d から s までの最小コストとなる経路コスト D_d^s を次のように求める。

$$D_d^s = \min_{m \in N(s)} (D_d^m + d_{sm}) \quad (4)$$

ただし、 $N(s)$ は端末または基地局 s の近傍端末集合、 d_{sm} は端末 s と近傍端末 m のリンクコストである。

- 算出した最小コストの経路コスト D_d^s 、送信先 IP アドレス d 、および転送先 IP アドレス s を含む経路情報を近傍端末へ配信する。

以上の処理を各端末で繰り返し実施することにより、任意の端末および基地局間の最小コストとなる経路を算出できる。

4.3 パケット分配と経路切替

各端末において、最小コスト経路探索により見つけた最小コスト経路へパスを切替えることによりパケットを分配すると、経路切替の発振現象が発生する⁴⁾。経路切替の発振の原因は、コストの高い経路からコストの低い経路へ過度のパケットが移動することにある。従って、基地局は適量のパケットをコストの高い経路からコストの低い経路へ徐々に移動するために、端末のパケット分配動作を制御する。

パケット分配における経路切替の発振問題は、結果的に、コストの高い経路からコストの低い経路へ過度のパケットが移動することにある。従って、基地局は適量のパケットをコストの高い経路からコストの低い経路へ徐々に移動するために、端末のパケット分配動作を制御する。

パケット分配率においてネットワークコストは下向き凸関数である。従って、降下法を用いてコストの高い経路に式 (5) を繰り返し適用し最小解を求める。

$$D^H(p) > D^H(p - \alpha(t) \cdot \Delta p) \quad (5)$$

ただし、 D^H は高コスト経路のコスト、 p は経路の現在のパケット量、 $\alpha(t)$ は繰り返し t 回目の α の値 ($0 < \alpha(t) \leq 1$) であり、 Δp は初期のパケット移動量である。

以下にその方式を図 2 に従い説明する。

- コストの高い経路からその一部のパケット (Δp) を決定) をコストの低い経路へ移動する。
- 上記の結果から、コストの高い経路が前回と同一の場合、前回と同じ量のパケット ($\alpha(t+1) = \alpha(t)$) をコストの低い経路へ移動する。コストの高い経

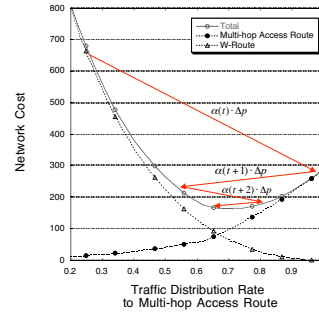


図 2 パケット分配による最適解探索

Fig. 2 Search of optimal solution using packet distribution.

路が入れ替わった場合は、コストが高い新たな経路から前回より少ない量のパケット ($\alpha(t+1) = \delta \cdot \alpha(t), 0 < \delta < 1$) をコストの低い経路へ移動する。

- 以上の動作を繰り返し、パケット分配量を減少させつつ、最小解の近傍へ徐々に近づける。

基地局は、上記方式をパケット分配メタ制御として、W-経路を用いて、次のように端末におけるパケット分配を能動的に制御する。

- 基地局において、W-経路、L-経路および複数のマルチホップアクセス経路が合流する木構造のルート (Root) 毎に平均遅延時間 (sec/packet) と平均スループット (packet/sec) をある時間区間で計測し、その積を経路コストとして算出する。
- 基地局において、上記経路コストで最大コストの経路を選択し、選択経路を構成する端末へ経路切替指示を W-経路を用いて送信する。最大コスト経路がマルチホップアクセス経路の場合、最大コスト経路が前回計測区間と同一経路であれば、前回と同じ切替えホップ数 ($\alpha(t+1) = \alpha(t)$ と同等) に位置する端末を選択し、経路切替指示を送信する。最大コスト経路が前回計測区間と異なる経路であれば、前回の切替えホップ数に 1 を加算したホップ数 ($\alpha(t+1) = \delta \cdot \alpha(t)$ と同等) に位置する端末を選択し、経路切替指示を送信する。切替位置をホップの後方へ徐々に移動させること、すなわち、切替位置の後方にある端末数を減らすことにより、パケット分配量を減少させ、最小解の近傍へ徐々に近づける。
- 経路切替指示を受信した端末は、基地局制御とは独立して行っている最小コスト経路探索により見つけた経路 (W-経路、L-経路も含める) へ切替えるため、転送先 IP アドレスを含んだ切替指示

表 1 ネットワーク構成
Table 1 Network configuration.

	無線 WAN 基地局	無線 LAN 基地局	端末
数	1	20	1000
無線システム	802.16	802.11j	802.16 802.11g/j

表 2 無線システムの性能
Table 2 Performance of wireless systems.

	802.16	802.11j	802.11g
最大通信容量	15Mbps	54Mbps	54Mbps
通信距離	1000m	50m	100m

の応答を基地局へ W-経路を用いて返信する。

- 経路切替応答を受信した基地局は、その応答内容に基づいて基地局で管理する経路トポロジを更新し、端末へ応答確認を送信する。
- 基地局から応答確認を受信した端末は経路切替を実施する。
- 以上の制御を繰り返し行う。

以上により、コストの高い経路からコストの低い経路へ適量の packets を徐々に移動させ、発振による不安定な状態を回避する。

5. シミュレーション評価

5.1 シミュレーション方法

シミュレーションには、以下のソフトウェアを用いて実施した。

- OPNET Core Software 11.5A PL1
- OPNET 03-Oct-2005-WiMAX

ネットワーク構成はシミュレーションの評価時間を考慮して、表 1, 2 に示される無線 WAN のセル空間の 10 分の 1 のスケールの空間として、次のような構成とした。

- ネットワーク空間を $560m \times 560m$ の正方空間とする (面積を 1/10)。
- 無線 WAN 基地局 1 台をネットワーク空間にランダムに配置する。
- 無線 LAN 基地局 2 台をネットワーク空間にランダムに配置する (無線 LAN 基地局数は 1/10)。
- 100 端末をネットワーク空間にランダムに配置する (端末数は 1/10)。

さらに、10 分の 1 のスケール空間を考慮して各無線システムの通信レートは次のようにした。

- 無線 WAN 基地局における 802.16 は 1 セル当たりの端末数が 1/10 となるため、その端末数に比例して最大送信レートを約 1/10 の 1.45Mbps と

した。

- 無線 LAN 基地局における 802.11j は 1 セル当たりの端末数は同一であるので、通信レートも同一の最大 54Mbps とした。
- マルチホップアクセス経路の 802.11g は近傍端末数は同一であるので、通信レートも同一の最大 54Mbps とした。
- 802.11j のチャンネル割当は自動、802.11g のチャンネル割当は固定の同一チャンネルとした。
- 802.11g/j において、MAC 遅延時間を考慮し、CTS-to-self を用いた。

802.11g および 802.11j において、電波伝搬モデルは伝搬環境を LOS (Line-Of-Sight, 見通し内) とし、受信信号強度を距離二乗による自由空間伝搬損失した値とした。

トラフィックは、ネットワーク全体の平均パケットサイズを設定し、それを平均として指数分布で各端末の平均パケットサイズを分散させた。各端末は割り当てられた平均パケットサイズを平均として指数分布に従ったサイズの packets を発生させる。また、その packets 到着間隔は指数分布に従うこととした。

シミュレーション開始時のネットワークトポロジは次のようにする。

- 端末が無線 LAN 基地局セル内にある場合は、無線 LAN 基地局と接続し、L-経路を形成する。
- その他の場合は、無線 WAN 基地局と接続し、W-経路を形成する。

シミュレーション評価時間は 1000 秒とし、シミュレーション開始から

- 100 秒後に各端末で packets 発生を開始。
- 150 秒後に基地局から新規端末 (全端末) へ経路探索開始の指示を送信。
- 300 秒後に基地局から新規端末 (全端末) へ経路切替指示を送信 (マルチホップアクセス経路の効果を確認するため、すべての W-経路をマルチホップアクセス経路へ切替えた状態から開始)。以降、基地局メタ制御を繰り返し行う。

とした。上記において、各端末の最小コスト経路探索における経路情報配信間隔を 10 秒、リンクコスト更新間隔は 10 秒、基地局から端末への経路切替指示送信間隔は 20 秒とした。

評価項目は、単位時間当たりの基地局に到着した packets の遅延時間 (packets が発生してから基地局に到着するまでの時間) の和 (sec, 以降、遅延時間) と単位時間当たりの基地局に到着した packets の総量 (bits, 以降、スループット) とした。

また、提案方式の有効性を議論するため、以下の3つの方式と評価項目において比較を行った。

- リンクコストをホップ数とする方式、経路切替において最小ホップ数の経路を選択する。
- DLAR(Dynamic Load Aware Routing)⁷⁾ で用いられているリンクコストを待機パケット数とする方式、経路を構成する各リンクの待機パケット数の和を経路コストとして、経路切替で最小コスト経路を選択する。
- DOSPR(Delay Oriented Shortest Path Routing)⁸⁾ で用いられているリンクコストを平均通信遅延時間とする方式、経路を構成する各リンクの平均通信遅延時間 (MAC 遅延時間+送信時間) の和を経路コストとして、経路切替で最小コスト経路を選択する。

5.2 リンクコストの評価

本節は、提案方式のリンクコストの有効性を議論するため、前述の比較対象の3つの方式で用いられているリンクコストを基地局メタ制御による経路探索・切替に適用し、提案方式と遅延時間とスループットにおいて比較をする。

W-経路 (802.16) および L-経路 (802.11j) で通信している状態から、マルチホップアクセス経路探索を行い、その結果に基づき、経路切替した場合の各方式における遅延時間とスループットの推移をそれぞれ図3、4、5、6に示す。図3と4はそれぞれ、ネットワーク全体のトラフィック総量が 256Kbps、平均パケット到着間隔が 70msec である場合の結果であり、図5と6はネットワーク全体トラフィック総量が 128Kbps、平均パケット到着間隔が 50msec である場合の結果である。

まず、図3において遅延時間について比較評価する。平均パケット到着間隔が 70msec の場合、経路切替後、ホップ数方式は遅延時間が減少する。DLAR方式、DOSPR方式および提案方式は一時的に経路切替前より遅延時間が増加する。しかし、時間が経過するに従い遅延時間が減少し、経路切替前の遅延時間より小さくなり、さらに、ホップ数方式の遅延時間よりも小さくなる。これは、切替直後は基地局におけるリンクコスト計算がデータ不足から偏りがあるが、時間が経過しデータの偏りが改善されると、徐々に最適解の近傍へ近づくためである。ホップ数方式以下の3つの方式で用いているそれぞれのリンクコストは有効であることが分かる。さらに、DLAR方式、DOSPR方式および提案方式を比較すると、提案方式はもっとも遅延時間を減少させる。DLAR方式とDOSPR方式は提

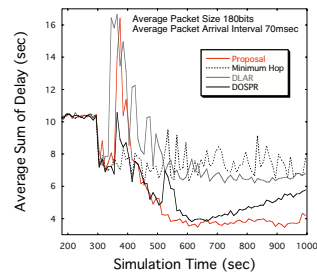


図3 遅延時間の推移 (平均パケットサイズ 180bits, 平均パケット到着間隔 70msec)

Fig. 3 Delay transition (average packet size 180bits, average packet arrival interval 70msec).

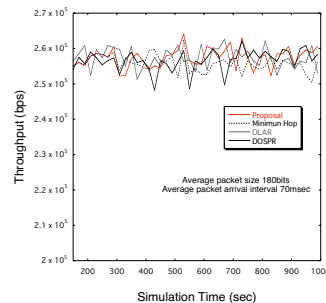


図4 スループットの推移 (平均パケットサイズ 180bits, 平均パケット到着間隔 70msec)

Fig. 4 Throughput transition (average packet size 180bits, average packet arrival interval 70msec).

案方式より最小コスト経路として W-経路を選択する 경우가多い。そのため、遅延時間が提案方式より大きくなる。すなわち、提案方式は DLAR 方式と DOSPR 方式と比較して、より低いコスト経路でマルチホップアクセス経路を構成し、W-経路へトラフィックを戻すことを抑制していると考えられる。従って、提案方式のリンクコストが DLAR 方式および DOSPR 方式のリンクコストより有効であると考えられる。

図5は、図3と比較して、推移結果とかなり異なる。図5はトラフィック総量が 128Kbps、平均パケット到着間隔が 50msec であり、図3の場合より、より小さなパケットがより頻繁に発生する。すなわち、トラフィック総量は小さいが、通信回数が増え、また1回の通信に占める制御通信の割合が多くなる。その結果、遅延増加の影響を与えることとなる。このような場合において、マルチホップアクセス経路は基地局までに複数回の通信を必要とするため、W-経路やL-経路より遅延増加の影響を受けやすい。従って、リンク品質を考慮しないホップ数方式は、経路切替前より遅延時間が大きくなる結果となる。DLAR方式、DOSPR方

式および提案方式は図3と同じように、経路切替直後は遅延時間が増えるが、時間の経過に従い遅延時間が減少し、経路切替前より遅延時間が少なくなる。さらに、DLAR方式、DOSPR方式および提案方式を比較すると、提案方式が最も小さい遅延時間となり、図3の場合よりその差が拡大する。すなわち、より小さなパケットがより頻繁に発生し、制御遅延、衝突およびパケット誤り率が増える状況においても、提案方式のリンクコストは、DLAR方式およびDOSPR方式より、効果的なマルチホップアクセス経路を構成することができる。

次に、スループットについて比較評価する。図4から分かるように、いずれの方式も経路切替前後でスループットはほぼ同一である。本評価で無線WANとして使用したOPNETのWiMAX(802.16)は、電波伝搬部分が未実装であるため、干渉やパケット損失などは考慮されない。そのため、割り当てられた容量内のトラフィックであれば、結果として高品質の通信となり、ネットワーク全体のパケット到着率とほぼ同一の高いスループットとなる。すなわち、いずれの方式も経路切替前後でスループットがほぼ同一であることから、遅延時間を減少させつつ高いスループットを維持している。一方、図6(パケット到着間隔が50msec)の場合、経路切替後、いずれの方式も大きくスループットが減少する。これは、より小さなパケットがより頻繁に到着すると、通信回数が増え、また制御通信時間が大きくなるため、マルチホップアクセス経路は通信遅延時間が大きくなり、パケット損失が増大するためである。しかし、DLAR方式、DOSPR方式、および提案方式は、遅延時間と同様に、時間が経過し経路探索と切替を繰り返し行うに従い、スループットが改善し最終的には経路切替前と同一となるまで回復する。図7は平均パケット到着間隔50msecの場合のマルチホップアクセス経路のパケット損失の推移を示す。この図から分かるように、ホップ数方式以外のいずれの方式もパケット損失が減少し、最終的にほぼ0となる。ただし、図8から分かるように、DLAR方式とDOSPR方式は、経路探索と切替を繰り返し行うに従い、W-経路のトラフィック量が線形的に増える。すなわち、DLAR方式とDOSPR方式は経路をW-経路へ切替えることでパケット損失を減少させている。提案方式もW-経路のトラフィック量が増えるが、その量はDLAR方式、DOSPR方式の両方式と比較して少なく、かつ、次第に定常的になる。すなわち、W-経路への経路切替だけでなくマルチホップアクセス経路の構成変更によりパケット損失を減少させている。

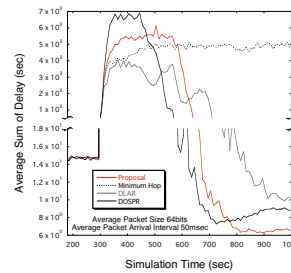


図5 遅延時間の推移(平均パケットサイズ 64bits, 平均パケット到着間隔 50msec)

Fig. 5 Delay transition(average packet size 64bits, average packet arrival interval 50msec).

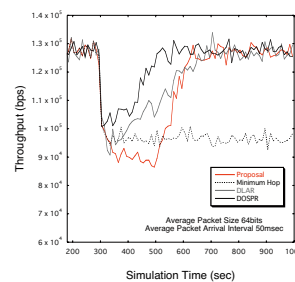


図6 スループットの推移(平均パケットサイズ 64bits, 平均パケット到着間隔 50msec)

Fig. 6 Throughput transition(average packet size 64bits, average packet arrival interval 50msec).

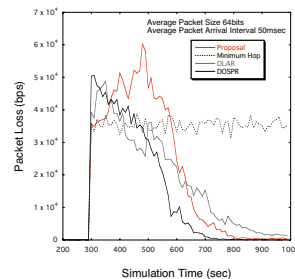


図7 パケット損失の推移(平均パケットサイズ 64bits, 平均パケット到着間隔 50msec)

Fig. 7 Packet loss transition(average packet size 64bits, average packet arrival interval 50msec).

最後に、各トラフィック量(平均パケット到着率)に応じた遅延時間とスループットの相関を図9, 10に示す。各図の遅延時間とスループットは、ランダムに生成した10通りのトポロジにおいて、ネットワーク全体の平均トラフィック総量を128Kbpsから1Mbpsまでの各トラフィック量で計測した結果の平均である。計測期間は、すべての方式の状態が安定するシミュレーション時間900秒以降とした。

ネットワークの平均トラフィック総量を増やすと、

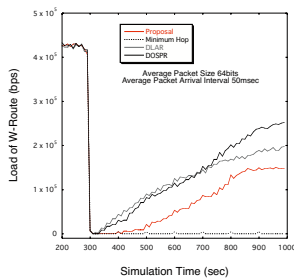


図 8 W-経路トラフィックの推移 (平均パケットサイズ 64bits, 平均パケット到着間隔 50msec)

Fig. 8 W-route load transition (average packet size 64bits, average packet arrival interval 50msec).

ネットワーク全体で端末の平均パケットサイズは指数分布であるため、各端末間の平均パケットサイズの分散が大きくなる。また、大きな平均パケットサイズとなる端末が増え、そのような端末では発生するパケットサイズの分散が大きくなる。すなわち、ネットワーク全体の平均トラフィック総量が増えると、各端末で処理するトラフィック量が増えると同時に、トラフィックがトポロジと時間において大きく分散することとなる。このようなケースでは、より効果的なトラフィック制御が必要となる。両図から分かるように、ホップ数方式はトラフィック量が増えるとスループットに対して急激に遅延時間が大きくなり、明らかに他の方式に劣る。DLAR 方式、DOSPR 方式、および提案方式は図 9 (パケット到着間隔が 70msec) において、あまり差は明確でない。しかし、送信回数および MAC 制御遅延時間が増える図 10 (パケット到着間隔が 50msec) においては、トラフィック量が増えると、DLAR 方式と DOSPR 方式はスループットに対して遅延時間が大きく増え始める。提案方式もトラフィック量が増えるとスループットに対して遅延時間が増えるが、その増加量は DLAR 方式と DOSPR 方式と比較して低い値で安定している。従って、提案方式は他の方式と比較して、高いトラフィック量で、かつ分散が大きい場合においても高いスループットと小さい遅延時間とする経路構成が可能であると考えられる。

以上のことから、通信遅延時間が増大するネットワーク状況において、さらに、トラフィック量が多くかつ分散が大きいネットワーク状況においても、提案方式のリンクコストは比較対象のいずれの方式のリンクコストより、高いスループットと小さい遅延時間とするマルチホップアクセス経路を構成できると考える。

5.3 基地局メタ制御の評価

本節では、提案方式の基地局メタ制御による端末の経路切替の有効性を議論するため、各リンクコストに

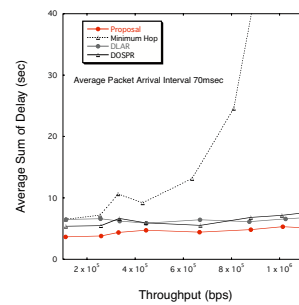


図 9 遅延時間とスループットの相関 (平均パケット到着間隔 70msec)

Fig. 9 Dependence of delay on throughput (average packet arrival interval 70msec).

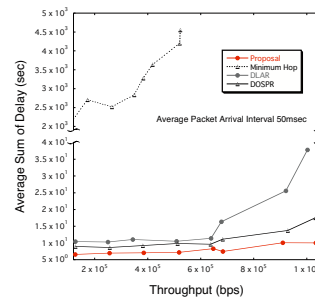


図 10 遅延時間とスループットの相関 (平均パケット到着間隔 50msec)

Fig. 10 Dependence of delay on throughput (average packet arrival interval 50msec).

関して基地局メタ制御を適用しない (従来の分散型非同期 Bellman-Ford を用いる、以降、自律制御) 場合の遅延時間を示す。自律制御は、各端末から経路情報配信間隔を 10 秒とし、各端末で近傍ノードから経路情報を取得した際に、最小コスト経路が見つければ経路切替を行うこととした。

図 11 はネットワークの平均トラフィック総量が 512Kbps, 平均パケット到着間隔が 50msec の場合の提案方式、ホップ数方式、DLAR 方式、DOSPR 方式における遅延時間の推移を示す。提案方式と DOSPR 方式は、遅延時間が大きく変動し、発振現象が発生していることが分かる。一方、ホップ数方式と DLAR 方式は発振現象は見られない。ホップ数方式はトラフィック変動を考慮しないため、そもそも経路切替が発生しない。DLAR 方式は、リンクコストが瞬時値の待機パケット数であるため、W-経路のような、たかだか 1 回の通信で済む経路では、通信遅延時間が小さく、パケットが待機している時間が極僅かであり、その瞬時値の大部分の場合 0 になる (マルチホップアクセス経路は複数通信による通信遅延、および複数リンクコス

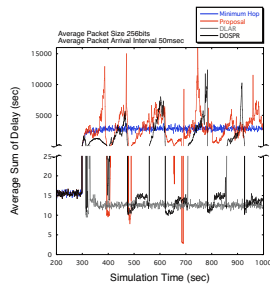


図 11 Bellman-ford による遅延時間の推移 (平均パケットサイズ 256bits, 平均パケット到着間隔 50msec)
Fig. 11 Delay transition using distributed asynchronous bellman-ford(average packet size 256bits, average packet arrival interval 50msec).

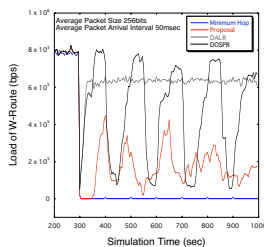


図 12 Bellman-ford による W-経路トラフィックの推移 (平均パケットサイズ 256bits, 平均パケット到着間隔 50msec)
Fig. 12 W-route traffic transition using distributed asynchronous bellman-ford(average packet size 256bits, average packet arrival interval 50msec).

トの和であるため、0 より大きな値になる可能性が高い)。すなわち、DLAR 方式は、W-経路へ経路切替をした場合、リンクコストの解像度が低いいため、経路切り替えた後の W-経路の経路コストが 0 となり、常に W-経路を最小コスト経路として判断する可能性が高い、その結果、W-経路への経路切替後はその経路では経路切替が発生しなくなる (図 12 参照)。以上のことから、ホップ数方式はトラフィック変動を考慮しないため、また、DLAR 方式はリンクコストの解像度の低さからトラフィック変動に鈍感であるため、経路切替の発振現象は発生せず、提案方式と DOSPR 方式はトラフィック変動に敏感であるため、経路切替の発振現象が発生する。以上のことから、経路切替の発振現象はリンクコストがトラフィック変動に敏感であるが故に発生する。

従って、マルチホップアクセス経路において、精度の高いリンクコストを用いて経路切替によるトラフィック制御を行う場合、経路切替の発振現象を抑制する制御が必須である。提案方式における基地局メタ制御は、図 11 を図 3、5 と比較して分かるように、経路切替による発振現象を抑制する。従って、基地局によるメタ

制御は、マルチホップアクセス経路の経路切替によるトラフィック制御に必須と考える。

6. 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、文献 4) に基づき、ネットワークコストを最小化するマルチホップアクセス経路のトラフィック制御方式を概説し、シミュレーション評価から提案方式の有効性を次の点で示した。

- マルチホップアクセス経路において、提案方式は、ホップ数方式や従来のトラフィック制御を考慮した方式と比較して、ネットワーク全体のスループットを高く維持しつつ、遅延時間の減少させることが可能である。
- 端末の最小コスト経路探索および切替を基地局によるメタ制御により、トラフィック制御に伴う経路切替の発振現象を抑制できる。

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。

参考文献

- 1) J. MitoraIII, and G. Maguire,Jr, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", IEEE Personal Commnication, Vol. 6, No. 4, pp. 13-14 1999.
- 2) J.MitoraIII, "Cognitive Radio for Flixible Multimedia Communications", Proc. Mo-MuC'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", 信学技法, SR2005-17, pp. 117-124, 2005.
- 4) 滝沢, 谷口, 山中, 山口, 小花, "コグニティブ無線ネットワークにおけるマルチホップアクセス経路トラフィック制御方式の提案", 情処研報, Vol. 2006, No. 98, pp. 65-72, 2006.
- 5) J. Little, "A Proof of the Queueing Formula $L = \lambda W$ ", Opre Res J. 18:172-174, 1961.
- 6) S. Wecker, "The Digital Network Architecture", IEEE Trans Comm, COM-28, pp. 510-526, 1980.
- 7) H. Hassanein and A. Zhou, "Routing with Load Balancing in Wireless Ad Hoc Networks" in Proc. ACM MSWiM, pp. 89-96, 2001.
- 8) S-T. Sheu and J. Chen, "A Novel Delay-Oriented Shortest Path Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks" in Proc. IEEE ICC' 01, 2001.