

コグニティブ無線ネットワークにおける 端末連携アクセス経路選択方式に関する考察

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同時に利用可能となる環境が構築されつつあり、また、多様なアプリケーションの利用が期待されている。このため、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、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。本稿では、コグニティブ無線ネットワークにおいて、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がより高能率なネットワークを実現するのに有効であることを示し、さらに端末連携アクセス経路の探索方式を提案する。

A Study on Search of Inter-Terminals Multi-hop Access Routes for Cognitive Radio 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 radio systems. In this report, we introduce the advantages of access paths using multi-hop terminal-terminal links, and proposes the search of terminal multi-hop access routes.

1. はじめに

近年、携帯電話、PHS、IEEE802系の無線LAN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、ユビキタス通信においてはセンサーネットワークが構成され、ZigBeeなどの近距離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、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無線通信環境となりつつあり、多様なアプリケーションの利用が期待されている。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)}。

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、適宜使い分ける、または同時利用する技術と考える。

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

さらに、我々は、コグニティブ無線ネットワークとして、基地局と端末との通信経路に、端末間同士のマルチホップ通信による端末間通信経路を加える。この端末間通信経路を加えることにより、新たな複数の通信経路を創出および選択し、周波数のより高い利用から、より高効率、高品質の無線通信を実現することを目指す。

本稿では、コグニティブ無線ネットワークにおいて、マルチホップ端末間通信による基地局までの経路を利用した場合、この経路が高効率な伝送において有効であることを示し、さらに、端末連携アクセス経路の探索方式を提案する。

2. コグニティブ無線ネットワーク

本稿では、2無線システム（広域カバレッジの無線システム（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する。そこに、マルチホップ端末間通信を適用することにより、トラフィックを各無線システムに効率的に振り分ける技術を考える。検討対象とするネットワーク構成を図 1 に示す。

- 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、無線 LAN 基地局と通信可能であり、マルチホップ端末間通信機能および、マルチホップ端末間通信から無線 WAN 基地局あるいは無線 LAN 基地局へ中継する機能も有する。
- 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岐させる機能を有する。

3. 端末連携アクセス経路の有効性

3.1 端末連携アクセス経路の数理モデル

2章の構成において、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 における基地局一端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 における基地局一端の直接通信による経路。単一リンクからなる。
- 端末連携アクセス経路 端末一端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構成される。

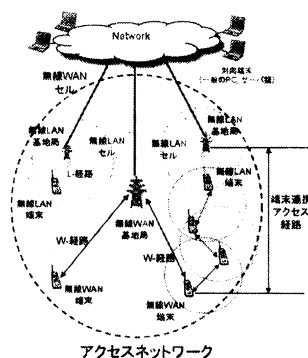


図 1 コグニティブ無線ネットワークにおける基地局アクセス経路
Fig. 1 Access Routes in Cognitive Radio Network.

クが連結構成される。

想定ネットワークは多数の端末から構成され、個々の端末においてトラフィックが発生する。著者らは文献 4) において、このようなネットワークの経路を構成するリンクを M/M/1 待ち行列システムとして見なし、各リンクのコストを用いて端末連携アクセス経路を評価した。本章では、上記文献に基づき、端末連携アクセス経路の有効性を示す。

3.1.1 リンクおよび経路のコスト

端末 i におけるデータの平均到着率、すなわち、トラフィックの平均発生率を F_i (Mbps) とする。また、端末 i と端末 j 間の通信容量を C_{ij} (Mbps) とすると、データの平均転送率は C_{ij} となり、このリンクにおけるコスト d_{ij} は、M/M/1 待ち行列システムに従い、リンクに待機するトラフィック数となり、つぎのようになる。

$$d_{ij} = \frac{F_i}{C_{ij} - F_i} \quad (1)$$

単一リンクを連結した複数リンクにおける平均通信遅延時間は Burke の定理および Jackson の定理から単一リンクの平均通信遅延時間の和として求められる。また、各端末におけるトラフィックは転送されて到着するトラフィックと個々の端末内で発生するトラフィックの合計として考える。従って、複数リンクの連結による経路のコストは次のように求まる。

$$d_{i,x} = \sum_{k=i}^x \frac{\sum_{k=i}^x F_k}{C_{k(k+1)} - \sum_{k=i}^x F_k} \quad (2)$$

3.1.2 リンクの通信容量

各リンクの通信容量 C_{ij} は電波特性に強く依存するが、本稿の検証では、次のような簡単なモデルにより、通信容量を設定した。

- W-経路およびL-経路の通信容量 C_{ij} は、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。
- 端末連携アクセス経路を構成する複数のリンクは、無線リソースを共有する同一のネットワーク内にあると考える。すなわち、各リンクの通信容量 C_{ij} は、該当無線システムの最大通信容量を連結されたリンク数で割った容量とする。
- 複数の端末連携アクセス経路において、各経路を構成する空間が重なる場合、複数の端末間経路の各リンクは無線リソースを共有する同一のネットワーク内にあると考える。すなわち、各リンクの通信容量 C_{ij} は、該当無線システムの最大通信容量を複数の端末連携アクセス経路を構成する全リンク数で割った容量とする。

3.1.3 評価関数

端末連携アクセス経路を評価するため、経路選択で用いられる各リンクのコストを用いて、ネットワーク全体の総コストを次のように求める。

$$G = \sum_{i=1}^N d_{i(i+1)} \quad (3)$$

ただし、 N はリンク総数である。

3.2 コストと通信遅延時間およびスループット

3.1節で示した数理モデルに基づき、図1に示されている構成において端末連携アクセス経路の検証を行う。すなわち、1つの無線WAN基地局と、そのセル内に一様に分布した複数の無線LAN基地局、および、無線WANセル内に一様に分布した端末から構成されるネットワークを考える。各端末は無線LANセル内である場合は無線LAN基地局に接続しL-経路を形成する。それ以外は無線WAN基地局に接続してW-経路を形成する。さらに、各端末は、L-経路と異なる無線LANシステムで通信可能な隣接端末と接続し、端末連携アクセス経路を形成することも可能とする。また、各端末で発生するトラフィックは各端末で同一とする。

このようなネットワークにおける評価関数は次のようになる。

$$G = D^W + D^L + D^T \quad (4)$$

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^T は各端末連携アクセス経路のコストの総和である。

W-経路を、端末連携アクセス経路に切り替えた場合のコストを、図2に示す。また、ホップ数8の場合の各ルート数におけるスループットと通信遅延時間の

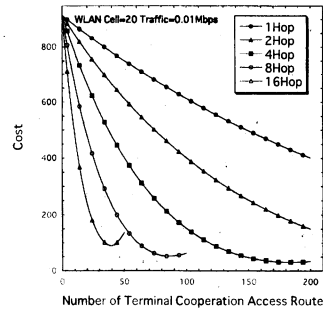


図2 端末連携アクセス経路数に応じた評価関数（無線LANセル数20）

Fig. 2 Dependence of cost on number of TC-routes (number of WLAN cell is 20).

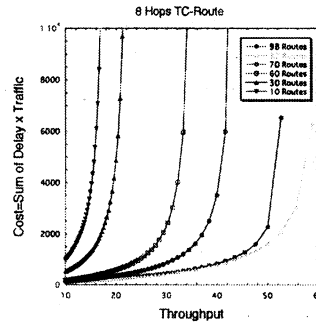


図3 スループットと通信遅延時間（ホップ数8の端末連携アクセス経路）

Fig. 3 Dependence of throughput and delay on number of TC-routes (number of Hop 8).

相関を図3に示す。図2から分かるように、W-経路をTC-経路に切り替えることにより、ネットワーク全体のコストが減少する。また、図3から分かるように、コストが少ない経路構成はネットワーク全体の通信遅延時間を抑制しつつ、スループットを向上させる。以上のことから、端末連携アクセス経路は有効であることが分かる。

4. 端末連携アクセス経路の探索

4.1 短期間におけるリンクコスト

ネットワーク全体の通信遅延時間の抑制とスループットの向上を図るため、各リンクコストの総和が最小となるように端末連携アクセス経路を探索する。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。従って、式(1)を小さな時間間隔に分解し、時間の関数としてリンクの待機トラフィック数を求め

ると次のようになる。

$$P_0(t+2\Delta t) = -F(t+\Delta t) \cdot \Delta t \cdot P_0(t+\Delta t) + C(t+\Delta t) \cdot \Delta t \cdot P_1(t+\Delta t) \quad (5)$$

$$P_n(t+2\Delta t) = F(t+\Delta t) \cdot \Delta t \cdot P_{n-1}(t+\Delta t) + (F(t+\Delta t) + C(t+\Delta t)) \cdot \Delta t \cdot P_n(t+\Delta t) + C(t+\Delta t) \cdot \Delta t \cdot P_{n+1}(t+\Delta t) \quad (6)$$

ただし、 $P_n(t+\Delta t)$ は期間 $[t, t+\Delta t)$ における待機トラフィック数が n である確率、 $F(t+\Delta t)$ は期間 $[t, t+\Delta t)$ におけるトラフィック到着率、 $C(t+\Delta t)$ は期間 $[t, t+\Delta t)$ における通信レートである。さらに、式 (5)(6) を展開すると、次の式が得られる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{n+1}(t+2\Delta t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{F(t+\Delta t)}{C(t+\Delta t)} P_n(t+\Delta t) \quad (7)$$

上記式から、リンクの待機トラフィック数の期待値は期間 $[t, t+\Delta t)$ のトラフィック到着率と送信レートの比および期間 $[t, t+\Delta t)$ のリンクの待機トラフィック数から求まることが分かる。すなわち、次のようにリンクコストが求まる。

$$d_{ij}(t+2\Delta t) = \frac{F(t+\Delta t)}{C(t+\Delta t)} \{Q(t+\Delta t) + 1\} \quad (8)$$

ただし、 $Q(t+\Delta t)$ は期間 $[t, t+\Delta t)$ のリンクの待機トラフィック数である。

4.2 最小コスト経路探索

4.1 節で述べたリンクコストから経路を構成するリンクのコストの総和が最小となる端末連携アクセス経路を次のように方法で探索する。

- 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。
- 経路コスト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。

$$D_d^s = \min_{m \in N(s)} (D_d^m + d_{sm}) \quad (9)$$

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を近傍端末へ配信する。

以上により、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 基地局におけるメタ制御

基地局は、W-経路を用いた通信により、セル全体の以下のメタ情報を収集する。

- 端末総数
- 各端末の W-経路コスト
- 端末間のトポロジ変動

このメタ情報から、端末連携アクセス経路の探索方式を次のように制御する。

- 近傍端末へ最小経路コストの上限値を設定し、この上限値を上回るコストをもつ経路情報は破棄する。
- 端末間のトポロジ変動などに基づき、計測期間 Δt を変動させる。

以上により、基地局により端末連携アクセス経路の探索動作の最適化を図る。

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、端末間のマルチホップ通信による端末連携アクセス経路の有効性を示し、以下のようにその経路探索方式を提案した。

- 経路を構成するリンクコストを M/M/1 の待ち行列に基づき、次のような時間の関数として求めた。

$$d_{ij}(t+2\Delta t) = \frac{F(t+\Delta t)}{C(t+\Delta t)} \{Q(t+\Delta t) + 1\}$$

- 上記リンクコストおよび近傍端末または基地局から配信される経路コストから次のように最小コストとなる端末連携アクセス経路を算出する。

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

- 基地局は W-経路を用いて、セル全体のメタ情報を取得し、その情報に基づいて端末連携アクセス経路の探索メカニズムを制御する。

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. MitoroIII, and G. Maguire, Jr, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", IEEE Personal Communication, Vol. 6, No. 4, pp. 13-14 1999.
- 2) J.MitoroIII, "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, その他, "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", 信学技法, CQ2005-48, pp. 73-78, 2005.