

無線マルチホップネットワークにおけるチャネル予約プロトコル

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

鶴見 宏美 奈良澤 みなみ 桧垣 博章

E-mail: {hiromi, minami, hig}@higlab.net

アドホックネットワーク、センサネットワーク、無線マルチホップアクセスネットワークといった無線機能を備えた移動コンピュータのマルチホップメッセージ配送を利用するモバイルワイヤレスネットワークにおいて、大量のセンサデータやマルチメディアデータの配送といった高いスループットを必要とするアプリケーションの研究開発が進められている。高いスループットの無線マルチホップ配送を実現する手法として、本論文では、通信経路内および通信経路間の競合、衝突の発生しない各無線通信リンクへのチャネル割り当て手法を提案する。ここでは、チャネル予約の制約条件を明らかにし、予約プロトコルを設計する。

Channel Reservation Protocol for High Throughput in Multi-channel Wireless Multihop Networks

Hiromi Tsurumi, Minami Narasawa and Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {hiromi, minami, hig}@higlab.net

Mobile wireless networks such as ad-hoc networks, sensor networks and wireless multihop access networks consist of multiple mobile computers with wireless communication modules. Here, for achieving higher connectivity even with limited battery capacity, wireless multihop message transmission is adopted. For providing higher end-to-end throughput to network applications which require large-scale data transmission such as sensor data and multimedia data, this paper proposes a novel method of channel assignment for wireless multihop networks. Here, it makes clear restrictions of channel assignment for avoiding contention and collision of wireless signal transmission and designs a channel reservation protocol according to the restrictions.

1 背景と目的

無線通信機能を備えた様々な移動コンピュータが広く利用され、それらが互いに情報を交換するアプリケーションが研究開発されている。従来の無線基地局を介した通信に加え、移動コンピュータがデータパケットをマルチホップで配送することで、限られた無線信号送信電力で高い接続性を得ることが可能となっている。このマルチホップ配送を実現するために、多様なアドホックルーティングプロトコルが提案されている。無線通信はブロードキャストを基礎としており、送信移動コンピュータの無線信号到達範囲に含まれる移動コンピュータが無線信号を受信することができる。無線ネットワークは、有線ネットワークに比べて狭帯域であり、ノイズの影響によりパケット紛失率の高い低信頼なネットワークである。このため、アプリケーションに対して高いスループットを提供することが困難であるが、この問題を解決する様々なMACプロトコルやルーティングプロトコルが提案されている。本論文では、各無線リンクが複数のチャネルで多重化されているモバイルワイヤレスネットワークを対象に、配送経路決定後に経路上の各無線通信リンクでチャネルを予約することによって、

高いスループットを得るための手法を提案し、チャネル予約プロトコルを設計する。

2 複数チャネル無線通信

モバイルワイヤレスネットワーク $N = \langle M, C \rangle$ は、無線通信機能を備えた移動コンピュータ M_i の集合 M から構成され、互いに無線信号到達範囲に含まれる移動コンピュータ M_p と M_q との間では、無線通信リンク $|M_p M_q\rangle$ 、 $|M_q M_p\rangle$ が利用可能である。各無線通信リンクでは、波長の異なる電磁波を用いることによって多重化された通信路が提供される。それぞれの通信路をチャネルとよぶ。同一無線通信リンクの複数のチャネルは、無線信号の送受信に独立に利用することができる。しかし、無線通信はブロードキャストを基礎としているため、同一の移動コンピュータに接続する複数のチャネルは、それぞれ独立に利用することはできない。例えば、無線通信リンク $|M_p M_q\rangle$ と $|M_p M_r\rangle$ において、移動コンピュータ M_p が M_q と M_r へのそれぞれのデータパケット配送のために、同一の波長を用いるチャネル c_i^{pq} と c_i^{pr} を同時に用いて無線信号を送信することはできな

い。また、無線通信リンク $|M_p M_q\rangle$ と $|M_q M_r\rangle$ において、移動コンピュータ M_p から M_q へのデータパケット配送と M_q から M_r へのデータパケット配送のために、同一の波長を用いるチャンネル c_i^{pq} と c_i^{qr} を同時に用いて無線信号を送信することはできない。このように、各無線リンクに複数のチャンネルが多重化される状況では、各移動コンピュータがどのチャンネルを用いて通信するかによって、ネットワークの性能が異なる。

また、各移動コンピュータの無線信号到達範囲が限定される環境において、移動コンピュータ間の接続性を低下させない手法として、無線マルチホップ配送が用いられ、様々なルーティングプロトコルが提案されている。特に、無線基地局の存在を仮定せず、無線通信機能を備えた移動コンピュータから構成されるアドホックネットワークのためのルーティングプロトコルには、DSDV [5]、OLSR [2]、AODV [6]、DSR [1]、TORA [4]、LBSR [7] など多数が提案されている。このような無線マルチホップ配送においては、各移動コンピュータから隣接移動コンピュータへの通信がブロードキャストを基礎としているため、送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまでの配送経路に含まれる移動コンピュータが送信する無線信号による競合や衝突、他の配送経路に含まれる移動コンピュータが送信する無線信号にとの競合や衝突により、パケット紛失率の上昇、遅延の拡大、スループットの低下といった問題が発生する。前者の問題に対して、論文 [10] では、送信電力を制御することにより、経路上の移動コンピュータの無線信号送信機会を拡大することで、スループットの低下を縮小する手法が提案されている。また、後者の問題に対して、データパケット配送中に検出した他の通信経路との干渉（競合や衝突の発生）に基づいて、通信経路を部分的に変更する手法が論文 [9] で提案されている。これらは、各無線通信リンクにはひとつのチャンネルしか存在しないことを前提とした提案であり、複数のチャンネルを活用して競合や衝突を解消するものではない。

一方、論文 [11] では、各無線リンクが複数チャンネルを持つアドホックネットワークを対象として、経路上の各無線通信リンクにチャンネルを割り当てる手法を提案している。ここでは、各無線通信リンクに割り当て可能なチャンネルは、その送信移動コンピュータの2ホップ隣接移動コンピュータが割り当てていないチャンネルであるとし、割り当て可能な候補チャンネル集合から指標に基づいて予約チャンネルを決定する手法をふたつ提案している。しかし、2ホップ隣接移動コンピュータが割り当て済みのすべてのチャンネルを割り当て不可としているため、各無線通信リンクが選択可能なチャンネル数が十分には多くなく、ネットワークの使用率の上昇とともに、チャンネル選択、チャンネル予約に失敗するという問題がある。

各通信リンクが複数のチャンネルに多重化されたネットワークにおいて、通信開始時にチャンネルを予約するネットワーク利用のひとつに全光ネットワークにおけるWDM(Wavelength Division Multiplexing)がある。ここでは、エッジルータやコアルータを接続する光ファイバリンクが複数の波長の信号で多重化されている。各コアルータにおける波長変換を前提としないバス多重化手法では、送信元エッジルータから送信先エッジルータまでのすべての光ファイバリンクにおいて同一の波長を予約することが必要となる。また、ある光ファイバリンクで他の通信経路のために予約されている波長を重複して用いることはできない。このような制約のもとで、経路上のすべての光ファイバリンクで波長を予約する様々な手法が提案されているが、論文 [8] では、以下の3つの要素によって波長予約プロトコルを分類している。

- 光ファイバリンクにおける予約波長数をひとつ（コンサバティブ）とするか、複数（アグレッシブ）とするか。
- 波長予約を送信元エッジルータに近い光ファイバ

リンクから順（フォワード）に行なうか、送信先エッジルータに近い光ファイバリンクから順（バックワード）に行なうか。

- 次ホップコアルータとの間の光ファイバリンクに制約条件を充足する波長が存在しない場合、ただちにこれまでに予約した波長を解放（ドロップ）するか、タイマを設定し、制約条件を充足する波長が解放されるのをこれまでに予約した波長を保持したまま待つ（ホールディング）か。

WDMにおける波長予約と無線マルチホップネットワークにおけるチャンネル予約とは、その予約に対する制約条件が異なるものの、プロトコルの設計指針は類似のものを適用できる可能性がある。

3 チャンネル予約条件

モバイルワイヤレスネットワークにおける、送信元移動コンピュータ $M_s(= M_0)$ から送信先移動コンピュータ $M_d(= M_l)$ までの無線マルチホップ配送経路 $R = \{M_0, \dots, M_l\}$ において、 R に含まれる複数の移動コンピュータからの無線信号送信の競合と衝突を回避し、他の経路に含まれる移動コンピュータからの無線信号送信との競合と衝突をも回避するチャンネル予約を実現するために、 R 上の各無線リンクで予約するチャンネルが満足しなければならない条件について考える。なお、以下では、移動コンピュータ M_i から1ホップで到達可能な移動コンピュータを隣接移動コンピュータとし、その集合を $N_1(M_i)$ 、2ホップで到達可能な移動コンピュータのうち M_i を除くものを2ホップ隣接移動コンピュータとし、その集合を $N_2(M_i)$ で表す。

まず、 R 上の各中継移動コンピュータ $M_i(1 \leq i \leq l-2)$ については、前ホップ移動コンピュータ M_{i-1} および次ホップ移動コンピュータ M_{i+1} と同一のチャンネルを用いた無線信号送信を行なうことはできない。これは、 M_i が単一のトランシーバを用いて、同一のチャンネルを用いた送信と受信を同時に行なうことができないためである。そのため、 M_{i-1} と M_i が同一のチャンネルを用いて同時に無線信号を送信するならば、 M_i が M_{i+1} に送信する無線信号と M_{i-1} が M_i に送信する無線信号とが M_i で衝突する。この結果、 M_i は、 M_{i-1} から送信された無線信号を受信することができない（図1）。同様に、 M_i と M_{i+1} が同一のチャンネルを用いて同時に無線信号を送信するならば、 M_i が M_{i+1} に送信する無線信号と M_{i+1} が M_{i+2} に送信する無線信号とが M_{i+1} で衝突する。この結果、 M_{i+1} は、 M_i から送信された無線信号を受信することができない（図2）。なお、 M_0 については、 M_1 と同一のチャンネルを用いた無線信号送信を同時に行なうと、 M_0 が送信する無線信号と M_1 が送信する無線信号とが M_1 で衝突するため、 M_1 が M_0 から送信された無線信号を受信することができない。 M_{l-1} については、 M_{l-2} と同一のチャンネルを用いた無線信号送信を同時に行なうと、 M_{l-2} が送信する無線信号と M_{l-1} が送信する無線信号とが M_{l-1} で衝突するため、 M_{l-1} が M_{l-2} から送信された無線信号を受信することができない。以上から、予約チャンネルについて、以下の制約条件が導かれる。

[チャンネル予約制約条件 (1)]

経路 $R = \{M_0, \dots, M_l\}$ 上の移動コンピュータ $M_i(0 \leq i < l)$ は、無線リンク $|M_i M_{i+1}\rangle$ において、無線リンク $|M_{i-1} M_i\rangle(0 < i < l)$ および無線リンク $|M_{i+1} M_{i+2}\rangle(0 \leq i < l-1)$ で予約されていないチャンネルを予約しなければならない。□

また、 M_i を含む他の経路 R' を用いた無線マルチ

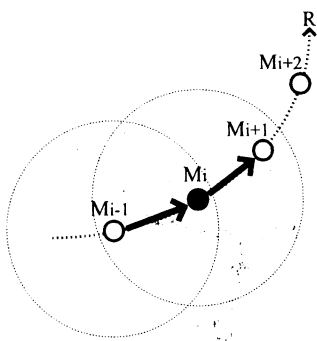


図 1: チャンネル予約制約条件 (1-1)

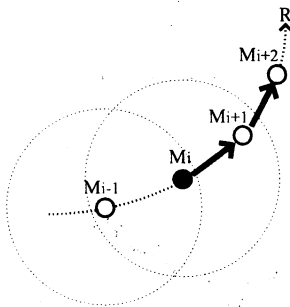


図 2: チャンネル予約制約条件 (1-2)

ホップ配送のために予約したチャンネルを予約することはできない (図 3)。

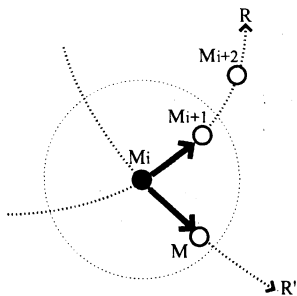


図 3: チャンネル予約制約条件 (2)

[チャンネル予約制約条件 (2)]

経路 $R = \|M_0, \dots, M_l\|$ 上の移動コンピュータ $M_i (0 \leq i < l)$ は、無線リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、 M_i が予約していないチャンネルを予約しなければならない。□

次に、 R 上の隠れ端末問題について考える。 R は、 M_0 から M_l までのマルチホップ配送経路であることから、 $M_i (0 < i \leq l)$ は M_{i-1} の無線信号到達範囲に含まれており、 $M_{i+1} (0 \leq i < l)$ は M_i の無線信号到達範囲に含まれる。ここで、すべての移動コンピュータの無線

信号到達範囲の大きさが等しいという仮定のもとでは、 $M_i (0 \leq i < l)$ は、 M_{i+1} の無線信号到達範囲に含まれる。以上により、 $M_i (0 < i < l)$ は、 M_{i-1} と M_{i+1} の無線信号到達範囲に含まれる。したがって、 M_{i-1} と M_{i+1} が同一のチャネルを用いて同時に無線信号を送信するならば、これらの無線信号が M_i で衝突するため、 M_{i-1} からの無線信号を M_i が受信することができない。これを回避するために、IEEE802.11 では RTS/CTS 制御を用いる手法を導入しているが、 M_{i-1} と M_{i+1} が同時に無線信号の送信を要求された場合には競合の発生となり、いずれかのみが無線信号を送信する。この結果、 R 上の無線マルチホップ配送のスループットが低下する [10]。この問題を解決するためのひとつの手法として、 M_{i-1} と M_{i+1} が異なるチャネルを用いることが考えられる。これによって、 M_{i-1} と M_{i+1} が同時に無線信号を送信しても、 M_{i-1} と M_{i+1} の間の競合を発生させることなく、 M_i は、 M_{i-1} からの無線信号を受信することができる。以上により、予約チャネルについて、以下の制約条件が導かれる。

[チャンネル予約制約条件 (3)]

経路 $R = \|M_0, \dots, M_l\|$ 上の移動コンピュータ $M_i (0 \leq i < l)$ は、無線リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、無線リンク $|M_{i-2} M_{i-1}| (1 < i < l)$ および無線リンク $|M_{i+2} M_{i+3}| (0 \leq i < l-2)$ で予約されていないチャネルを予約しなければならない (図 4)。□

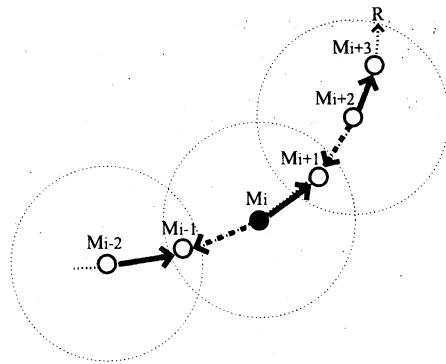


図 4: チャンネル予約制約条件 (3)

チャンネル予約にあたって、この隠れ端末問題は、 R 上にない 2 ホップ隣接移動コンピュータについても考慮しなければならない。まず、無線リンク $|M_i M_{i+1}| (0 \leq i < l)$ におけるチャンネル予約を行なうとき、 M_{i+1} の隣接移動コンピュータについて考える。 M_{i+1} の隣接移動コンピュータの集合 $N_1(M_{i+1})$ のうち、 R 上にない移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i+1}) - \{M_i, M_{i+2}\} (0 \leq i < l-1) (i = l-1)$ のときは $M \in N_1(M_{i+1}) - \{M_i\}$ について、すべての移動コンピュータの無線信号到達範囲の大きさが等しいという仮定のもとでは、 M_{i+1} は M の無線信号到達範囲に含まれる。したがって、 M と M_i が同一のチャネルを用いて同時に無線信号を送信するならば、 M の無線信号の送信先に関わらず、 M_i から送信された無線信号と M から送信された無線信号は衝突し、 M_{i+1} は、 M_i から送信された無線信号を受信することができない (図 5)。この問題を解決するために、RTS/CTS 制御を用いると、 R 上で考察したものと同様、競合が発生し、 R 上の無線マルチホップ配送のスループットが低下する。この問題を解決するためには、 M_i と M が異なるチャネ

ルを用いて無線信号を送信すればよい。これによって、 M_i と M が同時に無線信号を送信しても、 M_i と M の間の競合を発生させることなく、 M_{i+1} は、 M_i からの無線信号を受信することができる。以上により、予約チャネルについて、以下の制約条件が導かれる。

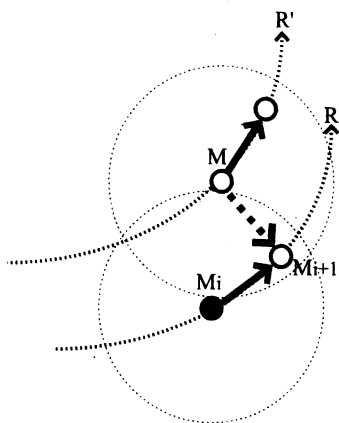


図 5: チャンネル予約制約条件 (4)

[チャンネル予約制約条件 (4)]

経路 $R = \{M_0, \dots, M_l\}$ 上の移動コンピュータ $M_i (0 \leq i < l)$ は、無線リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、 M_{i+1} の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i+1}) - N_1(M_i)$ が予約していないチャンネルを予約しなければならない。□

次に、無線リンク $|M_i M_{i+1}| (0 \leq i < l)$ におけるチャンネル予約を行なうとき、 M_{i-1} の隣接移動コンピュータについて考える。 M_{i-1} の隣接移動コンピュータの集合 $N_1(M_{i-1})$ のうち、 R 上にない移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i-1}) - \{M_{i-2}, M_i\} (1 < i < l) (i = 1$ のときは $M \in N_1(M_{i+1}) - M_i)$ について、すべての移動コンピュータの無線信号到達範囲の大きさが等しいという仮定のもとでは、 M_{i-1} は M の無線信号到達範囲に含まれる。 M を含むある経路 R' について、 M の次ホップが M_{i-1} であるとき、 M と M_i が同一のチャネルを用いて同時に無線信号を送信するならば、 M_i から送信された無線信号と M から送信された無線信号は M_{i-1} で衝突し、 M_{i-1} は、 M から送信された無線信号を受信することができない (図 6)。この問題を解決するために、RTS/CTS 制御を用いると、 R 上で考慮したものと同様に競合が発生し、 R 上の無線マルチホップ配送および R' 上の無線マルチホップ配送のスループットが低下する。一方、 M を含むいずれの経路についても、 M の次ホップが M_{i-1} でないとき、 M と M_i が同一のチャネルを用いて同時に無線信号を送信しても、 M_{i-1} での衝突は発生しない (図 7)。以上により、予約チャネルについて、以下の制約条件が導かれる。

[チャンネル予約制約条件 (5)]

経路 $R = \{M_0, \dots, M_l\}$ 上の移動コンピュータ $M_i (0 \leq i < l)$ は、無線リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、 M_{i-1} の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i-1}) - R$ が M_{i-1} を次ホップとして予約していないチャンネルを予約しなければならない。□

最後に、無線リンク $|M_i M_{i+1}| (0 \leq i < l)$ における

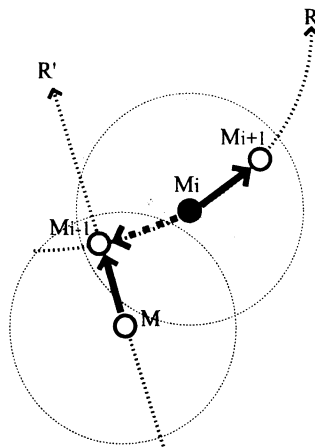


図 6: チャンネル予約制約条件 (5-1)

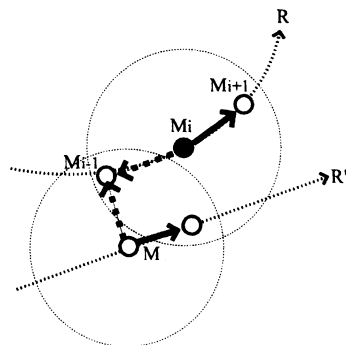


図 7: チャンネル予約制約条件 (5-2)

チャンネル予約を行なうとき、 M_i の隣接移動コンピュータの集合 $N_1(M_i)$ のうち R 上にない移動コンピュータ $M \in N_1(M_i) - \{M_{i-1}, M_{i+1}\} (1 < i < l) (i = 0$ のときは $M \in N_1(M_i) - \{M_{i+1}\})$ と M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M) - M_i$ について考える。 M は、 M' と M_i の無線信号到達範囲に含まれることから、 M' を含むある経路 R' について、 M' の次ホップ移動コンピュータが M であるとき、 M' と M_i が同一のチャネルを用いて同時に無線信号を送信するならば、 M_i から送信された無線信号と M' から送信された無線信号とが M で衝突し、 M は M' からの信号を受信することができない。一方、 M' を含むいずれの経路についても、 M' の次ホップ移動コンピュータが M でないとき、 M' と M_i が同一のチャネルを用いて同時に無線信号を送信しても、 M での衝突は発生しない。以上により、予約チャネルについて、以下の制約条件が導かれる。

[チャンネル予約制約条件 (6)]

経路 $R = \{M_0, \dots, M_l\}$ 上の移動コンピュータ $M_i (0 \leq i < l)$ は、無線リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、 M_i の 2 ホップ隣接移動コンピュータ $M' \in N_2(M_i)$ が R に含まれない M_i の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_i) - R$ を次ホップとして予約していないチャンネルを予約しなければならない。□

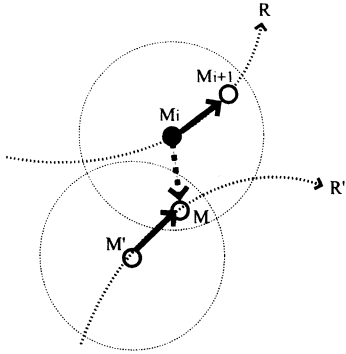


図 8: チャネル予約制約条件 (6-1)

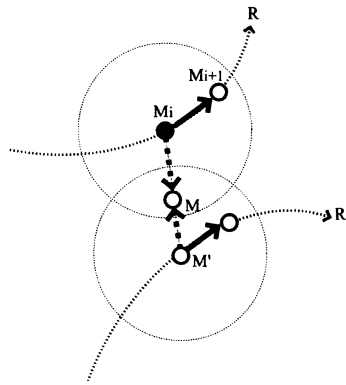


図 9: チャネル予約制約条件 (6-2)

4 チャネル予約プロトコル

前章で述べた条件を満たすチャネルを各無線リンクで予約することにより、経路上の各移動コンピュータが、経路上および経路外の移動コンピュータと衝突、競合を発生することなく、無線マルチホップ配送によりデータパケットを配送することができる。本章では、このチャネル予約プロトコルを提案する。チャネル予約プロトコルは、アドホックルーティングプロトコル等によって経路が決定した後、データパケット配送を開始する前に適用される。提案プロトコルは、DSDV や OLSR のような、各移動コンピュータのルーティングテーブルにすべての到達可能な移動コンピュータについてのエントリを格納するトポロジ管理型のプロトコル、DSR、AODV、TORA、LBSR のような、通信要求発生時に配送経路を探索、検出するオンデマンド型プロトコルのいずれにも適用できる。また、WDM 全光ネットワークにおけるパス多重化適用時の波長予約プロトコルの分類と同様、無線マルチホップネットワークにおけるチャネル予約プロトコルは、以下の要素に従って分類することが可能である。

- 各無線リンクにおける予約チャネル数をひとつ (コンサバティブ) とするか、複数 (アグレッシブ) とするか。
- チャネル予約を送信元移動コンピュータに近い無線リンクから順 (フォワード) に行なうか、送信先移動コンピュータに近い無線リンクから順 (バックワー

ド) に行なうか。

- 次ホップ移動コンピュータとの間の無線リンクに制約条件を充足するチャネルが存在しない場合、ただちにこれまでに予約したチャネルを解放 (ドロップ) するか、タイマを設定し、制約条件を充足するチャネルが解放されるのをこれまでに予約したチャネルを保持したまま待つ (ホールディング) か。

本論文では、CFD (コンサバティブ・フォワード・ドロップ) 型の波長予約プロトコルを設計する。経路 $R = \{M_0, \dots, M_i\}$ 上の移動コンピュータ M_i が無線リンク $|M_i M_{i+1}|$ のチャネルを予約するとき、前章に示した制約条件を満たすチャネルを検出しなければならず、そのためには、隣接移動コンピュータのチャネル予約状態情報を得なければならない。移動コンピュータ M_p から移動コンピュータ M_n への無線リンク $|M_p M_n|$ においてチャネル c_i が予約されていることを M_p で管理する場合、前章で示した制約条件の充足を確認するためには、移動コンピュータ M_i は、隣接移動コンピュータ $N_1(M_i)$ および 2 ホップ隣接移動コンピュータ $N_2(M_i)$ から予約状態情報を取得しなければならない。そこで、本論文では、 $|M_p M_n|$ において c_i が予約されていることを M_p と M_n の両方で管理することとする。

これによって、チャネル与え制約条件 (1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(6) については、 M_i が $|M_i M_{i+1}|$ のチャネルを予約するために、 M_i の隣接移動コンピュータ $N_1(M_i)$ からチャネル予約状態情報を取得することで、制約を充足するチャネルを決定することができる。しかし、チャネル予約制約条件 (4) については、 M_i の次ホップ移動コンピュータ M_{i+1} の隣接移動コンピュータ M からチャネル予約情報を取得することが必要である。 M は M_i の 2 ホップ隣接移動コンピュータであるが隣接移動コンピュータであるとは限らない。しかし、 M_{i+1} の隣接移動コンピュータであることから、結果として経路 R 上の移動コンピュータの隣接移動コンピュータからのみチャネル予約状態情報を取得するだけで、すべてのチャネル予約制約条件を充足するチャネルを決定することが可能である。

[チャネル予約 CFD プロトコル]

- 1) 送信元移動コンピュータ M_0 は、予約状態問い合わせメッセージ $RSreq$ メッセージを M_0 の無線信号到達範囲に含まれるすべての移動コンピュータにブロードキャスト送信する。
- 2) M_0 から $RSreq$ メッセージを受信した移動コンピュータ M は、 M を含むチャネル予約されたすべての経路について、次ホップ移動コンピュータ M_n とその予約チャネル c_i の $\langle M_n, c_i \rangle$ の集合 $R_n(M)$ と前ホップ移動コンピュータ M_p とその予約チャネル c_i の $\langle M_p, c_i \rangle$ の集合 $R_p(M)$ を含む予約状態通知メッセージ $RSrep$ メッセージを M_0 にユニキャスト送信する。
- 3) すべての隣接移動コンピュータから $RSrep$ メッセージを受け取った M_0 は、すべての制約条件を満たすチャネル c_0 を探索する。
 - 3-1) c_0 が検出されたならば、 $R_n(M_0) := R_n(M_0) \cup \{(M_1, c_0)\}$ とすることで、無線リンク $|M_0 M_1|$ のチャネル c_0 を予約し、チャネル予約要求メッセージ $Rreq(c_0)$ を M_1 にユニキャスト送信する。
 - 3-2) c_0 が検出できないならば、予約プロトコルを終了する。
- 4) 前ホップ移動コンピュータ M_{i-1} から $Rreq(c_{i-1})$ を受信した移動コンピュータ M_i は、 $R_p(M_i) :=$

- $R_p(M_i) \cup \{(M_{i-1}, c_{i-1})\}$ とすることで、無線リンク $|M_{i-1}M_i\rangle$ のチャネル c_{i-1} を予約する。
- 5) M_i は、 $RSreq$ メッセージを M_i の無線信号到達範囲に含まれるすべての移動コンピュータにブロードキャスト送信する。
 - 6) M_i から $RSreq$ メッセージを受信した移動コンピュータ M は、 M を含むチャネル予約されたすべての経路について、次ホップ移動コンピュータ M_n とその予約チャネル c_i の $\langle M_n, c_i \rangle$ の集合 $R_n(M)$ と前ホップ移動コンピュータ M_p とその予約チャネル c_i の $\langle M_p, c_i \rangle$ の集合 $R_p(M)$ を含む予約状態通知メッセージ $RSrep$ メッセージを M_i にユニキャスト送信する。
 - 7) すべての隣接移動コンピュータから $RSrep$ メッセージを受け取った $M_i (0 < i < l)$ は、すべての制約条件を満足するチャネル c_i を探索する。
 - 7-1) c_i が検出されなければ、 $R_n(M_i) := R_n(M_i) \cup \{(M_{i+1}, c_i)\}$ とすることで、無線リンク $|M_iM_{i+1}\rangle$ のチャネル c_i を予約し、チャネル予約要求メッセージ $Rreq(c_i)$ を M_{i+1} にユニキャスト送信する。
 - 7-2) c_i が検出できないならば、 $R_p(M_i) := R_p(M_i) - \{(M_{i-1}, c_{i-1})\}$ とすることで、無線リンク $|M_{i-1}M_i\rangle$ のチャネル c_{i-1} を解放し、チャネル予約キャンセルメッセージ $Rnack(c_{i-1})$ を M_{i-1} にユニキャスト送信する。
 - 8) $Rnack(c_i)$ を M_{i+1} から受信した移動コンピュータ M_i は、 $R_n(M_i) := R_n(M_i) - \{(M_{i+1}, c_i)\}$ および $R_p(M_i) := R_p(M_i) - \{(M_{i-1}, c_{i-1})\}$ とすることで、無線リンク $|M_iM_{i+1}\rangle$ のチャネル c_i および無線リンク $|M_{i-1}M_i\rangle$ のチャネル c_{i-1} を解放し、チャネル予約キャンセルメッセージ $Rnack(c_{i-1})$ を M_{i-1} にユニキャスト送信する。
 - 9) $Rnack(c_0)$ を M_1 から受信した移動コンピュータ M_0 は、 $R_n(M_0) := R_n(M_0) - \{(M_1, c_0)\}$ とすることで、無線リンク $|M_0M_1\rangle$ のチャネル c_0 を解放し、予約プロトコルを終了する。
 - 10) 前ホップ移動コンピュータ M_{l-1} から $Rreq(c_{l-1})$ を受信した送信先移動コンピュータ M_l は、 $R_p(M_l) := R_p(M_l) \cup \{(M_{l-1}, c_{l-1})\}$ とすることで、無線リンク $|M_{l-1}M_l\rangle$ のチャネル c_{l-1} を予約し、チャネル予約完了通知メッセージ $Rack$ を M_{l-1} にユニキャスト送信する。
 - 11) 次ホップ移動コンピュータ M_{i+1} から $Rack$ を受信した M_i は、前ホップ移動コンピュータ M_{i-1} に $Rack$ をユニキャスト送信する。
 - 12) 次ホップ移動コンピュータ M_1 から $Rack$ を受信した M_0 は、データパケットの送信を開始する。□

[チャネル解放プロトコル]

- 1) 送信元移動コンピュータ M_0 は、 $R_n(M_0) := R_n(M_0) - \{(M_1, c_0)\}$ とすることで、無線リンク $|M_0M_1\rangle$ のチャネル c_0 を解放し、予約チャネル解放要求メッセージ $Relreq$ を M_1 にユニキャスト送信する。
- 2) 前ホップ移動コンピュータ M_{i-1} から $Relreq$ を受信した移動コンピュータ M_i は、 $R_p(M_i) := R_p(M_i) - \{(M_{i-1}, c_{i-1})\}$ とすることで、無線リンク $|M_{i-1}M_i\rangle$ のチャネル c_{i-1} を解放する。さらに、 $R_n(M_i) := R_n(M_i) - \{(M_{i+1}, c_i)\}$ とすることで、無線リンク $|M_iM_{i+1}\rangle$ のチャネル c_i を解放し、

$Relreq$ を次ホップ移動コンピュータ M_{i+1} にユニキャスト送信する。

- 3) 前ホップ移動コンピュータ M_{l-1} から $Relreq$ を受信した送信先移動コンピュータ M_l は、 $R_p(M_l) := R_p(M_l) - \{(M_{l-1}, c_{l-1})\}$ とすることで、無線リンク $|M_{l-1}M_l\rangle$ のチャネル c_{l-1} を解放する。□

5 まとめと今後の課題

無線マルチホップネットワークを対象として、無線信号送信の競合、無線信号の衝突を回避するチャネル予約における制約条件を明らかにし、その制約に基づいたチャネル予約プロトコルとしてCFD型プロトコルを設計した。今後は、提案した制約によるチャネル予約成功率の評価と、設計したプロトコルの導入による通信開始までの時間オーバーヘッド、スループットの拡大効果測定のためのシミュレーション実験を行なう。また、ホールディング型のプロトコルやバックワード型のプロトコルの設計を行ない、多様な環境における性能の差異を明らかにする。

参考文献

- [1] Johnson, D.B., Maltz, D.A., Hu, Y.C., and Jetcheva, J.G., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-04.txt (2000).
- [2] Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T., Laouti, A., Qayyum, A. and Viennot, L., "Optimized link state routing protocol for ad hoc networks," Proceedings of IEEE International Publication, pp. 62-68 (2001).
- [3] Karp, B. and Kung, H.T., "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless," Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 243-254 (2000).
- [4] Park, V. and Corson, S., "Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification," Internet Draft, draft-ietf-manet-tora-spec-04.txt (2001).
- [5] Perkins, C.E. and Bhagwat, P., "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," Proc. of ACM SIGCOMM'94, pp. 234-244 (1994).
- [6] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," Proceedings of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 99-100 (1999).
- [7] Sagawa, Y., Asano, T. and Higaki, H., "Loop-Based Source Routing Protocol for Mobile Ad-hoc Networks," Proceedings of the International Conference on Communications and Computer Networks, pp. 19-23 (2002).
- [8] Yuan, X., Melhem, R. and GuptaGupta, R., "Distributed Path Reservation Algorithm for Multiplexed All-Optical Interconnection Networks," Proceedings of the 3rd IEEE Symposium on High Performance Computer Architecture, pp. 38-47 (1997).
- [9] 梅島, 松垣, "電力制御による競合解消を適用したアドホックルーティングプロトコル," 信学技報, Vol.103, No.443, pp. 57-60 (2003).
- [10] 沼田, 松垣, "順次短縮リンクを用いた広帯域無線マルチホップ通信," 情処研報, Vol.2005, No.113, pp. 53-59 (2005).
- [11] 堀部, 張, "アドホックネットワークにおける効率的なチャネル利用法の提案と評価," 情処研報, Vol.2004, No.21, pp.87-94 (2004).