

ワイヤレスネットワークに適したレイヤ 2 転送

Layer 2 Forwarding for Wireless Network

金沢 学志 鈴木 聡 亀田 卓 上田 真司 中瀬 博之 坪内 和夫

Satoshi Suzuki

Shinji Ueda

Kazuo Tsubouchi

Gakushi Kanazawa

Suguru Kameda

Hiroyuki Nakase

東北大学 電気通信研究所

Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

概要

コンシューマ向けの中規模なワイヤレスネットワークにおいては、端末の移動に伴うパケット転送にはレイヤ 2 転送による構成が適している。本報告ではまず始めにレイヤ 2 転送ネットワークの問題点を指摘し、その解決案である移動通知機能を提案する。移動通知パケットという特殊なパケットを定義し、それを用いて移動端末が移動後に経路の変更を能動的に行わせ、パケットロス削減するというのが本方法の特徴である。次に移動通知機能を付加したネットワークの性能を計算機シミュレーションにより検証する。この結果から移動通知機能の有効性が実証された。さらにパケット流量を抑える改良案を示し、PC に実装し最後に動作検証を行う。

1 はじめに

インターネットの普及・発展はめざましく、世界のどこにいてもインターネットを介して接続可能な状態になりつつある。しかしながら、インターネットに接続するアクセスポイントは限られた場所にしかない。特に日本では携帯、PHS[1]-[3]が普及してはいるとはいえ、低速であり、誰もがアクセス可能な状態とは言いがたい。誰もが、どこからでもアクセス可能な状況を作り出すためには、無線を利用したユビキタスネットワークの実現が不可欠である。無線を利用した移動体通信と、インターネットで用いる TCP/IP[4],[5]の整合性は、端末の移動に伴う IP の切り替えが必要であるとの認識から、非常に劣悪なものとしてされてきた。これを解決する手段として、Mobile-IP[6]などの移動体向けプロトコルの提案がされているが、Mobile-IP はネットワーク間の移動をターゲットにしているため、頻発するネットワーク内の端末移動には適さ

ない。

本報告では、コンシューマ向け中規模のワイヤレスネットワークをターゲットとすることにより、ネットワーク内での端末の移動に適した通信方式であるレイヤ 2 転送法を提案する。本方式は、セル間・セル内を無線化し、基地局の設置・移動を柔軟に行うことのできるシステムを目指している。また、安価な基地局設計・設置を可能にするため、フリーでオープンソースという特徴をもつ PC-UNIX である FreeBSD を用いる。提案する方法は、無線基地局にレイヤ 2 スイッチの機能を付加するとともに、スイッチのアドレステーブル書き換えのための移動通知パケットを実装することで実現する。この提案方式における特性をシミュレーションにより評価し、FreeBSD[7]をインストールした PC を用いて実装した。なお、本報告の実装では動作検証を目的とし、セル間・セル内ともに有線 LAN を用いて評価を行っている。

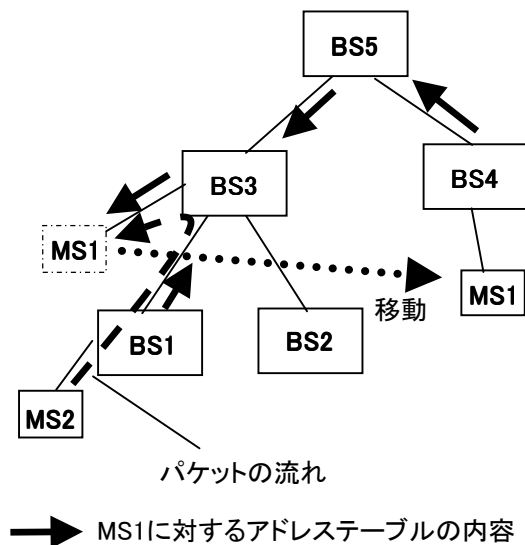


図1 レイヤ2転送ネットワークの問題点

2 移動通知機能を付加したレイヤ2転送ネットワーク

レイヤ2転送ネットワークでは、レイヤ2スイッチの学習機能を用いる。レイヤ2スイッチは、受信したパケットの送信元MACアドレスからアドレステーブルの情報を得るので、既存のルーティングプロトコルのようなルーティングメッセージが不要になり、トラフィック量を削減できる。しかし、端末が他のスイッチに移動したとき、移動端末がパケットを送信しない場合にはパケットの不通状態が生じてしまう。図1に問題点の具体例を示す。MS1は送信先の移動局、MS2は送信元の移動局、BS1～BS5はレイヤ2スイッチ機能を付加した無線基地局である。図1は、送信先(MS1)が移動した直後の状態を示している。この状態で移動局2(MS2)から移動局1(MS1)へパケットを送っても、パケットは移動局1が移動する前のアドレステーブルに従って流れるため移動後の移動局1へは届かない。

1つの解決方法として、エージング周期を短くする方法が考えられる。しかし、エージング周期の短縮は、パケットをすべてのポートに転送するブロードキャストを行う回数の増加を意味するので、トラフィックの増加とのトレードオフがある。さらにこの方法では、移動頻度によっては非常に短い周期でエージングを行わなくてはならず、根本的な解決にはならない。

この問題点を解決する方法として、移動通知機能を付加することを提案する。この機能は、移動局が移動後に経路の変更(基地局のアドレステーブルの内容の変更)を能動的に行わせる方法である。

移動通知パケットという特殊なパケットを定義し、移動局、基地局にそれぞれ以下の動作を行わせることで実現する。

移動局側の動作

移動局は、セル間移動のタイミングを各セルの基地局が出す受信電波の強度によって判断し、通信相手基地局を切り替える。切り替え後に新しい基地局宛てに移動通知パケットを送信する。

基地局側に必要な機能

移動通知パケットか通常のパケットかを判断する。移動通知パケットを受け取った場合は、移動通知パケットによってアドレステーブルを変更する時は移動通知パケットを周囲に隣接する基地局へ転送し(ブロードキャスト)、変更しない時はそのまま破棄する。

以上のようなシンプルな機能を付加することで、能動的にアドレステーブルを移動後の値に変更可能である。図2に示した例を用いて移動通知機能の動作を具体的に説明する。

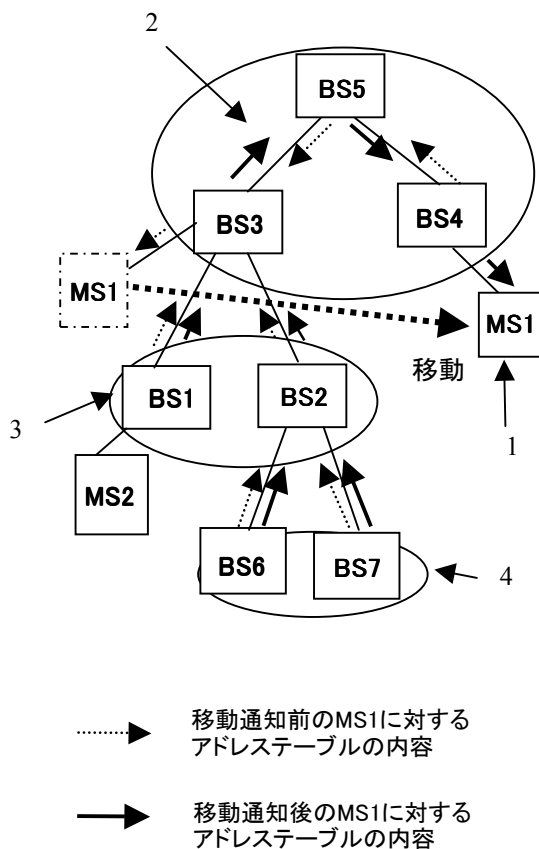


図2 移動通知機能

移動前にアドレステーブルは正しい値を持っており、移動局 1(MS1)が基地局 3(BS3)のセルから基地局 4(BS4)のセルへ移動した場合を仮定する。

1. 移動局 1 は移動を認識し、移動通知パケットを新たに通信する基地局 4 へ送信する。
2. 基地局 4 は移動通知パケットを受信することでアドレステーブルの値を変更するので、隣接している基地局 5 へ移動通知パケットを転送する。基地局 5 も同様に基地局 3 に、基地局 3 も同様に移動通知パケットを基地局 1 と基地局 2 へ転送する。
3. 基地局 1、基地局 2 は移動通知パケットを受信するが、アドレステーブルの値を変更しない。従って、移動通知パケットを破棄する。

表 1 シミュレーション条件

シミュレーション実行単位時間	10 μ sec
実行時間	5000sec
基地局数	37
移動局	10
移動発生確率分布	Poisson分布
送信発生確率分布	Poisson分布
送信先決定	ランダムに決定
セル内送信遅延	10msec
セル間送信遅延	10 μ sec
基地局レイヤ2転送遅延	50 μ sec
Ackパケット送信遅延	1msec
移動通知パケット送信遅延	10 μ sec
再送タイムアウト時間	1sec
パケット長	すべて64bytes

4. 基地局 2 が移動通知パケットを破棄するので、基地局 6、基地局 7 へは移動通知パケットが届かない。

以上のように、提案する移動通知機能で、移動後の値にアドレステーブルが変更可能であることがわかる。なお、通信先の移動端末のアドレス解決は ARP を用いる。

移動通知機能の特徴として以下のことが挙げられる。

- アドレステーブルの値が能動的に変更されるので、移動への対応が可能
- 不要な移動通知パケットを破棄するので、トラフィックの増加を抑制可能
- 移動局、基地局ともに単純な機能のみを付加すればよく、容易な実装が可能

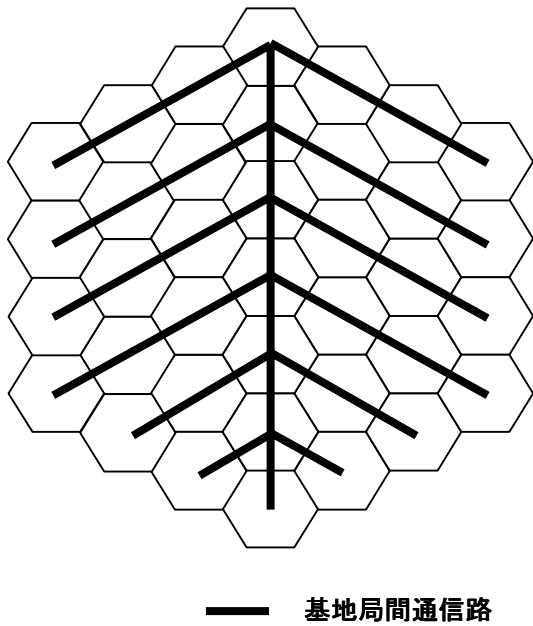


図3 37セル時のネットワーク構成

3 移動通知機能の有効性の評価

移動通知機能の有効性を、計算機シミュレーションにより検証した。基地局がすべてのパケットをブロードキャストする場合、レイヤ2転送のみを行った場合、移動通知機能を実装した場合を比較した。シミュレーション条件を表1に示す。セル内及びセル間送信遅延については、セル内伝送速度 64kbps(全2重)、セル間伝送速度 100Mbps(全2重)を適用し、移動通知パケットを 64bytes と仮定して導出した。サービスエリアの拡大やセル半径を小さくすることによる周波数利用効率の向上のために、セルラ方式を用いた多セル化は必須である。図3に37セルのネットワーク構成を示す。六角形セルを用いたセル配置を示し、基地局間通信路を示すことでネットワーク構成のトポロジーを示している。レイヤ2転送ネットワークでは、宛先と送出インターフェースの対応のみを有することから、現段

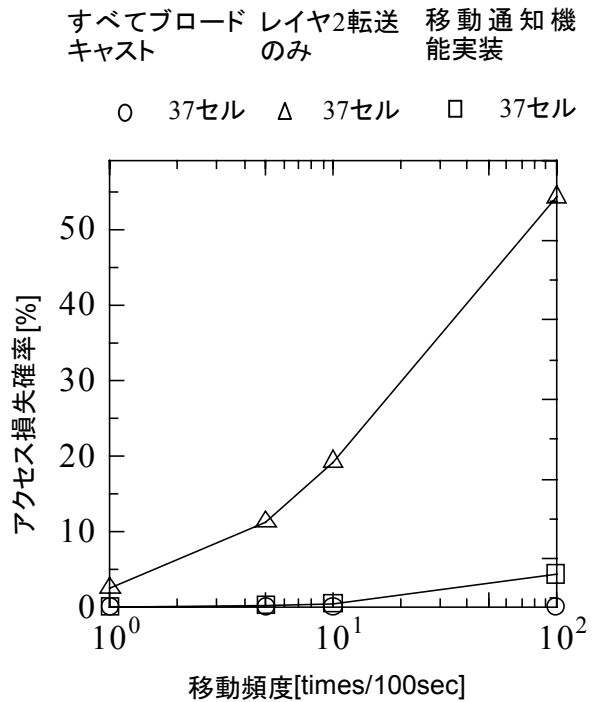


図4 移動頻度とアクセス損失確率の関係

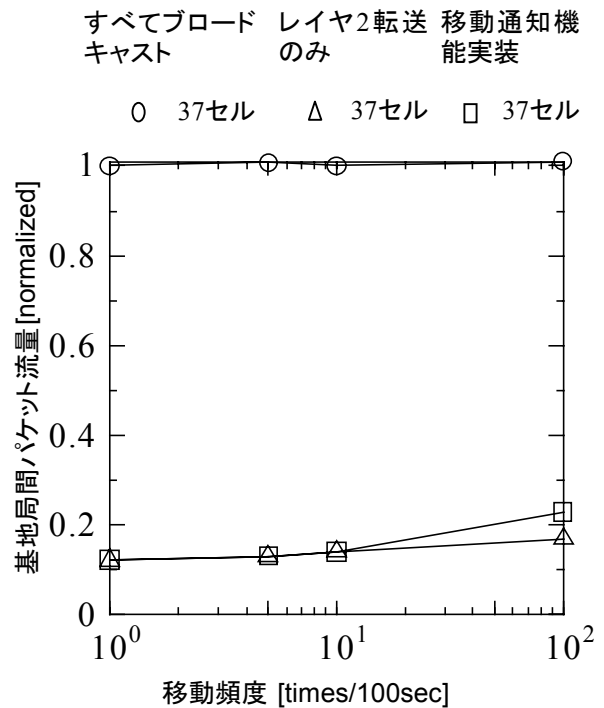


図5 移動頻度と基地局間パケット流量の関係

表 2 シミュレーション条件

シミュレーション実行単位時間	10 μ sec
実行時間	5000sec
基地局数	37
移動局	2
移動発生確率分布	Poisson分布
セル内送信遅延	8msec
セル間送信遅延	10 μ sec
基地局レイヤ2転送遅延	50 μ sec
Ackパケット送信遅延	1msec
移動通知パケット送信遅延	10 μ sec
再送タイムアウト時間	1sec
パケット長	すべて64bytes
パケット数	32,768パケット
データ量	2,097,152bytes

階ではループ構造に対応していない。そのため、ループができないようにツリー型のトポロジーを採用した。しかし、このようなネットワーク構成ではツリーの根元付近で負荷が集中し、大規模なネットワーク形成への対応が困難である。ループ構造を可能にするための検討、例えば IEEE802.1d で標準化されている高機能 MAC ブリッジのような、STP(Spanning Tree Protocol)などの導入が必要である。ループ構造については今後の検討課題にしたい。

横軸に移動頻度を、縦軸にアクセス損失確率をとったシミュレーション結果を図 4 に、縦軸に基地局間のパケット流量をとったものを図 5 に示す。なお、基地局間のパケット流量は、すべてのパケットをブロードキャストする場合で、移動頻度が 1 秒に 1 回の時のパケット流量を 1 とする正規化を行った。また、受信 Ack パケット総数(2 重受信は除く)を C_{rx} 、送信パケット総数を C_{tx} とすると、アクセス成功確率 P_{suc} は次式のように定義される。

$$P_{suc} = C_{rx} / C_{tx} \quad (1)$$

アクセス損失確率 P_{loss} は、アクセス成功確率を 1 から減じた値とし、次式のように定義される。

$$P_{loss} = 1 - P_{suc} \quad (2)$$

まずブロードキャストを行った場合、アクセス損失は生じないもののネットワーク全体にパケットが流れるため通常のトラフィックがネットワークの性能を劣化させる。レイヤ 2 転送のみを行った場合には、誤った方向へパケット転送する機会が増えるので、移動頻度が高くなるにつれてアクセス損失確率は増加する。それに比べ、移動通知機能を実装した場合は、移動頻度が高くなってもアクセス損失確率は非常に低い値を保つことが可能で

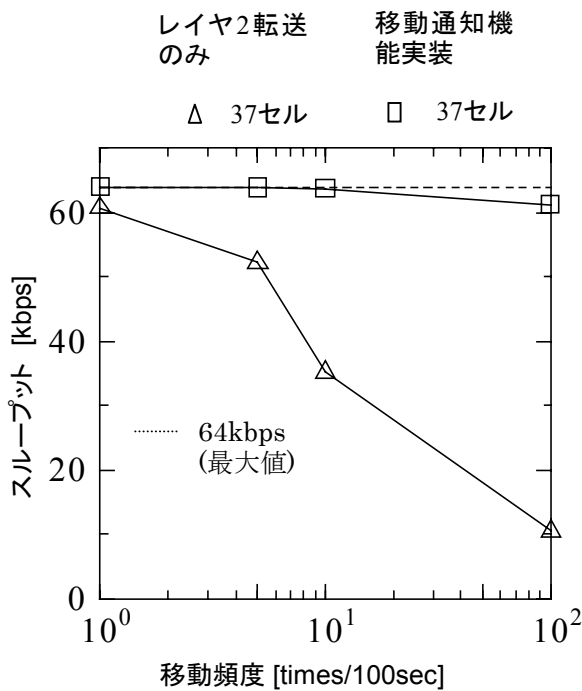


図 6 移動頻度とスループットの関係

ある。例えば、1秒間に1回という高頻度の移動があってもアクセス損失確率は約4%の値である。移動頻度が高くなると移動通知パケットを送信する回数も増えるので、基地局間のパケット流量も増大するが、すべてのパケットをブロードキャストする場合と比べると、非常に低い値を保つことが可能であることがわかる。つまり、移動通知機能を付加した場合、移動通知機能を付加しない場合と比べて端末アクセスの確実性が向上すると同時に、ブロードキャストする場合よりもパケット流量も抑えられる。

次にスループットの評価を行った。シミュレーション条件を表2に示す。移動局数を2として1対1で通信を行わせたこと、送信頻度を乱数で制御しないことを条件として取り入れた。横軸に移動頻度を、縦軸にリンク層のスループットをとった評価結果を図6に示す。移動頻度が高くなるにつれ、基地局がレイヤ2転送のみを行った場合にはスループットが著しく低下するが、移動通知機能を実装した場合には非常に高い値を保つことができている。例えば、1秒に1回という高い移動頻度であっても最高値の96%のスループットを維持している。

以上の結果から、移動通知機能の有効性が実証された。

4 移動通知機能の性能向上

前章までに述べた移動通知機能には、不要なパケット流量を抑える点で改善の余地がある。ここでは移動通知機能の性能を向上させる方法の概要を述べ、新方式でのパケット流量抑制効果について述べる。さらに、新方式を実装し、動作検証を行った結果について述べる。

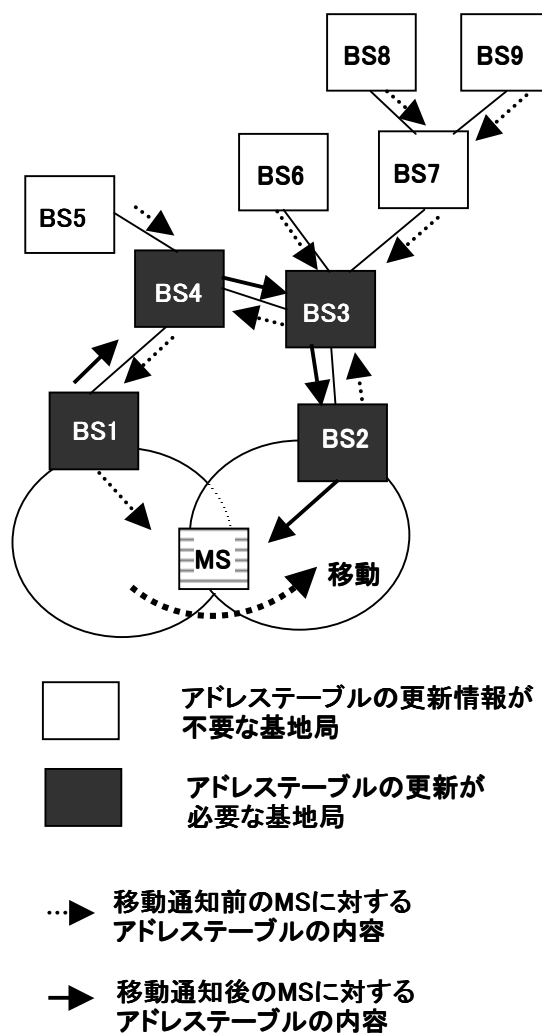


図7 新しい移動通知機能

4.1 新方式の概要

3章で評価した移動通知機能では、移動通知パケットによってアドレステーブルの値を更新した場合に移動通知パケットを周囲の基地局すべてに転送している。そのため、移動通知の情報を必要としない基地局へも移動通知パケットを転送してしまう。図7で示したモデルにおいて、移動後にアドレステーブルの更新が必要なのはBS1、BS2、BS3、BS4の4基地局だけである。にも関わらず、3章で評価した移動通知機能では、アドレステー

ブルの変更があった場合、到着ポート以外のすべてのポートに移動通知パケットをブロードキャストするため、本来移動通知パケットが不要である BS5、BS6、BS7 にまで移動通知パケットが届く。このような不要な移動通知パケットの増加を抑制する方法として、以下の 2 方法が考えられる。

- 移動前に通信していた基地局へ移動通知パケットを送信する[8]
- 移動前のアドレステーブルに従ってパケットを転送する

前者の方法をとる場合、それぞれの基地局が互いの基地局の所在に関するアドレステーブルを持つ必要がある。そのために基地局の存在位置を示すための情報をネットワーク内に流す必要があり、パケット流量の減少にはつながらない。

それに対して後者の場合は基地局の所在に関する情報は不要である。エイジングが発生してアドレステーブルが消去されていた場合はすべてのポートへパケットを転送することで位置情報は正しく更新される。パケット流量を減らした新しい移動通知機能を、後者の方式で実装し、動作を確認した。

提案方式の実装は、移動局への移動通知パケット機能の付加と、基地局への移動通知パケットの転送機能の付加により実現した。移動局の移動通知パケット送信機能は、ハンドオーバー発生時に、マルチキャスト[9],[10]パケットに使用する IP アドレス(224.1.0.20)および MAC アドレス(01:00:5e:00:01:14)[11],[12]を用いて、移動通知パケットを新しく接続した基地局に対して送信するように実装した。基地局の移動通知パケット転送機能

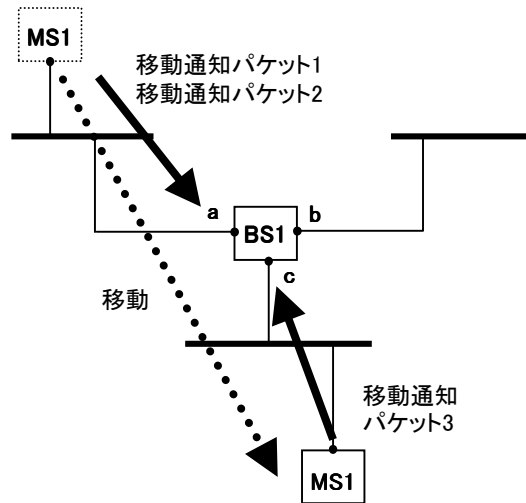


図 8 単体評価モデル

表 3: 単体での評価結果

移動通知パケット 1	インターフェース b と c へ転送
移動通知パケット 2	パケット破棄
移動通知パケット 3	インターフェース a へ転送

は、移動通知パケットを検出する関数と、アドレステーブルとパケットのアドレスを比較し、処理を決定する関数を作成し、ブリッジ機能を実現するカーネル[12]プロセスに組み込む事で実現した。

移動通知パケット受信時、従来の移動通知機能では、アドレステーブルを更新した場合に移動通知パケットをブロードキャストするように分岐させた。新方式の実装のためには更新前のインターフェースへ移動通知パケットを転送するように変更を施せば良い。

4.2 動作検証

評価方法

すべてのホストに FreeBSD をインストールし、パケットの流れを単体評価により検証した。評価に用いたモデルを図 8 に示す。

基地局 PC(BS1)に基地局用移動通知機能を実装した。移動局 PC(MS1)も同様に移動局用の移動通知機能を実装した PC である。

移動局に見立てた PC(MS1)を基地局 PC(BS1)のインターフェース a の先に接続した状態で、MS1 から移動通知パケットを 2 回送信、その後 MS1 を BS1 のインターフェース c の先へ接続して移動通知パケットを送信し、その時の移動通知パケットの流れを tcpdump(1)によって観測した。

評価結果

送信した順に移動通知パケットに番号を付け、パケット観測の結果を表 3 に示す。実験前はアドレステーブルに MS1 のアドレスがエントリされていない状態であったので、移動通知パケット 1 を受信すると、パケットをブロードキャストしている。移動通知パケット 2 は移動通知パケット 1 と同じインターフェースから到着するので、移動通知パケット 2 の受信によりアドレステーブルは更新されない。したがって移動通知パケットは破棄されている。移動通知パケット 3 は最後に届いた移動通知パケット 2 とは違うインターフェースから届く。BS1 はアドレステーブルを検索し、MS1 が以前つながっていたインターフェース a へパケットを転送している。

以上の評価により、移動通知パケットを受信した場合の(1)ブロードキャスト、(2)パケット破棄、(3)パケットを移動前の方向へ転送、という 3 種類の分岐が正常に行われていることが確認できた。

4.3 関連研究との差異

本報告で提案するレイヤ 2 転送ネットワークは、Columbia 大学の Cellular IP[14][15] や Lucent Technology Bell 研究所の HAWAII[8]と同様、ネットワーク内での頻発する移動を実現することを目的としている。しかし、Cellular IP のようなゲートウェイを用いた経路情報の集中制御は行わず、完全に各基地局に経路情報を分散する方法を用いる。また、HAWAII のような複雑な実装を行わず、最小限の実装変更での移動サポートを目的としている。さらに、前述した 2 つの方法ではネットワーク層(レイヤ 3)でのルーティング方法を用いているのに対し、本方法ではデータリンク層(レイヤ 2)で動作する。このことは上位プロトコルに依存しないことを意味しており、本方法では現行の IPv4 に限らず、NetBEUI や IPX など異種のネットワークプロトコルや次世代の IP である IPv6 も使用可能である。

5 おわりに

本報告では、シームレスな移動を可能にする方法であるレイヤ 2 転送ネットワークについて述べた。レイヤ 2 転送を行うという特性上、ネットワーク間の移動という大規模な移動は困難であるが、グローバルな移動は従来の集中制御、または Mobile-IP を用いた階層化したネットワーク構成を用いれば対応可能である。本方法は、このような大規模ネットワークへの応用・展開が可能であり、将来の移動体通信の発展に大きく寄与する技術になることを確信している。

参考文献

- [1] 「i モードサービス特集」, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol. 7, No. 2, 1999 年 7 月 [Special Issue on i-mode Service NTT DoCoMo Technical Journal, Vol. 1, No. 1, Oct. 1999 (英訳)]
- [2] 大貫 雅史, 小林 勝美, 中村 勝志, 木村 茂, 宮崎 亮智, 「移動通信パケット通信システム特集 1 システム概要」, NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, Vol. 5, No. 2, pp. 6-9, 1997 年 7 月
- [3] 大貫 雅史, 小林 勝美, 永田 清人, 村瀬 淳, 「PDC パケット通信方式」, 電子通信情報学会誌, Vol. 81, No. 3, pp. 253-258, 1998 年 3 月
- [4] J. Postel, "Transmission Control Protocol," RFC 793, Sep. 1981.
- [5] J. Postel, "Internet Protocol," RFC 791, Sep. 1981.
- [6] Charles Perkins, "IP Mobility Support," RFC 2002, Oct. 1996.
- [7] The FreeBSD Project
<http://www.FreeBSD.org/>
- [8] R. Ramjee, T. La Porta, S. Thuel, K. Varadhan, S. Wang, "HAWAII: A Domain-based Approach for Supporting Mobility in Wide-area Wireless Networks," IEEE ICNP'99, Oct. 31–Nov. 3, 1999, Toronto, Canada.
- [9] S. Seshan, H. Balakrishnan, R. H. Katz, "Handoffs in Cellular Wireless Networks: The Daedalus Implementation and Experience," International Journal on Wireless Communication Systems, 1996.
- [10] J. Myscore, V. Bharghavan, "A New Multicasting-based Architecture for Internet Host Mobility," ACM MOBICOM, 1997.
- [11] J. Reynolds, J. Postel, "Assigned Numbers," RFC 1700, Oct. 1994.
- [12] S. E. Deering, "Host Extensions for IP Multicasting," RFC 1112, Aug. 1989.
- [13] Marshal Kirk McKusick, Keith Bostic, Michael J. Karels, John S. Quarterman, "The Design and Implementation of the 4.4BSD Operating System," Addison-Wesley, 1996.
- [14] Andrew T. Campbell, Javier Gomez, "An Overview of Cellular IP," IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'99), Sep. 1999.
- [15] Andrew T. Campbell, Javier Gomez, Sanghyo Kim, Andras G. Valko, and Chieh-Yin Wan, "Design, Implementation, and Evaluation of Cellular IP," IEEE Personal Communications, Vol. 7, No. 4, pp. 42-49, Aug. 2000.