

[奨励講演] 無線マルチキャストのための端末再送信を用いた ロス補償方式の性能評価

久保 広行 河村 篤志 新熊 亮一 高橋 達郎

京都大学大学院情報学研究所通信情報システム専攻 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: kubo@cube.kuee.kyoto-u.ac.jp, {shinkuma, ttakahashi}@i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 無線 LAN (Local Area Network) を用いたコンテンツ配信サービスへの需要が高まってきており、そのようなサービスで無線リソースを高効率に利用するため、同じコンテンツを受信する端末に対し無線区間に PMP (Point to Multi-Point) 伝送を用いる無線マルチキャストが用いられている。また、通信容量やエリアの拡大のため、複数の AP (Access Point) を面的に展開してコンテンツ配信サービスを行う試みがされている。しかし、無線マルチキャストでは、一対一の通信とは異なり受信側がデータを受信失敗した際の補償が課題である。一般的に AP からの再送信では端末の配置が静的な環境では時間ダイバーシチ効果が得られず補償効果は低い。一方、正常にデータを受信できた端末が再送信することでデータを受信できなかった端末のロス補償する手法が提案されているが、これまで MAC (Medium Access Control) レイヤの設計や評価はなされていない。そこで、本稿では、端末再送信を用いたロス補償方式を MAC レイヤの設計も含めて提案する。提案方式は、受信失敗率の高い端末がセル境界付近に多いという点に着目し、隣接セルの境界を中心にしたエリアを制御単位としてロス補償を行う方式である。本稿ではシミュレーションにより提案方式の有効性を示す。

キーワード 無線マルチキャスト, ロス補償, 無線 LAN, 端末再送信, ルートダイバーシチ

A Loss Compensation Method using Station Retransmission for Wireless Multicast

Hiroyuki KUBO, Atsushi KAWAMURA, Ryoichi SHINKUMA, and Tatsuro TAKAHASHI

Communications and Computer Engineering, Graduate School of Informatics, Kyoto University
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501, Japan

E-mail: kubo@cube.kuee.kyoto-u.ac.jp, {shinkuma, ttakahashi}@i.kyoto-u.ac.jp

Abstract The demand of content distribution services via wireless local area networks (WLANs) has been increasing. Wireless multicast techniques are commonly used in these content distributing services, where many users simultaneously receive the same content, because they can efficiently use radio resources by using point-multipoint (PMP) transmission. Multicell networks consisting of WLAN access points (APs) are suitable for distributing content to many users in dedicated but wide areas. However, in wireless multicast, the design of effective loss compensation techniques remains an issue to be solved. Retransmission and multiple transmissions from APs are not effective in WLANs because no time-diversity effect is available in static environments. Another solution for the problem is data-frame relay by user terminals; a terminal that correctly received a data-frame relays to other failed terminals. In this paper, we propose a medium-access-control design for loss compensation using data-frame relay. In our method, data-frame relays are performed in the boarder area between neighboring cells, resulting in effective loss compensation for failed terminals near the boarder. In this paper, using computer simulations, we validate our method.

Key words wireless multicast, loss compensation, wireless LAN, station retransmission, route diversity

1. はじめに

近年、無線システムの汎用や動画サービス要求の高まりから、無線システムを用いて多数の人にコンテンツを配信するサービスの必要性が高まっている。多数の端末に同時にデータを転送する場合、無線リソースを高効率に利用するには、無線区間に PMP (Point to Multi-Point) 伝送を用いる無線マルチキャストを用いることが有効であり、様々な研究がなされている [1] [2]。さらに、サービスエリアを面的にカバーするために多数の送信局をセル状に展開するマルチセルでのマルチキャストサービスが注目を集めている。特に、導入の容易さや高い伝送レートから広く普及している無線 LAN (Local Area Network) を使用し、イベント会場などで広告や案内、ライブ映像のストリーミングなどのコンテンツを配信するシステムの実用化に向けた取り組みが行われている [3] [4]。

しかし、マルチキャストでは、一対一の通信とは異なり受信端末がデータを受信失敗した際の補償が課題である。特に無線区間では、通信路の不安定性のためにデータがロスしやすいため、無線マルチキャストにおいてはロスの補償が一層重要である。この課題を解決するために、これまでいくつかの方法が検討されている。

無線マルチキャストにおいては ARQ (Automatic Repeat Request) 方式と FEC (Forward Error Correction) 方式を組み合わせたハイブリッド方式がロス補償に有効であると知られている [5] [6]。しかし、ARQ 方式など AP (Access Point) からデータフレームを再送信する方法では端末の配置が静的な環境下では時間ダイバーシチ効果が得られず、ロス補償手法として検討の余地が残されている。一方、受信失敗したデータフレームを同一セル内の他の端末から受信する端末再送信方式が提案されている [7] [8] [9]。この手法は複数の経路を利用することによるルートダイバーシチ効果を得ることができるため、有効なロス補償手法である。しかし、従来提案されている端末再送信方式は MAC (Medium Access Control) レイヤの設計や評価が十分に為されておらず、実用性が低かった。

本稿では、端末再送信を用いたロス補償方式を MAC レイヤの設計も含めて提案する。提案方式は、受信失敗率の高い端末がセル境界付近に多いという点に着目し、隣接セルの境界を中心としたエリアを制御単位としてロス補償を行う方式である。このように、マルチセル環境向けに設計されている点も提案方式の新規性と言える。本稿ではシミュレーションにより提案方式の有効性を示す。

2. 提案方式:MRCS

本稿では、イベント会場やノマディックサービスなど、端末の配置が静的で時間ダイバーシチが得られない状況を前提に、マルチセル環境向けに設計された新たなロス補償方式 MRCS (wireless Multicast using Retransmission from successful station with Channel Shift) を提案する。端末再送信を用いた従来手法は、再送信する端末の選定や順序制御等が複雑である [10] [11]。しかし、MRCS は、再送信の順序制御に CSMA/CA (Carrier

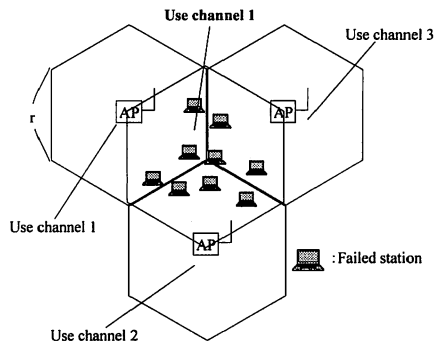


図 1 マルチセル環境

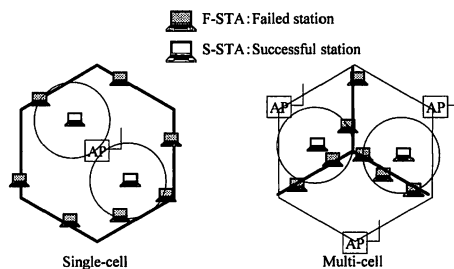


図 2 ロス端末の分布の違い

Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [12] を拡張した手法を用いることから、再送信する端末の選定やグルーピングやデータの問い合わせを必要とせず、設計が簡易である。さらに、MRCS は、セルの境界を中心としたエリアで制御を行うことにより、少ない再送信回数で多くの端末に受信させることができる。本稿では本方式において、これまでは不十分であった MAC レイヤの設計も詳細に行っている。以下、本方式について詳細に説明する。

2.1 ロス補償エリア

図 1 に想定される無線 LAN のマルチセル環境を示す。図中の Failed station は AP からのマルチキャスト送信でデータフレームの受信に失敗した端末であり、ロス補償フェーズにおけるロス補償の対象である (以下ロス端末と呼ぶ)。AP はそれぞれ R_1 Mbps で 1 回目のマルチキャスト送信を行う。本稿では、特定多数の端末に受信させることを目的として、ブロードキャスト送信を行うことを、マルチキャスト送信と定義する。ロス補償は図 1 の斜線部において、正常にデータフレームを受信した端末からマルチキャスト送信することで行われる。図 2 に示すように、単一のセルをロス補償エリアとして端末再送信を行う場合に対し、マルチセルにまたがったロス補償エリアで端末再送信を行う際にはロス端末はロス補償エリアの中央付近に存在することになり、少ない再送信回数で多くの端末に対しロス補償を行うことができる。

2.2 基本動作

図 3 で表される MRCS の基本動作について述べる。各 AP は、マルチキャストを行う前にビーコンを用いて、ロス補償

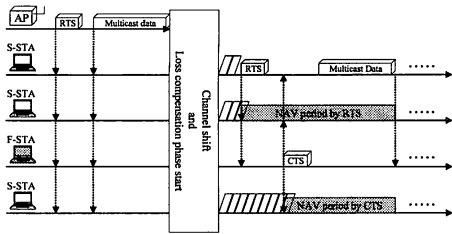


図 3 MRCS の基本動作

フェーズ（端末再送信を用いたロス補償を行う期間）の開始時刻、ロス補償フェーズの終了時刻、チャンネル選択テーブルを報知する。チャンネル選択テーブルは端末再送信時において使用されるチャンネルを決定するための情報であり、後述のチャンネルシフトにおいて使用される。

マルチキャストデータ配送時の動作について述べる。最初に、AP はマルチキャストデータを自身が接続しているマルチキャストルータなどから受け取ると、RTS (Request to Send) フレームを無線送信し、他の各端末の送信を抑制する。以降、事前のビーコンから指定されている期間は、当該マルチキャストが帯域を占有する。次に、AP は伝送レート R_1 Mbps でデータフレームをマルチキャスト送信する。AP からのマルチキャスト送信後、各端末はチャンネル選択テーブルにしたがってチャンネルシフト（使用チャンネル切り替え）を行いロス補償フェーズに遷移する。ロス補償フェーズにおいては、AP からのデータフレームを正しく受信した端末が、後述する順序制御アルゴリズムに従い順次データフレームを伝送レート R_2 でマルチキャスト送信する。ビーコンから報知された一定期間終了後、ロス補償フェーズを終了し、通常のサービス状態に戻る。AP にストリーミングで連続してデータフレームを到着する場合も、AP が毎回 RTS を送信して、上記の手順を行う。

2.3 チャンネルシフト

複数の AP が混在するマルチセル環境下では、同一のチャンネルによる干渉を避けるため、隣接する AP は異なるチャンネルを使用する。MRCS では複数セルにまたがって、図 1 の斜線部で示されるエリアでロス補償を行うため、ロス補償フェーズ時はそのエリアで使用する必要がある。ロス補償フェーズ時はそのエリアで使用するチャンネルを統一し、端末は適切なチャンネルに切り替える必要がある。そこで MRCS では以下のような手順にしたがいチャンネルシフトを実行する。なお、各端末は、ロス補償フェーズ前は最も受信電力の大きい AP に接続しているものとし、各端末の接続している AP を接続 AP と呼ぶ。

(1) 各 AP は図 1 に示すような六角セル構成にしたがって配置されているとする。複数セルにまたがったロス補償エリアにおいて使用されるチャンネルは、もともとの AP 配置における使用チャンネルがスライドする形であらかじめ決められており（図では右下方向）、チャンネル選択テーブルにおいて各端末に報知されている。

(2) 図 4 に示すように、各端末がロス補償フェーズ時に選択する可能性があるチャンネルは 3 種類である。その 3 種類

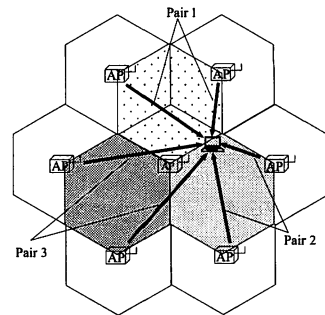


図 4 チャンネルシフト

のチャンネルから適切なチャンネルを選択するために、各端末は接続 AP に隣接する 6 つの AP を 3 つのペアにわけ、それぞれのペアの合計受信電力が最大になるものを選び、接続 AP とそのペアの AP の 3 つの AP に囲まれたエリアにいると判断して、チャンネル選択テーブルから適切なチャンネルを選択し、切り替えを行う。たとえば図 4 においてペア 2 の合計受信電力が最大だった場合、端末は図中の 3 つのロス補償エリアの内右下のエリア（ペア 2 と接続 AP に囲まれたエリア）をロス補償エリアとして選択し、ロス補償フェーズ時には中心の AP が使用していたチャンネルを使用する。なお、このチャンネルシフトはマルチセルの端のエリアにも問題なく適用可能である。ただし、全てのセルにおいて同タイミングでロス補償フェーズに遷移し、チャンネルシフトを行うためには、2.2 節で述べた最初の RTS の送信タイミングをサービスエリア内の全ての AP で一致させる必要がある。これは、サービスエリア内の AP 全てが同一のマルチキャストルータに LAN 接続されているような状況であれば、実現は可能と考えられる。

2.4 送信順序制御アルゴリズム

ロス補償フェーズにおいて各端末は、無線 LAN で一般に用いられている CSMA/CA [12] を拡張した以下の送信順序制御方式を用いる。

(1) S-STA (AP からの送信でデータフレームを正常に受信できた端末) はランダム時間待機後に RTS フレームを送信する

(2) F-STA (ロス端末) は RTS フレーム受信後に CTS (Clear to Send) フレームを送信する

(3) S-STA は RTS フレーム送信後に CTS フレームを受信したとき、マルチキャストデータフレームをマルチキャスト送信する

(4) S-STA は待機中に RTS フレームや CTS フレームを受信、あるいは何らかの送信が行われたことを検出したとき、RTS フレーム + CTS フレーム + データフレーム時間分待機し、(1) に戻る

(5) S-STA はデータフレームを送信するごとに CW (Contention Window) の値を 2 倍にする

以上の方式では (3) において、RTS フレーム送信後に複数端末が返信する CTS フレームを同時に受信することが考えら

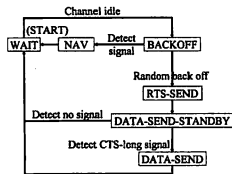


図 5 S-STA の動作

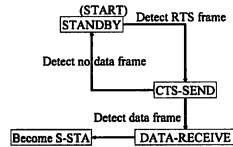


図 6 F-STA の動作

れる。そこで、S-STA は CTS フレームと同じ時間長の信号を検出した際に CTS フレームが受信されたとみなしてデータフレームを送信する。RTS/CTS は、本来の目的（隠れ端末問題の解消）とは異なり、ここでは、データフレーム送信の必要性の判断に用いられているため、データフレームと同じ伝送レート R_2 を用いて伝送される。端末再送信によって正常なデータフレームを受信した F-STA は新たな S-STA となり、(1) に移る。

図 5 と図 6 はロス補償フェーズでの S-STA と F-STA の動作を表したフローチャートである。ロス補償フェーズ終了時刻になると、各端末は動作を強制的に終了する。またロス補償フェーズにおいて各端末が保持していた CW のバックオフカウンタはリセットされる。

以上のように、MRCS は、送信要求を受けてから送信を行う従来の端末再送信手法に比べ構成は簡単である。また、再送信を行う端末を固定しないため、再送信を行うことで送信エネルギーを消費する端末を分散させることができる。さらに、宛先端末への経路制御などの必要がないという長所も有している。

3. シミュレーション条件

前節で説明した MRCS の有効性を示すため、シミュレーションを行った。表 1 に諸元を示す。現実性を考慮し、AP の配置は六角セル中に等間隔に配置されるのではなく、各セルの中央から 20m の範囲内のランダムな位置に配置した。各 AP に接続する端末数を一定数で与え、全ての端末がマルチキャストデータを受信要求しているとした。比較対象として、AP 再送信と、MRCS からチャンネルシフトの機能のみを除いたロス補償方式 (WMR: Wireless Multicast using Retransmission from successful station) についても評価を行い、結果を併せて示す。AP 再送信は AP からデータフレームを複数回再送信すること

表 1 シミュレーション諸元

無線システム	IEEE802.11a
パスロスモデル	ITU-R LoS Upper Bound [13]
チャンネル間干渉	なし
周波数	5[GHz]
送信電力	AP, 端末とも 10[dBm]
AP の伝送レート R_1	6[Mbps]
雑音電力	-92[dBm]
AP 高	4[m]
端末高	1[m]
データフレーム長	1500[Byte]
CW 最大値	1023
試行回数	1000

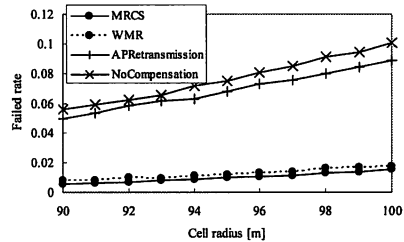


図 7 受信失敗率

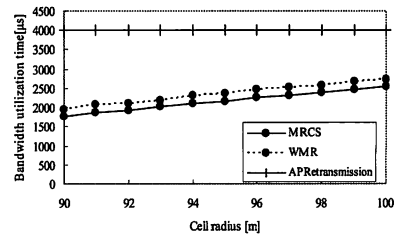


図 8 帯域利用時間

でロス補償を行う手法である。これは、2 節で述べた連送方式に相当する。WMR 方式は、単一のセルに閉じた端末再送信を用いたロス補償手法である。本方式と提案方式を比較することでマルチセル環境におけるチャンネルシフトを用いたロス補償の有効性を評価できる。シミュレーションにおいて変化させるパラメータとしては、端末再送信時の伝送レート R_2 、ロス補償フェーズの時間長、ロス補償エリアの端末数、ロス補償フェーズでの順序制御に用いる CW、セル半径 (図 1 の r)、シャドウイングの大きさが挙げられる。本稿では表 2 の値を上記のパラメータの基準値とする。

4. シミュレーション結果

4.1 端末再送信の有効性

MRCS および WMR はパラメータにはあまり依存せず、AP 再送信に比べ、有効なロス補償を実現する。本稿では端末再送信の有効性を明示するため、特に、表 2 の基準値を用いた時の性能を示す。このとき、AP 再送信の再送回数は 2 回とする。ロス補償フェーズの基準値 4ms と AP からの 2 回の再送信に要する時間はほぼ等しいため、公平な比較といえる。

図 7 に 90m から 100m の各セル半径に対する受信失敗率を

表 2 MRCS の基本パラメータ

パラメータ	基準値
端末再送信の伝送レート R_2	36[Mbps]
ロス補償フェーズの時間長 t	4[ms]
ロス補償フェーズでの CWmin	255
ロス補償エリアの端末数 n	100
シャドウイング s	対数正規分布 (標準偏差 5[dB])
セル半径 r	90~100[m]

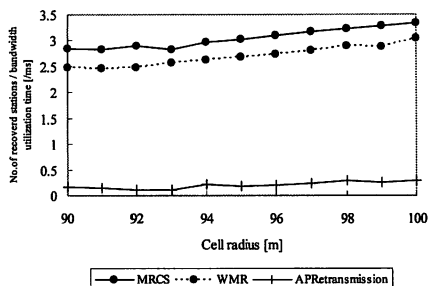


図 9 帯域利用効率

示す。受信失敗率は、ロス補償フェーズ終了時点でデータフレームを受信していない端末が全端末に対して占める割合である。この図にはロス補償を行わなかった場合の結果も併せて示す。まず、AP 再送信ではダイバーシチ効果を得られないため、あまり受信失敗率を低減できていない。一方、端末再送信を用いた 2 つの手法はともに大きく受信失敗率を低減できている。WMR, MRCS の受信失敗率は、セル半径が 100m のときでさえ、それぞれ 1.8% 程度、1.6% 未満と低い。

次に図 8 に各方式のロス補償フェーズ中の帯域利用時間を示す。ロス補償フェーズにおいて、複数の端末が同時に平行して送信を行った場合は、それぞれの端末が使用した分が計上される。また、本シミュレーションにおいて送信電力は端末、AP とも 10dBm と等しいので、帯域利用時間は送信エネルギーを消費した時間に等しい。図のように、端末再送信を用いる 2 方式ともに、AP 再送信に対し帯域利用時間を減少させることができている。これらの方式が端末再送信時に高い伝送レートを用いているからである。

図 7 と図 8 の結果から、端末再送信を用いた 2 方式は、AP 再送信よりも短い帯域利用時間で低い受信失敗率を達成できることが示された。ここで、ロス補償フェーズで低減できたロス端末数を帯域利用時間 [ms] で割った値を帯域利用効率（送信エネルギー利用効率）と定義し、図 9 に示す。AP 再送信の帯域利用効率は、MRCS や WMR に比べ概算で 1/10 である。このように、帯域利用時間を考慮した上で端末再送信を用いたロス補償方式が AP 再送信より有効なロス補償方式であることが示された。

4.2 シャドウイングに対する特性

ここでは、シャドウイングの大きさに対する特性を評価する。パラメータは基準値を用いるものとし、セル半径は 100m とした。図 10, 図 11 は、横軸にシャドウイングの標準偏差をとった受信失敗率ならびに帯域利用時間である。受信失敗率は、シャドウイングの標準偏差が大きいほど減少することが分かった。これは、シャドウイングの標準偏差が大きいほど、端末間リンクの品質の多様性が高まり、ルートダイバーシチ効果が高まるからである。一方、シャドウイングの標準偏差が小さいほど MRCS の WMR に対する優位性が高いのは、シャドウイングが小さいときは、AP や端末同士のリンクの品質は、図 1 や図 4 のように幾何学的な位置で決定されるが、シャド

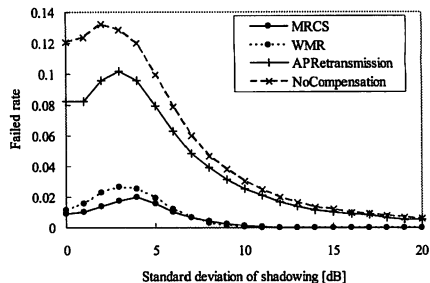


図 10 受信失敗率（シャドウイングに対する特性）

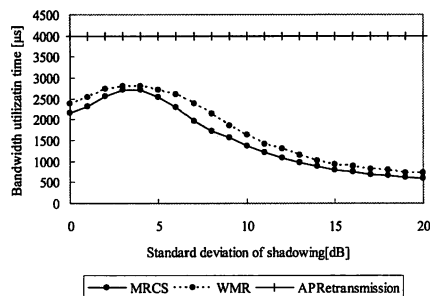


図 11 帯域利用時間（シャドウイングに対する特性）

ウイングが大きくなるにつれて、幾何学的な位置に依存しなくなるためである。また、図 11 から、MRCS の帯域利用時間は WMR に対し、10~20% 小さいことが確認された。

このように、MRCS の WMR に対する優位性は、ルートダイバーシチ効果が得られにくい、シャドウイングが小さい環境で、特に高いことが明らかになった。

4.3 サービス品質の評価

4.3.1 ストリーム受信特性

前節までは、1 データフレームの送信に対する評価を行い、提案する MRCS の有効性を示した。本節では、ストリームでデータフレームを配送した際の特性について評価する。シミュレーションでは 500 データフレームを配送し、その時の各端末の受信データフレーム数を計測した。試行回数は 100 回である。またシミュレーションパラメータには表 2 の基準値を用いた。

図 12 に、受信データフレーム数を累積分布で表す。図には、ロス補償を行わなかった場合、AP 再送信を用いた場合、WMR を用いた場合の結果も併せて示す。まず、MRCS を用いることで、端末が最も多くデータフレームを受信できていることが分かる。具体的には、約 98% の端末が、400 フレーム以上を正しく受信できている。また、約 90% の端末が全データフレームを受信できている。一方、WMR も良好な特性を示すが、MRCS より劣っている。また、AP 再送信では、データフレームを受信できていない端末の割合が、ロス補償を行わなかった時とほとんど変わっておらず、受信環境が悪い端末に対しては有効なロス補償が行えていないといえる。このようにストリーム単位の評価でも MRCS の優位性が確認できた。

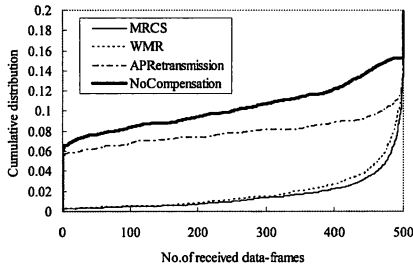


図 12 ストリーム受信フレーム数累積分布

4.3.2 提供可能なビットレート

次に提供可能なビットレートについて考察する。当該マルチキャストフロー以外のフローが存在しない環境下において、ロス補償フェーズの時間を t_1 [s], AP からの伝送レート R_1 [Mbps], 端末再送信時の伝送レート R_2 [Mbps], データフレーム長を n [bit] としたとき, MRCS の提供可能なビットレート θ [Mbps] は次の式で与えられる。

$$\theta = \frac{n}{\frac{n}{R_1} + t_1}$$

本論文のシミュレーションで用いた基準値 (表 2) を代入すると, $\theta = 2$ [Mbps] となる。ロス補償フェーズの長さを 2ms, 6ms に変更するとそれぞれ $\theta = 3$ [Mbps], $\theta = 1.5$ [Mbps] となる。AP からの最初の送信の伝送レート 6Mbps が提供可能なビットレートの上限値であることと, 前節の受信データフレームの評価から, MRCS は非常に高い信頼性で十分に高いビットレートのストリーム配信を実現できるといえる。また, MRCS 方式ではロス補償フェーズの時間を明確に区切るため, 受信側のバッファ容量に応じて, データフレームの最大遅延を事前に決めておくこともできる。

5. まとめ

本論文では, 無線マルチキャストにおけるロス補償の重要性を説明し, ルートダイバーシチ効果によりこれを効率的に行う端末再送信を用いた手法を検討した。特に, 従来とは異なり, マルチセル環境に適した MAC レイヤの設計を行った。シミュレーション評価によって, まず, 端末再送信を用いたロス補償方式が AP からの再送信によるロス補償よりはるかに有効であることを示した。また, 提案方式により, マルチセル環境で隣接セルにまたがって補償を行うことが, 受信失敗率の低減, 帯域利用効率の向上の点で有効であることを示した。さらに, ストリーム単位の評価においても提案方式が優位であることを確認した。ただし, 2.3 節で述べた通り, MRCS では, 最初の RTS の送信タイミングを全ての AP で一致させる必要がある。一方, WMR を用いると, そのようなタイミング制御無しに, MRCS には劣るが AP 再送信よりは高いロス補償性能を得ることができる。

今後は, ストリーム単位での信頼性を向上するために, FEC との組み合わせを検討したい。

文 献

- [1] H. Gossain, C. Cordeiro, and D. Agrawal, "Multicast: Wired to Wireless," IEEE Commun. no.40, vol.6, pp.116-123, June. 2002.
- [2] P. Chaporkar and S. Sarkar, "Wireless Multicast:Theory and Approaches," IEEE Trans Info Theory, vol.51, pp.1954-1972, June. 2005.
- [3] Pit Live TV powered by Intel, <http://www.mobilityland.co.jp/pitlivetv/>
- [4] 河村篤志, 寒川知生, 新熊亮一, 高橋達郎, "無線マルチキャストのための最適ルーピング・アクセスポイント割り当てアルゴリズム," 信学論 (B), vol.J90-B, no.5, pp.476-489, May 2007.
- [5] 上野英俊, 鈴木偉元, 田中希代子, 石川憲洋, "放送型データ配信サービスのためのマルチキャスト技術," NTT 技術ジャーナル, no.60, vol.9, pp.60-66, Sept. 2005.
- [6] 鈴木偉元, 原下貴志, 田中希代子, 上野英俊, 石川憲洋, 高橋修, 株式会社 NTT ドコモ マルチメディア研究所 "無線 LAN でのマルチキャスト 誤り回復方式の比較評価," 情報処理学会シンポジウム (DICOMO2003), No.058, pp.229-233, June. 2003.
- [7] 三星電子株式会社 "マルチキャストデータ再伝送方法及び装置" 公開特許広報 JP2004-166247A, 2004
- [8] 松下電器産業株式会社 "無線マルチキャスト通信方法" 公開特許広報 JP2007-13824A, 2007
- [9] 久保広行, 河村篤志, 新熊亮一, 高橋達郎, "無線マルチキャストのための端末再送信を用いたロス補償方式の検討," 信学技報, IEICE Technical Report MoMuC2007-60, pp.25-30, Nov. 2007
- [10] W. Si and C. Li, "RMAC: A Reliable Multicast MAC Protocol for Wireless Ad Hoc Networks," Proc. of the International Conference on Parallel Processing (ICPP), Aug.2004.
- [11] H. Gossain, N. Nandiraju, K. Anand and D. P. Agrawal, "Supporting MAC Layer Multicast in IEEE 802.11 based MANETs: Issues and Solutions," Proc. of the IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN), 2004.
- [12] 守倉正博, 久保田周治, 802.11 高速無線 LAN 教科書, pp.80-99, (社) インプレス, 2005.
- [13] Recommendation ITU-R P.1411-2, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100GHz," pp.6-7, 1999.