

モバイル・マルチキャスト通信のための FEC/ARQハイブリッド制御方式の検討

鈴木 偉元[†] 藤原 廣則[‡] 石川 憲洋[†] 上野 英俊[†] 高橋 修[†]

[†] 株式会社NTTドコモ マルチメディア研究所
〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-5

[‡] NTTアドバンステクノロジー株式会社
〒210-0007 川崎市川崎区駅前本町 12-1

E-mail: [†] {hideharu,ishikawa,hueno,osamu}@mml.yrp.nttdocomo.co.jp, [‡] fujiwara@ktb.netwk.ntt-at.co.jp

あらまし モバイル端末の普及によって、利用者からは移動通信網とインターネットのシームレスな通信環境の必要性が高まりつつあり、情報配信サービスにおいてはシームレス通信環境に対する最適なマルチキャスト通信品質の実現が課題である。そこで本研究では、無線網と有線網といった特性の異なるネットワークが混在する環境を想定したマルチキャストの高信頼化技術について検討する。マルチキャストの高信頼化技術には、従来から誤り訂正符号化 (FEC) や再送制御 (ARQ) があり、それぞれエラー耐性やトラヒック特性といった特徴が異なる。ここでは、FEC 及び ARQ をハイブリッドに組み合わせる方法について概観するとともに、ネットワークのエラー率を推定することによって、FEC の冗長率の最適値を動的に特定する方法について提案する。

キーワード マルチキャスト, 誤り訂正符号化, 再送制御

A Study of FEC/ARQ Hybrid Control Techniques for Reliable Multicast in Wireless Networks

Hideharu SUZUKI[†], Hironori FUJIWARA[‡], Norihiro ISHIKAWA[†], Hidetoshi UENO[†],
and Osamu TAKAHASHI[†]

[†] Multimedia Laboratories, NTT DoCoMo, Inc.
3-5 Hikarinooka, Yokosuka, Kanagawa, 239-8536 Japan

[‡] NTT Advanced Technology Corporation
12-1 Ekimaehoncho, Kawasaki-ku, Kawasaki, Kanagawa, 210-0007 Japan

E-mail: [†] {hideharu,ishikawa,hueno,osamu}@mml.yrp.nttdocomo.co.jp, [‡] fujiwara@ktb.netwk.ntt-at.co.jp

Abstract Now that mobile terminals are so prevalent, it is more necessary for mobile internet users to access seamlessly between a wireless network and the internet. A principal issue of the contents delivery service is how to realize the high quality of multicast transmission in the seamless access environment. In this paper, we have studied the reliable multicast technique for mobile users who use the wireless network and the wired network seamlessly. Up to this time, FEC (Forward Error Correction) and ARQ (Automatic Repeat request) have been studied as reliable multicast technique, and they have own benefits of error robustness and network traffic load respectively. We have surveyed the ordinary FEC/ARQ hybrid control technique and propose a design method of calculating the appropriate FEC redundancy ratio that involves our estimation method of packet error ratio.

Key words Multicast, FEC, ARQ

1. はじめに

モバイル端末の普及によって、インターネット接続による情報閲覧やメール等の情報発信が個人レベルにまで広まりつつあり、クライアント端末数の爆発的な増加が見込まれる。今後、位置情報に基づくコンテンツ配信や端末アプリケーションのアップデートなど、多数の端末に対するコンテンツ配信サービスの需要が高まることが予想される。マルチキャストは一度の送信で同時に多数のユーザに対してコンテンツの配信が可能であり、ネットワークの利用効率の向上とサーバの負荷低減の意味からも魅力的な技術である。

無線網は有線網に比べて一般にエラー率が高く、遅延のバラツキが大きいといった特性があり、モバイル端末に対するマルチキャストでは誤り耐性の向上は重要な課題の一つである。代表的な誤り制御技術には、送信側から符号化による冗長データを付加し、受信側で誤りを訂正する前方誤り訂正 (FEC: Forward Error Correction) と、誤り部分を再送して訂正する自動再送要求 (ARQ: Automatic Repeat Request) 方式がある[1]。エラー率の小さい状況では、FECは冗長データが無駄となり、スループットを劣化させるのに対し、ARQは誤った部分のみを再送するためスループットを下げずに高品質化を図れる。しかし、エラー率が大きい場合には、ARQは再送の頻度が急増するため、スループットを劣化させるが、FECはエラー率の変動がある範囲内であれば有効であるといった特徴がある。そこで、FECとARQの特徴を生かすことによって、両者を組み合わせたハイブリッド方式による効果は大きい。FECによって回復可能限界までのパケット損失を回復し、一部の回復限界を超えた損失をARQによって回復する。これによって、再送要求のための応答爆発が軽減される。一方、FECでは対応できない程の大きな誤り変動が生じた場合には、ARQによって補うことができる[2]。

FEC/ARQ ハイブリッド方式はこれまでにいくつかのアルゴリズムが提案され、計算機シミュレーションによる評価結果の報告がなされている[3]。NonnenmacherらはARQ処理層の下位にFEC処理層を独立な処理として挿入したLayered FEC方式と、ARQ及びFECを同じ層で処理するIntegrated FEC方式を比較している[3]。Layered FEC方式はオリジナルパケットと同時にFEC冗長パケットを送信し、受信側でデータを正しく復号できなければNACKを返す。

NACKに基づいて、ARQ層ではオリジナルパケットの再送を行う。この手順はそのデータが正しく復号されるまで繰り返される。Integrated FEC方式は最初にオリジナルパケットと同時にいくつかのFEC冗長パケットを送信する。NACKが返った場合には、再送要求のあった数だけのFEC冗長パケットを別に生成して送信する。Nonnenmacherらによると、Integrated FEC方式は再送に冗長パケットのみを用いるために回復効率がよく、Layered FEC方式よりも優れていることが論じられている。本稿では、Integrated FEC方式をベースにモバイル端末向けのハイブリッド方式を検討する。

また、Nonnenmacherらは網のパケットエラー率から、オリジナルパケット1つ当たりの平均送信回数を数式モデル化した。Nikaeinらは同じ数式モデルを利用し、このオリジナルパケット当たりの平均送信回数の逆数をとって評価指標とすることを提案している[4]。いずれの論文も、FEC冗長率や受信端末数をパラメータとすることで、計算機シミュレーションによる各方式の特性比較を行っているのだが、システム実装のための具体的な設計値、例えば、FEC冗長率の最適値などを特定するには至っていない。一般に、無線網のパケットエラー率は信号対雑音比 (SN比) やフェージングの性質、変調方式や復調方式、誤り制御符号の方式、ダイバシティ方式など非常に多くの要素に依存しあって変化するため、FEC冗長率を一意に定めることは困難である[5]。そこで本論では、FEC/ARQハイブリッド方式をシステムに実装して運用するために、実際のパケットエラー率をリアルタイムに監視し、それに基づいてFEC冗長率を動的に定める方法を提案する。

第2節では、従来から行われているマルチキャストの高信頼化技術と評価指標モデルについて紹介する。第3節では、モバイル端末を対象としたFEC/ARQハイブリッド方式について検討し、FEC冗長率の決定アルゴリズムを提案する。第4節では、評価用のプロトタイプシステムについて紹介する。

2. 従来のマルチキャスト高信頼化技術

2.1 FEC と ARQ

通信網で生じるエラーに対処する手法として、FECとARQがある。インターネットのユニキャスト通信に信頼性を提供するプロトコルとして一般的なTCPにおいては、無線データリンク層のエラー訂正

機能(ここにも FEC/ARQ が利用される)を利用することで、IP パケットレベルのエラー率を低く抑えることができている(この結果送信遅延時間が大きくなるという副作用が生じている)。IP マルチキャストによる通信の場合にも、信頼性向上の手段としてこれらの方法が利用される。FEC 方式にはブロック符号や畳み込み符号などの方式が存在しているが、本論ではブロック符号方式の Reed-Solomon Erasure Code を前提とする。ブロック符号化 FEC は簡単に言えば、元のパケット(k 個)に、エラー訂正用の冗長パケット(h 個)を付与し、この全体($n=k+h$ 個)で通信中に一部(最大で h 個まで)のパケットを紛失しても、元のパケット(k 個)を復元できるようにする仕組みである。

無線網は、一般的に、有線網と比較して帯域が小さい、遅延が大きい、エラー率が高いといった特性をもっている。無線網に接続したモバイル端末と、有線網に接続した固定端末が、同一のマルチキャスト配信サービスを受けようとする場合には、この通信網の違いによって幾つかの問題が生じる。一例として、IP マルチキャストによる一括転送型のファイル配信を実現する高信頼性プロトコルである RMTP[6]を利用する場合、このプロトコルは NACK 応答に基づいた Selective-Repeat 型の ARQ を採用しているため、再送信プロセスはエラー率の高い無線網に接続した端末の受信状況に支配されることになる。この結果、比較的エラー率の小さい有線網に接続する端末にも、多数の再送パケットの配送が行われる。また、もともと受信エラーには TCP などの想定と同じく輻輳が原因と考えたレート調整機能でしか対応できないために、無線網のような輻輳が原因ではない、伝送レベルのエラーにあらかじめ対応することができない。有線網では NACK 発生を抑制するためには、輻輳を起ささないように送信レートを下げることが有効であったが、無線網との組み合わせではこの方式が有効でない。

本稿では最終エンド側の無線網において IP マルチキャスト通信を利用することを前提とするために、IP パケットレベルのエラー訂正方式として FEC/ARQ 方式を採用することを考えたい。通信網の品質の違いを吸収するために IP ネットワークに FEC/ARQ を適用する場合にも、送信サーバと全受信端末間の End-to-end に適用する方式と、部分的に、例えば無線網上のみに適用する方式が考えられる。無線網(モバイル網)と有線網の二つのネットワー

クを対象に考える場合、送信サーバからみて有線網の端末と無線網の端末を区別して扱うことは難しいので、End-to-end への適用では、結局、エラー訂正のためのパケット(FEC における冗長パケットや ARQ の再送要求パケット)を End-to-end に適用することになってしまう。Rubenstein らは、マルチキャスト配信ネットワークの中間に local recovery 用の中継サーバを設置し、FEC/ARQ をこの中継サーバ配下のネットワークに限定的に適用するプロトコルを紹介している[7]。このような中継サーバは、特に無線網の高エラー環境に対応することを想定する場合には、エラー対応のためのトラフィック抑制の観点から、より効果的であると考えられる。無線網は、基地局の立地環境に応じてエラー条件が異なると考えられるため、複数の無線網が混在することを想定した IP マルチキャスト配信の場合、これらの無線網に FEC/ARQ が個別に適用できるように、中継サーバ方式を想定し、この複数の中継サーバを組み合わせることで異なる通信環境に適合させる方式が考えられる。実際には、通信環境条件が複雑になる程、中継サーバの設備コストや中継処理に要する遅延時間などのデメリットがあるため、End-to-end 方式と併用する必要があると考えられる。

本稿ではこの中継サーバ方式については特に議論せず、以降は、無線網に FEC/ARQ を適用した場合の有効性と、実際に導入する場合の方式案について述べる。

2.2 評価指標

Nikaein らは、無線網に FEC を適用する際に、最適のコードをただ一つに決定できないことから、二つのパラメータ(ビットエラー率、受信者数)を与え、その条件下における最適なエンコードを求める必要があることを述べている[4]。この際、最適値を算出する評価指標として、Efficiency 及び(マルチキャストの)パケットロス率を挙げている。パケットロス率を下げるためには、冗長パケットを増やせばいいと考えられるが、それは Efficiency の観点から問題があるということが示されている。Nikaein らは、通信品質の評価指標としてはパケットロス率として示される数字が要求されているものと考え、それを満たすエンコードの中で Efficiency が最大になるものを選択するように提案している。以下では、Nonnenmacher が示した Integrated FEC 方式について、この同じ

Efficiency の考えを適用することについて考察する。式の導出にあたっては、Nonnenmacher らの論文を引用した。

FEC ブロックにおいて、 k 個のオリジナルパケットを含む n 個の FEC パケットを構成するものとし、各パケットレベルのエラー率を p 、受信端末数を R とした場合に、FEC を適用した転送によって、一つのオリジナルパケットのエラー率 q は、次の式で表される。

$$q(k, n, p) = p \left(1 - \sum_{j=0}^{n-k-1} \binom{n-1}{j} p^j (1-p)^{n-j-1} \right)$$

Integrated FEC において、オリジナルパケット数を k 個、第 1 回目の送信と一緒に送信する冗長パケット数を a 個とする。FEC エンコードの冗長パケットが無限に生成できる (パケット数 $n = \infty$) と仮定すると、パケットの再送回数が L_r となる確率 P は次の式で表される。

$$P(L_r = 0) = \sum_{j=0}^a \binom{k+a}{j} p^j (1-p)^{k+a-j},$$

$$P(L_r = m) = \binom{k+a+m-1}{k-1} p^{m+a} (1-p)^k, \quad m=1, \dots$$

最大のパケット再送回数を L 、受信端末数を R とすると、

$$P(L \leq m) = \left(\sum_{i=0}^m P(L_r = i) \right)^R, \quad m=0, 1, \dots$$

平均のパケット再送回数は次の式で表される。

$$E[L] = \sum_{m=0}^{\infty} (1 - P(L \leq m))$$

よって、任意のオリジナルパケット 1 個当りにかかる平均送信回数 は次の式で表される。

$$E[M] = (E[L] + k + a) / k$$

また、 n が有限個である ($n < \infty$) 場合には、 B を再送要求回数 (ブロック数に等しい) とすると、 $E[M]$ は次の式で表される。

$$\begin{aligned} E[M] &= ((E[B] - 1)n + E[L|L < n]) / k \\ &= \frac{n}{k} \left(\sum_{i=1}^{\infty} (1 - (1 - q(k, n, p))^i)^R - 1 \right) \\ &\quad + \frac{1}{k} \sum_{m=0}^n (1 - P(L < m | L < n)) \end{aligned}$$

Nikaein らは Layered FEC について $E[M]$ の逆数をとって評価指標とする考え方を示している。同様に、Integrated FEC の Efficiency (Eff) を以下の通りとする。

$$Eff = \frac{1}{E[M]}$$

エラー率 (p) と受信端末数 (R) を与えると、Efficiency は FEC 冗長率の関数となり、Efficiency を最適にする FEC 冗長率を定めることができる。

3. モバイル向け FEC/ARQ ハイブリッドアルゴリズムの提案

3.1 FEC 冗長率の特定

Integrated FEC では、FEC レイヤにおいて、オリジナルパケット (k 個) に対して冗長パケットを生成し (h 個)、まず、そのうちの a 個をオリジナルパケットと一緒に送信する。受信側の FEC レイヤはこのうち k 個のパケットが受信できればオリジナルパケットを復元し、 k 個に不足する場合は再送を要求する。送信側の FEC レイヤは再送要求が、用意した冗長パケットで賄える限りはその再送要求に対応することができる。ここで、最初に送信するパケット (オリジナルパケット (k 個) + 冗長パケット (a 個)) に対して、用意された冗長パケットの数 (h 個) が意味を持つのは、この送信プロセスで、受信者から更に $h-a$ 個より多くの再送要求を受け取った場合である。図 1 において、 h の数が少ない場合には、 a の設定に関わらず、Efficiency が悪い状態が観察されるが、 h の数の増加に応じて、Efficiency は改善する。しかし、 h の数がある値を越えるとそれ以上の改善は認められない。もし、再送要求が $h-a$ 個を越える場合には、その FEC ブロックの送信パケット数は、最初に送信する冗長パケット数 (a 個) に無関係に、 $k+h$ 個となるだろう。この場合は、Integrated FEC においてもオリジナルパケットの再度の FEC エンコーディングが必要になる。これが h の小さい領域の Efficiency の悪化をもたらしている。もし、再送要求がこの ($h-a$) 個に満たなければ

ば、 h 個の冗長パケット数は、無限の冗長パケットを用意している場合と異ならない。グラフで、 h が一定数を越えると、Efficiency に変化が無くなるのがこの状態を示している。つまり、用意する冗長パケット (h 個) を無限にとった場合の再送要求数が、現に必要な冗長パケット数であると考えられる。しかし、グラフに示される通り、冗長パケット数 (h) が十分であっても、最初の送信する冗長パケット数である a 個が過剰であると、Efficiency が悪化することになる。そこで、 $a=0$ 、 $h=\infty$ として、簡単に最良の Efficiency を見積ることとする。その後、 h および a について、その最良の Efficiency に近い値を採用することを検討する。

ここで、Efficiency を決定するパラメータを付加して、 $\text{Eff}(a, h, k, p, R)$ と表す。上述の最良の Efficiency はこの記法で、 $\text{Eff}(0, \infty, k, p, R)$ と書ける。そこで、 $a=0$ として $\text{Eff}(0, h, k, p, R)$ の h の値を変えていき、この結果得られる値と、 $\text{Eff}(0, \infty, k, p, R)$ を比較する。図1においては、 $h \geq 6$ の範囲で $\text{Eff}(0, h, k, p, R)$ と $\text{Eff}(0, \infty, k, p, R)$ の計算結果が計算誤差の範囲で一致している。続いて a の値を決定するが、図1の $\text{Eff}(0)$ は $h \geq 6$ のとき、 $a \leq 4$ の範囲では変化がない。そこで、 a の値には最大値である 4 を採用する。これは FEC レイヤの再送要求に関わるトラヒックを最小にするという観点からである。

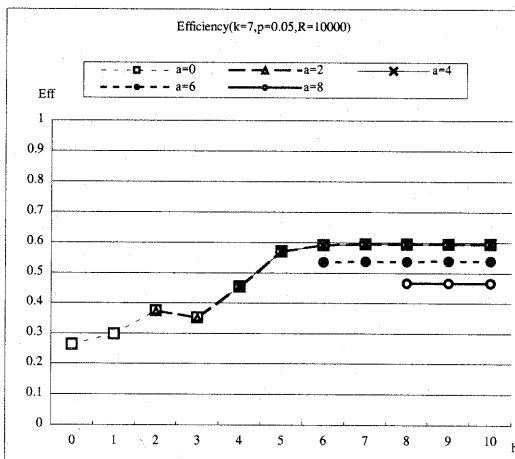


図1 Integrated FEC の Efficiency

3.2 FEC/ARQ ハイブリッドアルゴリズム

FEC/ARQ ハイブリッド処理フローを図2に示す。この方式は Nonnenmacher らが評価を行った Integrated FEC と同じものであり、FEC と ARQ が同一の処理層に存在し、FEC レベルの冗長パケット送信と RM (Reliable Multicast) レベルのパケット再送を組み合わせたものである。

(1) RM 部

RM 部は ARQ によるパケットの再送を行う。RM 部から後述する FEC 部へ引き渡すデータ単位を転送グループとする。RM 部では、送信されるファイルを転送パケットに分割し、 k 個のパケットから転送グループを構成して FEC 部へ引き渡す。RM 部レベルの NACK (RM-NACK) には、欠落パケット番号が通知され、次の転送グループの構成手順において欠落パケットを含める (再送)。RM 部レベルの ACK 受信によって、送信処理が完了する。

(2) FEC 部エンコード

FEC エンコードは k 個のパケットから構成される転送グループに対して、冗長パケット (h 個) を生成する。このオリジナルパケット (k) と冗長パケット (h) を合わせて FEC ブロックと呼ぶこととする。第1回目の FEC レベルの送信では、元パケット (k 個) と冗長パケット (a 個、 $a \leq h$) を送信する。

(3) FEC 部 NACK

受信側 FEC 部は一つの FEC ブロックの受信において必要な一定数 (k 個) が受信できなかった場合、再送要求数 (不足数) を格納した NACK パケット (FEC-NACK) を返送付する。FEC 部は NACK パケットにある再送要求数の最大値に基づいて、新たに FEC ブロックの冗長パケットを追加送信する。この追加送信シーケンスは冗長パケット残数 (r) が無くなったところで打ち切られる。FEC ブロック送信は上記の打ち切り処理、あるいはタイムアウトによって送信処理が完了する

(4) FEC 部冗長率適用

受信側 FEC 部は新たな FEC ブロック受信時に、受信パケット数を集計し、同一ブロックの末尾のパケットを受信して一定時間経過後に、受信パケット数が k 個以上であれば、ACK パケットを返送する。ACK パケットには受信パケット数を格納する。送信側 FEC 部は ACK パケットおよび NACK パケットから、各端末の受信パケット数 (受信失敗数) を取得し、平均パケットエラー率を求める。送信側 FEC 部は平均パケットエラー率に基づき、Efficiency の評価を行

い、最適な冗長率 (a') を取得する。

3.3 エラー率の推定

現実の IP 通信環境において、受信者数やエラー率を知るための一般的な手法は想定しにくい。そこで、IP マルチキャスト通信プロトコル上でこれらの情報を収集する方法について検討する。ここでは、FEC の送信者・受信者間で、受信確認のための ACK パケットを導入し、この情報に基づいてパケットエラー率を推定する。ACK は FEC ブロック単位に通知され、応答確認であると同時に、受信パケット数に関する情報を含んでいる。これにより、ネットワークのパケットエラー率を計算する。受信者の ACK 応答は、FEC ブロック全体を受信し終えた時点で返送されなくてはならない。FEC における受信確認は、FEC ブロック n 個から必要な k 個を受信した段階で、オリジナルパケット k 個をデコードし、ACK 応答を通知することが可能である。しかし、その場合には ACK に含まれる受信パケット数が k 個にとどまるため、送信した n 個に対してのパケット受信比率を計算することができないことになる。そこで、ACK 応答は、(i) n 個のパケット受信時か、(ii)FEC ブロックの受信待ちがタイムアウトする時点、(iii)送信側からの応答督促パケットを導入し、応答督促受信時のタイミングで行う。均質なエラー率を想定する場合、ACK パケットに含まれる受信パケット数を、当該 FEC ブロックの送信パケット数(n)で割ったものを、全応答パケットに対して平均化すれば、ネットワークのパケットエラー率が推定できる。

ただし、この方法には以下の問題が考えられる。まず、無線網の場合、おおよその傾向として、基地局に近い方が通信状況は良く、遠いほど悪化すると考えられることから、必ずしも均質なエラー率ではない。エラー率のばらつきが大きくなる場合、平均として得たパケットエラー率に基づく、適切な冗長パケット数と、この異なるエラー率を切り分けて個別に求める適切な冗長パケット数に差が生じることになる。想定より悪い受信率の端末群を含んでいる場合、その端末群に再送プロセスが支配されることから、計算された冗長パケット数は対象となるネットワークの最適値と異なることになるため、このような事象を考慮した補正手段が必要になる。また、ACK 応答パケットは紛失する可能性があるため、必ずしも、対象となるエリアの全受信者の情報が収集

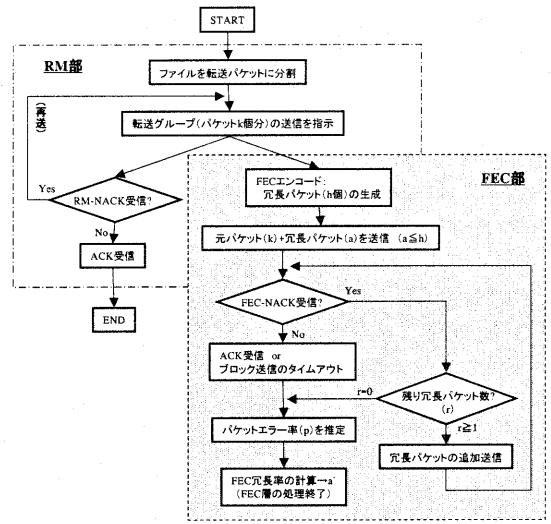


図2 ハイブリッドアルゴリズム

できるとは限らない点がある。一般には、通信状況の悪いエリアにいる端末の応答の方が紛失し易いと考えられるため、おおよその傾向としては、パケットエラー率の推定値は実態よりも良い値に傾くことになる。

4. 評価用プロトタイプソフトウェア

4.1 ソフトウェア構成

評価用プロトタイプを用いて、FEC 冗長パケットの適応設定の有効性を検証する。プロトタイプソフトウェアのソフトウェア構成を図3に示す。プロトタイプでは、ARQをベースとした既存の信頼性マルチキャストプロトコル階層(送信部: RM-S, 受信部: RM-R)の下位にFECによる高信頼化階層(送信部: FEC-S, 受信部: FEC-R)をそれぞれ挿入する構成をとった。これはFEC階層が提供する信頼性は万全ではなく、最適な冗長パケット率を設定しても、受信失敗する端末が必ず現れると考えられることから、FECによる信頼性の不足部分を上位の信頼性マルチキャストプロトコルで補うためである。なお、このような信頼性向上のためのFECとRMの階層構造は、管理の冗長性などからマルチキャスト転送の効率面では最適解を与えないと予想されるが、今回のようなFEC階層の適用の有無によるハイブリッド方式の評価においては十分と考える。

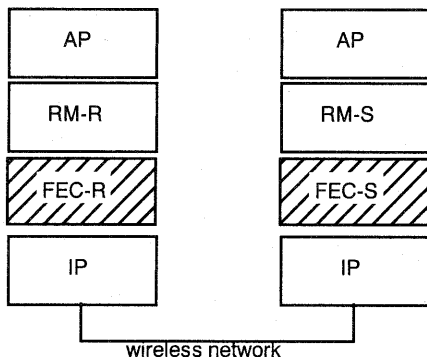
ハイブリッド方式によって期待される効果は、RM

階層における送受信パケット数の削減（再送プロセスの削減による効果）である。FEC 階層を設けない場合の RM 階層間の送受信パケットは、エラーの生じない環境下では、最小の送信パケット数を実現するが、エラー発生時の再送では FEC によるパケット削減が有効に作用すると期待される。プロトタイプソフトウェアでは、RM 階層に、RMTP を採用した。RMTP はバルクデータ配信のための高信頼型マルチキャスト転送プロトコルであり、配信プロセスは、

- (i)受信端末管理のためのコネクション確立フェーズ、
- (ii)マルチキャストによりデータパケットを配信する主配信フェーズ、
- (iii)配信終了手続きのためのコネクション解放フェーズから構成される。今回、FEC の適用を図ったのは、このプロセスのうちの主配信フェーズである。

プロトタイプソフトウェアの FEC 符号化方式が使用する Reed-Solomon(RS)符号の場合、予め FEC ブロック数の上限を定める必要がある。本プロトタイプでは、FEC ブロック数を 256 とし、例えば、1 個のオリジナルパケットに最大 255 個の冗長パケットを付加することが可能である。これを超える再送要求には答えることができない。

なお、この RM と FEC の階層構造には、各層の独立性を確保したため、RM 階層の機能の一部に制約を生じることが考えられる。本プロトタイプソフトウェアの例では、RMTP モジュールが従来行っているレート制御機能に問題がある。



RM-S:Reliable Multicast Sender module
 RM-R:Reliable Multicast Receiver module
 FEC-S:FEC Sender(encode) module
 FEC-R:FEC Receiver(decode) module

図3 ソフトウェア構成

RMTP のレート制御はパケットの送信間隔を調整する方式で実現されているが、FEC モジュールが独自に付加する冗長パケットやパケットに追加する管理情報については加味することができない。また、FEC エンコードに関わる処理時間に関しても想定が困難となることから、階層化された場合には同様なレート制御機能は RM 階層ではなく、FEC 階層に持つ必要がある。

4.2 エラー率

本プロトタイプソフトウェアでは、ACK 応答と NACK 応答を集計してエラー率を推定する。FEC を利用する場合、受信成功は送信パケットの全てを受信したことを意味しない。全ての送信パケット (k 個のオリジナルパケット + h 個の冗長パケット)のうちから k 個のパケットを受信できれば受信成功となるためである。ACK 応答が受信成功情報を持つ場合、当該端末が受信したパケット数は k 個から $k+h$ 個の間の値を取り得る。そこで、本プロトタイプでは、ACK パケットに受信成功数を格納することとした。よって、応答パケットに基づき、各端末の受信パケット数を割り出し、送信パケット数からパケット受信率を計算する。

ある FEC ブロックの第 1 回目の送信パケット数は $k+a$ 個である。これには FEC レイヤが行う一連の再送シーケンスで再送された冗長パケットの数は含まれていない。集計対象となる応答パケット数は、この第 1 回目の送信 ($k+a$ 個) に対する応答である。第 1 回目の送信応答であることを区別できるように、パケットには送信回数の情報を入れた。ACK 応答には受信パケット数を含めたので、この値と送信パケット数 ($k+a$ 個) の差が受信失敗パケット数である。本プロトタイプでは、NACK 応答に再送要求パケット数が含まれているので、その数から受信失敗数を算出できる。総受信失敗数は、各パケットの受信失敗数を受信パケット数全体で足しあわせれば求められるので、これを受信パケット数で割ることで、平均受信失敗パケット数が与えられる。更にこの値を送信パケット数で割ることで平均パケットエラー率が得られる。

但し、既に述べた通り、送信対象に異なるエラー率の集団が混在する場合を考えると、この方法で得られる平均エラー率には問題がある。図 4 は、64 パケットを 10,000 端末に送信した場合の端末群をエ

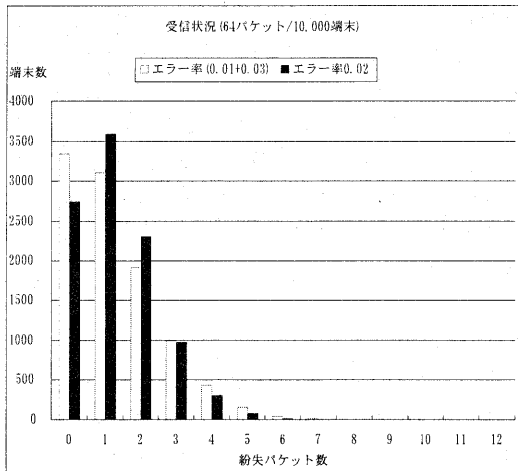


図4 エラー分布

ラー率が1%の集団と3%の集団が混在するグループと見なした場合のエラーの分布と、これに上記のエラー率推定を行った場合に得られる2%のエラー率でのエラー分布を示す。図4では、高エラー率の端末が推定値より大きくなり、再送パケット数がその分増加する傾向に陥る。

4.3 受信端末数

本方式では Efficiency の評価にあたって、受信端末数を確定する必要がある。受信端末の移動を伴うモバイル網において、無線基地局レベルに FEC による信頼性サポートを行う中間サーバを配置するようなネットワーク構成が考えられる。各中間サーバのエリア内にいる受信者数は流動的となり、受信端末数を確定することは難しい。これについて、想定される環境の標準的な受信者数が存在するとして、それに基づいて Efficiency 評価を行った場合、実際の受信者数が異なった場合の送信にどの程度の影響をおよぼすかを評価することはできる。

4.4 性能評価について

本プロトタイプソフトウェアでは、実際の計算機能力で、どの程度の受信端末に対して信頼性マルチキャスト配信を実現できるのか評価を行っていく。このために、受信側端末の挙動を模擬するシミュレータを導入し、マルチキャスト送信サーバに対する

負荷試験を行う予定である。また、FEC 冗長率の動的な更新の有効性を評価するにあたっては、エラー率の計測および、これに基づく Efficiency の算出と最適な冗長パケット数の計算処理の負荷（その計算量と、応答パケットのトラフィック量）や、冗長率の更新がどの程度のエラー率の変動に追従できるのかを定量化し、実際のモバイル網への適用性についても併せて検討したい。

本方式では、ある FEC ブロックの受信エラー率に基づいて、その次の FEC ブロックの送信に適用することを検討した。モバイル網のようなバースト的なエラー発生が生じうる場合には、ある FEC ブロックの受信率が著しく悪化し、これを直ちに次の FEC ブロック送信に反映させることの是非は重要な検討課題である。

5. おわりに

本論文では、モバイル端末に想定される有線網及び無線網が混在するネットワーク環境を対象に、マルチキャストの高信頼化技術の検討を行った。モバイル端末のようなネットワーク特性が変化しやすい環境条件に対応するために、従来から検討されている FEC/ARQ を組み合わせたハイブリッド方式に基づいて、FEC 冗長率を動的に特定する方法を示した。今後は、本提案のアルゴリズムについて、プロトタイプを用いた実証検証を行うとともに、受信端末数を増大させた場合の実装条件を明確にしていく。

文 献

- [1] 笹岡秀一他, 移動通信, 笹岡秀一(編), pp.215-250, オーク社, 東京, 1998.
- [2] 山内長承, “高信頼マルチキャスト,” 情報処理, Vol. 42, No. 8, pp.754-759, Aug. 2001.
- [3] J. Nonnenmacher, E. Biersack, and D. Towsley, “Parity-Based Loss Recovery for Reliable Multicast Transmission,” Comput. Commun. Rev., Vol. 27, NO. 4, pp.289-300, 1997.
- [4] N. Nikaein, H. Labiod, and C. Bonnet, “MA-FEC: A QoS-Based Adaptive FEC for Multicast Communication in Wireless Networks,” IEEE Int. Conf. Commun., Vol. 2000, NO. 2, pp. 954-958, 2000.
- [5] 秦正人他, パケット無線ネットワーク, 山内雪路他(編), pp.68-81, CQ出版社, 東京, 1990.
- [6] “Reliable Multicast Transport Protocol,” INTERNET-DRAFT, draft-shiroshita-rmtsp-spec-01, 1997
- [7] D. Rubenstein, S. Kaser, D. Towsley, and J. Kurose, “Improving Reliable Multicast Using Active Parity Encoding Services (APES),” Proc. IEEE INFOCOM, Vol. 3, pp. 1248-1255, 1999.