

非定常な衛星-地上系における同報通信システム特性の検討

笠原 禎也[†] 中谷 俊文^{†*} 趙 輝^{†**} 佐藤 亨[†]

Study on Performance of Point-to-Multipoint Communication Systems over Nonstationary Satellite-Terrestrial Links

Yoshiya KASAHARA[†], Toshifumi NAKATANI^{†*}, Hui ZHAO^{†**}, and Toru SATO[†]

あらまし. 筆者らは, 送信路が衛星回線, 帰還路が地上計算機ネットワークというシステムにおける衛星同報通信ハイブリッド ARQ プロトコルの提案を行ってきた. 本論文では, 各受信局の誤り率や往復遅延時間がそれぞれ異なる場合や帰還路で受信応答パケットの消失が生ずる場合のプロトコルの特性をシミュレーションを使って評価する. 更にパケットの消失によって, あるフレームに関する受信応答が一定時間返らなければ, そのフレームを再送する(タイムアウト) 必要が出てくる. このタイムアウト値が, 往復伝送遅延時間に対してどの程度にするのが適切か検討を加える. 最後に, 送信路の状態が非定常な場合に, 受信局においてビット誤り率を逐次推定する方法を検討し, この推定誤り率をもとに, 適応的にプロトコルのマルチコピー化を導入することで, 平均伝送遅延が改善できることを示す.

キーワード 衛星同報通信, ハイブリッド ARQ, タイムアウト, 非定常ネットワーク, マルチコピー

1. まえがき

近年, WWW をはじめとした画像・音声等の大量データの分散型データベースの需要増大と, 地域性に依存しないネットワーク環境への要求から, 計算機ネットワークは衛星回線と地上回線が混在したものになりつつある. 特に, 広範な地域に存在する多数の利用者に大量データを同時配信するには, 地上回線よりも衛星回線を用いた同報通信が有効であると考えられる.

このような広域の衛星同報通信を将来的に一般家庭に拡大することを想定すると, アンテナのサイズはできるだけ小さい地球局, つまり現在実用化されている VSAT (Very Small Aperture Terminal) より更に小さい USAT (Ultra Small Aperture Terminal) の普及が見込まれる. 現在の衛星 (BS) 放送受信に用いられるアンテナサイズになれば, アンテナの設置コストや大量生産に伴う生産コストの大幅な低減が期待できる一方, 降雨による C/N 比低下の-margin が非常に狭い状態での稼働が要求されるため, 効率の良い誤り

制御プロトコルが必要となる. またこのようなシステムでは, 大量データを伝送する往路は衛星回線, 受信応答用の帰還路は地上系ネットワークを利用するのが効率的であろう. 以上のことから, 筆者らは降雨により C/N 比が低下した状態になってもなおかつ高い伝送効率を持続できるハイブリッド ARQ 同報通信プロトコルを提案し, 計算機シミュレーションによりその性能を検証してきた [5], [6].

現在, インターネットにおいて同報通信を実現する方法としては, 多少のデータ消失や誤り発生は許容しつつリアルタイム性を重視した放送型の Multicast Backbone (MBone) [1] と, 逆に蓄積された画像・音声等のファイルを少々の伝送遅延は許容しながら誤りなく受信側に送る応答確認型の Multicast Transport Protocol (MTP) [2] が知られている. 応答確認型的手法としては, 更なるデータ伝送の信頼性向上と実用上の問題点を克服するため, Reliable Multicast Transfer Protocol (RMTP) の開発が複数のグループによって行われているほか [3], [4], MFTP 等の実用製品も存在する.

本論文で提案するプロトコルも応答確認型の同報通信方式である. 通信機能の階層的にはトランスポートレイヤとしての実装を想定しているが, データの再送

[†] 京都大学大学院情報学研究所, 京都市
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto, 606-8501 Japan

* 松下電器産業株式会社

** NTT 移動通信網株式会社

時に後に詳述する level の概念に従ったデータ加工をする点で、上で示した RMTTP や 1 対 1 通信に使われる TCP 等と大きく異なる。これは初めから降雨による C/N 比低下のマージンを見込んで誤り訂正機能を付加するのではなく、状況に応じた再送法によって訂正機能を強化する方式を用いていることによる。

文献 [5], [6] では各受信局の往復遅延時間はすべて一定であり、帰還路を介して送られる受信応答の packets には、消失も遅延も生じないという仮定のもとに理論値計算およびシミュレーションを行ってきた。それは他の衛星通信プロトコルの研究 [7]~[9] においても同様である。しかしながら、筆者らが帰還路として想定している地上系ネットワークではサイト間の遅延時間はその物理的距離や伝送速度によって変化し、また地上ネットワークの過負荷 (トラフィックに対する回線容量の不足) 等により packets の消失が生じる。packet 消失が生じる場合にプロトコルが正常動作するためには、ある一定時間受信応答がなければ同じフレームを再送する機能 (タイムアウト) を設定する必要がある。本論文では、往路と帰還路の特性が異なる衛星-地上系ネットワークにおいて、各受信局におけるビット誤り率や受信応答の遅延時間が局ごとに異なる場合や、応答 packet の消失等を考慮したときの、提案プロトコルの特性を評価し、特性の改善法を検討する。また、現実のデータ伝送においては、降雨状況によって通信路の状態は時間的に変化する。そこで、

刻々と変化する受信局でのビット誤り率の推定法を検討し、誤り率の変化に即応して最適なデータ送信が行えるプロトコルの提案と、その性能評価をする。

2. Selective-Repeat ハイブリッド ARQ プロトコル

本プロトコルは TypeII ハイブリッド ARQ プロトコルを改善し、更に同報通信に適応させたものである [5]。また再送には Selective-Repeat 方式を用いている。提案する衛星同報通信 Selective-Repeat ハイブリッド ARQ プロトコルの構成を図 1 に示す。図中、Outer code (C0) は誤り検出のみを行う (1024, 1000) BCH 符号 (4 ビット誤り検出)、Inner code (C1) は誤り訂正のみを行う (7, 4) BCH 符号 (1 ビット誤り訂正) を用いる。また Interleaver はバースト誤りのランダム化に用いる。

図において、まず最初の送信はデータを C0 で符号化し、フレーム番号等のヘッダを付けたフレームとして順次送信する (level 0)。このフレームは送信プロセスのバッファにいったん記憶される。一方、受信局側では、まず受信した level 0 のフレームを C0 で復号化し、誤りが検出されなければ送信側に ACK を返し、データを上位層プロトコルに渡す。誤りが検出されれば NACK を返してそのフレームを記憶する。

送信プロセスは、ある level 0 のフレームについての NACK を受け取ると、該当フレームをインターリー

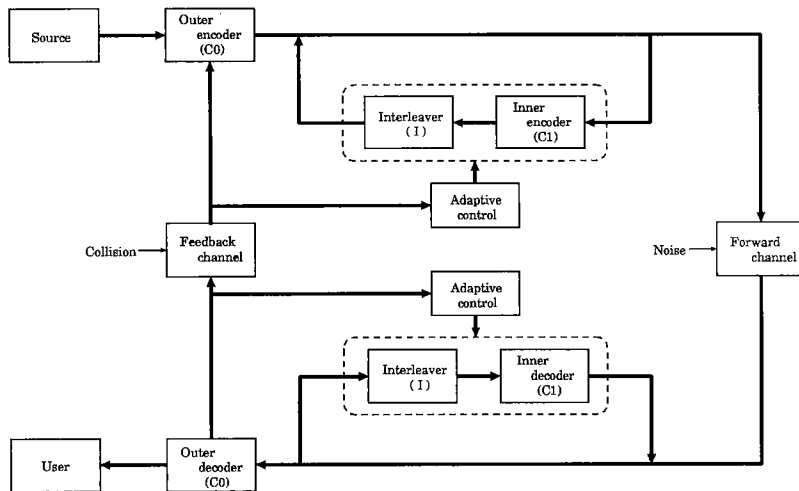


図 1 提案プロトコルの構成図
Fig.1 Block diagram of the proposed protocol.

プシ C1 で符号化した検査ビットのみを送る (level 1). NACK を返した受信プロセスでは level 1 のフレームと記憶しておいた level 0 のフレームとを合わせて A 誤り訂正を行い, ACK/NACK を返す.

level 1 のフレームに対して NACK が返ると, 送信プロセスは 2 回目の再送として, level 0, 1 の両フレームを合わせて更にインタリーブし C1 で符号化した検査ビットのみを送る (level 2). これに対して, 受信プロセス側は level 0~2 のすべてを合わせて誤り訂正を行い, ACK/NACK を返す.

送信プロセスは NACK を受け取る限り, level 0~2 のフレームを受信局が誤りなく受信を行うまで繰り返し送り続け, 全受信プロセスからの受信応答が ACK になると該当フレームをバッファから棄却する. 以上の提案プロトコルの流れ図および各 level のフレームの構成内容を図 2 および図 3 にまとめる.

この提案プロトコルと過去に提案されたプロトコルを理論計算により比較した. 比較対象としては無限容量の受信バッファをもつ同報通信用 Selective-Repeat ARQ である Ideal Multicast Selective-Repeat プロトコル (以下, IMSR と略記) と蓄積処理と MDS 符号-GMD 復号を用いた榊原, 笠原のプロトコル [9] (以下, MDS-GMD と略記) を用いた. 従来の MTP のプロトコルは, 往路に衛星回線を利用する場合には本質的に

は IMSR に帰着すると考えられる. 計算では IMSR, MDS-GMD とともにフレーム長は 1,024 ビットとした. また MDS-GMD で使用する符号は 16 元の MDS 符号, 再送を行うのは一つの受信局からの NACK が 2 個蓄積したときとする.

図 4 (a) にビット誤り率を変化させたときの伝送効率を示す. 受信局数は 10 とした. ここで, 伝送効率は情報ビットを全受信局に正しく送るまでに要した送信ビット総数に対する情報ビット数の割合と定義し, データ伝送の開始および終了時に発生するオーバーヘッドは考慮しないものとする. 提案プロトコルは 10^{-3} 付近と 10^{-2} 付近で誤り訂正の効果により IMSR と比べて非常に高い伝送効率を示す. また MDS-GMD に対しては全体的には劣るものの, その差は最大でも 0.2 程度で, 特に 10^{-3} 付近では提案プロトコルのほうが伝送効率が高くなっている.

ビット誤り率の変化に対する平均伝送遅延を図 4 (b) に示す. 縦軸の伝送遅延はフレーム単位 (1,024 ビット/フレーム) に換算してある. 受信局数は 10, 往復遅延は 3 フレームとした. 提案プロトコルは, IMSR に対しては伝送効率と同様, ビット誤り率の高い領域で特性が大きく改善している. また MDS-GMD と比較すると, 非常にビット誤り率が高い 10^{-2} 以上の領域では劣るものの, 全体的には提案プロトコルのほうが遅延が小さく, 10^{-5} 付近のビット誤り率の低い領域では MDS-GMD の 1/4 程度となっている. これは MDS-GMD が NACK を蓄積し, すぐには再送を行わない方式であるためである.

以上より, 提案プロトコルは IMSR に対しては効率, 遅延特性ともに優れていることがわかる. また

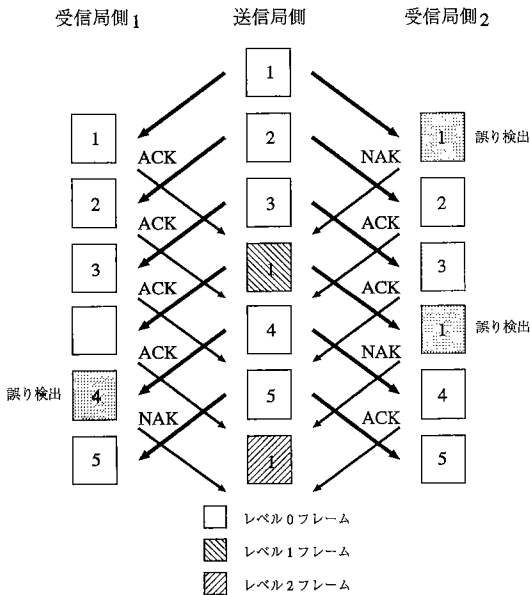


図 2 提案プロトコルの流れ図

Fig. 2 Time-sequence of the proposed protocol.

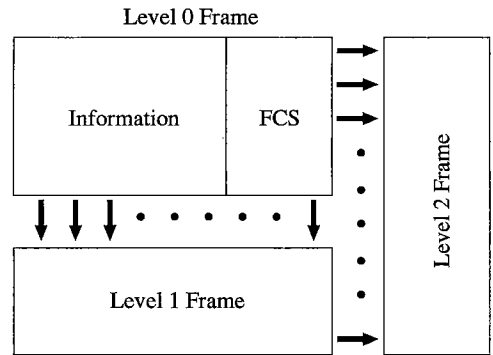
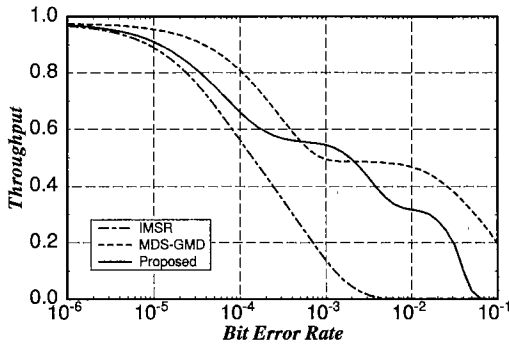
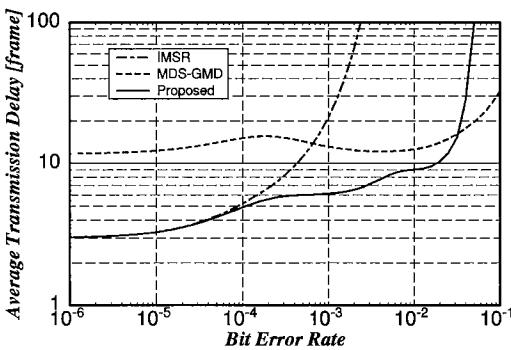


図 3 各 level フレーム構成のインタリーブと符号化

Fig. 3 Interleaving and encoding of a frame at each level.



(a) Throughput versus BER.



(b) Average transmission delay versus BER.

図4 各プロトコルの特性

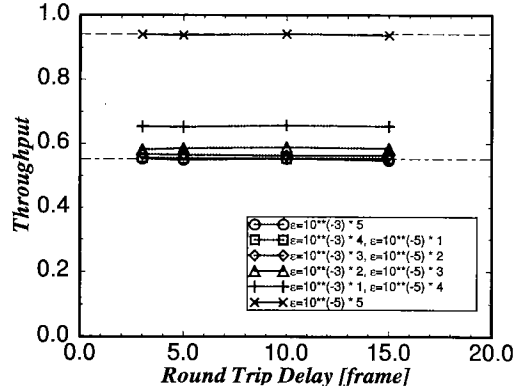
Fig. 4 Comparison of performances of different protocols.

MDS-GMD に対しては効率ではやや劣るものの遅延特性が非常に優れていることがわかる。遅延が小さいということはインタラクティブな通信において非常に重要な要素であり、この点で提案プロトコルは優れたプロトコルであると言える。

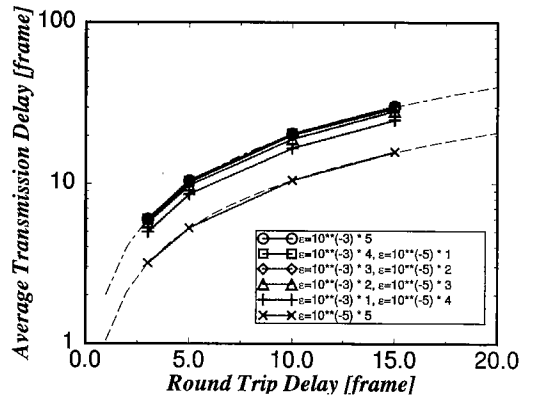
3. 各受信局の特性が異なるときの性能評価

3.1 ビット誤り率が異なる場合

ビット誤り率が各受信局によって異なる場合の性能評価をシミュレーションにて行った。図5にその結果を示す。横軸は往復遅延、縦軸は (a) 伝送効率および (b) 平均伝送遅延である。受信局数は5とし、各シンボルを付けた曲線がそれぞれ、ビット誤り率が 10^{-3} と 10^{-5} の受信局の数の割合を1局ずつ変化させたものである。また図中の一点鎖線と破線はそれぞれ、すべての受信局のビット誤り率が 10^{-3} 、および 10^{-5} としたときの理論値である。伝送効率は送信ビット数に対する情報ビット数の割合なので、往復遅延の変化に



(a) Throughput versus round trip delay.



(b) Average transmission delay versus round trip delay.

図5 各受信局におけるビット誤り率が異なる場合の特性

Fig. 5 Performance when BER is different for each receiver.

影響を受けないが、平均伝送遅延は往復遅延が大きくなるにつれ大きくなっている。また、伝送効率、平均伝送遅延ともに、ビット誤り率が高い受信局が一つでもあると、系全体がビット誤り率が高い受信局の特性に支配されるかたちで大きく劣化することがわかる。

3.2 往復遅延時間が異なる場合

本研究では、受信局からの受信応答を返す帰還路に地上系ネットワークを想定している。送信路の衛星回線の遅延時間が、送・受信局の物理的距離によらずほぼ 240 ms でほぼ一定なのに対し、地上回線においてはトラフィックの増減等のさまざまな要因により大きく変化する。実際に筆者らが、京都大学より国内の主な WWW サーバ 405 サイトに対してパケットを送ってその平均往復遅延時間の分布を調べたところ、大半は 200 ms (片道で約 100 ms) 以内であるものの、大き

いものは 1,500 ms (片道で 750 ms) 程度と衛星回線の 3 倍以上にもなることが明らかになった [10].

そこで、各受信局で往復遅延時間が異なるときの提案プロトコルの性能評価をシミュレーションにて行った。図 6 にその結果を示す。横軸はビット誤り率、縦軸は (a) 伝送効率および、(b) 平均伝送遅延である。受信局数は 5 とし、各シンボルを付けた曲線はそれぞれ、往復遅延が 16 フレームと 25 フレームの受信局の数の割合を 1 局ずつ変化させたものである。(a) 中の一点鎖線は理論値を示すが、伝送効率は往復遅延の影響を受けないので、すべての場合で理論値と一致している。また (b) 中の破線および一点鎖線は全受信局の往復遅延が 16 フレームおよび 25 フレームの場合の理論値である。これより、ビット誤り率が高いと再送が頻繁に起こるために往復遅延の大きな受信局の影響が比較的小さくなるが、ビット誤り率が低く再送があまり発生しない状況下では、往復遅延の大きな受信局が 1 局あるだけで、系全体の平均伝送遅延が大きく劣化するこ

とがわかる。

4. 帰還路の packets 消失を考慮したプロトコルの特性解析

4.1 再送タイムアウト

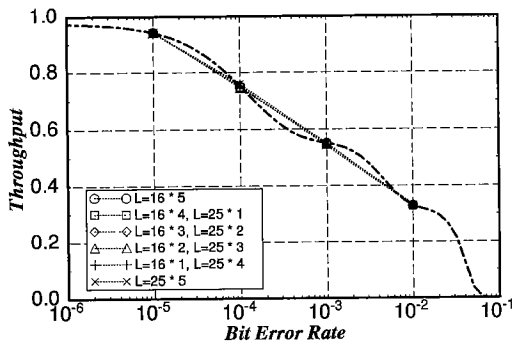
前節では、帰還路における受信応答の遅延時間のみを問題にしたが、実際には受信応答 packets が消失する場合もありうる [10]。原因としてはネットワークの過負荷によるノードでのバッファあふれ等が考えられるが、提案プロトコルは送信したフレームに対して必ず受信応答が返ってくるコネクション型であるため帰還路で packets の消失が生じると、消えた受信応答を送信局が待ち続け、プロトコルが正常に動作しない。そこで適切なタイムアウト値を設定し、あるフレームに対する受信応答がタイムアウト値以内にはないときは該当フレームを再送する機能を加えた。以下では最適なタイムアウト値を検討する。

さまざまなタイムアウト値を設定したときの伝送効率および平均伝送遅延をシミュレーションで求めた結果を図 7 に示す。図中のシンボル ○ は packets 消失率が比較的大きい場合 (ビット誤り率 1×10^{-5} , packets 消失率 2×10^{-1}), □ はビット誤り率が比較的大きい場合 (ビット誤り率 1×10^{-3} , packets 消失率 5×10^{-2}) の結果である。受信局数は 5 で、全受信局について往復遅延は全受信局 16 フレーム、ビット誤り率と packets 消失率も同一としている。(a) よりタイムアウト値を往復遅延以上にすると、伝送効率はほぼ一定になるが、それ以下にすると特性が大きく劣化する。この特性劣化は、受信応答が返る前にタイムアウトが生じるためである。また平均伝送遅延は、(b) より、タイムアウト値に対し単調増加の傾向があるが、ビット誤り率が比較的大きい場合には、タイムアウト値が往復遅延数より大きい部分でほぼ一定となっている。これはタイムアウトが発生する前に NACK が返ってきて再送が発生しやすくなるためと考えられる。これより、タイムアウトフレーム数は最大の往復遅延以上かつできるだけ小さく設定するのが適切であると言える。

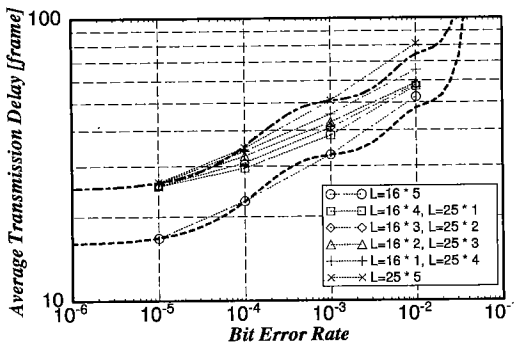
4.2 プロトコル特性のビット誤り率/packets 消失率依存性

送信路のビット誤り率と帰還路の packets 消失率はともにプロトコルの特性に大きく影響を与えることが明らかになった。本節では、両者がプロトコルの特性に及ぼす影響について、定量的に考察する。

送信フレームの平均フレーム誤り率を P_{ber} , 受信

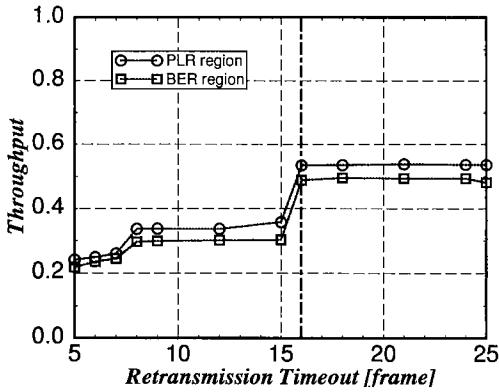


(a) Throughput versus BER.

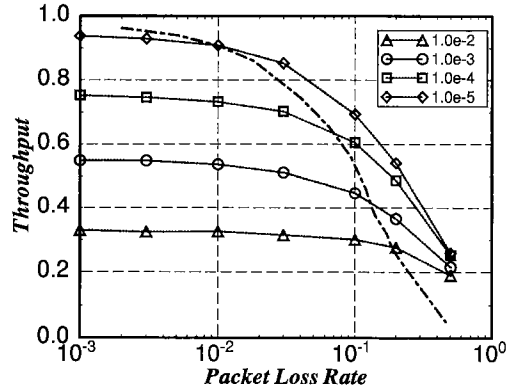


(b) Average transmission delay versus BER.

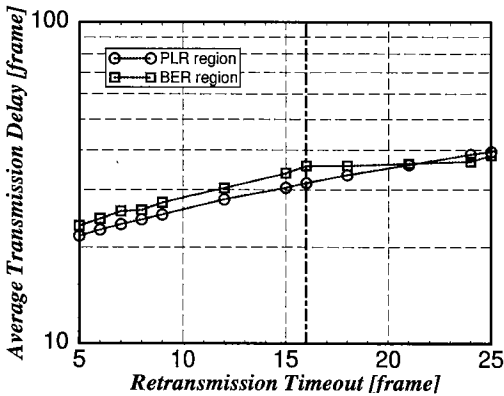
図 6 往復遅延時間が各受信局で異なる場合の特性
Fig. 6 Performance when the round trip delay is different for each receiver.



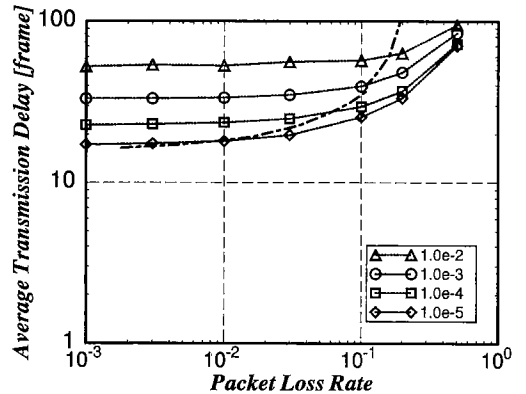
(a) Throughput versus retransmission timeout.



(a) Throughput versus packet loss rate.



(b) Average transmission delay versus retransmission timeout.



(b) Average transmission delay versus packet loss rate.

図7 さまざまなタイムアウト値による特性の変化 (PLR: パケット消失率が大, BER: ビット誤り率が大)
Fig.7 Performance versus retransmission timeout (PLR: Packet loss rate is dominant; BER: BER is dominant).

図8 ビット誤り率/パケット消失率依存性
Fig.8 Dependence of performance on BER and packet loss rate.

応答の平均パケット消失率を P_{plr} と定義する。ここで、伝送効率に対する送信路のビット誤りと帰還路のパケット消失の影響は、平均フレーム誤り率と平均パケット消失率が等しいとき、すなわち、

$$P_{ber} = P_{plr} \quad (1)$$

のときに等しくなると考えられる。一方、平均伝送遅延は、フレーム誤り率と往復遅延 L の積、およびパケット消失率とタイムアウト値 T の積に依存する。すなわち、

$$P_{ber} \cdot L = P_{plr} \cdot T \quad (2)$$

となったとき、両者の影響が等しくなると考えられる。

こうして計算した境界線と、シミュレーションの結果を示す。図8(a)は伝送効率のパケット消失率に対する変化である。往復遅延を16フレーム、再送タイムアウト値を18フレーム、受信局数を5とした。各シンボルはビット誤り率を $10^{-5} \sim 10^{-2}$ と変化させたシミュレーション結果、一点鎖線は式(1)で与えられる境界線である。図から、境界線よりも左側、すなわちパケット消失率が小さい領域では伝送効率はビット誤り率に依存し、逆に右側の領域では、パケット消失率に依存するためにビット誤り率にかかわらず伝送効率がほぼ同じ値に近づくことがわかる。同様に、図8(b)は縦軸を平均伝送遅延にした図である。一点鎖線は(2)式で与えられる境界線である。これより境界線より左側の領域ではビット誤り率、右側ではパケット消失率により特性が支配されることがわかる。

以上、パケット消失率の増大はプロトコルの特性を大きく劣化させることが明らかになった。改善法としては受信応答の複数化により等価的にパケット消失率を低下させる等が考えられる。

5. 送信路が非定常な場合のプロトコルの特性改善

前章までは通信路の状態が定常的であるとしてきたが、実際の通信路の状態は時間的に変化する。本章では、非定常状態におけるプロトコルの特性を考察し、送信路のビット誤り率の時間変化に対応した特性改善を行ったマルチコピー SR ハイブリッド ARQ プロトコル（以下、マルチコピープロトコルと呼ぶ）を提案する。

5.1 ビット誤り率の推定

通信路の状態変化をモニタするためには、各受信プロセスにおいてビット誤り率を逐次推定することが必要となる。以下にその方法を述べる。

ビット誤りが発生したことを 1、発生しなかった場合を 0 で表す時系列を $x(i)$ とし、1 の発生確率すなわちビット誤り率を ε とする。この $x(i)$ の分散は、ビット列の長さ Λ が十分長いとして、

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{\sum_{k=1}^{\Lambda} (x(k) - \bar{x})^2}{\Lambda} = \frac{\sum_{k=1}^{\Lambda} x(k)^2}{\Lambda} - \bar{x}^2 \\ &= \frac{\varepsilon \cdot \Lambda}{\Lambda} - \varepsilon^2 \simeq \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

となり、 ε とほぼ同等であることがわかる。

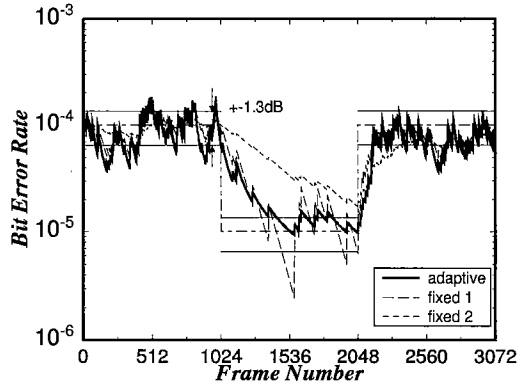
この $x(i)$ に 1 次の再帰型フィルタをかけることによって ε の推定を行う。このときの推定値および標準偏差は、

$$y_{rf}(i) = (1 - \beta)y_{rf}(i - 1) + \beta x(i) \quad (4)$$

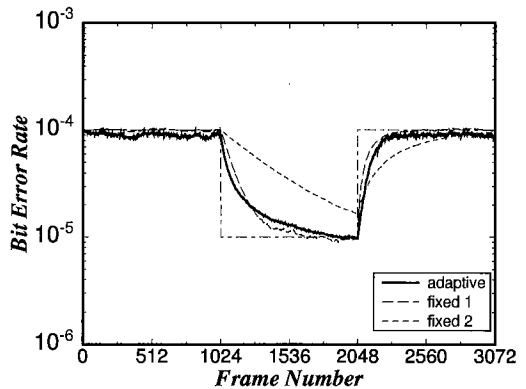
$$\sigma_{rf} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \{\beta(1 - \beta)^{k-1}\sigma\}^2} = \sqrt{\frac{\beta}{2 - \beta}}\sigma \quad (5)$$

となる。式 (3), (5) より σ_{rf} は ε の平方根に比例するが、 ε の値は対数的に変化するため β の値によっては $y_{rf}(i)$ の安定性が非常に悪くなる。そこで、 β を ε によって適応的に変化させる。ここで $\beta = \varepsilon/4$ とすると、 $\sigma_{rf} \approx 0.35\varepsilon$ となり、 $y_{rf}(i)$ は ε の $\pm 1.3\text{dB}$ におさえられることがわかる。但し、実際には ε の値はわからないので代わりに $y_{rf}(i - 1)$ を用いる。

ビット誤り率の推定の様子を図 9 に示す。(a) はある系列に対するビット誤り率の推定値で、(b) は 200 系



(a) Estimated BER for one time series.



(b) Average of estimated BER for 200 time series.

図 9 適応再帰型フィルタによる推定ビット誤り率
Fig.9 Estimated BER using adaptive recursive filter.

列の推定値の平均である。実際の ε の値は 1~1,024, 2,049~3,072 フレームでは 10^{-4} 、1,025~2,048 フレームでは 10^{-5} と変化させているのに対し、推定値は 1 フレーム (1,024 ビット) に 1 回求めている。実線が適応再帰型フィルタの推定値で (a) より $\pm 1.3\text{dB}$ にほぼおさまっていることがわかる。また長破線は ε が 10^{-4} 、短破線は 10^{-5} のときにそれぞれ実線と分散が同等になるように β を固定したときの推定値である。(a) より長破線の推定値はビット誤り率が低い $\varepsilon = 10^{-5}$ 付近で安定が悪く、逆に短破線は (b) より即応性が悪いことがわかる。

5.2 過渡特性の改善

つぎに、適応再帰型フィルタの定常特性を変化させずに、過渡特性を更に改善するため、以下のようなアルゴリズムを導入した。まず、 ε が減少する場合、時系列において 0 の続く長さが長くなる。この長さの情

報を用いてアルゴリズムを改善する。ビット誤り率が $2/\Delta_{z1}$ のとき 0 が Δ_{z1} ビット続く確率は、

$$\left(1 - \frac{2}{\Delta_{z1}}\right)^{\Delta_{z1}} \simeq e^{-2} = 0.135 \quad (6)$$

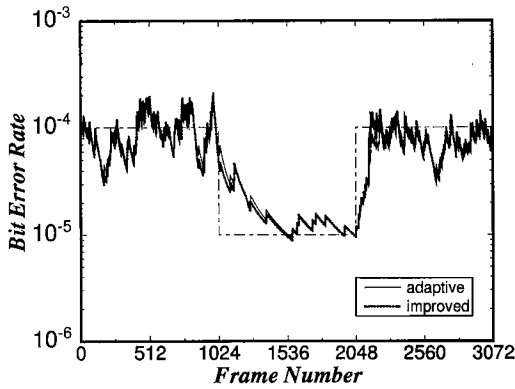
となる。従って Δ_{z1} からビット誤り率は、

$$y_{z1}(i) = 1 - 0.135^{1/\Delta_{z1}} \quad (7)$$

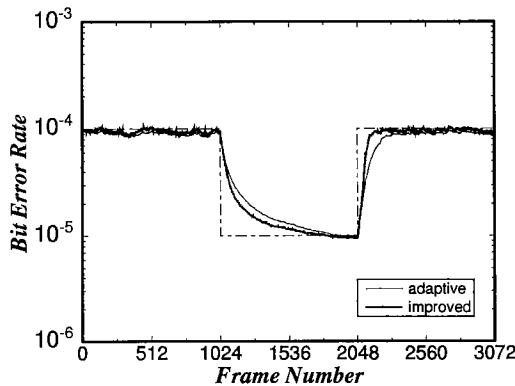
と推定される。 $y_{z1}(i)$ が $y_{rf}(i)$ より小さい場合には $y_{z1}(i)$ を推定値とする。

逆に ε が増加する場合、時系列で 1 の発生する頻度が高くなる。そこで、時系列 $x(i)$ に Δ 個の移動平均フィルタをかけたときの標準偏差が

$$\sigma_{mf} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\Delta} \left(\frac{\sigma}{\Delta}\right)^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{\Delta}} \quad (8)$$



(a) Estimated BER for one time series.



(b) Average of estimated BER for 200 time series.

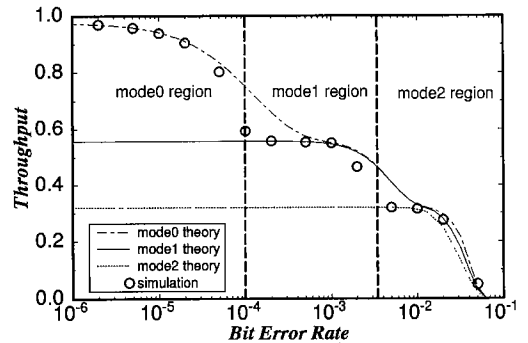
図 10 改良適応再帰型フィルタによる推定ビット誤り率
Fig. 10 Estimated BER using the improved adaptive recursive filter.

であることを考慮すると、前述の適応再帰型と同程度の分散をもつ移動平均フィルタは $\Delta = 8/\varepsilon$ として求められる。この過去 Δ ビットの時系列のうち 1 であるビット数の期待値は 8 ビットである。そこで、ある 1 のビットから九つ前の 1 のビットまでの時系列の長さを Δ_{s1} ビットとし、

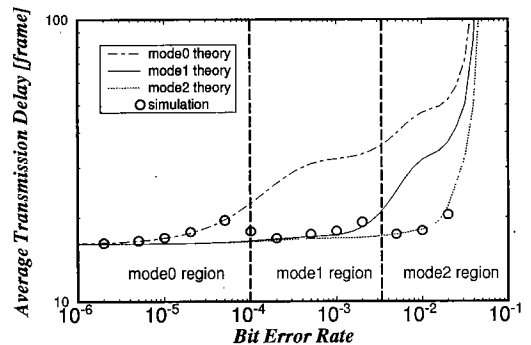
$$y_{s1}(i) = \frac{8}{\Delta_{s1}} \quad (9)$$

を求める。この $y_{s1}(i)$ が $y_{s1}(i-1)$ より増加しており、かつ $y_{rf}(i)$ より大きい場合には $y_{s1}(i)$ を推定値に採用する。以上の改善を行ったアルゴリズムを改良適応再帰型フィルタと呼ぶことにする。

このフィルタによるビット誤り率の推定値の結果を図 10 に示す。実線が改善後、一点鎖線が改善前の結果である。(a) から分散には大きな影響は出ていない。即応性については (b) より、誤り率が減少する部分では $y_{z1}(i)$ の、誤り率が増加する部分では $y_{s1}(i)$ の効果で改善がみられる。



(a) Throughput versus BER.



(b) Average transmission delay versus BER.

図 11 マルチコピープロトコルの定常状態における特性
Fig. 11 Performance of the multicopy protocol in stationary state.

5.3 プロトコルのマルチコピー化

前節で述べた各受信局のビット誤り率をもとに、特性改善を行ったマルチコピープロトコルを提案する。これは送信モードを、ビット誤り率が b_1 以下では従来の方法 (mode 0), b_1 以上 b_2 以下では, level 0 と 1 を連続送信し, 次の再送時には level 2 を送るモード (mode 1), b_2 以上になると最初から level 0~2 を連続送信 (mode 2) するように, 送信フレームを適応的に変化させる方法である。

図 11 にマルチコピー化を行った場合のビット誤り率に対する (a) 伝送効率, (b) 平均伝送遅延特性を示す。但し, 受信局数は 5, 往復遅延は 16 フレーム, 帰還路の消失パケットは生じないとしている。ここでは, $b_1 = 1.0 \times 10^{-4}$, $b_2 = 3.3 \times 10^{-3}$ を採用した。図中のシンボルがシミュレーションの結果, 一点鎖線, 実線, 破線はそれぞれ mode 0~2 のみを用いた場合の理論曲線である。図から, 提案するマルチコピープロトコルは, 伝送効率および平均伝送遅延はともに各モードの包絡線の特性を示し, 伝送効率を落すことなく平均伝送遅延の特性を改善できていることがわかる。

6. む す び

本論文では, 送信路が衛星回線, 帰還路が地上計算機ネットワークというシステムにおける衛星同報通信ハイブリッド ARQ プロトコルの特性評価を行った。まず, 各受信局の誤り率や往復遅延時間が異なる場合の特性評価を行い, いちばん状態が悪い受信局の特性にプロトコルの性能が支配されることを示した。更に帰還路のパケットの消失を考慮したときのプロトコルの特性評価を行った。つぎに, パケットの消失や受信応答が非常に遅いときにフレームを再送するための最適な再送タイムアウト値について議論した。最後に送信路の状態が非定常な場合に対応するための, 受信局におけるビット誤り率の逐次推定法について検討し, 誤り率の変化に応じたプロトコルのマルチコピー化による平均伝送遅延の改善を行った。実装に向けての具体化やコスト面の評価等については, 今後の課題として検討を続けていきたい。

文 献

- [1] H. Eriksson, "MBONE: The Multicast Backbone," *Communications of the ACM*, vol.37, no.8, pp.54-60, Aug. 1994.
- [2] S. Armstrong, A. Freier, and K. Marzullo, "Multicast Transport Protocol," RFC1301, Feb. 1992.
- [3] S. Paul, K.K. Sabnani, J.C. Lin, and S. Bhattacharyya,

"Reliable Multicast Transport Protocol (RMTP)," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.15, no.3, pp.407-421, April 1997.

- [4] 城下輝治, 高橋 修, 山下正秀, 山内長承, 串田高章, "高信頼マルチキャスト通信プロトコル (RMTP) の各種ネットワークへの適用性," *信学技法*, SSE95-196, IN95-140, pp.137-144, 1996.
- [5] H. Zhao, T. Sato, and I. Kimura, "A hybrid-ARQ protocol with adaptive rate error control," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E76-A, no.12, pp.2095-2101, Dec. 1993.
- [6] 趙 輝, 中谷俊文, 笠原禎也, 佐藤 亨, 木村磐根, "VSAT を用いた衛星同報通信の実験検討," *平 7 信学総大会*, B-232, 1995.
- [7] S.R. Chandran and S. Lin, "Selective-Repeat-ARQ Schemes for Broadcast Links," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-40, pp.12-19, Jan. 1992.
- [8] 小松雅治, 林田行雄, 樹下三行, "反復伝送を用いたハイブリッド Go-back-N ARQ 方式のトラフィック解析," *信学論 (B-II)*, vol.J76-B-II, no.4, 215-224, April 1993.
- [9] 榎原勝己, 笠原正雄, "MDS 符号を用いた同報通信用誤り制御方式のスループット特性," *信学論 (B-I)*, vol.J77-B-I, no.6, pp.445-452, June 1994.
- [10] 中谷俊文, 趙 輝, 笠原禎也, 佐藤 亨, 木村磐根, "ハイブリッド ARQ 方式による衛星-地上系同報通信プロトコルの検討," *信学技報*, SAT95-70, CS95-126, pp.67-72, 1995.

(平成 9 年 10 月 29 日受付, 10 年 1 月 16 日再受付)



笠原 禎也 (正員)

平元京大・工・電気第二卒。平 3 同大学院修士課程了。現在, 京大・情報学・通信情報システム助手。宇宙空間中のプラズマ波動の伝搬, 波動-粒子相互作用の研究, 衛星通信プロトコルの研究に従事。工博, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 米国地球物

理学会連合各会員。



中谷 俊文 (正員)

平 6 京大・工・電気第二卒。平 8 同大学院修士課程了。在学中は衛星通信プロトコルの研究に従事。現在, 松下電器産業 (株) 勤務。



趙 輝 (正員)

昭57 哈尔滨工大卒。昭63 上海科学技术大学大学院修士課程了。同年～平2 中国航空宇宙産業省上海無線設備研究所研究員。平7 京大大学院博士課程了。在学中は衛星通信プロトコルの研究に従事。現在、NTTドコモ(株)勤務。工博。平7年本会 PAACS Friendship 賞受賞。



佐藤 亨 (正員)

昭51 京大・工・電気第二卒。昭53 同大大学院修士課程了。昭56 同博士課程研究指導認定退学。現在、京大・情報学・通信情報システム教授。レーダによる大気、降雨、スペースデブリの観測、地下探査レーダの信号処理、衛星通信プロトコルの研究に従事。工博。昭61 地球電磁気・地球惑星圏学会田中館賞受賞。航空宇宙学会、IEEE、地球電磁気・地球惑星圏学会各会員。