

衛星を用いた同報通信プロトコルの考察

松尾一紀 滝塚孝志 小野欽司
(国際電信電話株式会社 研究所)

1. はじめに

データ通信に衛星回線を利用すると高速伝送が可能¹⁾他、衛星の放送性を利用した同報通信が実現できる。同報通信を行う場合、地上局数が増加する度に各リンクの伝送誤りの影響が加算され、送りたい情報をすべての地上局に送信するのに要する時間が長くなる²⁾ことが予想されるため、³⁾衛星を用いた同報通信に適した誤り制御法の検討が必要である。

衛星回線の誤り制御方式としては既に誤り訂正符号 (Forward Error Correction) が実用化されており、⁴⁾回線を高品質にすることができるが、誤り訂正符号で訂正できる誤りは限られており、データ通信で要求される信頼度を達成するためには、誤った情報を再送して回復する方式と併用することが必要である。⁵⁾

再送手順としては、ISOのHDLC (High Level Data Link Control)⁶⁾がある。しかし、衛星回線は伝送遅延が大きく、再送を要求したり再送するのに長い時間がかかるため、通信効率(スループット)が大きく低下するので、衛星回線の特性を考慮した誤り回復手順を採用することが重要である。特に同報通信の場合、無駄な再送を抑え、なおかつ早期に誤り情報フレームを回復させる制御が必要である。また、衛星同報通信においては、同じ情報フレームが重複して受信されることは不可避であり、重複受信についての対策をプロトコル上に実現しなければならない。

本稿では再送要求に新しい応答フレームを用いた誤り制御方式を提案した。本方式は高い通信効率⁷⁾が得られ、Point-to-Pointの通信から容易にPoint-to-

Multipointの同報型の通信に拡張することが可能で、地上局数が増加しても通信効率⁸⁾は余り低下しないという特長を持っている。

2. HDLCの誤り制御

HDLC手順は、通信回線上でのフレーム化された情報の転送手順を規定している。効果的な誤り回復を行うためのオプションとしてRejectフレーム (REJ) または Selective Reject フレーム (SREJ) の使用を許している。従って、HDLC手順での誤り回復の手段としては次の3方式が考えられる。

(i) REJ方式は、CCITT勧告 X.25, X.75で採用されている方式で、受信した情報フレームに誤りを検出すると、REJフレームにより、その情報フレーム以降の順序番号をもつすべての情報フレームの再送を要求する方式である。この様子を図1の(a)に示す。この方式は、情報フレームが連続して誤る場合に有利であり、制御が簡単である点に特長がある。

(ii) SREJ方式では、受信した情報フレームに誤りを検出すると、誤った情報フレームのみをSREJフレームで再送要求し、誤った情報フレームの後に到着する誤りのない情報フレームは受信側で蓄積しておく。この様子を図1の(b)に示す。この方式は無駄な再送がなくREJ方式より高い通信効率⁹⁾が得られる反面、制御が複雑になり、情報フレームを蓄積しておくための大きなバッファも必要となる。図2の(a)

にフレームフォーマットを示す。

(iii) SREJ-REJ方式では、単一の誤り情報フレームはSREJフレームにより、連続した誤り情報フレーム及び再送待ちの状態を検出した誤り情報フレームはREJフレームにより再送が要求される。^{[5][6]} 通信効率を向上させるため、連続した誤り情報フレームに対してのみREJフレームにより再送を要求する方式も提案されている。^[7]

これらの3方式の通信効率を比較すると、SREJ方式、SREJ-REJ方式、REJ方式の順に高い通信効率を達成できる。しかし、最も高い通信効率を得られるSREJ方式にしても、その制御の複雑さを補うほど通信効率は改善されない。

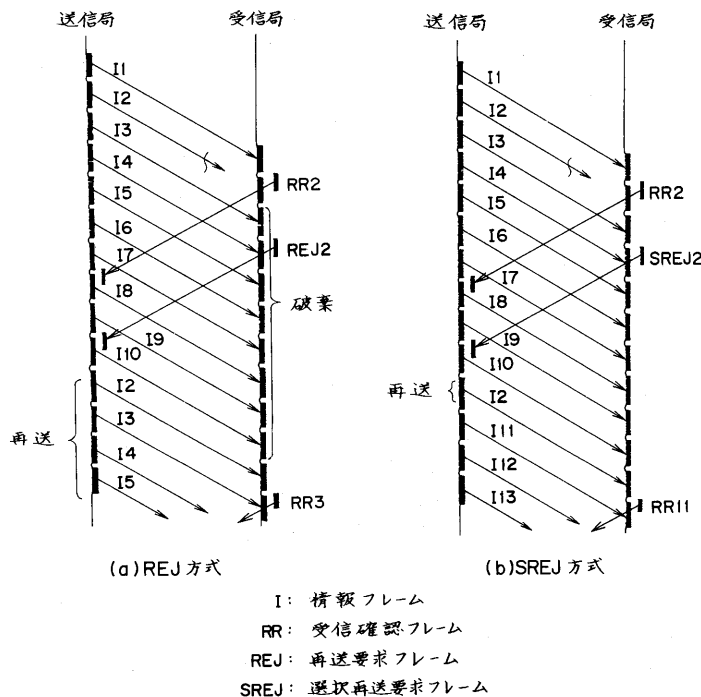


図1. HDLCの誤り制御

3. 応答フレームによる再送要求方式

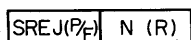
3.1 応答フレーム

SREJフレームを使って再送要求する場合、SREJフレームの受信順序番号 $N(R)$ が $N(R)-1$ より若い番号をもつ全ての情報フレームに対する受信確認と、 $N(R)$ と同じ番号を持つ情報フレームに対する再送要求という2つの意味をもつ。そのため、番号 $N(R)$ をもつ情報フレームが回復するまでは、それ以降の情報フレームで誤りを検出しても、誤りを検出した情報フレームに対するSREJフレームを送出することができない。

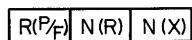
この $N(R)$ の意味の制約から1往復遅延時間内にもかたが1個の誤った情報フレームしか再送できない。従って、1往復遅延時間内に複数の情報フレームが誤りを受けるような伝送品質の悪い回線では、回復されない情報フレームが累積して通信が停滞する。^[8] より高い通信効率を達成するためには、SREJフレームを複数個送出的ように改良を加える必要性が指摘されている。^{[9][10]}

SREJに代る新しい再送要求信号として応答フレームを導入した(図2の(b))。このフレームでは、受信確認の意味をもつ $N(R)$ 番号と再送を要求する情報フレームの番号 $N(X)$ を分離して伝えることができるため、誤り回復を待たずとも複数個の再送要求フレーム(応答フレーム)を送出可能である。

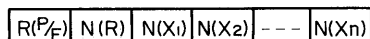
いつでも再送要求フレームを出せる場合には、送信側に同じ情報フレームに対する再送要求が複数個届く可能性があり、以下に述べ



(a) SREJ フレーム



(b) 応答フレーム



(c) チェックポインティング用の応答フレーム

N(R): 受信シーケンス番号

N(X): 選択再送要求シーケンス番号

図 2. 新しい再送要求フレーム

るような、情報フレームを重複して再送することに対する考慮が必要である。

HDLCCにおいて情報フレームの送信順序番号N(S)はモジュロ表現でつけられるため、同じN(S)の値をもっていても、実際にはN(S)+moduleの可能性がある。HDLCC手順では、送信側での最大アウトスタンディングフレーム数Kを、 $K \leq \text{module} - 1$ に設定するように規制している。

ところが、SREJ方式や本方式のように受信する順序番号に歯ぬけの状態を許すとき、この規制だけでは情報フレームを受信しても、それが期待していたものなのか、それとも既に受信済で重複して受信されたものなのか判断することができない。この問題の解決策として次の2つの方法が採られている。

(i) 重複受信がおこらないように送信側で制御する方式^[4]:

受信側から再送要求フレームを受信した場合、当該情報フレームを既に再送しているかどうかを調べ、再送を行っていない場合に限り再送を行う。受信側から受信確認が返らずタイムアウト条件が発生した場合には、チェックポインティングにより受信側の状態を調べ、受信側が当該フレームを受信していないことを確認したうえで再送を行う。

(ii) 重複受信しても、受信側でそのことを認識できるようにする方式^[6]:

最大アウトスタンディングフレーム数Kを送信順序番号のモジュロの半分以下に抑えておけば、同じ情報フレームを重複受信しても、受信側の判断によりその情報フレームを破棄することができる。従って、送信側

では重複受信について危惧することなく、受信側から要求があれば即座に当該フレームを送信することができる。

後者の方式は重複受信が不可避の同報通信に適し、高い通信効率を得られることが予想され、SETRAN方式^[1]のように受信確認が返ってこない情報フレームを連続して再送できるといったプロトコルの柔軟性をもっている。しかし、後者の方式では、前者の方式の半分の最大アウトスタンディングフレーム数しか使用できないという欠点がある。

3.2 チェックポインティング用の応答フレーム

新しい再送要求フレームを用いた場合、ある程度の効率の改善が見られるが、別の要因により効率の向上が抑えられる。

再送した情報フレームが再び誤った場合や、再送要求フレームが誤った場合に、送信側がそのことを認識するまでには長い時間がかかるため、最大アウトスタンディングフレーム数Kの制限により伝送が一時的に停滞する。この問題を解決するために、送信側ではチェックポインティング機能を用いて定期的に受信側の状態を調べ、^[12] 受信側で届いていない全ての情報フレームの番号を伝えることができるようにす

ればよい。チェックポイントニングの応答に用いる再送要求フレーム（応答フレーム）を図2の(C)のように機能拡張した。

受信側で再送要求時にタイマーをかけて、一定時間内に再送されて来ない場合に再び再送要求フレームを送出する方式もある。^{[10][13]} しかしこの方式は、受信側の処理が複雑になり、同報通信には適さない。

これらの改良を加えた応答フレームによる再送要求方式の通信シーケンス

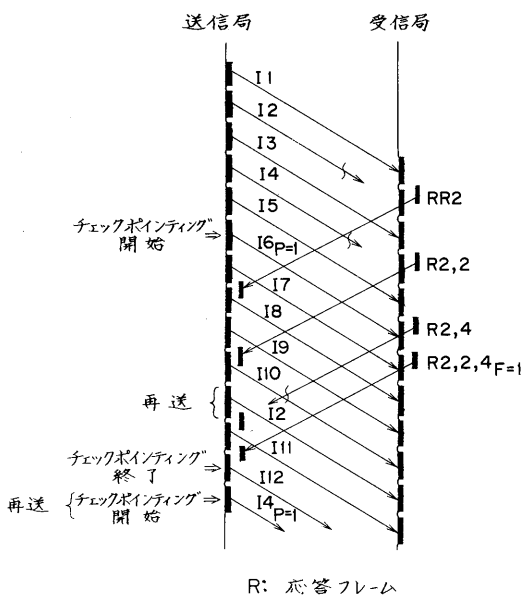


図3. 応答フレームを用いた再送シーケンス

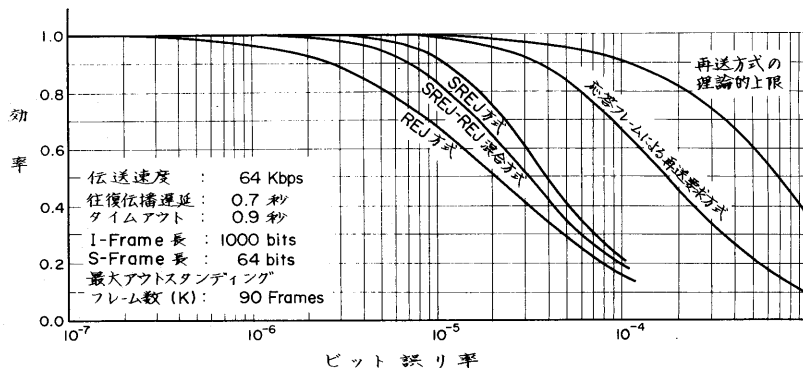


図4. 再送方式と効率

を図3に示し、その通信効率を従来のREJ方式、SREJ方式、SREJ-REJ方式の効率とともに図4に示す。計算機シミュレーションでは、伝送速度を64 kbps、往復伝播遅延を0.7秒、タイマー値を0.9秒、情報フレーム(I-Frame)長を1000ビット、監視フレーム(S-Frame)長を64ビット、最大アウトスタンディングフレーム数Kを往復伝播遅延の2倍分90にした。

この新しい応答フレームを用いると、伝送品質の悪い領域(ビット誤り率が $1 \times 10^{-5} \sim 10^{-4}$)において通信効率が改善されることがわかる。

3.3 誤り訂正符号 (FEC)

衛星回線では多くの場合、誤り訂正符号(FEC)を使用しているため、各種再送方式の比較を行う際、FECの影響を考慮する必要がある。

FECは大きく分類して、ブロック符号と畳込み符号に分けられる。^[2] ブロック符号はTDMA回線で使用されており、フレームを単位とした誤りの伝播確率は小さい。

一方、畳込み符号の場合、訂正能力以上の伝送誤りの影響が数拘束長に及び、フレームが連続して誤る確率が大きくなる。^[14]従って、畳込み符号を採用しているSCPC (Single Channel Per Carrier) 回線では、1往復遅延時間内に1個のフレームしか回復できない

SREJ方式は通信効率が低下してしまう。

SCPC回線で実際に使われている符号化率7/8の自己直交畳込み符号(拘束長384ビット中の2誤り訂正)を用いた場合

の効率比較を図5に示す。応答フレームを用いた誤り制御方式は、フレームが連続して誤る傾向をもつ畳込み符号と併用する場合にも高い通信効率を達成できる。

4. 同報通信

受信側から再送要求が個別に送られてくる同報通信では、送信側が全受信局からの応答が揃うのを待って(同期形)再送動作を開始すると、再送要求フレームの誤り等により通信効率が低下する恐れがある。そこで本稿では全受信局からの応答を待ち合せずに(非同期形)、個々の再送要求に対し有効無効を判断し、有効な再送要求の場合には即座に再送を行う方法について検討する。その際、受信側の動作はできるだけPoint-to-Point通信の場合と同じになるように配慮する。

送信側では複数の受信局を相手にするので、その状態変数はPoint-to-Point通信とは若干異なってくる。送信側の状態変数WE (lowest window edge: 送達確認が行われていない最も若い順序番号) は、個々の受信局に対する状態変数を WE_i ($i=[1, n]$, n は受信局数) とする

$$WE = \min(WE_1, WE_2, \dots, WE_n)$$

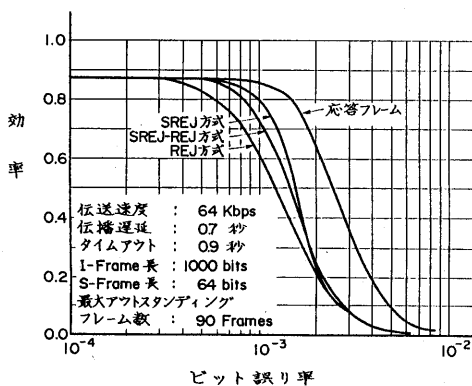


図5. 畳込み符号使用時の効率 (符号化率 7/8 FEC)

である必要がある。個々の受信局がある順序番号をもったフレームに対して送達確認を送って来たかどうかを表わす論理数配列BAを用いて、WEは次のように計算できる。

(同報通信時の状態変数WEの算法)

n : const := the_number_of_receivers;

M : const := modulo;

type V is new integer range 0..M;

WE : V := 0;

WEI : array (1..n) of V := (others => 0);

BA : array (1..M) of boolean array (1..n) := (others => (others => false));

N(R) : V; i : integer range 1..n;

/* when N(R) is arrived from ith called Station */

while WEI[i] $\neq$ N(R) loop

BA[WEI[i]][i] := true;

if BA[WEI[i]] = (others => true) then

WE := (WE + 1) mod M;

BA[WEI[i]] := (others => false);

end if

WE[i] := (WE[i] + 1) mod M;

end loop

本章では、REJ方式、SREJ方式、SREJ-REJ方式、新しい応答フレームによる再送要求方式の順に同報通信時の誤り回復手順を検討していくことにする。

4.1 REJフレームによる同報通信手順

ある受信局から届いたREJにより即座に再送を開始した場合、別の受信局からその後到着するREJにより再び再送してしまうことがないようにしなければならない。ACKフレームを

用いたStop-and-waitブロック転送方式の同報通信に対し、ブロックの識別子として選択ビット(Alternative bit)を使用することが提案されている。^[1]この選択ビットを、全受信局からの応答が揃うのを待たずに再送を開始するREJ同報通信に適用する場合について考える。

送信側と受信側に選択ビット状態変数AS, ARを持たせ、フレームを送信する際その選択ビットAにASまたはARの値をセットする。リンク設定時にはAS, ARともに0にセットする。

送信側では、REJ受信により新たに再送を開始する毎にASを反転させる。受信側では期待するN(S)をもつ情報フレームを受け取った時、及びチェックポインティングによりP=1のフレームを受け取った時、受信したフレームのもつ選択ビットの値をARにセットする。

上記の処理を行うことにより、送信側がREJを受信した時そのREJがもつ選択ビットの値が現在のASの値と等しい場合は有効であり、等しくない場合は無効であると判断できる。選択ビットを使用したシーケンス例を図6に示す。

REJフレームや再送を開始した先頭のフレームが誤った場合、回復を行う手段としてチェックポインティングは不可欠の機能である。受信局がP=1のフレームを受け取った時点で再送待ちであると、将来届く予定の情報フレームの順序番号に対し再送要求を送出する可能性がある。この再送要求を無効と判断するため、チェックポインティングを行う時には、送信側でP=1をセットした時点のN(S)値を状態変数NSPとしてもち、F=1のREJフレームを受け

取ったとき、そのN(R)がNSP値より小さい場合のみ有効にする処理を加える必要がある。

全受信局の応答が揃うのを待たずに再送を開始するため、いかなるN(R)をもつREJに対しても、再送はWEから行う。このことにより、無駄な情報フレームを再送する可能性はあるが、応答が揃うのを待つ方式と比較すれば効率性は向上することが期待される。

4.2 SREJフレームによる同報通信手順

Point-to-Point通信でSREJ方式を採用した場合、一時点では高々1個の情報フレームが再送されるだけであるので、送信側はどのフレームを再送したか、受信側はどのフレームが再送により届く可能性があるかを記憶するためにそれぞれ1つの状態変数があれば充分である。しかし同報通信では、送信側が複数のフレームを再送することがあるのは勿論、N(R)の意味による制約から新たなSREJフレームを送出できない状態の受信局でも、他の受信局

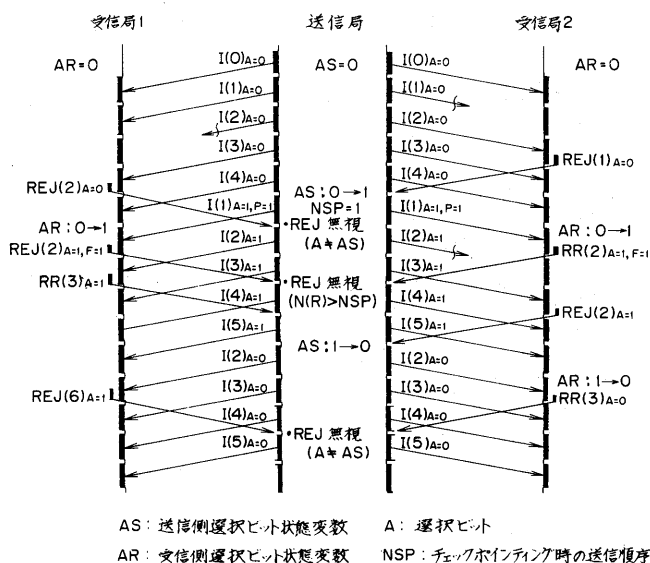


図6 REJ方式の同報通信シーケンス

の送出した SREJ により再送されたフレームを受け取り、誤りを回復出来る機会が生じて来る。従って送信側と受信側は、それぞれ再送中のフレームの順序番号や再送待ちのフレームの順序番号を表現するための配列またはリストをその状態変数としてもたせることにする。

SREJ 方式でも再送要求に対し即座に再送を行うが、再送を行ったフレームの送信順序番号 $N(S)$ を記憶しておくことにより、再送後到着する他の地上局からの同じ情報フレームに対する再送要求を無視することが出来る。

REJ 方式と同様にチェックポイント機能は、SREJ 方式にとっても不可欠である。チェックポイントングを効果的に行うため、送信側は別の状態変数を用意し、 $P=1$ のフレームを送出後再送したフレームの順序番号を記憶しておく。F=1 の SREJ フレームで再送要求される情報フレームが既に再送済であっても、チェックポイントング期間中に再送していなけ

れば、再送フレームが誤ったと判断して、その情報フレームを再び送る。SREJ による同報通信のシーケンス例を図7に示す。

SREJ フレームによる同報通信の場合、他局の再送要求により、必要な情報フレームが偶然届く可能性があるため、アウトスタンディングフレーム数 K をモジュロの半分以下に設定し、送られてきたフレームが重複しているかどうか判断する必要がある。

4.3 SREJ, REJ フレームによる同報通信手順

SREJ-REJ 混合方式は Point-to-Point の場合には、REJ フレームと SREJ フレームを併用した誤り回復手順として容易に実現される。しかし、全受信局の応答が揃うのを待たずに再送を開始する同報通信では、REJ 手順では選択ビットが必要となり、SREJ 手順では最大アウトスタンディングフレーム数 K をモジュロの半分以下にすることが必要である。従って、両者を併用すると、この2つの条件を使用せねばならない。

更に、無駄な再送をなくするためには、各情報フレームに SREJ により再送されたフレームであるかどうかを示すフラグを付け、受信側で将来届く情報フレームに対する REJ フレームの送出を抑制するようにしなければならない。

4.4 応答フレームによる同報通信手順

応答フレーム方式では、Point-to-Point 通信の場合でも送信側に複数の情報フレームに対する再送要求信号が届き、受信側も一時点で複数の情報

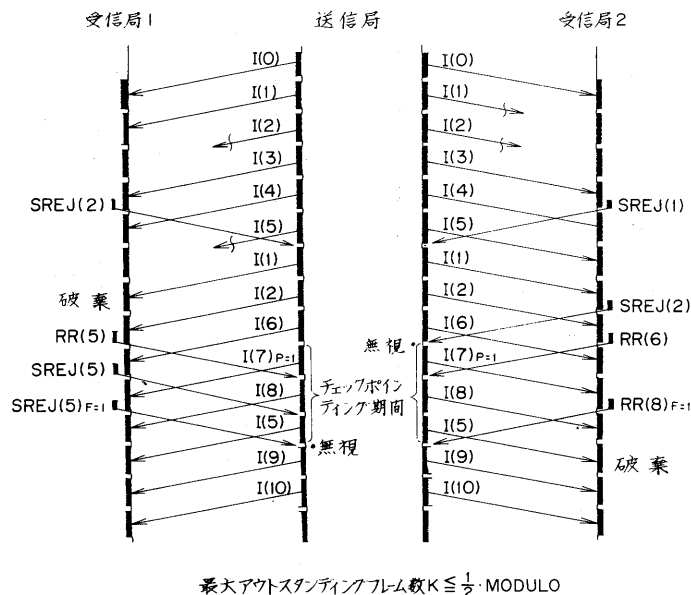


図7 SREJ 方式の同報通信シーケンス

フレームの再送待ちになることがある。従って、応答フレーム同報通信手順は Point-to-Point の手順と殆ど同じである。

送信側及び受信側がもたねばならない状態変数は SREJ 方式による同報通信手順と同じで、再送したフレームの順序番号や再送待ちのフレームの順序番号を表現したリストと、チェックポインティング期間中に再送したフレームのリストである。最大アウトスタンディングフレーム数 K はモジュロの半分以下でなければならない。

SREJ 方式と異なる点は、再送要求のフレーム形式(図2参照)が異なるため、送信側では1つの再送要求フレーム(応答フレーム)に対し、複数の SREJ が届いたのと同じ処理をすることであり、受信側では複数の連続した誤りを検出したとき、またはチェックポインティングにより受信状態の問合せを受けたとき複数の情報フレームに対し再送要求をすることである。

応答フレームを用いた Point-to-Point 通信と同報通信の相違は、送信側の状態変数 WE (lowest window edge) の計算法が変わること、再送したフレームの順序番号を記憶する状態変数が必要になる点であり、受信側は全く同じ処理で済む。応答フレームを用いた同報通信のシーケンス例を図8に示す。

4.5 効率評価

前述の4つの同報通信手順に対し、計算機シミュレーションにより効率を評価した。衛星回線上のビット誤りはランダムと仮定し、設定したビット誤り率を上り回線と下り回線に等分した。各フレームは、上り回線で誤った時全受信局に誤って届くものとし、

上り回線で誤りなく届いたフレームに対してのみ各受信局毎に下り回線誤りを発生させ、両回線で誤らなかったフレームのみ正しく受信されるものとした。

データ通信速度の中で比較的高速な 64 Kbps を設定し、往復伝播遅延時間はノード内の処理時間も含めて1ホップ分 0.7 秒とした。応答フレーム使用時は、S-Frame 長は可変であるのでこの影響も考慮した。

図9に示されるように REJ 方式では、他方式に比べ局数の増加に伴う効率の低下が著しく、一般的に使用されるビット誤り率 1×10^{-7} 程度の範囲に於ても高効率が得られない。

SREJ 方式では、 NCR の意味の制約により SREJ フレームが送出できない場合でも、局数が増加すると他局の SREJ によって回復されるため、最大アウトスタンディングフレーム数の制約で情報フレームを送れなくなっている期間が短縮されることがある。

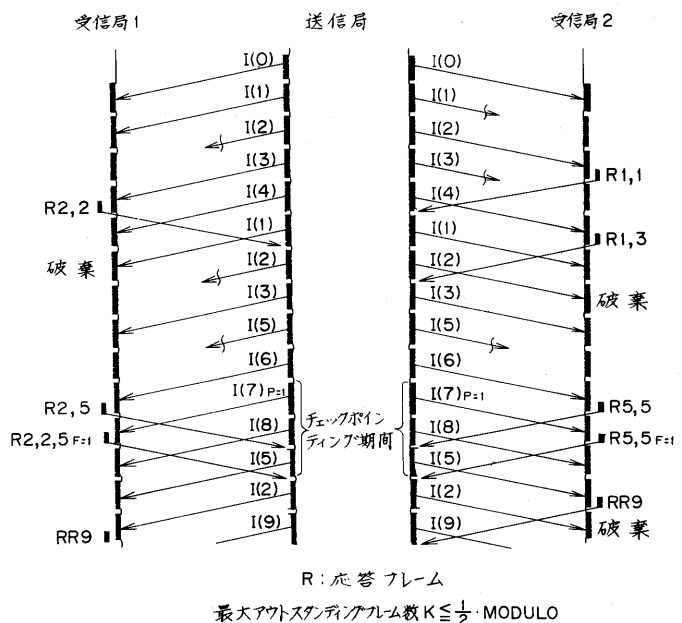


図8 応答フレーム方式の同報通信シーケンス

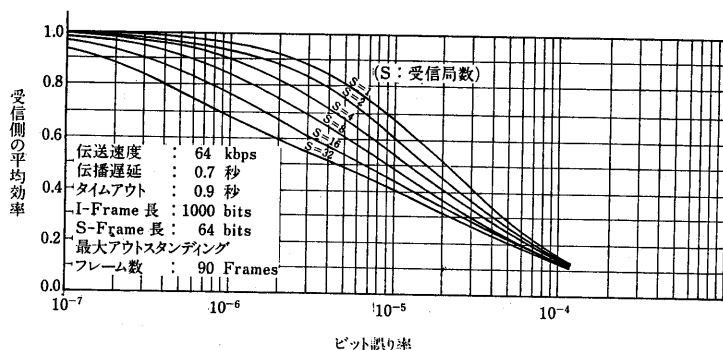


図.9 REJ 方式の同報通信の効率

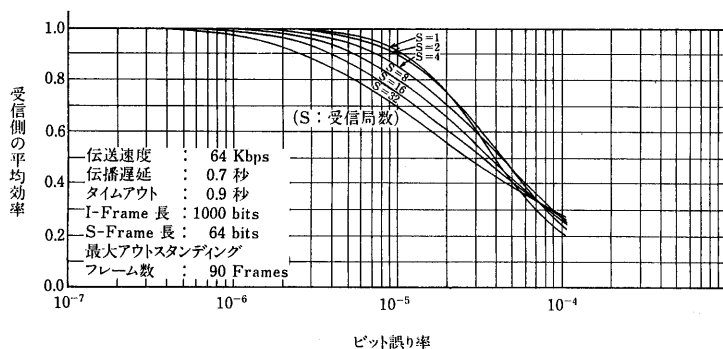


図.10 SREJ方式の同報通信の効率

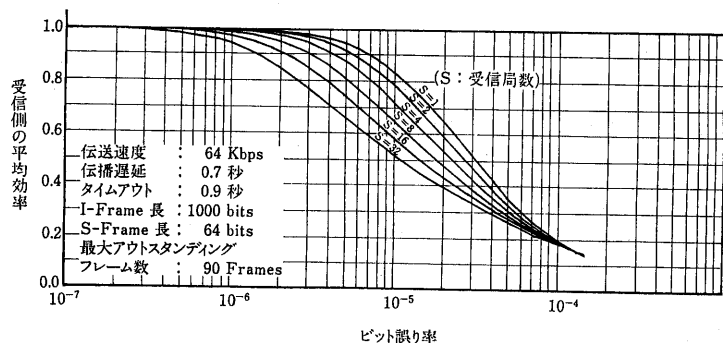


図.11 SREJ-REJ方式の同報通信の効率

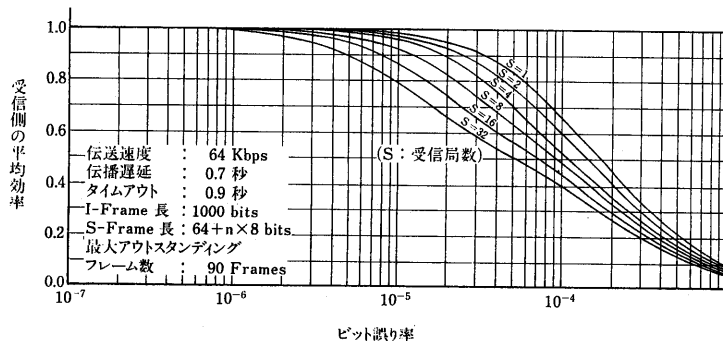


図.12 応答フレーム使用時の同報通信の効率

そのため図10に示すように、ビット誤り率が 6×10^{-5} 程度の極めてフレームが誤りやすい状態では、局数が増加するとかえって効率が改善されるという興味深い結果が得られた。

SREJ-REJ混合方式は、図11に示すようにSREJ方式とREJ方式の中間の効率となる。従って、フレームが連続して誤るような特殊な環境下でない限り、処理の複雑な本方式を採用する利点はないと思われる。

混合方式は、性質の大きく異なるSREJフレームとREJフレームを併用するため、非同期形の同報通信手順は極めて複雑になる。SREJ-REJ混合方式としては、SREJフレームに対してのみ非同期再送し、REJフレームに対しては全受信局の応答を待つて再送する同報通信手順⁽⁵⁾が現実的であろう。

応答フレーム方式は図12に示すように、他の3方式よりも全ての範囲で高い効率を達成できる。応答フレームはSREJ方式の欠点を取り除いたフレーム形式をもっているため、局数が多くなっても、SREJ方式より高い効率が得られるものと思われる。

5. おわりに

全受信局の応答が揃うのを待たずに再送を開始する非同期形同報通信にPoint-to-Point通信手順を拡張する場合、制御手順の変更の少なさは、応答フレーム方式、SREJ方式、REJ方式、SREJ-REJ混合方式の順である。同報通信における通信効率の点では応答フレームが最も優れている。

応答フレーム方式による同報通信のシミュレーション結果では、8つの地上局へ情報を伝送する場合、ビット誤り率が 1×10^{-4} のかなり伝送品質の悪い領域においても、すべての地上局への伝送に要する時間は1つの地上局へ伝送する場合と比べて1.4倍程度にしか増加しない。それぞれの地上局へ個別に伝送すると8倍の時間を要することを考えると、多量のデータを多宛先へ伝送する場合に有効な方式であると考えられる。

同報通信の効率を算出するため、同報通信時のフレーム誤り率を(くより回線誤り)+(く少なくとも1つの下り回線誤り)として1対1通信に換算する見かけ上のフレーム誤り率が提案されている。^[15]再送時には、誤りを検出した受信局にのみ正しく再送されれば良いため、1対1通信に換算したフレーム誤り率は小さくなる。そこで、これらの影響を考慮した同報通信効率の理論的導出法について今後検討する予定である。

最後に、日頃御指導を頂く鍛冶所長、寺村副所長、ならびに討論して頂いた情報処理研究室の関係各位に感謝する。

<参考文献>

- [1] S.B. CALO, M.C. EASTON: "A Broadcast Protocol for File Transfer to Multiple Sites", IEEE Trans. Comm., Vol. COM-29, No. 11, (1981-11).

- [2] 古賀, 安田, 村谷: "BCH符号と自己直交符号におけるビット誤り率改善特性", 信学論(B), 2, pp. 117-124 (昭54-2).
- [3] A.R.K. SASTRY: "Performance of Hybrid Error Control Schemes on Satellite Channels", IEEE Trans. Comm., Vol. COM-23, No. 7, (1975-7).
- [4] ISO 4335, Data Communication-High level data link control procedures-Consolidation of elements of procedures.
- [5] M.C. Easton: "Batch Throughput Efficiency of ADCCP/HDLC/SDLC Selective Reject Protocols", IEEE Trans. Comm., Vol. COM-28, No. 2, (1980-2).
- [6] 中島, 塩津, 高木, 神林, 佐藤: "衛星パケット交換方式", 信学技報, SE 80-106 (1980).
- [7] 井上, 森, 宮村, 加藤: "衛星回線を介した計算機間通信におけるHDLC手順の性能", 信学論(D), 昭和57-技14.
- [8] 松尾, 滝塚, 小野: "衛星回線における各種選択再送方式(SREJ)の性能評価", 信学技報, CS81-91, SE81-36 (1981).
- [9] ISO/TC97/SC6, N2071: "On the use of Selective Reject in HDLC".
- [10] 高橋, 安永: "衛星回線への適用を考慮したHDLC誤り制御プロトコル", 信学技報, CS81-9 (1981).
- [11] Shu Lin, Philip S. Yu: "An Effective Error Control Scheme for Satellite Communications", IEEE, ICC'79, pp. 41.5.1-41.5.6 (1979).
- [12] ECMA/TC24/81/31, "HDLC/CM, Elements of Procedure (Checkpoint Mode)", ISO/SC6, Berlin Meeting, 1981.
- [13] 森: "衛星回線への適用を考慮した改良選択再送方式の検討", 信学会部門別企大, No. 291, 昭和56年10月.
- [14] 松尾, 滝塚, 小野: "誤り訂正符号のHDLC通信効率に及ぼす影響について", 信学会総会企大, No. 1632, 昭和57年3月.
- [15] 井上, 川野, 加藤: "衛星回線を用いたデータ同報通信方式の一検討", 信学技報, EC81-4 (1981).