

## 衝突後予約移行形 (SRUC)

## 衛星パケット通信網の特性評価

准 員 石橋 豊† 正 員 田坂 修二†

Performance Evaluation of the Split Reservation  
Upon Collision (SRUC) Protocol for  
Satellite Packet Communication

Yutaka ISHIBASHI†, Associate Member and

Shuji TASAKA†, Regular Member

あらまし 衛星パケット通信網におけるアクセス方式の一つである SRUC 方式は、負荷の変動に適應する優れた方式である。しかし、これまでの特性解析においては、平均パケット遅延の上限しか求められておらず、又、その他の特性の詳細も明らかにされていない。本論文では、システムをマルコフ連鎖でモデル化し、平衡点解析の手法を用いることによって、SRUC 方式の特性を詳細に検討する。その結果、負荷に応じて最適なフレーム長が存在するが、フレーム長を最適値よりあまり小さくならないように選びさえすれば、その選択にそれ程注意を払う必要はないことが示される。このことをもとに、負荷に応じてフレーム長を可変にする可変長フレーム SRUC 方式を提案する。この方式の特性は、SRUC 方式において負荷に応じて最適なフレーム長を選択したときの特性に非常に近いものになることが示される。又、SRUC 方式と他の方式との比較を行った結果、SRUC 方式の特性は、マルチパケットメッセージの場合にも、負荷が軽いときにはスロット付アロハ方式、重いときには TDMA 予約チャネルを用いた予約方式の特性に近くなることが明らかにされる。

## 1. ま え が き

衛星パケット通信網におけるチャネルのアクセス方式としては、これまでに数多くの方式が提案されている<sup>(1)</sup>。これらのアクセス方式は、TDMA, FDMA等の固定割当て方式、純アロハ、スロット付アロハ等のランダムアクセス方式及び Roberts の予約方式、C-PODA 方式等の予約方式に大別される。このうち、システム内に多数の局が存在するという状況に適するアクセス方式は、軽負荷の場合はランダムアクセス方式、中程度から比較的高負荷の場合はアロハ形予約チャネルを用いた予約方式(以下、アロハ形予約方式と略す)、高負荷の場合には固定割当て方式とされている<sup>(1)</sup>。このように、軽負荷から高負荷まで全ての領域に対して優れたアクセス方式は存在しない。従って、

負荷の変動が大きい場合には、これらの方式を用いても十分な特性は得られない。これに対し、システムの負荷の変動に対して適應性のある方式もまた提案されており、最近多くの研究者によって注目されてきている。その代表的なものに、URN 方式<sup>(2)~(4)</sup>や本論文で検討する SRUC 方式<sup>(5)</sup>がある。これらの方式は、負荷の変動にプロトコル自身が適應するように設計されている。実際のシステムでは、ある程度の負荷の変動が見込まれるので、今後このような適應能力の備わった方式の重要性は増すものと思われる。

URN 方式では、送信待ちパケット数を推定することによって、パケット送信の成功の確率が最大となるように、チャネルへのアクセス権が局に与えられる。従って、衛星パケット通信網においては、伝搬遅延が大きくなるため、その推定誤差が大きくなり、URN 方式は必ずしも適さない。

一方、SRUC 方式は、何らの推定操作も必要とせず、衛星パケット通信網に適した方式である。この SRUC 方式に対しては、Borgonovo らによって、各

†名古屋工業大学工学部情報工学科, 名古屋市  
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of  
Technology, Nagoya-shi, 466 Japan  
論文番号: 昭 57 - 論 441[B-120]

局へのパケットの到着がポアソン分布に従うとして、その特性が一応求められている<sup>(6)</sup>。しかし、単一パケットメッセージに対する平均パケット遅延の上限が求められているにすぎず、システムの負荷が大きい場合には、その誤差が大きくなると考えられる。また、衛星パケット通信網特有の伝搬遅延の影響を明確に考慮に入れた解析がなされておらず、その他の特性の詳細も明らかにされていない。

本論文では、この SRUC 方式に対して、各局がマルチパケットメッセージを発生するという条件の下で、システムをマルコフ連鎖でモデル化し、平衡点解析の手法<sup>(6)~(8)</sup>を適用することによって、その特性を詳細に検討する。まず、2. でシステムのマルコフモデルを構成し、3. でそのモデルに平衡点解析を用いてスループット及び平均メッセージ遅延の理論式を求める。次に、4. でその理論式を用いて数値計算を行い、SRUC 方式の特性について考察する。その結果、文献(5)でも示されているように、負荷に応じて最適なフレーム長が存在することが示される。5. ではこのことをもとに、負荷に応じてフレーム長を可変にする可変長フレーム SRUC 方式を提案し、その特性について検討する。更に、6. では SRUC 方式と他の方式との比較を行う。

## 2. システムのモデル化

### 2.1 SRUC 方式の概要

SRUC 方式では、図1に示すように、スロット化された衛星チャンネルにおいて、一定数  $L$  個の大スロット (large slot) をまとめてフレーム (frame) が構成される。各大スロットは、パケット伝送用のデータスロット (data slot) と  $V$  個の小スロット (minislot) に分割されている。小スロットは1フレームに1個ずつ各局に固定的に割り当てられる。従って、全局数を  $M$  とすると、 $V$  は次式から決定される。

$$V = \lceil M/L \rceil \quad (1)$$

但し、 $\lceil x \rceil$  は  $x$  以上の最小の整数を表わす。これらの小スロットは、SI (Signalling Information) の伝送用として用いられる。SI はアロハ形予約方式

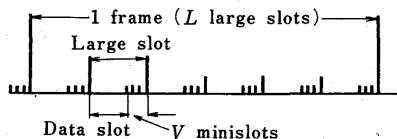


図1 SRUC方式におけるフレーム構成  
Fig.1-Frame structure of the SRUC system.

の予約パケット<sup>(9)</sup>に相当するものであり、自局にあるパケットの数に関する情報が含まれている。

データスロットは、予約されているか否かによって、予約状態 (reserved state) と競合状態 (contention state) とに分けられる。予約状態は、データスロットが予約されている状態をいい、競合状態は、予約されてなくパケットの送信の競合がなされる状態をいう。最初、データスロットは競合状態で使用され、各局はデータスロットにランダムアクセスするとともに、自局用小スロットに SI を送信する。この状態でパケットの衝突が検知され、それに対応する SI が受信されると、データスロットは予約状態に変わる。データスロットが予約状態のときには、送信すべきパケットを持つ局はランダムアクセスを行わず、自局用小スロットに SI を送信することによって予約を行う。そして、予約状態において予約されたパケットが全て処理されるまでデータスロットはこの状態に留まる。予約されたパケットが全て処理されると、データスロットは競合状態に戻る。本方式の動作原理の詳細については、文献(5)、(9)を参照されたい。

### 2.2 モデルの設定

システムをモデル化するために次の仮定を置く。

- (1) システムは  $M$  個の局を持つ。
- (2) 各局におけるメッセージの発生間隔は、平均  $1/\sigma$  データスロット長の幾何分布をする。
- (3) 各局は、一つのメッセージの伝送が完了するまでは、次のメッセージを発生しない<sup>†</sup>。
- (4) 一つのメッセージに含まれるパケット数は、平均  $1/r$  の幾何分布をする<sup>††</sup>。
- (5) 衛星チャンネルは、 $R$  データスロット長の round-trip 伝搬遅延を含む。
- (6) データスロットが競合状態にある場合には、一つのパケットを送信すると、そのパケットの成否が判明するまでは次のパケットの送信を行わない。成功が判明すると、直ちに次のパケットの送信にかかる<sup>†††</sup>。
- (7) パケットの誤りは、互いの衝突によってのみ起るものとし、他の誤りは無視する。又、SI の誤りはしないものとする。

上記のメッセージ発生確率  $\sigma$  と伝搬遅延  $R$  は、他の

<sup>†</sup> 文献(6)では、この制約はない。

<sup>††</sup> 文献(6)では、単一パケットメッセージしか扱っていない。

<sup>†††</sup> 成功を確認する前に、後続パケットを送信することも可能であるが、解析の簡単のため、この仮定を置く。これについては、6. で簡単に考察する。

方式<sup>(7),(8), (10)</sup>との比較を容易にするために、データスロット長を単位として定義されている。しかし、以上の仮定の下では、局の取り得る状態の変化は大スロット単位で起ると考えられる。そこで、これらの量を大スロット単位に換算すると、 $\sigma$ と $R$ は、それぞれ次式に示す量 $\alpha$ 、 $J$ で置き換えられる。

$$\alpha \triangleq (1 + V \cdot \eta) \sigma \quad (2)$$

$$J \triangleq \lceil R / (1 + V \cdot \eta) \rceil \quad (3)$$

但し、 $\eta$ は次式で与えられる。

$$\eta \triangleq (\text{小スロット長}) / (\text{データスロット長}) \quad (4)$$

以上の仮定の下で、システムのマルコフモデルを構成するために、局の取り得る状態を分類してみると、 $T, Q, B, PQ_i, PT_j$ モード (但し、 $1 \leq i \leq J+L-1, 1 \leq j \leq J$ ) という状態が考えられる。まず、 $T$ モードは、送信すべきメッセージがなく、大スロット当り確率 $\alpha$ でメッセージを発生しうる状態である。 $Q$ モードは、SIの採用によって予約が行われ、システム全体に共通の一つ存在する待ち行列<sup>(6)</sup>に加わっている状態である。また、 $B$ モードは、競合状態のデータスロットにおいて送信されたパケットの成功を確認したが、後続パケットがあり、それを送信しようとする状態である。 $PQ_{j+i}$ モード (但し、 $1 \leq i \leq L-1$ ) は、パケットを送信しようとしたデータスロットが予約状態であったか、又は競合状態のデータスロットでパケットの送信に失敗し、SIを送信するために自局用小スロットを待っている状態である。このモードにある局は、 $(i-1)$ 大スロット後にSIを送信できる。一方、 $PQ_i$ モード (但し、 $1 \leq i \leq J$ ) は、そのSIが受信されるのを待っている状態であり、伝搬遅延の影響を表わしている。 $PT_j$ モード (但し、 $1 \leq j \leq J$ ) は、競合状態のデータスロットでパケットの送信に成功し、その確認を待っている状態であり、やはり伝搬遅延の影響を表わしている。

このシステムでは、局がある大スロットでパケットを送信しようとするとき、その大スロットの位置と自局用小スロットを含む大スロットの位置の関係は、取りうる場合の数が多く複雑である。従って、これを正確にモデル化しようとするとき、モデルは非常に複雑なものとなる。そこで、局がパケットを送信しようとする大スロットから $i$ 大スロット (但し、 $0 \leq i \leq L-1$ ) 後に、自局用小スロットが確率 $1/L$ で現われるという近似を行う。このとき、上記の各モードの相互の関係は図2に示すようになる。

図2において、局がある大スロットで $T$ モードにあ

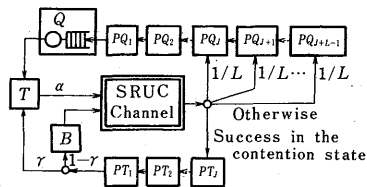


図2 SRUC方式の近似モデル  
Fig.2-An approximate model for the SRUC system.

ってメッセージを発生したとき、又は $B$ モードにあるとき、その局は、その大スロット内のデータスロットが予約状態であれば、パケットの送信を見送る。このとき、その大スロットから $i$ 大スロット (但し、 $0 \leq i \leq L-1$ ) 後の大スロットに、自局用小スロットがある場合 (確率 $1/L$ ) には $PQ_{j+i}$ モードに入る。そして、 $(i-1)$ 大スロット後にSIを送信し、その次の大スロットで $PQ_j$ モードに入る。但し、 $i=0$ の場合には、 $T$ 又は $B$ モードでSIを送信して、直ちに $PQ_j$ モードに入る。更に、 $J$ 大スロット後には $Q$ モードに入り、先着順にデータスロットを使用して、メッセージを送信する。送信完了すれば、 $T$ モードに入る。一方、データスロットが競合状態であれば、 $T$ モードにあってメッセージを発生した局と $B$ モードにある局は、直ちにパケットを送信する。その送信に失敗すると、予約状態のときと同じモード遷移が起る。成功すると、確率1で $PT_j$ モードに入る。そして、 $J$ 大スロット後に、後続パケットがある場合 (確率 $1-r$ ) には $B$ モードに、ない場合 (確率 $r$ ) には $T$ モードに入る。送信に成功した場合には、SIは送信されないか、又は送信されても受信時に棄却される。従って、この場合のSIの送受信動作は、局のモード遷移に影響を及ぼさない<sup>†</sup>。

### 3. 平衡点解析

図2において、 $Q, B, PQ_i, PT_j$ モード (但し、 $1 \leq i \leq J+L-1, 1 \leq j \leq J$ ) における局数をそれぞれ $m, l, m_i, l_j$ とすると、状態ベクトル $n \triangleq (m, l, m_i, l_j : 1 \leq i \leq J+L-1, 1 \leq j \leq J)$ は、大スロット毎に状態遷移が起きるマルコフ連鎖となる。これに平衡点解析の手法<sup>(6)~(8)</sup>を適用する。

まず、 $T$ モードにある局数 $n$ は次式で与えられる。

$$n = M - m - l - \sum_{i=1}^{J+L-1} m_i - \sum_{j=1}^J l_j \quad (5)$$

<sup>†</sup> パケットの送信に成功した場合にもSIを採用して後続パケットを送信すべきデータスロットを予約することも可能である。この場合も、同様にしてモデル化できる。このシステムを、単に、SIを採用するシステムと呼ぶ。

次に、ある大スロットでシステムが状態  $n$  にあるとき、競合状態のデータスロットでパケットの送信に成功する平均局数を  $s(n)$  とすると、 $B$  モードにある局数  $l$  は 0 か 1 のいずれかになることから、この  $s(n)$  は次式で与えられる。

$$s(n) = l(1-\alpha)^n + (1-l)n\alpha(1-\alpha)^{n-1} \quad (6)$$

また、 $Q$  モードに 1 個以上の局があるとき 1 となり、その他のとき 0 となる関数を考え、これを  $\zeta(n)$  と置く。このとき、各モードにおける平均増加局数を求めて 0 とおき、独立な式をまとめると次のようになる。

$$\zeta(n) r + r l_1 - n\alpha = 0 \quad (7)$$

$$m_{i+1} - m_i = 0, \quad (1 \leq i \leq J-1) \quad (8)$$

$$[n\alpha + l - \{1 - \zeta(n)\}s(n)] / L + m_{i+1} - m_i = 0 \quad (9)$$

$$(J \leq i \leq J+L-2)$$

$$[n\alpha + l - \{1 - \zeta(n)\}s(n)] / L - m_{J+L-1} = 0 \quad (10)$$

$$l_{j+1} - l_j = 0, \quad (1 \leq j \leq J-1) \quad (11)$$

$$\{1 - \zeta(n)\}s(n) - l_j = 0 \quad (12)$$

$$(1-r)l_1 - l = 0 \quad (13)$$

但し、式(9)、(10)、(12)における  $\{1 - \zeta(n)\}$  は、 $Q$  モードに少なくとも 1 個の局があるとき、すなわちデータスロットが予約状態にあるときには、ランダムアクセスによるパケット送信が行われないことを意味している。非線形連立方程式(5)~(13)の非負の実数解  $n_e \triangleq (m_e, l_e, m_{ei}, l_{ej})$  が平衡点である。この方程式を解くために、 $Q$  モードの待ち行列系を  $M/G/1$  形で近似し、 $m_e$  を  $m$  の平均値で置き換えると共に、 $\zeta(n_e)$  を  $Q$  モードに少なくとも 1 個の局がある確率  $\rho$  で近似する。すなわち、次のように置く。

$$m_e = \rho(2-r\rho) / \{2(1-\rho)\} \quad (14)$$

$$\zeta(n_e) = \rho \quad (15)$$

但し、式(14)は、ポラツェック・ヒンチンの平均値公式に、仮定(4)による幾何分布の変動係数  $\sqrt{1-r}$  を代入して得られたものである。式(5)~(15)より  $m_i, l_j, s(n), \zeta(n)$  を消去して整理すると、次式が得られる。

$$m = \rho(2-r\rho) / \{2(1-\rho)\} \quad (16)$$

$$n = \frac{r(M-m) + \{J(1-r) + 1 - (L+1)r/2\}\rho r}{r(1-\alpha) + (J+1)\alpha} \quad (17)$$

$$l = (1-r)(n\alpha - \rho r) / r \quad (18)$$

$$l(1-\alpha)^n + (1-l)n\alpha(1-\alpha)^{n-1} - (n\alpha - \rho r) / \{r(1-\rho)\} = 0 \quad (19)$$

但し、上式では、簡単のため平衡点を表す添字  $e$  は省略してある。明らかに上式は  $\rho$  に関して解くことができる。ここで、スループット  $S$  をチャンネルがパケットの伝送のために使用されている割合と定義すると、

これは、平衡点  $n_e$  においては次のように書ける。

$$S = \{\rho \cdot 1 + (1-\rho) \cdot s(n_e)\} / (1 + V \cdot \eta) \quad (20)$$

上式に式(2)、(6)、(19)を代入すると次式が得られる。

$$S = n_e \sigma / r \quad (21)$$

次に、平均メッセージ遅延  $D_m$  を、メッセージが発生してからその最後のパケットが正しく受信されるまでの平均時間をデータスロット単位で表現したものと定義する。これは、リトルの公式を用いると次式で与えられる。

$$D_m = M / (rS) - 1 / \sigma + \rho R + 1 \quad [\text{データスロット}] \quad (22)$$

上式の導出の詳細は、文献(9)を参照されたい。

#### 4. 数値例とシミュレーション

##### 4.1 スループット及び平均メッセージ遅延特性

前章で得られた理論式を用いて計算した数値例とそれに対する 5 万大スロット分のシミュレーション結果を図 3 に示す。これは、 $M=100, R=12, \eta=0.1, L=50$  とした場合の  $M\sigma$  に対するスループット及び平均メッセージ遅延を示したものである。図 3 において、スループット、平均メッセージ遅延ともに理論値とシミュレーション値は全般によく一致している。

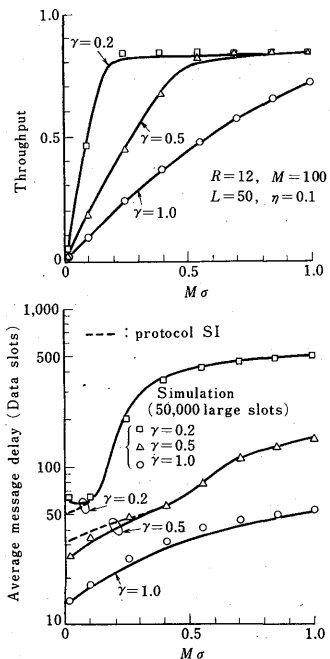


図 3 SRUC 方式のスループット及び平均メッセージ遅延特性  
Fig.3-Throughput and average message delay versus  $M\sigma$  for SRUC system.

表1 L, V及びJの関係 (M=100, R=12, η=0.1)

|   |     |    |    |    |    |    |    |    |    |       |    |       |       |       |       |       |       |       |     |
|---|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| L | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10,11 | 12 | 13,14 | 15,16 | 17~19 | 20~24 | 25~33 | 34~49 | 50~99 | 100 |
| V | 100 | 50 | 34 | 25 | 20 | 17 | 15 | 13 | 12 | 10    | 9  | 8     | 7     | 6     | 5     | 4     | 3     | 2     | 1   |
| J | 2   | 3  | 4  | 5  | 6  |    | 7  |    | 8  |       |    | 9     |       | 10    |       | 11    |       |       |     |

図3の平均メッセージ遅延特性において、 $\gamma = 0.2$ の場合に、 $M\sigma$ が小さいとき平均メッセージ遅延が一旦減少してから増加している。これは、負荷が非常に軽い場合にはメッセージ内のほとんど全てのパケットが競合状態のデータスロットで送信されることになり、負荷が少し重くなるとパケットの衝突が起り早く予約が行われることになるためである。すなわち、競合状態においては、仮定(6)より、一つのメッセージを構成するパケットの送信間隔が $(J+1)$ 大スロットになるのに対し、予約状態においてはパケットを連続して送信することができるからである。負荷が極めて軽い場合に平均メッセージ遅延が大きくなるという現象は、パケットのランダムアクセスに成功した場合にもSIを採用して予約を行うことによってなくすることができる。しかし、負荷が軽い場合にSIを採用することによって特性が改善されるのは、平均メッセージ長がある程度大きい場合であり、平均メッセージ長が小さくなるとフレーム長によっては、返って特性が劣化する。図3には、参考のため、SIを採用するシステム(protocol SI)の理論値を破線で示してある<sup>†</sup>。

更に、図3より、従来のアロハ形チャネルを用いたシステム<sup>(6)~(8)</sup>とは異なり、チャネルの不安定現象は現れず、システムの平衡点は唯一つだけ存在していることが分かる。このことは、本方式が負荷の変動に適応する本質的に安定な方式であることを示している。

4.2 フレーム長が特性に及ぼす影響

本方式におけるフレーム長が特性に及ぼす影響を明確にするために、 $M\sigma = 0.5$ の場合のLに対する平均メッセージ遅延を図4に示す。図4より、アロハ形予約方式<sup>(8)</sup>の場合と同じようなLの変化に伴う $D_m$ の不連続的变化が生じていることが分かる。これは、システムの動作を決定する $\alpha$ とJの値が、式(2)、(3)に示すようにVの値に依存しており、このVの値は、式(1)から決定されるのでLに対して不連続に変化することになるためである。M=100, R=12, η=0.1とした場合に、Lの各値に対するVとJの値を表1に示す。表1において、Vが不連続に変化するLの各値に対し、図4に不連続的变化が生じている。

†  $\gamma = 1.0$ のときには、両者は一致する。

また、Vの値が同じになるLの各値に対しては、 $\alpha$ とJが一定の値になることから次のことがいえる。局がT又はBモードからPT<sub>J</sub>モードに遷移することなく、Qモードに遷移するまでの平均大スロット数は、 $\{J + (L-1)/2\}$ で与えられる。このうち、Jは一定である。従って、Vの値が同じになるLの各値のうち、平均メッセージ遅延が最小となるのは、最小のLのときである。図4にはこのような現象も現われている。

更に、図4より、平均メッセージ長に応じて最適なフレーム長が存在することが明らかである。しかし、本方式では、フレーム長Lの値がある程度大きいときには、その特性に及ぼす影響は小さくなり、最適なフレーム長を用いた場合との特性の差はわずかとなる。一方、与えられた負荷に対してLが小さすぎると特性は急激に劣化している。これらの理由は、表1からも分かるように、Lが大きくなるにつれて、Lの変化に対するVの変化の割合が小さくなるからである。すなわち、Lが小さいときには、Vが大きく変化するのにに対し、Lがある程度大きくなると、Vは高々1しか変化しない。このVはオーバーヘッドの大きさを示すものであり、Vが大きい程オーバーヘッドは大きくなる。このため、Lが小さいとオーバーヘッドの影響が大きくなり、逆に、Lが大きくなるとその影響が小さくなるからである。図4は、 $M\sigma$ を固定して $\gamma$ を変化させてい

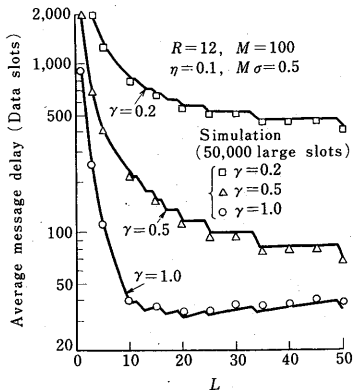


図4 SRUC方式の平均メッセージ遅延とLの関係  
Fig.4-Average message delay versus L for the SRUC system.

るが、逆に  $r$  を固定して  $M\sigma$  を変化させても上記のことと同様の結論が得られる。従って、本方式には、負荷に応じて最適なフレーム長が存在するが、フレーム長を最適値よりあまり小さくならないように選びさえすれば、フレーム長の選択にそれ程注意を払う必要はないことが分かる。なお、フレーム長  $L$  をパラメータに取り、平均メッセージ遅延・スループットトレードオフ特性も描いてみた<sup>(9)</sup>。その図からも、負荷に応じて最適なフレーム長が存在することが明らかとなった。

5. 可変長フレーム SRUC (V-SRUC) 方式

前章の議論から、SRUC 方式には負荷に応じて最適なフレーム長が存在することが明らかとなった。従って、負荷の変動が大きい場合には、フレーム長を固定とするのは得策ではない。そこで、本章では、簡単な方法によって、負荷に応じてフレーム長を可変にする V-SRUC (Variable frame length-SRUC) 方式を提案し、その特性について検討する。

V-SRUC方式は、フレーム内の予約状態で使用されるデータスロット数から、次のフレームのフレーム長を決定するものである。

$i$  番目 (但し、 $i \geq 1$ ) のフレームのフレーム長を  $L_i$ 、大スロット内の小スロット数を  $V_i \triangleq \lceil M/L_i \rceil$ 、そして予約状態で使用されるデータスロット数を  $L_{Ri}$  とする。このとき、 $L_{Ri}/L_i \approx 1$  ならば、チャンネルが容量近くまで使用されており、待ち行列内で費やす時間が大きくなっていると考えられる。そこで、この場合には、オーバーヘッドを減じて容量を大きくするためフレーム長を大きくする。一方、 $L_{Ri}/L_i \ll 1$  ならば、このときの負荷に対して過大なフレーム長を用いていることになるので、フレーム長を小さくする。このようにすれば、負荷がある程度重い場合には適応性が更に良くなる。しかし、4.2でも述べたように、あまりフレーム長を小さくしすぎると、オーバーヘッドが急激に大きくなり返って特性が劣化することもあり得る。これを避けるために、フレーム長の下限  $L_{min}$ 、即ち、大スロット内の小スロット数の上限  $V_{max} \triangleq \lceil M/L_{min} \rceil$  を置く。又、4.2でも述べたように、 $V$  の値が同じになる  $L$  の各値のうち、平均メッセージ遅延が最小となるのは最小の  $L$  のときである。従って、 $V$  の値をもとに、 $L$  の値を変えるのが良い。

( $i+1$ ) 番目のフレームにおける  $V_{i+1}$  と  $L_{i+1}$  を次のように決める。まず、 $L_{Ri}$  から、 $V_{i+1}$  の候補となる値  $V_{i+1}^*$  を次式によって求める。

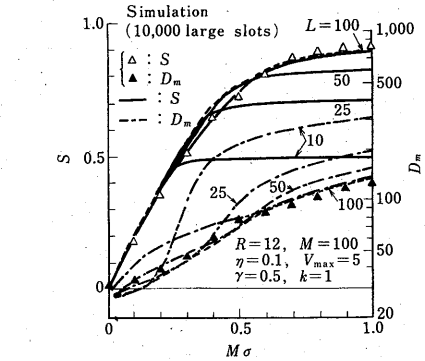


図5 V-SRUC方式のスループット及び平均メッセージ遅延のシミュレーション結果  
Fig.5-Simulation results of throughput and average message delay for the V-SRUC system.

$$V_{i+1}^* = \lceil M/L_{Ri} \rceil - k \tag{23}$$

但し、 $k$  はある正整数である。上式において、 $L_{Ri}/L_i = 1$  のとき  $\lceil M/L_{Ri} \rceil = V_i$  となるが、このときにはフレーム長を大きくする必要があるので、 $\lceil M/L_{Ri} \rceil$  から  $k$  だけ引いたものを  $V_{i+1}^*$  とした。 $k$  の値をいくりにするのが最も良いかということ、理論的に決定することは困難である。最適な  $k$  の値は、種々のパラメータの値に依存するが、本論文で用いている数値例では、シミュレーションの結果によると、 $k = 1$  程度にしておけば十分のようである。なお、 $L_{Ri} = 0$  の場合には  $V_{i+1}^* = V_{max}$ 、 $V_{i+1}^* \leq 0$  となる場合には  $V_{i+1}^* = 1$  とする。この  $V_{i+1}^*$  を実現する最小のフレーム長を  $L_{i+1}$  とすると、これは次式で与えられる。

$$L_{i+1} = \lceil M/V_{i+1}^* \rceil \tag{24}$$

このとき、表1から分かるように、 $L$  と  $V$  の値が1対1に対応していないので、この  $L_{i+1}$  を実現する最小の  $V$  の値が  $V_{i+1}^*$  と異なる場合がある。例えば、 $L_{Ri} = 4$ 、 $k = 1$  のとき、 $V_{i+1}^* = 24$ 、 $L_{i+1} = 5$  となる。しかし、 $L_{i+1} = 5$  なるフレーム長を用いるときには、表1から  $V = 20$  とすれば十分である。従って、式(24)で得られた  $L_{i+1}$  を実現する最小の  $V$  の値を  $V_{i+1}$  とすればよく、 $V_{i+1}$  は次式で与えられる。

$$V_{i+1} = \lceil M/L_{i+1} \rceil \tag{25}$$

$M=100$ 、 $R=12$ 、 $r=0.5$ 、 $\eta=0.1$ 、 $V_{max}=5$ 、 $k=1$  の場合の1万大スロット分のシミュレーション結果を図5に示す。図中の実線と一点鎖線は、フレーム長を固定とした場合の理論値を表している。図5において、シミュレーション結果は、固定長フレームの場合の包絡線上の値に非常に近いものとなっている。

このことから、V-SRUC方式の特性は、SRUC方式において負荷に応じて最適なフレーム長を選択したときの特性に非常に近いものとなることが分かる。

V-SRUC方式が、簡単な方法によってフレーム長を可変にするにもかかわらず、このように優れた特性を持つのは次の理由による。SRUC方式では、負荷に応じて最適なフレーム長が存在したが、フレーム長が最適値よりあまり小さくなければ、そのときの特性と最適なフレーム長を用いた場合の特性との差はわずかであった。従って、ある程度大きめにフレーム長を選ぶようにすれば、フレーム長の選択に対してそれ程注意を払う必要はない。V-SRUC方式は、SRUC方式のこの特徴を有効に利用したものである。

### 6. 他方式との比較

本章では、SRUC方式の特性を他の方式のそれと比較することによって、その特徴を更に明確にする。その一例として、スロット付アロハ(S-ALOHA)方式、TDMA予約チャンネルを用いた予約方式(以下、TDMA予約(TDMA reservation)方式と略す)及び固定割当てTDMA方式(以下、TDMA方式と略す)と比較する<sup>†</sup>。この場合のTDMA予約方式は、SRUC方式においてランダムアクセスをなくしたものに相当している<sup>10)</sup>。M=100, R=12のとき、 $r=1.0$ 及び $r=0.2$ とした場合の各方式に対する平均メッセージ遅延・スループットトレードオフ特性を、それぞれ図6(a), (b)に示す。又、参考のため、SRUC方式において、SIを採用するシステム(protocol SI)の特性も図6(b)に示してある。

図6にて、TDMA予約方式については、文献(10)で得られた理論式を用いて計算した特性を示してある。TDMA方式では、次の理論式を用いた。

$$S = \{1 - (1 - \sigma)^M\} / \{1 - (1 - r)(1 - \sigma)^M\} \quad (26)$$

$$D_m = M / (rS) - 1 / \sigma + R + 1 \quad [\text{スロット}] \quad (27)$$

又、スロット付アロハ方式については、文献(7)のモデルを1局毎に適用して、その結果をM個分組み合わせることによって得られた詳細なモデルを用いた。その平衡点解析による理論式は、再送確率をpとすると、 $\sigma \leq p$ のときには次のようになる。

$$\{1 - (1 + Rp)n\} \sigma - (1 - \sigma/p) rnp(1 - np)^{M-1} = 0 \quad (28)$$

<sup>†</sup> 文献(6)においても、スロット付アロハ方式及び予約方式との比較が行われているが、これは単一パケットメッセージの場合のみである。又、その予約方式は、予約のためのオーバーヘッドが0であるとした非現実的なものである。

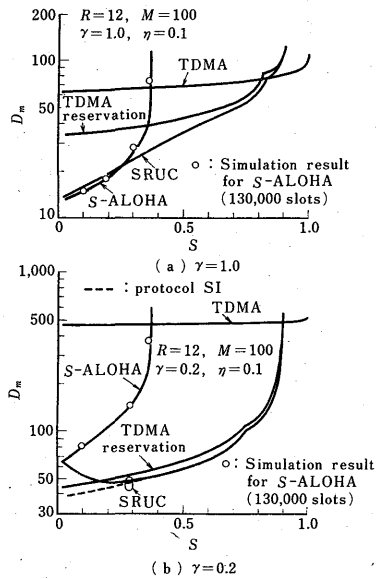


図6 各方式の特性比較  
Fig.6-Average message delay-throughput tradeoff for SRUC, S-ALOHA, TDMA reservation and TDMA.

$S = Mnp(1 - np)^{M-1} \quad (29)$   
 $D_m = M / (rS) - 1 / \sigma + 1 \quad [\text{スロット}] \quad (30)$   
 $\sigma > p$ のときの理論式も同様にして得られる。上式は、M及び $1/p$ が大ききときには文献(7)の結果にほぼ一致することが容易に示される。しかし、一般に、上式の方が精度が良い。スロット付アロハ方式では、チャンネルの不安定現象が生じることもあるので、各入力率に対して、安定となる領域においてスループットが最大となるように再送確率を選んだときの包絡線が図6に示されている。又、この方式に対しては、13万スロット分のシミュレーション結果も図中に示してある。これによると、上記の理論は正確であることが分かる。TDMA予約方式及びSRUC方式では、 $\eta=0.1$ の場合に各スループットに対して平均メッセージ遅延が最小となるようにフレーム長を選んだときの包絡線が示されている。TDMA予約方式における包絡線もまた、SRUC方式の場合と同様に滑らかとなっていない。これは、上述のようにTDMA予約方式はSRUC方式においてランダムアクセスをなくしたものに相当するので、SRUC方式の場合と同じ理由による。

図6から、従来言われているように、SRUC方式は広範囲の入力率に対して優れた特性を持つ方式であることが分かる。又、その特性は、単一パケットメッ

セージの場合だけでなく、マルチパケットメッセージの場合にも、負荷が軽いときにはスロット付アロハ方式、重いときには TDMA 予約方式の特性に近くなることが分かる。このことから、SRUC 方式はランダムアクセス方式と予約方式のギャップを埋めるものであると言える。

更に、図 6 から分かるのは、周知のように、極めて高負荷の場合には TDMA 方式が優れているということである。又、スロット付アロハ方式は、 $r=0.2$  のように平均メッセージ長が長いときには、負荷が軽いときでも特性は悪くなっている。しかし、この理論値は本論文の仮定(6)と同じく、一つのパケットの送信の成功を確認した後に次のパケットを送信するという前提に基づいたものである。従って、前のパケットの送信の成否を確認することなく、連続的にパケットの送信を行うようにすれば、負荷が軽い場合の特性は改善されるものと考えられる。しかし、SRUC 方式についても、仮定(6)の制約を取り除くことによって、スロット付アロハ方式の場合と同様に特性が改善されることになるので、両方式の定性的な関係は変わらない。

## 7. む す び

本論文では、SRUC 方式に対して、各局がマルチパケットメッセージを発生するという条件の下で近似モデルを構成し、それに平衡点解析の手法を適用して、その特性を詳細に検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) アロハ形予約方式と同様に、フレーム長の変化に対して、平均メッセージ遅延が不連続的に変化する。

(2) 負荷に応じて最適なフレーム長が存在する。しかし、フレーム長を最適値よりあまり小さくならないように選びさえすれば、その場合の特性と最適なフレーム長を用いた場合の特性との差はわずかとなる。従って、ある程度大きめにフレーム長を選ぶようにすれば、フレーム長の選択に対してそれ程注意を払う必要はない。

以上の結果をもとに、負荷に応じてフレーム長を可変にする V-SRUC 方式を提案し、その特性をシミュレーションによって求めた。その結果、V-SRUC 方式の特性は、SRUC 方式において負荷に応じて最適なフレーム長を選択したときの特性に非常に近いものとなった。

更に、SRUC 方式と他の方式との比較を行った結果、従来言われているように、SRUC 方式は広範囲

の入力率に対して優れた特性を示した。特に、その特性は、単一パケットメッセージの場合だけでなく、マルチパケットメッセージの場合にも、負荷が軽いときにはスロット付アロハ方式、重いときには TDMA 予約方式の特性に近くなることが明らかとなった。

今後の課題として、まず仮定(3)の制約を取り除いて、各局においてメッセージの待ち行列が形成されることを許したシステムの解析が必要である。又、SRUC 方式も含めて、これまで提案されている数多くのアクセス方式の特性を、同一の条件の下で比較検討し、その相互関係を明らかにする必要がある。

謝辞 御討論頂いた静岡大学福田明助教授、本学太田正光教授及び東京大学安田靖彦教授に感謝する。なお、本研究は、昭和 56 年度文部省科学研究費補助金によって行われたものである。

## 文 献

- (1) Lam, S.S.: "Satellite packet communication-multiple access protocols and performance", IEEE Trans. Commun., COM-27, 10, pp.1456-1466 (Oct. 1979).
- (2) Kleinrock, L. and Yemini, Y.: "An optimal adaptive scheme for multiple access broadcast communication", Proc. ICC, pp.7.2.1-7.2.5. (1978).
- (3) Mittal, K.K. and Venetsanopoulos, A.N.: "On the dynamic control of the URN scheme for multiple access broadcast communication systems", IEEE Trans. Commun., COM-29, 7, pp.962-970 (July 1981).
- (4) 福田, 長谷川: "アクセス権割当形適応多元接続方式(URN方式)を用いたパケット交換網に関する考察", 信学論(B), J64-B, 10, pp.1099-1106 (昭56-10).
- (5) Borgonovo, F. and Fratta, L.: "SRUC: A technique for packet transmission on multiple access channels", Proc. ICC, pp.601-607 (1978).
- (6) 福田明: "アロハ形システムの平衡点による特性解析", 信学論(B), J61-B, 11, pp.959-966 (昭53-11).
- (7) 田坂, 古川: "マルチパケットメッセージを持つアロハ形衛星パケット通信網の特性解析", 信学論(B), J63-B, 12, pp.1177-1184 (昭55-12).
- (8) 田坂, 石橋: "アロハ形予約チャンネルを用いた予約方式衛星パケット通信網の動特性", 信学論(B), J64-B, 11, pp.1165-1172 (昭56-11).
- (9) 石橋, 田坂: "SRUC衛星パケット通信網の特性解析", 信学技報, SE81-87 (1982-01).
- (10) 石橋, 田坂: "TDMA予約チャンネルを用いた予約方式衛星パケット通信網の平衡点解析", 信学論(B), J65-B, 5, pp.668-669 (昭57-05).

(昭和 57 年 2 月 4 日受付)