

パケット無線通信方式

A Packet Radio Communication System

安田 靖彦*・田坂 修二**

Yasuhiko YASUDA and Shuji TASAKA

1. ま え が き

米国の有名な ARPANET を始め、多くの計算機網では有線通信回線を用いてネットワークを構成しているが、最近計算機一端末間の情報交換方式として、ハワイ大学で開発した ALOHA システムの延長線上にあるパケット無線通信方式が多くの関心を集めている。これは無線回線の場合、一つの回線を多数の端末で共用できること、放送形式のシステムとなるため、網構成が簡単になり、複雑なルーチングが不要なこと、移動端末も収容できること、将来衛星回線のコストが地上回線より相対的に安くなると予想されること、また多くの島嶼からなる地域や発展途上国など地上の通信網の整備が遅れている地域でも実現可能であること等々多くの理由に基づくものである。

ところでこの種のパケット無線交換システムにおいて問題となる通信方式としては、純 ALOHA 方式¹⁾が実用されているが、回線利用効率が低いので、これを改善するため、SLOTTED ALOHA 方式²⁾、搬送波検出方式³⁾、ビジートン方式³⁾あるいはスロット予約方式¹³⁾等が提案されている。しかし、これらの方式ではいずれもシステムが純 ALOHA 方式より複雑になるという代償を払う必要がある。

本文では、先に報告した非常災害対策用広域多点情報収集システム^{5),6)}に関連して筆者等が提案した、ランダムアクセス通信を応用したパケット無線通信方式^{7),8)}について述べ、この方式が、純 ALOHA と同様システム構成が容易であるにも拘らず、回線利用効率は SLOTTED ALOHA より大きくなることを示す。

2. パケット無線通信

一つの大型計算機を地理的に遠く離れた多数のユーザが無線通信を用いて共有するシステムを考えよう。対話形の端末一計算機間情報交換の場合、活動的端末も、発生する情報はきわめて間欠的である。このような状況においては、各端末に固定的に一つずつの周波数帯域あるいはタイムスロットを割当てる FDM または TDM 方

式は回線利用効率が極端にわるく、また情報伝達の遅延時間が非常に大きくなる。一方、ランダムアクセス通信方式は全端末が一つの無線周波数空間を共用し、統計的負荷平均化作用を積極的に活用できるので、上記のようなシステムに適している。

端末一計算機間に用いられるランダムアクセス方式としては、純 ALOHA 方式が代表的である。この方式では各端末が発生する情報を1000ビット程度のパケットにまとめ、発信端末名、宛先名、その他の付加情報を加えたのち、誤り検出符号化して、任意の時刻に送信する。したがって、いくつかの端末が活動的であるとき、図1に示すように端末Aから送信されたパケットはそのまま目

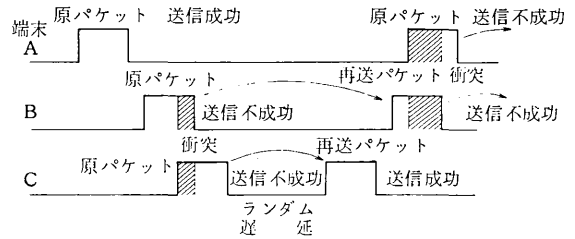


図1 純 ALOHA 形パケット無線通信の動作

的の局へ到達し、局は受信確認の意味で ACK 信号を端末 A へ送り返す。一方端末 B および端末 C が送信したパケットは衝突し、双方とも失われる。このように複数パケットが時間的に重なって互いに他へ妨害を与える現象はランダムアクセス通信の宿命である。純 ALOHA では端末 B および C はパケットを送信した後、一定時間待って、宛先局から ACK 信号が戻って来なかったら、衝突が起こったものと判断し、同一パケットを再送信する。このとき、二つの端末が同じ時刻に再送信すると再び衝突が起こるので、各端末はランダムな遅延時間において再送信を行う。この操作は目的局から ACK 信号が戻ってくるまで繰返される。

さて、端末の数が十分多いとき、全端末が発生するパケットの生起時点はポアソン過程に従うと考えられる。パケットの単位時間当りの平均生起率 λ (個/sec)、パケットの継続時間を τ sec とすると

$$S = \lambda \tau \quad (1)$$

は、発生するパケットを順序よく並べたときに占有する無線回線の時間帯を表わしており、回線利用効率(スルー

* 東京大学生産技術研究所 第3部

** 東京大学工学系大学院 (現在、名古屋工業大学情報工学科)

プット)と呼ばれる。いうまでもなく $0 \leq S \leq 1$ である。一方実際に回線中に存在するパケットは各端末が最初に発生するパケットの外に、同一パケットの再送信によるパケットも含まれている。再送信パケットを含めた全パケットの生起もポアソン過程に従うとして、その平均生起率を λ' とおけば

$$G = \lambda' \tau \quad (2)$$

は回線中に存在するパケットによって、その回線が塞がれる時間帯を表わし、チャンネルトラヒックと呼ばれる。ところで、あるパケットが他のパケットによって妨害を受けない確率は、そのパケットの開始時刻の前後 $\pm \tau$ sec 以内に他のパケットが存在しない確率に等しい。全パケットの生起が平均生起率 λ' のポアソン過程に従うことから、この確率は $e^{-2\lambda'\tau}$ に等しい。従って次の関係が得られる。

$$\lambda = \lambda' e^{-2\lambda'\tau} \quad (3)$$

これを書き直して、チャンネルトラヒックとスループットとの関係

$$S = Ge^{-2G} \quad (4)$$

が得られる。スループットを横軸にとって上式を描くと図 2¹⁾ のようになり、 $S = 1/2e = 0.184$ に達すると系は不安定になる。従ってこの値が純 ALOHA 方式の最大スループットで、このときのチャンネルトラヒックは $G = 0.5$ となる。

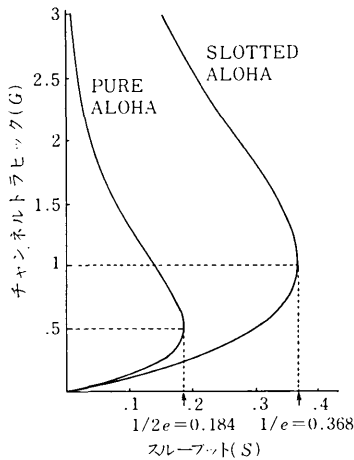


図2 ALOHA 方式の $S-G$ 特性

このように、純 ALOHA 方式の回線利用効率は非常に低いので、これを改善するため、いくつかの方式が提案されている。このうち最も簡単な SLOTTED ALOHA は図 3²⁾ に示すように、共通の無線チャンネルにパケット長に等しい時間的区切を入れ、各端末はパケットをこの区切り内に送信するように規制するものである。このように時間軸をスロット化することによって、純 ALOHA のように、パケット同志が部分的に重なる状態はなくな

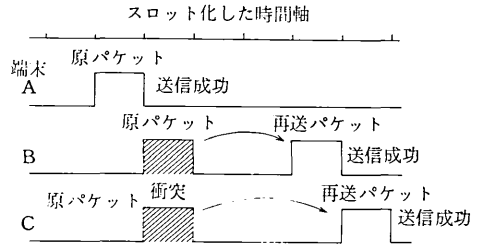


図3 SLOTTED ALOHA 形パケット無線通信の動作

り、衝突する場合は完全に重なるようになる。この結果パケットはその開始時刻より後 τ sec 以内に生起する他のパケットによってのみ妨害を受けることになるので、スループットとチャンネルトラヒックの関係は次式のようになる。

$$S = Ge^{-G} \quad (5)$$

この関係は図 2 に示す通りで、最大スループットは $S = 1/e = 0.364$ に向上する。

このほか、搬送波検出方式 (CSMA) は、他の端末から送信される電波を受信して、その間の送信は見合わせるものであり、ビジートン方式は回線の使用状況を局から各端末に知らせて、その間の送信を遅延させるものである³⁾。また予約方式は予め送信要求が発生した端末がタイムスロットを予約して、そこへ送信する方式である³⁾。これらの方式は、純 ALOHA と違って各端末に何らかの規制を加えるものであって、ランダムアクセス通信本来の利点のある程度犠牲にしており、システム構成も複雑になる。

3. COMBED ALOHA

本文で提案する COMBED ALOHA 方式は、独特の楕形信号構造と非同期多点標本化検出とをもって、パケットの部分的重なりによる回線容量の損失を回復する一つの新しいランダムアクセス通信方式である。方式の基本的構成は先に報告した非常災害対策用広域多点情報収集システム^{5),9)}に準拠しているが、受信側標本化パルスの周期を τ/M sec (M は整数)とし、シフトレジスタの個数を $n_m M$ 個に変更したものである^{7),8)}。

送信信号の構造は図 4 に示す通りで、各ビット信号は周期 t_0 sec 中 $\tau = t_0/n_m$ sec 時間だけ送信されるので、送信パケットは楕形の信号構造をとる。このようなパケットを各端末が互いに全く独立に送信するのでパケットが重なる場合、ビット信号においては部分的に重なるのが普通である。図 5 (a) はパケット I にほかの二つのパケット II, III が重なった様子を示すものである。これらのパケットは重なったまま受信され、受信機においてベースバンド信号に変換されて信号判定回路に入る。ここで、送信側とは独立に自走している発振器からの標本化パルスによって、ビット同期をとることなく標本化さ

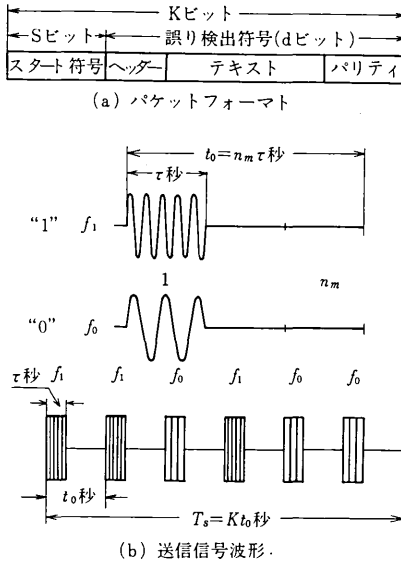


図4 送信信号構成 ($n_m = 3$)

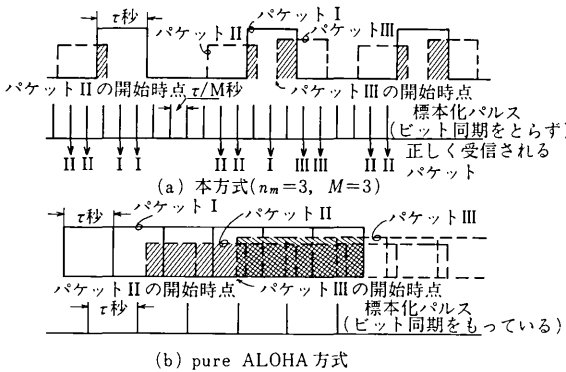


図5 パケットの重なりと標準化パルスとの関係

れて、その標本値の正負によって、 *1 , *0 の半定が下される。このとき、一つのパケットのデータは、一般に M 個のシフトレジスタに入ることになる。そして、この M 個のデータのうちの少なくとも1個が、ほかのパケットのビット信号が重なっていない領域を標準化することによって得られたものであるならば、そのパケットは正しく受信されたことになる。これらのデータは、スタート符号が検出された後、誤りのチェックが行われる。その結果、誤りがなければ、そのデータを受け入れて送信端末へ ACK 信号を送り、誤っていれば捨て去ることになる。

以上の説明で明らかのように、本方式は、ほかのパケットの重なりを各ビットに少しずつ分散することによって各々のビットにおいて重なっていない領域を残し、それを高密度標準化によって積極的に利用しようというものである。これに対して、ALOHA方式では、図5 (b) に示すように、ほかのパケットが重なると、ビット信号

では全面的に重なっていて、標準化パルスは必ず信号の重なった領域にある。従って、誤りを生じたり、同期はずれを起こしたりすることになるので、パケットの部分的な重なりを全く利用できない。

また、本方式では、ビット同期をとる必要がなく、単にスタート符号を検出すればよいので、受信機が簡単化できると共に、送受信機間の同期のために必要なビットを減少することができるという利点もある。本方式におけるビット信号判定方式を、非同期多点標準化受信方式と呼ぶ。

4. スループットの解析

以下の解析において、次の仮定を置く。

仮定(1): ビット信号の包絡線は完全な方形波である。
 仮定(2): パケットの発生源は無限個の独立な端末よりなり、新しく発生するパケットと再送パケットとを加えた全パケットの開始時点が、平均生起率 λ (1/s) のポアソン過程となっている。

仮定(1)は、系の帯域制限効果があまり強くなければ十分妥当である。ビット信号波形については、文献10)を参照されたい。

仮定(2)におけるポアソン分布の仮定は、パケットの平均再送遅延 \bar{X} が、パケットの伝送時間に比べて十分大きいときに妥当である。ところが、実際のシステムでは、パケットの遅延を小さくするために \bar{X} をあまり大きくできないので、この仮定に基づいて得られるスループットの結果は、遅延が有限の場合のスループットの上限となる。しかし、これまでの研究によると、 \bar{X} がパケットの伝送時間に比べてそれほど大きくない有限の値のときにスループットはこの上限に十分近づくことが、シミュレーションによって示されている^{3),4)}。

4.1 パケットの損失確率

スループット計算のための準備として、まずパケットの重なりによる判定誤りによってパケットが失われる確率を導く。但し、ランダム誤りの影響は無視する。

ある特定のパケットの開始時点が t_1 とすると、ほかのパケットの開始時点が、区間 $I_l \triangleq [t_1 + lt_0 - \tau, t_1 + lt_0 + \tau]$ ($l = 0, \pm 1, \dots, \pm(K-1)$; $t_0 = n_m \tau$) のいずれかにあれば、パケットに i 個のほかのパケットが重なる確率は、

$$P_{ov}(i) = \{(2K-1)2\tau\lambda\}^i / i! \cdot \exp[-(2K-1)2\tau\lambda] \quad (6)$$

となる。 $2K-1 \approx 2K$ とし、

$$G \triangleq \lambda K \tau : \text{チャネルトラヒック} \quad (7)$$

と定義すると、上式は次のようになる。

$$P_{ov}(i) = (4G)^i / i! \cdot e^{-4G} \quad (8)$$

本方式では、ほかのパケットが重なっても、標準化時点が信号の重なっていない領域にあれば、パケットは正

しく受信される。従って、 i 個のほかのペケットが重なった場合のビット信号判定誤り率を $P_B(i)$ と表すと、ペケットの重なりによる判定誤りによってペケットが失われる確率 P_L は、次式で与えられる。

$$P_i = \sum_{i=1}^{\infty} P_B(i) P_{OV}(i) = \sum_{i=1}^{\infty} P_B(i) \frac{(4G)^i}{i!} e^{-4G} \quad (9)$$

4.2 $P_B(i)$ の計算

本方式では、一つのビット信号に対して M 個の位相の異なる標準化パルスが存在する。そして、一つの位相の標準化パルスによってペケットが正しく受信されるためには、ビット信号内のその標準化時点が、ペケットの全ビットに渡って、ほかのペケットから干渉を受けていないことが必要である。従って、 $P_B(i)$ を計算する場合にはペケットの全ビットを一つに重ね合わせて考え、ほかのペケットが重なっている領域について OR をとった後になおほかのペケットが重ならずに残っている領域内に標準化パルスが存在するかどうかを考えればよい。以下、簡単のため、すべての時間変数は τ で正規化して考えることにし、図6に示すように、区間 $[0, 2]$ 内に i 個のほかのペケットのビット信号が存在する場合を考えれば十分である。

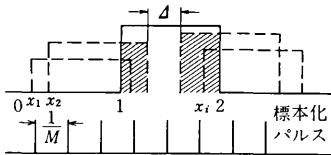


図6 ビット信号と標準化パルスとの関係 ($M=3$)

$P_B(i)$ の計算における考え方は、次のようである。本方式では、標準化パルス発振器は自走しているの、標準化時点は、 $1/M$ の時間不確度を持つ。従って、図6に示すように、与えられたペケットのビット信号において、ほかのペケットのビット信号が重なっていない領域の長さを Δ とすると、 Δ が $1/M$ よりも大きければ、必ずその中に少なくとも1個の標準化パルスが存在することになり、ペケットは正しく受信される。しかし、 Δ が $1/M$ 以下であっても、 $\Delta / (1/M)$ の確率で正しく受信されることになる。従って、

$$P_B(i|\Delta) = \begin{cases} 0, & (1/M \leq \Delta \leq 1) \\ 1 - M \cdot \Delta, & (0 \leq \Delta \leq 1/M) \end{cases} \quad (10)$$

となり、これを Δ について平均すれば $P_B(i)$ が求まる。

Δ は、ほかのペケットのビット信号の開始時点 s_1, \dots, s_i ($0 \leq s_j \leq 2, j=1, \dots, i$) の関数であるので $P_B(i)$ を求めるために、ポアソン過程の次の性質に着目する。 $\{Y(t), a \leq t \leq b\}$ をポアソン過程とし、 $Y(a) = 0$,

* 標準化時点が信号の重なった領域にあっても、そのペケットの受信レベルがほかのペケットのそれよりも十分大きければ正しく受信されるので、この仮定による計算は、判定誤り率の上限を与える。

$Y(b) = n$ という条件の下で、区間 $[a, b]$ における $Y(t)$ の n 個の変化点を表す不規則変数 x_1, x_2, \dots, x_n ($a \leq x_1 \leq \dots \leq x_n \leq b$) の分布は、 $[a, b]$ 上の一様分布からとった大きさ n の順序統計量の組と同じであり、その確率密度関数は、

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} n! / (b-a)^n, & (a \leq x_1 \leq \dots \leq x_n \leq b) \\ 0, & (\text{その他}) \end{cases} \quad (11)$$

となる。] ¹¹⁾

従って、 s_j は、 $[0, 2]$ 上で一様分布する不規則変数であることがわかる。

$$x_i \triangleq \min(s_1, \dots, s_i), \quad x_i \triangleq \max(s_1, \dots, s_i) \\ 0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq 2 \quad (12)$$

とし、以後、大きさ i の順序統計量の組 (x_1, \dots, x_i) によって考える。以下、 $P_B(1), P_B(2), P_B(3)$ について計算する。

(1) $P_B(1)$

$$P_B(1|x_1) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x_1 \leq 1 - 1/M \\ 1 - M \cdot |1 - x_1|, & 1 - 1/M \leq x_1 \leq 1 + 1/M \\ 0, & 1 + 1/M \leq x_1 \leq 2 \end{cases} \quad (13)$$

となり、式(6)より、 $P(x_1) = 1/2$ ($0 \leq x_1 \leq 2$) となるので、 $P_B(1)$ は次のようになる。

$$P_B(1) = \int_0^2 P(x_1) P_B(1|x_1) \alpha x_1 = \frac{1}{2M} \quad (14)$$

(2) $P_B(2)$

x_1, x_2 の値によって、 Δ は次のような7とおりの場合に分類される。

① $0 \leq x_1 \leq x_2$) のとき、 $\Delta = 1 - x_2 \geq \frac{1}{M}$ (15)

② $0 \leq x_1 \leq x_2$) のとき、 $\Delta = 1 - x_2 \leq \frac{1}{M}$ (16)

③ $0 \leq x_1 \leq 1$) のとき、 $\Delta = 0$ (17)

④ $0 \leq x_1 \leq 1 - 1/M$) 及び $1 - 1/M \leq x_1 \leq 1$)
 $1 + x_1 \leq x_2 \leq 1 + x_1 + 1/M$) 及び $1 + x_1 \leq x_2 \leq 2$)
 のとき、 $\Delta = x_2 - x_1 - 1 \leq 1/M$ (18)

⑤ $0 \leq x_1 \leq 1 - 1/M$) のとき、 $\Delta = x_2 - x_1 - 1 \geq \frac{1}{M}$ (19)

⑥ $1 \leq x_1 \leq 1 + 1/M$) のとき、 $\Delta = x_1 - 1 \leq \frac{1}{M}$ (20)

⑦ $1 + 1/M \leq x_1 \leq 2$) のとき、 $\Delta = x_1 - 1 \geq \frac{1}{M}$ (21)

以上の各々に対して、式(9)より、 $P_B(2|x_1, x_2)$ を計算し式(10)より得られる $P(x_1, x_2) = 1/2$ ($0 \leq x_1 \leq x_2 \leq 2$) を用いてこれを平均すると、

$$P_B(2) = (M^2 + 3M - 1) / 4M^2 \quad (22)$$

となる。

(3) $P_B(3)$

x_1, x_2, x_3 の値によって, Δ は10とおりの場合に分類され, これを前と同様に計算すると,

$$P_B(3) = (4M^3 + 6M^2 - 4M + 1) / 8M^3 \quad (22)$$

となることが示される.

なお, ここで得られた $P_B(2), P_B(3)$ の理論式はシミュレーションによって妥当であることが確かめられた.

4.3 スループット式

式(7)で定義されたチャネルトラヒック G は, 1パケットのチャネル占有時間 $K\tau$ 秒当りに発生するパケットの平均個数を表しているのので, 与えられたチャネル上で, パケットを重ねることなく, 又, すき間なく配置するならば, $G = 1$ となってチャネルは100%利用されていることになる. しかし, 実際には, パケットの重なりによって誤りが生じてパケットが失われているので, スループット又はチャネル利用効率は,

$$S \triangleq G(1 - P_L) \quad (23)$$

と定義するのが妥当である. このとき上式は, 式(9)より,

$$S = G \sum_{i=0}^{\infty} (1 - P_B(i)) \frac{(4G)^i}{i!}, \quad (24)$$

ただし, $P_B(0) = 0$

となる. この式は, 無限級数を含み, 厳密に計算するのは困難であるので, 次のような有限項よりなる下限式を定義する.

$$S_i^{(k)} \triangleq G \sum_{i=0}^k (1 - P_B(i)) \frac{(4G)^i}{i!} e^{-4G}, \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (25)$$

$$S \geq S_i^{(k)} \quad (26)$$

$S_i^{(1)}$ については, $G = (M - 1 + \sqrt{5M^2 - 4M + 1}) / (8M - 4)$ のとき, 最大値

$$S_i^{(1)\max} = \frac{2M - 1 + \sqrt{5M^2 - 4M + 1}}{4M} \left(\frac{-M - 1 + \sqrt{5M^2 - 4M + 1}}{2M - 1} \right) \quad (27)$$

をとることが示される. $S_i^{(2)}, S_i^{(3)}$ については, 数値計算してその最大値 $S_i^{(2)\max}, S_i^{(3)\max}$ を求めた. その結果を示したのが, 表1である. 又, G に対する $S_i^{(3)}$ のグラフを図7に示す.

表1と図7によると, 本方式は, $M = 1$ の場合には, pure ALOHA 方式とはほとんど同じになり, $M = \infty$ の

表1 本方式の最大スループットの下限

	$M = 1$	$M = 2$	$M = 3$	$M = 4$	$M = 5$	$M = \infty$
$S_i^{(1)\max}$	0.1467 (0.354)	0.1779 (0.384)	0.1885 (0.392)	0.1938 (0.395)	0.1971 (0.397)	0.2100 (0.405)
$S_i^{(2)\max}$	0.1719 (0.430)	0.2287 (0.487)	0.2520 (0.505)	0.2646 (0.514)	0.2724 (0.519)	0.3057 (0.538)
$S_i^{(3)\max}$	0.1807 (0.474)	0.2514 (0.557)	0.2839 (0.587)	0.3022 (0.601)	0.3140 (0.610)	0.3669 (0.645)

但し () 内は, $S_i^{(i)\max}$ を与える G の値である

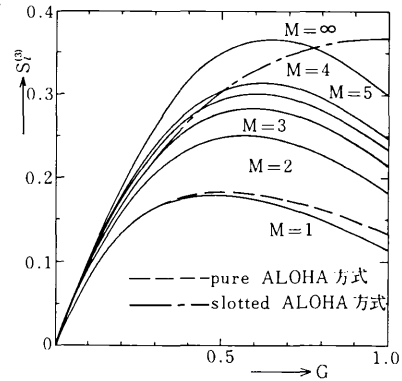


図7 $S_i^{(3)}$ vs. G

場合には, slotted ALOHA 方式と同程度もしくはそれ以上になっていることが分かる.

4.4 多点標本化に伴うデータの不確定

本方式では, 普通同一のパケットが M 個のシフトレジスタに入ることになるので, 最終的には何らかの判定基準によって, そのうちの1個を選択する必要がある. これまでの解析では, ほかのパケットが重なっても, M 個のデータのうちの少なくとも1個が正しく受信されているならば, 必ずそのデータが選択されるものと仮定していた. しかし, 実際には, 正しいデータがあるにもかかわらず, 誤ったデータが選ばれる可能性があり, それによってスループットが減少する.

このようなことが起こるのは, まずほかのパケットが重なる(事象I)ことが必要であり, 次にその重なった部分に対応するデータのスタート符号が検出されて(事象II), パケットの重なりによるバースト誤りが検出されず(事象III: 確率 P_U), かつ誤ったデータが選択される(事象IV)ことが必要である. 従って正しいデータがある場合に, P_c は

$$P_c = 1 - P(I \cap II \cap III \cap IV) > 1 - P_U \quad (28)$$

となり, 実質的なスループットは, $P_c \cdot S$ となる.

ここで誤り検出のために (n, k) 巡回符号を用いるとすると, i 個の他のパケットが重なったとき M 個のデータに発生する独立なバースト誤りは高々 m 種類 ($m = i (1 \leq i \leq M), m = M (i \geq M)$) であるので¹²⁾, $P_U \leq m \times 2^{-(n-k)}$ となり, この場合のスループットは少なくとも $(1 - P_U) \cdot S_i^{(i)}$ となる. そこで, 例えば, $n - k = 16$ とすると, $m = 3$ のとき $P_U \leq 4.58 \times 10^{-5}$, $m = 10$ のとき $P_U \leq 1.53 \times 10^{-4}$ となる. 従って実際のなどの値の範囲でも, スループットはほとんど減少しない.

4.5 遅延についての考察

端末-計算機間の通信が会話形であるような場合にはシステムの特性として, スループットのみならず, パケットが発生してから正しく受信されるまでの平均時間, すなわち平均パケット遅延 D が問題になる. これは一般に次のように表される³⁾.

$$D = (T_t + T_p) + (G/S - 1) \cdot (T_t + 2T_p + T_a + \bar{X}) \quad (29)$$

但し、 T_t : パケットの伝送時間、 T_p : 伝搬遅延
 T_a : ACK 信号の伝送時間、 \bar{X} : 平均再送遅延

上式の第1項は、最初の送信に伴う遅延を、第2項は再送に伴う遅延を表している。又、 G/S は、パケットの平均送信回数を表す量である。

本方式の $S_i^{(3)}$ に対する $G/S_i^{(3)}$ と、ALOHA方式の S に対する G/S の関係を示したのが図8である。これによると、本方式では、 M を十分大きくすれば、同一のスループットにおいて、SLOTTED ALOHA方式よりも少ない平均送信回数ですむことが分かる。しかし、 D の値はほかのパラメータにも依存しているので、これによって本方式における遅延がALOHA方式における遅延よりも小さくなるということとはできない。特に、本方式では、パケット長が同じであるとすると、 T_t はALOHA方式の約 n_m 倍となるから、 T_p よりも T_t が大きいような場合には、むしろ本方式の D の方が大きくなることもあり得る。しかし、衛星回数のように $T_p \gg T_t$ である場合には、一回の再送に伴う遅延が大きくなるので、本方式の D の方が小さくなる。

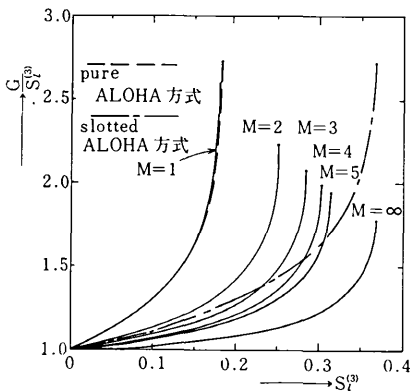


図8 平均送信回数とスループットとの関係

5. むすび

本文では、パケットの部分的重なりによる容量の損失を回復するために、SLOTTED ALOHA方式とは別の観点から検討を行い、時間軸をスロット化することなく、特別な送信信号形式と受信方式を用いることによって、極限の場合には、少なくとも $1/e$ 程度の最大スループットが得られることを示した。又、ビット信号の周波数変動やマルチパス効果によるスループットの劣化についても検討を加えたがここでは省略した。

本文で検討した方式は、地上無線通信系、衛星通信系のいずれにも適用可能であるが、特に衛星通信系に適しているものと思われる。すなわち、スループットに関し

ては、これまでに報告されている方式のうちで最も優れているCSMA方式^{3),4)}($S_{max} = 0.857$)は、伝搬遅延がパケットの伝送時間に比べて十分小さい場合には有効である。しかし、伝搬遅延がパケットの伝送時間と同程度もしくはそれ以上になると、純ALOHA方式よりもスループットが低下することになるので、衛星通信系では本方式の方が優れていることになる。更に、平均パケット遅延に関しても4.5で述べたように、衛星通信系ではCOMBED ALOHAは、ALOHA方式よりも優れている。以上より、本方式は、システムの効率と構成の簡単さという両面から考えれば、無線パケット通信方式としてかなりの利点を持った方式といえよう。

なお、本文ではスループットの下限式を示すにとどめたが、厳密解も得られており¹⁴⁾別の機会にご報告したい。

謝辞 日頃討論頂く研究室諸氏に感謝する。

(1977年1月6日受理)

参考文献

- 1) N. Abramson: "The ALOHA system—another alternative for computer communications", FJCC AFIPS Conf. Proc., 37, p.281 (1970)
- 2) N. Abramson: "Packet switching with satellites", NCC, AFIPS Conf. Proc., 42, p.695 (1973)
- 3) L. Kleinrock and F. Tobagi: "Carrier sense multiple access for packet switched radio channels", Proc. ICC '74.
- 4) L. Kleinrock and F. Tobagi: "Random access techniques for data transmission over packet-switched radio channels", NCC, AFIPS Conf. Proc., 44, p.187 (1975)
- 5) 安田: "非常災害対策用広域多点情報収集システムに関する研究" 生産研究 27, 3, p.16 (昭50年3月)
- 6) 安田, 田坂: "非常災害対策用広域多点情報収集システムに関する研究—その2" 生産研究 28, 4, p.10 (昭51年4月)
- 7) 田坂, 安田: "ランダムアクセスによる無線パケット通信の方式" 電子通信学会論文誌 J59-A, 8, p.644 (昭51年8月)
- 8) Y. Yasuda, S. Tasaka: "A Packet Radio Random Access Communication System" 1976 IEEE ICC Conf. Rec. No. 38-24
- 9) 田坂, 安田: "情報収集用非同期多重通信の方式", 信学論(A), 58-A, 8, p.499 (昭50-08)
- 10) 田坂, 安田: "非同期標本化受信方式に対する最適波形", 信学論(A), 58-A, 9, p.563 (昭50-09)
- 11) S. Karlin, 佐藤訳: "確率過程講義", 産業図書 (1974)
- 12) W. W. Peterson: "Error-Correcting Codes", M. I. T. p. 152 (1961)
- 13) L. G. Roberts: "Dynamic allocation of satellite capacity through packet reservation", NCC, AFIPS Conf. Proc. 42, p.711 (1973)
- 14) 福田, 田坂, 安田: "くし形信号構造を用いた無線パケット通信方式のスループット解析" 電子通信学会論文誌掲載予定