

## 無線回線を用いた計算機網の通信容量†

—アロハシステムについて—

田中義郎<sup>††</sup> 池田哲夫<sup>††</sup>

米国における ARPA Net. をはじめとする数多くの電子計算機網の研究開発、実用化は目覚ましいものがある。我が国においてもその例にもれず、資源の共用という点に注目しながら、開発が進められてきた。

これらは主として有線回線を用いた網であるが、無線回線を用いた網もいくつか研究されており、その例として、ハワイ大学の Abramson 教授の提唱した周波数を共有する ALOHA 方式を考えることができる。

周波数を共有する方式において、通信容量を増加させるために、スロット方式、予約方式等が検討された。都市地域において、比較的簡単な受信機で無線回線を構成すると、都市雑音（主としてインパルス性雑音）を避けることができず、ビット誤り率は  $10^{-2}$ ~ $10^{-4}$  程度になることが実験的、理論的にたしかめられている。

そのような悪条件の下で電子計算機網を構成するものと考え、通信容量がどのように低下するかを検討したものである。ここで検討を加えた方式は、各種の ALOHA 方式であり、方式によって多少の差異はあるが、ビット誤り率が  $10^{-2}$  とすれば、理想的に系が運用されている場合に比べて、その通信容量は約  $1/3$  になることが示されている。またそれらの方式が収容することのできるアクティブ最大収容端局数を示してある。

## 1. ま え が き

近年、米国における ARPA ネットワークをはじめとする電子計算機網の研究<sup>1)</sup> および実用化はめざましいものがあり、我が国においても国鉄、銀行をはじめとして東京大学の TECNEN、京都大学の KUPNET 等とその数は非常に多い<sup>2)</sup>。これらの電子計算機網は資源の共用に重点がおかれているが、網における負荷の分散という点でも期待されている。このようにして構成される電子計算機網は大規模な情報処理システムに遠隔端末を接続する方法と大規模あるいは中規模程度の処理装置を複数個接続する方法等が考えられている。この電子計算機網の接続は、現在は主として専用回線あるいは電話用の公衆回線によって網を構成する有線伝送方式が考えられているが、電子計算機網の設計においては、電話回線と同様に有線伝送方式だけでは十分な設計を行えない場合も生じ、無線通信回線を必要とする場合もある。

そのような理由から無線回線を用いた電子計算機網に関してもいくつかの方式が検討されており<sup>3)</sup>、人工衛星を用いてグローバルな回線を構成しようとしたものの1つがハワイ大学を中心とした ALOHA システムである<sup>1)</sup>。この ALOHA システムの第1段階とし

ては、UHF 帯を用いてハワイ大学および隣接諸島とを結ぶものであったが、第2段階は科学衛星 ATS-1 を用いて、米本土・日本およびその他の汎太平洋地域の国々を結ぶ計画である。以下我々はこの ATS-1 を用いた電子計算機網 ALOHA システムを念頭において議論を進めることにする。

この ALOHA 方式は、周波数を共有する方式（人工衛星に対して上り回線 149 MHz、下り回線 136 MHz）であり、数多くのユーザが同一周波数でパースト的に使用するものである。この無線回線を利用した方式としてはアクセスの仕方によって pure ALOHA 方式<sup>1)</sup>、slotted ALOHA 方式<sup>4)</sup>、reserved ALOHA 方式<sup>5)</sup>、CSMA 方式<sup>6)</sup>等がそれぞれ特徴を持つ方式として提案され、理想的な運用がなされているものとして解析されている。

しかし、実際の回線における実験の結果では、雑音によるビット誤り率は  $10^{-2}$ ~ $10^{-4}$  程度であり<sup>7),8)</sup>、1000 ビット程度で1データパケットを構成する上記の方式では、その誤り率を無視し得る程度に小さいものとは考えられない。

この程度の誤り率は、理論的に適当なインパルス性雑音の分布を仮定して求めた結果ともよく一致し<sup>9)</sup>単に実験設備だけの問題としてこの誤り率を処理するわけにはいかない。端局設備として現在用いられている程度のもので<sup>7),8),11)</sup>この方式が運用されていくものとするれば、非常に多くの都市雑音の存在する都市域において使用する限り、この雑音はさけられないものと考

† Channel Capacity of Computer Communication Networks in a Radio Link —For ALOHA System— by YOSHIO TANAKA and TETSUO IKEDA (Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology).

†† 名古屋工業大学電気工学科

えられる。

そこで上記 pure ALOHA 方式に ACK パケットの並用方式 (正しいデータパケットの受信報告として ACK を用いる方式で、これは誤り率が高いときには NACK 方式より能率が良い) を採用するものとして、データパケット同志の衝突、雑音による誤り、データパケットと ACK パケットの衝突等を考えてシステムの通信容量を求め、雑音による通信容量の減少の程度を示した。また、この方式の応用として、各種の slotted ALOHA 方式、そして ALOHA 方式ではデータパケットの不成功時にはデータパケットの再送が行われることを積極的に利用した再送多数決方式を提案し、雑音による誤り率を考慮してシステムのスループットを求めたので報告する。

## 2. ALOHA-ACK 返送方式

### 2.1 pure ALOHA-ACK 返送方式

図 1 に示すような多数の端局と計算機との間の共通周波数を用いた無線回線によるタイムシェアリングシステムを考えたのが ALOHA システムである。図 2 はその ALOHA システムにおいて  $K$  個の稼動中の端局から一連のデータパケット列が送信されている様子を示したものである。同図において明らかのように異なる端局から発生するデータパケットが多くなると 2 局からのデータパケットが衝突することとなる。このようなデータパケット同志の衝突が起こった場合、衝

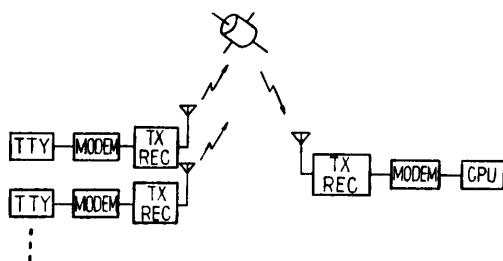


図 1 アロハシステム  
Fig. 1 ALOHA system.

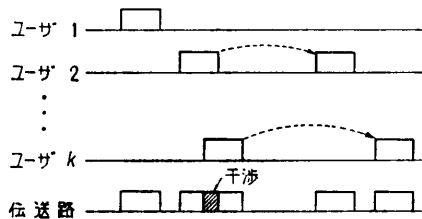


図 2 アロハシステムにおける多重化の方式  
Fig. 2 Multi-access for ALOHA system.

突した 2 個のデータパケットは互いに誤り、ある遅延の後に再送される。この仮定のもとに pure ALOHA システムの通信容量は  $1/(2e)$  であることが既に示されている<sup>1)</sup>。

ここで述べる pure ALOHA-ACK 返送方式は pure ALOHA 方式において半 2 重回線を仮定し、送信局が送信したデータパケットを受信局において誤りなく受信したときのみ受信局は送信局に ACK パケット (以下 ACK と略す) を返送する方式である。送信局はデータパケットを送信してからある一定時間内に ACK を正しく受信しない場合には、そのデータパケットの伝送は失敗したと判断し、あるランダムな遅延の後にそのデータパケットを再送し、ACK を正しく受信するまで繰返す。N. Abramson は雑音によるデータパケットの誤りを無視して pure ALOHA 方式の設計を行ったが、現実には雑音によるビット誤り率は非常に高く、これを無視することはできない。ここではシステムの雑音による通信容量の減少と半 2 重回線に ACK を返送することによる通信容量の減少について報告する。

すべての到来するメッセージデータパケット及び再送データパケットの生起はそれぞれ独立であり、その分布はポアソン分布であると仮定する。また、端局の数が多くと仮定しているため ACK の生起もポアソン分布で近似できるものとする。データパケットの生起がポアソン分布であるという仮定は、データパケットの平均再送遅延がデータパケット伝送時間に比べて十分大きいときは妥当な仮定であり、この仮定に基づいて得られるスループットの結果は、平均再送遅延が有限のときのスループットの上限を与えることとなる。

データパケットが再送される場合は、送信局が ACK を正しく受信しない場合であり、これには次の 5 つの要因が考えられる。

- (A) データパケット同志が衝突して互いに干渉して誤りを起こす場合
- (B) データパケットが雑音によって誤る場合
- (C) データパケットが ACK と衝突して互いに干渉して両者が同時に誤りを起こす場合
- (D) ACK が雑音によって誤りを起こす場合
- (E) ACK 同志が衝突して互いに干渉して誤りを起こす場合

上記のどの一つが起こっても、そのデータパケットは伝送路上で誤ったと解釈され再送されることになる。しかし、ACK はデータパケットに較べ非常に短かく、

またその発生数も少ないため、(E)の要因は他の要因と比較しその確率は非常に小さいので、ここでは無視する。

以下スループットの解析を行っていくに際して、次の文字を定義する。

$R$ : 単位時間当りに伝送される再送をも含めた平均データパケット数

$r$ : 単位時間当りに伝送される ACK の平均数

$r'$ : 単位時間当りに成功する ACK の平均数

$n_{dp}$ : データパケット構成ビット数

$n_{ap}$ : ACK パケット構成ビット数

$\tau_{dp}$ : データパケット幅

$\tau_{ap}$ : ACK パケット幅

$\eta$ : 雑音によるビット誤り率

次に、上記の(A)~(D)の要因によってデータパケット及び ACK が誤る確率を求める。

(A) 与えられたデータパケットが他のデータパケットと衝突して誤る確率は

$$P_1 = 1 - \exp(-2R\tau_{dp}).$$

(B) データパケットが雑音によって誤る確率は

$$P_2 = 1 - (1 - \eta)^{n_{dp}}.$$

(C) データパケットが ACK と衝突して誤る確率は

$$P_3 = 1 - \exp\{-r(\tau_{dp} + \tau_{ap})\}.$$

(C') ACK がデータパケットと衝突して誤る確率は

$$P_4 = 1 - \exp\{-R(\tau_{dp} + \tau_{ap})\}.$$

(D) ACK が雑音によって誤る確率は

$$P_5 = 1 - (1 - \eta)^{n_{ap}}.$$

データパケットが誤りを起こす確率は、上記に示した(A), (B), (C)の確率の和集合の確率で表わされる。従って、

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^3 (1 - P_i) \\ = 1 - (1 - \eta)^{n_{dp}} \exp\{-2R\tau_{dp} - r(\tau_{dp} + \tau_{ap})\}$$

となる。また、ACK が誤りを起こす確率は(C'), (D)の確率の和集合の確率で表わされる。

$$P_a = 1 - \prod_{i=4}^5 (1 - P_i) \\ = 1 - (1 - \eta)^{n_{ap}} \exp\{-R(\tau_{dp} + \tau_{ap})\}.$$

となる。従って、単位時間当りに伝送される再送をも含めたデータパケットの平均数  $R$  と単位時間当りに伝送される ACK の平均数  $r$  との関係は

$$r = R(1 - \eta)^{n_{ap}} \exp\{-2R\tau_{dp} - r(\tau_{dp} + \tau_{ap})\} \quad (1)$$

となり、また単位時間当りに伝送される ACK の平均数  $r$  と単位時間当りの ACK の平均成功数  $r'$  との関係は、

$$r' = r(1 - \eta)^{n_{ap}} \exp\{-R(\tau_{dp} + \tau_{ap})\} \quad (2)$$

となる。ここで、 $S' = r'\tau_{ap}$ ,  $S = r\tau_{ap}$ ,  $G = R\tau_{dp}$  とおくと(1), (2)式は、次式のようにになる。

$$S = G(1 - \eta)^{n_{dp}} \exp\left\{-G - S\left(1 + \frac{n_{ap}}{n_{dp}}\right)\right\} \quad (3)$$

$$S' = S(1 - \eta)^{n_{ap}} \exp\left\{-G\left(1 + \frac{n_{ap}}{n_{dp}}\right)\right\} \quad (4)$$

ここで、 $G$ はチャネルトラヒック(すべてのデータパケットのチャネル占有率であり、 $S'$ はチャネルスループット(送受信の完了したデータパケットのチャネル占有率)である。(3), (4)式よりチャネルトラヒックとチャネルスループットとの関係を求め図3に示す。システムの通信容量はチャネルスループットの最大値で定義される。よって、システムの通信容量  $S_{max}$  は、雑音によるビット誤り率  $\eta$  によって変化し、図3より明らかなように、次の値を持つ。

$\eta = 10^{-3}$	$S_{max} = 0.037$
$\eta = 10^{-4}$	$S_{max} = 0.096$
$\eta = 0$	$S_{max} = 0.104$

ただし、この値はデータパケットが 1024 bits, ACK パケットが 32 bits として計算した値である。参考のためにデータパケット同志の衝突のみを考慮して理想的に運用されている pure ALOHA 方式のチャネルスループットを同図中に描いておいた。以上から半2重回線により ACK パケットをデータパケットと同一チャネルで伝送するとき、システムの通信容量は全2重回線で ACK パケットを伝送するときの約 3/5 程度となることがわかる。また、我々が問題としている都市雑音(ビット誤り率  $10^{-3}$  程度)においてシステムを運用するとき通信容量は無雑音のときに比べ 1/2 以

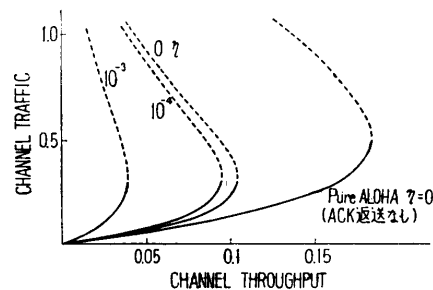


図3 純アロハ ACK 返送方式における通信容量  
Fig. 3 Channel traffic vs. channel throughput for a pure ALOHA-ACK method (DATA packet size 1024 bits, ACK packet size 32 bits).

下に落ちこんでしまい、pure ALOHA-ACK 返送方式において最大チャンネル利用率は 37% である。図 3 において破線で示されている部分は、再呼びによりシステムが輻輳して不安定となる領域である。

次に、このシステムを同時に使用できる最大端局数  $K_{max}$  は、各端局からのメッセージデータパケットの平均発生率を  $\lambda$ 、データパケット幅を  $\tau_{dp}$ 、システムの通信容量を  $S_{max}$  とすると、近似的に

$$K_{max} = S_{max} / (\lambda \cdot \tau_{dp}) \quad (5)$$

で表わされる。このシステムにおいて、ビット誤り率と同時に稼働できる最大端局数との関係を図 4 に示す。ここで、データ速度は 10 kbits/sec として計算した。

### 2.2 slotted ALOHA-ACK 返送方式

次に、pure ALOHA 方式の通信容量を改善する方式として提案されている slotted ALOHA 方式についても pure ALOHA-ACK 返送方式と同様の仮定を行い雑音を考慮して解析した。このシステムは図 5 に示すようにチャンネルの時間軸に対してデータパケット伝送時間に等しくタイムスロットを切り、データパケットは必ずこのスロットに同期して伝送されるが、各ユーザがどのスロットを選ぶかは全く自由である。そして、この方式は、送信局が送信したデータパケットに対し受信局がそのデータパケットを誤りなく受信したときのみ受信局は送信局に ACK を返送する。送信局はある一定時間内に ACK を正しく受信しない

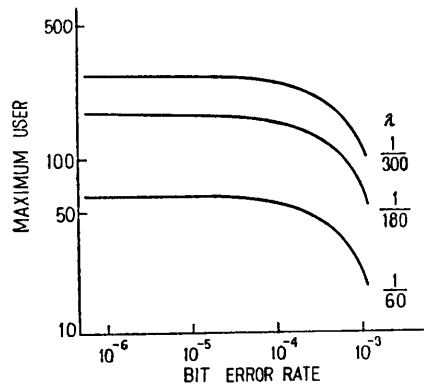


図 4 純アロハ ACK 返送方式における収容端局数  
Fig. 4 Maximum users with  $\lambda$  as a parameter for a pure ALOHA-ACK method.



図 5 スロットアロハ方式  
Fig. 5 Slotted ALOHA channel.

とき、あるランダムなスロットの後に同一データパケットを再送する。この手続きはデータパケットの送信が成功して ACK が誤りなく受信されるまで繰返されるシステムである。

仮定としては pure ALOHA-ACK 返送方式と同様に各端局からのデータパケットのトラヒックはそれぞれ独立であり、その生起はポアソン分布に従うものとする。

データパケットが再送される場合としては、送信局において ACK が正しく受信されない場合であり、その原因としては pure ALOHA-ACK 返送方式の場合と同じである。2.1 節と同様の計算により、単位時間当りに伝送されるデータパケットの平均数  $R$  と単位時間当りに伝送される ACK の平均数  $r$  との関係は

$$r = R(1-\eta)^{n_{dp}} \exp\{-(R+r)\tau_{dp}\} \quad (6)$$

であり、また、単位時間当りに伝送される ACK の平均数  $r$  と単位時間当りの ACK の平均成功数  $r'$  との関係は

$$r' = r(1-\eta)^{n_{dp}} \exp(-R\tau_{dp}) \quad (7)$$

である。ここで、 $S' = r'\tau_{dp}$ 、 $S = r\tau_{dp}$ 、 $G = R\tau_{dp}$  とおくと(6)、(7)式は、次式で表わせる。

$$S = G(1-\eta)^{n_{dp}} \exp(-G-S) \quad (8)$$

$$S' = S(1-\eta)^{n_{dp}} \exp(-G) \quad (9)$$

(8)、(9)式よりチャンネルトラヒック  $G$  とチャンネルスループット  $S$  との関係を求め、図 6 に示す。

### 2.3 slotted ALOHA-ACK 返送II方式

2.2 節で述べた slotted ALOHA-ACK 返送方式ではデータパケットについてのみチャンネルにタイムスロットを切った。そのため、データパケット同志の衝突ばかりかデータパケットと ACK との衝突による誤りもデータパケット再送の大きな原因の 1 つと考えられる。そこでデータパケットと ACK との衝突による

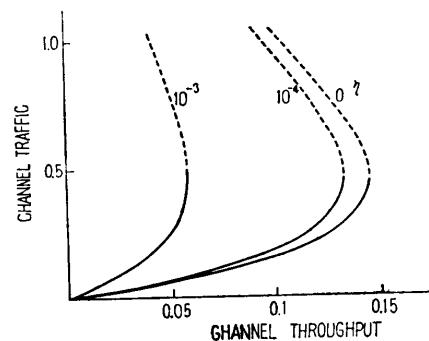


図 6 スロットアロハ ACK 並用方式の通信容量  
Fig. 6 Channel traffic vs. channel throughput for a slotted ALOHA-ACK method.

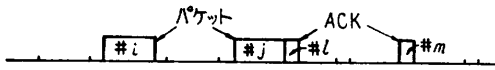


図 7 ACK に対するスロットを用いる方式  
Fig. 7 Slotted ALOHA II channel.

誤りを避けるために図 7 のようにデータパケットと ACK のためのスロットを別々に切り、データパケット及び ACK はそれぞれのスロットに伝送されるという slotted ALOHA-ACK 返送方式を提案する。

データパケットの再送原因は 2.1 節の pure ALOHA-ACK 返送方式とほぼ同じであり、異なっているのはデータパケットと ACK との衝突が存在しないことである。

単位時間当りに伝送されるデータパケットの平均数  $R$  と単位時間当りに伝送される ACK の平均数  $r$  との関係は

$$r = R(1-\eta)^{n_{dp}} \exp \{-R(\tau_{dp} + \tau_{ap})\} \quad (10)$$

となる。また、単位時間当りに伝送される ACK の平均数と単位時間当りの ACK の平均成功率  $r'$  との関係は

$$r' = r(1-\eta)^{n_{ap}} \exp \{-r(\tau_{dp} + \tau_{ap})\} \quad (11)$$

となる。ここで、 $S' = r'\tau_{dp}$ ,  $G = R\tau_{dp}$  とおくと (10), (11) 式よりチャネルトラヒックとチャネルスループットとの関係は

$$S' = G(1-\eta)^{n_{dp} + n_{ap}} \exp \left[ -G \left( 1 + \frac{n_{ap}}{n_{dp}} \right) \right] - (1-\eta)^{n_{dp}} \exp \left( -G \left( 1 + \frac{n_{ap}}{n_{dp}} \right) \right) \quad (12)$$

で表わされ、図 8 に示した。

2.4 slotted ALOHA-ACK 返送 III 方式

slotted ALOHA-ACK 返送 III 方式は 2.3 節の slotted ALOHA-ACK 返送 II 方式と全く同じシステムを考

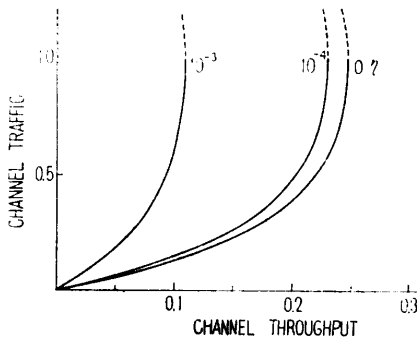


図 8 ACK に対するスロットを用いる方式の通信容量  
Fig. 8 Channel traffic vs. channel throughput for a slotted ALOHA-ACK II method.

えている。slotted ALOHA-ACK 返送 II 方式では、各々の端局及び計算機の処理時間（ここでは、データパケットを受信してから ACK を返送するまでの時間）が一般的にそれぞれ異なっていると計算を行ったが、各々の端局及び計算機の処理時間を全く等しいと仮定したのが slotted ALOHA-ACK 返送 III 方式である。この仮定のもとでは ACK 同志の衝突は起こらない。つまり slotted ALOHA-ACK 返送 II 方式と異なるのは ACK 同志の衝突による ACK の誤りが存在しなくなったことである。

単位時間当りに伝送されるデータパケットの平均数  $R$  と単位時間当りに伝送される ACK の平均数  $r$  との関係は次式で示される。

$$r = R(1-\eta)^{n_{dp}} \exp \{-R(\tau_{dp} + \tau_{ap})\} \quad (13)$$

また、単位時間当りに伝送される ACK の平均数  $r$  と単位時間当りの ACK の平均成功率  $r'$  との関係は

$$r' = r(1-\eta)^{n_{ap}} \quad (14)$$

である。従って、(13), (14) 式により  $S' = r'\tau_{dp}$ ,  $G = R\tau_{dp}$  とおくとチャネルトラヒックとチャネルスループットとの関係は次式で与えられる。

$$S' = G(1-\eta)^{n_{dp} + n_{ap}} \exp \left\{ -G \left( 1 + \frac{n_{ap}}{n_{dp}} \right) \right\} \quad (15)$$

これを図 9 に示す。

以上のように ALOHA システムを基として各種 ALOHA-ACK 返送システムについて、雑音によるデータパケット及び ACK パケットの誤りを考慮して、これら ALOHA-ACK 返送システムの通信容量を計算した。これらの結果からわかるように、我々が今問題としているビット誤り率  $10^{-3}$  程度の雑音においてこれらシステムの通信容量は無雑音の場合と比較して 1/2 以下になってしまう。また、1000 ビット程度のデータパケットを仮定するとき、雑音によるビッ

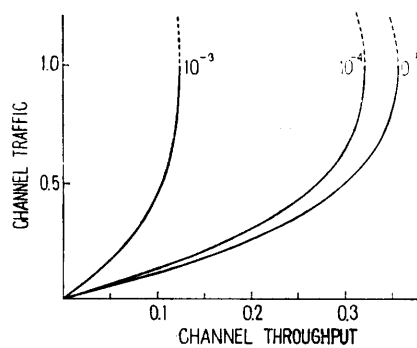


図 9 ACK 返送時間を固定したスロット方式の通信容量  
Fig. 9 Channel traffic vs. channel throughput for a slotted ALOHA-ACK III method.

ト誤り率が  $10^{-4}$  程度以下であるならば雑音による通信容量は大きく減少しないことが明らかになった。

### 3. 再送多数決方式

#### 3.1 再送多数決方式の概要

現在使用しているデータパケットは 1000 ビット程度から成り立っているので、雑音によるビット誤り率が  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  程度の回線において、データパケットの多くはこの雑音によって誤り、このために通信容量の低下をきたしていることが前節までの計算で明らかになった。そこで、それをいくらかでも補償するために再送多数決方式を考える。このシステムでは、送信局はデータパケットを送信してからそのデータパケットに対する ACK を誤りなく受け取るまで同一データパケットを  $m$  回 ( $m$  は奇数) 伝送する。また、受信局は送信局から送られてきたデータパケットを誤りなく受け取ったならば ACK を返送し、誤って受け取ったならばそのデータをバッファに記憶しておき、送信局からのデータパケットの再送を待つ。そして、受信局は  $m$  回目までの伝送されたデータパケットがすべて雑音によって誤った場合にのみその誤った  $m$  個のデータパケットの各々対応するビットに対して多数決をとり、その結果、そのデータパケットに誤りがなければ ACK を返送し、誤っていれば最初から繰返すという方式である。

データパケットが  $m$  回とも雑音によってのみ誤りを起こしたとすると、実際のビット誤り率が  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  程度であるから、 $m$  個のデータパケットの各々対応する同一ビットが雑音によって誤るという確率は非常に低いから多数決をとった結果、そのデータパケットはほとんど正しく受信されると考える。

#### 3.2 再送多数決方式のアルゴリズム

次に、3.1 節で述べた再送多数決のアルゴリズムを考える。ここでは、 $m=3$  として解析を行う。

まず次の文字を定義する。

$R_i$ : 単位時間当りの  $i$  回目のデータパケットの平均トラフィック数 ( $i=1, 2, 3$ )

$P_i$ :  $i$  回目のデータパケットが誤りを起こす確率 ( $i=1, 2, 3$ )

$P_e$ : ACK が誤りを起こす確率

$r_i$ : 単位時間当りの  $i$  回目のデータパケットに対する ACK の平均伝送数 ( $i=1, 2, 3$ )

$r'$ : 単位時間当りに成功する ACK の平均数

単位時間当りに伝送されるデータパケットの平均数は

$$R = \sum_{i=1}^3 R_i \quad (16)$$

であり、単位時間当りに伝送される ACK の平均数は

$$r = \sum_{i=1}^3 r_i \quad (17)$$

である。多数決に寄与する 2 回目の伝送は 1 回目のデータパケットが誤った場合であり、1 回目のデータパケットに対する ACK が誤ったときの再送データパケットはこれには当てはまらない。故に

$$R_2 = R_1 P_1 \quad (18)$$

である。また、多数決に寄与する 3 回目の伝送は

$$\begin{aligned} R_3 &= R_2 P_2 \\ &= R_1 P_1 P_2 \end{aligned} \quad (19)$$

である。1 回目、2 回目、3 回目のデータパケットに対するそれぞれの ACK の平均伝送数は次式によって与えられ

$$r_1 = R_1(1 - P_1) \quad (20)$$

$$r_2 = R_2(1 - P_2) = R_1 P_1(1 - P_2) \quad (21)$$

$$r_3 = R_3(1 - P_3) = R_1 P_1 P_2(1 - P_3) \quad (22)$$

となる。単位時間当りに伝送される ACK の平均数は

$$r = R_1(1 - P_1 P_2 P_3) \quad (23)$$

であり、単位時間当りに伝送されるデータパケットの平均数は、

$$R = R_1(1 + P_1 + P_1 P_2) \quad (24)$$

となる。単位時間当りに ACK が成功する平均数は

$$r' = r(1 - P_e) \quad (25)$$

となる。従って、次式となる。

$$r' = \frac{R(1 - P_e)}{1 + P_1 + P_1 P_2} (1 - P_1 P_2 P_3) \quad (26)$$

そこで、pure ALOHA-ACK 返送方式に上記に示した  $m=3$  の再送多数決方式を適応すると、システムのチャネルトラフィックとチャネルスループットとの

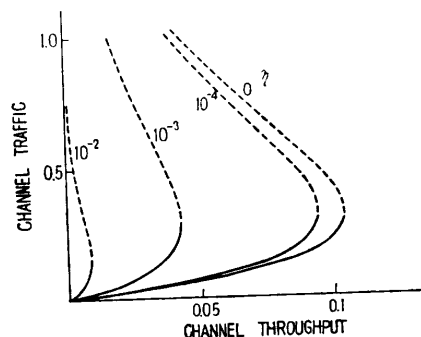
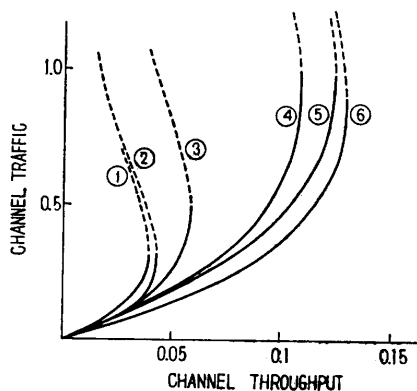


図 10 多数決方式を用いた通信容量  
Fig. 10 Channel traffic vs. channel throughput for a pure ALOHA-ACK decision method of majority method.

表 1 各種アロハ方式の通信容量  
Table 1 Channel capacities of various ALOHA schemes.

方 式	ビット 誤り 率			
	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	0
pure ALOHA-ACK 返送方式	0.0	0.0369	0.0960	0.1044
slotted ALOHA-ACK 返送方式	0.0	0.0579	0.1328	0.1456
slotted ALOHA-ACK 返送Ⅱ方式	0.0	0.1083	0.2297	0.2469
slotted ALOHA-ACK 返送Ⅲ方式	0.0	0.1240	0.3209	0.3567
pure ALOHA-ACK 返送再送多数決方式	0.0089	0.0426	0.0951	0.1044
slotted ALOHA-ACK 返送Ⅲ再送多数決方式	0.0211	0.1291	0.3209	0.3567



- ① pure ALOHA-ACK method
- ② pure ALOHA-ACK decision of majority method
- ③ slotted ALOHA-ACK method
- ④ slotted ALOHA-ACK II method
- ⑤ slotted ALOHA-ACK III method
- ⑥ slotted ALOHA-ACK III decision of majority method

図 11 誤り率  $10^{-3}$  の場合の各種方式の通信容量の比較  
Fig. 11 For  $\eta=10^{-3}$  channel traffic vs. channel throughput for various ALOHA channels.

関係は 図10 のようになる。

#### 4. 各種方式の比較

今まで述べてきた各種 ALOHA-ACK 返送方式の通信容量をまとめて表 1 に示す。また、雑音によるビット誤り率が  $10^{-3}$  の場合において各種方式におけるチャネルスループットを 図 11 に示した。これより slotted ALOHA-ACK 返送Ⅲ方式が通信容量としては最も有益であることがわかる。また、 $m=3$  の再送多数決方式を用いた場合と用いなかった場合とを比較してみると、再送多数決方式を用いても通信容量の増

加はあまり大きくないことがわかる。しかし、チャネルトラヒックが小さな範囲において、再送多数決方式は多数決を行わない場合に較べチャネルスループットに大きな改善があることが確かめられた。

#### 5. むすび

本論文では、ALOHA システムを基礎として雑音を考慮したときの各種 ALOHA-ACK 返送方式の通信容量を求め、その減少を定量的に示した。また、本論文により雑音の存在する実際のチャネルにおいて、システムが安定に運用できるチャネルトラヒックの範囲がそれぞれの方式において示したチャネルスループットの曲線により求められる（各曲線において実線で示される部分）。その他に、システムを同時に使用できる最大端局数も (5) 式によってそれぞれ求めることができる。ここでは pure ALOHA-ACK 返送方式についてのみ 図 4 に示した。

再送多数決方式については、データパケットの多くが雑音によってのみ誤りを起こすとき（つまり、チャネルトラヒックが小さくデータパケット同志の衝突及びデータパケットと ACK との衝突が起こる確率が小さいとき）には有効な方法といえよう。しかし、チャネルトラヒックが大きくなってチャネルスループットがデータパケット同志の衝突及びデータパケットと ACK との衝突によって制限されてくると、 $m$  回のデータパケットがすべて雑音によってのみ誤るという確率は非常に小さくなってしまい多数決をとっても意味がないものとなる。

このように、ALOHA 方式（ランダムアクセス方式）を基礎としている以上、データパケット同志の衝突によるデータパケットの誤りは避けられず、フローコントロールを行わない限り既に計算されている slotted ALOHA 方式の通信容量である  $1/e$  以上には通信容量を上げることができない。また、雑音によるデータパケット及び ACK の誤りによる通信容量の減少は現段階では避けることができない。従って、今後の課題として通信容量を上げるために、データパケット同志の衝突及びデータパケットと ACK との衝突によるデータパケット及び ACK の誤りを減少させる方法を考えてゆく必要がある。また、データパケットや ACK に誤り訂正機能を持たせれば通信容量を改善することができる。

以上これらの計算の結果は、これら方式の最大収容端局数、最適データ速度等を求める基礎となるであろう。

う。このような雑音の存在する実際の無線パケット交換網の設計の一助となれば幸いである。

**謝辞** 本研究を行うにあたり、種々御検討を頂き、更に有益なる御助言を賜った東北大学佐藤利三郎教授、野口正一教授、長沢庸二助教授、電気通信大学大泉充郎教授、遠藤一郎教授、日本電気(株)勅使河原可海氏、その他通信衛星を利用した電子計算機網に関する研究グループの諸氏に深謝する。

本論文の数値計算は名古屋工業大学計算センターにおいて行ったものである。

また本研究は、文部省科学研究費の補助を得て行われたものであることを付記し、謝意を表する。

### 参 考 文 献

- 1) ノーマン・エブラムソン, フランクリン F. クオ: コンピュータ・ネットワーク, 産業図書, コンピュータ・サイエンス翻訳選書, 5.
- 2) 喜田村, 高月: コンピュータネットワーク, 電気通信協会 (1975).
- 3) 桑原: 周波数を共有するパケット無線ネットワーク, 日経エレクトロニクス (1975, 7, 28) pp. 48-61.
- 4) Abramson, N.: Packet Switching with Satellite, NCC, 1973, pp. 695-702.
- 5) Roberts, L. G.: Dynamic Allocation of Satellite Capacity through Packet Reservation, Proc. AFIPS, 1973, NCC, pp. 711-716.
- 6) Kleinrock, L. and Tobagi, F. A.: Carrier Sense Multiple Access for Pocket Switched Radio Channels, Proc. ICC. 1974, pp. 21 B1-21 B7.
- 7) Endo, I., Sakai, T., and Futakawa, Y.: An Experiment of Date Transmission Satellite Channel, PACC. Net. Symp. Proc. 1975, pp. 95-100.
- 8) 根本, 佐藤: 衛星を介した VHF 帯データ送受信結果, 電子通信学会研究会資料, CS 76-58 (1976. 8).
- 9) 岩波, 池田: PSK-FM 信号のインパルス雑音とガウス雑音に対する誤り率の計算, 信学会論文誌, Vol. J60-A, No. 6, pp. 505-512 (6. 1977).
- 10) 佐藤他: 科学衛星 ATS-1 によるデータ伝送 (I)——東北大学~ハワイ大学間データ伝送システム——東北大学電通談話会記録, Vol. 43, 4, pp. 155-159 (昭和 49 年 11 月).
- 11) 佐藤他: 同 (II)——受信システム——, 東北大学電通談話会記録, Vol. 43, 4, pp. 160-163 (昭和 49 年 11 月).

(昭和 52 年 2 月 17 日受付)

(昭和 53 年 7 月 11 日採録)