

解説

—コンピュータ・ネットワーク その5—

無線によるパケット通信\*

勅使河原 可海\*\*

1. はじめに

1960年代末より盛んになってきたコンピュータネットワークは、ARPANETの開発によってパケット交換を主体とする分散型ネットワーク技術が確立され、今や各国でコンピュータネットワークが計画・実施されてきている。ARPAタイプの汎用分散型ネットワークの研究は一段落し、その後現在注目を浴びているのが、地上無線や通信衛星によるパケット通信である。無線によるパケット通信は、1968年からハワイ大学のALOHAシステムで始められた地上無線を用いたタイムシェアリングシステムの開発にその端を発しているが<sup>1)</sup>、1975年のNCC(National Computer Conference)では、この無線によるパケット通信のネットワーク、すなわちパケット無線ネットワーク(Packet Radio Network)がメインテーマとして取り上げられ大いに議論された<sup>2)-9)</sup>。

これは、ARPANETに携わっていた研究者達により構成されたパケット無線グループ、ARPANET衛星システムグループの研究グループが、その研究成果の集大成として発表されたものとみなすことができる。

本稿では、ALOHAシステムを実例として引用しつつ、パケット無線ネットワークについて、その構成から始め、無線チャネルのアクセス方式を概説し、最後に技術的問題点に言及する。

2. パケット無線ネットワークの構成

2.1 基本的構成

パケット無線ネットワークの基本的構成は、図-1に示されるように、端末、中継器、局から成る。端末と局間の通信はパケット単位でなされ、端末から送信されたパケットは、直接局に送られるか、または局ま

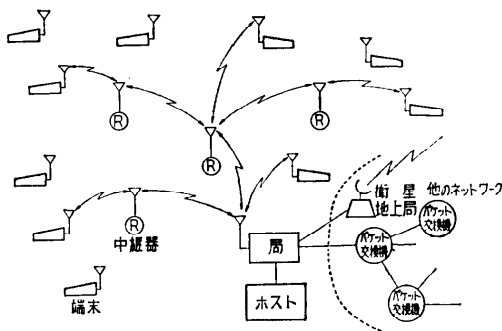
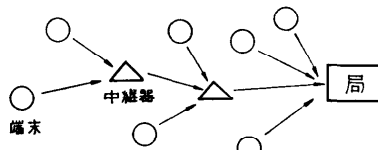


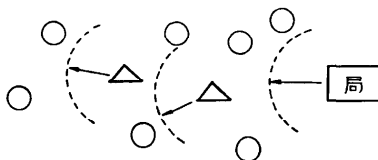
図-1 パケット無線ネットワークの構成

での距離が遠かったり、途中で障害物があって直接局と通信できないときは、中継器を介して局に送られる。局はゲイトウェイを通じて直接ホストと接続しており、ホストで何らかの処理が行われるか、有線回線または衛星回線により接続している他のネットワークのホストで処理がなされる。処理された結果は局から直接または中継器を介して端末へパケット単位で送られる。

パケット無線ネットワークでは、端末・局間の無線チャネルは通常端末から局へと、局から端末へと別々の周波数が割当てられる。図-2に示されるように端末



(a) マルチアクセスチャネル



(b) ブロードキャストチャネル

図-2 無線チャネルの構成

\* Packet Communications via Radio and Satellite by Yoshimi TESHIGAWARA (EDP Systems Support Division, Nippon Electric Co., Ltd.)  
日本電気(株)情報処理システム支援本部

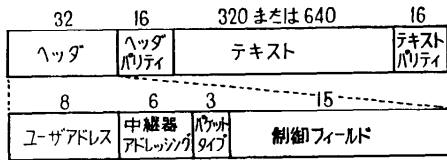


図-3 パケット形式 (各フィールド上部数字はフィールド長: ビット)

から中継器を介して局にパケットを伝送する上り方向の無線チャンネルを、マルチアクセスチャンネルまたはランダムアクセスチャンネルと呼び、局から端末への下り方向のチャンネルをブロードキャストチャンネルと呼ぶ<sup>10)</sup>。マルチアクセスチャンネルに関しては、1つのチャンネルを多数のユーザが共用するため、チャンネルを効率的に使うための工夫が後述のように種々なされている。端末からのパケット送信の基本となる方式は、有線通信と同様に、パケット送信後確認符号 (ACK) が返ってこないときは、パケットを再送することであるが、チャンネルの共有のため、2つ以上の端末で同時に出されたパケットは衝突するので、そのための再送が多く、パケット無線通信では有線通信に比べて再送が大きなファクタとなる。

パケット無線ネットワークにおけるパケットの形式は、典型的な例として ALOHA システムで使われている形式を示すと図-3 のようである<sup>10), 11)</sup>。データパケットとしては、テキスト部が 40 byte のハーフパケットと 80 byte のフルパケットの2種類使われている。ヘッダ部の制御フィールドは、エラー制御、フロー制御などに用いられ、またテキスト長を指定して可変長パケットも使えるようになっている。無線チャンネルの伝送エラー率が高いことを考慮してヘッダだけのパリティが付加されている。

2.2 ALOHANET の構成

ALOHA システムは、ハワイ大学において情報計算科学科と電気工学科の教授・研究者を中心として構成されている研究プロジェクトであり、無線によるタイムシェアリングシステムの開発を目的として始められたもので、地上無線と衛星通信によるコンピュータ通信網の研究をテーマとしてシステムが開発されている<sup>1), 4)</sup>。ALOHA システムのネットワーク構成は、図-4 に示すようであり、パケット無線ネットワークが ALOHANET といわれるものである。パケット無線端末は TCU (Terminal Control Unit) または PCU (Programmable Control Unit) と

呼ばれる装置により、中継器・局とのインタフェースをとっている。局は MENEHUNE (ハワイ語で伝説の中にでてくる小人) と呼ばれており、ヒューレット・パッカード社のミニコンピュータ HP 2100 が用いられている<sup>11)</sup>。局は、大学の計算センタの IBM 370/158 と接続されており、それが ALOHANET の1つの HOST となっており、端末からセンタのタイムシェアリングシステムが利用できるわけである。MENEHUNE はゲイトウェイにより ARPANET の TIP (Terminal Interface Message Processor) と接続され、TIP は通信衛星 INTELSAT IV の地上局と結びついて、そこから衛星通信により米本土の ARPANET との結合が実現されている。TIP には、マイクロプロセッサにより O/S 部分をファームウェア化した BCC 500 と呼ばれる中型コンピュータも接続されているので、ALOHANET 内の端末は、BCC 500 を ARPANET の1ホストとして利用できる。

さらに MENEHUNE は通信衛星 ATS-1 とも ALOHA システム内にある簡易地上局によりインタフェースを持ち、太平洋沿岸諸国の大学・研究機関とも通信できる。これが PACNET (太平洋地域教育用コンピュータ・ネットワーク) と呼ばれるものであり、現在はアラスカ大学、電気通信大学、東北大学と衛星によるパケット通信の実験を行っており、その実用化を目指している<sup>12)-14)</sup>。

ALOHANET の無線チャンネルは、UHF (極超短波) で帯域幅 100 kHz、端末から局へのマルチアクセスチャンネルの搬送周波数は 407.350 MHz、局から端末へのブロードキャストチャンネルは、413.475 MHz

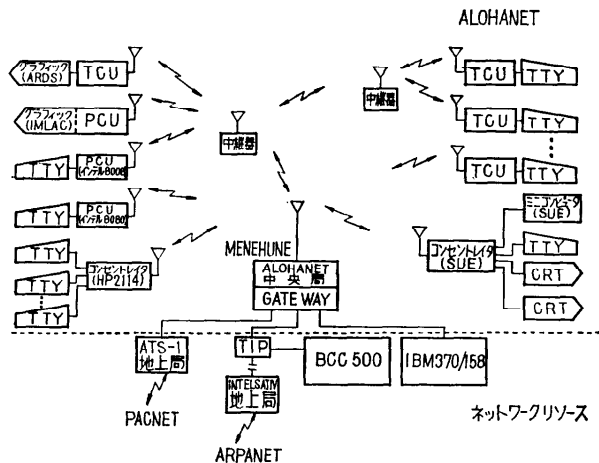


図-4 ALOHA システムネットワーク構成

のものが使われている。チャンネルの速度は 24 k BPS であるが、端末より速度を 110 BPS から 9600 BPS まで指定して使われる。

### 2.3 パケット無線ネットワークの構成機器

パケット無線ネットワークを構成する3つの要素、即ち端末、中継器、局について、それらの機能を中心として概説する。

#### 2.3.1 端 末

パケット無線端末は、図-5 に示されるように、

- a. トランシーバ、モデム、コーデック（符号/復号器）の無線通信部。
- b. ロジック回路または処理プロセッサ、バッファから成るネットワークアクセスと制御ロジック。
- c. キーボード、ディスプレイなどの入出力部。

の3つの部分から構成される。

一般にパケット端末に要求される機能は、

- 1) パケットヘッダの作成
- 2) パケットアドレスの確認
- 3) パケットチェックサムの計算
- 4) パケットの蓄積と再送
- 5) 重複パケットなどエラーに対する処理
- 6) 無人端末では、端末の生死を局が判別できるための状態の通知

などが挙げられ、新しい機能として、

- 7) テキストの暗号化

も付け加えられている<sup>2), 8)</sup>。

ALOHA システムでは、これらの機能を前述のTCU、またはPCUで実現している。TCUは、古いバージョンでハードウェアロジックが用いられたが、PCUはINTEL 8008 や 8080 のマイクロプロセッサが使われている。したがって、PCUは、プログラム可能であるので、伝送プロトコルの変更などに対する柔軟性や、設計・製作の容易性、経済性、コンパクト

さなどの特長がある。TCUが8,000~10,000ドルしたものが、PCUでは2,000~3,000ドルで実現できる。マイクロプロセッサの低価格化に伴い、さらに安く実現できるようになる。

現在は、端末の軽量化をさらに進め、ポータブルな無線端末の開発が進められている。実験用のポータブル端末は、20字×4行のディスプレイ、20字/行のプリンタ付の72鍵のキーボードである。大きさは、ちょうど小型のスーツケース位で、重さは電源別で約10kgである。将来は、無線通信部とネットワークロジック部を併せて100立方インチ（約12cm立方）、5ポンド（約2.3kg）以下のものが要望されている<sup>9)</sup>。

#### 2.3.2 中 継 器

中継器は、当初は受信信号を増幅して送信する単純な中継器であったが、パケット処理を主体とするネットワーク制御ロジックを組み込んだ知的な中継器が開発されている<sup>6)</sup>。機能としては、

- 1) 端末の1)~5)の機能
- 2) 中継器の生死を局が判別できるための状態の通知
- 3) 局または端末への伝送パスに関して最適な次の中継器を決定するルーティング

があり、また新しい機能として統計収集のための

- 4) トラフィック状況の把握
- 5) 測定用トラフィックの発生。

も考えられている<sup>15)</sup>。

中継器についても端末同様小型・軽量化が検討されスタンフォード研究所(SRI)で試作器が作られている。それは、30cm立方、18kg、消費電力25ワットというものである。LSIやVLSIなどの利用により、さらにコンパクト化、低消費電力化が進められている<sup>6)</sup>。

#### 2.3.3 局

局の構成は、無線通信部と種々のパケット処理やネットワーク管理を行うネットワーク制御部（ソフトウェア）から成り立っている。ネットワーク制御部は、通常ミニコンピュータによって実現されている。

局の機能としては、

- 1) 稼動中の端末と中継器のダイナミックなディレクタリの作成などのネットワーク管理機能
- 2) パケット無線ネットワークと他のネットワーク間とのインタフェースをとるゲイトウェイ機能
- 3) パケットの蓄積
- 4) アカウンティング機能

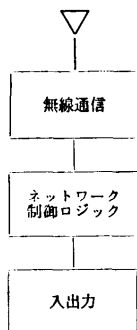


図-5 無線端末の構成

- 5) 端末までの最適な通信路を決めるルーティング機能
- 6) フロー制御
- 7) 統計収集
- 8) 端末間のスイッチング機能

などが挙げられる。その他にも、遠隔地の端末をデバッグしたり、分散化されたデータベース管理などの複数局をコーディネートする高度な機能も考えられている<sup>7)</sup>。

ALOHANETにおける局は、前述のMENEHUNEと呼ばれるものであり、端末および中継器からくるパケットを処理し、ネットワーク資源、即ち IBM 370/158, ARPANET, PACNET への割り振りを行い、また逆にネットワーク資源からのメッセージを端末に送り出している。これは、ARPANET の TIP と同じようにメッセージのマルチプレクサ/コンセントレータとして機能している。

MENEHUNE のハードウェアとソフトウェアの構成は図-6 に示すようであり、ハードウェアとしては、ミニコンピュータ HP 2100 (32k 語、サイクルタイム 0.98 μ 秒) が中心で、これには DMA 2 チャンネルと 14 の I/O ポートがある。また ARPANET とのインターフェースは別個のミニコンピュータ HP 2115 (8k 語、サイクルタイム 2 μ 秒) でとられている。ソフトウェアの主要部分となるのが ALOHA ドライバであり、前述の局の機能を実現している他に、端末に送られた各パケットの必要なディスプレイ時間の計算や必要に応じた待ちパケットのキューイング、また PCU からへのファイル伝送の制御など、種々の機能を持っている<sup>11), 16)</sup>。

無線通信部は、アンテナ、デュプレクサ、送受信機モデムおよび符号/復号器から構成されている。符号/復号器は、シリアルパラレル変換、パリティチェ

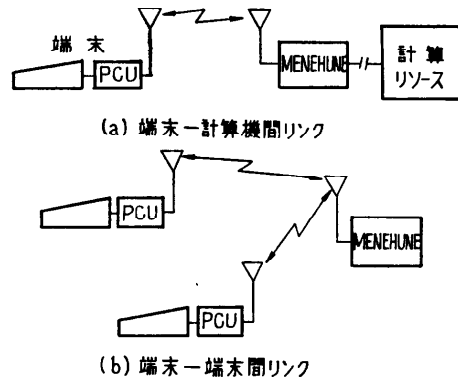


図-7 MENEHUNE によるリンク

ックワードの生成と挿入、およびパケットのパリティのチェック、受信パケットのスタートの検出、送信パケットの頭に挿入される同期リーダの生成などの機能を持ち、HP 2100 の 2 つの I/O ポートと全二重ビットパラレルのインターフェースを持っている。

MENEHUNE は、図-7(a)に示されるように端末と計算機とのインターフェースをとるだけでなく、前述のように図-7(b)で示される端末間のインターフェースもととり、無線ネットワーク内でのメッセージ(パケット)交換機の役割をも果しており、ユーザ相互の通信を可能にしている。

2.3.4 その他の構成機器

パケット無線ネットワークを構成する基本要素の端末・中継器・局以外に ALOHANET では、ミニコンピュータを用いて、複数台の無線端末を制御するコンセントレータが開発されている。これを用いれば、端末ごとに付けられている無線通信部および TCU または PCU が不要でなくなり、経済的なシステムが実現できる。図-4 に示されるように、ミニコンピュータは Lockhood SUE, HP 2114 が使われている。

SUE コンセントレータは、SUEMUX と呼ばれ<sup>17)</sup>、4 台の端末を制御して、局または中継器とのインターフェースをとる PCU と同じ機能をもつ。端末は最大 8 台まで接続可能である。ソフトウェアは、無線 I/O, 実行プログラム、ターミナル I/O, バッファの各モジュールから成り、プログラムとバッファに各々 2k 語割り当てられている。

3. 無線チャンネルのアクセス方式

無線パケット通信では、1 つのチャンネルを多

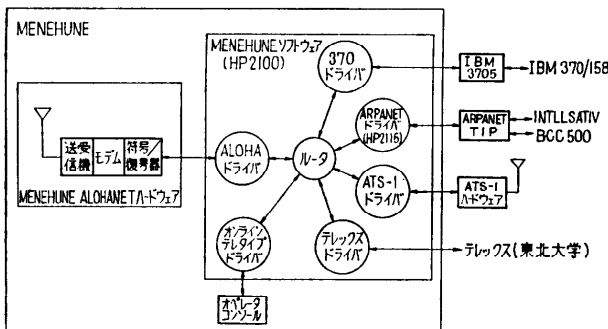


図-6 MENEHUNE ハードウェア/ソフトウェア構成

数のユーザが共有するので、チャンネルをできるだけ効率良く使うことが必要である。現在考えられているいくつかの方式について比較・説明する。

3.1 純 ALOHA とスロット ALOHA

パケットをランダムに無線チャンネルに送り出すのが純 ALOHA (または単に ALOHA) 方式であり、図-8 に示されるパケットの衝突が起きたら端末からある間隔をおいて再送を行う<sup>1)</sup>。しかしこの方式ではパケットの一部が重なってもパケットの全体が駄目になってしまうので、パケットの送信のタイミングを同期させることにより、パケットの衝突の確率を小さくすることが考えられた。即ち、図-9 に示されるようにチャンネルを1パケットの伝送時間ごとのタイムスロットに切って、このスロットに各端末からのパケット送信を合わせるわけで、パケットは衝突するときは全体が重なり、そうでなければ全然重ならないので、純 ALOHA 方式のように一部だけ重なって両者とも駄目になることはない。この方式がスロット ALOHA 方式と呼ばれるものである<sup>18)</sup>。

端末からの入力トラフィックのうち局に有効に伝送される実質的なトラフィックをスループット  $S$ 、 $S$  に衝突による再送パケットを加えたトラフィックをチャンネルトラフィック  $G$  とする。  $S$  および  $G$  はチャンネル容量を1としたときの割合で表し、チャンネル容量を 100% フルに使ったときには  $S=1$  となる。したがって、 $S$  は有効パケットに使われた回線使用率とみなすことができる。  $S$  と  $G$  の関係を図-10 に示す。最大スループットは、実質的に使えるチャンネル容量で、純 ALOHA

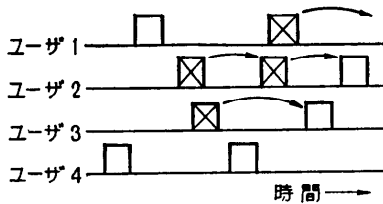


図-8 純 ALOHA 方式

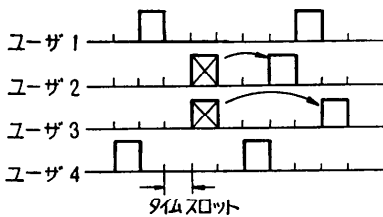


図-9 スロット ALOHA 方式

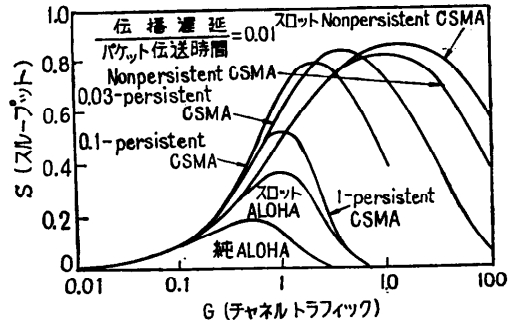


図-10 ALOHA 方式と CSMA 方式のスループット

方式では約 18% しかいかないのに、スロット ALOHA ではその 2 倍の約 37% となっている。  $S$  が最大スループットを達成してからは、  $S$  は減少するのに対して  $G$  が增大するので、パケットの平均再送回数  $G/S$  が急激に増加し、パケットが生起してから首尾良く局に到達するまでの遅延時間が增大する。したがって、  $S$  が最大となるときの  $G$  より小さい  $G$  の範囲で意味がある。

3.2 CSMA (搬送波検知) 方式

純 ALOHA, スロット ALOHA 方式に対して、各端末がチャンネルのビジー状態をみて送信する方式が CSMA (Carrier Sense Multiple Access: 搬送波検知) 方式である<sup>3), 19)</sup>。この方式は、パケット送信時に搬送波を検知して他ユーザによってチャンネルが使われていないかをチェックし、空いているときに送信しようとするものである。

これには 2 つの基本的方式があり、1 つは、チャンネルをチェックして空いていればパケットを送信するが、使われていればチャンネルが空くまで待って空いたらすぐにパケットを送信する方式で、送信することに必ず固執する (persist) ことから、1-persistent CSMA と呼ばれる。これは他ユーザと衝突する確率が高い。これに対してもう 1 つの方式は、チャンネルが空いたら送るが使われていればパケットが衝突した時と同じように、ある再送間隔だけ待ってチャンネルの空きを調べ空いていれば送信する。まだ使われていれば再度待ってチャンネルの空きを調べるというもので、パケット送信に固執しないので、Nonpersistent CSMA と呼ばれる。

1-persistent CSMA を一般化した方式として、次の方式が考えられている。それは、チャンネルの空きをチェックして、空いていれば  $p$  の確率でパケットを送信し、  $1-p$  の確率で 1 スロットだけ待ってから、もしチャンネルが空いていれば前と同様に  $p$  の確率でパケッ

トを送信する。もしその時チャンネルが使われていれば、ある再送間隔に基づいた再送のスケジュールを行う。はじめにチャンネルの空きをチェックした時に使われていれば、チャンネルが空くまで待って、空いたら前述の操作を行う。これが *p*-persistent CSMA と呼ばれるものである。

種々の CSMA 方式が前述の ALOHA 方式と共に、図-10 において比較して示されている。スロット Nonpersistent CSMA 方式が最大のスループットを示すことがわかる。図中、パケット伝送時間とは1パケットをある伝送速度の無線チャンネルで伝送するのに要する純粋の伝送時間であり、伝播遅延は、電波が伝わる速度(約30万 km/sec)に対する遅延である。例えば、1パケット1000ビット、チャンネル速度9600 BPSでは、パケット伝送時間は104 msec、伝送距離が300 kmの伝播遅延は1 msecであり、伝播遅延/パケット伝送時間は約0.01となる。

### 3.3 BTMA (ビジートーン) 方式

無線ネットワークにおいて、端末間の距離が遠く無線波が到達不可能であったり、途中で障害物があったりしてお互に通信できないとき、それらの端末を隠れ端末 (Hidden Terminal) というが、これらの端末が存在するときは、お互に搬送波が検知できないので、CSMA 方式でもパケットの衝突が増え、チャンネルのスループットが低下する<sup>3),20)</sup>。この解決策として考えられたのが、局からチャンネルがビジーのときにビジートーンを送信し、端末側がこれを検知してチャンネルの空き具合を調べパケット送信のタイミングを考えると方式で、これが BTMA (Busy Tone Multiple Access: ビジートーン)方式と呼ばれるものである<sup>20)</sup>。BTMA 方式を用いれば隠れ端末の影響をなくすることができるが、局がビジーを検出してから端末にビジートーンを送り、端末側でビジー状態を知るまでに遅延が生ずるので、チャンネルのビジー状態がずれて伝わるため、その分だけチャンネルの利用効率が悪くなる。

### 3.4 SRMA (分割チャンネル予約) 方式

ランダムアクセスチャンネルを送信要求とメッセージ伝送のチャンネルに分割し、送信要求にしたがってパケット送信チャンネルを局がスケジュールするのが SRMA (Split-channel Reservation Multiple Access: 分割チャンネル予約)方式である<sup>3),21)</sup>。メッセージ長に対する送信要求パケット長の割合が0.1より小さいときは、SRMA 方式は CSMA, BTMA 方式よりスループットの点で勝れているが、その割合が大きくなる

表-1 種々のチャンネルアクセス方式に対する最大スループット

チャンネルアクセス方式	最大スループット
純 ALOHA	0.184
スロット ALOHA	0.368
1-persistent CSMA	0.529
スロット 1-persistent CSMA	0.531
Nonpersistent BTMA	
100 kHz 帯域幅	0.680
1 MHz 帯域幅	0.720
0.1-persistent CSMA	0.791
Nonpersistent CSMA	0.815
0.03-persistent CSMA	0.827
スロット nonpersistent CSMA	0.857
完全スケジューリング	1.000

と逆転する。送信要求は、CSMA または ALOHA 方式のランダムアクセス方式で送られるが、スループット、遅延、パフォーマンスは送信要求のアクセス方式のパフォーマンスに依存しており、待ち CS-SRMA は、ALOHA-SRMA より良いパフォーマンスを示す。

これまで示した種々のアクセス方式について最大スループットを比較して表-1に示す。

その他の方式では、パケットをくし型の信号構造とし、受信側で高密度標本化を行い、ランダムにパケットを送信するにも拘らず、スロット ALOHA よりも大きな最大スループットが得られる combed ALOHA 方式も検討されている<sup>22)</sup>。

## 4. 衛星チャンネルのアクセス方式<sup>23)~28)</sup>

衛星通信のチャンネルを地上局からアクセスする方式は、前章で示した無線チャンネルのアクセス方式と同じものを使うことも可能であるが、衛星チャンネルでは、パケットの伝送時間に比べて、伝播遅延が大きく無視できないので、この点に考慮を払わねばならない。ALOHA 方式のスループットは、伝播遅延の大きさには関係ないが、CSMA, BTMA 方式では、伝播遅延がパケット伝送時間に比べて大きくなるとスループットは低下してくる<sup>19),20)</sup>。

### 4.1 時分割多重方式に基づくアクセス方式

通常考えられる方式としては、各地上局にタイムスロットを割り当てる時分割多重 (TDMA) 方式がある。この方式では、スロットが固定的に割り当てられているので、地上局数が少なく各地上局でトラフィックが均衡している場合には優れた方式であるが、逆にトラフィックが少なく地上局の数が多い場合はチャンネルの利用率が低くなり、またトラフィックの不均衡がある場合には都合が悪い。これに対して、TDMA を基準

として空いているスロットも他の地上局がラウンドロビン方式で使用する方式が提案され<sup>26)</sup>、高トラフィックの局が比較的少ない場合には有効に適用できる。また同じように TDMA を基本とし、短い 1 パケットメッセージは TDMA モードで伝送し、ファイルなどの長いメッセージは予約情報を TDMA のスロットを利用して送り、長いタイムスロットを予約するモードで伝送する衛星パケット交換方式も提案されている<sup>27)</sup>。

この方式では、ファイル型の長メッセージが会話型の短メッセージ伝送の即時性を損なわず、またトラフィックの不均衡さに対してもパフォーマンスがそれ程低下しないという特長がある。しかしながら、TDMA を基本としているため、低トラフィックの局が多数ある場合に難がある。

#### 4.2 予約方式

既に前節でも示したがタイムスロットを予約してからパケットを伝送し、パケットの衝突を避けることにより、チャンネルの利用率を上げようとして予約方式が考えられている。典型的な予約方式としては、スロット ALOHA 方式により予約用に設けられたタイムスロットをアクセスし予約を行うランダム予約方式がある<sup>25)</sup>。この方式は、特にチャンネルの利用率の高いところでは伝送遅延に関して TDMA やスロット ALOHA 方式より優れた特性を示し、コストパフォーマンスも良い。

また、予約スロットを TDMA 方式で行う順次予約方式も提案されている<sup>28)</sup>。この方式は、伝送遅延に関して、地上局数が多いと局数に応じた長さの予約部が必要のためランダム予約方式に比べて悪くなるが、チャンネル利用率が高いところではかなり良い特性を示し、チャンネル利用率の低いところでは、ランダム予約方式より多少悪くなるが、その差はほんの僅かである。

### 5. 無線パケット通信の適用

無線パケット通信の特長を生かして効果的に適用できる対象を、適用領域と適用システムに分けて以下に示す。

#### 5.1 無線パケット通信の適用領域

無線パケット通信が適している領域として

- (1) 自動車、船舶などの移動性ユーザ。
- (2) 僻地、離島などで電話回線が利用できないところ。
- (3) ピーク時にトラフィックが集中し、高帯域幅を必要とするところ。

- (4) トラフィック量が非常に少なく、回線接続では不経済なところ。

などが挙げられる<sup>5)</sup>。

ALOHA システムにおいて無線パケット通信が取り上げられた理由には、ハワイが 8 つの島から成り、特に島間の通信回線の品質が悪いこと、さらに通信コストが高いことが挙げられ、また衛星通信を利用したのはハワイが米本土と離れているという地理的条件からきており、ハワイ特有の環境により無線パケット通信が有効に適用されている。

#### 5.2 無線パケット通信の適用システム

無線パケット通信の適用例として、端末からコンピュータをアクセスするのに無線を用いることが必要であり、あるいは有効であるシステムを考えてみる。

##### (1) 船舶、航空機ネットワーク

船舶や航空機内に置かれた端末からコンピュータを利用するのに無線パケット通信は移動性ユーザという特長を生かしており最も適していると言える。収集された気象データ、海洋データ、地形データの入力やそれらのデータの解析を行うのに有効に利用できるであろう。また、船内の端末から患者の診断結果や検査データ等を病院のセンタに送ってカルテなどの作成・保存を行ったり、指示を受けたりする船内医療診断システムも考えられる。

##### (2) 僻地医療・教育システム

電話回線のない山奥や離島などの僻地においても前述の無線パケット通信による医療診断システムは有効である。診察用の巡回バス等に無線端末を積載して、診断・検査データをオンラインでセンタに送り処理する僻地医療システムが考えられる。また僻地における情報処理教育や研究者達の科学技術計算を行うのにも無線パケット通信は適用できる。

##### (3) 限定地域内ローカルネットワーク

ハワイ大学の ALOHA システムでも使われているように、大学の構内や工場・研究所の敷地内で、各研究室や作業室から構内、敷地内にあるコンピュータを利用するローカルなネットワークにパケット無線は効果的に使われる。大学または工場・研究所からあまり遠くなければ、端末を自宅に持ち帰り使用することも可能である。またローカルな地域情報ネットワークに CATV の代用として無線パケット通信を使うことも考えられる。

##### (4) 警察パトロールシステム

パトロールカーに搭載した無線端末より指紋を入力

して照合して貰うとか、免許証の照合、盗難車の問合せを行なうなど迅速な応答が要求される警察システムに適用でき、す早く事件等に対処できる。

#### (5) 自動車管制、デマンドバス

現在既に開発が進められているが、自動車内の簡易ディスプレイ装置にセンタから送られた最適経路情報を表示する経路指示システムに無線パケット通信が適用できる。同様に、デマンドバスにおいてもセンタのコンピュータで最適経路が決定され、無線パケット通信によりバス内のディスプレイ装置に経路指示が出される。また各停留所では、センタから無線により送られ、ディスプレイに表示された現在のバスの位置と待ち時間を知ることができる。これらのシステムでは、無線通信の特長である一斉通信の機能が有効に活用されている。

### 6. パケット無線ネットワークの問題点

パケット無線ネットワークの研究・開発における主な技術的問題点を挙げる。

#### 6.1 システムの安定性

ランダムアクセスチャンネルでは、入力トラフィックが多くなるとパケットの衝突確率が高くなり、パケットの再送が増す。そこで、パケットの再送間隔が短いとますますトラフィックが増加し、パケットは衝突し再送を繰り返すのみで目的地には伝送できなくなり、いわゆるシステムは不安定状態に入る。そこでシステムを安定に保つため、入力トラフィックを制限したり、再送間隔を制御したり、または両者を組合せたりする動的チャンネル制御方式が提案されている<sup>29)</sup>。

ALOHA システムにおいてもスロット ALOHA 方式について、システムが不安定状態に入ってから元に戻るまでの平均リカバリ時間や不安定状態に入るまでの平均ダウン時間の検討がなされており<sup>30), 31)</sup>、ALOHA システムで開発されたパケット無線ネットワークのシミュレータを用いて最適再送間隔などの検討が理論的解析と併行して行われている<sup>32), 33)</sup>。今後もシステムの安全性を含む無線チャンネルの過渡状態の解明が進められねばならない。

#### 6.2 捕捉効果

パケットが端末より同時に送信されると衝突が起きるが、もしある端末出力が他の端末からの出力より大きく、他からのパケットに打ち勝てば、その出力の大きい打ち勝ったパケットはたとえ他のパケットの衝突が起きてても正しく受信され得る。これを捕捉(キャプ

チャ)効果と呼び、高出力のユーザと低出力のユーザとに分けてチャンネルをアクセスすると、最大スループットが約 50% 改善されるという結果が出されている<sup>34)</sup>。また、捕捉効果の特殊な場合については、パケットスループットとトラフィックとの関係が解析されている<sup>35)</sup>、更に一般的な場合についてパケット無線における捕捉効果の検討とその効果的な実現方法の開発が望まれる。

#### 6.3 機密保護と確証

無線を使った通信では、誰でも聞こうと思えば聞くことができるので、特に機密保護については注意を払わねばならない。このためデータの暗号化が研究されており、暗号器の開発が進められている。パケット無線ネットワークでは、始点の端末で暗号化し、最終目的地の HOST のみで解読されるようにすることを考えている<sup>2)</sup>。

また、無線チャンネルは誰でもアクセスできるので、送信側と受信側の両者についてお互いに確証(Authentication)を取り、偽者の送信先なり送信元を見破らねばならない。中継器同志で考えてみると、各中継器は同じアルゴリズムを持っていてしかもそのアルゴリズムはダイナミックに変えることができるとする。偽者の中継器を見つけるのは、プロトコルの違反や、アルゴリズムの相違を監視していれば良い<sup>2)</sup>。簡単な確実な確証の方法の開発が必要である。

#### 6.4 プロトコル

パケット無線ネットワークにおけるプロトコルの問題は、前述のチャンネルのアクセス方式やシステム安定性に関する最適パケット再送間隔の決定、可変長パケットの考察<sup>36)</sup>、ファイルメッセージの会話型メッセージへの影響などの検討を含むフロー制御などが考えられる<sup>37)</sup>。パケット無線ネットワークのプロトコルは、端末と中継器間や中継器相互間などのホップ間のパケット無線間プロトコルと、端末・局間プロトコルおよびプロセス間プロトコルに階層化される<sup>38)</sup>。パケット形式も階層化に応じて各レベルのプロトコルごとに必要情報を順次ヘッダに付加していくのが理想的であるが、現実的にはヘッダ部の多くのフィールドは種々のプロトコルレベルに共通に使って、ヘッダのオーバーヘッドを少なくしている。また、プロトコルの階層化により、誤り制御を目的とするパケット伝送の到達確認方法について、中継器間などのホップごとにとる HBH (Hop-by-Hop) 方式と、端末と局間でとる ETE (End-to-End) 方式との比較・選択が問題となる。無



線通信のようにホップごとの伝送成功確率の低いときや、ホップ数の多いときは HBH 方式の方がチャネル利用率に関して優れていることが明らかにされている<sup>39)</sup>。

### 6.5 伝送品質

無線チャネルは、雑音の影響やフェージングの落ち込みなどのため伝送品質が悪く、特にデジタルデータの伝送に問題がある。そこで、誤り検出・訂正符号を用いたり、繰り返し送信による多数決判別の採用などが検討され、誤り訂正符号として畳み込み符号を用い伝送品質がかなり改善されることが試されており、実用化を目指している。

### 6.6 ネットワーク構成

パケット無線ネットワークの構成に関して、特に端末からのトラフィック、端末の分布などを考慮した中継器、および局の位置、通信範囲、台数などの決定の問題がある。また、中継器の位置については、見通しが良いところが適しているため、山の頂上などに設置するが、電力供給や保守が容易にできることも考慮に入れねばならない。

### 6.7 混合型ネットワーク

衛星通信のネットワークについては、地上の回線網と組合せた混合型ネットワーク (Mixed Media Network と呼ばれる) の研究がなされている。衛星チャネルは伝播遅延が大きい、低価格で広帯域の伝送が可能であるので、衛星チャネルを地上の回線とうまく組合せて効率良いネットワークを設計しようとするものである。この混合型ネットワークの設計と応用に役立つであろう種々のトレードオフを議論し<sup>40)</sup>、パケットの伝送時間を最小にするルーティングやトラフィックの割り振りについても検討されており<sup>41)</sup>、今後も SIMP (Satellite IMP) をサブネットにどう組込むのか問題など衛星通信の経済性の問題と関連して検討すべき事柄は多い。

### 6.8 その他の問題点

端末から中継器を介して局へパケットを伝送するときや、またはその逆のときには、中継器は自分の分担する端末のみパケットを中継し、それ以外のは棄却することにより端末と局間のルートを決定するルーティングの問題があり、中継器、端末の稼動状況に応じてダイナミックに最短経路となるルーティング方式が必要となる<sup>42)</sup>。

また無線端末、中継器の通信領域がその出力の大きさによって限定されることから、地域的に多重を行う

方法の検討も望まれる。

更に、これまでのパケット無線ネットワークは全て局が1台しかない場合について検討されてきたが、局が複数台存在する多局のネットワークについてもスループットやパケット伝送遅延などの特性の解析も問題として残されている。

## 7. おわりに

本稿では、無線パケット通信について、パケット無線ネットワークの構成や無線チャネルのアクセス方式など技術的概説を中必として種々の問題点を列挙したが、言及しなかったパケット無線ネットワークの経済性の評価や実用化の検討などは今後の課題として取り組まねばならない<sup>43)</sup>。

無線パケット通信は ALOHA システムを中心とする研究の実績から、またその便宜性、経済性から、コンピュータコミュニケーションの有効手段として今後更に開発と実用化が進められるものと思われる。LSI 技術をはじめ薄膜回路、液晶マトリックスなど電子技術の進歩により、経済的で効率良いパケット無線装置の開発や、周波数拡散変調 (Spread Spectrum Modulation) や誤り訂正符号などの通信技術のパケット無線への採用などと、将来有望視されている衛星によるデータ通信システムの開発・実用化に伴って無線パケット通信の将来は大きく開かれている。

## 参考文献

- 1) N. Abramson: The ALOHA System, Computer-Communication Networks, p. 525, Prentice-Hall (1973).
- 2) R. E. Kahn: The Organization of Computer Resources into a Packet Radio Network, AFIPS Conf. Proc. Nat. Comput. Conf. Vol. 44, pp. 177~186 (1975).
- 3) L. Kleinrock and F. Tobagi: Random Access Techniques for Data Transmission over Packet-Switched Radio Channels, *ibid.*, pp. 187~201.
- 4) R. Binder, N. Abramson, F. F. Kuo and D. Wax: ALOHA Packet Broadcasting-A Retrospect, *ibid.*, pp. 203~215.
- 5) H. Frank, I. Gitman and R. V. Slyke: Packet Radio System-Network Considerations, *ibid.*, pp. 217~231.
- 6) S. C. Fralick and J. C. Garrett: Technological Considerations for Packet Radio Networks, *ibid.*, pp. 233~243.
- 7) J. Burchfiel, R. Tomlinson and M. Beeler: Functions and Structure of a Packet Radio

- Station, *ibid.*, pp. 245~251.
- 8) S. C. Fralick, D. H. Brandin, F. F. Kuo and C. Harrison: Digital Terminals for Packet Broadcasting, *ibid.*, pp. 253~261.
  - 9) 桑原啓治: 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, 7月28日号, pp. 46~61 (1975).
  - 10) R. Binder: ALOHANET Protocols, ALOHA System Technical Report, B74-7 (1974).
  - 11) R. Binder, W. S. Lai and M. Wilson: The ALOHANET MENEHUNE-Version II, ALOHA System Technical Report, B74-6(1974).
  - 12) 海老原義彦, 野口正一, 大泉充郎: 汎太平洋教育研究用ネットワーク-東北大学 ALOHA ネットワーク, 情報処理, Vol. 16, No. 7, pp. 650~653 (1975).
  - 13) R. Sato, et al: Satellite Data Communication and its Information Processing, Proc. of PAC-NET Symposium, pp. 83~93 (1975).
  - 14) I. Endo, T. Sakai and Y. Futakawa: Experiment of Data Transmission on Satellite Channel, *ibid.*, pp. 95~100 (1975).
  - 15) F. A. Tobagi, S. E. Lieberman and L. Kleinrock: On Measurement Facilities in Packet Radio Systems, AFIP Conf. Proc. Nat. Comput. Conf., Vol. 46, pp. 589~596 (1976).
  - 16) 勅使河原可海: 無線パケット通信, コンピュータネットワーク最近の技術動向, 情報処理学会講習会テキスト, pp. 45~54 (1976).
  - 17) R. Okano: SUEMUX, ALOHA System Working Document, CCG/W-56 (1975).
  - 18) N. Abramson: Packet Switching with Satellites, AFIPS Conf. Proc. Nat. Comput. Conf., Vol. 42, pp. 695~702 (1973).
  - 19) L. Kleinrock and F. Tobagi: Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics, IEEE Trans. Commun., Vol. COM. 23, pp. 1400~1416 (1975).
  - 20) F. Tobagi and L. Kleinrock: Packet Switching in Radio Channels: Part II-The Hidden Terminal Problem and the Carrier Sense Multiple Access Mode with a Busy Tone, *ibid.*, pp. 1417~1433 (1975).
  - 21) F. Tobagi and L. Kleinrock: Packet Switching in Radio Channels: Part III-Polling and (Dynamic) Split-Channel Reservation Multiple Access, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-24, No. 8, pp. 832~845 (1976).
  - 22) 田坂修二, 安田靖彦: 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, Vol. 59-A, No. 8, pp. 644~651 (1976).
  - 23) 高月敏晴: コンピュータネットワーク, p. 298, 電気通信協会, 東京 (1975).
  - 24) L. Kleinrock and S. S. Lam: Packet-Switching in a Slotted Satellite Channel, AFIPS Conf. Proc. Nat. Comput. Conf., Vol. 42, pp. 703~710 (1973).
  - 25) L. G. Robert: Dynamic Allocation of Satellite Capacity through Packet Reservation, *ibid.*, pp. 711~716.
  - 26) R. Binder: A Dynamic Packet Switching System for Satellite Broadcast Channels, Proc. of Int. Conf. Commun., pp. 41.1~41.5 (1975).
  - 27) 岩橋 努, 中西 暉, 真田英彦, 手塚慶一: 衛星パケット交換方式, 電子通信学会交換研究会資料, SE-75-78 (1975).
  - 28) 齊藤忠夫, 上田孝一: 衛星データ通信における多重アクセス方式, 電子通信学会交換研究会資料, SE 76-5 (1976).
  - 29) S. S. Lam and L. Kleinrock: Dynamic Control Schemes for a Packet Switched Multi-Access Broadcast Channel, AFIPS Conf. Proc. Nat. Comput. Conf., pp. 143~153 (1975).
  - 30) P. Murthy: Analysis and Static Control Procedures for Slotted ALOHA with Blocking, ALOHA System Technical Report, B 75-9 (1975).
  - 31) P. Murthy: A Slotted ALOHA System without Blocking-Modelling, Analysis and Control, ALOHA System Technical Report, B75-16 (1975).
  - 32) M. J. Ferguson: On the Control, Stability, and Waiting Time in a Slotted ALOHA Random-Access System, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-23, No. 11, pp. 1306~1311(1975).
  - 33) H. Kobayashi, Y. Onozato and D. Huynh: An Approximate Method for Design and Analysis of an ALOHA System, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-25, No. 1, pp. 148~157 (1977).
  - 34) J. J. Metzner: On Improving Utilization in ALOHA Networks, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-24, No. 4, pp. 447~448 (1976).
  - 35) N. Abramson: The Throughput of Packet Broadcasting Channels, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-25, No. 1, pp. 117~128 (1977).
  - 36) M. J. Ferguson: An Approximate Analysis of Delay for Fixed and Variable Length Packets in an Unslotted ALOHA Channel, ALOHA System Technical Report B76-6 (1976).
  - 37) R. Binder: A Simple Mixed-Traffic Techniques for Ground-Based ALOHA Channels, ALOHA System Technical Report B75-6(1975).
  - 38) Network Analysis Corporation: Packet Radio Communication Protocols, Local, Regional and Large Scale Integrated Networks, Sixth Semi-annual Technical Report, Vol. 2, pp. 1.1-1.16 (1976).

- 39) I. Gitman: Comparison of Hop-by-Hop and End-to-End Acknowledgement Schemes in Computer Communication Networks, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-24, No. 11, pp. 1258~1262 (1976).
- 40) D. Huynh, H. Kobayashi and F.F. Kuo: Design Issues for Mixed Media Packet Switching Networks, AFIPS Conf. Proc. Nat. Comput. Conf., Vol. 45, pp. 541~549 (1976).
- 41) D. Huynh, H. Kobayashi and F.F. Kuo: Optimal Design of Mixed Media Packet Switching Networks: Routing and Capacity Assignment, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-25, No. 1, pp. 158~169 (1977).
- 42) I. Gitman, R.M. Van Slyke and H. Frank: Routing in Packet-Switching Broadcasting Radio Networks, IEEE Trans. Commun., Vol. COM-24, No. 8, pp. 926~930 (1976).
- 43) 日本情報処理開発協会: 国際情報ネットワーク技術調査小委員会報告書 (1977).  
(昭和52年4月22日受付)  
(昭和52年6月22日再受付)
-