

Title	多元放送型伝送路を用いたパケット通信方式に関する研究
Author(s)	六浦, 光一
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3088003">https://doi.org/10.11501/3088003</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

多元放送型伝送路を用いた  
パケット通信方式に関する研究

平成 3 年 10 月

六 浦 光 一

## 内容梗概

本論文は、多元放送型伝送路を用いたパケット通信網に対し、基本的性能を改善する新しい方式を提案するもので、筆者が詫間電波工業高等専門学校において行ってきた研究をまとめたものである。具体的には、チャンネル容量の再利用を図る網構成方式、および捕捉効果を用いたアクセス制御方式とそれを適用したプロトコルを提案し、それらの有効性を定量的に明確化することを中心に、全体を序論、結論を含め6章で構成している。

第1章は、序論であり、研究の背景、目的および本論文の概要について述べる。

第2章では、空間分割多重化によるチャンネル容量の再利用を目的とした、パケット無線網の新しい網構成方式、ローカル／グローバル網構成について述べる。本網構成では、全チャンネル容量を、先ず、ローカルチャンネルおよびグローバルチャンネルに分割する。ローカルチャンネルは更に分割され、空間的チャンネル容量の再利用に用い、スループット性能の改善を図る。また、グローバルチャンネルは、網全域規模の情報伝送を可能とするために用いられる。本章では、ローカル／グローバル網構成の原理を詳説し、ローカル、グローバル両チャンネルの遅延比をパラメータとして、基本的性能の解析を行ない、数値評価を与える。更に、ローカル、グローバル各チャンネルへのチャンネル容量の配分に関し種々の指標による配分方式を導入し、与えられた網条件に対し最適なローカル／グローバル網構成の実現を可能とする。本網構成を適用することにより、平均遅延に大きな影響を与える事なくパケット無線網の総スループットの相当な改善が可能となる。

第3章では、プロトコルレベルより下位の、アクセス制御レベルにおける対応として、時変出力制御方式につき述べる。時変出力制御方式は、パケット送出中にその出力を時間の関数として増大させることにより、パケット到着時刻の差を受信パワー差に変換し捕捉効果を生じさせる方式である。この捕捉効果により、衝突状態のパケッ

トにおいても所定の時間差があれば、先頭の packets が正常に受信されスループット性能を改善する。本章では、時変出力制御方式の原理を詳説し、その特長を述べ、具体的な制御手順を提示する。さらに、送信機に必要とされるダイナミックレンジを最小とする、最適な出力制御関数を導く。

4章では、時変出力制御方式を、多元放送型伝送路によるパケット通信方式の最も基本的アクセスプロトコルである p-ALOHA に適用した、新しいアクセスプロトコル v-ALOHA につき述べる。ここでは、v-ALOHA プロトコルを解説しその特長を述べ、スループット性能の解析を行なう。さらに数値的性能評価により、固定長パケットに関し s-ALOHA に近い性能が得られること、また可変長パケットに関し s-ALOHA より優れた性能が可能であることを示す。v-ALOHA は、p-ALOHA 本来のプロトコルの簡便性を保持し、且つ時変出力制御方式によりスループット性能の改善を実現している。このため、近年急速に普及を開始している VSAT (Very Small Aperture Terminal) のアクセスプロトコルとして適するものと考えられる。

5章では、同期機能が可能なパケット通信網を対象とし、時変出力制御方式の s-ALOHA への適用に関して述べる。本来 s-ALOHA は同期を基本とし、一方時変出力制御方式はパケット到着の時間差を必要としている。本章では、この相矛盾する要求を解決した新しいプロトコルを、固定長パケットに関し捕捉区間付s-ALOHA として与え、可変長パケットに関し末尾同期s-ALOHA として与える。両プロトコルとも時変出力制御方式の適用により、s-ALOHA を大幅に上回るスループット性能の改善を実現しているため、同期機能を有するパケット通信網に対し、有力なアクセスプロトコルを与える。

6章は結論であり、上記研究全体についての成果を要約する。

# 目次

第1章 序論	.....	1
第2章 ローカル／グローバル網構成	.....	7
2.1 緒言	.....	7
2.2 空間分割多重化によるチャネル容量の再利用	.....	8
2.3 ローカル／グローバル網構成	.....	10
2.3.1 ローカル／グローバル網構成の基本原則	.....	10
2.3.2 ローカル／グローバル網構成の特性	.....	12
2.4 基本性能解析	.....	13
2.5 チャネル容量配分方式の解析	.....	18
2.6 性能の数値的検討	.....	21
2.6.1 基本性能	.....	21
2.6.2 各チャネル容量配分方式による性能と網構成の最適化	.....	28
2.7 結言	.....	32
第3章 時変出力制御方式（PCT方式）	.....	35
3.1 緒言	.....	35
3.2 捕捉効果を利用する制御方式	.....	36
3.3 PCT方式	.....	37
3.3.1 原理	.....	37
3.3.2 制御方式	.....	39
3.3.3 特性	.....	41

3. 4	P C T方式の実現性	.....	42
3. 5	最適出力制御関数	.....	46
3. 5. 1	問題の定式化	.....	46
3. 5. 2	最適制御関数	.....	47
3. 6	結言	.....	51
第 4 章	時変出力制御方式を用いたp-ALOHA方式 (v-ALOHA)	.....	53
4. 1	緒言	.....	53
4. 2	V S A T網と p - A L O H A	.....	53
4. 3	v - A L O H A	.....	56
4. 4	性能解析	.....	57
4. 5	性能の数値的検討	.....	60
4. 5. 1	固定長パケット形式	.....	61
4. 5. 2	可変長パケット形式	.....	63
4. 6	結言	.....	66
第 5 章	時変出力制御方式を用いたs-ALOHA方式 (s-ALOHA/PCT)	.....	67
5. 1	緒言	.....	67
5. 2	s - A L O H Aと P C T方式の適合性	.....	67
5. 3	s - A L O H A / P C T	.....	70
5. 3. 1	捕捉区間付 s - A L O H A	.....	70
5. 3. 2	末尾同期 s - A L O H A	.....	72
5. 4	捕捉区間付 s - A L O H Aの性能評価	.....	74

5. 4. 1	性能解析	.....	74
5. 4. 2	数値評価	.....	77
5. 5	末尾同期 s-ALOHA の性能評価	.....	80
5. 5. 1	性能解析	.....	80
5. 5. 2	数値評価	.....	84
5. 6	結言	.....	89
第 6 章 結論		.....	91
謝辞		.....	95
文献		.....	96
付録		.....	100

# 第1章

## 序 論

コンピュータネットワークは近年急速にその底辺を拡大しつつあり、計算機間通信の需要は急激に増大している<sup>[1]・[2]</sup>。この需要に対応する主要な手段として、地上無線または衛星通信系を多元放送型伝送路として用いた通信網が有望である<sup>[3]・[4]</sup>。この多元放送型伝送路による通信網は、網構成の柔軟性において優れている。このため、近年の網収容端末の急激な変動、増加に対処する手段として、また移動端末を収容する手段として、その利用が注目を集めている。

このような多元放送型伝送路においては、チャンネル容量を全端末により有効に利用するために、大別して2種類の利用形態が存在する。一つは、全チャンネル容量を周波数または時間領域において分割し、各端末に固定的に配分するプリアサインメント方式である。他方は、固定配分を行わず、必要に応じ随時、所定のアクセス制御の下に配分するデマンドアサインメント方式である。このうち、パケット通信方式は、デマンドアサインメント方式の一つの形式であり、情報をパケットと呼ぶ小単位に分割し、パケット毎にチャンネル容量の確保を行う方式である<sup>[5]</sup>。

計算機間通信においては、低頻度で高速度の伝送要求、すなわちバースト的トラヒックが多数の端末から発せられる。このようなトラヒックに対し、パケット通信方式は統計的な負荷平均化を実現しているため、チャンネル容量の有効な利用を図ることが出来、プリアサインメント方式および回線交換形式によるデマンドアサインメント方式に比較して、相当高い伝送性能が期待される。

このようなパケット通信におけるアクセス方式としては、ランダムアクセス方式が最も簡便で基本的な方式であり、バースト的なトラヒック特性に対し有効に動作すると考えられている<sup>[6]・[7]</sup>。このため、移動端末を始めとする端末数の増大に対し、ハードウェア負担の比較的軽いランダムアクセス方式の採用が適していると考えられる。



しかし、ランダムアクセス方式では、パケット相互の衝突によるスループット性能低下が宿命的な問題となり、多元放送型伝送路を用いたパケット通信方式の主要な研究テーマとなっている。これに対し、従来ランダムアクセス系の各種のプロトコル、ALOHA<sup>[8]</sup>、CSMA<sup>[9] - [11]</sup>、Treeアルゴリズム<sup>[12]</sup>等が提案されているが、いずれも性能とコスト・使用環境との間にトレードオフが存在し、完全なものとはなっていない。このため、プロトコルレベルに限定しない広範な視点からの新しい方式の提案が必要とされている。

このような利点および問題点を有する多元放送形伝送路を用いたパケット通信網に対し、基本的性能の改善を目的としたプロトコルレベルとは別の次元のアプローチとして、空間分割多重化によるチャネル容量の再利用を図る網構成方式、および捕捉効果を用い衝突パケットの回復を図るアクセス制御方式が提案されている。

空間分割多重化は、送信機の出力を制限し、電波の到達距離を所定の範囲内とすることにより、全域を地理的に分割するものである<sup>[13] - [19]</sup>。これにより、同一のチャネル容量、すなわち同一周波数またはタイムスロットを複数の地点で相互に干渉を生じることなく使用することが可能となり、チャネル容量の再利用が実現される。チャネル容量の再利用を図る具体的方式としては、従来提案されているマルチホップ方式およびセルラ方式がある。

マルチホップ方式は、チャネル容量は単一のままで出力のみを制限することにより再利用を図る方式であり、再利用の区域、回数が地理的に連続している<sup>[13] - [16]</sup>。従って、マルチホップ方式においては、パケットは各端末において中継処理されるため、以下のような問題点が生じる。すなわち、各端末が中継器の役割を果たすことから、各端末の信頼性が網全体の信頼性に大きく関与することとなる。多段中継による遅延時間の増大も問題となる。各端末は、互いに正確な座標位置を、パケット送出毎に知る必要がある。しかし、これは移動端末を含めた現実的な場合には困難である。また、中継は端末の地理的分布に依存するため、目的端末に到達することも保証されていない。

セルラ方式は、チャンネル容量および地域を分割し、送信出力を制限することにより、地理的に明確な再利用を意図した方式である<sup>[17] - [19]</sup>。セルラ方式は、自動車電話システムで実用化されているが、そこではゾーン内中心局までのアクセスのみしか対象としておらず、中心局間の伝送は有線回線等の別チャンネルを想定している。従って、網全域を所定のチャンネル容量で賄うパケット無線網の要求に適合するものとはなっていない。

以上のように、従来提案されている空間分割によるチャンネル容量の再利用を行う方式は、基本的には網性能の向上の可能性を有するものの、幾つかの問題点を含んでいる。従って、パケット無線網に適用し、チャンネル容量の再利用による網性能の改善を目的とする新しい網構成方式が必要とされている。

捕捉効果を利用し衝突パケットの回復を図るアクセス制御方式は、アクセスプロトコルより下位のレベルすなわちOSIモデルにおける物理下位層に属する方式である。捕捉効果は、FM、PM等の角度変調系に顕著に見られる現象であり、強パワー信号が弱パワー信号を完全に抑圧し、パケット衝突が生じた場合において大きいパワーを有するパケットが支障なく伝送される現象である<sup>[20]</sup>。この捕捉効果を生じる両パケットのパワー差に関し、意図的に付与するもの<sup>[21]、[22]</sup>と、受信点までの距離差により自然に生じるもの<sup>[23]、[24]</sup>が、従来検討されている。

パワー差を意図的に付与する方式では、ユーザを優先権に応じ出力の異なるグループに分割することにより捕捉を実現している。この方式では、優先権の付与に関連する諸問題が存在し、網運営上のオーバーヘッドとなる。また、パワー差が自然発生的に生じるものとして、移動体通信網等における端末間の遠近差による信号の強弱から生じる捕捉効果に関し解析が行われている。この自然発生的な捕捉効果の場合、距離差と言う合理性に欠ける優先権に依存しており、遠距離端末は常に不利な扱いを受けることになる。更に、衛星網においては有意な距離差は生じない。

このように、従来提案されている捕捉効果の利用を目的としたアクセス制御方式は、実現の際に幾つかの問題点を有する。従って、捕捉効果を利用して網性能の改善を図

るために、制御が簡易で、合理性に欠ける優先度を導入する必要のない新しいアクセス制御方式の開発が必要とされている。

本論文は、以上のような問題点の解決を試みることを目的とし、空間分割多重化によるチャンネル容量の再利用を図る新しい網構成方式<sup>[25]</sup>、および捕捉効果を用い衝突パケットの回復を図る新しいアクセス制御方式<sup>[26] - [29]</sup>を提案、検討する。

空間分割多重化によるチャンネル容量の再利用を図る網構成方式として、ローカル／グローバル網構成方式を提案する。ローカル／グローバル網構成では、対象とする全域をゾーンと呼ぶ小地域に分割し、各ゾーンで使用するチャンネルとして、ローカルチャンネル、グローバルチャンネルと呼ぶ2種類を準備する。このうちローカルチャンネルはゾーン内の端末間での通信に用い、グローバルチャンネルはゾーン外端末との通信に用いる。更に、隣接するゾーンにおいては、各ローカルチャンネルは $k$  ( $k \geq 3$ )種の別個のチャンネルを用いる。この異なるローカルチャンネルを用いる $k$ ゾーンの集合をエリアと呼ぶ。エリアを繰り返し用いて全域をカバーすれば、同一チャンネルをローカルチャンネルとして用いるゾーンは所定の距離だけ離れ、相互に干渉を与える事なく同一チャンネルの並行使用が可能となり、エリア数 $N$ に比例したチャンネル容量の再利用が実現される。このようなローカル／グローバル網構成の原理を詳説し、ローカル、グローバル両チャンネルの遅延比をパラメータとして基本的性能の解析を行ない、数値評価を与える。更に、ローカル、グローバル各チャンネルへのチャンネル容量の配分に関し種々の指標による配分方式を導入し、与えられた網条件に対し最適なローカル／グローバル網構成の実現を可能とする。

一方、捕捉効果を利用するアクセス制御方式としては、時変出力制御方式を提案する<sup>[26]</sup>。時変出力制御方式は、パケット送出中に送信出力を所定の時間関数に従って増大することにより、パケット到着時間差をパケット間の受信電力差に変換し、捕捉効果を積極的に誘起することにより、網性能の改善を図ったアクセス制御方式であり、PCT (Power Control during Transimission) 方式と略称する。このPCT方式の原理、具体的制御手順、特徴を詳述し、また本方式の適用が有効となるネットワーク環

境に関しても言及する。更に、PCT方式の実現性に関し受信機および送信機の面から検討を加え、送信機に必要とされるダイナミックレンジを最小とする最適な制御関数を導く<sup>[27]</sup>。

PCT方式はアクセスプロトコルレベルより下位のレベルに属するため、既存の任意のアクセスプロトコルと組み合わせることにより、性能改善を図った新しいアクセスプロトコルを実現することが可能である。本論文では、PCT方式を、多元放送型伝送路によるパケット通信方式の最も基本的アクセスプロトコルである p-ALOHA に適用した、新しいアクセスプロトコル v-ALOHA を提案する<sup>[28]</sup>。この v-ALOHA プロトコルを解説しその特長を述べ、スループット性能の解析を行なう。更に数値的性能評価により、固定長パケットに関し s-ALOHA に近い性能が得られること、また可変長パケットに関し s-ALOHA より優れた性能が可能であることを示す。

更に、同期機能を有するパケット通信網を対象とし、時変出力制御方式の s-ALOHA への適用に関して述べる。本来 s-ALOHA は同期を基本とし、一方時変出力制御方式はパケット到着の時間差を必要としている。本論文では、この相矛盾する要求を解決した新しいプロトコルを、固定長パケットに関し捕捉区間付s-ALOHA として与え、可変長パケットに関し末尾同期s-ALOHA として与える<sup>[29]</sup>。これらのアクセスプロトコルに関し、原理を詳述し、スループット性能の解析を行い有効性を示す。

## 第2章

### ローカル／グローバル網構成

#### 2. 1 緒言

ランダムアクセス系プロトコルを採用したパケット無線網では、パケット相互の衝突が構造的な問題となっている。このため、ALOHA、s-ALOHA、CSMA方式等、各種のプロトコルが提案されている<sup>[8] - [12], [30], [31]</sup>。しかし、いずれの方式も全域を単一チャンネルとして使用する限りは、最大スループットは1を越えることはない。このように、従来のプロトコルでは、多少の相違はあるにせよ、高いスループットを望めないのが現状であり、コストおよびサービスに対する一つの制約条件となっている。

これに対し、本章では、空間分割多重化により無線チャンネル容量の空間的再利用 (Spatial Reuse) を可能とし、網全体でのスループットを高め、需要に対応した網を提供することを目的とした、新しいパケット無線網の構成法、ローカル／グローバル網構成を提案、検討する<sup>[25], [32] - [34]</sup>。

以下では、まず空間分割多重化によるチャンネル容量の再利用の概念を述べ、従来提案されている再利用方式に言及しその問題点を明らかにする。次いで、新しい網構成方式、ローカル／グローバル網構成の基本的原理と特性を詳述する。また、この新しい網構成に関し、固定無線網を対象とした性能解析を行う。すなわち、チャンネルの分割数およびチャンネル再利用回数とスループットとの関係を定式化し、その際、平均遅延の増大をいかに抑えて、総スループットがどれほど改善されるかを明らかにする。更に、本網構成において採用する、ローカル／グローバルと呼ばれる2種類のチャンネルへの、チャンネル容量の配分方式と網性能についても論じる。

## 2. 2 空間分割多重化によるチャネル容量の再利用

空間分割多重化は、送信機の出力を制限し電波の到達距離を所定の範囲内とすることにより、全域を地理的に分割するものである。これにより、同一のチャネル容量、すなわち同一周波数またはタイムスロットを複数の地点で相互に干渉を生じることなく使用することが可能となり、チャネル容量の再利用が実現される。

このチャネル容量の再利用に関しては、従来、チャネル容量は単一のままで出力のみを制限する事により行う方式を Kleinrock and Silvester<sup>[14]</sup>、Takagi and Kleinrock<sup>[15]</sup>、Cidon and Sidi<sup>[16]</sup>等が提案している。これらは再利用の区域、回数が地理的に連続しており、本論文では連続的再利用と呼ぶ。連続的再利用においては、伝送形態は図2-1(a)に示すようにマルチホップ方式である。従ってパケット中継に伴う中継処理作業が各端末において必要となり、各端末の信頼性が網全体の信頼性に大きく関与することとなる。多段中継による遅延時間の増大も問題となる。各端末は互いに正確な座標位置を、パケット送出毎に知る必要がある。しかし、これは移動端末を含めた現実的な場合には困難であろう。また、中継は端末の地理的分布に依存するため、目的端末に到達することも保証されていない。

一方、チャネル容量および地域を分割し、送信出力を制限することにより、地理的に明確な再利用を意図した方式が、Macdonald<sup>[17]</sup>により提案されている。この方式を離散的再利用と呼ぶ。離散的再利用としては、図2-1(b)に示すように自動車電話システムで提案、実用化されているセルラ方式<sup>[17]-[19]</sup>がある。しかし、そこでは、ゾーン内中心局までのアクセスのみしか対象としていない。

これらの問題点を考慮し、提案する網構成は、単一チャネルをFDM等の手段により幾つかのチャネルに分割し、それらを地理的に分離して再利用することを意図したものである<sup>[25]、[32]、[33]</sup>。これは離散的再利用に基づいているため、連続的再利用のような多段中継とそれに伴う大きな遅延は生じない。しかも、文献[17]では考慮さ

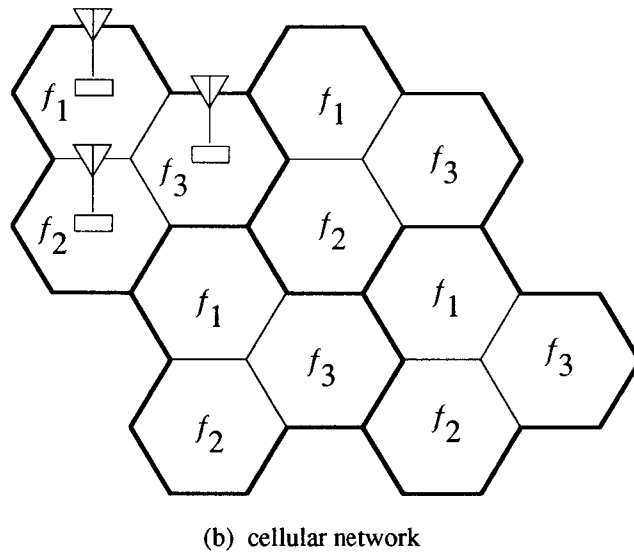
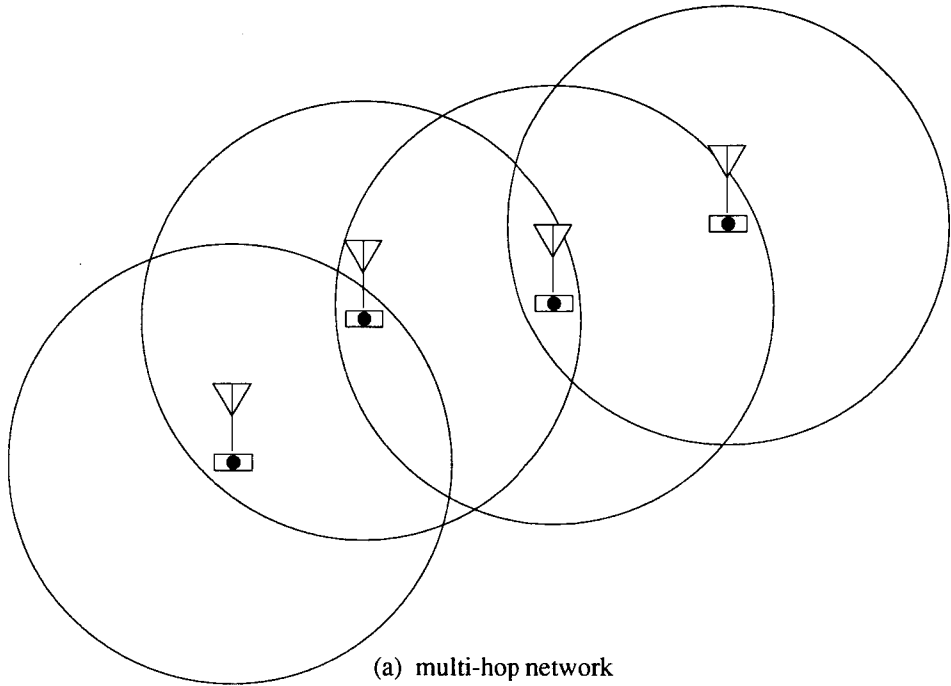


図 2-1 空間分割によるチャネル容量の再利用  
 Fig. 2-1 The reuse of channel capacity by space division.

れていない、全チャンネル容量で網全体の通信を賄うことを可能としている。各チャンネルの利用区域が明確であるために網全体の性能解析は容易である。また、移動端末に対する適用は、基本的にセルラ方式、マルチホップ方式となんら変わるところはない。各端末は自区域に存在する端末名のみを知り得れば良く、移動端末に対する実現性は、マルチホップ方式より高い。

## 2. 3 ローカル／グローバル網構成

本節では、空間分割によるチャンネル容量の再利用を目的とした新しい網構成方式としてローカル／グローバル網構成を提案し、その基本原理および特性を述べる。

### 2. 3. 1 ローカル／グローバル網構成の基本原理

チャンネル容量の再利用のために、ここでは図2-2で模式的に示したように、対象とする全域を小地域（ゾーンと呼ぶ）に分割し、各ゾーンで使用するチャンネルとして、ローカルチャンネル、グローバルチャンネルと呼ぶ2種類を準備する。このうちローカルチャンネルはゾーン内の端末間での通信に用い、グローバルチャンネルはゾーン外端末との通信に用いる。更に、隣接するゾーンにおいては、各ローカルチャンネルは $k$  ( $k \geq 3$ )種の別個のチャンネルを用いることとする。この異なるローカルチャンネルを用いる $k$ ゾーンの集合（エリアと呼ぶ）を繰り返し用いて、全域をカバーすれば、同一チャンネルをローカルチャンネルとして用いるゾーンは、各エリアにそれぞれ1箇所である。そして、それらは地理的に常に一定以上の距離だけ離れて配置されている。従って、出力を絞ることにより、これら各ゾーンは互いに干渉を与えることなく、同一チャンネルの並列使用が可能となり、エリア数 $N$ 、すなわち繰り返し回数に比例したチャンネルの再利用が可能となる。このような概念に基づく網構成を、ローカル／グローバル網



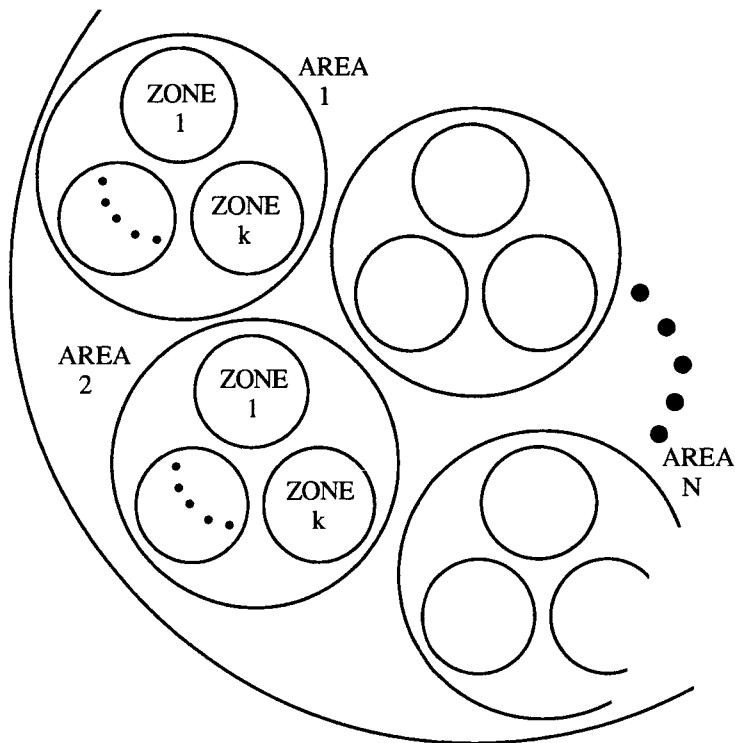


図 2-2 ローカル/グローバル網構成

Fig. 2-2 Local/global network configuration.

成 (local/global network configuration) , 略して L G 構成と呼ぶことにする。

ゾーンの地理的分割は、単に幾何学的に実施することも考えられるが、網の持つ地域性に着目して分割することが適当である場合が多い。例えば、そのような網としては、学園都市、工業団地等における網が考えられる。学園都市においては、大学内または学部内にまとまったローカルトラヒックが存在し、全域でのグローバルトラヒックを遥かに上回ることが考えられ、ゾーン分割の単位となる。しかも、トラヒックの局所性という、L G 構成において有利な性質も存在する。

L G 構成において、グローバルチャネルの扱い方により、更に 2 通りのタイプが考えられる。一つは、前述の説明にそのまま沿ったタイプである。つまり、各端末は 2

チャンネルの通信能力を有し、必要に応じてパケットを、並行動作しているローカルまたはグローバルチャンネルのいずれかで送出する。このようなタイプを平面型LG構成（p-LG構成）と呼ぶ。これに対して他のタイプとして、各端末は、送信に対してはローカルチャンネルのみを利用し、グローバルトラヒックはエリアの中心局で受信中継し、中心局同士の上位網においてグローバルチャンネルを用い通信を行なう。このようなタイプを階層型LG構成（h-LG構成）と呼ぶ。今回の解析、数値的検討はp-LG構成に限り、h-LG構成に関しては将来の報告に委ねる。

なお、ローカル／グローバルという概念は Wong and Yum<sup>[35]</sup>によりLANの方式として提案されているが、有線回線におけるもので、所定チャンネル容量を与えての構成ではない。また、グローバル回線については詳細に解析結果を与えているが、ローカル回線に関しては着想のみの紹介であり、解析評価はなされていない。

### 2. 3. 2 ローカル／グローバル網構成の特性

p-LG構成（以下、必要な場合以外単にLG構成と呼ぶ）に対する定性的な性能傾向を考察する。まず、1エリア内のゾーン数 $k$ を考える。 $k$ が大ならば、ローカルチャンネルのスループットは、ゾーン内のユーザ数が減少することにより、ある程度改善されるが、チャンネル容量は $k$ に逆比例するため遅延が大となる。従って、ゾーン数 $k$ は、空間的再配置に必要な最小値 $k=3$ <sup>[17]</sup>が理想値となる。次に、エリア数すなわち再利用回数 $N$ を考える。各ゾーンのローカルスループットは $N$ 倍されて全スループットに寄与するため、 $N$ を大きくすると、全スループットが向上すると考えられる。しかし反面、各ゾーン内のユーザ数の減少のためグローバルトラヒックの比重が大きくなり、ローカルスループット自体が全スループットに対しそれほど貢献しなくなると考えられる。

本網構成の実現、実働化は比較的容易であると考えられるが、いくつかの留意しなければならない点がある。第1に、各端末ともローカル、グローバルの2チャンネルに

対応した設備を持つ必要があり、しかも、両チャンネルは出力、チャンネル速度が大きく異なっている点である。ただし、グローバルチャンネル設備は各端末とも同一であるし、ローカルチャンネル設備は  $k$  種類であるので、利用者数によればコスト的に決定的な要因とはならないであろう。また  $h-LG$  構成では、各端末は単一の設備で良いが、エリア内に中心局の建設と運用が必要となる。更に、中継を伴うために 3 ホップ方式となり遅延も増大する事が予想されるが、 $p-LG$  構成では 1 ホップのため、中継に伴う諸事情は考慮しなくても良い。第 2 に、チャンネルの再利用に起因する同一チャンネルの空間的分離である。 $k=3$  がその最小値であり、数値評価もその値で行うが、現実的には、地域性のため理想的な六角形分割にならない場合や、干渉許容量の関係から緩衝空間を広く必要とする場合には、 $k>3$  とする必要があると考えられ、その場合は性能がある程度犠牲となる。第 3 に、 $L-G$  構成における移動無線の利用を考えると、ゾーンへの入出圏情報の管理を考慮しなければならない。この場合、オーバーヘッドを伴うが、何らかのプロトコルにより対応することが考えられる。

なお、無線チャンネルを利用する代表的な網構成の例として、専用チャンネルの固定配分型（例、TDMA）がある。これは、軽負荷では遅延の劣化を招くのみであり、重負荷において初めて良好な性能を示す。また、ここで対象とする網のように、不特定多数のユーザを収容する網においては、柔軟性およびチャンネル細分化の面で問題がある。本論文では、解析条件を重負荷としているため、一つの上限值を与えるという意味で、固定配分型の性能を参照する。

## 2. 4 基本性能解析

今回の解析では、プロトコルは  $s$ -ALOHA を採用した。これは、簡易なプロトコルであるため、 $L-G$  構成の基本的な概念の具体的適用例として示すのに適しているからである。また、 $s$ -ALOHA は元来、最大スループットが低いため、 $L-G$  構成とするこ

とにより、どの程度改善が得られるかの一つの目安ともなる。高スループットが得られている CSMA方式における解析は、次の機会に譲りたい。

通信モデルを以下に述べる。各端末の地理的位置は均一の分布とする。また、各端末間のトラヒックは必ずしも均一とはせず、ローカルトラヒック量をパラメータとして扱っている。パケットはローカル、グローバルチャンネルとも同一の固定長とする。スロット長は、ローカル、グローバル両チャンネルにおいて、それぞれのチャンネル速度に応じたパケット伝送時間とする。各端末は常にパケットを保有し（重負荷；文献 [15] でも前提としている条件）、両チャンネルの各スロットにおいて所定の確率に従いパケットを送出する。これは並行動作として行なわれる。この時、伝送が成功すれば、次のパケットを、衝突が生じれば同じパケットを、次の各スロットで同様な確率により送付する。このようなモデルに基づき、以下のように性能解析を行なう。

$k$  を 1 エリア内のゾーン数、 $N$  をエリア数とし、 $M$  を全域のユーザ数とすれば、各ゾーン内のユーザ数  $m$  は、次式となる。

$$m = \frac{M}{kN} \quad (2.1)$$

各ゾーン、すなわちローカルチャンネルにおいて、重負荷の場合は単に各スロットにおいて各端末が送付する確率  $p_L$  を考えれば良い。従って、1 端末あたりのローカルスループット  $S_L / m$  は、送付したパケットの伝送成功率として次式で計算でき、またその最大値は、 $p_L$  が式 (2. 3) の時実現される。

$$\frac{S_L}{m} = p_L(1-p_L)^{m-1} \quad (2.2)$$

$$p_L = \frac{1}{m} \quad (2.3)$$

このとき、ゾーン内のローカルスループット  $S_L$  は式 (2. 4) で与えられる。

$$S_L = \left(1 - \frac{1}{m}\right)^{m-1} \quad (2.4)$$

式(2.4)は、 $m$ の増大に伴い急速に  $1/e$  に収束する。また、単位は1ローカルスロット当たりの伝送成功パケット数である。

同様にして、グローバルチャンネルを考えれば、ユーザ数は全域ユーザ数 $M$ と同一であるので、送出確率、 $p_G = 1/M$ の時に、最大グローバルスロット $S_G$ を得る。

$$S_G = \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{M-1} \quad (2.5)$$

次に、ローカルチャンネルとグローバルチャンネルに対するチャンネル容量配分に関して議論する。単一チャンネル時の容量を $C_s$  (bps) とし、そのローカルチャンネルへの容量配分率を $\alpha$ とする。この時、ローカルチャンネル容量 $C_L$ 及びグローバルチャンネル容量 $C_G$ はそれぞれ、

$$C_L = \frac{\alpha C_s}{k} \quad (2.6a)$$

$$C_G = (1-\alpha)C_s \quad (2.6b)$$

となる。また、この時、各ローカル、グローバルスロット長 $T_L$ 、 $T_G$ は、単一チャンネル時のスロット長を1 (unit time) とすれば、次式となる。

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{1/\left(\frac{\alpha C_s}{k}\right)}{1/C_s} \\ &= \frac{k}{\alpha} \end{aligned} \quad (2.7a)$$

$$\begin{aligned} T_G &= \frac{1/(1-\alpha)C_s}{1/C_s} \\ &= \frac{1}{1-\alpha} \end{aligned} \quad (2.7b)$$

更に、ある一端末からの、送信相手 $M-1$ 端末中、ゾーン内端末数(ローカルチャンネルを用いて送信)の比率を、ノード局所性(node localization)  $L$  とする。

$$L = \frac{m-1}{M-1} \quad (2.8)$$

また、一端末当りのトラヒックのローカルチャンネルへの流入率、これを、局所特性 (localization factor)  $\beta$  と呼ぶ。このとき、一端末からの、ゾーン内と全域の各一端末に対する平均トラヒック比をローカルウェイト (local weight)  $W$  とすれば、局所特性  $\beta$  は、次式で与えられる。

$$\beta = LW \quad (2.9)$$

すなわち、 $\beta$  は一端末からの全トラヒックに関する比であり、 $W$  は一端末から一端末へのトラヒックに関する比である。各ゾーン内端末に対してもゾーン外端末に対しても、同一のトラヒックが存在する場合は  $W=1$  であり、 $\beta=(m-1)/(M-1)$  となる。

LG構成の性能は、総スループット  $S_T$ 、平均遅延  $d_T$ 、総パワー  $P_T$  <sup>[36]</sup> によって評価される。総スループット  $S_T$  は、ローカル、グローバル各チャンネルのスループットの和で与えられる。但し、それぞれ共通の時間単位に換算して計算する。単位として比較のために、単一チャンネルにおけるスロット長 1 (unit time) を用いる。従って、

$$\begin{aligned} S_T &= \frac{S_L k N}{T_L} + \frac{S_G}{T_G} \\ &= S_L \alpha N + S_G (1 - \alpha) \end{aligned} \quad (2.10)$$

ローカルチャンネルにおける遅延  $D_L$  とグローバルチャンネルにおける  $D_G$  は、式 (2.11 a), (2.11 b) で与えられ、それを単位時間  $d_L, d_G$  に換算すれば式 (2.12 a), (2.12 b) となる。

$$D_L = m/S_L \quad (2.11a)$$

$$D_G = M/S_G \quad (2.11b)$$

$$d_L = D_L T_L \quad (2.12a)$$

$$d_G = D_G T_G \quad (2.12b)$$

平均遅延  $d_T$  はこれらを平均して、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} d_T &= d_L \beta + d_G (1 - \beta) \\ &= \frac{m}{S_L} \cdot \frac{k}{\alpha} \beta + \frac{M}{S_G} \cdot \frac{1}{1 - \alpha} (1 - \beta) \end{aligned} \quad (2.13)$$

また、総パワー  $P_T$  は、次式となる。

$$P_T = S_T / d_T \quad (2.14)$$

次に、網構成パラメータが性能に与える影響を解析する手順につき述べる。網構成パラメータは全ユーザ数  $M$ 、ゾーン数  $k$ 、エリア数  $N$ 、容量配分率  $\alpha$ 、ローカルウェイト  $W$  の 5 種である。解析を容易にするために、 $M$ 、 $k$ 、 $W$  は与えられたものとする。このとき、性能は 2 変数  $N$ 、 $\alpha$  の関数として表される。 $N$  と  $\alpha$  は元来独立なものである。ところで、 $\alpha$  の設定はローカル、グローバルの各遅延のバランスに大きな影響を与えるため、遅延時間との関連において  $\alpha$  を扱うのが妥当である。

ここでは、一つの網設計方針として、ローカルチャネルとグローバルチャネルの遅延の比  $\gamma$  を与えることにより、 $\alpha$  を  $N$  の関数として表す。各遅延の比を一定に保った網を構成することは、実際の運用の見地から意味がある。

このとき、

$$d_L = d_G \gamma \quad (2.15)$$

より、

$$\begin{aligned} \frac{m}{S_L} T_L &= \frac{M}{S_G} T_G \gamma \\ \frac{m}{S_L} \cdot \frac{k}{\alpha} &= \frac{M}{S_G} \cdot \frac{1}{1 - \alpha} \gamma \end{aligned} \quad (2.16)$$

を、 $\alpha$  について解けば、

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{S_L}{S_G} N\gamma} \quad (2.17)$$

となる。式(2.17)により与えられる $\alpha$ は、局所特性 $\beta$ を含んでいない、従って、総スループット $S_T$ はローカルウェイト $W$ とは無関係に決まる。

平均遅延 $d_T$ は $\beta$ を含み、次式で示される。

$$d_T = d_G \{1 + \beta(\gamma - 1)\} \quad (2.18)$$

上式より、 $\gamma < 1$ の場合は、局所性の高い( $\beta$ :大)トラヒックを有する網のほうが、平均遅延 $d_T$ は小となり、 $\gamma > 1$ の場合はその逆となることが分かる。また、特に $\gamma = 1$ の場合は、平均遅延 $d_T$ も、 $d_L = d_G$ より、

$$\begin{aligned} d_T &= d_L\beta + d_G(1+\beta) \\ &= d_L \quad \text{または} \quad d_G \end{aligned} \quad (2.19)$$

となり、 $W$ には無関係となる。このことは、ある端末からゾーン内およびゾーン外の端末に対するトラヒックの差異に左右されない性能を有する網構成を意味し、網設計を容易にしている。

## 2.5 チャンネル容量配分方式の解析

2.4では、ローカル、グローバル両チャンネルの遅延比 $\gamma$ を、常に一定とする観点から、網性能の解析を行った。しかし、式(2.10)、(2.13)でわかるように、容量配分率 $\alpha$ により、網性能は大きく左右される。従って、 $\gamma$ を一定とするような $\alpha$ の設定方式のみに依らず、 $\alpha$ の設定そのものについても調べる必要がある。

本節では、各網の特性に対応した最適化方式を検討するために、種々の意味付けに基づく $\alpha$ の設定方式を導入し、解析を加える。その際、 $S_T$ に関連する意味付けは、 $\alpha$



=1.0 において  $S_{T:\max}$ が達成され、非現実的であり適当ではない。式 (2. 13) で与えられる平均遅延  $d_T$ は、これを最小化する  $\alpha$ の最適値を有し、また、その各項のバランスは、 $\alpha$ の設定により大きく変化する。しかもローカル、グローバル各チャンネルの遅延  $d_L$ 、 $d_G$ 自体のバランスも、 $\alpha$ の設定により大きく影響される。従って、 $\alpha$ の設定方式に何らかの意味付けを行うには、遅延時間との関連において考えるのが妥当である [34]。

ここでは前節で行った最適化を方式 I と呼び、その他に次の3方式による性能の解析を行う。

- ・両チャンネルの平均遅延への寄与を等しくする (方式 II)
- ・平均遅延を最小とする (方式 III)
- ・パワーを最大とする (方式 IV)

#### (1) 方式 II

平均遅延  $d_T$ への、ローカル、グローバル各チャンネルの遅延時間の寄与を等しくするように、 $\alpha$ を設定する方式である。この場合、式 (2. 13) に関し次の関係がえられる。

$$\frac{m}{S_L} \cdot \frac{k}{\alpha} \beta = \frac{M}{S_G} \cdot \frac{1}{1-\alpha} (1-\beta) \quad (2.20)$$

より具体的な解釈としては、一端末当りの、ローカル、グローバル各スループットの比が、ローカル、グローバル向けの各パケットの構成比と等しくなっている。式 (2. 20) を  $\alpha$  について解けば、次式が得られる。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{S_L}{S_G} N \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right)} \quad (2.21)$$

(2) 方式 III

$d_T$ を最小にすることも一つの有力な方式である。 $d_T$ を $\alpha$ の関数で表現すれば、

$$d_T(\alpha) = A \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{B}{1-\alpha} \right) \quad (2.22)$$

ここに、

$$A = \frac{mk}{S_L} \beta$$
$$B = \frac{S_L M}{S_G mk} \cdot \frac{1-\beta}{\beta}$$

従って、

$$\frac{d}{d\alpha} d_T(\alpha) = 0 \quad (2.23)$$

を解けば、次式が得られる。

$$\alpha = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{S_L}{S_G} N \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right)}} \quad (2.24)$$

(3) 方式 IV

パワーを最大とする $\alpha$ を設定する。パワーは、 $S_T$ と $d_T$ を共に評価する指標<sup>[36]</sup>であり、LG構成では、最大パワーに関し、 $\alpha$ の最適値を有している。このとき、

$$\frac{d}{d\alpha} P_T(\alpha) = 0 \quad (2.25)$$

を解く。これは次の3次方程式となる。

$$A_3 \alpha^3 + A_2 \alpha^2 + A_1 \alpha + A_0 = 0 \quad (2.26)$$

ここに、

$$A_0 = \beta S_G^2$$

$$A_1 = 2(NS_L - 2S_G)\beta S_G$$

$$A_2 = (NS_L - 2S_G)\{N(1-\beta)S_L - 4\beta S_G\} - 3\beta S_G^2$$

$$A_3 = 2(S_G - NS_L)\{N(1-\beta)S_L - \beta S_G\}$$

である、上式を数値的に解き、この方式における $\alpha$ を得る。

## 2. 6 性能の数値的検討

### 2. 6. 1 基本性能

2. 4の解析において容量配分率 $\alpha$ を、 $\gamma$ を介したNの関数として扱うことにしたため、性能に対する変数はエリア数(再利用回数)Nのみとなる。数値結果としては、まず、LG構成の基本性能として、(1) Nに対する性能を示し、次に、補足的な性能を示すために、(2) 遅延比 $\gamma$ 、(3) 近傍特性 $n_b$ 、(4) 全ユーザ数Mの各パラメータに対する性能を示し、各々検討を行う。

表2-1には性能比較のため、単一チャネル時、及び各端末に専用分割(M分割)した時の性能を与えておく。重負荷の場合、M分割時の性能は、2. 3. 2で述べたことから、あくまで参考値として扱う。

表2-1 単一チャネル、M分割時の性能 [M=300]

	単一チャネル		M分割	
	スループット S	$(1-1/M)^{M-1}$	0.3685	1
遅延 d	M/S	814.1	M	300.0
パワー P=S/d	$S^2/M$	.00045	1/M	.00333

各項の説明の前に、ローカルウェイト $W$ に影響を与える、一つの物理的概念を導入する。 $W$ はトラヒックの局所性（ローカルチャネルの利用の割合）を表す値であるが、このローカルチャネルの利用の割合を高める一つの要因として、端末間距離とトラヒックの関係が考えられる。ここでは、平均トラヒックは端末間平均距離の逆数の $n_b$ 乗に比例する、という関係を仮定し導入する。例えば、 $n_b=0$ の場合は、ローカル、グローバルの各平均トラヒックは距離にかかわらず同一であることを意味する。また、 $n_b=1$ では、トラヒックは平均端末間距離の逆数に比例することであり、この場合はZiffの法則<sup>[37]</sup>を表している。この $n_b$ を近傍特性と呼ぶことにする。 $n_b$ は $W$ との間に次式の関係有する。

$$W = \left\{ \sqrt{M/m} \right\}^{n_b} \quad (2.27)$$

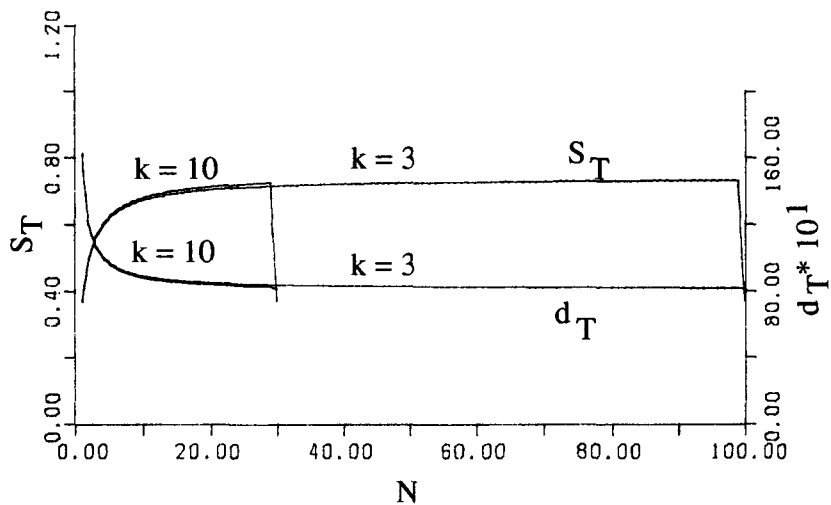
以下の各節では、網構成パラメータは、特に断わらない限り、 $M=300$ ,  $k=3$ ,  $\gamma=1.0$ ,  $n_b=0$ とする。

#### (1) エリア数に対する網の性能

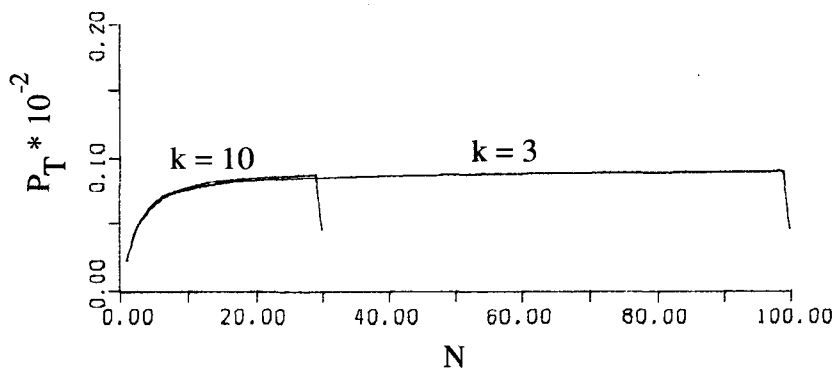
LG構成の基本的性能とその有効性の確認のため、エリア数 $N$ と網性能の関係を調べる。遅延比 $\gamma$ は、代表的な値として $\gamma=1.0$ （ローカル、グローバルの各遅延が等しくなる。図2-3(a),(b)）および $\gamma=0.5$ ,  $1.5$ （図2-4）とした。

図2-3(a)に、 $\gamma=1.0$ の場合の、総スループット $S_T$ , 平均遅延 $d_T$ を示し、図2-3(b)にパワー $P_T$ を示す。 $\gamma=1.0$ はローカル、グローバルの各遅延を等しくするという点で、 $\gamma$ の一つの基準として考えられる。図より分かるように、単一チャネル時の性能に比較して、 $S_T$ は格段に改善され、 $d_T$ は単一チャネル時に収束している。しかも、性能の改善は急速に最良値に収束している。 $N_{max}$ において $S_{T,max}$ に達するが、その95%の性能を与える $N$ を調べると、相当小さな $N$ で実現されている。この $N$ を、実際の運用という意味で、 $N_{opr}$ と名付ける。 $N_{opr}$ が小ということは、全域を多数のエリアで分割すること無く良好な性能が達成されることを示す。

図2-4はそれぞれ、 $\gamma=0.5, 1.5$  の場合において、他のパラメータは図2-3と同様な条件下での、 $S_T, d_T$ の数値結果を示している。



(a)



(b)

図2-3 (a) エリア数 $N$ に対する総スループット $S_T$  および平均遅延 $d_T$   
 (b) エリア数 $N$ に対するパワー $P_T$

Fig. 2-3 (a) Total throughput  $S_T$  and mean delay  $d_T$  vs. number of area  $N$ .  
 (b) Power  $P_T$  vs. number of areas  $N$ .

これより、 $\gamma = 1$  前後では、平均遅延  $d_T$  にはそれ程の差は認められないが、総スループット  $S_T$  は相当大きく  $\gamma$  に左右されることが分かる。従ってグローバル遅延にある程度の余裕がある場合は、 $\gamma$  を小さくする方が性能的に有利である。

表 2-2 には、各  $\gamma$  における  $N_{opr}$  時の数値性能を示す。各  $\gamma$  とも、実際的な  $N_{opr}$  において、平均遅延  $d_T$  の大きな増大を招くことなく、総スループット  $S_T$  の相当な改善(場合によっては 1 以上) が得られている。

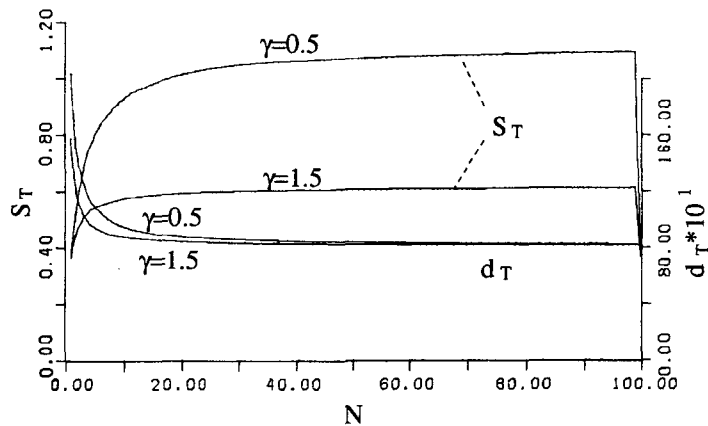


図 2-4  $\gamma = 0.5, 1.5$  における網性能  
Fig. 2-4 Performance at  $\gamma = 0.5, 1.5$ .

表 2-2 LG 構成の性能 [M=300, k=3]

$\gamma$	0.5			1.0	1.5
$n_b$	0	1	2	-	0
$N_{opr}$	28			16	11
$\alpha(N_{opr})$	0.0577			0.0544	0.0542
$S_T$	1.042			0.697	0.581
$d_T$	860.3	829.9	551.9	861.0	872.4
$P_T$	.00121	.00126	.00189	.00081	.00067

以上の数値結果より、本論文で提案したLG構成の基本性能とその有効性を確認することができる。

#### (2) $\gamma$ の変化に対する性能

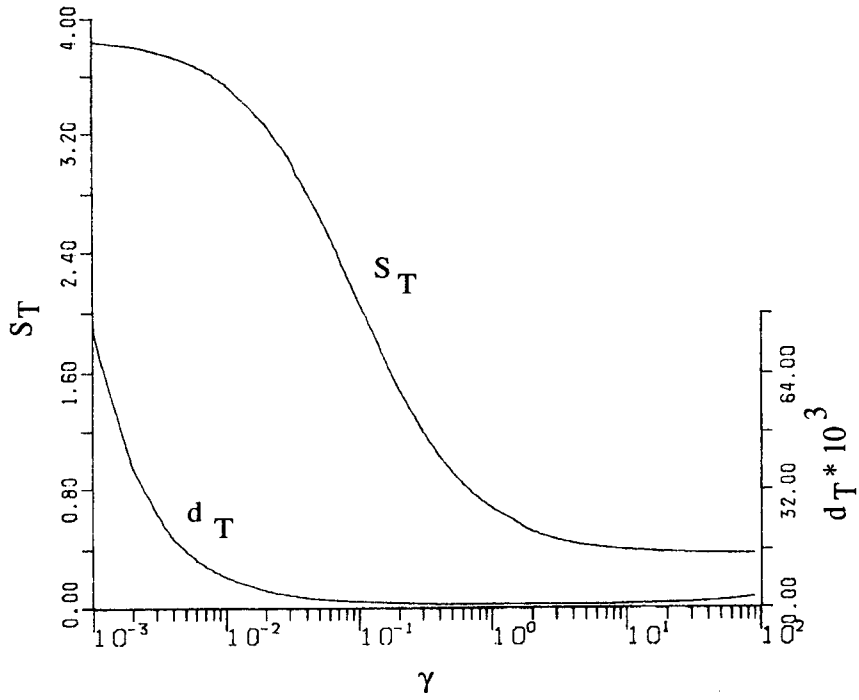
$\gamma$  の広い範囲 ( $\gamma=10^{-3}\sim 10^2$ ) における性能を与える。図2-5(a)は  $S_T$ 、 $d_T$  を示し、図2-5(b)は  $P_T$  を示している。この図より、パワー  $P_T$  に関して  $\gamma$  の最適値が存在することが分かる。 $\gamma=0.1$  において  $P_{T:\max}=0.00134$  である。この時平均遅延  $d_T$  は、 $d_T=1545.4$  であり、 $\gamma=1$  の場合の約2倍となっている。従って、通信距離が長いことでグローバル通信の遅延の増加を一つの制約条件とする場合は、網全体のパワー性能で著しい改善が得られることが明らかになった。

#### (3) 近傍特性 $n_b$ と性能

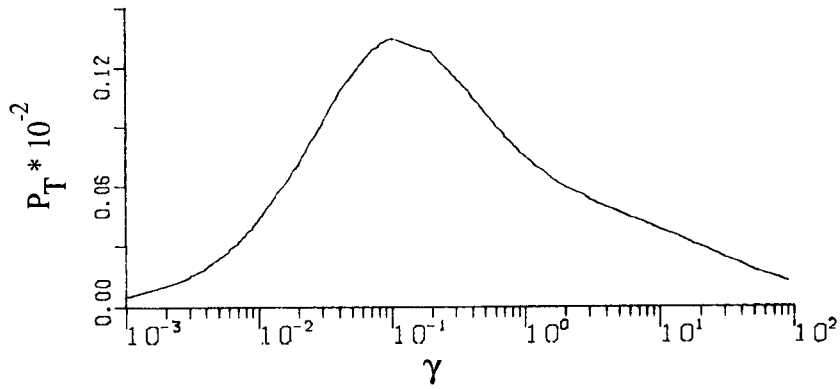
容量配分率  $\alpha$  の決定に遅延比  $\gamma$  を導入すれば、式(2.17)で示されるように、総スループット  $S_T$  は局所特性  $\beta$  に独立であり、従って近傍特性  $n_b$  の値に左右されない性能が得られる。図2-4 ( $n_b=0$ ) および図2-6 ( $n_b=1$ ) によりこのことは確認される。両図とも、 $\gamma=0.5$  を用いている。これは、 $n_b$  による平均遅延  $d_T$  の変化を見るためである。式(2.18)より分かるように、この場合はトラヒックの局所性が平均遅延  $d_T$  に対して有利に働いている。しかし、 $d_T$  は急速に最小値に収束するため、図2-4と比較してそれほど大きな差は見られない。

#### (4) 全ユーザ数 $M$ が性能に及ぼす影響

表2-3に、ユーザ数  $M$  の代表値(100~3000)と性能  $S_T$ 、 $d_T$ 、 $P_T$  及びその性能を与える  $N_{opt}$  の関係を示す。比較のために単一チャネル時の性能を併記してある。また、 $N=10$  に固定した場合のパワーも記載する。表2-3より、総スループット  $S_T$  はユーザ数  $M$  にかかわらず一定で、単一チャネルの約2倍であり、平均遅延  $d_T$  は  $M$  に比例して増大するものの、単一チャネルの値を大きく上回るものではない。従って、パワー



(a)



(b)

図 2-5 (a) 遅延比  $\gamma$  に対する総スループット  $S_T$  および平均遅延  $d_T$   
 (b) 遅延比  $\gamma$  に対するパワー  $P_T$

Fig. 2-5 (a) Total throughput  $S_T$  and mean delay  $d_T$  vs. delay ratio  $\gamma$   
 (b) Power  $P_T$  vs. delay ratio  $\gamma$



はMの全範囲に渡って、単一チャネル時の値を大きく改善している。

$N_{opr}$ はユーザ数を増しても、常に実際的な小さな値を保ち、大ユーザ網においても網構成の複雑さを増すことなく、LG構成が適用可能であることが分かる。また、 $N=10$ に固定した場合の、パワーによると、ユーザ数Mにかかわらず固定したNにおいても、 $N_{opr}$ の場合とほぼ同一の性能が得られている。従って、Nに対する網性能は十分にロバストである。このことは、網の成長に伴うMの増大に対し、網の再構成を行う必要があまりなく、網運営が容易であることを意味している。

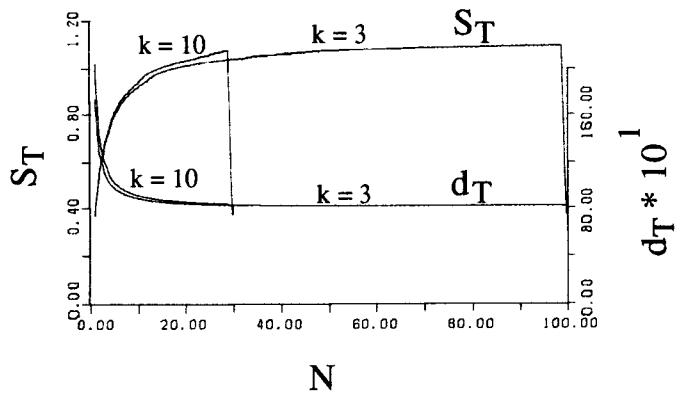


図 2-6 近傍特性  $n_b=1$  における網性能 ( $\gamma=0.5$ )  
 Fig. 2-6 Performance at neighbourhood characteristic  $n_b=1$  ( $\gamma=0.5$ ).

表 2-3 ユーザ数Mに対する性能

M	LG構成 ( $N=N_{opr}$ )				単一チャネル			N固定 (=10)
	$S_T$	$d_T$	$P_T$	$N_{opr}$	$S_S$	$d_S$	$P_S$	$P_T$
100	0.692	289	2.396	12	0.370	270	1.369	2.322
500	0.698	1434	0.487	17	0.368	1359	0.271	0.451
1000	0.698	2864	0.244	18	0.368	2717	0.135	0.225
1500	0.698	4298	0.162	18	0.368	4076	0.090	0.150
2000	0.698	5733	0.122	18	0.368	5435	0.068	0.112
2500	0.698	7167	0.097	18	0.368	6793	0.054	0.090
3000	0.698	8602	0.081	18	0.368	8152	0.045	0.075

( $P_T, P_S$  は  $\times 0.001$ )

## 2. 6. 2 各チャネル容量配分方式による性能と網構成の最適化

チャネル容量配分率 $\alpha$ の設定に関する各方式の特性を調べ、それに対応する最適化形式の適用分野を見極めるために、基本性能として、図2-3同様、エリア数 $N$ に対する各方式の性能を求める。

総スループット $S_T$ 、平均遅延 $d_T$ に関し、図2-7～2-9に、それぞれ方式I～IVの性能を示す(方式Iに関しては図2-3(a))。各方式のパワー $P_T$ に関しては、表2-4に与える。また、各方式の代表的な性能に関し、表2-5に数値を示す。条件としている網構成パラメータは、ゾーン数 $k=3$ 、ユーザ数 $M=300$ である。また、近傍特性は $n_b=0,1$ として、同一図中に重ねて示す。

方式Iは、2.6.1で詳述したが対比のため特徴をまとめる。性能は $S_T$ 、 $d_T$ ともに良好で、しかもトラヒックの局所性に独立であるため、一般的な網に対し最も適当な方式である。また、ローカル、グローバル各チャネルの遅延比を、当初に与えることが出来るため、両チャネルの遅延そのものが問題となる網にも適している。

図2-7は方式IIに関する性能であり、図に依る限り、 $S_T$ の大幅な改善は見られず、 $d_T$ は単一チャネル時の約2倍程度の劣化を示している。なお、方式IIは、局所性の極めて強い網においては、著しい性能改善を示すため、参考データとして、 $n_b=2$ の

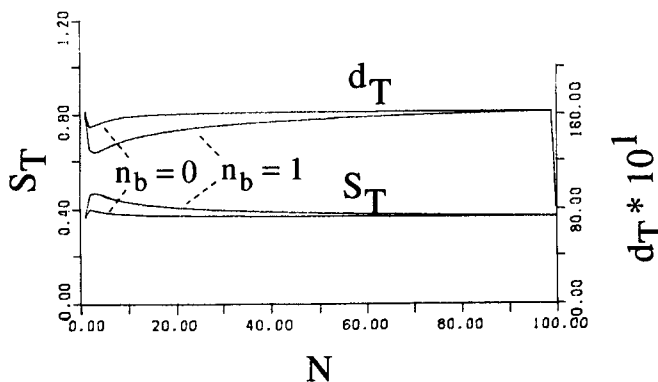


図2-7 方式IIにおける $S_T$ および $d_T$

Fig. 2-7  $S_T$  and  $d_T$  of scheme II.

場合の値も、表 2-5 に含めておく。また、方式 II のもう一つの大きな特徴としては、ローカル、グローバル各チャンネルのスループット比が、各チャンネルへ流入するトラヒック比に等しい、という点である。このため、単一チャンネル時と同様、ローカル、グローバル何れにも差異を生じず、滞りの偏らない伝送が可能である。

図 2-8 は、最小の  $d_T$  を与える方式 III の性能を示している。しかし、 $d_T$  の値は、方式 I に比べ、わずかに改善されているに過ぎない。 $S_T$  はトラヒックの局所性に極めて依存し、 $n_b=1$  のときには、方式 I に較べ相当の改善が認められる。なお、この場合も参考データとして  $n_b=2$  の場合の性能も、表 2-5 に併記する。

図 2-9 には、パワーを最大とする方式 IV に関する性能を示した。ここで、 $S_T$  軸は、図 2-3 (a)、2-7、2-8 におけるものの 25 倍のスケールになっている。すなわち、 $S_T$  の改善が極めて顕著であることがわかる。 $d_T$  の増大は、方式 II 程度である。従って、遅延の増大よりも、スループットの改善に重点を置く網に適用すれば、大きな効果が得られる。

表 2-4 は各方式におけるパワー  $P_T$  を示している。方式 I~III では、現実的な範囲での  $N$  の変化に対し、 $P_T$  の変化はそう大きくない。また、単一チャンネル時と比較して、約 1/2 の劣化~2 倍の改善である。しかし、方式 IV は特別で、 $P_T$  は  $N$  に従って増大しており、極めて大きな値を示している。 $\alpha$  を充分大きく与える時、 $N$  の増大が  $S_T$  の改善に顕著に影響し、このような  $P_T$  が得られる。ただし、 $N$  の大きな値は現実的ではないため、方式 IV においては、現実的な  $N$  を与えた後、性能を論じるのが妥当である。

表 2-5 には、各方式における代表的な  $N$  の選択法の一例と、その時の性能を示している。いずれも、実際の運用における  $N$  の一つの選択基準を与えている。(方式 III では、より小さい  $N$  で性能的には充分である。) また性能も、方式 II の  $n_b=0,1$  以外は充分な改善が認められる。

これら各方式の性能を、一覧できるように、実際のエリア数としての  $N=10$  の場

合で統一した値を、表2-6に示しておく。他のパラメータは同様である。表より、各方式を通じて、 $\alpha$ と $S_T$ 、 $d_T$ の関係の概要がわかる。

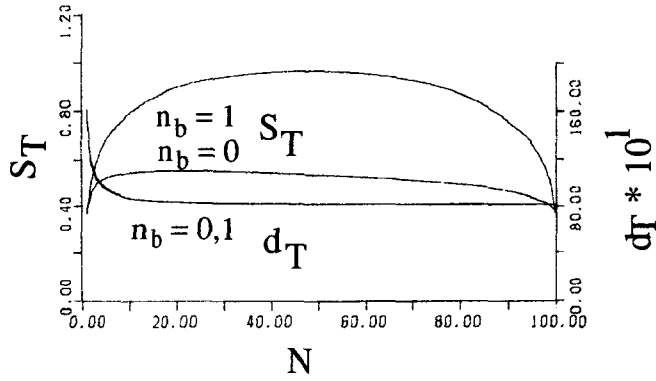


図2-8 方式IIIにおける $S_T$ および $d_T$

Fig. 2-8  $S_T$  and  $d_T$  of scheme III.

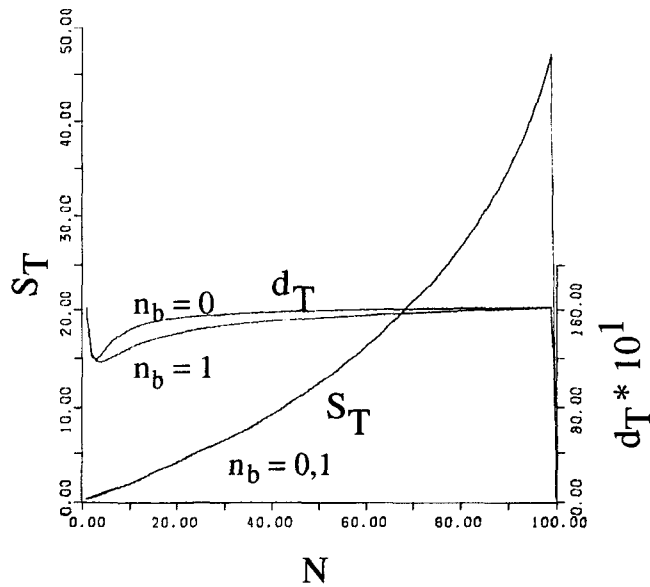


図2-9 方式IVにおける $S_T$ および $d_T$

Fig. 2-9  $S_T$  and  $d_T$  of scheme IV.

以上のことから、表2-7に、各方式の特徴を、簡潔に定性的にまとめておく。

表2-4 各方式におけるパワー  $P_T$

方式	I	II		III		IV	
$n_b$	—	0	1	0	1	0	1
N	$P_T$ ( $\times 10^{-4}$ )						
2	4.046	2.689	3.557	3.906	4.173	4.046	4.311
5	6.336	2.514	3.519	5.540	7.006	7.530	8.748
10	7.548	2.392	3.126	6.256	8.999	13.506	15.395
20	8.290	2.322	2.788	6.605	10.667	26.680	29.220
40	8.704	2.286	2.528	6.642	11.755	58.529	61.554
60	8.851	2.273	2.403	6.455	11.701	101.393	104.252
80	8.929	2.267	2.323	6.065	10.610	165.562	167.580

表2-5 各方式における代表的性能

方式	I	II			III			IV	
Nの代表値 選定基準	$N_{opr}$	$S_{T:max}$ を 与えるN			$S_{T:max}$ を 与えるN			$d_{T:min}$ を 与えるN	
$n_b$	—	0	1	2	0	1	2	0	1
N	16	2	3	10	21	48	43	3	4
$\alpha$ (N)	0.0544	0.0886	0.1364	0.4697	0.0278	0.0259	0.1344	0.3417	0.4335
$S_T$ (N)	0.697	0.402	0.471	2.015	0.557	0.972	3.063	0.626	0.860
$d_T$ (N)	861.0	1493.7	1273.7	297.8	841.8	820.7	465.2	1187.8	1165.7
$P_T$ (N)	.00081	.00027	.00037	.00677	.00066	.00118	.00658	.00053	.00074

表2-6 容量配分率  $\alpha$  の決定方式と網性能

[N=10 固定]

方式	I	II		III		IV	
	-	0	1	0	1	0	1
$n_b$	-	0	1	0	1	0	1
$\alpha(10)$	0.0869	0.0029	0.0184	0.0515	0.1205	0.4496	0.4606
$S_T$	0.673	0.379	0.433	0.549	0.791	1.945	1.983
$d_T$	891.6	1583.9	1385.3	877.8	879.0	1439.9	1288.3
$P_T$	.00075	.00024	.00031	.00063	.00090	.00135	.00154

表2-7 各方式の定性的傾向

方式	$S_T$ の改善	$d_T$ 増大の抑圧	パワーの改善	$n_b$ 依存性	Nの実現性
I	++	+	++	-	+
II	-	-	--	+	+
III	+	+	+	++	+
IV	+++	-	+++	-	+

## 2.7 結言

パケット無線網において、チャンネル容量の空間的再利用に基づく総スループットの向上を目的とした新しい網構成を提案し、ローカル/グローバル網構成と名付けた。このLG構成に関し、重負荷条件においてs-ALOHAを用いた固定端末配置の場合の性能解析を、遅延比 $\gamma$ を導入することにより行い、数値結果に検討を加えた。その結果、 $\gamma$ 及びNの実現性のある値において、平均遅延 $d_T$ に大きな影響を与える事なく、総スループット $S_T$ の相当な改善が得られることが確認できた。その他、総スループット $S_T$ はトラヒックの局所性に左右されないこと、また、パワー $P_T$ に関して $\gamma$ の最適

値が存在することなどが判明した。

更に、チャンネル容量配分率 $\alpha$ の設定に関しては、最適化の方式と関連する各種方式を導入し、その意味付け、解析、数値結果を与えた。また、得られた数値結果の検討により、各方式の特徴を明らかにし、それに従う最適化方式の適用が妥当な網につき考察を加えた。その結果、複数の $\alpha$ 設定方式と、その適当な選択が可能となったため、与えられた網に対し、より効果的なL G構成の最適化を実現することができる。

CSMA プロトコルでの性能解析、h-L G構成の検討、軽負荷時における性能向上の確認、および現実的問題として、移動通信への適用、端末の地域的分布が不均一な場合の解析などが残された課題である。

## 第3章

### 時変出力制御方式(PCT方式)

#### 3. 1 緒言

多元放送型伝送路を用いたパケット通信網の基本的性能を改善する新しい方式として、本章では、プロトコルレベルより下位の、アクセス制御レベルにおける対応として、捕捉効果を用いた時変出力制御方式を提案、検討する<sup>[26]、[27]、[38]</sup>。

時変出力制御方式は、パケット送出中にその出力を時間の関数として増大させることにより、パケット到着時刻の差を受信パワー差に変換し捕捉効果を生じさせるアクセス制御方式であり、PCT (Power Control during Transmission) 方式と略称する。この時変出力制御により誘起された捕捉効果により、衝突状態のパケットにおいても所定の時間差があれば、先頭のパケットが正常に受信されスループット性能が改善される。

以下では、捕捉効果によるアクセスプロトコルの性能改善について、従来検討されている制御方式に関しその特徴および問題点を明らかにし、これらの問題点を解決する新しいアクセス制御方式として、PCT方式を導入し、その基本原理、具体的制御手順および特長を詳述する。また、本方式の適用が有効となるネットワーク環境に関しても言及する。次いで、PCT方式の実現性に関し受信機および送信機の性能の面から検討を加える。受信機に関しては、捕捉比すなわちどの程度のパワー比により捕捉が可能となるかについて述べる。また送信機に関しては、捕捉時間および出力を制御する関数により必要なダイナミックレンジが決定される。出力制御関数として線形関数および指数関数につき必要なダイナミックレンジを求め、各関数の妥当性を検討する。また、送信機に必要とされるダイナミックレンジを最小とする最適な制御関数を導き、証明および数値例によりその優位性を示す。



### 3. 2 捕捉効果を利用する制御方式

パケット衝突によるスループット性能の低下に対し、プロトコルレベルとは別の次元での対応を考え、各種プロトコルと組み合わせることにより性能改善を図ることも可能である。その一つとして、アクセスプロトコルより下位のレベルすなわちOSIモデルにおける物理下位層に属する方式として、捕捉効果を用いるアクセス制御方式がある。

捕捉効果は、FM、PM等の角度変調系に顕著に見られる現象であり、強パワー信号が弱パワー信号を完全に抑圧し、パケット衝突が生じた場合において大きいパワーを有するパケットが支障なく伝送される現象である<sup>[20]</sup>。この捕捉効果を生じる両パケットのパワー差に関し、意図的に付与するものと、受信点までの距離差により自然に生じるものが、従来検討されている。

前者に関して、Metzner<sup>[21]</sup>は、ユーザを優先権に応じ高出力群と低出力群に分割することによりパワー差を実現し、スループット性能の相当な改善を得ている。更に一般的に、K群に分割する場合にも言及している。Kozlowski<sup>[22]</sup>は、同様にk群に分割した場合の、各群の使用する最適パケット長を求めている。後者に関してこれとは別の観点から、Namislo<sup>[23]</sup>は、端末間の遠近差による信号の強弱(near/far phenomenon)により生じる捕捉効果に関し、移動無線の場合にどれほどの性能改善をもたらすかを解析している。Ramamurthi等<sup>[24]</sup>は遠近差に加え、周波数拡散信号を用い、到着時間差から生じる信号の位相差により捕捉効果を完全としたものを提案している。これを完全捕捉(perfect-capture)と呼び、これに適用する3種のプロトコルを提案し優劣を論じている。その他、原因には言及せず、現象のみを抽象化して扱いフレームアロハに適用した議論が、杜等<sup>[39]</sup>、Wieselthier等<sup>[40]</sup>によりなされている。

このように、捕捉効果は多くの研究者の関心を引き、ランダムアクセス系網の性能改善に大きな効果を有することが確認されている。しかし、パワー差を意図的に付与

する方式では、優先権の付与に関連する諸問題が存在し、網運営上のオーバーヘッドとなる。また、パワー差が自然発生的に生じることによる捕捉効果の場合は、距離差と言う合理性に欠ける優先権に依存しており、遠距離端末は常に不利な扱いを受けることになる。更に、衛星網においては有意な距離差は生じない。

このように、従来提案されている捕捉効果の利用を目的としたアクセス制御方式は、実現の際に幾つかの問題点を有する。従って、捕捉効果を利用して網性能の改善を図るために、制御が簡易で、合理性に欠ける優先度を導入する必要のない新しいアクセス制御方式の開発が必要とされている。

### 3. 3 P C T方式

前節で述べた、捕捉効果を利用するアクセス制御方式に関する諸問題を解決するために、ここでは時変出力制御方式（P C T）方式を導入し、その原理、制御手順、特性を詳述する<sup>[26]、[27]、[38]</sup>。

#### 3. 3. 1 原理

P C T方式の原理は以下の通りである。ユーザは、パケット送出開始時刻には受信地点でのパワーが $P_s$ となる出力で送出し、出力を時間の関数として徐々に増大させる。パケット長には制限を設け、最長パケットの送出終了時刻の受信点パワーを $P_r$ とする。図3-1に例を示す。

図では、時刻 $t_1$ に到着を開始した先頭パケットから、ある程度時間遅れをおいて、時刻 $t_2$ （ $t_1 < t_2 < t_3$ 、 $t_3$ は先頭パケットの受信終了時刻。）に第2番目のパケットが衝突状態で到着している。この場合、受信パワーの増大を傾き $A$ の線形と仮定すれば、衝突の期間を通じて、両パケット間に常に一定の受信パワー比 $(t_2 - t_1)A$  (dB)

が保たれている。捕捉に必要なパワー比を捕捉比と呼び  $R_{\min}$  (dB) とする。このとき、前記の値が  $R_{\min}$  より大であれば、先頭の packets はチャンネルを捕捉し、送信に成功する。送信の成否は、本質的に、両 packets の到着開始時刻の差、 $t_2 - t_1$  に依存する。到着開始時刻の差は、地上無線系においては送出開始時刻の差と送受間の伝播遅延の差により決定される。伝播遅延が等しい衛星網においては、送出開始時刻の差となる。パワー比  $R_{\min}$  を生じるための最小の時間差を  $T_d$  とし、これを捕捉時間と呼ぶ。すなわち、本方式は時間差を出力差に変換するものである。

packet 衝突が連続的に続く場合は、先頭と第 2 番目の packet との間に所定の時間差があれば、先頭の packet のみが有効となる。なお、packet の出力変化として、ここでは時間とともに増大する場合を示したが、減少させるような制御形式も考えら

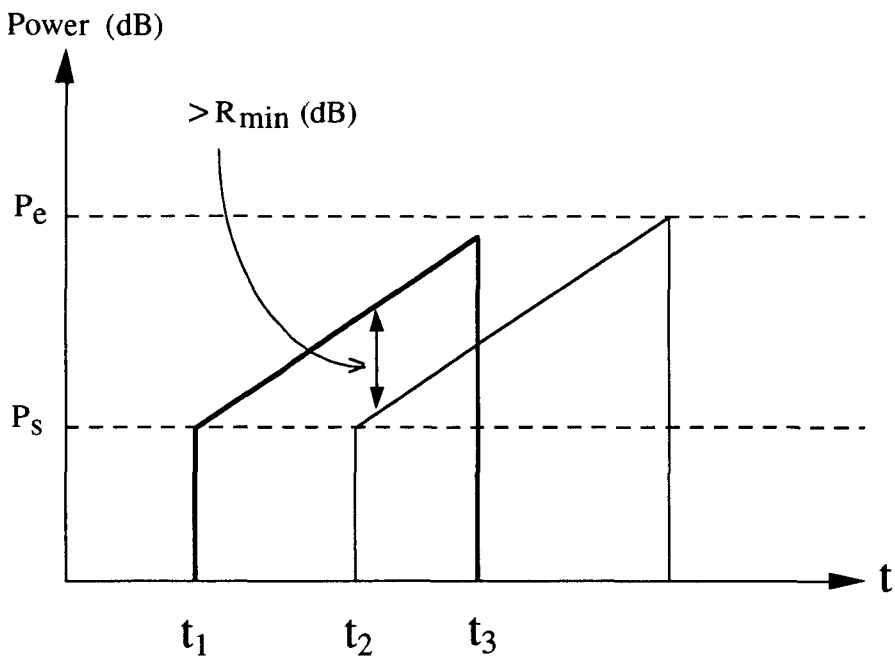


図 3-1 時変出力制御方式の原理

Fig. 3-1 The principle of PCT scheme.

れる。その場合には、末尾パケットが有効となる。但し、実現の際には同期等いくつかの問題点が生じて来る。

### 3. 3. 2 制御方式

前記の原理で示したような捕捉効果を誘導するための制御方式は、プロトコルより下位のレベルに属する。以下に、より詳細に制御方式を解説する。図3-2にパケット構成を示す。各ユーザから送出される情報は、最大長  $L_i$  (bit)のブロックに分割され、これにアドレスや制御情報などをヘッダ  $H$ (bit)として加え、FCSなどの符号誤り制御ビットを末尾に付加してパケットを構成する。パケットの先頭にはパケット開始デリミタ(PSD)、パケットの末尾にはパケット終了デリミタ(PED)を付加する。デリミタをも含めたパケットの最大長を  $L_{max}$  (bit)とする。受信局は、PSD信号を検知することによりパケット受信を開始する。以後、PED信号を検出するまで正常に受信した場合、そのパケットの受信に成功したと判断する。PED受信後、伝送路上に信号がない場合、受信局は ready状態となり、次のPSD信号を待つ。PED受信後、

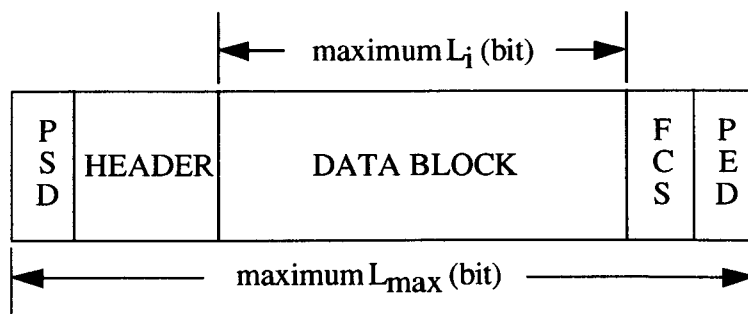


図3-2 パケット構成  
Fig. 3-2 The packet structure.

PSDを検知することなく引き続いて何らかの信号を受信する場合、図3-3(a)に示すように、捕捉により前方部を失った後続パケットの断片かまたは雑音と見なし、PED以降の信号は棄却される。信号通過後、受信局は ready状態となる。PED受信以前に何らかの要因で正常な受信が困難になった場合、パケットの受信に失敗、すなわちパケット衝突と判断し、受信した情報を棄却する。図3-3(b)に示すように、パケットの受信中に他のパケットが到着し、両者間の時間差が非常に小さい場合は、捕捉効果が生じず、パケットの正常な受信が不可となる。この衝突パケットを通過させた後、

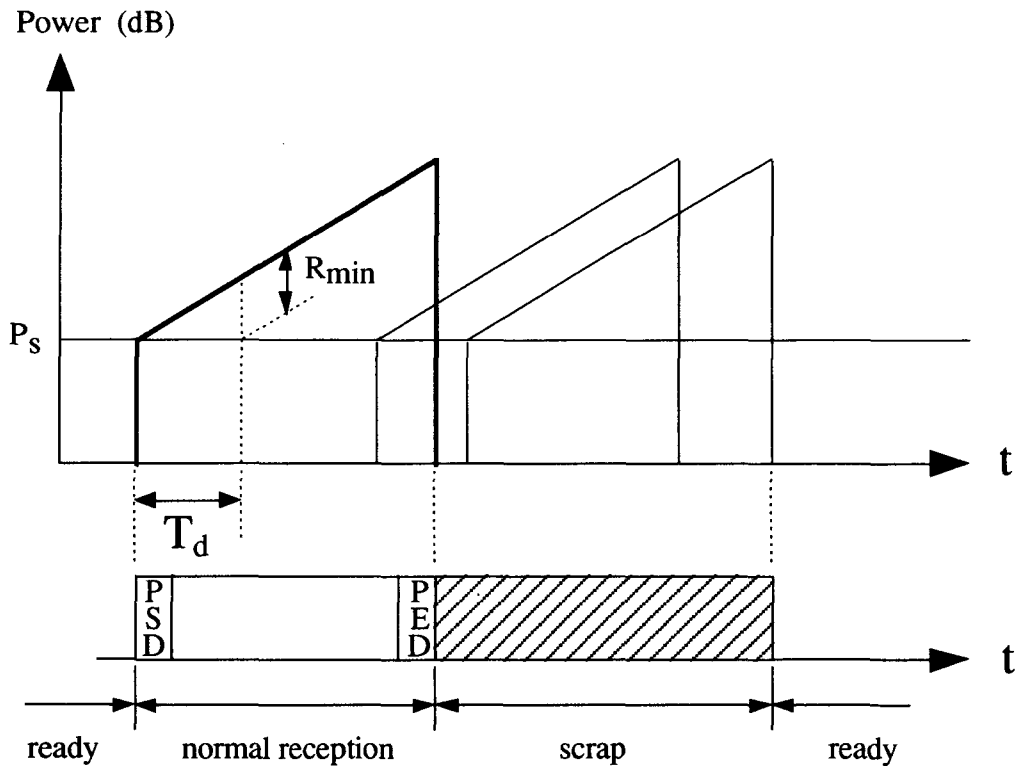


図3-3(a) 捕捉による伝送の成功

Fig. 3-3(a) Successful transmission by capture.

受信局は ready となる。

### 3. 3. 3 特性

以下に、本方式の定性的検討を行う。

第1にPCT方式は、任意のアクセスプロトコルと組み合わせることが可能であり、簡易な制御手順で高いスループット性能が得られることを特長としている。

第2にPCT方式での捕捉、被捕捉の関係は、送出時刻の前後関係に依存するのみ

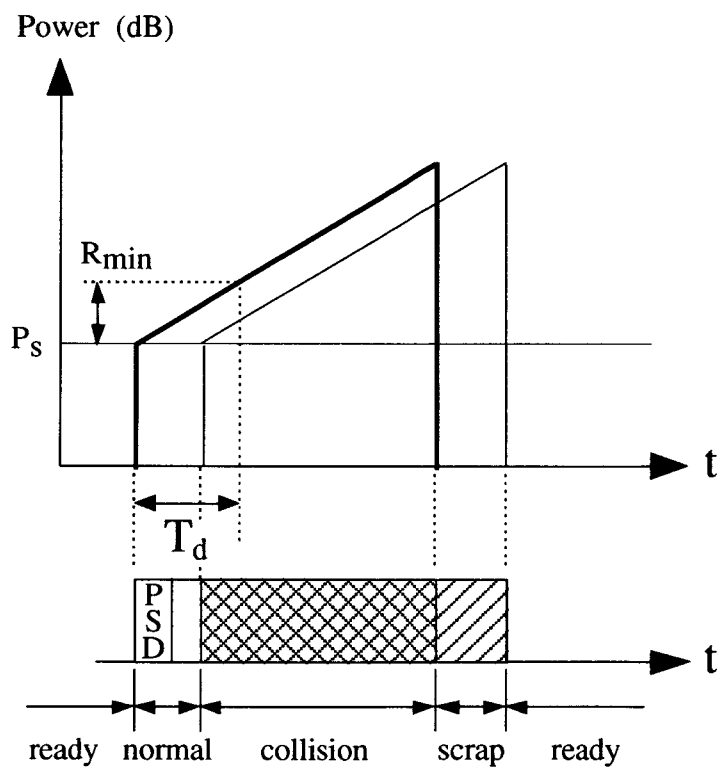


図 3-3 (b) 伝送の失敗

Fig. 3-3(b) Unsuccessful transmission.

で、各端末は全く平等な地位を有している。なお、必要ならば、優先権の付与も可能である。Metzner の方式では、低出力群と高出力群への端末のグループ分けの手续が必要となり、高い性能を得るには最適なグループ分けを考慮しなければならない。なお、PCT方式を Metzner の方式と組み合わせて使用することは可能である。Namislo の方式では、衛星網に適用することはできない。地上無線においても、受信局から遠距離の端末ほど、捕捉に対して低い優先度となることは避けられない。

第3に、捕捉効果が、衝突状態における先行パケットに対し生じるため、パケットの先頭の検出、ビット同期の確立が容易である。Lee<sup>[41]</sup>によるランダムレベル選択方式は基本的に優先権の導入を必要としない方式であるが、後続パケットに関しても捕捉効果が生じるため、このビット同期の点で問題がある。

第4に、性能は捕捉時間 $T_d$ により決定される。これは、受信機の捕捉比 $R_{min}$ のみならず、送信機の出力増加関数を検討することにより、更に改善が可能である。

第5に、PCT方式は、1対 $n$ 、すなわちスター形網に対し広く適用できる。このような網としては、衛星パケット網および、特定の局が中継を行なうような地上無線系の網が考えられる。地上無線網では、各端末から中継局までの距離が異なるため、送信出力は、中継局での受信パワーが所定の値となるよう調整される。移動端末においても、中継局からのダウンリンクをモニタすれば、送信出力の決定は可能となる。

第6に、本方式を実現する際、送受信機の制御が問題点として考えられる。送信機側では、最終段電力増幅回路の出力を直接制御するか、可変減衰器を通過させることにより行われる。受信機側では、AGCにより、変化するPCT方式の信号に追随する。送受いずれも、変化の速度は所定の値を満足する必要がある。

### 3. 4 PCT方式の実現性

本節では、PCT方式の実現性に関し、受信機および送信機の面から検討を加える。

PCT方式においては、パケット到着時刻の差がパケットの受信パワーの差となり捕捉効果が誘起される。このとき、必要な捕捉時間 $T_d$ が短いほど衝突状態から回復する先頭パケットの数が多くなり、スループット性能はより改善される。 $T_d$ は2つの要因により決定される。一つは、捕捉効果を生じるために必要なパワー比、すなわち捕捉比 $R_{min}$ であり、他方は、受信パワーの増加特性である。

捕捉比 $R_{min}$ は受信機の性能により決定され、PCT方式にとり小であることが望ましい。Lathi<sup>[42]</sup>は、FMでの感覚試験において、信号波と干渉波の比が6(dB)以下になると耳障りとなることを報告している。また、Jessop<sup>[43]</sup>は、現在の受信機技術では、これを2(dB)であるとしている。この値は、Roberts<sup>[31]</sup>では1.5~3(dB)とされている。従って、2(dB)程度のパワー差を捕捉に必要な値と考えて妥当である。

次に、第2の要因である、受信パワーの増加特性を検討する。これは、送信機における出力増加関数により決定される。 $T_d$ を小とすることは、急激な出力の増加により可能であるが、この場合、パケット末尾において送出パワーは極めて大きな値となり、送信機の最大パワーを超過することになる。従って、PCT方式の実現の際に、送信機に必要とされるダイナミックレンジが問題となる。

以下では、2種の出力増加関数、線形および指数関数に関し、必要とされるダイナミックレンジの見地から比較する。図3-4に、最もクリティカルな状態、すなわち時間差 $T_d$ で衝突している2つのパケットを示す。

線形関数の場合、出力増加関数 $f(t)$ は、 $A$ を直線の傾きとして次式で与えられる。

$$f(t) = A \cdot t + P_s \quad (3.1)$$

このとき、2つのパケットのパワー比は、最長パケットの受信終了時刻 $T_{max}$ の時点において最小値 $r(T_{max})$ となり、次式で与えられる。

$$r(T_{max}) = \frac{A \cdot T_{max} + P_s}{A(T_{max} - T_d) + P_s} \quad (3.2)$$



これが捕捉比  $r_{min}$  ( $=10^{R_{min}/10}$ ) より大となるには次式を満足しなければならない。

$$A \geq \frac{P_s(r_{min} - 1)}{T_{max}\{1 - r_{min}(1 - \beta)\}} \quad (3.3)$$

ここに、 $\beta$ は捕捉時間 $T_d$ を平均パケット伝送時間 $1/\mu$ で正規化したもので、相対捕捉時間と呼ぶ。ここでは、パケット長は次の指数関数の場合もふくめ $L_{max}$ の固定長として扱う。従って、この場合 $\beta$ は次式で与えられる。

$$\beta = T_d/T_{max} \quad (3.4)$$

式(3.3)のAより、必要とされるダイナミックレンジDは次のようになる。

$$\begin{aligned} D &= \frac{P_e}{P_s} \\ &= \frac{A \cdot T_{max} + P_s}{P_s} \\ &\geq \frac{\beta r_{min}}{1 - r_{min}(1 - \beta)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

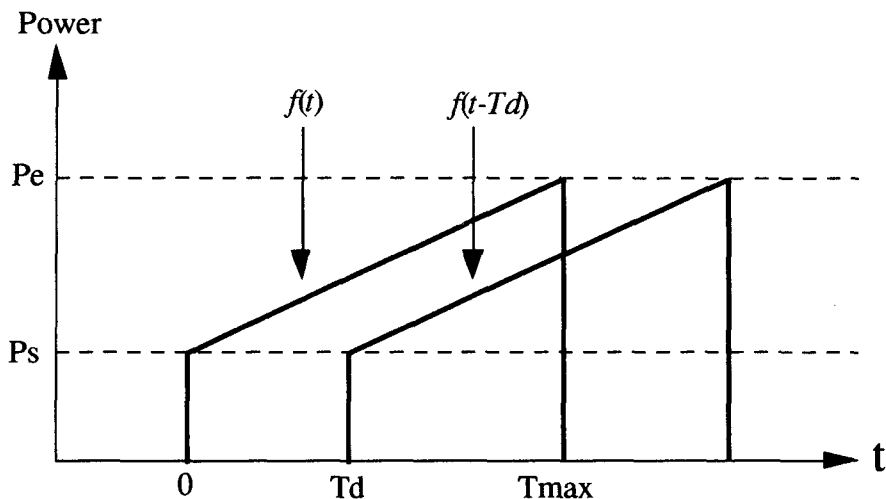


図 3-4 時間差 $T_d$ での衝突パケット

Fig. 3-4 The Collision with time lag  $T_d$ .

制御関数が指数関数の場合、図3-4の  $f(t)$  は次式で与えられる。

$$f(t) = \exp(A \cdot t + \ln P_s) \quad (3.6)$$

Aはパラメータである。このとき、重なる2つのパケットのどの部分においてもパワー比は一定であり、クリティカルな状態での比  $r$  は次式で与えられる。

$$r = \exp(A \cdot T_d) \quad (3.7)$$

この  $r$  が捕捉比  $r_{min}$  より大となるためには、

$$A \geq \frac{\ln r_{min}}{\beta T_{max}} \quad (3.8)$$

であり、従って所要ダイナミックレンジDは次式で与えられる。

$$D \geq \exp\left(\frac{\ln r_{min}}{\beta}\right) \quad (3.9)$$

以上の結果から、必要とされるダイナミックレンジDを表3-1に示す。表より、線形関数は、衝突部分の最後でパワー比が最小となるため、それ以前の部分で必要以上のパワー比となり、ダイナミックレンジの増大を招くことがわかる。これに対し、指

表3-1 所要ダイナミックレンジ (dB)

曲線の形		直線		指数関数		
		2	3	2	3	4
$\beta$	0.05	----	----	40.00	60.00	80.00
	0.10	----	----	20.00	30.00	40.00
	0.15	----	----	13.33	20.00	26.67
	0.20	----	----	10.00	15.00	20.00
	0.25	----	----	8.00	12.00	16.00
	0.30	----	----	6.67	10.00	13.33
	0.35	----	----	5.71	8.57	11.43
	0.40	11.11	----	5.00	7.50	10.00
	0.45	7.45	----	4.44	6.67	8.89
	0.50	5.82	26.25	4.00	6.00	8.00

---- : 適用不能

数関数は、常にパワー比が一定であるため、与えられた $\beta$ に対してより実現性の高いダイナミックレンジとなることがわかる。

### 3. 5 最適出力制御関数

前節では、出力制御関数として具体的に線形関数、指数関数を解析し、必要なダイナミックレンジを数値的に与えた。その結果、指数関数がダイナミックレンジの点で、より望ましい性質を有することがわかった。本節では、一般的な非減少関数を対象とし、必要なダイナミックレンジを最小とする、最適な出力制御関数を導く<sup>[27]</sup>。

#### 3. 5. 1 問題の定式化

以下に問題の定式化を行う。図3-5では、受信パワーがある非減少関数 $f(t)$ に従

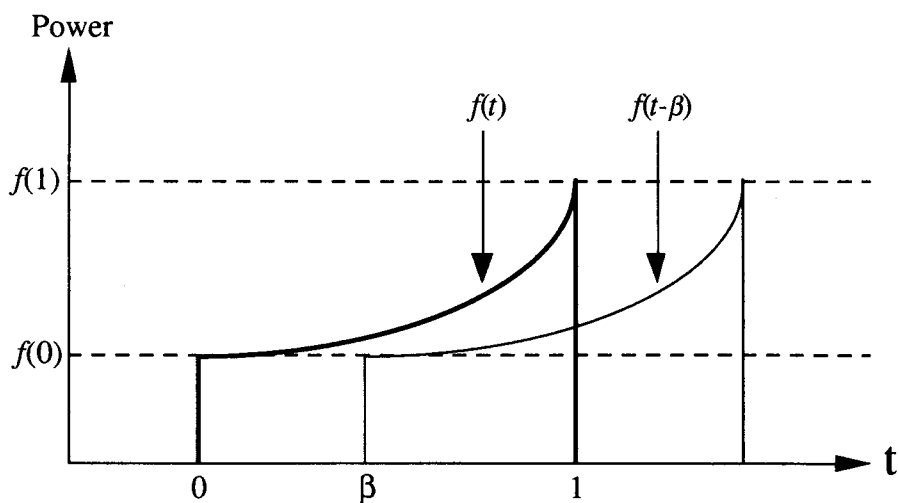


図3-5 時間差 $\beta$ での衝突

Fig. 3-5 The Collision with time lag  $\beta$ .

う2つのパケットが、相対的な時間差  $\beta$  で衝突している状態を示している。パケット長は固定長で、1に正規化して扱う。このとき、必要なパワー比が満足されれば、先頭パケットは捕捉に成功する。時間差  $\beta$  で捕捉に成功するならば、時間差が  $\beta$  以上の場合には、非減少関数であるため、常に必要なパワー比が満足される。従って、以下では、時間差は  $\beta$  として考えれば良い。このとき、捕捉に必要なパワー比、捕捉比を  $r_{min}$  で表わせば、次式が成立する。

$$\frac{f(t)}{f(t-\beta)} \geq r_{min} \quad (>1) \quad (3.10)$$

但し、 $t$  の範囲は、 $\beta \leq t \leq 1$  である。

このとき、パケットの送出開始と終了間のダイナミックレンジ  $D$  は、次式となる。

$$D = \frac{f(1)}{f(0)} \quad (3.11)$$

従って、問題は、式 (3. 10) を満たす関数の内、式 (3. 11) の  $D$  を最小とする  $f(t)$  を見出すことと定式化される。

### 3. 5. 2 最適制御関数

上記の問題提起に対し、最適な出力制御関数  $f(t)$  は、次の命題により与えられる。

[命題] 式 (3. 10) を満たし、式 (3. 11) を最小とする関数  $f(t)$  は次式で与えられる。

$$f(t) = \prod_{k=1}^n \{1 + (r_{min} - 1) \cdot u(t - k\beta)\} \quad (3.12)$$

ここに、 $n$  は  $\beta$  の逆数の整数部である。また、 $u(\cdot)$  は単位ステップ関数である。

(証明) 式 (3. 10)、(3. 11) の対数を取り、 $\ln f(t)$  の導関数を  $g(t)$  とすると、それぞれ、式 (3. 13)、(3. 14) が得られる。

$$\int_{t-\beta}^t g(t) d(t) \geq \ln r_{min} \quad (\beta \leq t \leq 1) \quad (3.13)$$

$$\ln D = \int_0^1 g(t) d(t) \quad (3.14)$$

ここで問題は、式(3.13)を満たし、式(3.14)を最小とする関数  $g(t)$  を求めることに帰着する。式(3.14)を最小とするためには、式(3.13)は常に等号であることが必要とされる。これを満たす  $g(t)$  は、 $\beta$  を周期とし、区間  $0 \leq t \leq 1$  で周期的な関数で、1周期内の積分値が  $\ln r_{min}$  となるような関数である。また、 $f(t)$  が非減少関数であるため、 $g(t)$  は非負の関数でもある。次に、パケット長  $1$  が  $\beta$  の整数倍とは限らない点に着目して、この必要条件を満たす関数のうちで、式(3.14)を最小とするものを考える。パケット長は次式で与えられる。

$$n\beta + \alpha = 1 \quad (3.15)$$

ここに、 $\alpha$  は  $0 \leq \alpha < \beta$ 、 $n$  は整数(=INT( $1/\beta$ ))である。上式より、式(3.14)での  $g(t)$  の積分区間は、パケット末尾に対応する部分で、一周期  $\beta$  に満たない端数の区間  $\alpha$  を含んでいることがわかる。従って、任意の  $\beta$  に関して、式(3.14)を最小とするためには、 $g(t)$  の値が、区間  $\alpha$  で  $0$  であれば良い。任意の  $\alpha$  においてこのことを可能とするには、 $g(t)$  は周期の末尾まで  $0$ 、末尾においてデルタ関数を含む関数として、次式で与えられる。

$$g(t) = \sum_{k=1}^n \ln r_{min} \cdot \delta(t - k\beta) \quad (3.16)$$

ここに、 $\delta(\cdot)$  はディラックのデルタ関数である。

式(3.16)の  $g(t)$  より、最適な出力制御関数  $f(t)$  は次式で与えられ、式(3.12)が得られる。

$$f(t) = \exp \left\{ \int_0^t g(t) d(t) \right\} \quad (3.17)$$

(証明終)

$f(t)$ は、図3-6のような階段状の関数となる。

式(3.12)の $f(t)$ によるダイナミックレンジDは、

$$D = r_{min}^n \quad (3.18)$$

として与えられる。

[系] パケット長が $\beta$ の整数倍の場合は、先の必要条件を満たす全ての $g(t)$ に基づく $f(t)$ も最適な制御関数となり、式(3.18)と同一のダイナミックレンジを有する。

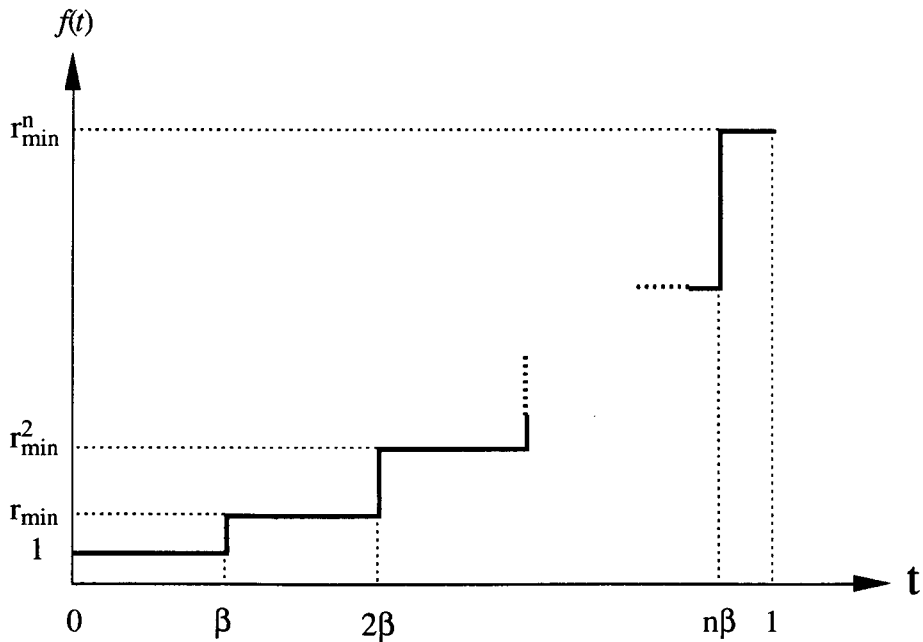


図3-6 最適な出力制御関数

Fig. 3-6 The optimum power control function.

次式で与えられる指数関数は、その代表的なものである。

$$f(t) = \exp\left(\frac{t}{\beta} \ln r_{min}\right) \quad (3.19)$$

$$g(t) = \frac{1}{\beta} \ln r_{min} \quad (3.20)$$

図4に、捕捉比  $R_{min}$  が 4 dB の場合の、 $\beta$  に対する  $D$  のグラフを示した。同図には、比較のため、線形関数、指数関数の場合の所要ダイナミックレンジを併せて示した。

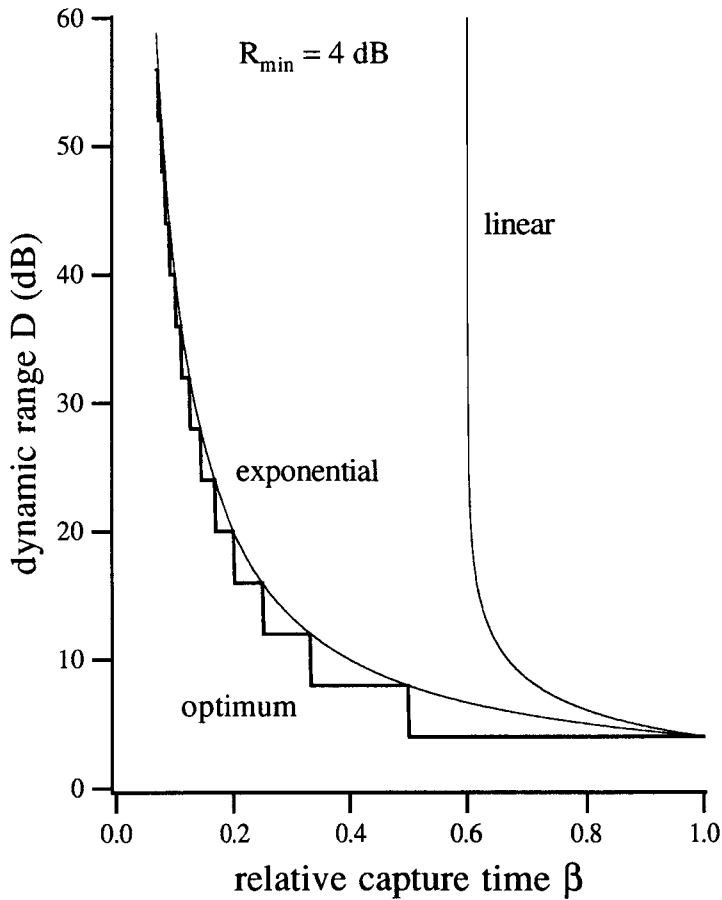


図 3-7 各種制御関数とダイナミックレンジ

Fig. 3-7 The required dynamic range for various control functions.

この図より、一般的な $\beta$ に関して、式(3.12)で与えられる関数が、最も小さいダイナミックレンジとなっていることがわかる。また、 $\beta$ がパケット長の整数分の一となっている場合には、指数関数と式(3.12)の関数のダイナミックレンジが一致していることが分かる。

### 3.6 結言

本章では、多元放送型伝送路を用いたパケット通信網の基本性能を改善するために、プロトコルレベルより下位のアクセス制御レベルにおける、捕捉効果を利用した時変出力制御方式(PCT)方式を提案し、その有効性を確認した。PCT方式の基本原理解は、パケット送出中にその出力を時間の関数として増大させることにより、パケット到着時刻の差を受信パワー差に変換し捕捉効果を生じさせるものである。

このPCT方式に関し、基本原理、具体的制御手順および特長を詳述した。また、本方式を実現する際に、送信機に必要とされるダイナミックレンジについて検討し、これを最小とする最適制御関数を導いた。

PCT方式は、アクセスプロトコルと独立な制御方式であるため、任意のアクセスプロトコルと組み合わせ、性能改善を図った新しいアクセスプロトコルを開発することが可能となる。次章以降では、従来からの代表的アクセスプロトコルである p-ALOHA および s-ALOHA に対するPCT方式の適用に関して述べる。



## 第4章

### 時変出力制御方式を用いた p-ALOHA 方式 (v-ALOHA)

#### 4.1 緒言

第3章で導入した時変出力制御方式（PCT方式）は、アクセスプロトコルレベルより下位の、アクセス制御レベルにおける方式であるために、任意のアクセスプロトコルと組み合わせて新しいプロトコルを開発することが可能である。本章では、このPCT方式をランダムアクセス系の基本プロトコルである p-ALOHA に適用した新しいアクセスプロトコル、v-ALOHA を提案、検討する<sup>[28]・[44]</sup>。特に、v-ALOHA は近年急速に普及し始めた VSAT (Very Small Aperture Terminal)<sup>[45]・[53]</sup> のアクセスプロトコルとして有望である。

以下では、VSAT網における基本的アクセスプロトコルとしての p-ALOHA の位置付けに言及し、次いで、p-ALOHA の簡易性を損なうことなく性能改善を図ることを目的として、PCT方式と組み合わせた v-ALOHA プロトコルを導入し、その特性を述べる。更に、定量的な解析により、スループット性能を、ALOHA の一般的な性能式と共通な形で定式化する。数値結果として、固定長パケットに関する性能を、捕捉効果を利用したMetznerの方式、p-ALOHA および s-ALOHA と比較し、可変長メッセージに関する性能を s-ALOHA と比較し、本アクセスプロトコルの有効性を示す。

#### 4.2 VSAT網と p-ALOHA

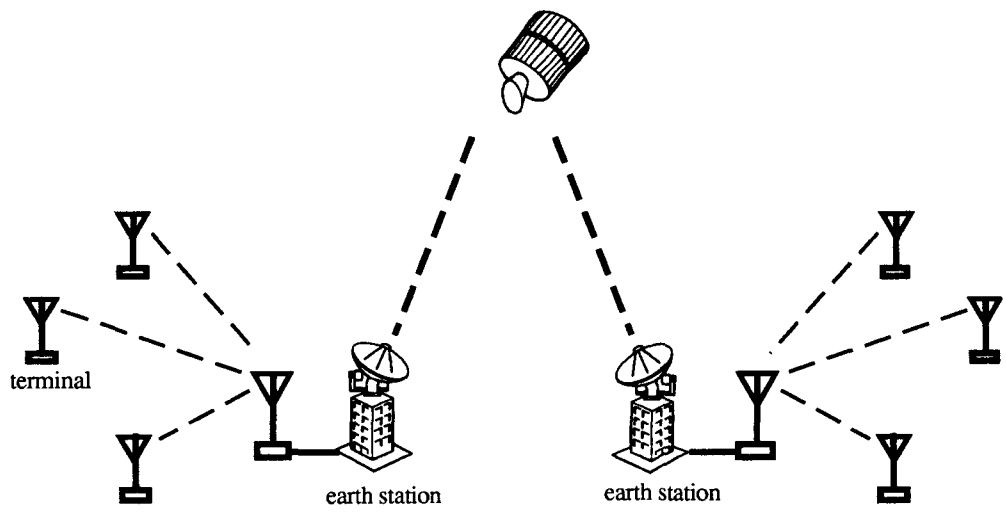
最近、VSAT の出現と普及により、衛星通信の利用形態が大きく変わりつつある

[45] - [49] . VSAT の特徴である超小型開口面アンテナにより、ユーザ端末から衛星への直接アクセスが可能となった。このため、より高能率、低コストの衛星パケット網が実現され、また、移動体への搭載も可能となってきている (図 4-1) 。

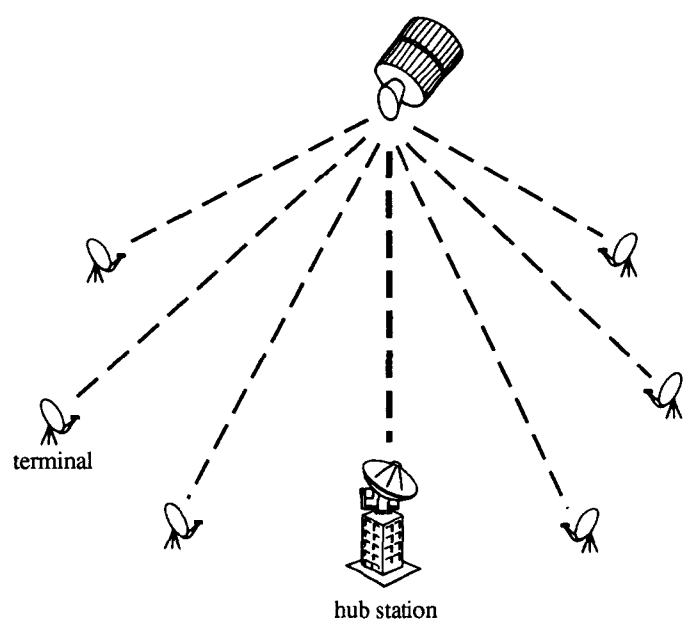
VSAT を用いた衛星パケット網においては、各ユーザ端末の地理的分散およびトラヒックのバースト性により、アクセスプロトコルはランダムアクセスを基本としたものが適している。ランダムアクセスプロトコルは現在各種の方式が提案されているが、衛星パケット網では網の状態に関する情報の利用が困難であるため、最も基本的なプロトコルである ALOHA が一般的に採用されている [50] - [53] 。

ALOHA には、任意の時刻に送出できる pure ALOHA [8] (または unslotted ALOHA、以下 p-ALOHA とする)、および一定の時間枠に同期して送出する slotted ALOHA [30]、[31] (以下 s-ALOHA とする) の 2 種のプロトコルが存在する。p-ALOHA は s-ALOHA に比較して、次のような利点がある。すなわち、同期およびスロット化の手間が不要であり、実現が最も容易である。また、スロット化を行わないため可変長データに対して無駄部分の発生がない。p-ALOHA のこれらの特長は、簡易性を旨とする VSAT 網の要求に適合する [53] 。

しかしながら、p-ALOHA の最大の問題点は、パケット衝突によるスループットの低さである。パケット衝突そのものは、ランダムアクセス一般にとって宿命的な課題であり、その克服のために各種プロトコルが、提案、改良されてきた [9] - [12] 。それらは、網の状態に関する情報を、何らかの形で制御動作に生かしたものであるが、p-ALOHA は制御の簡便性を特長とするために、伝送の成否以外の情報は全く用いていない。このため、p-ALOHA を基本とする場合は、性能改善のためにアクセスプロトコルとは別の次元での対応を考える必要がある。



(a) terrestrial packet radio network and satellite packet network.



(b) VSAT network.

図 4-1 衛星通信系パケットネットワーク  
Fig.4-1 Packet networks with a satellite.

### 4. 3 v-ALOHA

パケット衝突によるスループット性能の低下に対し、プロトコルレベルとは別の次元での対応の一つとして、捕捉効果を用いる制御方式が可能である。VSAT 網では、基本的アクセスプロトコルである p-ALOHA の低スループット性を、この捕捉効果により改善することができるが、そのためには簡易な制御方式で、しかも、平等な送信権を有する（必要とあれば、優先権の付与も可能な）方式が必要である。PCT 方式はこれを実現したアクセス制御方式である。PCT 方式は前章で述べたように、捕捉効果を利用した他のアクセス制御方式に比較して、数多くの優れた特長を有する。

本節では、VSAT に適したプロトコルとして、簡易性の要求から p-ALOHA を基本とし、その低スループットという弱点を補うために PCT 方式を組み合わせた新しいプロトコルを導入する。p-ALOHA に適用したこの p-ALOHA/PCT を、時変の *time-varying* から、v-ALOHA と呼ぶ。v-ALOHA の時変出力制御方式は、時間的に増大する出力においては、二つのパケットの送出開始に時間差が存在すれば出力差が生じることに着目したものである。VSAT 網では、各端末の送出開始時刻はランダムであるため、上記のような PCT 方式の条件に適合している。

具体的プロトコルは以下の通りである。各端末において、送出すべきパケットが生成されると、その時点で、衛星に向け送出を開始する。パケット長は可変長が可能である。その際、送信出力に時変出力制御を施す。すなわち、パケット送出開始時刻には受信地点でのパワーが  $P_0$  となる出力で送出し、出力を時間の関数として徐々に増大させ、送出終了時刻には受信点パワーを、最長パケットで最大の  $P_0$  とする。また、網の状態に関する情報には関知しない。送信端末は、衛星からのダウンリンクをモニターすることにより、送信成功の有無を知る。送信の失敗を知ったときは、適当なバックオフ時間をおいたのち、再送信する。

捕捉効果を用いる他のアクセス制御方式との比較により、v-ALOHA の定性的特性

を述べる。v-ALOHA では捕捉、被捕捉の関係は、送出時刻の前後関係に依存するのみで、各端末は全く平等な地位を有しているが、Metzner の方式では優先権の導入は避けられない。なお、v-ALOHA に更に優先権を導入し、Metzner の方式と組み合わせて使用することは可能である。また、Namislo の方式では、有意な距離差が生じないため衛星網に適用することはできない。

次に、他のアクセスプロトコルとして s-ALOHA を基本とする場合と比較して v-ALOHA の特性を述べる。v-ALOHA は、p-ALOHA を基本としているために使用が簡便で現実的である。s-ALOHA のような網全体の同期は不要であり、網の信頼性が高い。s-ALOHA では、少数のユーザの同期ずれにより網性能は大きく劣化する。VSAT では、s-ALOHA 用に正確な同期を維持するための装置を付加することは、サイズおよびコストの面から困難である。また、可変長パケットに対しては、s-ALOHA のようなスロット化の手間と、スロットの無駄部分の発生がない。

#### 4. 4 性能解析

本節では、v-ALOHA のスループット性能を解析的に導き、元のプロトコルである p-ALOHA との比較を行う。

ネットワークモデルに関し、以下の仮定を行う。チャンネル容量を  $C$  とする。端末数は無限大とする。再送を含めたパケットの生成はポアソン過程に従うものとし、その平均生成率は単位時間当り  $\lambda$  とする。パケット長は  $L_{\min}$  から  $L_{\max}$  の範囲とする。従って、パケット伝送時間長も  $T_{\min} (= L_{\min}/C)$  から  $T_{\max} (= L_{\max}/C)$  の範囲となり、その確率密度関数を  $p(t)$ 、平均時間を  $1/\mu$  とする。以下では、"パケット長" という用語は特に混乱の生じない限り、パケットのビット長およびパケット伝送時間長の両者に関して用いる。

図 4-2 は、v-ALOHA の受信過程を示している。図において、パケットが占めてい

る部分をビジー区間B, そうでない部分をアイドル区間Iと呼ぶことにする。また, 隣接するアイドル区間とビジー区間を合わせて1サイクルYと呼ぶ。各サイクルにおいて, 高々一個の packets が伝送に成功する。このように見れば, 本捕捉方式の動作は, Ross<sup>[54]</sup> のシンチレータ(scintillator) によりモデル化できる。

平均サイクル長  $E[Y]$  は, 次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 E[Y] &= E[I] + E[B] \\
 &= \frac{1}{\lambda} + \frac{1 - \exp(-\lambda/\mu)}{\lambda \exp(-\lambda/\mu)} \tag{4.1}
 \end{aligned}$$

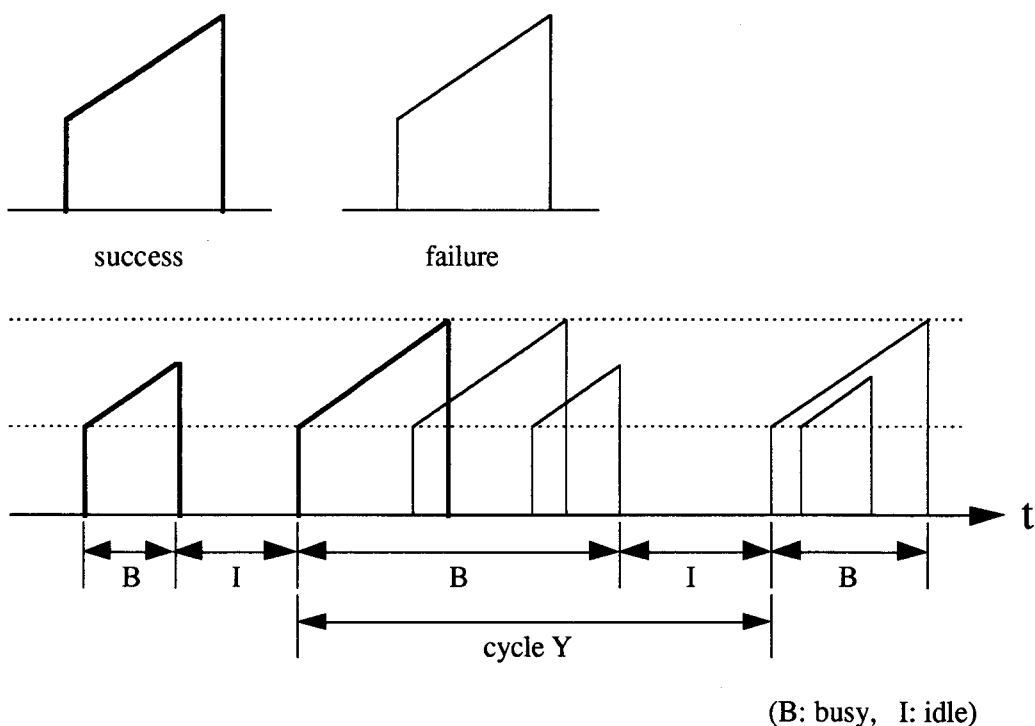


図 4-2 v-ALOHA による受信過程  
 Fig.4-2 The receiving process of v-ALOHA.

また、1 サイクル当りの送出成功パケット長  $t_{suc}$  の平均は、

$$E[t_{suc}] = \int_0^{T_{max}} p_F(t) t p_c(t) dt \quad (4.2)$$

ここに、 $p_c(t)$  は再送を含めたパケット長  $t$  の確率密度関数である。また、 $p_F(t)$  はビジー区間の先頭パケットの送出成功確率、すなわち、第2番目のパケットが先頭から  $T_d$  以内に送出されない確率である。但し、パケット長  $t$  が  $T_d$  より短い場合は、第2パケットが  $t$  以内に送出されない確率となる。 $p_F(t)$  は次式で与えられる。

$$p_F(t) = \begin{cases} \exp(-\lambda t) & (t < T_d) \\ \exp(-\lambda T_d) & (t \geq T_d) \end{cases} \quad (4.3)$$

従って、スループット  $S_v$  は次式となる。

$$S_v = E[t_{suc}] / E[Y] \\ = \lambda \exp(-\lambda/\mu) \left\{ \int_0^{T_d} \exp(-\lambda t) t p_c(t) dt + \exp(-\lambda T_d) \int_{T_d}^{T_{max}} t p_c(t) dt \right\} \quad (4.4)$$

次に、 $T_d$  が十分小さく、従って  $t < T_d$  となる確率が小さく、式(4.4)の第1項が無視できる場合を考える。同じく、ヘッダ(長さ  $H/C \geq T_d$ )の付随等により、常にパケット長  $t$  が  $T_d$  以上となる場合も考える。いずれも現実的に意味のある想定である。この両者の場合とも、スループット  $S_v$  は、

$$S_v = \frac{\lambda}{\mu} \exp\left\{-\lambda\left(\frac{1}{\mu} + T_d\right)\right\} \quad (4.5)$$

となる。この場合は、通常の p-ALOHA とは異なり、衝突を受ける確率はパケット長とは無関係である。従って、再送を考慮したパケット長の確率密度関数  $p_c(t)$  は元の確率密度関数  $p(t)$  と等しい。また、式(4.5)で与えられる性能は、パケット長分布にかかわらず、平均パケット長  $1/\mu$  のみで決定されることがわかる。

上式は、平均トラヒック  $G (= \lambda/\mu)$ 、および相対捕捉時間  $\beta$  (捕捉時間と平均パケッ

ト伝送時間の比,  $=T_d \cdot \mu$ ) により, ALOHA の性能を一般化した形として, 次式で与えられる.

$$S_v = G \cdot \exp\{-G(1+\beta)\} \quad (4.6)$$

次に,  $T_d \rightarrow 0$  の場合の極限性能を考察する. これは, 先頭パケットであれば常に捕捉効果が得られると言うことであり, 式(4.6)で  $\beta \rightarrow 0$  とすれば, s-ALOHA の性能  $S_s$  に収束する. すなわち, 本捕捉方式の性能は可変長パケット, 任意送出時刻でありながら, 極限性能として s-ALOHA の性能を有している. また,  $T_d$  が  $T_{max}$  より大の場合は, 捕捉効果が全く生じることなく p-ALOHA と同様となり, 固定長パケットに関し p-ALOHA の性能  $S_p$  に一致する. すなわち, 式(4.6)において,  $\beta$  を 1 とした極限性能となる.

$$\lim_{\beta \rightarrow 0} S_v = G \cdot \exp(-G) = S_s \quad (4.7)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow 1} S_v = G \cdot \exp(-2G) = S_p \quad (4.8)$$

#### 4.5 性能の数値的検討

本節では, v-ALOHA の数値的 performance 評価を他の方式と比較して行う. 固定長パケットに関し, 捕捉効果を利用する Metzner の方式 (以下, 二群群別方式と呼ぶ), p-ALOHA, s-ALOHA と比較を行い, また, 相対捕捉時間  $\beta$  の各値に対する性能を調べる. 可変長パケットに関しては, s-ALOHA と比較を行う. その際のパケット長分布は, Ferguson<sup>[55]</sup> が p-ALOHA の性能解析に用いた二種類の典型的な分布について行う.



#### 4. 5. 1 固定長パケット形式

性能評価は、再送を含めた網全体のトラフィック  $G$  に対するスループットにより行う。二群群別方式は p-ALOHA に適用し、現実問題に近い扱いとするために、全体のトラフィック  $G$  と各群への端末の配分率  $\alpha$  により評価する。二群群別方式のスループット  $S_{HL}$  の評価式は次式で与えられる。（導出に関しては、付録 A を参照）

$$S_{HL} = \alpha G \cdot \exp(-2\alpha G) + (1-\alpha) G \cdot \exp(-2G) \quad (4.9)$$

v-ALOHA のスループット  $S_v$  は、式 (4. 6) により  $\beta$  を与えて評価する。但し、パケット長は捕捉時間  $T_d$  より大とする。捕捉のない p-ALOHA, s-ALOHA のスループット  $S_p, S_s$  は周知の通り、式 (4. 8), (4. 7) で評価する。

図 4-3 に、各方式の性能を比較して示した。  $S_{HL}$  に関しては  $\alpha = 0.35$  (式 (4. 9))

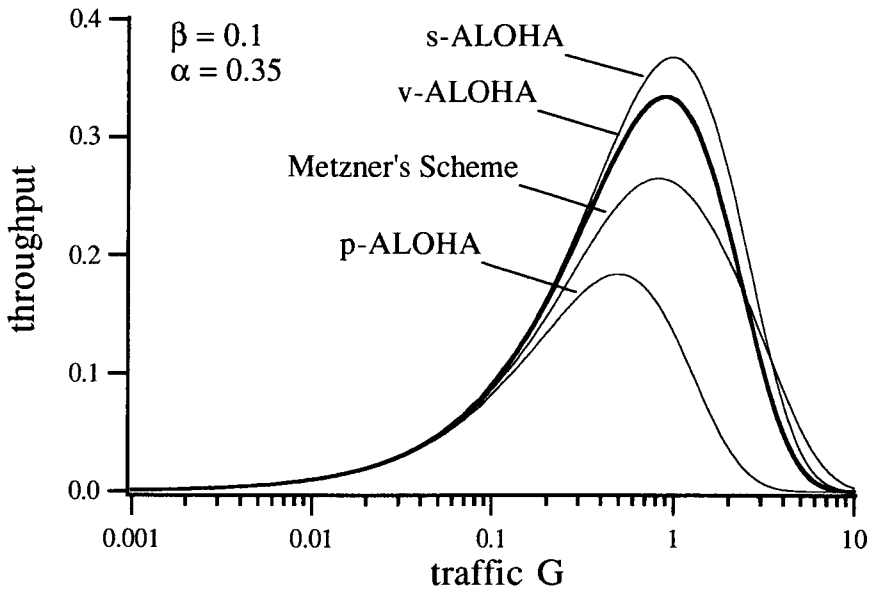


図 4-3 各種方式の性能比較 (固定長パケット)

Fig. 4-3 The throughput of v-ALOHA and various protocols.

は  $\alpha_{OPT}(G)$  が存在する。解析的には求められないが、 $G$  の 1 ~ 2 に対し  $\alpha_{opt}$  は約 0.2 ~ 0.4 である。)、 $S_v$  に関しては  $\beta = 0.1$  とした。

この図より、v-ALOHA は s-ALOHA の性能に近い値を達成していることがわかる。また、二群群別方式は捕捉のない p-ALOHA の性能を上回っているものの、v-ALOHA には及ばない。また、スループットのピークを超える  $G$  の範囲では、v-ALOHA を上回る部分もあるが、そこでは、システムは過負荷となり通常使用されない。

図 4-4 には、 $\beta$  の各値に対する性能を示した。 $\beta = 0$  の場合が s-ALOHA の性能となる。図より、 $\beta = 0.1$  付近であれば、微少な  $\beta$  に十分近い性能を示していることがわかる。従って、捕捉時間は、性能に対してそれほど厳しい条件とはならない。

以上より、固定長パケット形式に関し v-ALOHA の有効性が確認できた。

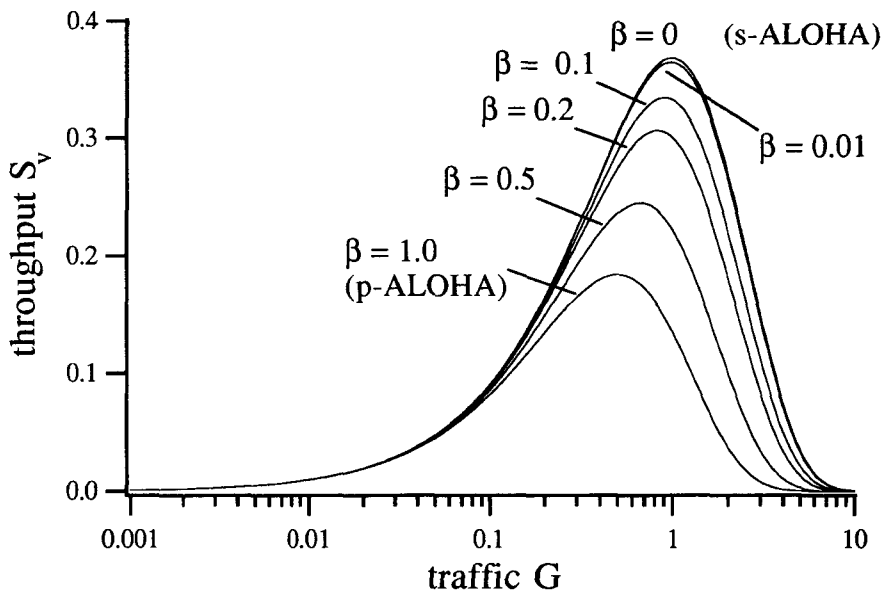


図 4-4 相対捕捉時間による性能  
Fig. 4-4 The throughput of v-ALOHA for various  $\beta$ .

#### 4. 5. 2 可変長パケット形式

本方式は、p-ALOHA を基本にしているため、パケットの無駄部分は存在しない。しかし、s-ALOHA の場合、元々のメッセージが可変長の場合、一定長のスロットに收容するため、スロットの無駄が生じ、式(4. 10) で示される実効スループットは低い値となる。

$$\text{実効スループット} = \frac{\text{平均メッセージ長}}{\text{平均パケット長}} \cdot \text{スループット} \quad (4.10)$$

従って、v-ALOHA の方が s-ALOHA より高いスループットを示すことが予想される。

可変長パケットに関し、Fergusonは p-ALOHA を対象とした性能解析を行い、スループットの上限を固定長パケット、下限を、ヘッダおよびメッセージの2種の固定長パケットが混在する場合とし、その中間として、指数分布のパケット長を扱っている。指数分布の場合、ある一定長を超える部分は切捨て、パケット長の確率密度関数を算出している。ここでは、Fergusonが用いた2種類のパケット長分布に対し、本方式と s-ALOHA の性能比較を行う。性能は、平均パケット生成率 $\lambda$ に対するスループットにより評価する。

第1のパケット長分布は、スロットをフルに使用するデータパケットと、通信制御用にごく僅かのビットしか含まない制御パケットの、2種類のみによる分布である。いずれも、長さ $H$  ( $H/C \geq T_d$ ) のヘッダを伴っている。メッセージの長さを $L_m$ とすると、データパケット長は  $L_m+H$  であり、これはスロット長でもある。制御パケット長は、制御データ部を無視して $H$ として扱う。両パケットの構成比を $\gamma$ とする。

v-ALOHA, s-ALOHA の実効スループット $S_{ve}$ ,  $S_{se}$ はそれぞれ次のようになる。詳細は付録Bを参照。

$$S_{ve} = \lambda \frac{(1-\gamma)L_m}{C} \exp\left[-\lambda \left\{ \frac{(1-\gamma)L_m+H}{C} \right\} (1+\beta)\right] \quad (4.11)$$

$$S_{se} = \lambda \frac{(1-\gamma)L_m}{C} \exp\left(-\lambda \frac{L_m+H}{C}\right) \quad (4.12)$$

図4-5に両者の数値性能を比較した。パラメータは、伝送速度 $C=50$ (Kbps)、ヘッダ長 $H=100$ (bit)、メッセージ長 $L_m=900$ (bit)、相対捕捉時間 $\beta=0.1$ 、 $\gamma=0.5$ とした。この結果、当初の予想通り、制御パケットの比率のため s-ALOHA の性能は大幅に低下し、v-ALOHA を大きく下回っている。これに対し、v-ALOHA の性能は、式(4.5)を基本としているため、パケット長分布にかかわらず、平均パケット長で性能が決まる。劣化要因は、ヘッダ部による無効分のみであるため、図4-3における性能に比べ、ここでの s-ALOHA ほどの大きな低下は認められない。

次に、第二のパケット長分布として、切捨て(truncated)指数分布に対する性能を調べる。この分布は p-ALOHA に対しては、図4-5 で用いた分布と固定長の中間の性

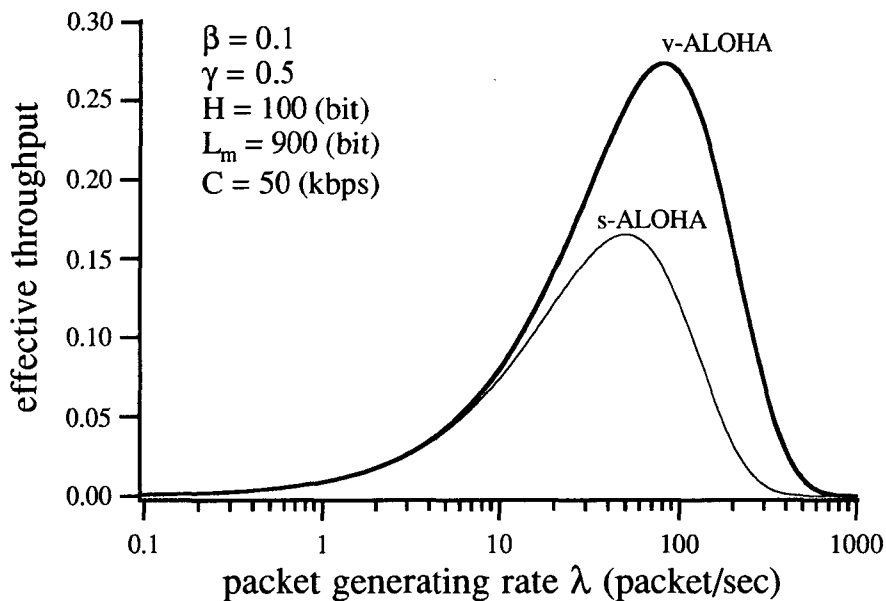


図4-5 可変長パケットに対する性能 (制御、データパケットのみ)

Fig. 4-5 The effective throughput for variable length packets.  
(the distribution of control and data packet)

能を与える。v-, s-ALOHA に対する性能は次式の通り。ここに  $L_m$  は最大メッセージ長（従ってスロット長は  $L_m + H$ ）， $1/\mu_m$  は元の指数分布の平均メッセージ長である。詳細は付録 B を参照。

$$S_{ve} = \lambda \frac{\{1 - \exp(-\mu_m L_m)\} / \mu_m}{C} \cdot \exp\left\{-\lambda \left[\frac{\{1 - \exp(-\mu_m L_m)\} / \mu_m + H}{C}\right] (1 + \beta)\right\} \quad (4.13)$$

$$S_{se} = \lambda \frac{\{1 - \exp(-\mu_m L_m)\} / \mu_m}{C} \exp\left(-\lambda \frac{L_m + H}{C}\right) \quad (4.14)$$

図 4-6 に数値結果を比較した。  $1/\mu_m$  は 1000 (bit) とした。スロットが完全に使用されている確率（前のパラータの  $1 - \gamma$  に相当）は、0.407 となる。それ以外のパケ

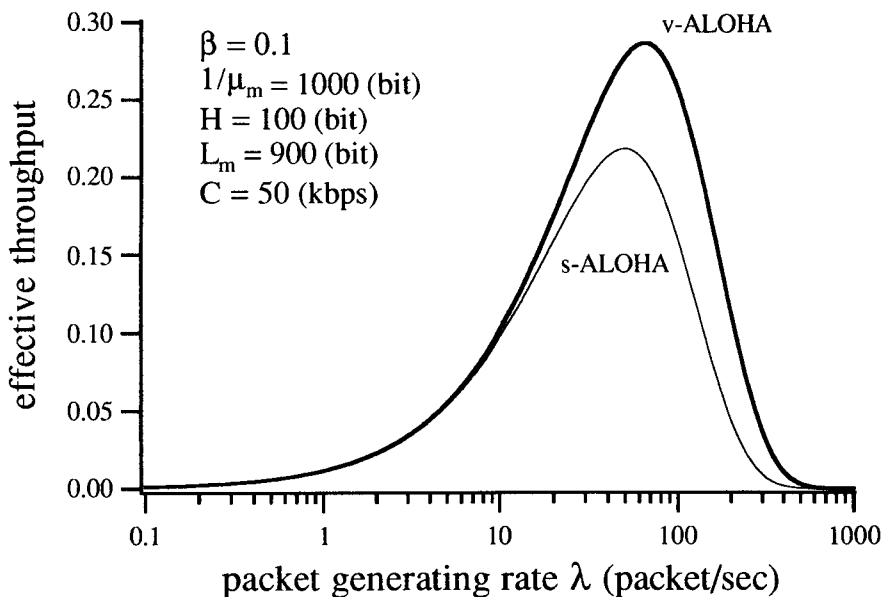


図 4-6 可変長パケットに対する性能（切捨て指数分布）  
 Fig. 4-6 The effective throughput for variable length packets.  
 (truncated exponential distribution)

ット長は指数分布に従っている。他のパラメータは、図4-5と同一である。図4-5と同様、スロットの無駄が多いため、s-ALOHAの劣化は大きく、従って本方式が勝っている。

以上の結果から、可変長メッセージに対しては、使用の簡便性、スループット性能とも、本方式の方が優れていることが確認される。

#### 4. 6 結言

時変出力制御方式（PCT方式）を p-ALOHA に適用し、VSAT を用いた衛星パケット網の特性に対応した新しいアクセスプロトコル v-ALOHA を提案した。p-ALOHA を基本プロトコルとしPCT方式を組み合わせたことにより、p-ALOHA の使用の簡便さと、捕捉による性能の向上という2つの特徴を併せもっている。また、各ユーザに対し、何らの優先度も導入する必要がなく運用できるのも特徴の一つである。

解析により、スループット性能は、概ね、平均パケット長と同一の固定長パケットでの、s-ALOHA と p-ALOHA の間の値を取ることがわかった。数値結果により、固定長パケットでの性能は、妥当な相対捕捉時間 $\beta$ で、極限性能である s-ALOHA に十分近い値を達成していることを確認した。しかも、可変長メッセージに対する性能では、スロットの有効利用が成されないため s-ALOHA の性能が大きく劣化するのに対し、v-ALOHA の劣化は軽少であり、スループット特性は、逆に、v-ALOHA の方が高いことがわかった。このような優れた特性をもつため、v-ALOHA は、今後、VSAT網の拡大、普及への有効な手段となるであろう。

## 第5章

### 時変出力制御方式を用いた s-ALOHA 方式 (s-ALOHA/PCT)

#### 5.1 緒言

時変出力制御方式 (PCT方式) は任意のアクセスプロトコルと組み合わせることでその性能改善を図ることが可能であり、前章では、ランダムアクセス系の基本プロトコルである p-ALOHA と組み合わせ、近年普及が開始された VSAT網向けのアクセスプロトコルとして v-ALOHA を提案し、その有効性を確認した。本章では、同期機能を有する網を対象として、PCT方式の s-ALOHA への適用につき検討する<sup>[29]</sup>。s-ALOHA は p-ALOHA を改良したものであり、より高いスループット性能を有するため、PCT方式を適用することにより、v-ALOHA より更に高い性能が得られることが期待される。

以下では、同期を基本とする s-ALOHA とパケット到着時刻差を必要とする PCT方式の適合性について述べ、両者の要求を整合される着想を導入する。この着想に基づき、新しいアクセスプロトコルを2種、固定パケット長形式に関して捕捉区間付s-ALOHA、可変長パケット形式に関して末尾同期s-ALOHA を提案し、原理および特長を述べる。更に、これらに関し、その性能を解析的および数値的に評価し、両プロトコルの有効性を確認する。

#### 5.2 s-ALOHA と PCT方式の適合性

p-ALOHA に PCT方式を適用し性能の改善を図ったアクセスプロトコルが v-

ALOHA<sup>[28]</sup>である。このPCT方式は、パケット送出中に出力を増大することにより、受信地点においてパケットの到着時刻に差があれば、それら間に受信パワー差が生じ捕捉効果が誘起されることを基本原理としている。すなわち、図5-1に示すように、PCT方式は本質的に、パケット到着時間差をパケット受信パワー差に変換するものである。

一方、p-ALOHAの性能をプロトコルレベルで改善した方式がs-ALOHA<sup>[30]、[31]</sup>である。p-ALOHAでは、図5-2(a)に示すように、先頭パケットの末尾と後続パケットの先頭のごく一部分の衝突によっても、両パケットの全データが廃棄され、チャネル容量が大きく損なわれる。これに対し、s-ALOHAでは、時間を、固定したパケット長と同一長のスロットに分割し、パケット送出はスロットに同期して行うことを基本原理としている。このため、パケット衝突が生じる場合は、図5-3(a)のように、パケット全長に渡る衝突となり、廃棄されるデータの占める時間長がp-ALOHAに比較して短くなり、スループット性能が改善される。

また、s-ALOHAによる性能改善は、次のように説明することも出来る。p-ALOHA

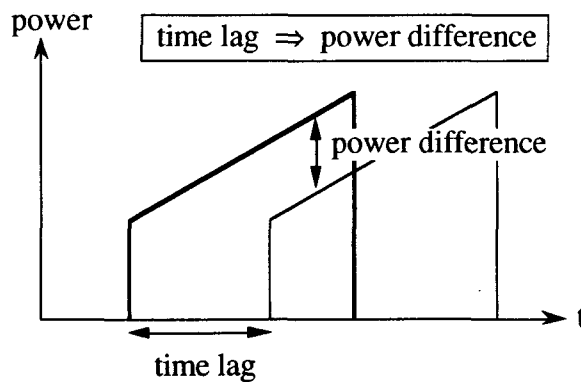


図5-1 到着時刻差による受信パワー差の生成  
Fig. 5-1 The time lag generating power difference in PCT scheme.



において、あるパケットが衝突を受けないためには、そのパケット付近の所定の時間帯に他のパケットの生成および送出が無いことが必要である。この時間帯を vulnerable period と呼び、図 5-2 (b)に示す。s-ALOHA の場合、生成したパケットは全て次のスロットの先頭において送出されるため、vulnerable period は図 5-3 (b)に示すように、p-ALOHA の1/2 となり、衝突を生じる確率が軽減され、スループット性能が改善される。以上のように、s-ALOHA は、送出開始そしてパケット到着の時刻を所定のタイムスロットに同期させることにより、p-ALOHA の性能を改善するものである。

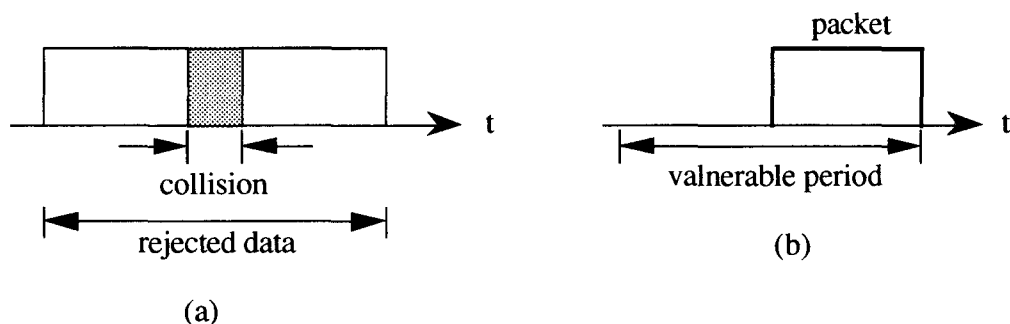


図 5-2 p-ALOHA における衝突  
Fig. 5-2 The collision in p-ALOHA.

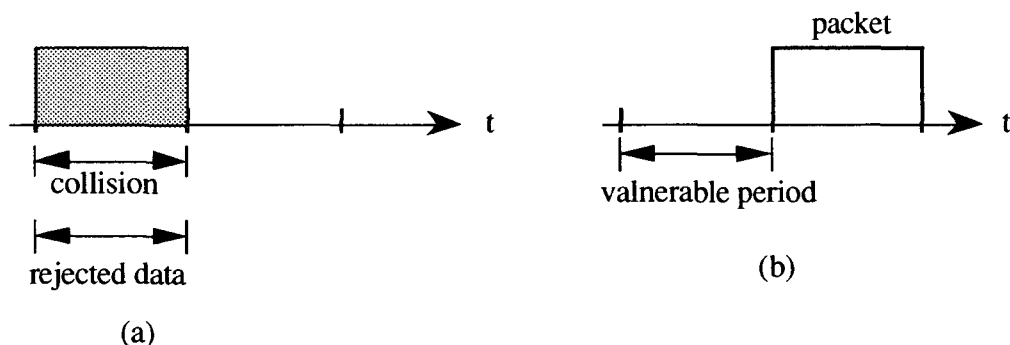


図 5-3 s-ALOHA における衝突  
Fig. 5-3 The collision in s-ALOHA.

この s-ALOHA に P C T方式を適用すれば、v-ALOHA を凌ぐスループット性能を有する新しいアクセスプロトコルの実現が期待される。P C T方式はアクセスプロトコルレベルより下位のアクセス制御レベルに属するものであり、任意のアクセスプロトコルと組み合わせることが可能であるため、s-ALOHA と組み合わせることも基本的には可能である。しかし、P C T方式は有効に動作するためにパケット到着時刻差を本質的な条件とし、一方 s-ALOHA はパケット到着時刻がスロットに同期することを基本原理としている。従って、両者を直接組み合わせ新しいアクセスプロトコルを開発することはできず、s-ALOHA の送出手順になんらかの着想に基づく変更が必要とされる。

### 5. 3 s-ALOHA/P C T

本節では、P C T方式を s-ALOHA に適用する具体的手法を述べる。前節で述べたように、P C T方式はパケット到着開始時刻差を必要とし、s-ALOHA はパケット到着開始時刻の同期を基本原理としているため、P C T方式を s-ALOHA に適用する為には新しい着想に基づく送出手順の改良を必要とする。以下では、固定長パケット形式および可変長パケット形式に関し、P C T方式を s-ALOHA に適用するための2種類のプロトコルを提案する。

#### 5. 3. 1 捕捉区間付 s-ALOHA <sup>[56]</sup>

固定長パケットを送出する s-ALOHA に P C T方式を適用するには、パケットの到着時刻、従って送出の時刻を適当にずらす配慮が必要となる。そこで、図 5-4 に示すようなスロット構成を考える。スロットの前半に、捕捉区間(capture interval) と呼ぶ時間帯を設けている。後半の時間帯は、パケット長と同一の長さである。この捕捉区

間を設けることにより、パケット送出手の開始を捕捉区間でランダムに選定することが出来る。その結果、同一スロット内の衝突パケットの間に到着時刻の差が生じ、PCT方式による捕捉効果が実現される。図5-5に示すように、2つのパケットA、Bが同一スロットにおいて衝突を生じた場合、その到着時間差 $\Delta T$ が捕捉時間 $T_c$ より大であれば、パケットAは捕捉に成功し、正常に受信される。なお、相対捕捉時間 $\beta$ は、

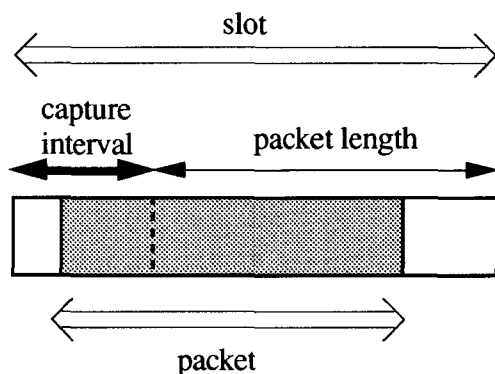


図5-4 s-ALOHA/CIのスロット構成  
Fig. 5-4 The slot structure for s-ALOHA/CI.

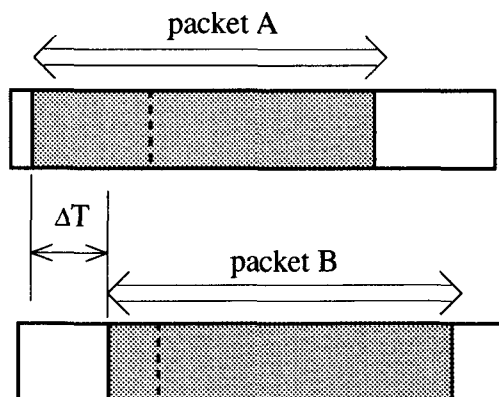


図5-5 パケット到着時間差 (s-ALOHA/CI)  
Fig. 5-5 The time lag between packet arrivals (s-ALOHA/CI).

捕捉時間  $T_d$  をパケット伝送時間で正規化したものである。また、捕捉区間の長さは、パケット長で正規化して扱い、 $h$  と表わす。

この新しいプロトコルを、捕捉区間付 s-ALOHA (s-ALOHA/CI: s-ALOHA with Capture Interval) と呼ぶ。具体的手順は以下の通りである。各端末において、送出すべきメッセージが生成されると、パケット開始デリミタ、ヘッダ、メッセージ、フレームチェックシーケンス、パケット終了デリミタによりパケットを構成する。ついで、乱数等により、捕捉区間内における送出開始時刻を決定する。次のスロットにおいて、決定された時刻に、衛星または中央局に向け送出を開始する。その際、送信出力に時変出力制御を施す。送出に当たっては、網の状態に関する情報には関知しない。送信端末は、衛星等からのダウンリンクをモニタすることにより、送信成功の有無を知る。送信の失敗を知ったときは、適当なバックオフスロットの後、再送信する。

s-ALOHA/CI のスループット性能は、PCT方式を組み合わせることにより、元の s-ALOHA を改善する値となることが期待される。相対捕捉時間  $\beta$  の値を一定として、定性的に性能の傾向を考察する。捕捉区間の導入により、PCT方式による捕捉が可能となったが、捕捉区間長  $h$  の値により、捕捉による伝送成功の確率は変化する。 $h$  の最小値は、明らかに  $\beta$  である。 $\beta$  未満の  $h$  においては、捕捉効果は得られない。 $h$  の増大に伴い、捕捉成功の確率は単調に増大する。しかし、 $h$  はスロットに対し、オーバーヘッドとなる区間であるため、 $h$  の増大は伝送の効率を低下させる方向に働く。従って、スループット性能の見地から、 $h$  には相矛盾する要因が含まれ、その最適値が存在する。

### 5. 3. 2 末尾同期 s-ALOHA <sup>[57]</sup>

パケット長が固定長の場合、s-ALOHA は p-ALOHA の 2 倍のスループット性能を示すが、可変長パケットを対象とする場合は、スロット長に満たない部分はスロットロスとして無駄な伝送となる。このため、可変長パケット形式での s-ALOHA の実効

スループット、すなわち無駄部分を除いたスループットは低い値となり、パケット長分布によっては固定長 p-ALOHA のスループットより劣化する場合もある。s-ALOHA/CI も、可変長パケットを対象とした場合は、同様に実効スループットは固定長パケットでのスループットより低下すると考えられる。

そこで、可変長パケット形式に対しては、次のようなスロット構成を考える。すなわち、図 5-6 のように、パケット末尾がスロット終了時刻に同期するように、パケットの送出開始時刻を決定する。このことにより、パケット長の差が PCT 方式に必要な送出開始時刻の差となる。

この可変長パケットの末尾を揃え、s-ALOHA により送出するプロトコルを、末尾同期 s-ALOHA (s-ALOHA/TS : s-ALOHA with Tail Synchronization) と呼ぶ。s-ALOHA/TS のプロトコルは次のようになる。送出すべきパケットは、最短のものをヘッダのみの H、最長のものをスロット長と同じ 1 とし、上述のような送出開始時刻に送出し、所定の時間関数に従って出力を増大する。ここで、パケット長は、最大パケット長すなわちスロット長で正規化して扱っている。送出過程は、スロット単位で

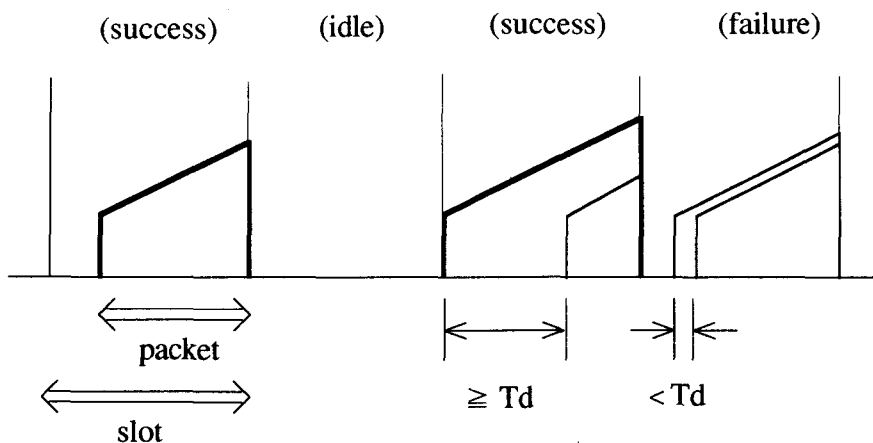


図 5-6 パケット長と捕捉の成否 (s-ALOHA/TS)  
Fig. 5-6 The capture effect and packet length (s-ALOHA/TS).

みれば、s-ALOHAと同じであるが、実際に送出される信号は、パケットが存在している部分となり、長いパケットほど早い時刻に送出され、最長のパケットでスロット開始に同期して送出される。受信側では、図5-6のように、1スロット内に単一のパケットが送信されている場合、または、複数のパケットが同一スロットに存在し、先頭と後続のパケット間に $T_d$ 以上の時間差が存在することにより捕捉効果が生じる場合に、受信成功となる。それ以外のパケットは、受信失敗となる。

次に、s-ALOHA/TSの定性的特徴を述べる。まず、長いパケットほど、先行して送出されるために、捕捉効果を生じやすくなる。これは、パケット長により優先度が付与されていることと等価になる。このため、長いパケットほど伝送成功の可能性が高くなり、スループットの改善に大きく寄与する。このことは、p-ALOHAにおいて長いパケットほど衝突を受けやすくなり、スループット劣化の要因となっていることと逆である。また、s-ALOHA/CIに比較し、捕捉区間を必要としないため、オーバーヘッド部が無くなることもスループット向上に結びついている。

## 5. 4 捕捉区間付 s-ALOHAの性能評価

本節では捕捉区間付 s-ALOHAのスループット性能を解析的に導出する。また、スループット改善の評価尺度として、捕捉効果の発現を確認するために、衝突スロットのうち捕捉により回復される割合、すなわち、スロット回復率 $P_r$ を導入し、解析する。更に、解析的に導いた各性能を数値的に求め、本プロトコルの有効性を確認する。

### 5. 4. 1 性能解析

スロット回復率 $P_r$ を次式により導入し、解析的に検討する。なお、スロット回復率 $P_r$ は、捕捉区間付 s-ALOHAおよび次節の末尾同期 s-ALOHAの両プロトコル

に関し、共通する評価指標である。

$$P_r = \frac{N_r}{N_c} \tag{5.1}$$

ここに、 $N_c$ は全衝突スロット数、 $N_r$ は $N_c$ のうち捕捉により回復したスロット数であり、それぞれ次のように与えられる。

$$N_r = N_s - N_n \tag{5.2}$$

$$N_c = N_a - N_i - N_n \tag{5.3}$$

ここに、 $N_s$ は伝送に成功したスロット数、 $N_n$ は $N_s$ のうち衝突の生じていないスロット数、 $N_a$ は全スロット数、 $N_i$ は空スロット数である。

以下の捕捉区間付 s-ALOHA の性能解析においては、以下のことを仮定する。ユーザ数は無限大とし、パケット生成はポアソン過程に従うものとする。生成されたパケットは、次スロットにおいて送出する。送出時刻は、一様分布により捕捉区間内で決定される。相対捕捉時間を  $\beta$ 、捕捉区間長を  $h$  とし、パケット長は 1 として扱う。

図 5-7 に、注目するパケットの到着時刻  $t$  およびその他のパケットの到着時刻  $t'$

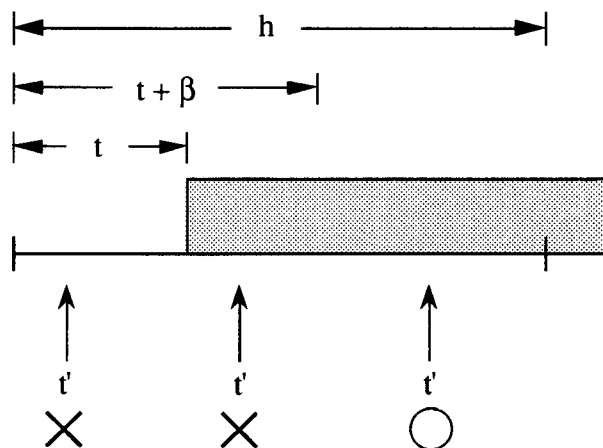


図 5-7 パケット到着時刻と捕捉の成否 (s-ALOHA/CI)  
Fig. 5-7 The capture effect and packet arrival time (s-ALOHA/CI).

を示す。ここに、時刻はパケット伝送時間で正規化したものとし、 $\beta$ 、 $h$ と同次元で扱う。当該パケットが伝送に成功するには、スロット内に他のパケットが存在しないか、存在しても、スロットの開始時刻から当該パケットの捕捉時間内以外の区間に到着するか、のいずれかである。従って、両方の場合をまとめると、伝送成功の確率  $P_s(t)$  は、他のパケットがスロットの開始時刻 0 から  $t + \beta$  までに到着しない確率となり、次式で与えられる。

$$P_s(t) = \exp\left\{-\min(t+\beta, h) \frac{h+1}{h} G\right\} \quad (5.4)$$

ここに、 $G$  はパケット伝送時間当りの平均トラヒックである。上式を、捕捉区間内で平均して、伝送成功確率  $P_s$  を得る。

$$\begin{aligned} P_s &= \int_0^h \frac{1}{h} P_s(t) dt \\ &= \frac{1}{(1+h)G} \exp\left\{-\frac{\beta}{h} (1+h)G\right\} + \left\{\frac{\beta}{h} - \frac{1}{(1+h)G}\right\} \exp\{-(1+h)G\} \quad (5.5) \end{aligned}$$

スロット当りのトラヒックは  $G(1+h)$  であるので、パケット伝送時間当りのスループロット  $S_c$  は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_c &= G(1+h)P_s \frac{1}{1+h} \\ &= G \cdot P_s \\ &= \frac{1}{1+h} \left[ \exp\left\{-\frac{\beta}{h} (1+h)G\right\} + \left\{\frac{\beta}{h} (1+h)G - 1\right\} \exp\{-(1+h)G\} \right] \quad (5.6) \end{aligned}$$

$S_c$  をパケット伝送時間当りとしたのは、従来の s-ALOHA の性能との比較のためである。

スロット回復率  $P_r$  は、 $N_a$  を 1 に正規化すれば、次式と式 (5.1) ~ (5.3) により求められる。

$$N_a = 1 \quad (5.7)$$



$$N_s = S_c (1+h) \tag{5.8}$$

$$N_n = (1+h)G \cdot \exp\{-(1+h)G\} \tag{5.9}$$

$$N_i = \exp\{-(1+h)G\} \tag{5.10}$$

#### 5. 4. 2 数値評価

s-ALOHA/CI の基本性能として、式 (5. 6) で示されるスループット  $S_c$  を図 5-8 に示す。パラメータは、 $\beta=0.01$ 、 $h=0.2$  である。従来の s-ALOHA のスループット  $S_s$  および、s-ALOHA/CI のシミュレーション結果も併せて示している。シミュレ

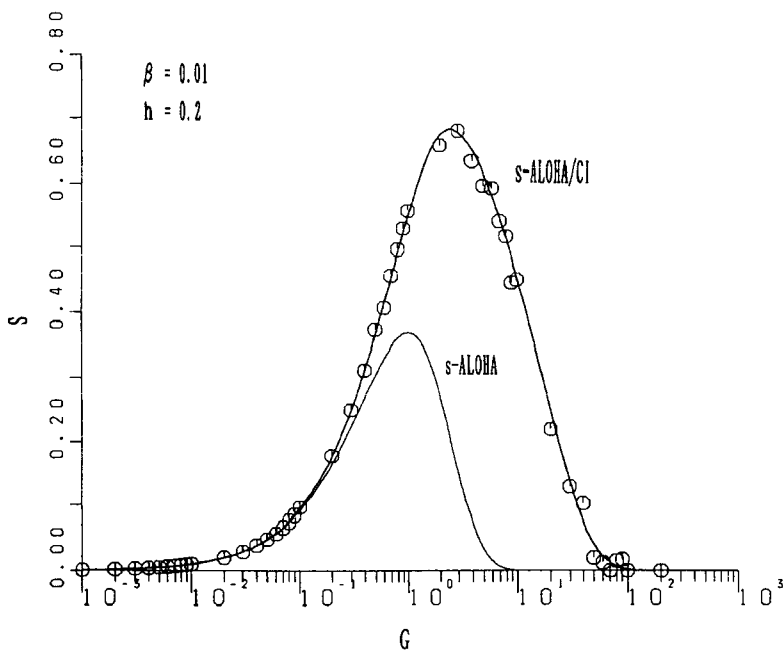


図 5-8 s-ALOHA/CI のスループット性能  
Fig. 5-8 The throughput performance of s-ALOHA/CI.

ーションでは、各G毎に5000個のパケットを生成し、その伝送の成否によりスループットを求めた。シミュレーション結果は理論値とよく一致し、s-ALOHA/CIの解析の正当性を実証している。この図より、性能は、従来のs-ALOHAの性能を大きく上回っていることがわかる。しかも、網が過負荷とならない動作範囲のGは、より高トラフィックに及んでいる。これより、s-ALOHA/CIの有効性が確認される。

式(5.1)～(5.3)および式(5.7)～(5.10)により求められるスロット回復率 $P_r$ を図5-9に示し、シミュレーション結果を併記した。シミュレーションでは、各G毎に3000個の衝突スロットにつき、その捕捉の成否により $P_r$ を求めた。パラメータは $\beta=0.01$ 、 $h=0.171$ である。この $h$ はほぼ最適値である。図より、軽トラフィックにおいて、約89%の衝突スロットが捕捉により回復されてることがわかり、s-ALOHA/CIのスループットの改善を裏付けている。

定性的検討でも述べたように、 $h$ は捕捉率の向上と、オーバーヘッドの増大という

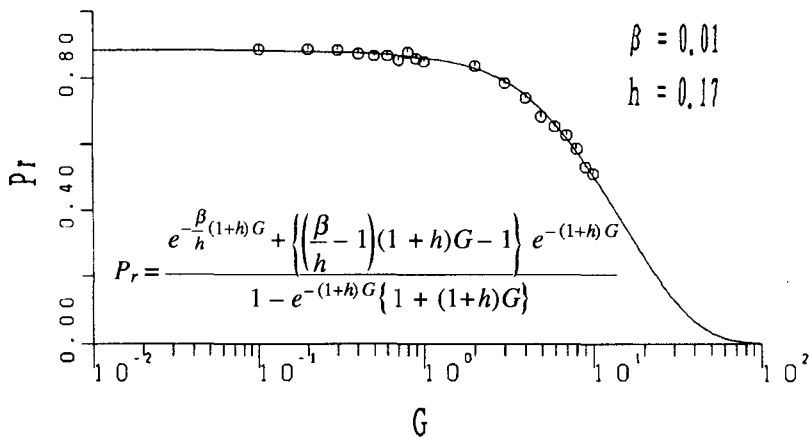


図5-9 s-ALOHA/CIのスロット回復率  
Fig. 5-9 The slot recovery ratio of s-ALOHA/CI.

相反する要因を持ち、最適値が存在する。hの最適値は、解析的には求められないが、Gの関数である。従って、Gの各値に関し最適値  $h_{opt}$  が存在する。図5-10では、各Gにおいて  $h_{opt}(G)$  を数値的に求め、それに基づく  $S_c$  を図示した。右軸が  $h_{opt}(G)$ 、左軸が  $S_c$  である。この図より、過負荷とならないGにおいては、 $h_{opt}(G)$  は妥当な値となっており、しかも、 $S_c$  は s-ALOHA に比べ大きく改善されていることがわかる。

以上の数値結果から、捕捉区間hを導入して、PCT方式を s-ALOHA に適用した、s-ALOHA/CI の性能の正当性と有効性が確認された。

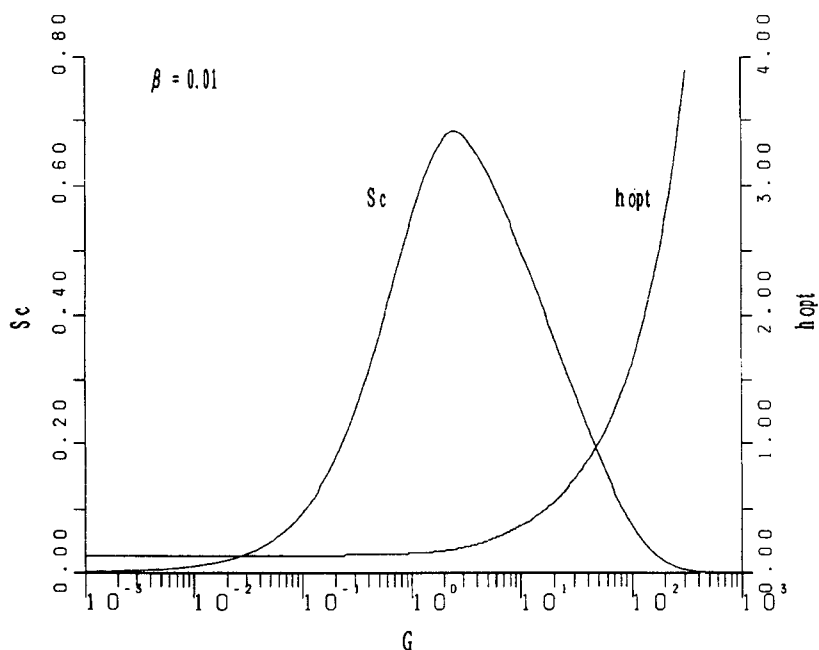


図5-10 最適捕捉区間長とスループット性能  
Fig. 5-10 The optimum  $h$  and corresponding throughput performance.

## 5. 5 末尾同期 s-ALOHA の性能評価

本節では末尾同期 s-ALOHA のスループット性能を解析的に導出する。また、前節で導入したスロット回復率  $P_r$  を解析的に求める。更に、各解析性能の数値評価を行い、本プロトコルの有効性を確認する。

### 5. 5. 1 性能解析

末尾同期 s-ALOHA に従うパケット伝送に関して、以下のことを仮定する。スロット長は 1 として扱う。相対捕捉時間  $\beta$  は、捕捉時間  $T_d$  を、最大パケット長さ  $s$  ならぬスロット長で正規化した値とする。パケット長  $x$  は、最短でヘッダ長  $H$ 、最長でスロット長 1 とし、与えられた確率密度関数  $p(x)$  に従う。長さは、全てスロット長で正規化したものとし、 $\beta$  と同次元で扱う。ユーザ数は無限大とし、パケットの生成は、平均生成率  $\lambda$  (packet/slot) のポアソン分布に従うものとする。トラヒック  $G$  は、平均パケット長を  $1/\mu$  とすれば、

$$G = \lambda/\mu \quad (5.11)$$

$$1/\mu = \int_H^1 x p(x) dx \quad (5.12)$$

で与えられる。

スループットは、可変長パケットを対象とするため、スロット当りの平均伝送成功パケット長、すなわち実効スループットにより評価する。従って、従来の s-ALOHA の実効スループット  $S_s$  は、ヘッダも有効データとして扱えば次式で与えられる。

$$S_s = \lambda \cdot \exp(-\lambda) / \mu \quad (5.13)$$

長さ  $x$  のパケットの伝送成功確率を  $P_s(x)$  とすれば、s-ALOHA/TS の実効スループット  $S_T$  は、次式で与えられる。

$$S_T = \lambda \int_H^1 x p(x) P_s(x) dx \quad (5.14)$$

ここに、 $P_s(x)$  は、そのスロット内に長さが  $x - \beta$  以上のパケットが存在しない確率であるため、 $x - \beta$  以下のパケットが生成される確率を  $P(x)$  とすれば、

$$\begin{aligned} P_s(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} \{\lambda \cdot P(x)\}^n \exp(-\lambda) / n! \\ &= \exp\{-\lambda(1-P(x))\} \end{aligned} \quad (5.15)$$

となる。

スロット回復率  $P_r$  は、 $N_a$  を 1 に正規化して、次式と式 (5.1) ~ (5.3) により求められる。

$$N_a = 1 \quad (5.16)$$

$$N_s = \lambda \int_H^1 p(x) P_s(x) dx \quad (5.17)$$

$$N_n = \lambda \cdot \exp(-\lambda) \quad (5.18)$$

$$N_i = \exp(-\lambda) \quad (5.19)$$

式 (5.14) の  $S_T$  および式 (5.17) の  $N_s$  は、パケット長分布に依存するため、以下では具体的な分布を与えて性能を評価する。可変長パケット分布に関しては、Ferguson<sup>[55]</sup> が p-ALOHA の性能評価に用いた 2 つの分布を対象とする。先ず第 1 の分布は、制御パケットとデータパケットの 2 種類のパケットのみが存在し、制御パケットの構成比を  $\gamma$  とするものである。パケット長は、制御パケットに関しては制御

データ部を無視しヘッダ長Hとして扱い、データパケットはスロット長と同じ1とする。従って、パケット長xの確率密度関数  $p(x)$  は、

$$p(x) = (1 - \gamma) \cdot \delta(x - 1) + \gamma \delta(x - H) \quad (5.20)$$

ここに、 $\delta(\cdot)$ はディラックのデルタ関数である。このとき、 $P(x)$ は、 $\beta \leq 1 - H$ と仮定すれば、

$$P(x) = \begin{cases} \gamma & (x = 1) \\ 0 & (x = H) \end{cases} \quad (5.21)$$

となり、スループット  $S_T$ は、

$$S_T = \lambda [(1 - \gamma) \exp\{-\lambda(1 - \gamma)\} + \gamma H \cdot \exp(-\lambda)] \quad (5.22)$$

で与えられる。

平均パケット長  $1/\mu$  は、

$$1/\mu = (1 - \gamma) + H\gamma \quad (5.23)$$

で与えられ、トラヒックGは上式と式(5.11)により、s-ALOHAの実効スループット  $S_s$ は上式と式(5.13)で、それぞれ得られる。式(5.17)の  $N_s$ は、式(5.15)、(5.20)、(5.21)より、次のように与えられる。

$$N_s = \lambda [(1 - \gamma) \exp\{-\lambda(1 - \gamma)\} + \gamma \exp(-\lambda)] \quad (5.24)$$

従って、上式と式(5.16)、(5.18)、(5.19)および式(5.1)～(5.3)により、スロット回復率  $P_r$ が求められる。

第2のパケット長分布として、切捨て指数分布を扱う。これは、平均  $1/\mu_m$ の指数分布に従うメッセージを長さ  $1 - H$ を超えるものは切捨て、ヘッダHを付加しパケットとしたものである。パケット長の確率密度関数  $p(x)$ は、

$$p(x) = \mu_m \exp\{-\mu_m(x - H)\} \cdot u(x - H) + \exp\{-\mu_m(1 - H)\} \cdot \delta(x - 1) \quad (5.25)$$

で与えられる。ここに、 $u(\cdot)$ は単位ステップ関数である。このとき、 $P(x)$ は、

$$P(x) = \begin{cases} 1 - \exp\{-\mu_m(x-\beta-H)\} & (H+\beta \leq x \leq 1) \\ 0 & (H \leq x < H+\beta) \end{cases} \quad (5.26)$$

で与えられ、スループット  $S_T$  は、

$$\begin{aligned} S_T &= \lambda \cdot \left[ \exp\{-\mu_m(1-H)\} \cdot \exp\{-\lambda \cdot \exp\{-\mu_m(1-H-\beta)\}\} \right. \\ &\quad + \int_{H+\beta}^1 x \mu_m \exp\{-\mu_m(x-H)\} \cdot \exp\{-\lambda \cdot \exp\{-\mu_m(x-H-\beta)\}\} dx \\ &\quad \left. + \int_H^{H+\beta} x \mu_m \exp\{-\mu_m(x-H)\} \cdot \exp(-\lambda) dx \right] \\ &= \lambda \cdot \left[ \exp\{-\{\mu_m(1-H) + \lambda \cdot \exp\{-\mu_m(1-H-\beta)\}\}\} \right. \\ &\quad + \mu_m \int_{H+\beta}^1 x \cdot \exp\{-\{\mu_m(x-H) + \lambda \cdot \exp\{-\mu_m(x-H-\beta)\}\}\} dx \\ &\quad \left. + \exp(-\lambda) \{ H + 1/\mu_m - (H+\beta+1/\mu_m) \exp(-\mu_m\beta) \} \right] \end{aligned} \quad (5.27)$$

となる。第2項の積分は解析的には表すことができないので、数値評価の際は数値積分を用いる必要がある。

平均パケット長は、

$$1/\mu = \frac{1}{\mu_m} \{1 - \exp\{-\mu_m(1-H)\}\} + H \quad (5.28)$$

である。トラヒック  $G$ 、s-ALOHA の実効スループット  $S_s$  は、これを、式 (5.11)、(5.13) に代入して求められる。式 (5.17) の  $N_s$  は、式 (5.15)、(5.25)、(5.26) より、次のように与えられる。

$$N_s = \exp\{-\lambda \cdot \exp\{-\mu_m(1-H-\beta)\}\} \cdot \{\lambda \cdot \exp\{-\mu_m(1-H)\} + \exp\{-\mu_m\beta\}\} + \exp(-\lambda) \{\lambda - (1+\lambda)\exp\{-\mu_m\beta\}\} \quad (5.29)$$

従って、上式と式(5.16)、(5.18)、(5.19)および式(5.1)～(5.3)により、スロット回復率  $P_r$  が求められる。

### 5.5.2 数値評価

5.5.1で引用した各パケット長分布における、s-ALOHA/TSの性能の数値結果を、シミュレーション結果を併せ、図5-11～16に示す。

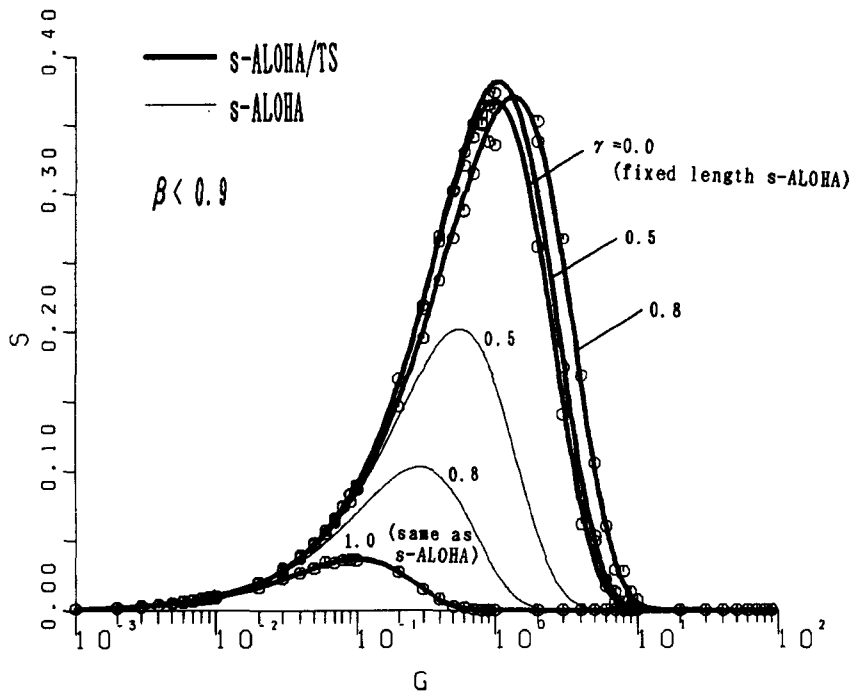


図5-11 s-ALOHA/TSのスループット性能  
(制御およびデータパケットによる分布)

Fig. 5-11 The throughput performance of s-ALOHA/TS  
(the distribution of control and data packet).



図5-11~13は2種の packets からなる分布に関するもので、図5-11は  $\gamma$  をパラメータとし、式(5.11)の  $G$  に対する式(5.22)の  $S_T$  の性能をプロットした。 $\gamma$  は、0.0, 0.5, 0.8, 1.0 とした。 $\gamma=0.0$  はすべてデータ packets であるため、固定長の s-ALOHA の性能  $G e^{-G}$  と同一である。また、 $H$  は0.1、 $\beta$  は0.9 以下の任意の値でよい。太線が s-ALOHA/TS のスループット  $S_T$  で、細線が s-ALOHA の実効スループット  $S_s$  である。シミュレーションは、図5-8と同様であるが、packet 長は所定の分布に従うものとしている。シミュレーション結果は理論値とよく一致し、解析の正当性を裏付けている。

$\gamma$  の増大に対応して、s-ALOHA の実効スループット  $S_s$  は大幅に減少しているが、s-ALOHA/TS のスループット  $S_T$  は常に  $S_s$  を上回り、固定長 s-ALOHA の性能をも上

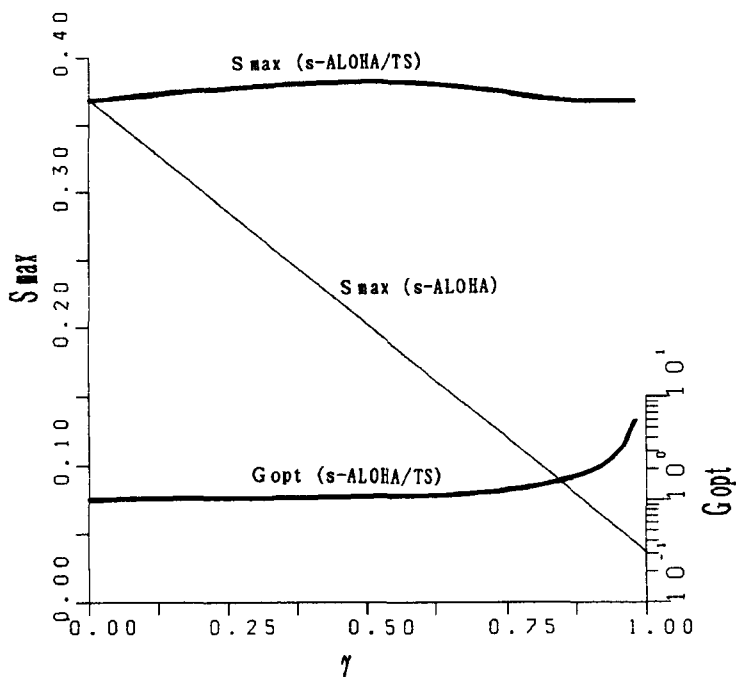


図5-12 制御 packets の比率  $\gamma$  に対する最大スループットおよび最適トラフィック

Fig. 5-12 The maximum throughput and optimum traffic vs.  $\gamma$ .

回っていることが分かる。これは、s-ALOHA では衝突となる場合でも、捕捉によりデータパケットが制御パケットを抑えて伝送に成功し、また、これに加え制御パケット単独での伝送成功が加わるためである。  $\gamma$  が 1.0 に近づくと、制御パケットは被捕捉または相互の衝突により、殆ど伝送されず、データパケットがスループットの中心となる。このため、最大スループットを与える最適トラヒックは増大し、データパケットの占めるトラヒックがほぼ 1 となる  $G$  が最適値となる。また、このときの最大スループットは、固定長s-ALOHA の最大値、 $1/e$  に収束する。ただ、 $\gamma$  が完全に 1.0 となっている場合は、すべて制御パケットであるため、s-ALOHA の実効スループットに一致する。

図 5-1 2 には、 $\gamma$  に対する  $S_T$  の最大スループットと最適トラヒック  $G_{opt}$  をプロットした。比較のために、 $S_s$  の最大スループットも示した。これからも、上に述べたことが確認される。

図 5-1 3 には、式 (5. 1) ~ (5. 3) および式 (5. 16), (5. 18), (5. 19), (5. 24) により得られるスロット回復率  $P_r$  を、シミュレーション

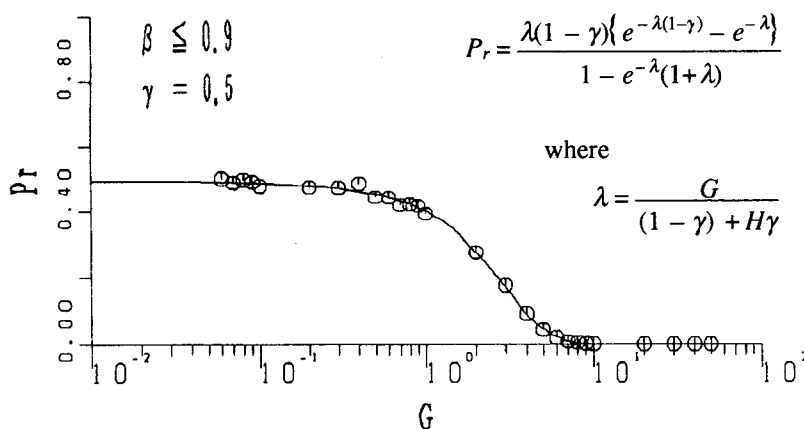


図 5-1 3 s-ALOHA/TS のスロット回復率  
(制御およびデータパケットによる分布)  
Fig. 5-13 The slot recovery ratio of s-ALOHA/TS  
(the distribution of control and data packet).

結果と併せて示した。シミュレーションは、図5-9と同様である。パラメータは、 $\beta \leq 0.9$  の任意の値、 $\gamma=0.5$  とした。図より、軽トラヒックにおいて、約50%の衝突スロットの回復が確認でき、s-ALOHA/TSのスループットの高さを裏付けている。

図5-14～16には、パケット長分布が切捨て指数分布の場合の性能を示す。図5-14は、 $1/\mu_m$  をパラメータとして、式(5.11)のGに対する式(5.27)の $S_T$ をプロットした。Hは0.1、 $\beta$ は0.01である。 $1/\mu_m$  は、5.0、1.0、0.5、0.3とした。従って平均パケット長 $1/\mu$  は、各々0.92、0.69、0.52、0.39となる。細線が、比較のためのs-ALOHAの実効スループット $S_s$ 、および固定長s-ALOHAのスループットである。シミュレーションは、図5-11と同一条件であり、理論値とよ

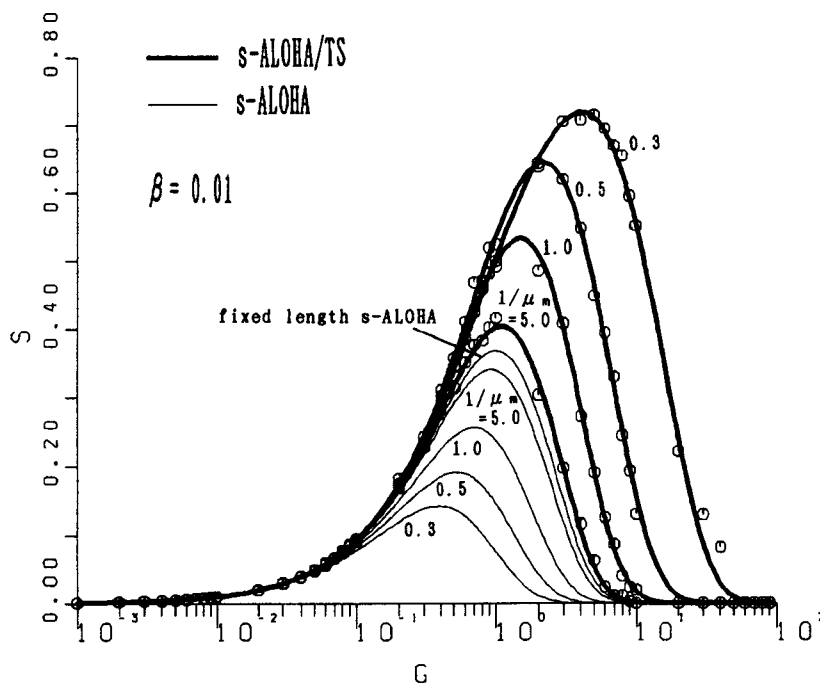


図5-14 s-ALOHA/TSのスループット性能  
(切捨て指数分布)  
Fig. 5-14 The throughput performance of s-ALOHA/TS  
(truncated exponential distribution).

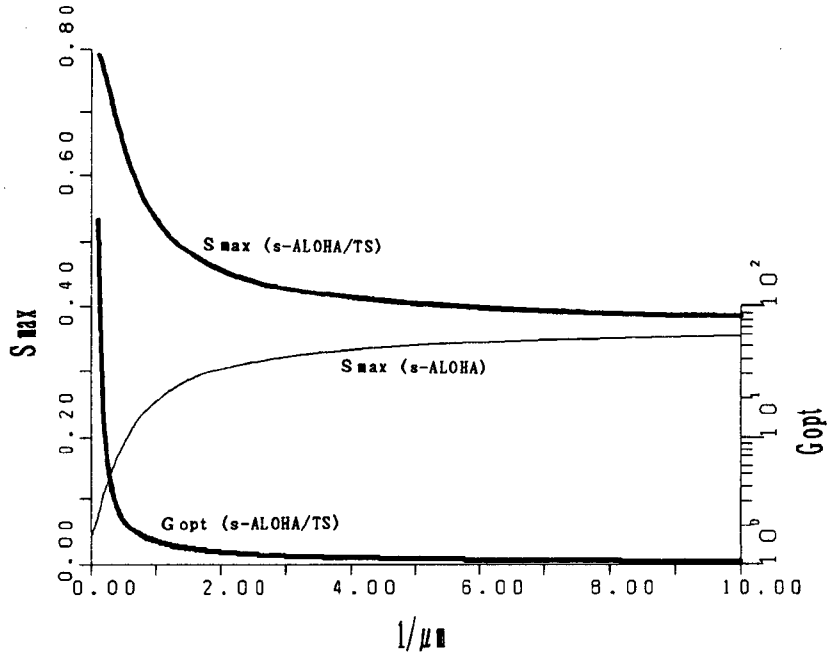


図 5-15 平均メッセージ長  $1/\mu_m$  に対する最大スループット  
および最適トラフィック  
Fig. 5-15 The maximum throughput and optimum traffic vs.  $1/\mu_m$ .

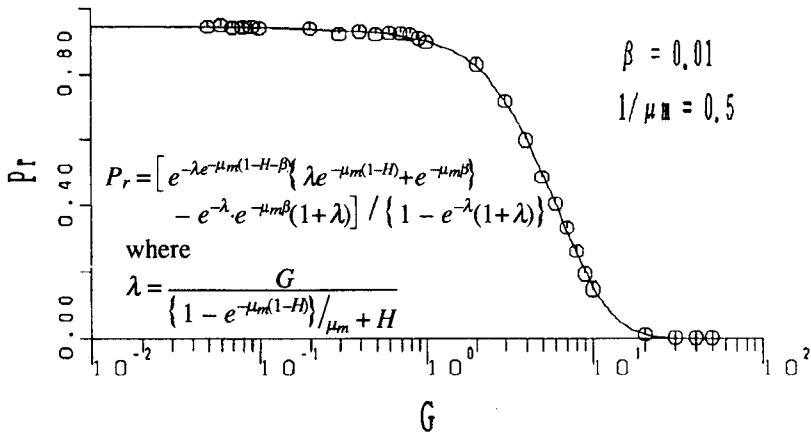


図 5-16 s-ALOHA/TS のスロット回復率  
(切捨て指数分布)  
Fig. 5-16 The slot recovery ratio of s-ALOHA/TS  
(truncated exponential distribution).

く一致している。図5-11と同様、s-ALOHAの実効スループットは、 $1/\mu_m$ の減少すなわち短いパケットの増大に伴って、低下していることが分かる。しかし、s-ALOHA/TSの実効スループットは、s-ALOHAを大きく上回り、 $1/\mu_m$ の減少に対し、s-ALOHAとは逆に増大している。これは、パケット長の差による捕捉効果が大きく作用しているためである。また、逆に $1/\mu_m$ が大となるに伴い、スロット長に等しい最長のパケットが増加するため、スループット性能は固定長s-ALOHAの性能に収束する。

図5-15に、 $1/\mu_m$ に対する $S_T$ の最大スループットと最適トラヒック $G_{opt}$ を示す。2種のパケット長分布と同様な理由で、最大スループットを与える最適トラヒック $G_{opt}$ は、 $1/\mu_m$ の減少に伴い増大する。 $S_s$ の最大スループットは、 $1/\mu_m$ の減少に伴い減少しているが、 $S_T$ の最大スループットは逆に増大している。

図5-16には、式(5.1)～(5.3)および式(5.16)、(5.18)、(5.19)、(5.29)により求められるスロット回復率 $P_r$ を、シミュレーション結果と併せて示した。シミュレーションは、図5-13と同様である。パラメータは、 $\beta=0.01$ 、 $1/\mu_m=0.5$ とした。図より、軽トラヒックにおいて、約95%の衝突スロットが回復されていることがわかり、スループットの高さを裏付けている。

## 5.6 結言

時変出力制御(PCT)方式をs-ALOHAに適用した新しいアクセスプロトコルを、固定長パケット形式ならびに可変長パケット形式について、それぞれ提案した。いずれも、PCT方式に必要とされるパケット送出時刻差を、同期を旨とするs-ALOHAに、いかにして導入するかの着想に基づいている。第1のプロトコル、捕捉区間付s-ALOHA(s-ALOHA/CI)は、固定長パケット形式に関するもので、スロットの前に捕捉区間を設け、その区間内で送出時刻をランダムに選択することにより、送出時刻

差を与えている。第2のプロトコル、末尾同期s-ALOHA (s-ALOHA/TS) は、可変長パケット形式に関するもので、その可変長性を活かし、パケット末尾をスロット末尾に同期して伝送することにより、パケット長の差を送出開始時刻の差としている。

解析的評価およびシミュレーションにより、いずれのプロトコルも、捕捉効果により従来の s-ALOHA のスループット性能を大きく改善することを確認した。また、s-ALOHA/CI では、捕捉区間長に最適値が存在することを示した。可変長パケット形式ではスロットロスのため、従来の s-ALOHA では実効スループットが低下するのに対し、s-ALOHA/TS では、捕捉効果と可変長性を活かしたプロトコルのため、実効スループットは固定長s-ALOHA をも上回ることが示された。

このような良好な性能を有するため、同期機能を有するVSAT網等のアクセスプロトコルとして、これらを用いることにより、網のより効率的な運用を実現することが出来る。

## 第6章

### 結論

コンピュータネットワークの拡大と普及は情報化社会の根幹を形成するものである。このコンピュータネットワークを実現する有力な手段の一つとして、衛星系および地上無線系による多元放送型伝送路を用いたパケット通信方式が、その網構成の柔軟性のため注目を集めている。

本論文では、従来提案されている多元放送型伝送路によるパケット通信方式の性能を制限する種々の問題点を指摘し、その基本性能を改善する新しいパケット通信方式を提案、検討した。具体的には、チャンネル容量の再利用を図る網構成方式、および捕捉効果を用いたアクセス制御方式とそれを適用したプロトコルを提案し、それらの有効性を定量的に確認した。

以下に、本研究で得られた諸結果をまとめる。

第2章では、空間分割によるチャンネル容量の再利用に着目し性能改善を図った網構成方式、ローカル／グローバル網構成を提案、検討した。ローカル／グローバル網構成は、全チャンネル容量を先ずローカルチャンネルおよびグローバルチャンネルに分割する。グローバルチャンネルは網全域に渡る通信に用いる。ローカルチャンネルは更に分割され、出力を所定の地域に制限することにより、地理的に離れた地域において繰り返し用いる。これによりチャンネル容量の再利用が実現される。このようなローカル／グローバル網構成の基本原理を詳述した。更に、本網構成の基本性能として、ローカルチャンネルの分割数およびローカルチャンネルの再利用回数とスループット性能および平均遅延の関係を定式化した。これに関してローカル、グローバル両チャンネルの遅延の比をパラメータとして性能を数値的に評価した。この結果、平均遅延の増大をそれほど招くことなく大幅なスループット性能の改善を確認した。また、ローカル、グローバル両チャンネルへのチャンネル容量の配分方式に関し、遅延比を一定とする方式、両チャンネル

のスループット比をトラヒック比に一致させる方式、平均遅延を最小とする方式、パワーを最大とする方式の4方式を提案し、その特性および網構成の最適化につき検討した。これにより、与えられた網の特性に対応した、より効果的なローカル／グローバル網構成の適用が可能となった。

第3章では、プロトコルレベルより下位の、アクセス制御レベルにおける対応として、捕捉効果を用いた時変出力制御方式（PCT方式）を提案、検討した。PCT方式は、パケット送出中にその出力を時間の関数として増大させることにより、パケット到着時刻の差を受信パワー差に変換することを基本原理としている。この受信パワー差により捕捉効果が誘起され、衝突状態のパケットにおいても所定の到着時間差があれば、先頭パケットは捕捉効果により正常に受信され、スループット性能が改善される。このようなPCT方式の基本原理、具体的制御手順および特長を詳述した。また、PCT方式を実現する際にその性能に大きな影響を与える、送信機のダイナミックレンジと出力制御関数の関係につき、線形関数および指数関数を具体例として、必要とされるダイナミックレンジを数値的に求め、ダイナミックレンジの見地から指数関数が優れていることを示した。更に、必要とされるダイナミックレンジを最小とする最適な制御関数として階段状関数を導き、その最適性の証明を与え、他の制御関数と数値的に比較した。

第4章では、上述のPCT方式をランダムアクセス系の基本プロトコルである p-ALOHA に適用した新しいプロトコル v-ALOHA を提案した。v-ALOHA は、p-ALOHA の特長である使用の簡便性と、PCT方式によるスループット性能の改善という両特長を有するプロトコルであり、近年普及が開始された VSAT網のアクセスプロトコルとして有望である。この v-ALOHA のプロトコルの特性を詳述し、定量的な解析により、スループット性能を ALOHA の一般的な性能式に共通する形で定式化した。この定式化に基づく数値結果により、固定長パケット形式に関し、上限を s-ALOHA の性能、下限を p-ALOHA の性能とし、捕捉に必要な時間差をそれほど小さくする必要がなく、上限性能に近い値が達成されることを確認した。また、可変長



パケット形式に関し、s-ALOHA と性能を比較した。s-ALOHA ではスロットの有効利用が行なわれなため性能が大きく劣化するのに対し、v-ALOHA の劣化は軽少であり、実質的スループット性能は s-ALOHA を凌ぐものであることを示し、その有効性を確認した。

第5章では、同期機能を有するパケット通信網を対象とし、PCT方式を s-ALOHA に適用した新しいアクセスプロトコルを固定長パケット形式ならびに可変長パケット形式について、それぞれ提案した。いずれも、PCT方式に必要とされるパケット送出時刻差を、同期を旨とする s-ALOHA にかんして導入するかの着想に基づいている。第1のプロトコル、捕捉区間付s-ALOHA (s-ALOHA/TS) は、固定長パケット形式に関するもので、スロットの前部に捕捉区間を設け、その区間内で送出時刻をランダムに選択することにより送出時刻差を与えている。第2のプロトコル、末尾同期s-ALOHA (s-ALOHA/TS) は、可変長パケット形式に関するもので、その可変長性を活かし、パケット末尾をスロット末尾に同期して伝送することにより、パケット長の差を送出開始時刻の差としている。解析的評価およびシミュレーションにより、いずれのプロトコルも、捕捉効果により従来の s-ALOHA のスループット性能を大きく改善することを確認した。特に、可変長パケット形式においては、従来の s-ALOHA ではスロットロスにより実効スループットが大きく低下するのに対し、s-ALOHA/TS では捕捉効果と可変長性を活かしたプロトコルのため、実効スループットは固定長パケット形式における s-ALOHA をも上回ることが示された。このような良好な性能を有するため、同期機能を有する VSAT網等のアクセスプロトコルとしてこれらを用いることにより、網のより効率的な運用を実現することが出来る。

今後の課題としては、ローカル／グローバル網構成に関し、軽負荷時における性能改善の確認および階層型網構成の検討および評価が残されている。また、時変出力制御方式に関しては、地上無線系における CSMA プロトコルへの適用が挙げられる。

## 謝辞

本論文は、大阪大学工学部手塚慶一教授の御指導のもとに、筆者が詫間電波工業高等専門学校において行った研究をまとめたものである。本研究の機会を与えて下さるとともに、その遂行に当たり全過程を通じ、終始懇切丁寧なる御指導、御鞭撻を賜った大阪大学工学部手塚慶一教授に心から御礼申し上げます。

本研究遂行に当たり、貴重な御助言、御教示を賜った大阪大学工学部倉藺貞夫教授、森永規彦教授、大阪大学産業科学研究所北橋忠宏教授に厚く御礼申し上げます。

研究着手当初より、全ての局面において一貫して直接御指導を賜った大阪大学工学部岡田博美助教授に深甚の謝意を表す。

筆者が電気通信大学電気通信学部および大学院修士課程在学中以来今日まで、常に変わらぬ御指導と御激励を頂く武蔵工業大学工学部遠藤一郎教授および東京大学森川博由助手に深く感謝の意を表す。また、本研究の遂行に当たりの確かな御助言と御討論を頂いた神戸大学教養部大月一弘講師に深く感謝の意を表す。

筆者が在職する詫間電波工業高等専門学校の浅井健二郎前校長および片山健一校長を始めとする関係諸教職員の御支援に感謝する。

また、折りにふれて有益な御助言御激励を頂いた大阪大学言語文化部中西暉教授に深く謝意を表す。更に、大阪大学工学部通信工学教室通信網工学講座の山本幹助手、大学院生戸出英樹氏、石田朗氏には種々の面でお世話になった。

ここに記して、以上の皆様に深く感謝の意を表す。

## 文献

- [ 1 ] M.Sloman and J.Kramer: "Distributed systems and computer networks", Prentice-Hall International, London (1987).
- [ 2 ] A.S.Tanenbaum: "Computer networks", Prentice-Hall, New Jersey (1981).
- [ 3 ] R.Kahn: "The organization of computer resources into a packet radio network", AFIPS, NCC, (1975).
- [ 4 ] L.Kleinrock and S.S.Lam: "Packet switching in multiaccess broadcast channel: performance evaluation", IEEE Trans. Commun., COM-23, 4, pp.410-423 (Apr. 1975).
- [ 5 ] 電子通信学会編: "パケット交換技術とその応用", 電子通信学会(昭60).
- [ 6 ] R.Rom and M.Sidi: "Multiple access protocols", Springer-Verlag, New York (1990).
- [ 7 ] N.Abramson: "The throughput of packet broadcasting channels", IEEE Trans. Commun., COM-25, 1, pp.117-128 (Jan. 1977).
- [ 8 ] N.Abramson: "THE ALOHA SYSTEM Another alternative for computer communication", AFIPS, SJCC, (1970).
- [ 9 ] L.Kleinrock and F.A.Tobagi: "Packet switching in radio channels: Part I - carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics", IEEE Trans. Commun., COM-23, 12, pp.1400-1416 (Dec.1975).
- [10] F.Tobagi and L.Kleinrock: "Packet switching in radio channels: part II The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and the busy-tone solution", IEEE Trans. Commun., COM-23, 12, pp.1417-1433 (Dec. 1975).
- [11] R.M.Metcalf and D.R.Boggs: "Ethernet: distributed packet switching for local computer networks", Commun. ACM, 19, 7, pp.395-404 (Jul.1976).
- [12] I.Capetanakis: "Tree algorithms for packet broadcast channels", IEEE Trans. Inf. Theory, IT-25, 5, pp.505-515 (Sep.1979).
- [13] F.A.Tobagi: "Modeling and performance analysis of multihop packet radio networks", Proceedings of IEEE, Vol.75, 1, pp.135-155 (Jan. 1987).
- [14] L.Kleinrock and J.Silvester: "Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number", Conf. Rec., Nat. Telecommun. Conf., pp.4.3.1-4.3.5 (Dec. 1978).
- [15] H.Takagi and L.Kleinrock: "Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals", IEEE Trans. Commun., COM-32, 3, pp.246-257 (Mar. 1984).
- [16] I.Cidon and M.Sidi: "A single-hop multi-station packet-radio network", Proc. IEEE INFOCOM84, PP.336-343 (1984).

- [17] V.Macdonald: "Advanced mobile phone service: The cellular concept", B.S.T.J., Vol.58, 1, pp.15-41 (Jan. 1979).
- [18] L.Schiff: "Random-access digital communication for mobile radio in a cellular environment", IEEE Trans. Commun., COM-22, 5, pp.688-692 (May 1974).
- [19] E.S.K.Chien, D.J.Goodman and J.E.Russell: "Cellular access digital network (CADN): Wireless access to networks of the future", IEEE Commun. Mag., Vol.25, 6, pp.22-31 (Jun. 1987).
- [20] M.J.Gans and Y.S.Yeh: "Modulation, noise, and interference", pp.178, Chap.4 of "Microwave mobile communication", New York: John Wiley & Sons, (1974).
- [21] J.J.Metzner: "On improving utilization in ALOHA networks", IEEE Trans. Commun., COM-24, 4, pp.447-448 (Apr.1976).
- [22] A.T.Kozłowski: "A nonslotted random-access channel with higher utilization", IEEE Trans. Commun., COM-35, 1, pp.120-122 (Jan.1987).
- [23] C.Namislo: "Analysis of mobile radio slotted ALOHA networks", IEEE J. Select. Areas Commun., SAC-2, 4, pp.583-588 (Jul.1984).
- [24] B.Ramamurthi, A.A.M.Saleh and D.J.Goodman: "Perfect-capture ALOHA for local radio communications", IEEE J. Select. Areas Commun., SAC-5, 5, pp.806-814 (Jun. 1987).
- [25] 六浦,岡田: "パケット無線ネットワークのローカル/グローバル網構成", 信学論(B), J71-B, 9, pp.1010-1019 (昭63-09).
- [26] K.Mutsuura, H.Okada, K.Ohtsuki, Y.Tezuka: "A new control scheme with capture effect for random access packet communications", IEEE/ICC'89, 30.1.1-7, pp.938-944 (June 1989).
- [27] 六浦,岡田,大月,手塚: "時変出力制御方式における最適な出力制御関数", 信学論(B-1), J72-B-1, 12, pp.1269-1271 (平1-12).
- [28] 六浦,岡田,大月,手塚: "時変出力制御による捕そく効果を用いた純アロハのアクセス方式 v-A L O H A", 信学論(B-1), J72-B-1, 7, pp.574-583 (平1-07).
- [29] 六浦,岡田,大月,手塚: "捕そく効果を用いた時変出力制御付きスロットアロハ方式", 信学論(B-1), J74-B-1, 1, pp.37-47 (平3-01).
- [30] L.Kleinrock and S.S.Lam: "Packet-switching in a slotted satellite channel", Proc. NCC'73, pp.703-710 (1973).
- [31] L.G.Roberts: "ALOHA packet system with and without slots and capture", Comput. Commun. Rev., 5, pp.28-42 (Apr.1975).
- [32] 六浦, 岡田: "パケット無線ネットワークのローカル/グローバル網構成に関する一考察", 情報理論とその応用研究会, 第8回シンポジウム資料, pp.682-687 (昭60-12) .

- [33] 六浦,岡田: “パケット無線ネットワークのローカル／グローバル網構成”, 信学技報, IN86-15 (昭61-06).
- [34] 六浦,岡田: “ローカル／グローバル網構成における,容量配分率の決定と網性能”, 信学技報, IN86-70 (昭61-08).
- [35] P.C.Wong and T.S.Yum: "A multi-channel computer network with local and global transeiving media", Proc., IEEE INFOCOM'85, pp.142-150 (1985).
- [36] L.Kleinrock: "Power and deterministic rules of thumb for probabilistic problems in computer communications", ICC'79 Conf. Proc., 2, pp.43.1.1-43.1.10, (1979).
- [37] L.クラインロック: “コミュニケーション ネット”, pp.24, コロナ社 (昭50).
- [38] 六浦,大月,岡田: “時変出力制御による捕捉効果を用いたパケット通信方式”, 昭和63年電子情報通信学会春期全国大会, B-384 (昭63).
- [39] 杜,岡田,中西,真田,手塚: “捕捉効果を考慮したアロハ方式の基本性能と最適化”, 信学技報, SE86-44 (昭62-02).
- [40] J.E.Wieselthier, A.Ephremides and L.A.Michaels: "The effect of capture on the performance of framed ALOHA protocols - an exact analysis", GLOBECOM'87, 15.1.1-15.1.5 (1987).
- [41] C.C.Lee: "Random signal levels for channel access in packet broadcast networks", IEEE J. Select. Areas Commun., SAC-5, 6, pp.1026-1034 (Jul. 1987).
- [42] B.P.Lathi: "Modern digital and analog communication systems", pp.318, New York: Holt, Rinehart and Winston (1983).
- [43] G.R.Jessop: "vhf/uhf manual", fourth edition, Chap.4, Radio Society of Great Britain (1983).
- [44] 六浦,岡田,大月: “時変出力制御による捕捉効果を用いた純アロハのアクセス方式  $v-A L O H A$ ”, 信学技報, CS87-161 (昭63-03).
- [45] D.Chakraborty: "VSAT communications networks - an overview", IEEE Commun. Mag., Vol.26, 5, pp.10-24 (May 1988).
- [46] E.B.Parker and J.Rinde: "Transaction network applications with user premises earth stations", IEEE Commun. Mag., Vol.26, 8, pp.23-35 (Sep.1988).
- [47] M.Horstein and P.J.Hadinger: "A satellite system architecture for single-hop VSAT networks", Collect. Tech. Pap. AIAA 12th Int. Commun. Satell. Syst. Conf. 1988, pp.625-635 (1988).
- [48] T. T. Ha: "Personal computer communications via VSAT networks," IEEE J. Select. Areas Commun., SAC-7, pp. 235-245, 1989.
- [49] K. M. S. Murthy et al: "VSAT user network examples," IEEE Commun. Mag., Vol. 27, no. 5, pp. 50-57 (May 1989).

- [50] C.J.Wolejsza, D.Taylor, M.Grossman and W.P.Osborne: "Multiple access protocols for data communications via VSAT networks", IEEE Commun. Mag., Vol.25, 7, pp.30-39 (Jul. 1987).
- [51] D.Raychaudhuri and K.Joseph: "Channel access protocols for Ku-band VSAT networks: a comparative evaluation", IEEE Commun. Mag., Vol.26, 5, pp.34-44 (May 1988).
- [52] D.Raychaudhuri and J. Harman: "Dynamic performance of ALOHA-type VSAT channels : a simulation study," IEEE Trans. Commun., COM-38, pp. 251-259, (1990).
- [53] A.L.McBride: "An overview of unslotted ALOHA in a VSAT network", GLOBECOM '86, PP.1479-1488 (1986).
- [54] S.M.Ross: "Applied probability models with optimization applications", pp.49, San Francisco: Holden-Day (1970).
- [55] M.J.Ferguson: "An approximate analysis of delay for fixed and variable length packets in an unslotted ALOHA channel,"IEEE Trans. Commun., COM-25, 7, pp.644-654 (Jul. 1977).
- [56] 六浦,岡田,大月,手塚: “マルチアクセス型ネットワークにおける時変出力制御—スロットアロハ方式”, 信学技報, IN88-153 (平1-03).
- [57] 六浦,岡田,大月,手塚: “捕そく効果を用いた時変出力制御付き末尾同期スロットアロハ方式 s-ALOHA/TS”, 信学技報, IN89-121 (平2-02).

## 付録

### A. 2 群群別方式のスループット $S_{HL}$

Metzner は、低出力群と高出力群のトラヒックを別のものとして扱っている<sup>[21]</sup>。しかし、実際的には、網全体のトラヒック  $G$  に対する性能を与えるべきである。この評価基準で、以下のように考え直す。

高出力群と低出力群にユーザを、従ってトラヒックを分割する割合を  $\alpha$  とする。各群のトラヒック  $G_H$ ,  $G_L$  は、次式となる。

$$\left. \begin{aligned} G_H &= \alpha G \\ G_L &= (1-\alpha) G \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.1})$$

従って、全体のスループット  $S_{HL}$  は、次のように得られる。

$$\begin{aligned} S_{HL} &= G_H \exp(-2G_H) + G_L \exp\{-2(G_H+G_L)\} \\ &= \alpha G \cdot \exp(-2\alpha G) + (1-\alpha) G \cdot \exp(-2G) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

上式により、 $\alpha$  をパラメータとして評価する。

### B. 可変長パケットに対する性能評価式の導出

平均パケット長を  $1/\mu$ 、パケット生成率を  $\lambda$  とすれば、v-ALOHA のトラヒック  $G$  は次のように与えられる。

$$G = \lambda/\mu \quad (\text{B.1})$$

また、v-ALOHA の実効スループット  $S_w$  は次式で与えられる。

$$S_{ve} = \frac{1/\mu - H/C}{1/\mu} G \cdot \exp\{-G(1+\beta)\} \quad (\text{B.2})$$

s-ALOHA のスロット利用率  $\eta_s$ , 平均トラヒック  $G_s$  は, それぞれ次式で与えられる.

$$\eta_s = \frac{1/\mu - H/C}{(L_m + H)/C} \quad (\text{B.3})$$

$$G_s = \lambda(L_m + H)/C \quad (\text{B.4})$$

従って, 実効スループット  $S_{se}$  は,

$$S_{se} = \eta_s G_s \exp(-G_s) \quad (\text{B.5})$$

となる.

1 番目のパケット長分布 (制御, データの 2 種のパケットのみからなる) の確率密度関数  $p(x)$  は,

$$p(x) = \gamma \delta(x-H) + (1-\gamma) \delta(x-H-L_m) \quad (\text{B.6})$$

である<sup>[55]</sup>. ここに,  $\gamma$  は全体に対する制御パケットの構成率で, パラメータとして扱う.  $\delta(\cdot)$  はディラックのデルタ関数である. 従って, 平均パケット長  $1/\mu$  は次式で与えられる.

$$1/\mu = \{(1-\gamma)L_m + H\}/C \quad (\text{B.7})$$

これより, 式 (B. 2), (B. 5) を計算すれば, 本文の式 (4. 11), (4. 12) が得られる.

第 2 のパケット長分布 (切捨て指数分布) の確率密度関数  $p(x)$  は,

$$p(x) = \mu_m \exp\{-\mu_m(x-H)\} u(x-H) + \exp(-\mu_m L_m) \delta(x-L_m-H) \\ (H \leq x \leq L_m+H) \quad (\text{B.8})$$

で与えられる<sup>[55]</sup>. ここに,  $u(\cdot)$  は, 単位ステップ関数である. この分布は,



$$p(x) = \mu_m \exp(-\mu_m x) \quad (\text{B.9})$$

の指数分布に従うパケット長を  $L_m$  で切り捨てて<sup>[\*]</sup>、ヘッダ  $H$  ( $H/C \geq T_d$ ) を付加したものと考えられる。このとき、平均パケット長  $1/\mu$  は次式で与えられる。

$$1/\mu = [ \{ 1 - \exp(-\mu_m L_m) \} / \mu_m + H ] / C \quad (\text{B.10})$$

これより式 (B. 2)、(B. 5) を求めれば各スループットが式 (4. 1 3)、(4. 1 4) のように得られる。