

# 符号分割多元接続による パケット通信に関する研究

(研究課題番号 07455160)

平成7年度～平成8年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))  
研究成果報告書

平成9年3月

研究代表者 小 川 明  
(名古屋大学工学部教授)

# 科学研究費補助金研究成果報告書

## 研究課題： 符号分割多元接続による パケット通信に関する研究

研究実施期間： 平成7年度～平成8年度  
研究機関名： 名古屋大学(13901)  
研究種目： 基盤研究(B)(2)  
研究課題番号： 07455160

研究代表者： 名古屋大学・工学部・教授 小川明

研究組織： 名古屋大学・工学部・教授 小川明 (20204068)  
名古屋大学・工学部・助教授 片山正昭 (60185816)  
名古屋大学・工学部・助手 山里敬也 (20252265)

名古屋大学図書	
和B	89645

科学研究費補助金研究成果報告書

研究課題： 符号分割多元接続によるパケット通信に関する研究  
研究課題番号： 07455160

研究実施期間： 平成7年度～平成8年度  
研究機関名： 名古屋大学(13901)  
研究種目： 基盤研究(B)(2)

研究代表者： 名古屋大学・工学部・教授 小川明

研究組織： 名古屋大学・工学部・教授 小川明 (20204068)  
名古屋大学・工学部・助教授 片山正昭 (60185816)  
名古屋大学・工学部・助手 山里敬也 (20252265)

研究経費： 平成7年度 3,500  
平成8年度 900  
合計 4,400 (千円)

研究発表

(ア) 学会誌等

1. A. Jamalipour, M. Katayama, T. Yamazato, A. Ogawa, "Throughput Analysis of Spread-Slotted ALOHA in LEO Satellite Communication System with Nonuniform Traffic Distribution," IEICE Transactions, E78-B, pp.1657-1665, Dec. 1995.
2. A. Jamalipour, M. Katayama, T. Yamazato, A. Ogawa, "Adaptive Transmit Permission Control on Spread Slotted Aloha Applicable in LEOS Systems," IEICE Transactions, E79-B, pp.257-265, March 1996.
3. H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "CDMA Unslotted ALOHA Systems with Packet Retransmission Control," IEICE Transactions, E79-A, pp.1339-1345, July 1996.
4. H. Okada, M. Saito, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "CDMA ALOHA Systems with Modified Channel Load Sensing Protocol for Satellite Communications," IEICE Transactions, E79-A, pp.2035-2042, Dec. 1996.
5. A. Jamalipour, M. Katayama, T. Yamazato, A. Ogawa, "Transmit Permission Control on Spread ALOHA Packets in LEO Satellite Systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, JSAC-14, pp.1748-1757, Dec. 1996.
6. T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Effects of The Access Timing Delay on CDMA Unslotted ALOHA with Channel Load Sensing," IEICE Transactions, E79-B, pp.1339-1345, Sep. 1996.
7. M. Saito, H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Throughput Improvement on CDMA Slotted ALOHA System," IEICE Transactions, E80-B, pp.74-80, Jan. 1997.

(イ) 口頭発表

1. H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "A Novel Access Control Method for CDMA Unslotted ALOHA Systems," MDMC '96, pp.391-395 (1996.7.18-20).
2. H. Okada, M. Saito, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Performance Evaluation of CDMA ALOHA Systems with Modified Channel Load Sensing Protocol," IEEE GLOBECOM '96, pp.1291-1295 (1996.11.18-22).
3. T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Performance Degradation due to the Access Timing Delay on CDMA Unslotted ALOHA with Channel Load Sensing," IEEE ICUPC '96, pp.111-114 (1996.9.29-10.2).
4. M. Saito, H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Throughput Improvement on CDMA Slotted ALOHA System by Modified Channel Load Sensing Protocol," PIMRC '96, pp.103-107 (1996.10.15-18).
5. A. Ogawa, T. Yamazato, K. Nishida, H. Okada, T. Sato, M. Katayama, "Throughput of CDMA Unslotted-ALOHA System in Cellular Environment," WMWCC '96, pp.23-24 (1996.9.17-20).
6. 西田邦生, 岡田啓, 佐藤毅, 山里敬也, 片山正昭, 小川明, "遠近問題とフェージングを考慮した CDMA ALOHA 方式のスループット特性についての一考察," 1996年電子情報通信学会総合大会, vol.SA-5-4, pp.472 (1996.3).
7. 山里敬也, 浅井裕介, ジャマリプール・アバス, 片山正昭, 小川明, "セルラー環境での CDMA ALOHA 方式のスループット解析," 第19回情報理論とその応用シンポジウム, pp.313-316 (1996.12).

# もくじ

<b>1</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	目的	2
<b>2</b>	<b>CDMA Unslotted ALOHA 方式のスループット解析</b>	<b>7</b>
2.1	はじめに	7
2.2	システムモデル	8
2.3	特性解析	11
2.3.1	指数長パケット	11
2.3.2	固定長パケット	15
2.4	数値例	20
2.5	まとめ	31
<b>3</b>	<b>パケットの再送を考慮に入れた特性解析</b>	<b>32</b>
3.1	はじめに	32
3.2	システムモデル	33
3.3	状態占有確率とスループット, 遅延特性	34
3.4	期待流動値とシステムの安定性	36
3.5	数値例	39

3.6	まとめ	44
<b>4</b>	<b>最適アクセス制御方式</b>	<b>45</b>
4.1	はじめに	45
4.2	システムモデル	47
4.3	OACPの原理	47
4.3.1	パケットの送信制御 (CLSP)	50
4.3.2	パケットの再送制御 (ORC)	50
4.4	OACPの特性解析	52
4.5	OACPを実現するための課題と解決策	56
4.5.1	パラメータの決定とCDMAパケット無線通信におけるスループット特性の上限	56
4.5.2	状態 $r$ の推定	58
4.6	数値例	58
4.7	まとめ	64
<b>5</b>	<b>アクセス制御遅延の影響</b>	<b>65</b>
5.1	はじめに	65
5.2	システムモデル	67
5.3	スループット解析	68
5.3.1	アクセス制御遅延	68
5.3.2	システム内オフアードロード	70
5.3.3	遷移率	74
5.3.4	スループット解析	76
5.4	スループット特性	78
5.5	まとめ	79

<b>6</b>	<b>アクセス制御遅延の影響を和らげるアクセス制御方式</b>	<b>84</b>
6.1	はじめに . . . . .	84
6.2	システムモデル . . . . .	85
6.3	アクセス制御遅延による影響 . . . . .	86
6.4	Modified Channel Load Sensing Protocol (MCLSP) . . . . .	87
6.4.1	送信確率の導出アルゴリズム . . . . .	90
6.4.2	特性解析 . . . . .	92
6.4.3	数値例 . . . . .	95
6.5	まとめ . . . . .	95
<b>7</b>	<b>セルラー環境での CDMA ALOHA 方式のスループット解析</b>	<b>99</b>
7.1	はじめに . . . . .	99
7.2	システムモデル . . . . .	100
7.2.1	セグメント分割モデル . . . . .	100
7.2.2	送信機モデル . . . . .	102
7.2.3	通信路モデル . . . . .	102
7.2.4	基地局モデル . . . . .	104
7.3	BER 解析 . . . . .	104
7.3.1	RAKE 受信機を用いた場合 . . . . .	104
7.3.2	誤り訂正符号を用いた場合 . . . . .	105
7.4	スループット解析 . . . . .	107
7.5	数値例 . . . . .	108
7.5.1	不均一トラフィックの影響 . . . . .	108
7.5.2	RAKE の効果 . . . . .	108
7.5.3	誤り訂正符号の効果 . . . . .	110

7.6	まとめ . . . . .	112
<b>8</b>	<b>総括</b>	<b>113</b>
8.1	本研究のまとめ . . . . .	113
8.2	今後の課題 . . . . .	115
	<b>参考文献</b>	<b>117</b>
	<b>研究実績</b>	<b>122</b>

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

近年、他システムとの相互干渉や多重伝搬に強く、また非同期の多元接続が可能であり、マルチメディア情報の伝送に適したスペクトル拡散に基づく符号分割多元接続 (CDMA) 方式が注目を浴びており、特に次世代の移動体通信方式として研究が盛んに行われている [2], [3], [29]. しかし通常の CDMA では、フェージング環境下での他チャネルからの干渉 (多元接続干渉) のために効率が期待ほどには向上しないことも問題となっている. この CDMA 方式の効率を高めるには、信号を連続的に送信するのではなく、情報が存在する場合のみ、信号を送出することが望まれる. この点からパケット通信は、CDMA 方式と親和性が良く、また CDMA 方式の特徴の一つであるランダムアクセス性は、パケット無線通信における最も簡易なプロトコルである ALOHA 方式 [4], [5] に良く整合している. しかもマルチチャネルパケット通信が可能なことから大群効果による効率向上も期待できる. したがって、ALOHA 方式と CDMA 方式を結合した無線パケット通信方式、CDMA ALOHA 方式は、ランダムアクセスの簡便性の利点を維持しつつ、効率の高いパケット通信を実現できる可能性を有するものとして将来の移動



体通信,特にモバイル・コンピューティングや移動体マルチメディア通信にとって有望な方式である.

このような見地から,CDMA ALOHA 方式に関する研究が各方面で行われている.[6]～[9],[11]～[20],[31].

しかし,これまでの研究では,熱雑音の影響が無視されることが多く,また,移動体通信で通常問題となるフェージングあるいは遠近問題等の影響を考慮した評価がなされていない.符号分割多元接続方式そのものの研究では,これらの環境条件の影響を考慮して特性が評価されているが,それらの結果は,スプレッドアロハ方式におけるスループット特性の評価にそのまま適用することはできない.またトラフィック負荷分布の不均一性の問題はスプレッドアロハ方式のみならず一般の通信システムにおいても従来ほとんど考慮されていない.また,スループット向上に有効なアクセス制御方式として,チャネル負荷状況に応じてパケット送信を制御するチャネルロードセンシングプロトコル(C LSP)がある.しかし,従来のものは,制御に時間遅延を伴うとスループット特性が大きく劣化する問題がある.実際には,信号伝搬や信号処理によって必ず時間遅延を生じるので,この問題を無視することはできない.

## 1.2 目的

以上を背景に本報告では移動体通信に適用可能な簡便で高効率な無線データ通信の実現をめざしてCDMA ALOHA 方式を対象とした新しいアクセス制御方式の確率を目的としている.そのための基礎的な検討課題として以下に示す項目の検討を行った.

- CDMA ALOHA 方式のスループット解析

CDMA ALOHA 方式には大別して2つの方式があり、このうち Pure (Unslotted) ALOHA 方式に CDMA 方式を適用した CDMA Unslotted ALOHA (CDMA U-ALOHA) 方式は、各ユーザー局がパケットを非同期で送信できるといった利点をもっており、いくつかの研究がなされている [11] ~ [20], [31].

単純な ALOHA 方式では、同時に1つのパケットしか送信することができなかつた。一方 CDMA ALOHA 方式では、多元接続可能という性質により、同時に複数のパケットが送信されても、パケットの送信に失敗する確率は同時に送信されているパケット数の増加に対して徐々に増加するにすぎない。このため、CDMA ALOHA 方式は単純な ALOHA 方式よりも良いスループット特性を得ることができる [9], [31]. しかしながら、その解析手法は未だ確立されておらず、CDMA ALOHA 方式の解析では同時送信局数の遷移が一定となる Slotted 方式について行われているものが殆どである。本研究では CDMA ALOHA 方式の同時送信局数の遷移を本論文では、マルコフモデル、トラヒック理論を用いて表すことにより、解析を可能とした。この結果、従来では求められていなかった固定長パケットの解析、CDMA ALOHA 方式のシステム安定性の解析等が可能となった。

- CDMA ALOHA 方式のアクセス制御

CDMA ALOHA 方式では、多元接続可能という性質により、同時に複数のパケットが送信されても、パケットの送信に失敗する確率は同時に送信されているパケット数の増加に対して徐々に増加するにすぎない。このため、CDMA ALOHA 方式は単純な ALOHA 方式よりも良いスループット特性を得ることができる [9], [31]. しかしながら、チャンネルのトラヒック量が大きくなると、パケットの送信に失敗する確率は高くなってしまい、その影響

はそのとき送信されているパケット全てに及ぶ。そこで、トラフィック量に応じてパケットの送信を制御する(アクセス制御と呼ぶ)ことが特性向上を図るために必要となってくる。

そこで、上記解析手法を用い、特性向上を図るためのアクセス制御方式の提案を行う。これは、パケットの送信制御と再送制御を同時に行うことにより特性の向上を図る Optimal Access Control Protocol (OACP) である。結果として、提案するアクセス制御方式は CDMA ALOHA 方式のスループットの上限を維持できるように制御する事が可能であり、よって最適な制御を行うプロトコルであることを示す。

- CDMA ALOHA 方式でのアクセス制御遅延の影響

実際の通信に適用しようとする解決すべき課題が多くあるのは既に述べた通りである。そのうちの1つにパケットの伝搬や処理時間に要する遅延(アクセス制御遅延)による影響がある。アクセス制御はチャネルの状態を観測し、その情報に基づいて制御が行われる。アクセス制御遅延が存在すると、アクセス制御に関する情報がそれだけ過去の値となり、特性に影響を与える。そこで、まず、このアクセス制御遅延が CDMA ALOHA 方式にどのような影響を与えるのか検討を行う。

次にアクセス制御遅延による影響を和らげることのできる Modified Channel Load Sensing Protocol (MCLSP) の提案を行う。これは一定時間のチャネル観測を行い、その観測結果に基づいてパケットの送信確率を算出し、その値をユーザー局に伝える。ユーザー局では伝えられた送信確率に従ってパケットの送信を行う。

このような制御を行う事により、アクセス制御遅延存在下でも高いスループット特性を維持できる。

- セルラー環境での CDMA ALOHA 方式のスループット解析

CDMA ALOHA 方式を実際のセルラー環境で用いると、他局からの干渉のみならずマルチパスの影響を受け、そのスループットが著しく劣化する。また、近年、周波数の有効利用の観点からマイクロセルラーの検討が行われているがその場合、ユーザーが一様に分布しているケースは稀である (不均一トラフィック)。さらに各ユーザーの位置が異なるため、それぞれのユーザーから送信されるパケットは伝送距離による減衰を受け、さらに、統計的に異なるマルチパスを通じて基地局に到着する。

そこでこの点について比較的容易に解析できるよう、新しい解析モデル提案する [29], [30]。これは、1つの基地局のカヴァー可能な範囲 (セル) を、微小面積区域 (セグメント) に分割して、そのそれぞれに着目し解析を行う。セグメントが十分に小さいならば、マルチパスの統計的性質、トラフィックの様子等がセグメント内で等しいものと考えられる事ができる。よって、全体の特性は各々のセグメントでの特性を加算した値として求める事ができ、複雑な環境下での解析でも比較的容易に行える。さらに、信号の生起する状態をそれぞれのセグメントごとに定める事が可能であり、ユーザーの地理的分布、すなわちトラフィックの不均一性も含めた解析が可能となる。以下、本稿ではセルラー環境を考え、その場合の CDMA U-ALOHA のスループット特性について延べていく。特に、不均一トラフィックの影響、パワーコントロールの効果、RAKE 受信機の効果、誤り訂正符号の効果を解析的に求めていく。

本報告書は次のような章で構成される。

第2章で CDMA U-ALOHA 方式の特性解析を行い, 第3章で再送パケットによる影響を考慮して CDMA U-ALOHA 方式の特性解析を行う。そしてこの結果を基にして第4章で OACP の提案を行う。また第5章では, アクセス制御を行った場合に問題となるパケットの処理や伝搬による時間遅れによる影響を明らかにし, その影響を和らげることを目的としたアクセス制御方式である MCLSP の提案を第6章で行う。さらに第7章では実際のセルラー環境下での CDMA U-ALOHA 方式の特性解析を行い, 最後に第8章にて本論文を総括する。

## 第 2 章

# CDMA Unslotted ALOHA 方式のス ループット解析

### 2.1 はじめに

本章では, CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性および遅延特性を指数長パケットと固定長パケットの両方の場合について解析的に求める.

パケット長が指数分布に従う指数長パケットの場合, このシステムは待ち行列モデルにおける  $M/M/\infty^1$  と一致する [13]. このように, 到着がポアソン過程, サービス時間が指数分布に従うシステムにおいては, 指数分布のマルコフ性により, 過去の状態に依存せず現在の状態のみでシステムの状態が決まる. しかも, 微小時間における同時送信局数の変化は 1 増えるか, 減るか, 変わらないかのいずれかになる. このため, 同時送信局数が推移する様子を出生死滅過程として示すことができ, その解析も比較的簡単に行える [13], [25].

パケット長が固定の場合について考えて見る. 固定長パケットを用いると, 可

---

<sup>1</sup>Kendall の標記法  $A/B/C$  を用いている. 但し,  $A$  は到着時間分布,  $B$  はサービス時間分布,  $C$  はサーバ数である. また, 時間分布として,  $M$  は指数分布,  $D$  は一定 (固定) を意味する.

変長パケットには必要だった長さに対する冗長情報や処理がいらぬ、可変長パケットよりスループット特性がよい等の利点がある。固定長パケットを用いたシステムは待ち行列モデルにおける  $M/D/\infty$  に一致する [14], [15]。指数長パケットにおける解析では、指数分布のマルコフ性により、パケットの終了がその発生とは独立であるために、発生率及び終了率は直ちに与えられる。しかしながら固定長パケットの場合、パケットの終了はそのパケットの発生、すなわち過去の状態に依存することになる。よって、マルコフ性が成り立たず、終了率を一意に求めることができない。そこで、固定長パケット CDMA U-ALOHA 方式において、終了率を指数長パケットのときと同様に定める指数長近似法 (ELA) [15] を用いることにより、解析を行う。この指数長近似法を用いることにより、近似的にシステムがマルコフ性を持つものと考えられ、比較的容易に解析を行うことができる。

## 2.2 システムモデル

システムモデルを図2.1に示す。各ユーザーは固有に割り当てられた拡散符号 [2] を用いて、パケットを直接拡散する。そしてそのパケットを1ホップで中央局に送信する。

さらに次のような仮定を行なう。

- ユーザー数  $K$  は十分多く、パケットの到着は生起率  $\lambda$  のポアソン過程に従うものとする。
- オファードロード  $G$  を、指数長パケットのときは平均パケット長時間  $\bar{T}_p$  に発生する平均パケット数、固定長パケットのときはパケット長時間  $T_p$  に発生する平均パケット数とする。このとき、 $G = \lambda \cdot \bar{T}_p$ 、または  $G = \lambda \cdot T_p$  と表される。

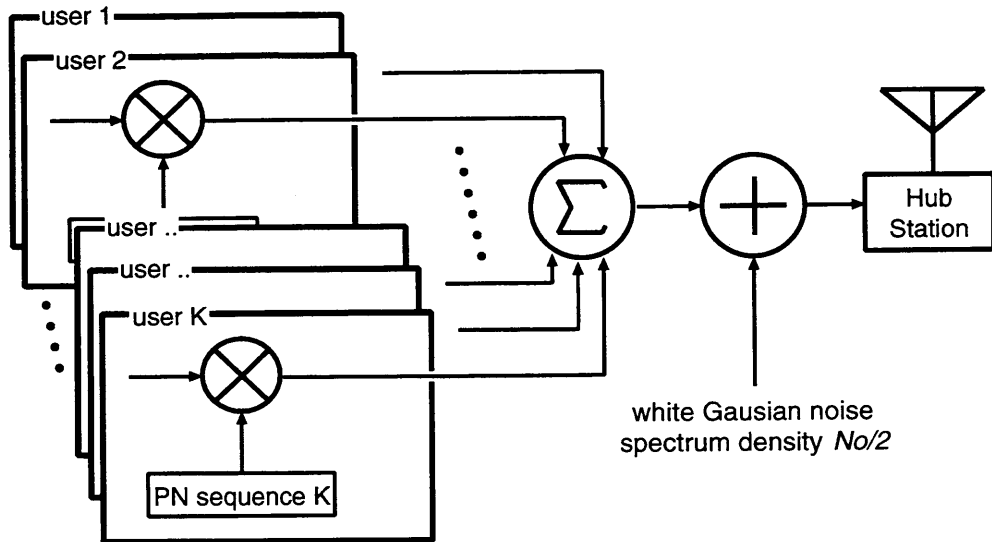


図 2.1: システムモデル

- パケット長は指数長 (平均  $\bar{L} = \bar{T}_p \cdot R$  [bits]), または, 固定長 ( $L = T_p \cdot R$  [bits]) とする. ここで,  $R$  は転送レートである.
- 各パケットは, 全て等しい電力で受信される.
- 各ユーザーに割り当てられる拡散符号はランダム符号とする. このときのビット誤り率は多元接続干渉と熱雑音の影響を考慮して, 次式によって得られる [24].

$$\begin{aligned}
 P_b(k) = & \frac{2}{3} Q \left[ \left( \frac{k}{3N} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] \\
 & + \frac{1}{6} Q \left[ \left( \frac{k \cdot N/3 + \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] \\
 & + \frac{1}{6} Q \left[ \left( \frac{k \cdot N/3 - \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b} \right)^{-0.5} \right] \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

ただし,

$$\sigma^2 = k \left\{ N^2 \frac{23}{360} + N \left( \frac{1}{20} + \frac{k-1}{36} \right) - \frac{1}{20} - \frac{k-1}{36} \right\} \quad (2.2)$$



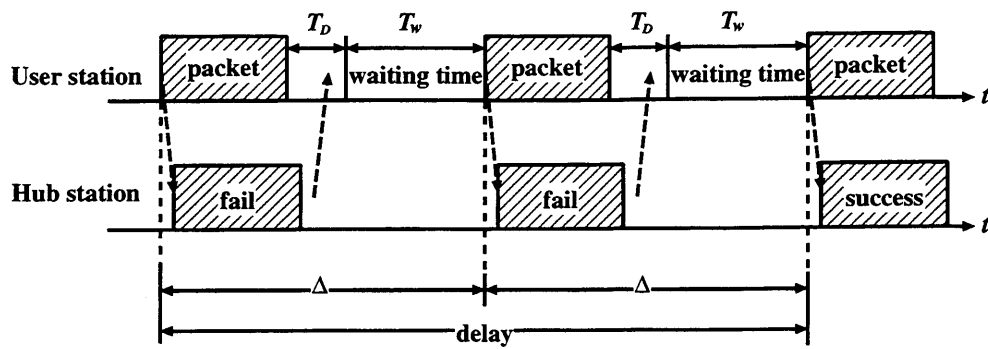


図 2.2: パケットの再送過程

ここで,  $N$  は拡散率,  $k$  は干渉パケット数, そして

$$Q[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2/2) du \quad (2.3)$$

- 誤り訂正符号は用いないものとする. よって1ビットでも誤りがあると, そのパケットは正しく伝送されない.
- 同時送信局数の推移はビットごとに起こるものとする. つまり各ビット内では同時送信局数は一定であるものとする.

また, 図2.2のようなパケットの再送を行うものとする. まず, ユーザー局がパケットを生成し中央局にパケットを送る. 中央局がパケットを受け取ってからこのパケットが正しく送信されたかどうか調べる. もし, パケットが正しく送信されていないならば, そのパケットを送り直す必要が生じる. そのため適度な時間(再送間隔時間  $T_w$ )をおいてから, このパケットの再送を行なう. そしてこのパケットが正しく送信されれば, このパケットの送信は終了する. この動作はパケットが正しく送信されるまで繰り返される. このような再送過程において, ユーザー局において初めのパケットを送信してから成功したパケットを送るまでに要した

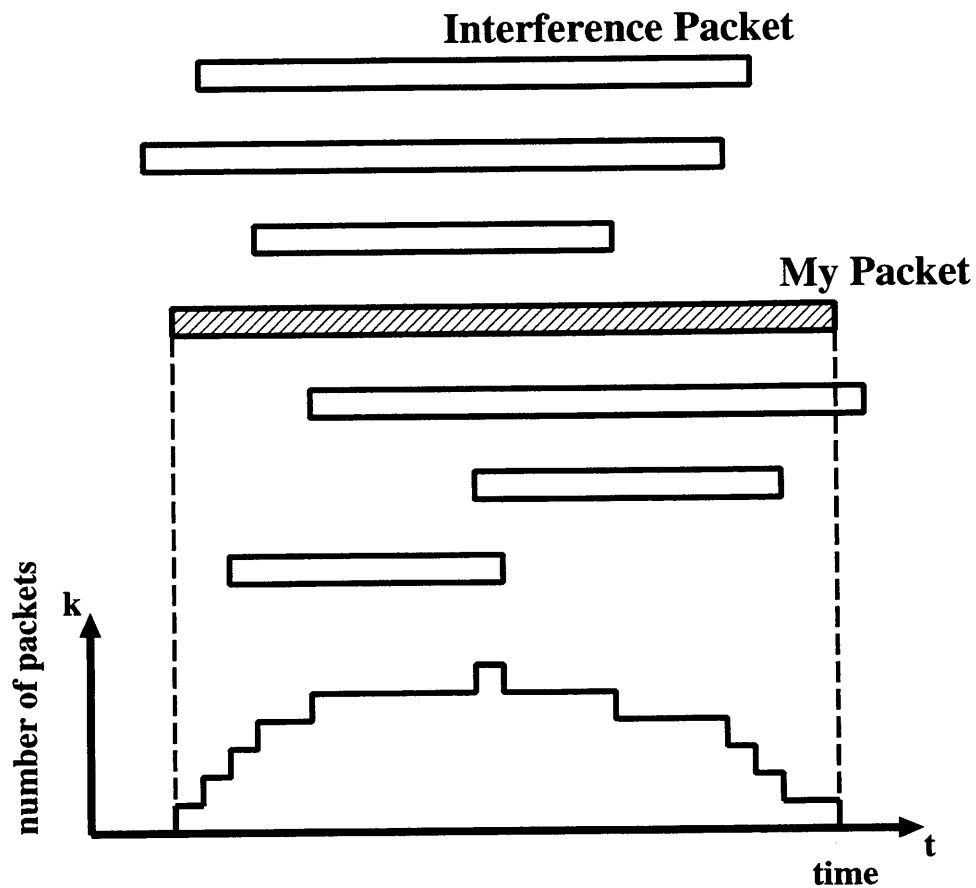


図 2.3: 指数長パケットの到着の様子

時間を遅延時間とする。ここで、パケットの伝搬や処理にかかる時間を  $T_D$  とする。

## 2.3 特性解析

### 2.3.1 指数長パケット

本節では指数長パケット CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性と遅延特性を解析的に求める。

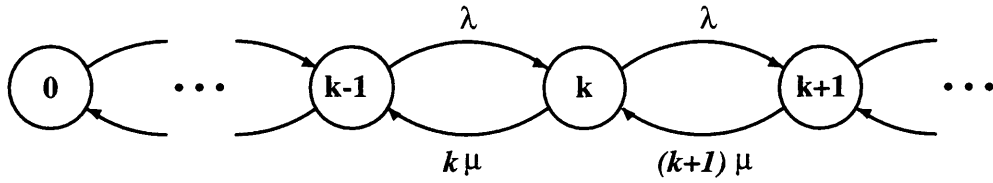


図 2.4: 指数長パケットにおける干渉パケット数の状態遷移図

図2.3に指数長パケットの到着状況を示した。指数長パケットが指数間隔で発生し中央局を通過していくという状況は、待ち行列モデルにおける  $M/M/\infty$  と一致する。パケットの発生はポアソン過程に従うと仮定しているので、生起率は  $\lambda = G/\overline{T}_p$  のように表される。パケット長を指数長と仮定しているので、指数分布のマルコフ性より終了率は  $k\mu = k/\overline{T}_p$  と表される。よって、システムは図2.4に示されるような状態遷移図に従う。

まず、干渉パケット数の定常状態確率  $P_k$  を求める。図2.4の状態遷移図より、システムは出生死滅過程になる。出生死滅過程に従うシステムの定常状態確率は、システムが状態  $k$  にあるときの生起率を  $\lambda_k$ 、終了率を  $\mu_k$  とすると、次式のように表される [25]。

$$P_k = \begin{cases} \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \prod_{m=0}^{n-1} \frac{\lambda_m}{\mu_{m+1}}} & ; k = 0 \\ P_0 \prod_{m=0}^{k-1} \frac{\lambda_m}{\mu_{m+1}} & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.4)$$

CDMA U-ALOHA 方式の定常状態確率  $P_k$  は、式 (2.4) において  $\lambda_k = \lambda$ 、 $\mu_k = k\mu$  とすればよいので、

$$P_k = \frac{(\lambda T_p)^k}{k!} e^{-\lambda T_p} = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \quad (2.5)$$

となる。

ここで、微小時間  $\Delta t$  をビット時間とする。同時送信局数の推移はビットごとに起るものとしているので、 $\Delta t$  後において1増加するか、1減少するか、変化しないかという3つの場合に限定される。また、 $P_S(k, i)$  をあるパケットにおいて1ビット目から  $i-1$  ビット目まで成功し、 $i$  ビット目の干渉パケット数が  $k$  である確率とする。

(i)  $i = 1$  のとき;

定常状態の式 (2.5) より、

$$P_S(k, i) = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \quad (2.6)$$

となる。

(ii)  $i > 1$  のとき;

状態遷移図2.4より、 $P_S(k, i)$  は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t - \lambda\Delta t\} \cdot \{1 - P_b(k)\} \\ & + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \cdot \{1 - P_b(k+1)\} \\ & + P_S(k-1, i-1) \cdot \lambda\Delta t \cdot \{1 - P_b(k-1)\} \end{aligned} \quad (2.7)$$

ここで得られた  $P_S(k, i)$  を使って、長さ  $L$  [bits] のパケットの成功確率  $Q_S(G, L)$  は、

$$Q_S(G, L) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \cdot (1 - P_b(k)) \quad (2.8)$$

となる。

パケット長を指数分布に従うと仮定した場合、スループットを一般的な定義である平均トラヒック量とパケット成功確率の積とすると、パケットの長さを考慮

していないことになる。そこで、スループットを呼量によって求めることで、パケットの長さを考慮する。このとき、平均パケット長で正規化したスループット特性は、

$$S(G) = G \cdot \frac{1}{\bar{L}} \sum_{L=1}^{\infty} L \cdot f(L) \cdot Q_S(G, L) \quad (2.9)$$

となる。ここで、 $f(L)$  はパケット長の確率密度関数であり、

$$f(L) = \mu e^{\mu L/R} \quad (2.10)$$

である。

図2.2に示されるような再送過程において、パケットを受け取ってから次のパケットを受け取るまでの時間を  $\Delta$  とすると、 $\Delta$  は次式のように表される。

$$\Delta = T_D + T_w \quad (2.11)$$

これを用いて、平均パケット長で正規化した長さ  $L$  のパケットの遅延時間  $D(G, L)$  は、

$$\begin{aligned} D(G, L) = & \frac{1}{\bar{T}_p} \left\{ 0 \cdot Q_S(G, L) + \Delta(1 - Q_S(G, L))Q_S(G, L) \right. \\ & + 2\Delta(1 - Q_S(G, L))^2 Q_S(G, L) + \dots \\ & \left. + q\Delta(1 - Q_S(G, L))^q Q_S(G, L) + \dots \right\} \quad (2.12) \end{aligned}$$

と表される。ここで、 $q\Delta$  は全部で  $q + 1$  回繰り返した時、最初のパケットを送った時から最後のパケットを受け取り始まるまでの時間である。また、 $(1 - Q_S(G, L))^q Q_S(G, L)$  は  $q$  回正しく伝送されず、 $q + 1$  回目に成功する確率である。

式 (2.12) を簡単にして、

$$D(G, L) = \frac{1}{\bar{T}_p} \cdot \frac{\Delta}{Q_S(G, L)} (1 - Q_S(G, L)) \quad (2.13)$$

となる。

よって、遅延特性は、

$$D(G) = \sum_{L=1}^{\infty} D(G, L)f(L) \quad (2.14)$$

となる。

これまで、パケット再送間隔時間  $T_w$  を固定して考えてきたが、再送パケットの衝突を防ぐために、平均  $T_w$  の指数分布に従う、つまり再送するパケットの発生がポアソン過程に従うものとして解析を行なう。このように仮定を行なっても結局式 (2.13) と一致する。ただし、 $T_w = K \cdot T_p/G$  である。

### 2.3.2 固定長パケット

本節では、パケット長が固定の場合についてに考えてみる。

図2.5に固定長パケットの到着状況を示した。固定長パケットが指数間隔で発生し中央局を通過していくという状況は、待ち行列モデルにおける  $M/D/\infty$  と一致する。パケットの発生はポアソン過程に従うと仮定しているので、生起率は  $\lambda = G/T_p$  のように表される。終了率を求めるにあたっては、以下に述べる指数長近似法を用いる。

では、指数長近似法 (ELA) の原理について述べる。この指数長近似法というのは固定長パケットにおけるパケットの終了率を指数長パケットのときと同様に定めるといったもので、このような手法を用いることにより、近似的にマルコフ性が成り立つものと考えられ、解析が容易になるといったものである。

指数長近似法における終了率については、以下の様にして求める。図2.6 (a) において、パケットは固定長なので、パケット長時間を  $T_p$  と定めると、時間間隔  $[T_i, T_i + \Delta t]$  に終了するパケットは、必ず時間間隔  $[T_i - T_p, T_i - T_p + \Delta t]$  に発生していなければならない。よって、着目パケットが時間間隔  $[T_i, T_i + \Delta t]$  に終了する確率は、時間間隔  $[T_i - T_p, T_i - T_p + \Delta t]$  にパケットが発生した確率に等しい。また、図2.6 (b) に示されるように、時刻  $T_i$  における干渉パケット数を  $k$  とする。パ

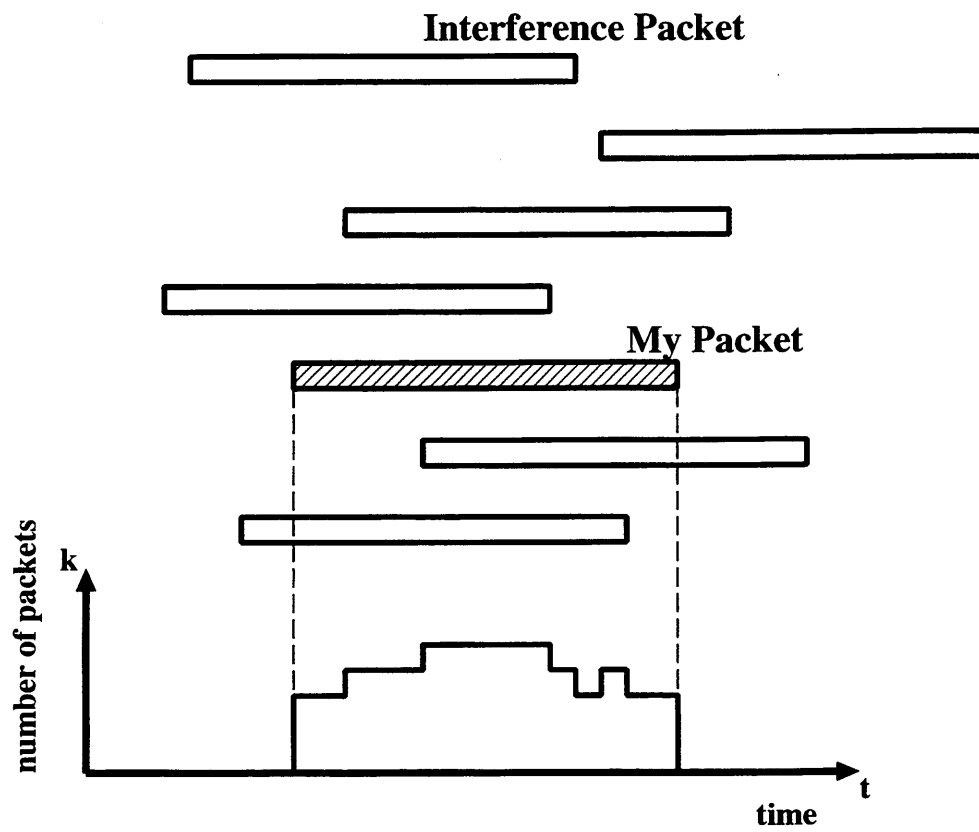
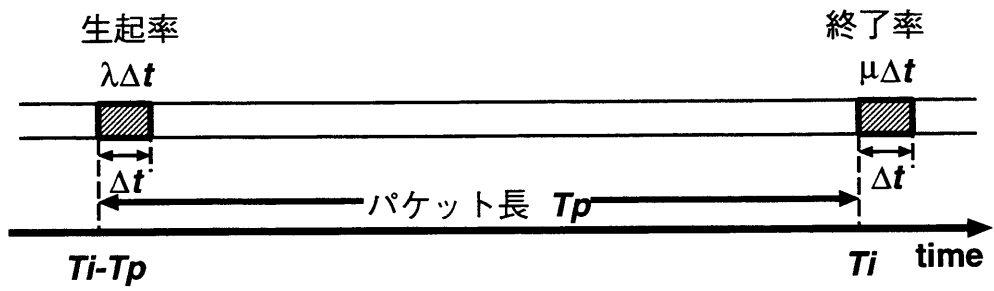
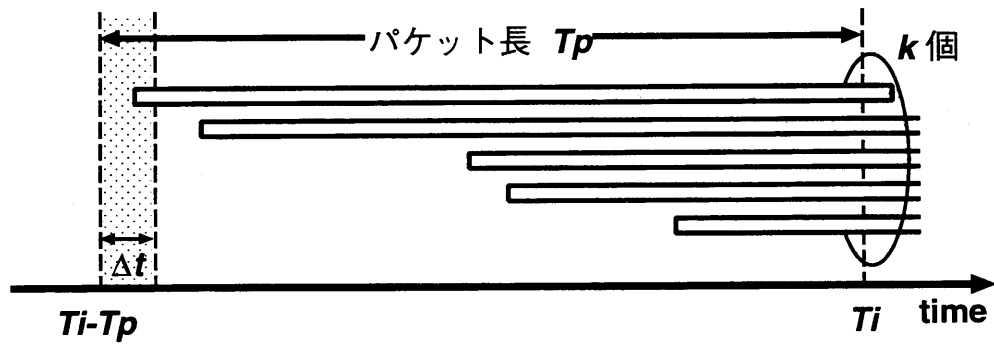


図 2.5: 固定長パケットの到着の様子



(a) 終了する確率と生起した確率の関係



(b) 干渉パケット数と生起した確率の関係

図 2.6: 指数長近似法の原理



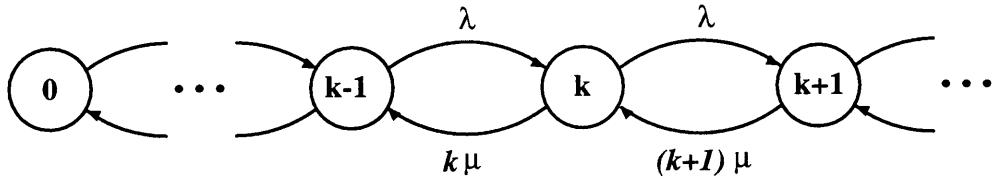


図 2.7: 固定長パケットにおける干渉パケット数の状態遷移図

ケットは固定長なので、この  $k$  個のパケットは必ず時間間隔  $[T_i - T_p, T_i - T_p + \Delta t]$  に発生したことになる。このことより、パケットの発生確率がパケット長時間において一様であると仮定すると、時間間隔  $[T_i - T_p, T_i - T_p + \Delta t]$  にパケットが発生した確率は、 $\Delta t / T_p$  となる。よって、あるパケットが  $[T_i, T_i + \Delta t]$  に終了する確率は  $\mu \Delta t$  (但し  $\mu = 1 / T_p$ ) となり、干渉レベルが  $k$  のときの終了率は  $k \mu \Delta t$  となる。これは、指数長パケットを仮定したシステムにおける終了率と同じになる。なお、終了率を求めるにあたってパケットの発生確率がパケット長時間において一様であると仮定したが、パケットの発生がポアソン分布にしたがうとき、 $k$  個のパケットが発生したとするとこれらのパケットの発生は一様分布に従う [25]。

よって、システムは図2.7に示されるような状態遷移図に従うと近似される。

次に、干渉パケット数の定常状態確率  $P_k$  を求める。図2.7の状態遷移図より、システムは出生死滅過程になると近似できる。CDMA U-ALOHA 方式の定常状態確率  $P_k$  は、式 (2.4) において  $\lambda_i = \lambda$ ,  $\mu_k = k \mu$  とすればよいので、

$$P_k = \frac{(\lambda T_p)^k}{k!} e^{-\lambda T_p} = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \quad (2.15)$$

となる。

ここで、微小時間  $\Delta t$  をビット時間とする。同時送信局数の推移はビットごとに起るものとしているので、 $\Delta t$  後において 1 増加するか、1 減少するか、変化し

ないかという3つの場合に限定される。また、 $P_S(k, i)$  をあるパケットにおいて1ビット目から  $i-1$  ビット目まで成功し、 $i$  ビット目の干渉パケット数が  $k$  である確率とする。

(i)  $i = 1$  のとき;

定常状態の式 (2.15) より,

$$P_S(k, i) = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \quad (2.16)$$

となる。

(ii)  $i > 1$  のとき;

$P_S(k, i)$  は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} P_S(k, i) &= P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t - \lambda\Delta t\} \cdot \{1 - P_b(k)\} \\ &\quad + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \cdot \{1 - P_b(k+1)\} \\ &\quad + P_S(k-1, i-1) \cdot \lambda\Delta t \cdot \{1 - P_b(k-1)\} \end{aligned} \quad (2.17)$$

ここで得られた  $P_S(k, i)$  を使って、CDMA U-ALOHA 方式のパケット成功確率  $Q_S(G)$  は,

$$Q_S(G) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \cdot (1 - P_b(k)) \quad (2.18)$$

となる。

よってスループット特性は,

$$S(G) = G \cdot Q_S(G) \quad (2.19)$$

となる。

また、指数長パケットのときと同様にして遅延特性を求めると、平均パケット長で正規化した遅延時間  $D(G)$  は、

$$\begin{aligned}
 D(G) &= \frac{1}{T_p} \left\{ 0 \cdot Q_s(G) + \Delta(1 - Q_s(G))Q_s(G) \right. \\
 &\quad + 2\Delta(1 - Q_s(G))^2 Q_s(G) + \cdots \\
 &\quad \left. + q\Delta(1 - Q_s(G))^q Q_s(G) + \cdots \right\} \\
 &= \frac{1}{T_p} \cdot \frac{\Delta}{Q_s(G)} (1 - Q_s(G)) \tag{2.20}
 \end{aligned}$$

と表される。

## 2.4 数値例

図2.8, 2.9に  $E_b/N_0$  を変化させたときの指数長パケットおよび固定長パケットのスループット特性の解析結果およびシミュレーション結果を示す。拡散率  $N = 31$ , 平均パケット長  $\bar{L} = 1000$  [bits], パケット長  $L = 1000$  [bits],  $E_b/N_0 = \infty, 10, 20$  [dB] の場合である。指数長および固定長パケットのどちらの場合も、解析結果とシミュレーション結果が非常によく一致していることがわかる。また、スループット特性ははじめオフロードが増加するにつれて増加するが、一度最大値をとるとオフロードの増加とともに減少していく。また、 $E_b/N_0$  の値が大きくなると特性も良くなっていくが、 $E_b/N_0$  がある程度大きくなると、あまり変化がみられなくなることがわかる。

図2.10, 2.11に拡散率を変化させたときの指数長パケットおよび固定長パケットのスループット特性を示す。 $N = 31, 63, 127$ ,  $\bar{L} = 1000$  [bits],  $L = 1000$  [bits],  $E_b/N_0 = \infty$  の場合である。この図より、拡散率  $N$  の増加に従ってスループットの最大値が増加することがわかる。

図2.12, 2.13にパケット長を変化させたときの指数長パケットおよび固定長パ

ケットのスループット特性を示す。  $N = 31$ ,  $\bar{L} = 500, 1000, 5000$  [bits],  $L = 500, 1000, 5000$  [bits],  $E_b/N_0 = \infty$  の場合である。この図より、パケット長が短くなればなるほどスループットの最大値が増加することがわかる。ところがパケット長を短くすると、パケット全体に対するヘッダー部分の割合が大きくなり、情報量が減ってしまうことを加えて考慮すべきであろう。

図2.14, 2.15にユーザー数  $K$  が 1000 のときの、指数長パケットおよび固定長パケットの遅延特性を示す。同じく、 $N = 31$ ,  $\bar{L} = 1000$  [bits],  $L = 1000$  [bits],  $T_D = 0$ ,  $E_b/N_0 = \infty, 10, 20$  [dB] の場合である。オフロードロードが小さいときは遅延時間も短いですが、スループットが最大となるオフロードロードよりも大きくなると急峻に遅延時間は増加し、許容できない程長くなってしまふ。また、 $E_b/N_0$  が大きくなると遅延時間も短くなることがわかる。

図2.16に指数長パケットと固定長パケットの特性比較を示す。この図より、オフロードロードが 14 より小さいときには固定長パケットの方がスループットが良いことがわかる。この値よりオフロードロードが大きくなると、指数長パケットの方がスループットが良くなる。これはオフロードロードが大きくても短いパケットは正しく伝送されているからである。

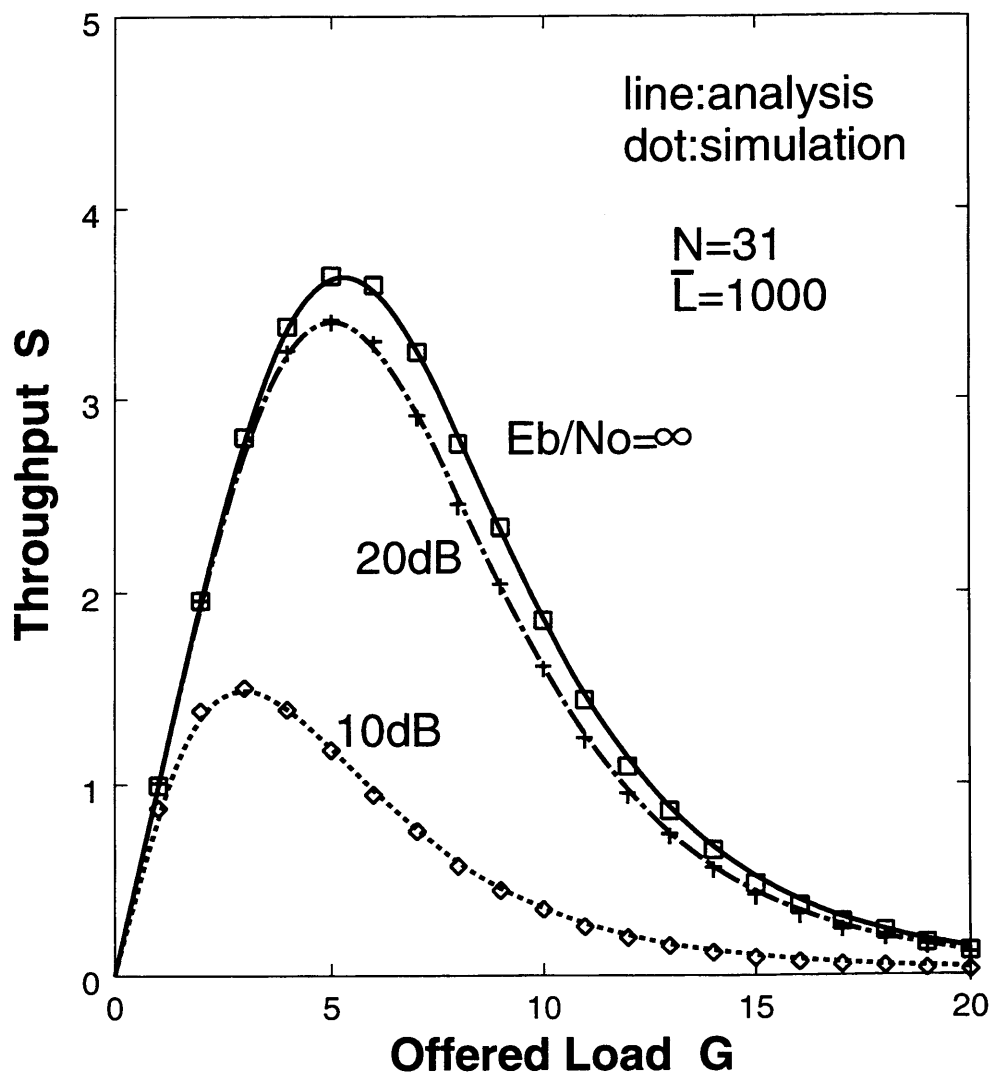


図 2.8: 指数長パケットのスループット特性

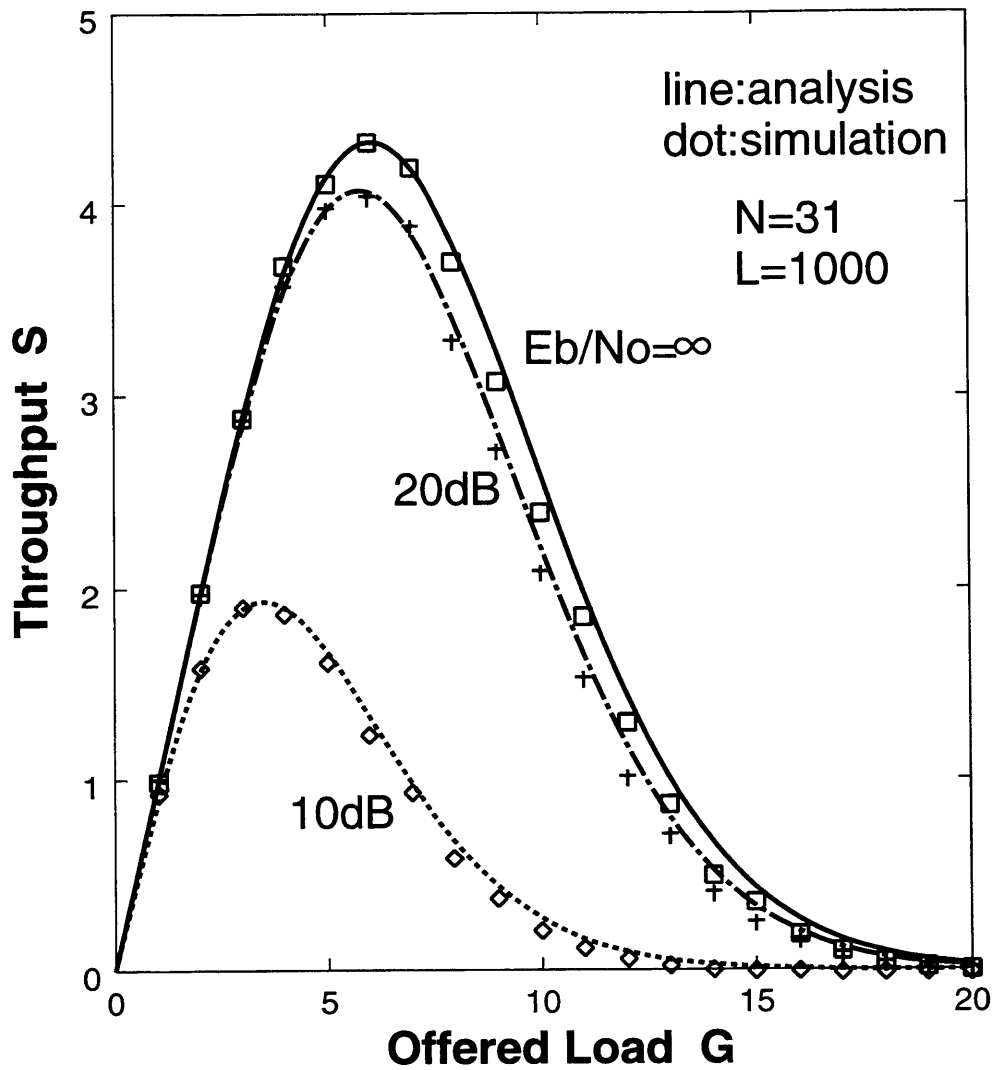


図 2.9: 固定長パケットのスループット特性

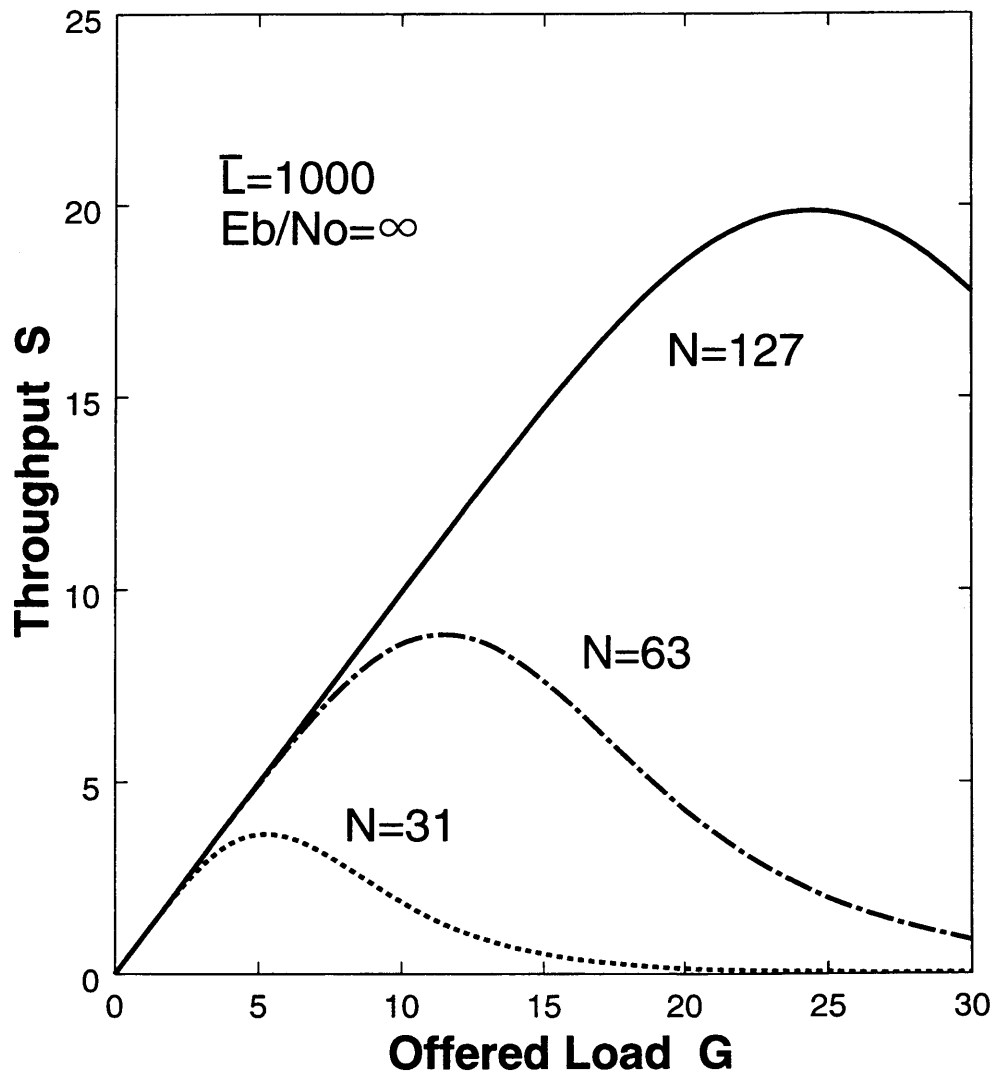


図 2.10: 拡散率を変化させた場合の指数長パケットのスループット特性

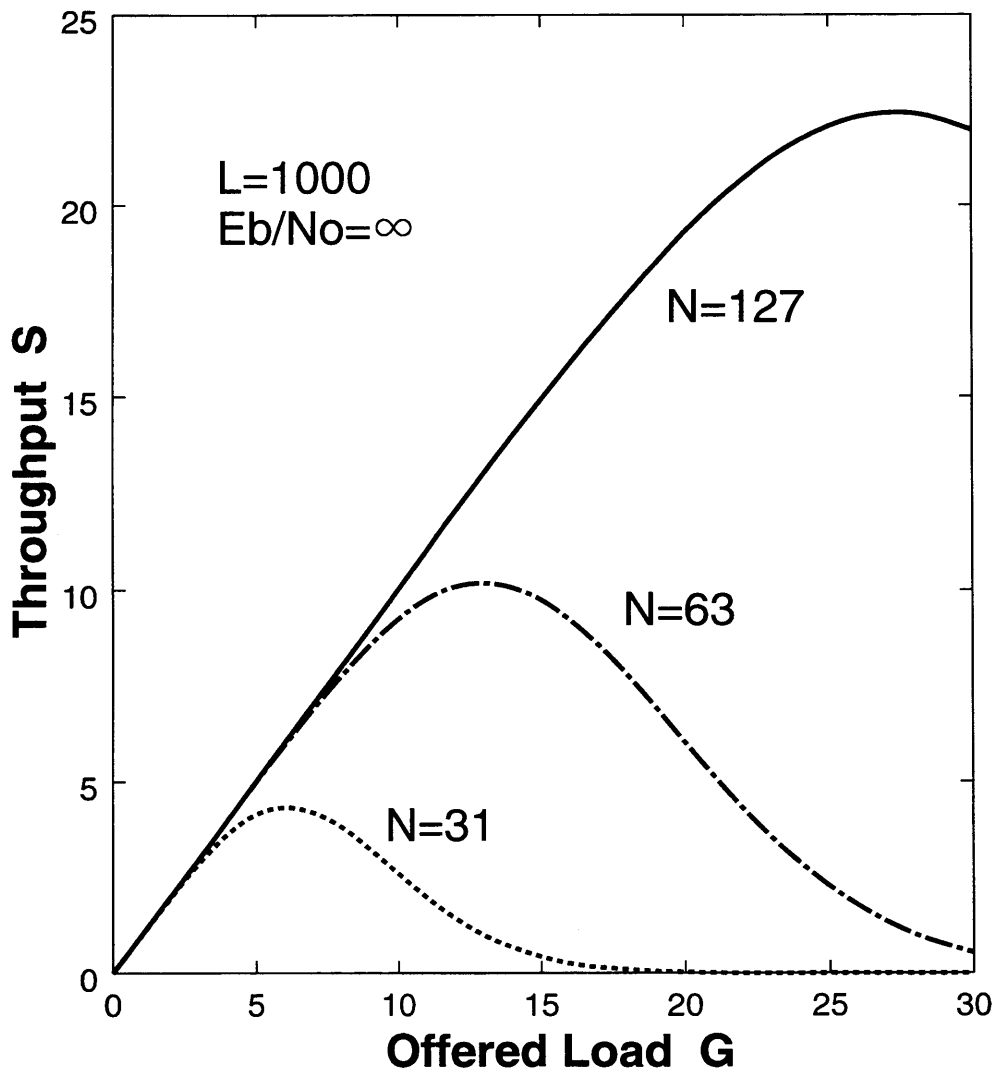


図 2.11: 拡散率を変化させた場合の固定長パケットのスループット特性



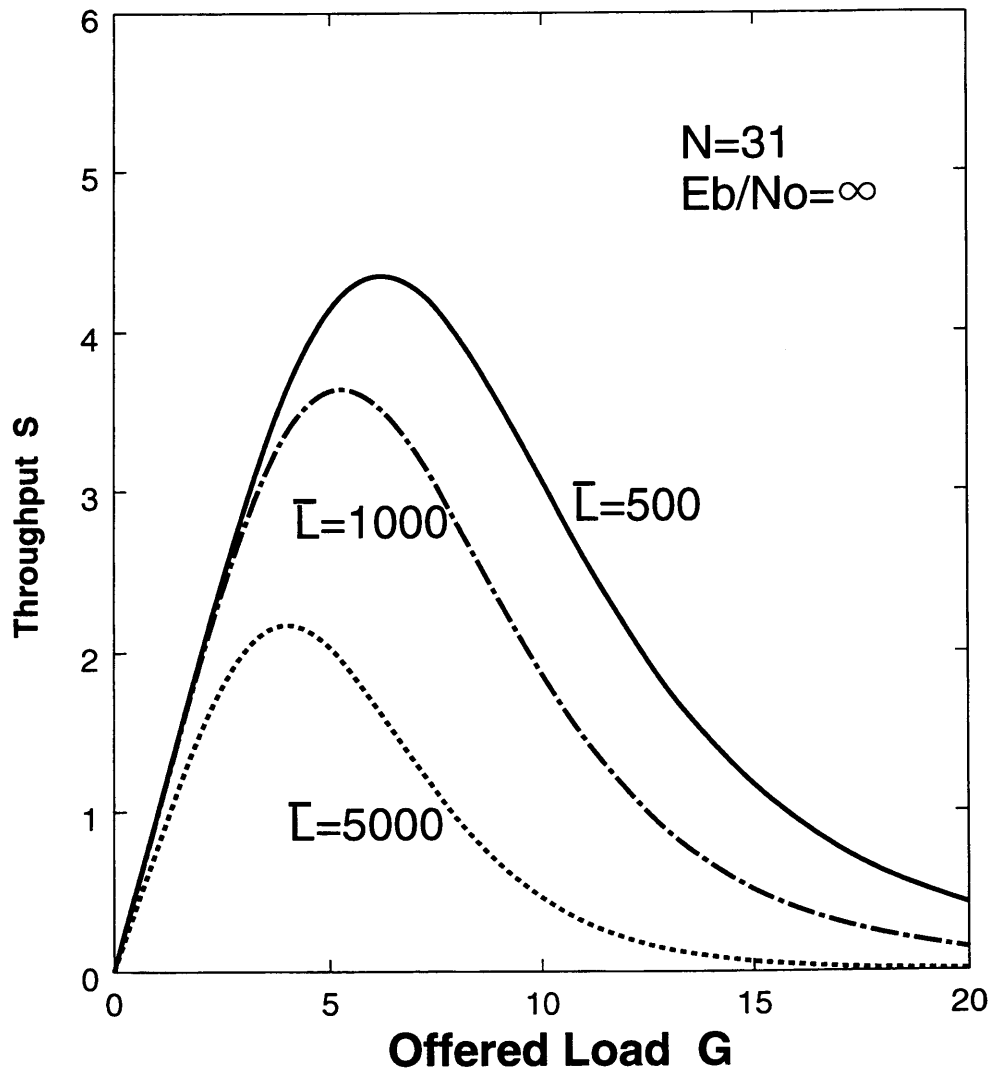


図 2.12: 平均パケット長を変化させた場合の指数長パケットのスループット特性

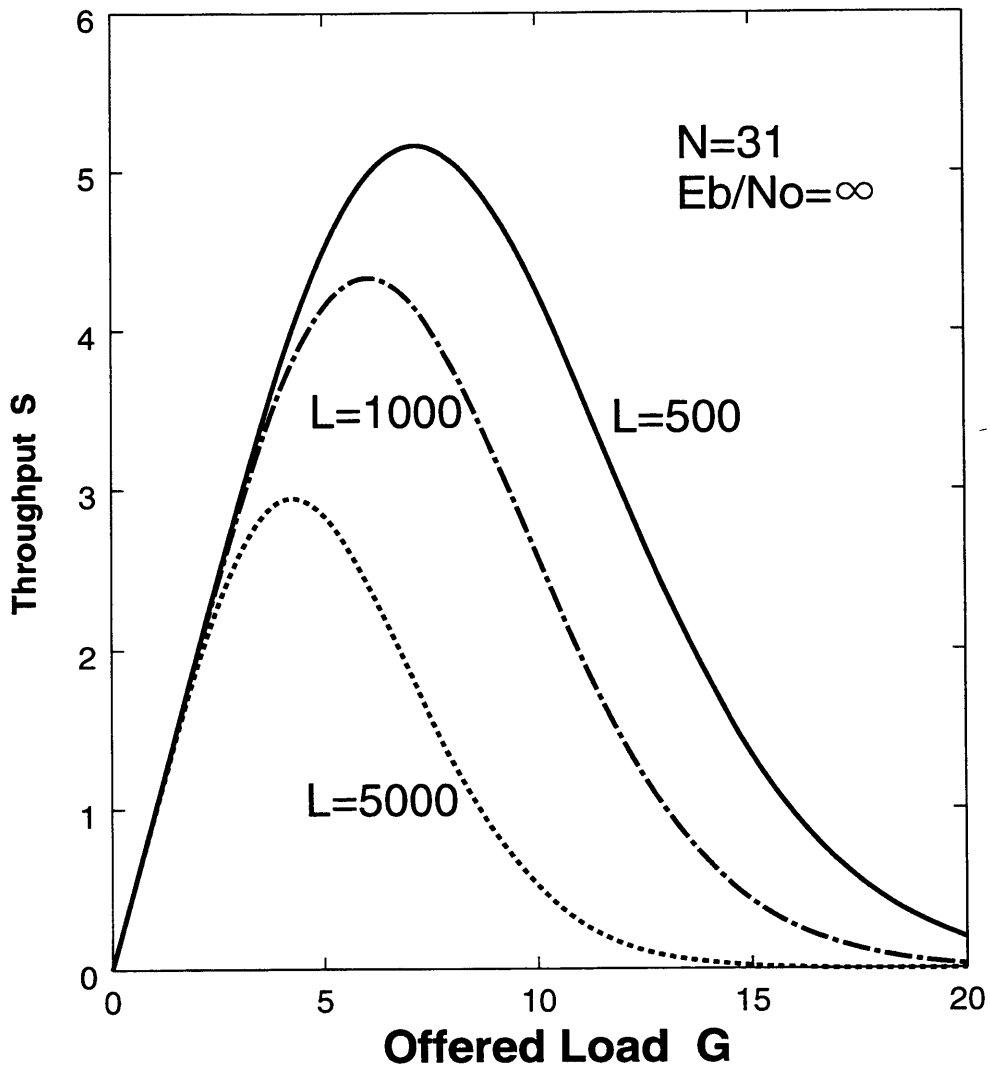


図 2.13: パケット長を変化させた場合の固定長パケットのスループット特性

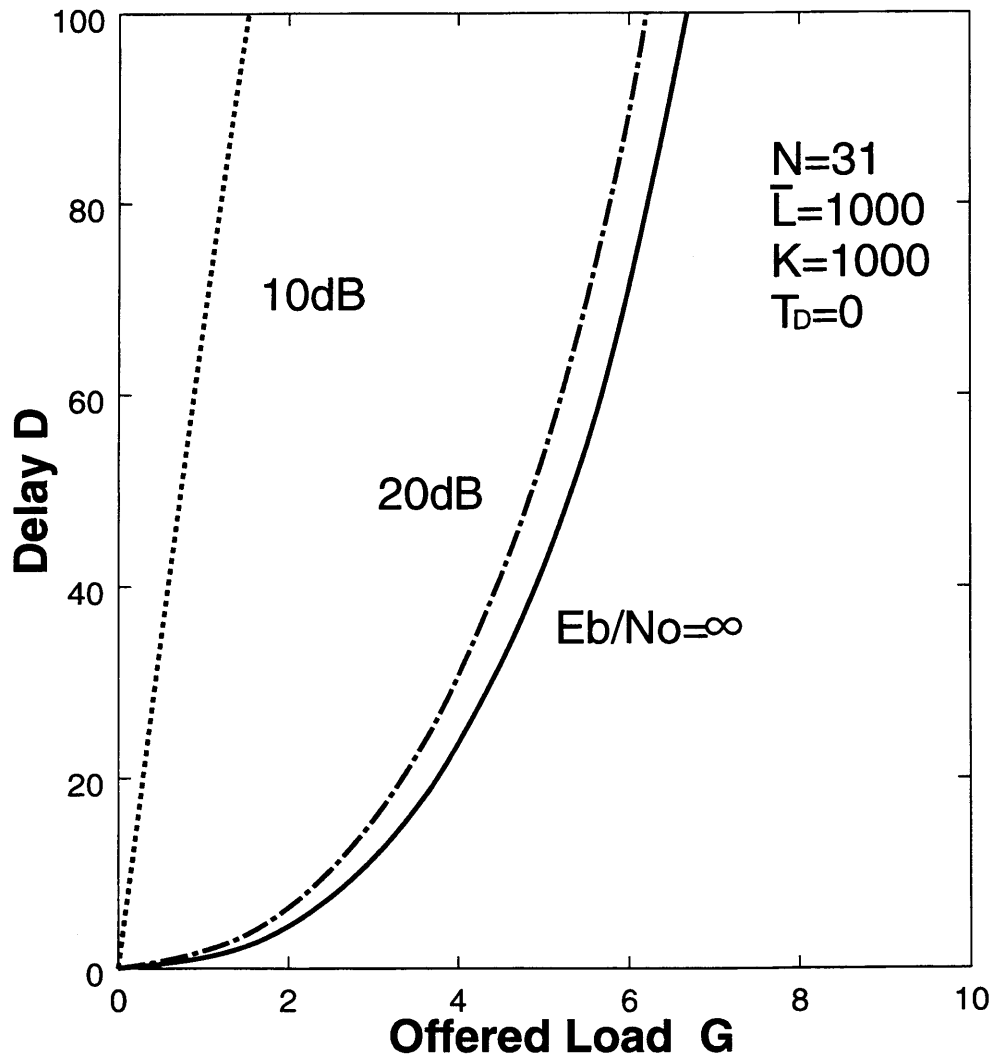


図 2.14: 指数長パケットの遅延特性

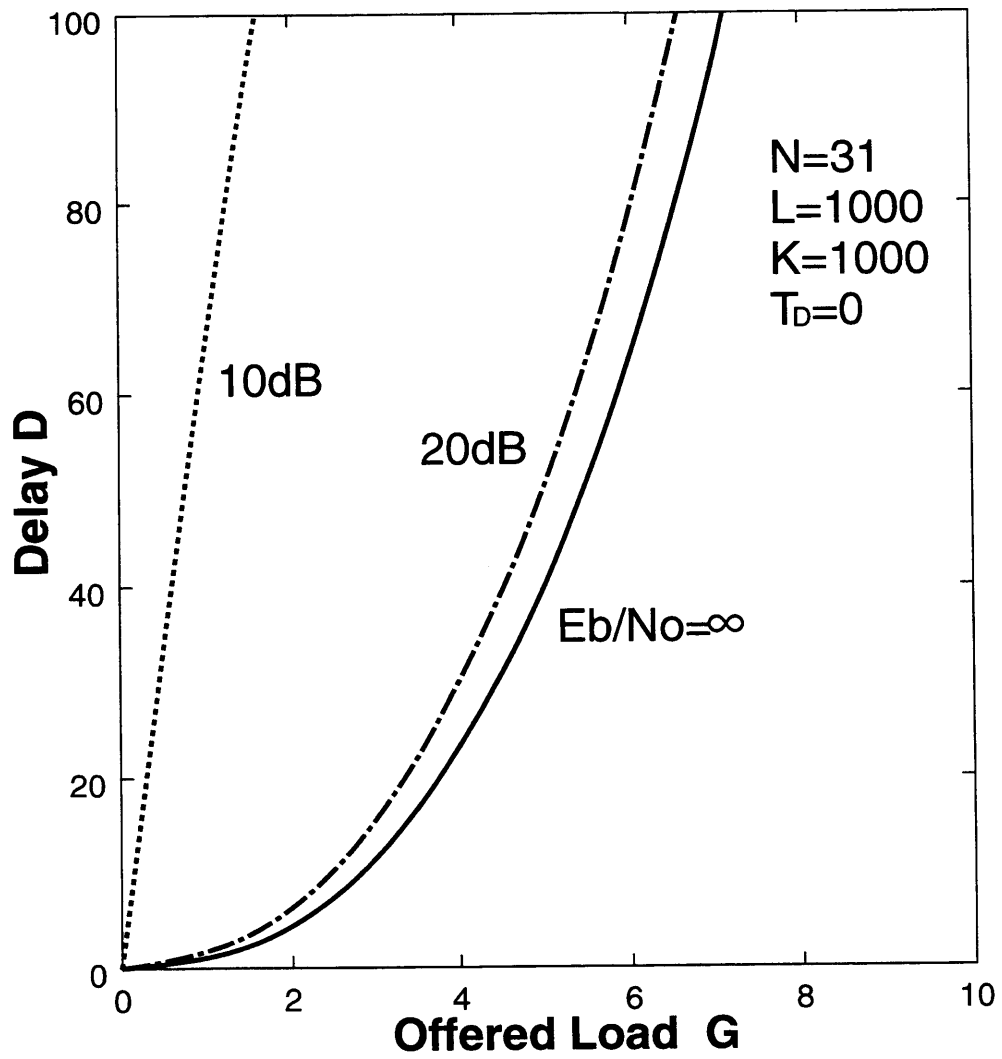


図 2.15: 固定長パケットの遅延特性

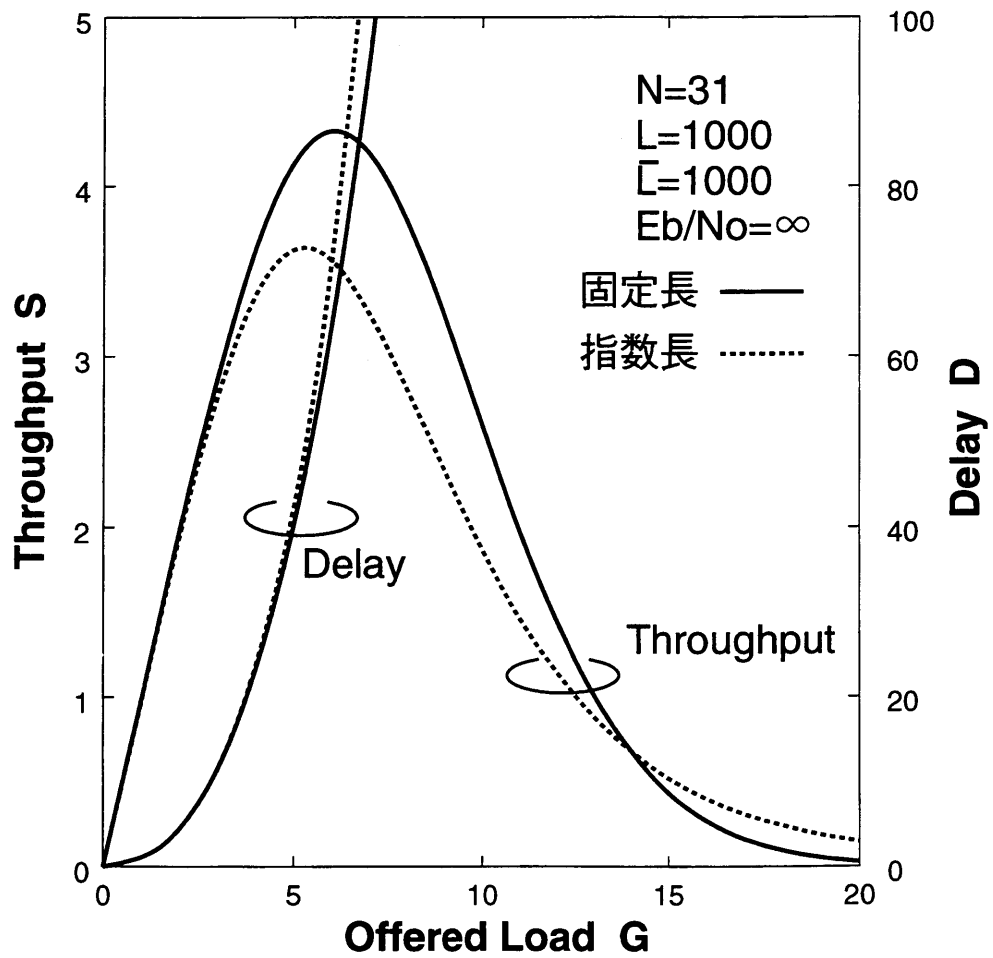


図 2.16: 指数長パケットと固定長パケットの比較

## 2.5 まとめ

指数長パケットのスループット解析および遅延特性を、パケット発生がポアソン発生と仮定して、待ち行列システム  $M/M/\infty$  を用いて行なった。このシステム  $M/M/\infty$  に対しては従来よりさまざまな形でその解析がなされており、干渉パケット数の遷移をマルコフモデルの状態遷移で直ちに表すことができる。

また固定長パケットの場合においても、スループット解析および遅延特性を解析的に求めた。固定長パケットを用いたシステムは非マルコフモデルとして従来よりその解析が困難なものとして知られていた。これは固定長パケットのサービス終了が発生時刻に依存するため、サービス終了率が存在しないことに起因している。本解析ではパケットの終了率を指数長パケットのときと同様に定めることにより、近似的にマルコフ性が成立するので、干渉パケット数の状態遷移を出生死滅過程としてあらわした。そしてこれを用いてスループットおよび遅延特性解析式を得た。

この結果、スループット特性は始め増加し、一度最大値をとった後、オフアードロードの増加とともに減少していくことがわかった。遅延特性はスループットが最大となるオフアードロードの値より大きくなると、急激に悪くなる。また、パラメータ  $E_b/N_0$  に対しては 20[dB] 程度で十分である、スループットの最大値は拡散率  $N$  の増加にともなって大きくなっていく、パケット長が短くなるにつれてスループットの最大値は大きくなることがわかった。以上のことよりスループット特性および遅延特性は拡散率  $N$ 、 $E_b/N_0$ 、パケット長  $L$ 、オフアードロード  $G$  に強く依存することがわかった。

## 第 3 章

### パケットの再送を考慮に入れた特性解析

#### 3.1 はじめに

第2章では新しく生成されるパケット(新規パケット)と、パケットの伝送に失敗したためにそのパケットを送りなおす再送パケットとを区別せずに解析を行なってきた。しかし、実際のシステムにおいて新規パケットと再送パケットの生起率が異なることは当然考えられる。なぜなら、新規パケットの発生は各ユーザーが中央局に対して何らかの情報を送りたいときに起こるのに対し、再送パケットは各ユーザーが適度に間隔をおいてから送信されるからである。さらに、この再送間隔を制御することにより比較的容易に再送パケットの発生を制御することができる。そのため、新規パケットと再送パケットを区別して解析を行う必要がある。

Pure ALOHA 方式 [21] ~ [23] と同様に、CDMA ALOHA 方式においても bi-stable な状態になる可能性がある。この bi-stable な状態とは、高いスループット特性を得ることのできる望ましい安定状態と、ほとんどのパケットが伝送に失敗してしまうという望ましく安定状態が存在し、統計学的なふらつきのためにこれら 2 つの安定状態の間を移動してしまう状態である。望ましくない安定状態に落

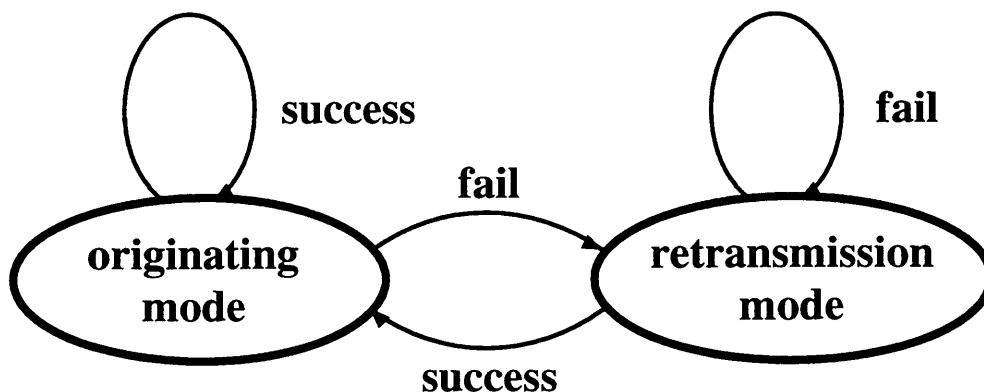


図 3.1: ユーザー局における新規モードと再送モードの変化

ち込むと特性の劣化は避けられない。しかしながら, CDMA ALOHA 方式においてはシステムの安定性に関してはこれまで調べられていない。

そこで, 本章では CDMA U-ALOHA 方式の再送パケットの影響を考慮に入れた特性解析を行なう。第2章の結果より, スループット特性は固定長パケットの場合の方が良いので, ここでは固定長パケットについて解析を行う。このシステムの安定性についても調べることにする。なお, 本章では再送パケットの生起率を適当な値に固定して解析を行う。つまり, 再送パケットの発生を制御しない。制御に関しては本章の結果を基にして第4章で検討する。

### 3.2 システムモデル

システムモデルは2.2節で述べた固定長パケットのものと同じとする。また, パケットの再送に関して以下のような手順を考える。各ユーザーは図3.1のように新規パケットを生成する新規モードと, パケットが正しく伝送されなかったためにパケットを再送する再送モードのいずれかに属する。新規モードにあるユーザーは新規パケットを発生し, そのパケットが正しく伝送されれば新規モードの



ままであるが、正しく伝送されなかったら再送モードに移る。再送モードにあるユーザーはパケットを再送し、それが正しく伝送されたときに新規モードに移るが、正しく伝送されなければ再送モードのままである。新規パケットの生起率を  $\Lambda_o$ 、再送パケットの生起率を  $\Lambda_r$  とし、全てのユーザーに対して再送モードにいるユーザーの割合を状態  $r$  とする。システムが定常状態であるとする、状態  $r$  の変化は非常にゆっくりであると見なし得る。そこでパケットの発生は生起率  $\lambda = (1 - r)\Lambda_o + r\Lambda_r$  のポアソン過程に従うものと仮定する。また、オフアードロード  $G$  はパケット長時間  $T_p$ [sec] に発生するパケットの数なので、

$$G = \lambda \cdot T_p = \{(1 - r)\Lambda_o + r\Lambda_r\} \cdot T_p \quad (3.1)$$

と表される。ここで、新規パケットのオフアードロードを  $G_o = \Lambda_o \cdot T_p$ 、再送パケットのオフアードロードを  $G_r = \Lambda_r \cdot T_p$  と定義することによって、 $G$  は次のように表される。

$$G = (1 - r)G_o + rG_r \quad (3.2)$$

### 3.3 状態占有確率とスループット、遅延特性

式(3.2)より、 $G_o$  と  $G_r$  の値が異なる時、状態  $r$  によって全体のオフアードロード  $G$  の値が変化することがわかる。このため、第2章で行なった解析手法ではこのことを考慮に入れていないため、再送パケットを考慮したスループット特性や遅延特性を正確に求めることができない。そこで、ここでは状態  $r$  に着目して特性解析を行っていく。式(3.2)より状態  $r$  における全体のオフアードロードがわかるので、状態  $r$  におけるスループットや遅延時間というのは容易に求めることができる。そのため定常状態における状態  $r$  の占有確率  $\pi(r)$  を求めれば、システム全体のスループットや遅延特性を求めることができる。

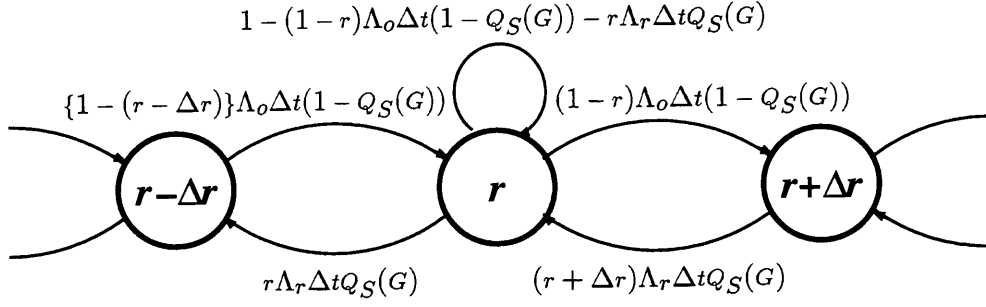


図 3.2: 状態  $r$  の遷移

まずはじめに、この状態占有確率  $\pi(r)$  を求める。パケットの発生はポアソン過程に従うので、微小時間  $\Delta t$  の間に状態  $r$  は  $\Delta r$  増加するか、 $\Delta r$  減少するか、変化しないかのいずれかの場合に限定されるものと仮定する。このことより、状態推移図は図3.2のようになる。微小時間  $\Delta t$  の間に新規モードのユーザーがパケットを生成し、パケットの伝送に失敗したとき状態  $r$  は  $\Delta r$  増加し、パケットの伝送に成功したとき状態  $r$  は変化しない。また、再送モードのユーザーが再送パケットの伝送に成功したとき状態  $r$  は  $\Delta r$  減少し、再送パケットの伝送に失敗したとき状態  $r$  は変化しない。このことより、状態占有確率  $\pi(r)$  は、

$$\begin{aligned}
 \pi(r) = & \{1 - (r - \Delta r)\} \Lambda_o \Delta t \cdot (1 - Q_S(G)) \cdot \pi(r - \Delta r) \\
 & + \{1 - (1 - r) \Lambda_o \Delta t \cdot (1 - Q_S(G)) - r \Lambda_r \Delta t \cdot Q_S(G)\} \cdot \pi(r) \\
 & + (r + \Delta r) \Lambda_r \Delta t \cdot Q_S(G) \cdot \pi(r + \Delta r)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

となる。

従って、パケットの再送を考慮したスループット特性は、状態  $r$  におけるスループットに状態占有確率  $\pi(r)$  を掛けて、 $r$  について 0 から 1 まで積分すれば良

いので、式 (2.18) の  $Q_S(G)$  を用いて次のようになる。

$$S(G_o) = \int_0^1 \{(1-r)G_o + rG_r\} \cdot Q_S((1-r)G_o + rG_r) \cdot \pi(r) dr \quad (3.4)$$

また、遅延特性も同様にして、

$$D(G_o) = \int_0^1 D_U((1-r)G_o + rG_r) \cdot \pi(r) dr \quad (3.5)$$

となる。ただし、 $D_U(G)$  はオフロードロードが  $G$  のときの遅延時間であり、式 (2.20) より、

$$D_U(G) = \frac{1}{T_p} \cdot \frac{\Delta}{Q_S(G)} (1 - Q_S(G)) \quad (3.6)$$

と表される。

### 3.4 期待流動値とシステムの安定性

ここでは、システムの安定性について述べる。安定動作の指標として、期待流動値 (Expected Drift)  $d(r)$  を用いるものとする [21]。これは再送モードのユーザーが増加する割合と定義し、

$$\begin{aligned} d(r) = & \text{(新規モードから再送モードに移る割合)} \\ & - \text{(再送モードから新規モードに移る割合)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

と表される。新規パケットの発生する割合は  $(1-r)G_o$  であり、パケットの伝送に失敗する確率は  $(1-Q_S(G))$  なので、新規モードから再送モードに移る割合は  $(1-r)G_o(1-Q_S(G))$  となる。同様にして、再送モードから新規モードに移る割合は  $rG_rQ_S(G)$  となる。よって、式 (3.7) は次式のようになる。

$$\begin{aligned} d(r) &= (1-r)G_o(1-Q_S(G)) - rG_rQ_S(G) \\ &= (1-r)G_o - GQ_S(G) \end{aligned} \quad (3.8)$$

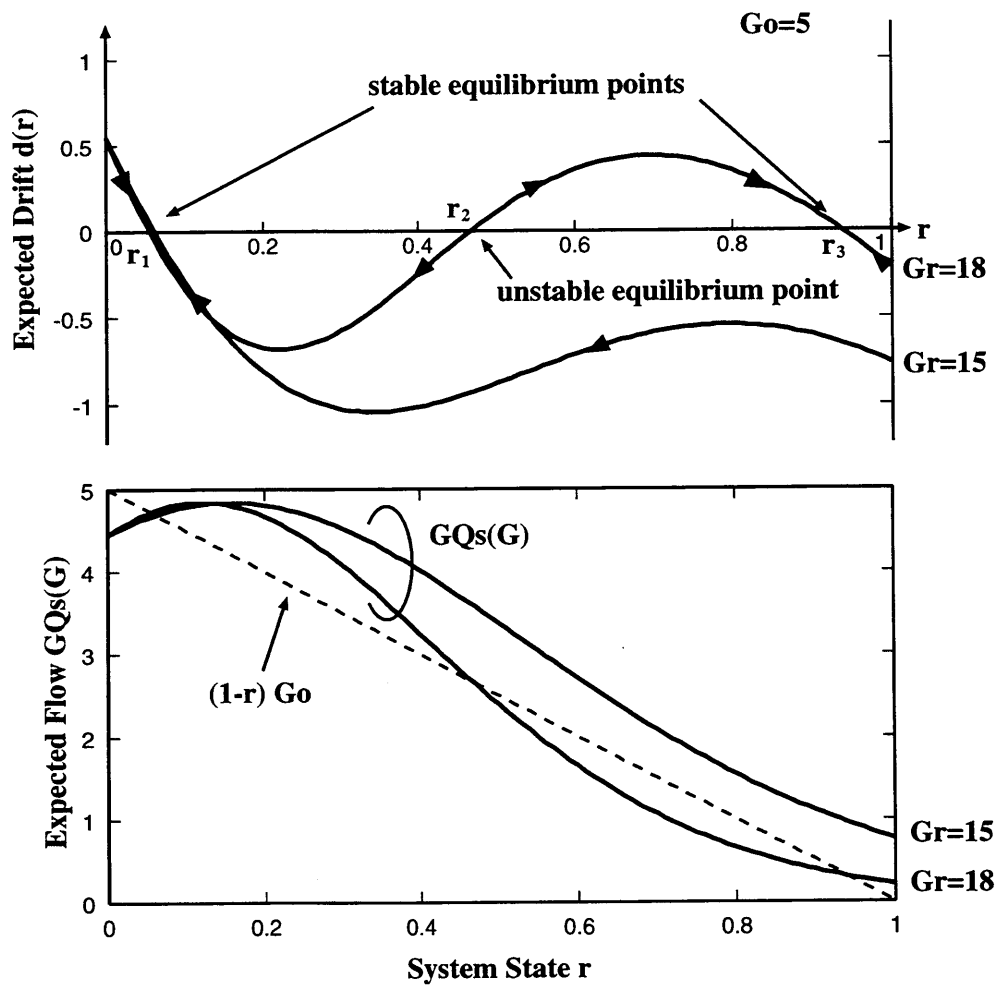


图 3.3: 期待流动值

式 (3.8) において、第 1 項目は新規パケットの発生する割合である。第 2 項目は状態  $r$  におけるスループットであり、これを Expected Flow と呼ぶ。もし、新規パケットの発生する割合と Expected Flow が等しければ、期待流動値は 0 になる、つまり再送モードのユーザーが増加する割合が 0 なので、システムは平衡状態になるといえる。図 3.3 は期待流動値と Expected Flow を表している。式 (3.8) の第 1 項目と第 2 項目の間には、次のような関係が存在することは明かである。

1. もし  $r = 0$  ならば、 $GQ_S(G) \leq (1 - r)G_0$ .
2. もし  $r = 1$  ならば、 $GQ_S(G) \geq (1 - r)G_0$ .

これらの特性の為に、 $d(0)$  は 0 以上に、 $d(1)$  は 0 以下になる。このため、平衡点の数は奇数個となる。

一般的に、スループット特性はオフロードが小さい所では単調増加し、最大値をとった後、減少していく、つまり、 $GQ_S(G)$  は上に凸の曲線となる。また、 $(1 - r)G_0$  は直線になるので、これらの交点は 3 個以下、つまり平衡点は 3 個以下になる。よって、このシステムは 1 つの平衡状態を持つか、又は 3 つの平衡状態を持つことになる。また、3 つの平衡状態を持つとき、 $r_1$  と  $r_3$  は安定であるが、 $r_2$  は不安定である。なぜなら、 $r_1$  や  $r_3$  では状態  $r$  が少し変化しても  $r_1$  や  $r_3$  に戻ろうとするが、 $r_2$  ではすこし変化したら  $r_2$  には戻ろうとせず、 $r_1$  か  $r_3$  に移ろうとするからである。更に述べると、 $r_1$  は状態  $r$  が小さい所で安定になるので、再送モードのユーザーが少なく望ましい安定状態であると言える。しかし、 $r_3$  は状態  $r$  の値が大きく再送モードのユーザーが多いため、望ましくない安定状態であると言える。統計学的なふらつきのために、これら 2 つの安定状態の間を移動することになる。

### 3.5 数値例

図3.4, 3.5に拡散率  $N = 31$ ,  $E_b/N_0 = \infty$ , パケット長  $L = 1000$  [bits], ユーザー数  $K = 1000$ , 再送パケットのオフアードロード  $G_r = 5.15$  のときのスループット特性および遅延特性を示す. この図には計算機シミュレーションによって求めた結果も示してある. 図をみてわかるように, 解析結果と計算機シミュレーション結果が非常によく一致していることがわかる. まず,  $G_r = 15$  の場合について着目する.  $G_r = G_o$  のときと比べて, 新規パケットのオフアードロード  $G_o$  が小さいところでは,  $G_r = 15$  のときの方が特性が良くなるが, 新規パケットのオフアードロードが5より大きくなると特性が急激に劣化する. 次に  $G_r = 5$  の場合について着目する. 新規パケットのオフアードロードが小さいところでは,  $G_r = G_o$  のときと比べて特性は悪くなるが, 新規パケットのオフアードロードが大きくなってくると,  $G_r = G_o$  のときと比べて  $G_r = 5$  のときの方が特性は良くなる. これは, 新規パケットのオフアードロードが小さいとき, パケットの伝送が成功する確率は高いので, 再送パケットのオフアードロードが大きい方が再送パケットを早く処理でき, 特性が良くなるためである. また新規パケットのオフアードロードが大きいとき, パケットの伝送が成功する確率は低くなってしまいうので, 再送パケットのオフアードロードが小さい方が全体のオフアードロードを小さく抑えることができ, パケットの伝送に成功しやすくなり特性が良くなるためである.

図3.6に拡散率  $N = 31$ ,  $E_b/N_0 = \infty$ ,  $L = 1000$  [bits],  $K = 1000$ , 新規パケットのオフアードロード  $G_o = 5.12$  のときの期待流動値と状態確率を示す. 再送パケットのオフアードロード  $G_r = 5$  の場合, 図3.6(a) からわかるように, 期待流動値  $d(r)$  は直線的に減少し, 状態  $r$  がおよそ0.2のところまで0となり平衡状態になっている. また, 期待流動値が0になるところで状態占有確率  $\pi(r)$  がピーク

値をとっていることがわかる。図3.6(b)に示されているように、 $G_r = 10$ の場合、再送パケットの生起率が大きくなるので、再送パケットがより速く処理でき、その結果平衡点が  $G_r = 5$  の場合より状態  $r$  の小さいところに移っている。さらに再送パケットのオフロードを大きくした  $G_r = 15$  の場合 (図3.6(c)), 平衡状態が3つ存在してしまうのがわかる。再送パケットの生起率を大きくしすぎたために、状態  $r$  の大きいところで全体のオフロードが大きくなってしまい、パケット成功確率が悪くなってしまうからである。3.4節で述べたように、3つの平衡状態のうち1つめと3つめは安定な平衡状態であり状態占有確率がピーク値をとっているが、2つめは不安定な平衡状態であるために、状態占有確率はピーク値をとらない。このように2つの安定状態が存在するとき、システムはこの2つの安定状態の間を移動することになる。このような bi-stable な状態は、図3.4や図3.5において、 $G_r = 15$  の場合の  $G_o = 5$  の付近で見られるような特性の急激な変化が起こるときに生じる。再送パケットのオフロード  $G_r = 20$  の場合になると (図3.6(d)), 再送パケットの生起率が大きくなりすぎ、平衡状態は状態  $r$  がほぼ1のところまで移ってしまう。このような場合、ほとんど全てのユーザーが再送モードにいる、つまりパケットはほとんど正しく伝送されず、特性は非常に悪くなってしまう。

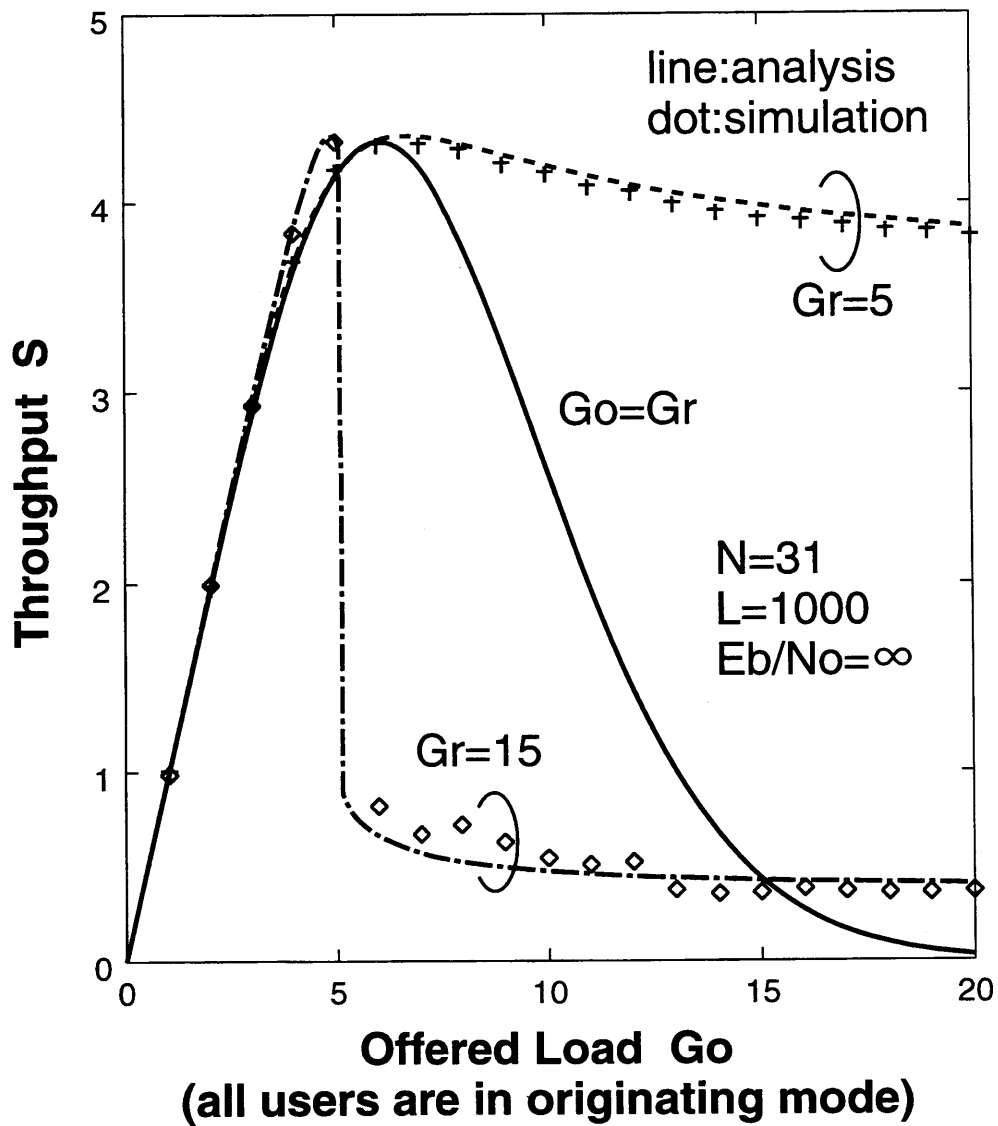


図 3.4: 再送パケットを考慮したスループット特性



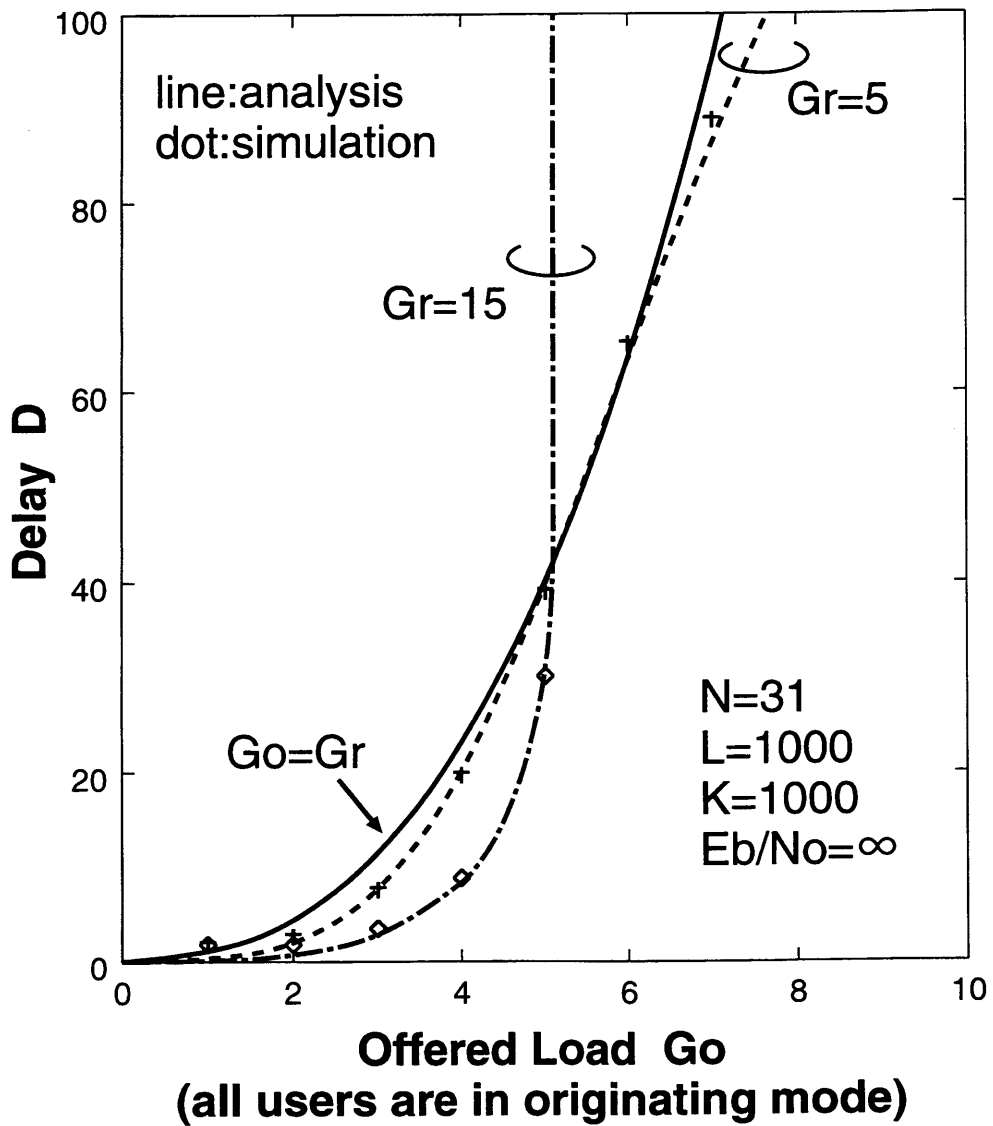


図 3.5: 再送パケットを考慮した遅延特性

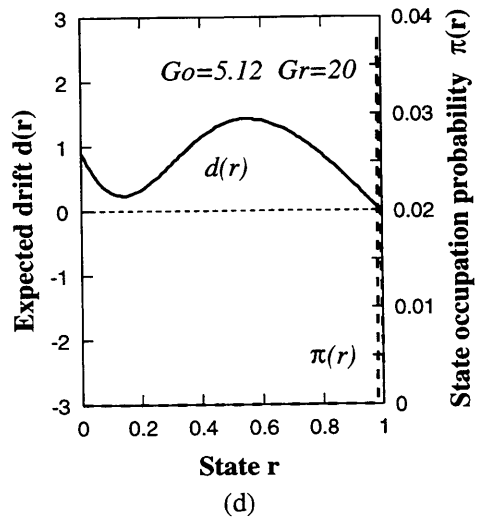
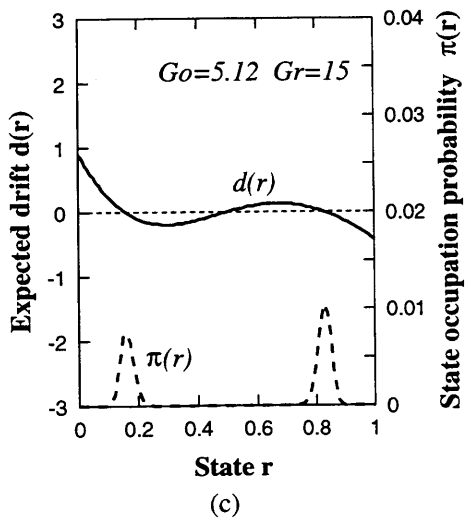
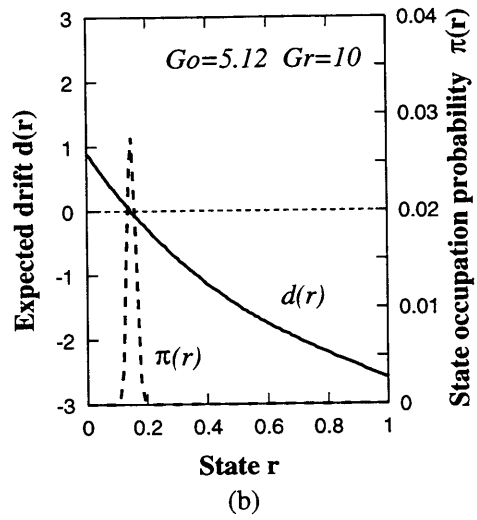
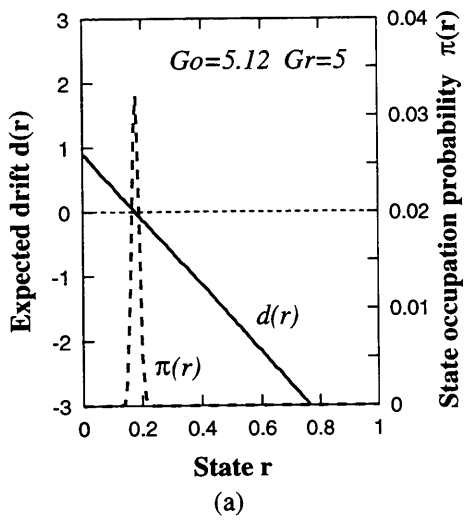


図 3.6: 期待流動値と状態占有確率

### 3.6 まとめ

本章では、再送パケットを考慮してスループット特性、遅延特性を求めた。その結果、再送パケットのオフロードが大きいとき、新規パケットのオフロードが小さいところで特性がよく、再送パケットのオフロードが小さいとき、新規パケットのオフロードが大きいところで特性がよいのがわかった。また、システムの安定性を調べるために、期待流動値を用いて特性解析を行った。その結果、安定状態が2つ存在する bi-stable な状態が存在し、このとき、スループット特性や遅延特性が急激に変化することがわかった。

## 第 4 章

### 最適アクセス制御方式

#### 4.1 はじめに

本章では特性向上を図るために、パケットの送信制御と再送制御を同時に行うアクセス制御方式に関して検討を行う。

前章において、CDMA U-ALOHA 方式に対して何のアクセス制御も行わない場合について、パケットの伝送に失敗して生じる再送パケットの影響を考慮して解析を行った。そして、システムが安定に動作するかどうかについても調べ、システムが不安定になり、望ましくない状態に落ち込む場合があることを示した。CDMA ALOHA 方式の場合、システムが望ましくない状態に落ち込むと、その影響は伝送中の全てのパケットにおよぶ恐れがある。この場合、殆んど全てのパケットが伝送に失敗してしまう可能性が生じ、スループットの劣化は非常に大きなものとなる。このため、システムが望ましくない状態に落ち込むのを防ぐ必要があり、パケットの再送制御が重要となる [16]。これは、再送パケットを中央局によって与えられる送信確率に従って送ることで、制御を行なう方法である。このパケットの再送制御を行なうと、スループット特性は直線的に増加し、一度最大値をとった後、その値を維持し続ける。これは、全体のオフロードロードがスルー

プットが最大になるときのオフロードの値になるようにパケットの再送制御を行っているためである。しかし、パケットの再送制御のみでは、スループットの最大値はアクセス制御を行っていない場合の最大値より大きくなる。ない。

また、CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性を向上させる方策の 1 つとして、チャネル伝送中のパケットの数に応じてパケットの送信を制御する Channel Load Sensing Protocol (CLSP) [8], [14], [17] ~ [20] がある。CLSP では、各局が中央局にパケットを送るというスター型のネットワークを前提としており、中央局がチャネル伝送中のパケットの数 (チャネルロードと呼ぶ) を調べ、このパケットの数があるスレッシュホールドより小さければ送信を許可し、スレッシュホールド以上なら送信を拒否するというパケットの送信制御が行われる。文献 [14] において、CLSP を行ったときのスループット特性、およびスレッシュホールドの決定方法について述べられている。この方法によってスレッシュホールドが与えられたシステムでは、スループットの最大値は CLSP を用いていない場合のおよそ 1.5 倍になり、平均トラヒック量の多い所でもスループットの劣下は生じないことが示されている。しかし、システム特性評価において、送信拒否や再送パケットの影響について考慮されていない。

これまで、パケットの送信制御と再送制御の両方を用いたシステムは考えられていない。そこで本稿では CDMA U-ALOHA 方式における新しいアクセス制御方式として Optimal Access Control Protocol (OACP) を提案する。このプロトコルはスループットの最大値を高くするためにパケットの送信制御を行い、システムが望ましくない安定状態に落ち込むのを防ぐためにパケットの再送制御を行うことにより特性向上を図る。この OACP を用いた CDMA U-ALOHA 方式の特性評価を解析的に行う。また、期待流同値を用いてシステムの安定性を明らかにする。

さらに、CDMA パケット無線通信のスループット特性の上限値を求め、これ

と比較することにより OACP が最適なアクセス制御を行なっていることを示す。なお、ここでいう「最適」とは、使用するチャネルや通信方式において、スループット特性を最も高くすることができる、つまり スループット特性を CDMA パケット無線通信の上限まで高くすることができるという意味である。本研究ではパケット無線通信におけるアクセス用プロトコルを問題にしており、チャネルの状態や変復調技術等に関しては重要ではないので、考慮しない。

## 4.2 システムモデル

システムモデルは3.2節で述べたものと同じとする。ただし、パケットの送信要求の発生は生起率  $\lambda$  のポアソン過程に従うものとする。

アクセス制御を行うにあたって、図4.1に示されるようなシステムを用いる。各ユーザー局が中央局にパケットを送信するというスター型のネットワークを用いる。中央局は各ユーザー局に対して、アクセス制御に関する情報を放送する。ユーザー局では、この情報に従いパケットを中央局に送信する。このとき、パケットの伝搬や、処理時間によって生じる遅延(アクセス制御遅延と呼ぶ)が存在するが、これは非常に小さいものとし、アクセス制御遅延による影響を無視できるものとする。また、中央局においてチャネルロードの観測は完全に行えるものとする。

## 4.3 OACP の原理

本章で提案する Optimal Access Control Protocol (OACP) は、パケットの送信制御と再送制御を同時に行なうことにより、特性向上を図るアクセス制御方式である。図4.2に OACP を用いたときのパケットの流れ図を示す。

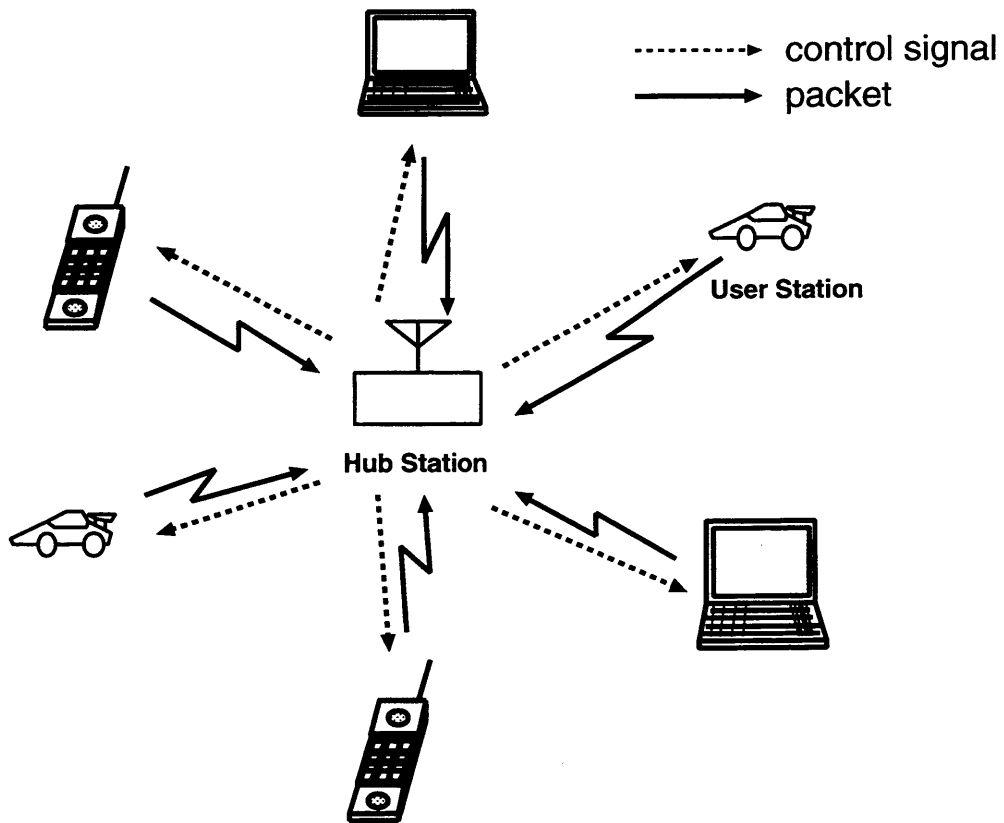


図 4.1: パケットのアクセス制御

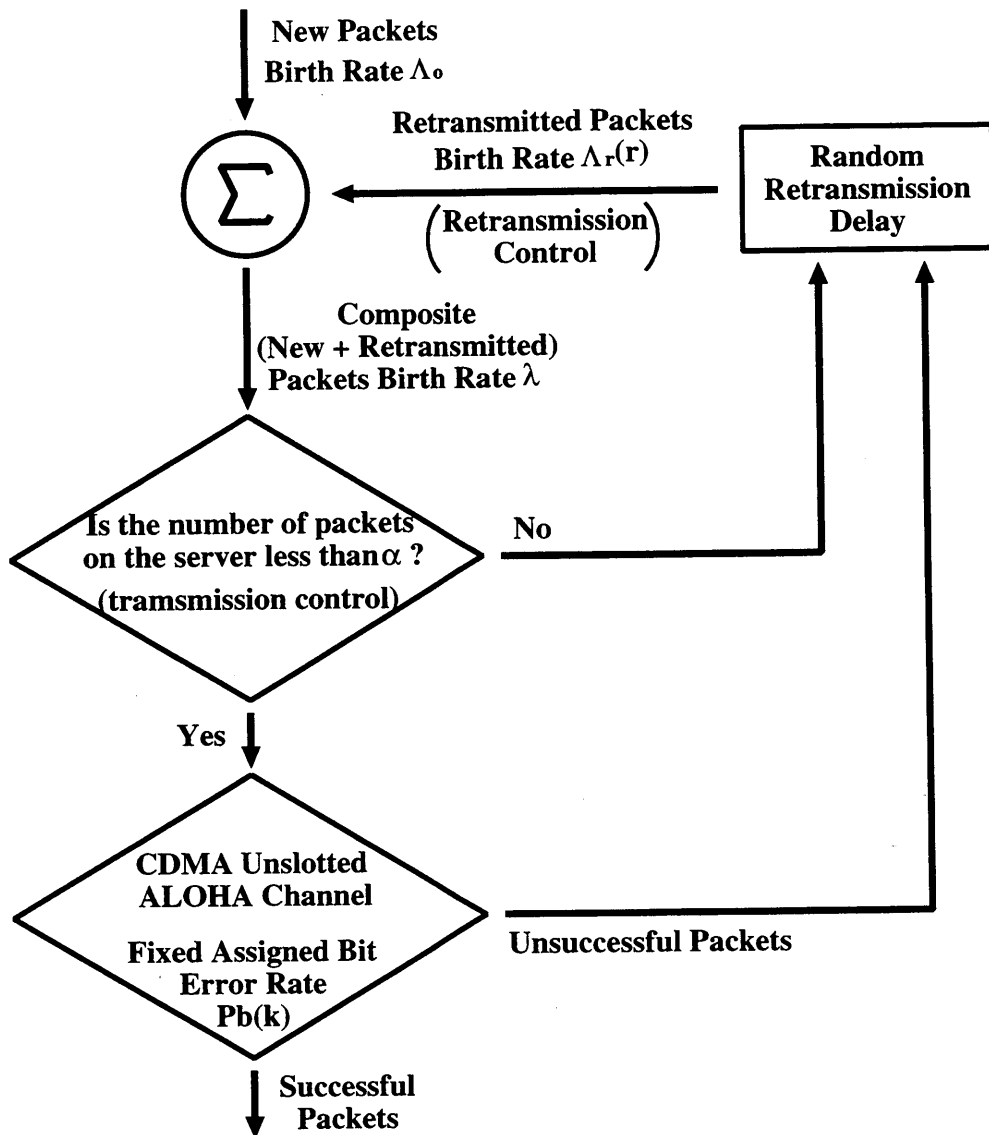


図 4.2: OACP を用いたときのパケットの流れ図



#### 4.3.1 パケットの送信制御 (CLSP)

OACP では CLSP に基づくパケットの送信制御が行われる。これは、同時に伝送されるパケット (新規パケットと再送パケットの両方) の数があるスレッシュホールド  $\alpha$  を超えないようにするアクセス制御方式である。

CLSP では、まずチャンネルロードが観測される。チャンネルロードの観測は、通常中央局で行なう必要がある。これはユーザー側で、伝送中のパケット数を認識することが遠近問題等の理由により困難であるためである。チャンネルロードが  $\alpha$  より小さければ、パケットの送信を新規パケットと再送パケットの両方とも許可し、チャンネルロードが  $\alpha$  以上なら、パケットの送信を新規パケットと再送パケットの両方とも拒否する。この結果を随時各ユーザーに放送して知らせる。ユーザー局では放送される決定結果に従ってパケットの送信を行う。このとき、パケットの送信を拒否されたユーザーは、このパケットを再送するために再送モードに移るものとする。

このようなパケットの送信制御を行うと、チャンネルロードは常にスレッシュホールド  $\alpha$  以下に保たれる。アクセス制御を行わない場合、チャンネルロードが大きくなるとパケットの送信に失敗する確率は高くなってしまい、その影響はそのとき送信されているパケット全てに及んでしまう。これに対しパケットの送信制御を行うと、このような状況を防ぐことができるので、特性の向上を図ることができる。

#### 4.3.2 パケットの再送制御 (ORC)

これまで、CLSP では伝送に失敗したパケットや、パケットの送信制御によって送信を拒否されたパケットは、呼損として扱われてきた。これに対し OACP では、送信に失敗したパケットや、パケットの送信制御によって送信を拒否されたパケットの両方を再送パケットとして扱い、これを制御することにより特性の向

上を図る.

再送パケットは, 再送パケットの生起率  $\Lambda_r(r) (= G_r(r) \cdot R/L)$  に従って送信される. まず, 中央局で状態  $r$  の推定を行う. 状態  $r$  が大きいときは再送モードのユーザーが多い, つまりパケットの成功確率が低いので,  $\Lambda_r(r)$  を小さくすることによって再送されるパケットの数を減らし, パケットの成功確率を高くしてやる. 逆に状態  $r$  が小さいときには新規モードのユーザーが多い, つまりパケットの成功確率が高いので,  $\Lambda_r(r)$  を大きくすることによりより早く再送パケットを処理し, 遅延時間を短くする. このように再送パケットは  $\Lambda_r(r)$  を状態  $r$  に依存して調整することにより制御される. 中央局はこのように調整された  $\Lambda_r(r)$  をユーザー局に放送して知らせる. ユーザー局では生起率  $\Lambda_r(r)$  に従って再送パケットを送信しようとする. このときに, パケットの送信制御を受け, チャンネルロードがスレッシュホールドより小さければ, 再送パケットは送信される. このような操作を行うので, 再送を行うまでの間, 遅延が生じる.

$\Lambda_r(r)$  を期待流動値  $d(r)$  に着目して調整する.  $d(r)$  の値が小さければ小さいほど, より望ましい状態になる. なぜなら,  $d(r)$  を小さくすることによってシステムはより小さい  $r$  に移ろうとし,  $r$  の値が小さいときの状態占有確率が高くなるからである. それゆえ,  $\Lambda_r(r)$  を  $d(r)$  ができる限り小さくなるように調整する. 式 (3.8) より,  $d(r)$  をできる限り小さくするには,  $GQ_S(G)$  をできる限り大きくしてやればよい. ここで,  $GQ_S(G)$  の最大値を与える  $G$  を  $G_{max}$  とすると, 式 (3.2) より次式を満足しなければならない.

$$G_{max} = (1 - r)G_o + rG_r(r) \quad (4.1)$$

従って, 再送パケットのオフアードロード  $G_r(r)$  は,

$$G_r(r) = \begin{cases} \frac{G_{max} - (1-r)G_o}{r} & ; \text{if } r \geq 1 - \frac{G_{max}}{G_o} \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.2)$$

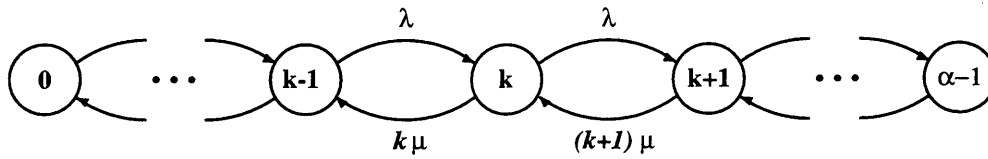


図 4.3: パケットの送信制御を行ったときの干渉パケット数の状態遷移図

となる。ただし、 $G_r(r)$  が負になるときは  $G_r(r) = 0$  (再送を行なわない) とした。

#### 4.4 OACP の特性解析

本節では OACP の特性を解析的に求めていく。4.3.2節で述べたようなパケットの送信制御を行なった場合、チャンネルロードは常に  $\alpha$  以下になるので、システムは待ち行列システムにおける  $M/D/\alpha/\alpha$  に従うことになる [14]。

よって、システムは2.3.2節で述べた指数長近似法を用いることにより、図4.3に示されるような状態遷移図に従うと近似される。

まず、干渉パケット数の定常状態確率  $P_k$  を求める。図4.3の状態遷移図より、システムは出生死滅過程に従う。よって、式 (2.4) より、

$$P_k = \begin{cases} \frac{G^k/k!}{\sum_{j=0}^{\alpha-1} G^j/j!} & ;\text{if } k < \alpha - 1 \\ 0 & ;\text{otherwise} \end{cases} \quad (4.3)$$

となる [25]。

このとき、チャンネルにおける平均トラヒック量を  $G_{sys}$  とすると、これはチャネ

ルロードの平均値として求めることができるので、 $G_{sys}$  は次式のようになる。

$$G_{sys} = \frac{\sum_{j=0}^{\alpha} j \cdot G^j / j!}{\sum_{j=0}^{\alpha} G^j / j!} \quad (4.4)$$

次に、パケットの送信制御を行なったときの  $P_S(k, i)$  を求める。  $P_S(k, i)$  はあるパケットにおいて1ビット目から  $i-1$  ビット目まで成功し、 $i$  ビット目の干渉レベルが  $k$  となる確率である。

(i)  $i = 1$  のとき;

チャネルロードは常に  $\alpha$  以下になるので、定常状態の式 (4.3) より  $P_S(k, i)$  は以下のようになる。

$$P_S(k, i) = \begin{cases} \frac{G^k / k!}{\sum_{j=0}^{\alpha-1} G^j / j!} & ; \text{if } k < \alpha - 1 \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.5)$$

(ii)  $i > 1$  のとき;

状態遷移図4.3より、以下のように  $P_S(k, i)$  が得られる。

(a)  $k < \alpha - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, i) &= P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t - \lambda\Delta t\} \cdot \{1 - P_b(k)\} \\ &\quad + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \cdot \{1 - P_b(k+1)\} \\ &\quad + P_S(k-1, i-1) \cdot \lambda\Delta t \cdot \{1 - P_b(k-1)\} \end{aligned} \quad (4.6-a)$$

(b)  $k = \alpha - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, i) &= P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t\} \cdot \{1 - P_b(k)\} \\ &\quad + P_S(k-1, i-1) \cdot \lambda\Delta t \cdot \{1 - P_b(k-1)\} \end{aligned} \quad (4.6-b)$$

(c)  $k > \alpha - 1$  のとき

$$P_S(k, i) = 0 \quad (4.6-c)$$

この  $P_S(k, i)$  を用いて, パケット成功確率  $Q_S(G)$  は

$$Q_S(G) = \frac{G_{sys}}{G} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \cdot (1 - P_b(k)) \quad (4.7)$$

となる.

状態占有確率  $\pi(r)$  は, 式 (3.3) において  $\Lambda_r$  を  $\Lambda_r(r)$  と置き換えることにより得られるので,

$$\begin{aligned} \pi(r) = & \{1 - (r - \Delta r)\} \Lambda_o \Delta t \cdot (1 - Q_S(G)) \cdot \pi(r - \Delta r) \\ & + \{1 - (1 - r) \Lambda_o \Delta t \cdot (1 - Q_S(G)) - r \Lambda_r(r) \Delta t \cdot Q_S(G)\} \cdot \pi(r) \\ & + (r + \Delta r) \Lambda_r(r + \Delta r) \Delta t \cdot Q_S(G) \cdot \pi(r + \Delta r) \end{aligned} \quad (4.8)$$

となる.

したがって, OACP を用いたときのスループットは, 式 (3.4) において,  $G_r$  を  $G_r(r)$  と置き換えることにより得られるので,

$$S(G_o) = \int_0^1 \{(1 - r) G_o + r G_r(r)\} \cdot Q_S((1 - r) G_o + r G_r(r)) \cdot \pi(r) dr \quad (4.9)$$

となる.

次に遅延特性を求める. OACP を用いたときのパケットの再送過程を図4.4に示す. この図に示されるような再送過程において, 送信が拒否されることによって生じる遅延時間を  $\Delta_1$ , パケットの伝送に失敗したことに生じる遅延時間を  $\Delta_2$  とすると,  $\Delta_1, \Delta_2$  は,

$$\Delta_1 = K \frac{T_p}{G_r(r)} \quad (4.10)$$

$$\Delta_2 = \Delta_1 + T_p + T_D \quad (4.11)$$

と表される.

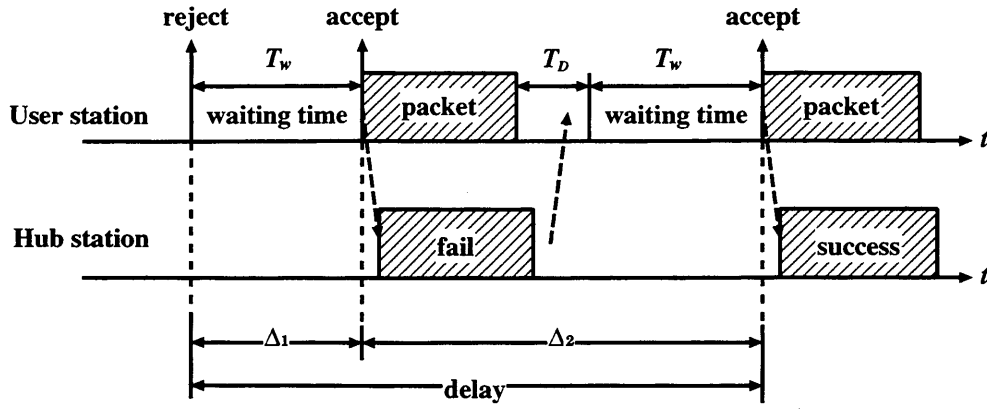


図 4.4: OACP を用いたときのパケットの再送過程

ここで、チャネルロードがスレッシュヨルド以上であるためにパケットが拒否される確率を  $Q_R(G)$ 、パケットの伝送に失敗する確率を  $Q_F(G)$  とすると、

$$Q_R(G) = \frac{G^\alpha / \alpha!}{\sum_{j=0}^{\infty} G^j / j!} \quad (4.12)$$

$$Q_F(G) = 1 - Q_R(G) - Q_S(G) \quad (4.13)$$

となる。これらを用いて遅延特性は次式のように表される。

$$D(G_o) = \int_0^1 D_C((1-r)G_o + rG_r) \cdot \pi(r) dr \quad (4.14)$$

ただし、 $D_C(G)$  はオフアードロードが  $G$  であるときの遅延時間であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} D_C(G) &= \frac{1}{T_p} \{ 0 \cdot Q_S(G) + \Delta_1 Q_R(G) Q_S(G) + \Delta_2 Q_F(G) Q_S(G) \\ &\quad + 2\Delta_1 Q_R^2(G) Q_S(G) + 2(\Delta_1 + \Delta_2) Q_R(G) Q_F(G) Q_S(G) \\ &\quad + 2\Delta_2 Q_F^2(G) Q_S(G) + \dots \} \\ &= \frac{1}{T_p} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \{ m\Delta_1 + (n-m)\Delta_2 \} \end{aligned}$$

$$\cdot Q_R^m(G) Q_F^{n-m}(G) Q_S(G) \quad (4.15)$$

## 4.5 OACP を実現するための課題と解決策

実際に OACP を行うためには、次の課題を解決しなければならない。スレッシュヨルド  $\alpha$  の値に従ってパケットの送信は制御されるので、スレッシュヨルド  $\alpha$  を決める必要がある。また、スループットが最大になるときのオフアードロード  $G_{max}$  と状態  $r$  の値に応じてパケットの再送制御を行うので、 $G_{max}$  の決定と状態  $r$  の推定を行う必要がある。

そこで、本節ではこれらの課題の解決策について述べる。

### 4.5.1 パラメータの決定と CDMA パケット無線通信におけるスループット特性の上限

スレッシュヨルド  $\alpha$  と  $G_{max}$  は、CDMA パケット無線通信におけるスループット特性の上限値を示すことにより決定する。

CDMA パケット無線通信におけるスループット特性の上限値  $S_{opt}$  は、発生した全てのパケットが成功することを示しているので、 $S_{opt} = G_o$  であると言える。しかし、現実的には同時に送ることのできるパケットの数に上限が存在する。そのため、スループット特性はある最大値をとらなければならない。この値を  $S_u$  とすると、スループット特性の各トラヒック状態での最適値  $S_{opt}$  は  $G_o$  が小さいところでは傾斜 1 で直線的に増加し、最大値  $S_u$  を得た後、その値を維持し続けるものである。つまり、 $S_{opt}$  は、

$$S_{opt} = \begin{cases} G_o & ; \text{if } G_o \leq S_{max} \\ S_u & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.16)$$

と示される。

それでは  $S_u$  の値だが、以下のように求めることができる。スループットが最大となるためには、同時送信局数が一定、かつこのときのスループットの値が最大にならなければならない。なぜなら、ある着目するパケットの存在期間中において同時送信局数がスループットを最大とする値より大きくなったり小さくなったりすると、その分だけスループット特性は悪くなるからである。今、同時送信局数が常に  $m$  であるとする、このときのスループットは  $m \cdot \{1 - P_b(m-1)\}^L$  となるので、 $S_u$  の値は

$$S_u = \max_m [m \cdot \{1 - P_b(m-1)\}^L] \quad (4.17)$$

となる。

$\alpha$  と  $G_{max}$  は以下のように決めることができる。式 (4.17) の  $m \cdot \{1 - P_b(m-1)\}^L$  は、CLSP において、オフロード  $G$  を無限大にしたときのスループット特性  $S_{G \rightarrow \infty} = \alpha \cdot \{1 - P_b(\alpha-1)\}^L$  と一致する [14]。このことは以下のように説明できる。CLSP では、 $G$  が大きくなればなるほどある時刻における同時送信局数が  $\alpha$  である確率は高くなる。そして、 $G$  を無限大に近づけたとき、同時送信局数は常に  $\alpha$  になる。よって、 $S_{G \rightarrow \infty}$  が最大となるように  $\alpha$  を選ばばよいことになる。

ところで、パケットの送信制御を行うシステムは、アクセス制御遅延による影響を受ける (6.3節参照)。アクセス制御遅延とは、パケットの伝搬や、処理時間によって生じる遅延のことである。パケットの送信制御を行う場合、中央局がチャネルロードを観測してからユーザー局でアクセス制御が行われるまでにこのような遅延が生じるので、制御に関する情報がそれだけ過去の物となり、特性に影響を与える。オフロードが大きくなるとパケットの発生確率が高くなるので、よりアクセス制御遅延による影響を受けやすくなると考えられる。そのためアクセス制御遅延による影響を無視できない場合、オフロードが大きくなると特性が劣化し、スループット特性は上に凸のグラフになる。



次にアクセス制御遅延存在下でのパケットの再送制御を考えてみる。パケットの再送制御を行うことにより、システムのおファードロード  $G$  を常に  $G_{max}$  の値に保つことができ、おファードロードが大きいところでもスループットの劣化が生じなくなると予想される。このため、本論文で提案する再送パケットの制御が非常に有効になると考えられる。

#### 4.5.2 状態 $r$ の推定

状態  $r$  の推定は、以下のように行う。各ユーザー局は、新規モードから再送モード、再送モードから新規モードといったモードの変化が起こったとき、その情報を別チャンネルで中央局に送る。中央局ではこの情報を受け取り、モードの変化に応じて状態  $r$  の推定を行う。

ところで、状態  $r$  の推定誤差はどの程度まで許容されるのだろうか。パケットの再送制御は、システム全体のおファードロード  $G$  を常に  $G_{max}$  の値になるように再送パケットの発生割合を調整している。状態  $r$  の推定が正しくないと  $G$  が  $G_{max}$  の値とは少し異なってしまうことになる。ただ、スループットが最大値をとる付近では、 $G$  に対するスループットの変化量は小さいので、状態  $r$  の推定誤差が多少あったとしてもスループット特性はあまり劣化しないものと考えられる。

### 4.6 数値例

本章では、アクセス制御遅延が非常に小さい場合について数値例を示す。各パラメータの値は、 $N = 31$ ,  $L = 1000$  [bits],  $K = 1000$ ,  $E_b/N_0 = \infty$  としている。この条件の下では、4.5.1節で述べた方法により、最適なスレッシュホールド  $\alpha$  は7になる。また、 $G_{max}$  が100となる程度のアクセス制御遅延があるものとする。

図4.5および図4.6にOACPを用いた場合のスループット特性および遅延特性

を示す。シミュレーション結果もこの図にプロットしてある。この図において、解析結果とシミュレーション結果が一致していることがわかる。

パケットの送信制御のみを行ったとき、スループットの最大値はOACPを用いた場合とほぼ同じであり、アクセス制御を行わなかった場合と比べて、およそ1.5倍になっていることがわかる。しかし、スループット特性はオフロードに対して徐々に増加している。遅延特性は新規パケットのオフロード $G_o$ が増加するにつれ、ゆっくりと増加している。 $G_o$ が小さいところではアクセス制御を行わなかった場合とほぼ同じだが、 $G_o$ が大きいところでは特性がよくなっている。

パケットの再送制御のみを行った場合では、スループット特性は直線的に増加し、一度最大値をとった後、その値を維持し続ける。これは、パケットの再送制御を行うことにより、全体のオフロードをスループットが最大となるように維持し続けるためである。しかし、パケットの送信制御を行っていないので、その値はアクセス制御を行わなかった場合と同じである。また、遅延特性は $G_o$ が4くらいまでは低い値を維持し続けるが、4を超えると急激に増加する。

OACPを用いたとき、スループットの最大値はアクセス制御を行わなかった場合と比べておよそ1.5倍になっている。また、スループット特性は直線的に増加し、ある値を維持し続けている。遅延特性は $G_r$ が6くらいまで低い値を維持し続けるが、6を超えると徐々に増加していくことがわかる。また他の場合と比べ、 $G_o$ が大きい所での遅延特性はかなり改善されている。このことは、次のように説明できる。パケットの送信制御を行うと、チャンネルロードはスレッシュホールド以下に制限される。しかし、スループット特性を良くするためには、同時送信局数がスレッシュホールドを維持し続けた方がよい。そこで、再送パケットの制御を行い、結果としてチャンネルロードがスレッシュホールドを維持し続けるよう、チャンネル容量の空いているところに再送パケットを送っている。このため、チャンネルロードはス

レッシュヨルドを維持し続け、スループット特性は最大値を維持し続けることになる。また、CDMA パケット無線通信のスループットの上限と比較してみると、ほぼ一致していることがわかる。つまり、OACP を用いた場合はスループット特性に関して最適であると言える。

図4.7に  $N = 31$ ,  $L = 1000$  [bits],  $K = 1000$ ,  $E_b/N_0 = \infty$  のときの期待流動値  $d(r)$  と状態占有確率  $\pi(r)$  と Expected Flow を示す。図4.7(a) に示されるような  $G_0 = 5.12$  の場合、アクセス制御を行わない場合 (図3.6) と比較すると、パケットの再送制御が行われているので、制御を行っていない場合と比べて  $d(r)$  がより小さい値をとっていることがわかる。それゆえ、平衡状態はより小さな状態  $r$  に存在している。つまり、再送状態のユーザーが少なくなるため、より望ましいと言える。  $G_0 = 10$  の場合 (図4.7(b)) についても、新規パケットのオフアードロードが大きくなったにもかかわらず、比較的状态  $r$  の小さいところで平衡状態をとっている。また、図4.7(c),(d) より、Expected Flow  $GQ_S(G)$  はほぼ一定値を保ち続けていることがわかる。これは、パケットの再送制御を行うことにより、全体のオフアードロードをスループットが最大となる値に維持し続けるためである。期待流動値が0となるのは、 $GQ_S(G)$  と  $(1-r)G_0$  の値が等しくなるときであり、 $(1-r)G_0$  はあきらかに状態  $r$  に関して直線的に減少し、また  $GQ_S(G)$  もほぼ一定になるので、期待流動値が0となるのは1点しか存在しない。よって、平衡状態は1つしか存在しないことになり、bi-stable な状態にはならない。

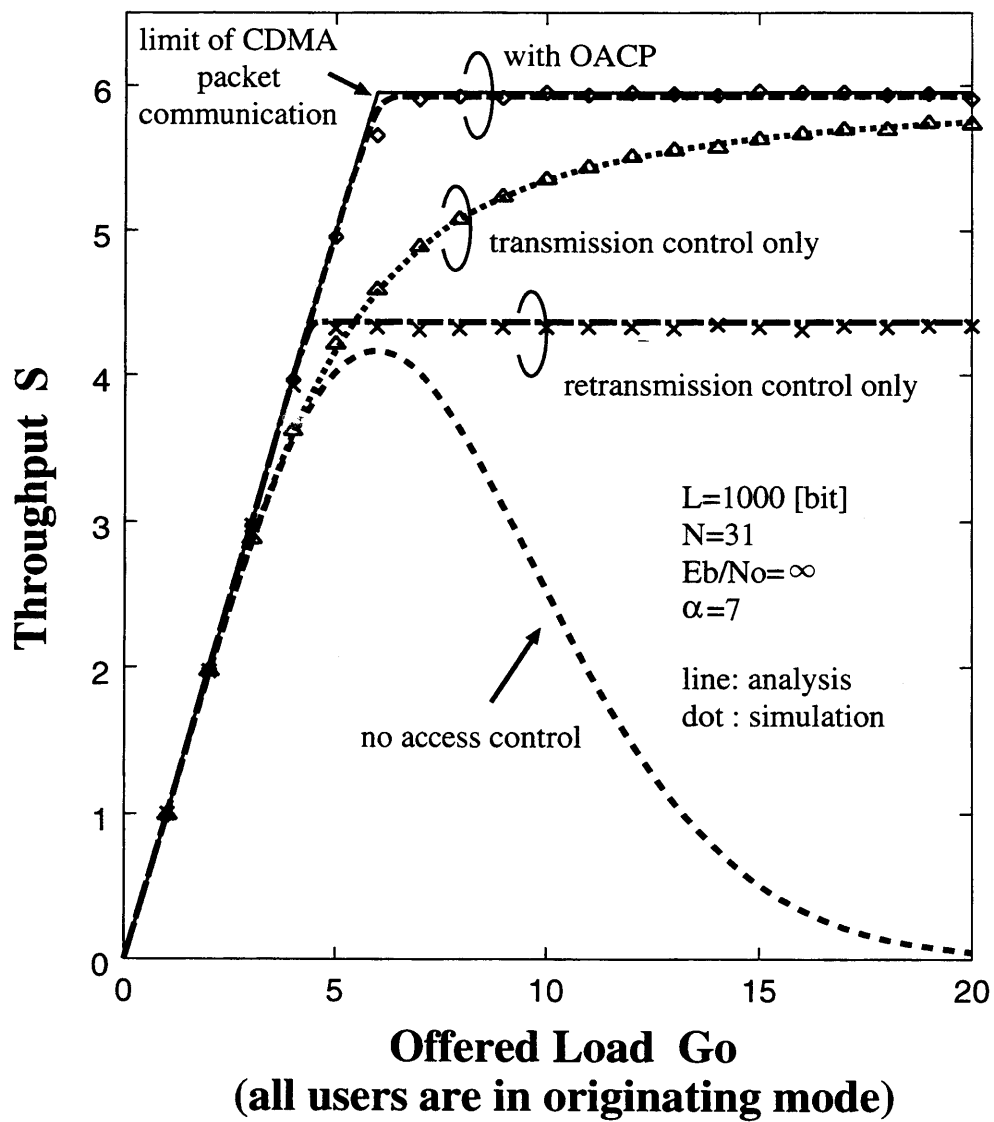


図 4.5: アクセス制御を行ったときのスループット特性

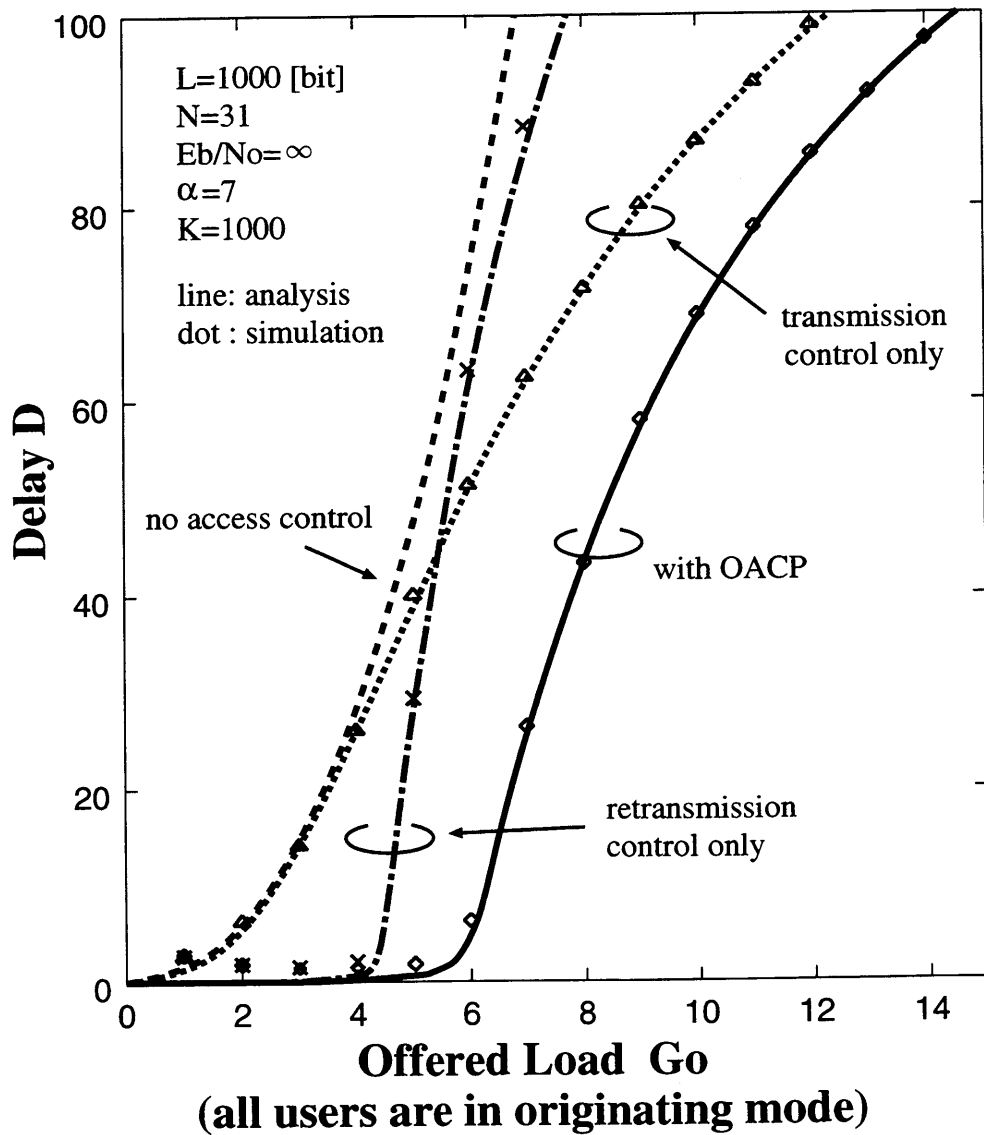


図 4.6: アクセス制御を行ったときの遅延特性

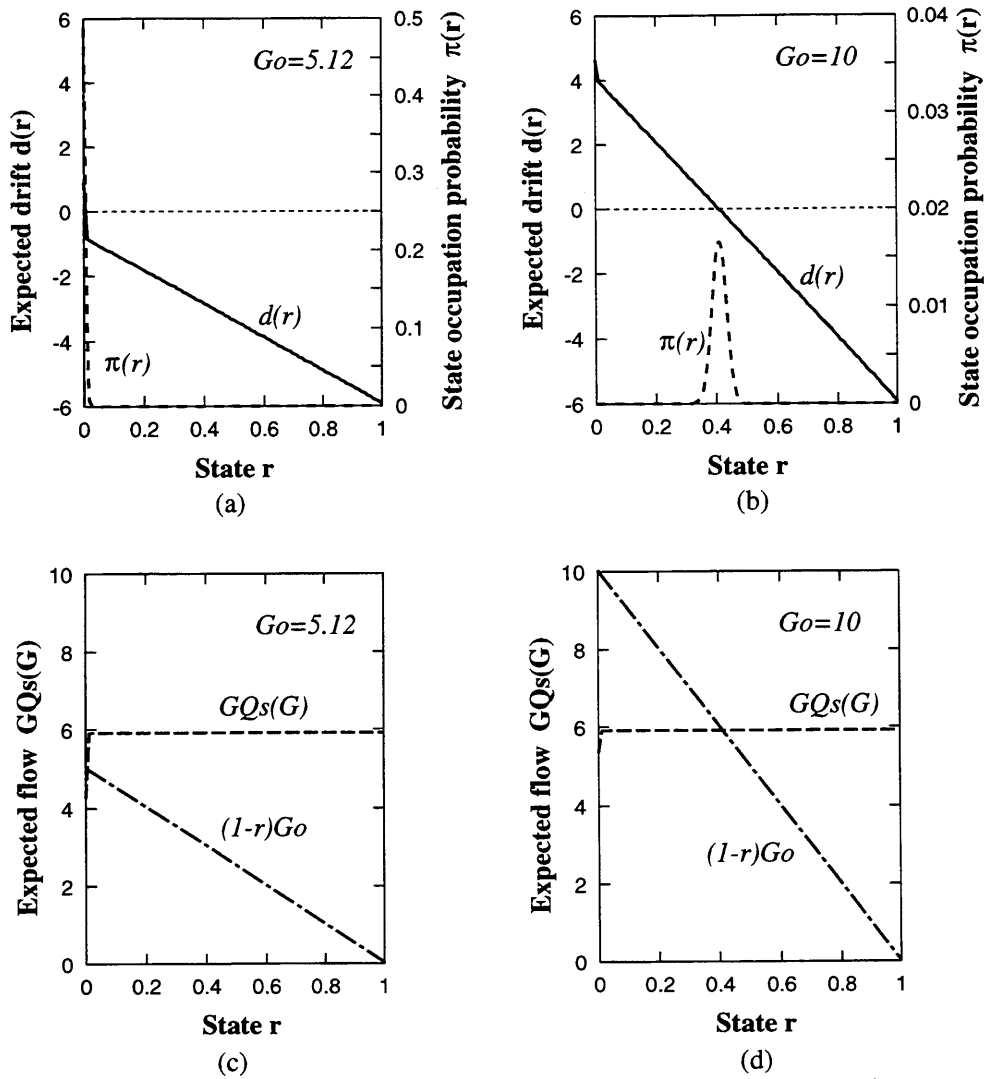


図 4.7: OACP を用いたときの期待流動値と状態占有確率と Expected Flow

## 4.7 まとめ

本章では、パケットの送信制御と再送制御の両方を行う OACP を提案し、これを用いたときの特性評価を行った。OACP を用いたとき、パケットの送信制御を行なった場合とパケットの再送制御を行なった場合の両方の性質を持っており、このため最もスループット特性が良くなり、遅延特性も向上していることがわかった。そして、OACP を用いたシステムが CDMA パケット通信において、スループット特性を最適にすることを示した。

また、OACP を用いたシステムの安定性についても調べ、bi-stable な状態にならないことを示した。

## 第 5 章

### アクセス制御遅延の影響

#### 5.1 はじめに

これまで述べてきたように、アロハ方式にスペクトル拡散技術を適用した CDMA Unslotted ALOHA 方式 (CDMA U-ALOHA) は耐干渉性, 秘話性, CDMA が可能などの利点を有し大変魅力的な方式である。

この CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性向上を図るアクセス方式として, チャンネルロードセンシングプロトコル (Channel Load Sensing Protocol : CLSP) の検討がされている [8], [14], [18], [26]. CLSP とは, アロハ方式のスループット特性向上手法として知られるキャリアセンシングプロトコル (Carrier Sensing Protocol : CSP) と同様に, パケット送信をする際チャンネル使用状況を観測し, その結果に基づいてパケット送信を制御するプロトコルである. アロハ方式では同時に複数個のパケットを伝送することができないので, CSP は伝送中のパケットの有無に応じて, パケット送信の制御を行なう. 一方, CDMA U-ALOHA 方式では複数個のパケットを同時に伝送できるため, CLSP は伝送中のパケット数 (チャンネルロードと呼ぶ) が, 定められたスレッシュホールド  $\alpha$  よりも小さければパケット送信を行ない,  $\alpha$  以上であれば送信を控える.



CLSP ではチャネル使用状況の観測は、通常基地局で行なう必要がある。これはユーザ側で、伝送中のパケット数を認識することが、遠近問題等の理由により困難であるためである。基地局ではチャネル使用状況の変化にともない、パケット送信の許可及び拒否を決定し、その結果を随時ユーザに知らせる。ユーザは、送られてくる決定結果に従ってパケット送信を行なう。この決定結果は全てのユーザに等しく送られるものであり、特定のユーザに対して個別に送られるものではない。そのため、CLSP はデマンドアサインメント方式のように回線割り当てのための専用回線を必要としないプロトコルである。しかしながら、基地局で知ることのできるチャネルロードは、ユーザがパケット送信を開始してから基地局に伝わるまでの伝搬時間や、その値を認識するために必要な時間だけ過去の値となる。さらに、その値に基づいて、ユーザ側でパケット送信が制御されるまでにも、処理や伝搬による時間遅れが生じてしまう。ここでは、ユーザがパケット送信を開始してから、パケット送信を制御するまでの時間遅れのことをアクセス制御遅延、 $T_D$ 、と呼ぶことにする。このアクセス制御遅延のため、単純な CLSP では、パケットを送信したい時刻よりも  $T_D$  前のチャネルロードに基づきパケット送信が制御されることになる。したがって、送信したい時刻のチャネルロードが  $\alpha$  未満であってもパケット送信を拒否されたり、 $\alpha$  以上であるにもかかわらずパケット送信を許可したりするため、スループット特性は劣化してしまうと考えられる。このような状態は伝搬時間の長い衛星通信では特に顕著となると思われる。

本章では CDMA U-ALOHA 方式において、アクセス制御遅延のスループット特性に及ぼす影響を解析的に明らかにする。

## 5.2 システムモデル

各ユーザーは固有に割り当てられた拡散符号（ランダムシグナチャーシーケンス）を用いてパケットを直接拡散する。（以降パケットとはスペクトル拡散されたものとする）中央局からの制御信号をもとにパケットを1ホップで中央局に送信する。図??にシステムモデルを示す。さらに次のような仮定を行なう。

- ユーザー数は無限大である。
- パケット長は固定長 ( $L$  ビット)。
- パケットは再呼を含めて平均到着率  $\lambda$  (パケット/秒) でポアソン生起する。
- パケット長  $L$  当たりのパケット平均到着数  $G$  を  $G = \lambda \frac{L}{R}$  とする。（ただし,  $R$ [ビット/時間] はデータレート）
- スループットは1パケット長時間に送信に成功するパケット数とする。
- 各パケットは全て等しい電力で受信される。
- ランダムシグナチャーに対するビット誤り率  $P_b(k)$  は, スタンダードガウシアン近似により得られるものを用いる [27].

$$P_b(k) = Q\left[\left(\frac{k}{3N} + \frac{N_0}{2E_b}\right)^{-0.5}\right] \quad (5.1)$$

ただし,  $k$  は干渉パケット数,  $N$  は拡散率,  $E_b/N_0$  はパケット1ビット当たりの受信電力対熱雑音の比を表す。また,  $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$ 。

- 誤り訂正符号は用いない。よって1ビットでも誤りがあるとそのパケットは正しく伝送されない。

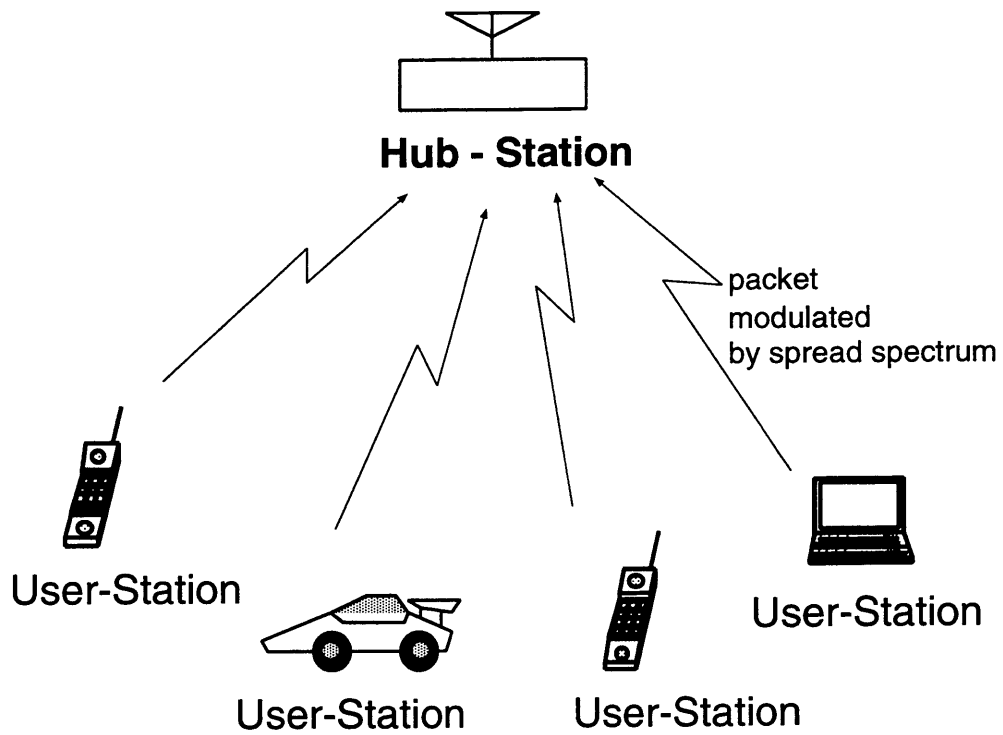


図 5.1: システムモデル

- 同時送信局数の遷移はビットごとに起こるものとする。つまり各ビット内では同時送信局数は一定であるものとする。
- アクセス制御遅延はユーザー全て等しいものとする。

## 5.3 スループット解析

### 5.3.1 アクセス制御遅延

CLSP のシステムにおいて基地局で知ることのできるチャンネルロードは、ユーザーがパケット送信を開始してから基地局に伝わるまでの伝搬時間や、その値を認識するために必要な時間だけ過去の値となる。さらに、その値に基づいて、ユーザ

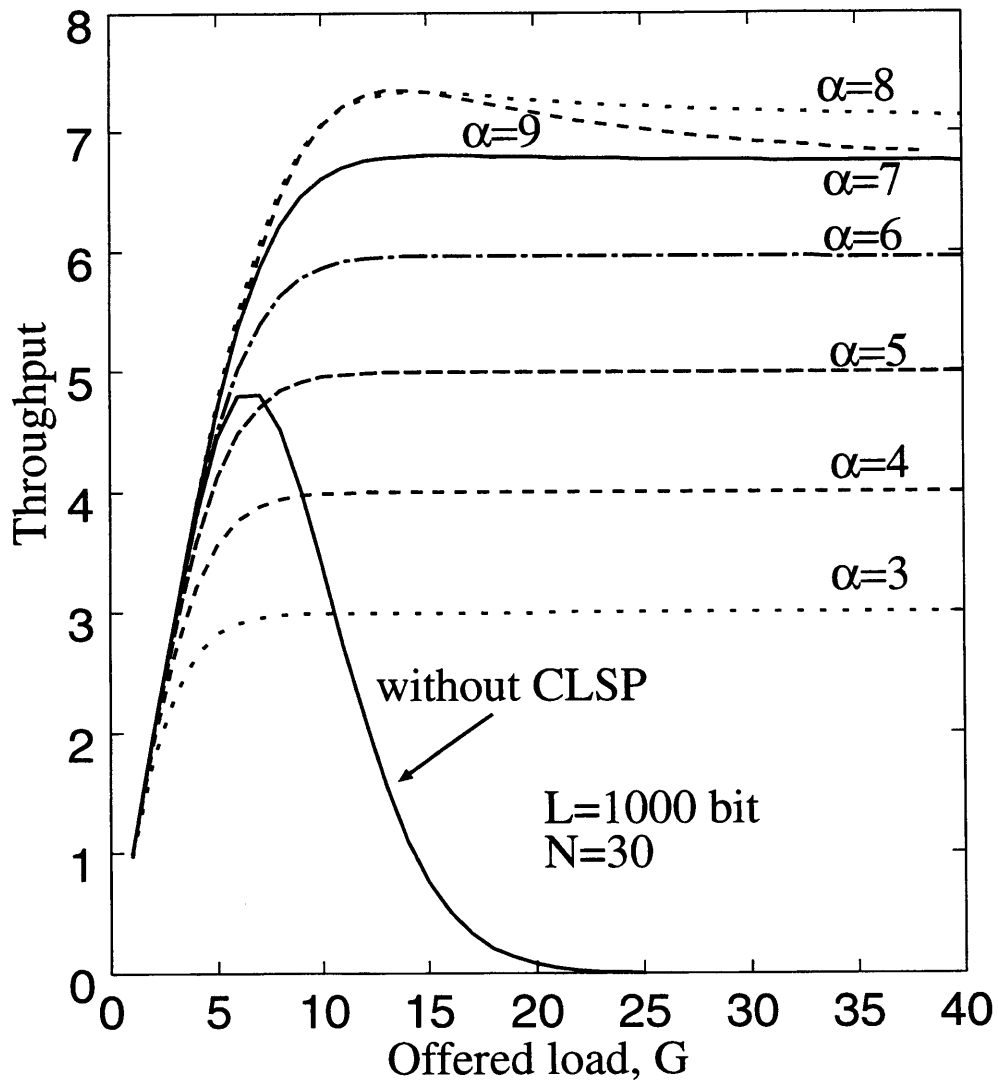


図 5.2: CLSP を用いた Spread Aloha(理想状態)

側でパケット送信が制御されるまでも、処理や伝搬による時間遅れが生じてしまう。この過程における遅延時間をアクセス制御遅延という(図5.3)。アクセス制御遅延がないと仮定した場合の特性[14]を図5.2に示す。 $L=1000$  ビット、拡散率  $N=30$  とした。CLSP を用いると、スループットは特にオフロードの高いところで飛躍的に増大する。ところが実際のシステムではアクセス制御遅延が存在しこの遅延がスループットに影響を及ぼすものと考えられる。

遅延時間を考慮するため、疑似パケット(以降 F-パケットと示す)を定義する。これは、パケット(以降 T-パケット)長にアクセス制御遅延時間  $T_D$  をたしあわせた長さ( $T = T_P + T_D$ )を持つパケットである(図5.4)。各ユーザーがこのパケットを送出していることにすれば、中央局によるパケット発生の制御が遅延に関係なくリアルタイムで行われると考えることができる。

### 5.3.2 システム内オフロード

$T_D = 0$  の場合の CLSP におけるパケットの到着は待ち行列システムにおける  $M/D/\alpha/\alpha$  [25] に従う。ところが遅延を考慮した場合、パケットはスレシヨルド  $\alpha$  に関係なく到着し到着パケット数は  $\alpha$  を越えてしまう可能性がでてくるため  $M/D/\alpha/\alpha$  はくずれてしまうと考えられる。

F-パケット(白部分+斜線部分)が到着する状況を図5.5に示す。スレシヨルドを  $\alpha=3$  とする。 $t=t_1$  における T-パケット(白部分)の個数は、2個である。中央局はこのパケットの個数を認識し、 $\alpha$  より小さいので、送信許可の制御信号を全ユーザーに送る。一方、F-パケットの個数は4個となっている。従って、F-パケットに対するスレシヨルドは T-パケットのそれよりも大きくなると考えられる。そこで、F-パケットに対する新たなスレシヨルド  $\gamma$  を定める。そして、F-パケットの到着が  $M/D/\gamma/\gamma$  に従うものと仮定する。ただし、 $\gamma=\alpha+n$  で、 $n$  はスレシヨルドの増加分でアクセス制御遅延時間とオフロードに依存する値と

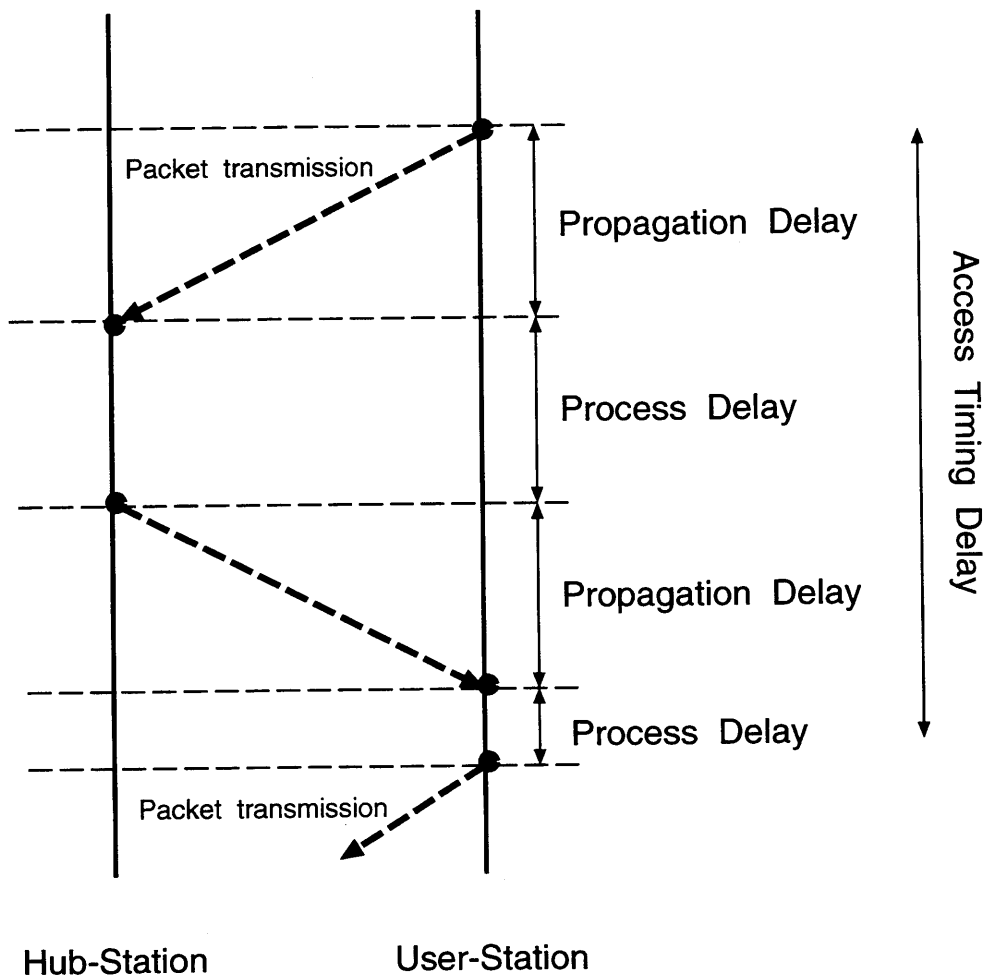


図 5.3: アクセス制御遅延

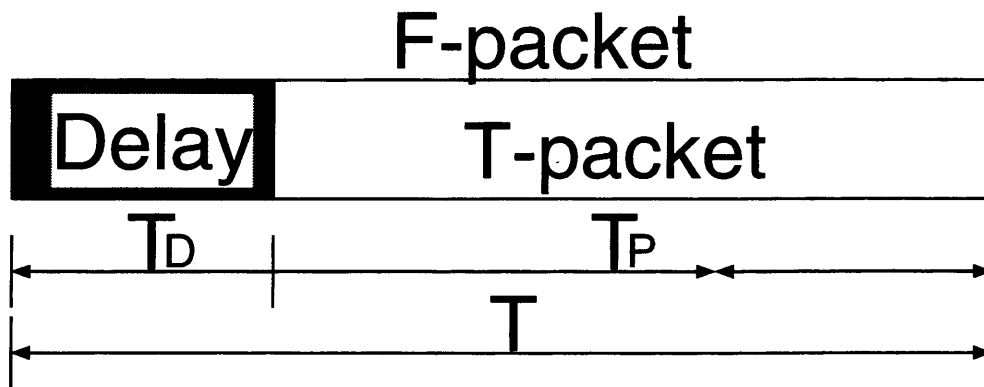


図 5.4: 疑似パケット

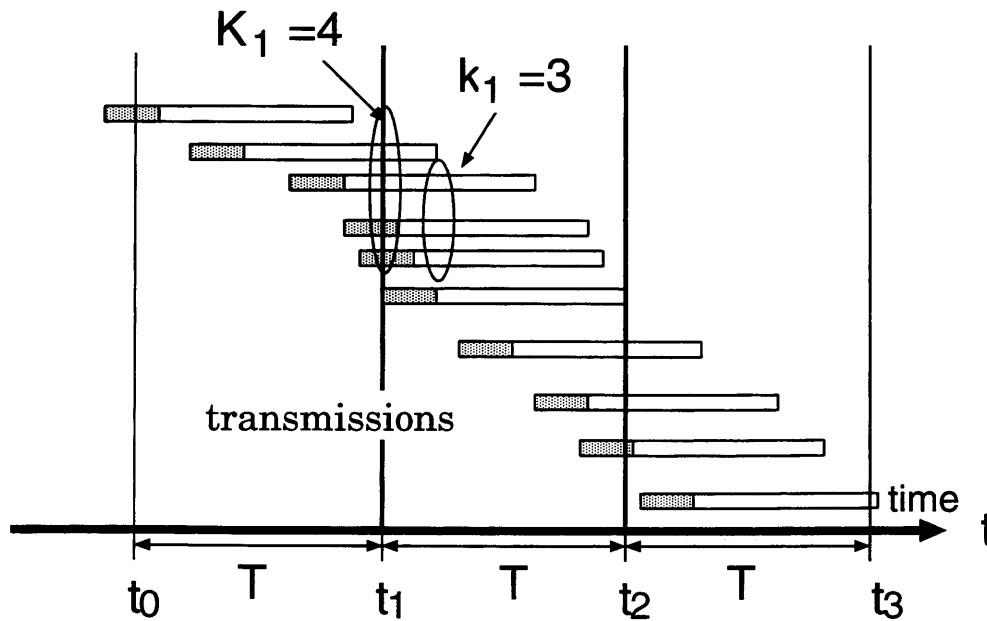


図 5.5: パケットの到着

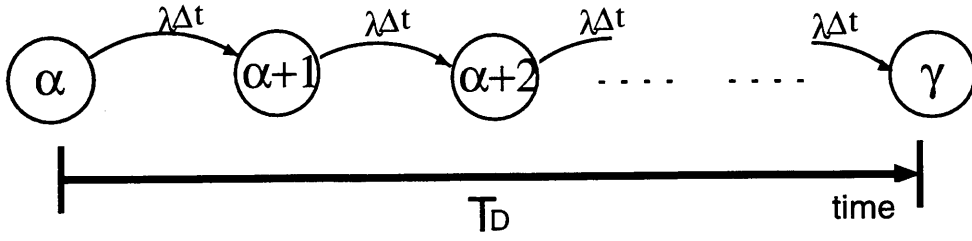


図 5.6: スレシヨルドの増加

なる.  $n$  は時区間  $T_D$  に発生するパケット数とみなせるので, 出生率  $G/L$  の純出生過程 (図5.6) に対する定常確率で与えられる.

$$P_n = \frac{G \frac{T_D}{T}^n}{n!} e^{-G \frac{T_D}{T}} \quad (5.2)$$

となる. さらに, スレシヨルド増加が  $n$  の時, F-パケットに対するシステム内オフアドロード ( $G_{sys-n}$  とする) は  $M/D/\gamma/\gamma$  の定常確率より次のように与えられる.

$$G_{sys-n} = \frac{\sum_{j=0}^{\alpha+n} j \cdot \frac{(\lambda T)^j}{j!}}{\sum_{i=0}^{\alpha+n} \frac{\lambda T^i}{i!} e^{-\lambda T}} \quad (5.3)$$

$G_{sys-n}$  を  $P_n$  で平均化すると平均 F-パケット長時間,  $T_P$  のシステム内オフアドロードは次のようになる.

$$G_{sys} = \sum_{n=0}^{\infty} G_{sys-n} P_n \quad (5.4)$$

ここで T-パケット長時間,  $T_P$  当りのシステム内オフアドロード ( $G_{sys}$  とする) は次のようになる.

$$G_{sys} = \frac{T_P}{T} \sum_{n=0}^{\infty} G_{sys-n} P_n \quad (5.5)$$



オフロード \$G\$ に対する \$G\_{sys}\$ の特性を \$\tau\$ をパラメータとして図5.7に示す。 \$\tau = 0.01\$ の時, \$\tau = 0.0\$ の特性とほとんどかわらない。 \$\tau\$ を増加させていくに従って, オフロードの高いところ (\$G > 10\$) でどんどん増加していくことがわかる。

### 5.3.3 遷移率

図5.5において, 着目 F- パケットの頭の部分の干渉パケット数 (\$K\_1\$ とする) は, F- パケットの到着が \$M/D/\gamma/\gamma\$ に従うことから次の定常確率で与えられる。

$$P_F(K_1) = \frac{\frac{(\lambda T_F)^{K_1}}{K_1!}}{\sum_{K_1=0}^{\infty} \frac{(\lambda T_F)^{K_1}}{K_1!}} \quad (5.6)$$

これらの \$K\_1\$ 個のパケットは着目 F- パケット時間内ですべて終わる。 さらに \$K\_1\$ のうちいくつかのパケットは着目パケットの斜線部分で終了してしまう。 よって着目 T- パケット 1 ビット目の干渉パケット数 (\$k\_1\$ とする) は \$K\_1\$ 個のうち \$k\_1\$ 個が時区間 \$T\_T\$ に入る確率, 二項分布を用いて次の式で与えられる。

$$P_T(k_1|K_1) = {}_2C_1 \left(\frac{T_T}{T_F}\right)^{k_1} \left(\frac{T_D}{T_F}\right)^{K_1-k_1} \quad (5.7)$$

\$P\_F(K\_1)\$ を用いると, 着目 T- パケット 1 ビット目の干渉パケット数が \$k\_1\$ であるという定常確率 \$P\_T(k\_1)\$ は, 次のようになる。

$$P_T(k_1) = \sum_{K_1}^{\infty} P_T(k_1|K_1)P_F(K_1) \quad (5.8)$$

\$k\_1\$ を用いると着目パケット内の終了率は次のように与えられる [?].

$$\mu(k_1)\Delta t = \frac{k_1}{L} \quad (5.9)$$

また, パケットはポアソン生起するので発生率は次のようになる。

$$\lambda\Delta t = \frac{G}{L} \quad (5.10)$$

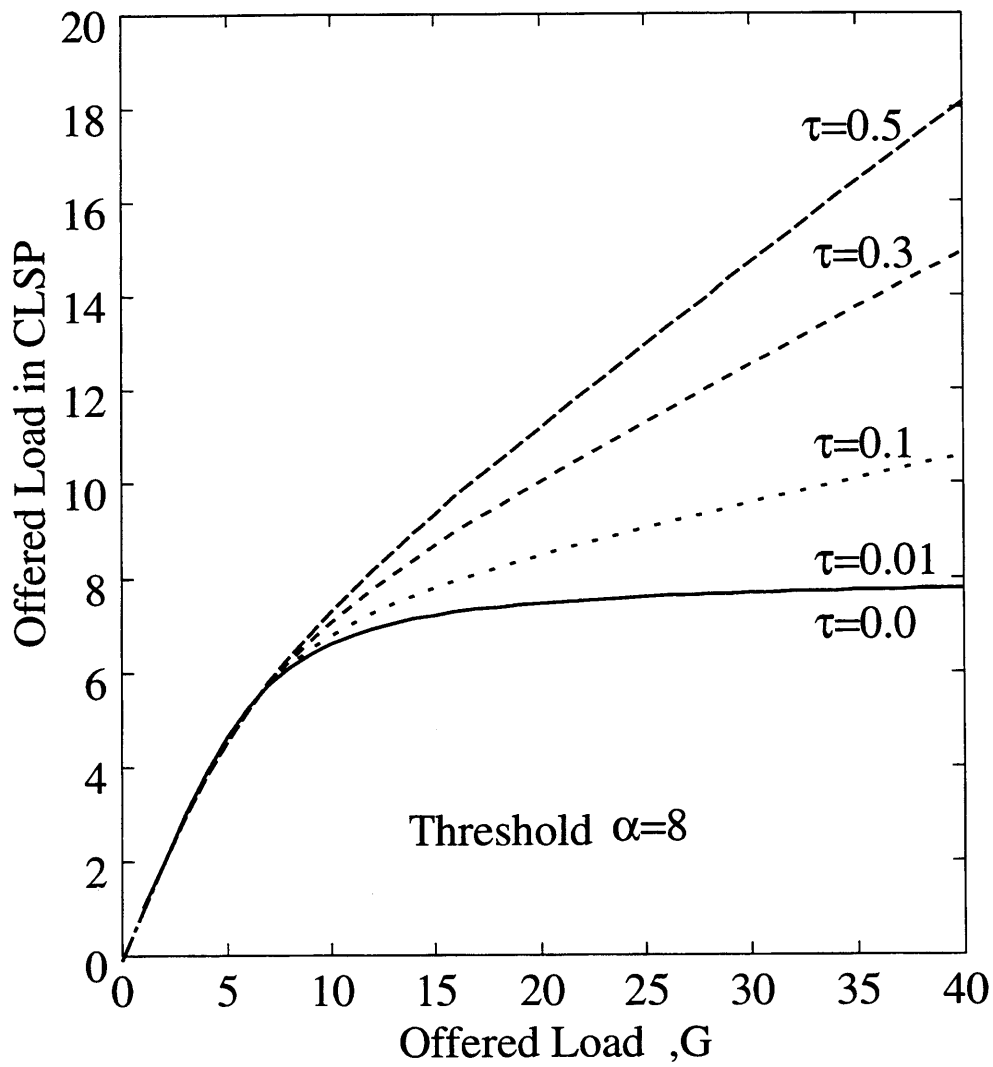


図 5.7: システム内オフロードロード

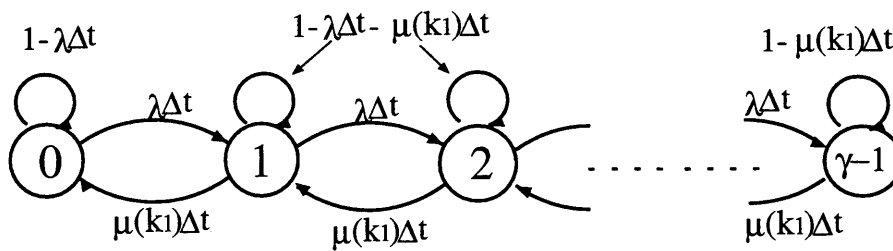


図 5.8: 干渉レベルの状態遷移図 (CLSP の場合)

### 5.3.4 スループット解析

図5.8に同時送信局数の状態遷移図を示す.

確率  $P_C(k, i | k_1, K_1)$  を定義する. 着目 F- パケットの頭の部分の干渉パケット数が  $K_1$  で着目 T- パケットの 1 ビット目の干渉パケット数が  $k_1$  の時,  $i - 1$  ビットまでが成功し, さらに  $i$  ビット目の干渉パケット数が  $k$  である確率である.

$i = 1$  の時

$k_1 < \gamma - 1$  の時

すなわち着目パケット 1 ビット目の干渉パケット数が  $\gamma - 1$  個以下の時までは CLSP の制御は受けないので確率 (5.7) より得られる.

$$P_C(k = k_1, i = 1 | k_1 < \gamma - 1, K_1) = P_T(k_1 | K_1) P_F(K_1) \quad (5.11)$$

$k_1 \geq \gamma - 1$  の時

すなわち, 着目パケット 1 ビット目の干渉パケット数が  $\gamma - 1$  個より大きくなってしまうことはない. よって,

$$P_C(k, i | k_1 > \gamma - 1, K_1) = 0 \quad (5.12)$$

$i > 1$  の時

図5.8の状態遷移図から求められる.  $k < \gamma - 1$  の時, 干渉パケット数は  $\gamma - 1$  より小さいので, 発生率  $\lambda \Delta t$ , 終了率  $\mu(k_1) \Delta t$  の遷移を行なう. よって次式が得られる.

$$P_C(k < \gamma - 1, i | k_1, K_1) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_C(k, i-1 | k_1, K_1) \cdot \{1 - \mu(k_1)\Delta t - \lambda\Delta t\} \\ \quad \cdot \{1 - P_b(k)\} \\ + P_C(k+1, i-1 | k_1, K_1) \cdot \mu(k_1)\Delta t \\ \quad \cdot \{1 - P_b(k+1)\} \\ + P_C(k-1, i-1 | k_1, K_1) \cdot \lambda\Delta t \\ \quad \cdot \{1 - P_b(k-1)\} \end{array} \right. \quad (5.13)$$

$k = \gamma - 1$  の時

着目パケットの個数も考慮するとパケット数はスレシヨルドの  $\gamma$  となってしまうので発生は止まる。従って式 (5.13) において第 1 項を  $\lambda\Delta t = 0$  とし、第 2 項を 0 としてしまうことで式 (5.14) が得られる。

$$P_C(k = \gamma - 1, i | k_1, K_1) = \left\{ \begin{array}{l} P_C(k, i-1 | k_1, K_1) \cdot \{1 - \mu(k_1)\Delta t\} \\ \quad \cdot \{1 - P_b(k)\} \\ + P_C(k-1, i-1 | k_1, K_1) \cdot \lambda\Delta t \\ \quad \cdot \{1 - P_b(k-1)\} \end{array} \right. \quad (5.14)$$

$k > \gamma - 1$  の時

パケット数がスレシヨルドを越えることはないので次式となる。

$$P_C(k > \gamma - 1, i | k_1, K_1) = 0 \quad (5.15)$$

$P_C(k, i | k_1, K_1)$  を用いてパケット成功確率  $Q_C$  を求める。確率  $P_C(k, i; k_1)$  において  $i = L$  とし、 $L$  ビット目が成功する確率を掛ける。さらに、干渉パケット数  $k, k_1$  について 0 から  $\infty$  の値をとることを考慮すると  $Q$  は次のようになる。

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{k_1=0}^{\infty} P_C(k, L | k_1, K_1) \cdot (1 - P_b(k)) \quad (5.16)$$

スループット解析式は次のように導出される。

$$S = G \cdot Q \quad (5.17)$$

## 5.4 スループット特性

図5.2に理想状態, すなわちアクセス制御遅延のない場合の特性を示した. この場合, 中央局の制御信号により実際に送信されるパケット数を CLSP のスレシヨ  
ルド  $\alpha$  以下に制御できるためにスループット特性は CLSP を用いない CDMA  
U-ALOHA 方式よりも飛躍的に増大した. また, 最適スレシヨルドとして  $\alpha = 8$   
を得ることができた.

図5.9にアクセス制御遅延を考慮した場合の特性を示した.  $\alpha = 8$  とし,  $\tau$  をパラ  
メーターとした.  $\tau$  は遅延時間  $T_D$  をパケット長時間  $T_P$  で規格化した値で  $\tau =$   
 $T_D/T_P$  である.  $\tau$  が大きくなるほどスループットは劣化していく.  $\tau$  がかなり  
大きくなると, CLSP を用いない場合よりもスループットは劣化してしまうこと  
がわかる. この理由は以下のように説明できる. CLSP では, 基地局で観測された  
チャンネルロード  $X$  の信頼度が  $\tau, G$  によって変化してしまう. 例えば, ある時刻  
のチャンネルロードとして  $X = 5$  を観測したとする. 仮に, その時刻における  $G$  が  
5であれば, 観測されたチャンネルロード  $X = 5$  は,  $\tau$  の大きさにそれほど左右さ  
れずに情報としての信頼度は大きい. しかし,  $G$  が 20 であるときは, 観測された  
チャンネルロード  $X = 5$  の情報としての信頼度は,  $\tau$  に応じて変化する. なぜなら,  
 $\tau$  が大きくなるにしたがって, その間のチャンネル使用状況が変化しやすくなるた  
めである. それにも関わらず, CLSP では, パケット送信を観測結果  $X$  のみに基  
づいて制御しているため, スループット特性が劣化したといえる.

図5.10に  $\tau = 0.1$  としスレシヨルド  $\alpha$  をパラメーターとした場合の特性を示し  
た. 理想状態における最適スレシヨルドは  $\alpha = 8$  であった. ところが  $\alpha = 8$  の特  
性は劣化してしまい, 最適スレシヨルドはさがる. さらにオフアードロードの高  
いところ ( $G > 30$ ) では  $\alpha = 5$  以下となってしまう. 図5.11に  $\alpha = 5$  における特性  
を  $\tau$  をパラメーターとして示した. 理想状態ではスループットは  $\alpha$  の値 5 を越え

ることはなかったが,  $\tau=0.01, 0.1$  においてはその値を越えることがわかる. すなわち理想状態における特性よりも向上する. これは以下のように説明できる. 理想状態下ではシステムにパケットを受け入れる余裕があるにも関わらず, CLSP の制御のもと発生パケット数が  $\alpha=5$  以内に抑えられてしまう. よって, スループットは 5 を越えることはない. ところが多少のアクセス制御遅延が存在することでシステム内には  $\alpha$  よりも多くのパケットが発生することになる (図5.7). 理想状態においてパケットを受け入れるシステムの余裕の分だけスループットが向上したといえる. ところが, さらに  $\tau$  が大きくなると特性は劣化し, そのピーク値は CLSP を用いない CDMA U-ALOHA 方式よりも劣化してしまう.

## 5.5 まとめ

チャネルロードセンシングプロトコル (CLSP) を用いた CDMA U-ALOHA 方式においてアクセス制御遅延がスループットに与える影響を解析的に明らかにした. 従来の解析においてはこの遅延は考慮されていなかった. 遅延時間を考慮しない解析では, 待ち行列システム  $M/D/\alpha/\alpha$  を用いて解析を行なうことができた. ところが, 遅延時間が存在する場合このシステムを用いることができない. そこでアクセス制御遅延時間をパケット長時間にたしあわせた疑似パケットを定義し, さらにそのパケットに対する CLSP の新たなスレシールド  $\gamma$  を決定した. 疑似パケットの到着が待ち行列システム  $M/D/\gamma/\gamma$  に従うことを仮定し, 解析を行った.

アクセス制御遅延がスループット, 最適スレシールドに強く影響を与えることがわかった.  $\tau = 0.1$  の場合の特性ではオフロードの高いところで最適スレシールドが低くなっていく現象が見られた.  $\alpha = 5$  の場合の特性では  $\tau = 0.0$  の場合よりもむしろ  $\tau = 0.1$  の場合, すなわち多少のアクセス制御遅延のあるほ

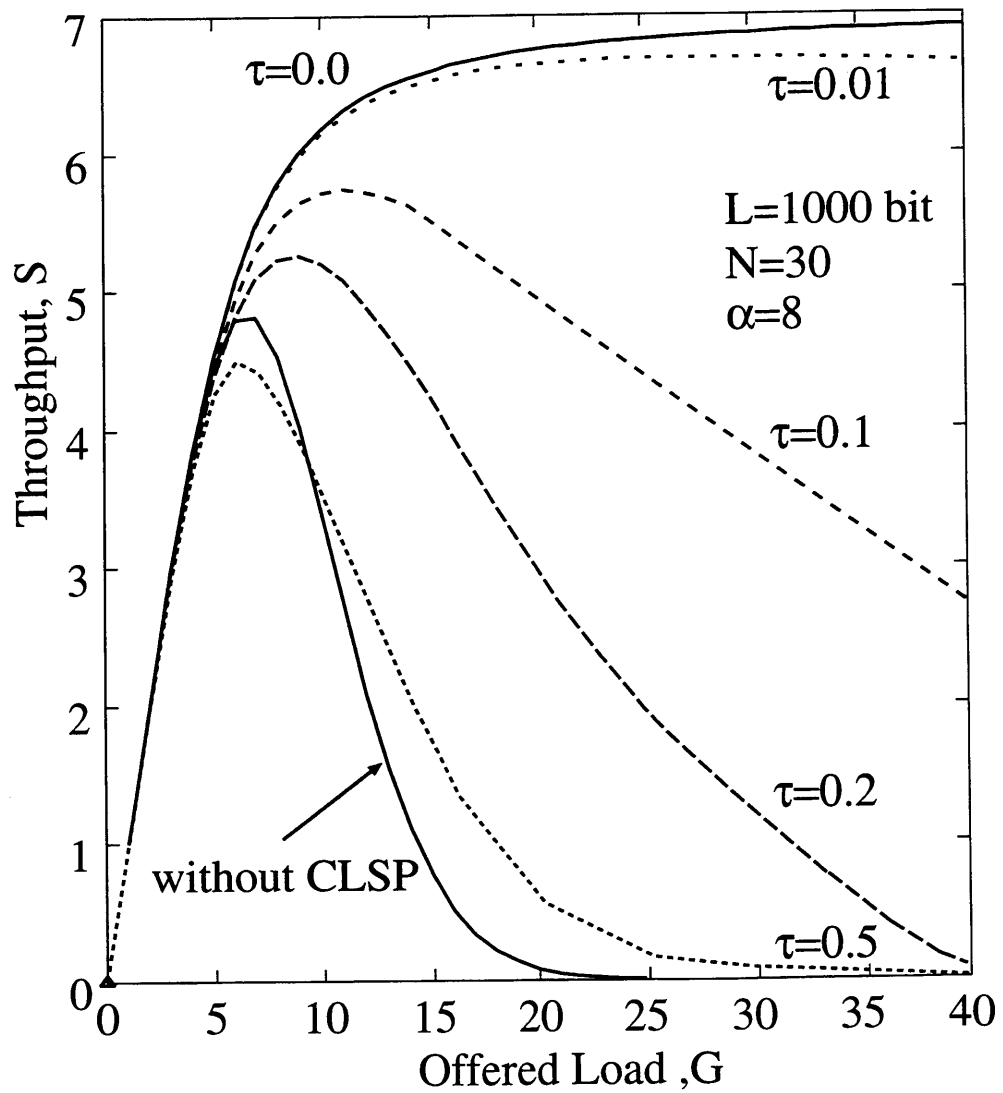


図 5.9: スレシヨルド  $\alpha = 8$  の場合

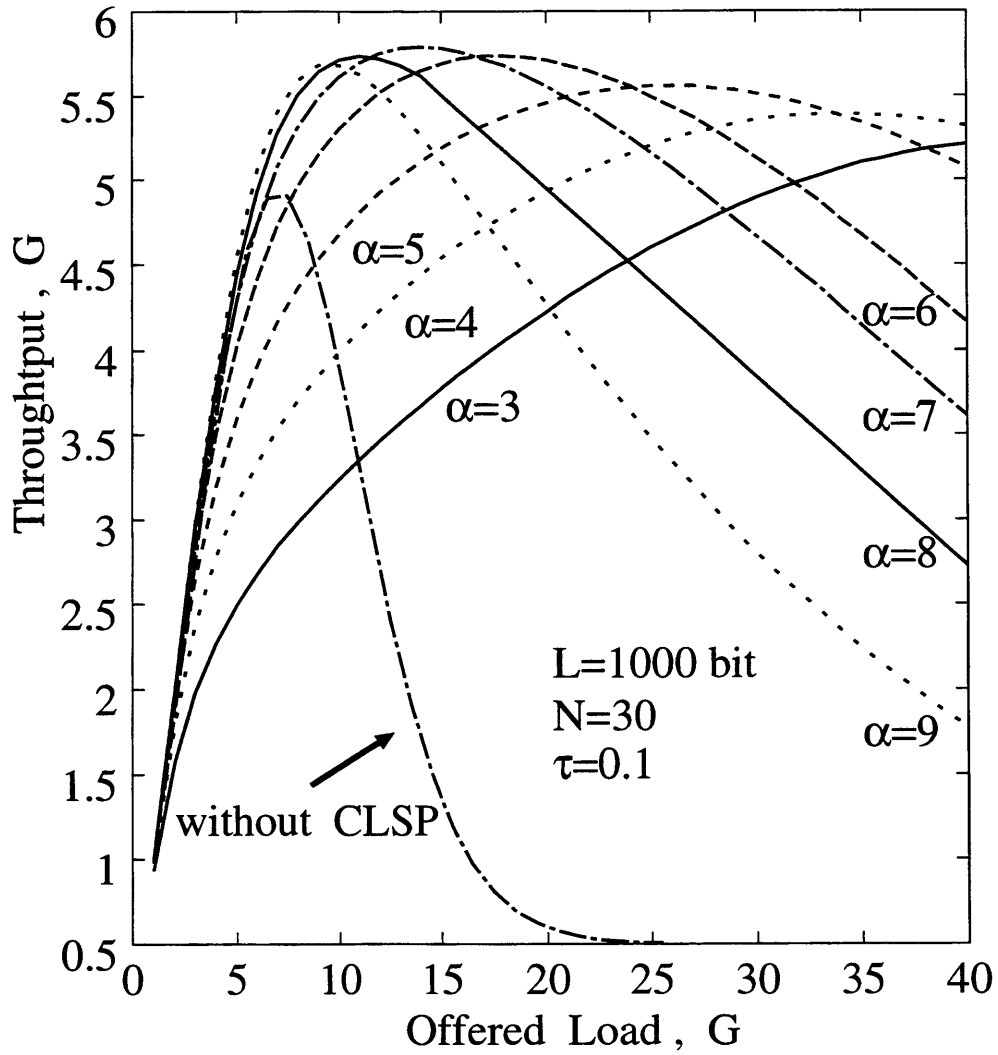


図 5.10: アクセス制御遅延  $\tau = 0.1$  の場合



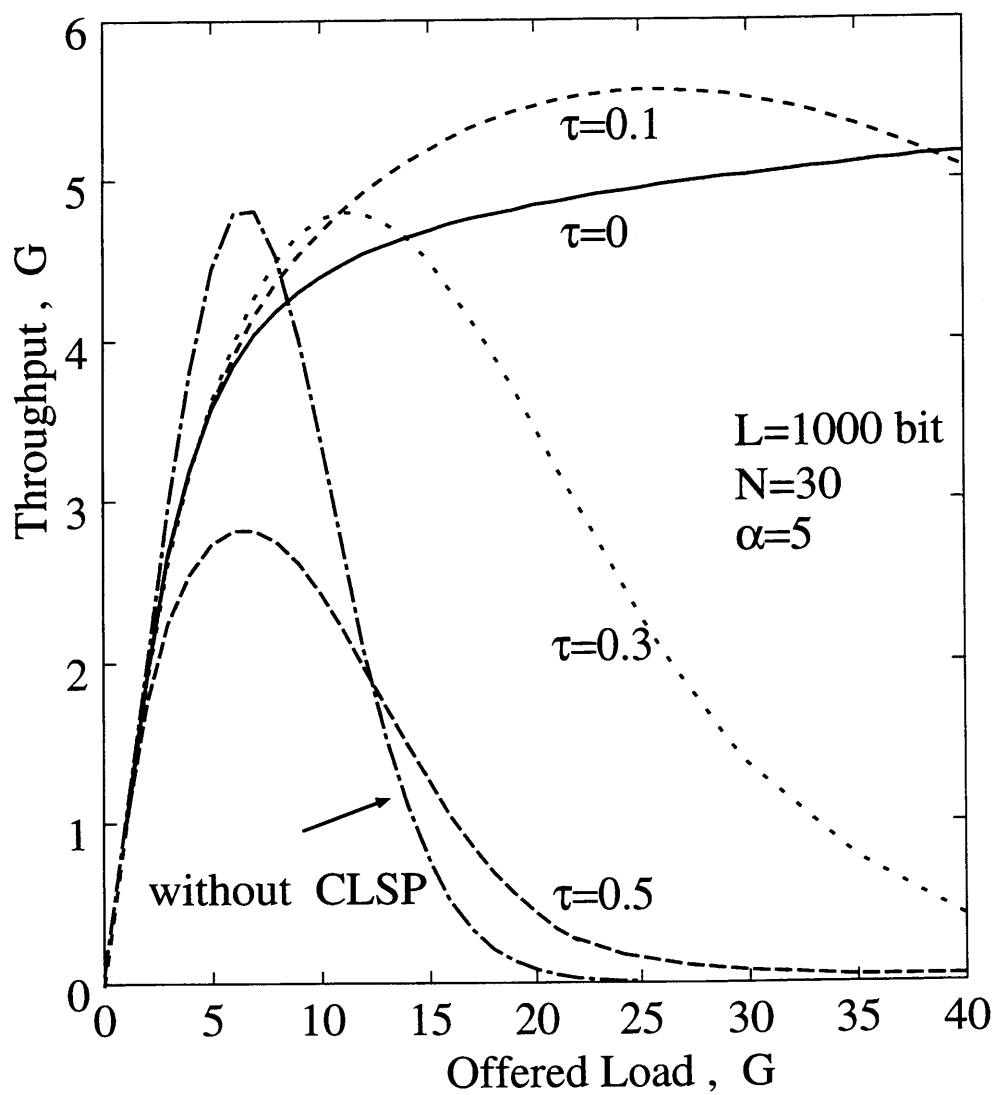


図 5.11: スレシヨルド  $\alpha = 5$  の場合

うが特性が良くなることがわかった。アクセス制御遅延の大きさによって CLSP のスレシヨルドを最適な値にかえることが必要であることがわかった。

## 第 6 章

# アクセス制御遅延の影響を和らげるアクセス制御方式

### 6.1 はじめに

第4章で述べたように、CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性向上を図るアクセス制御方式として Channel Load Sensing Protocol (CLSP) の検討がされている [8], [14], [17] ~ [20]. CLSP では中央局がチャネルロードを観測し、これがあるスレッシュホールドより小さければ送信を許可し、スレッシュホールド以上なら送信を拒否するというパケットの送信制御が行われる。つまり、中央局で観測されるチャネルロードに基づいてアクセス制御が行われる。

しかしながら、中央局で知ることのできるチャネルロードは、ユーザー局がパケット送信を開始してから中央局に伝わるまでの伝搬時間や、チャネルロードを観測するために必要な時間だけ過去の値となる。さらにその値に基づいて、ユーザー局でパケット送信が制御されるまでにも、パケットの処理や伝搬による時間遅れが生じてしまう。このような時間遅れをアクセス制御遅延と呼ぶことにする。この時間遅れのため、単純な CLSP では、パケットを送信したい時刻よりもアク

セス制御遅延の分だけ前のチャンネルロードに基づきパケット送信が制御されることになる。したがって、送信したい時刻のチャンネルロードが $\alpha$ 未満であってもパケット送信を拒否されたり、 $\alpha$ 以上であるにもかかわらずパケット送信を許可したりするため、スループット特性は劣化してしまうと考えられる。

アクセス制御遅延による特性の劣化は、伝搬時間の長い衛星通信では特に顕著となると思われる。例えば、高度 1,000 [km] の低軌道衛星の場合、アクセス制御遅延はおよそ 0.02 [sec] になる。さらに、高度 36,000 [km] の静止衛星の場合、アクセス制御遅延はおよそ 0.5 [sec] にもなってしまう。

そこで、本章では CLSP を用いた CDMA U-ALOHA 方式において、アクセス制御遅延による影響を明らかにする。そして、この影響を和らげることのできる Modified Channel Load Sensing Protocol (MCLSP) を提案する。MCLSP では、中央局はある一定時間チャンネルロードを観測し、オフロードの推定を行い、この値に基づいてアクセス制御を行う。このオフロードはパケット長時間におけるパケット送信要求の平均値であるので、短時間では一定とみなすことができる。そのため、オフロードに基づいてアクセス制御を行うことにより、アクセス制御遅延による影響を和らげることができる。MCLSP を用いた CDMA U-ALOHA 方式の特性解析を行い、アクセス制御遅延が存在しても高いスループット特性を維持することができることを示す。

## 6.2 システムモデル

システムモデルは2.2節で述べた固定長パケットのものと同じとする。ただし、パケットの送信要求の発生は生起率 $\lambda$ のポアソン過程に従うものとする。

図6.1に示されるようなアクセス制御遅延による影響を無視できないものとする。ここで、アクセス制御遅延は各ユーザーにおいて等しいものとし、この遅延時

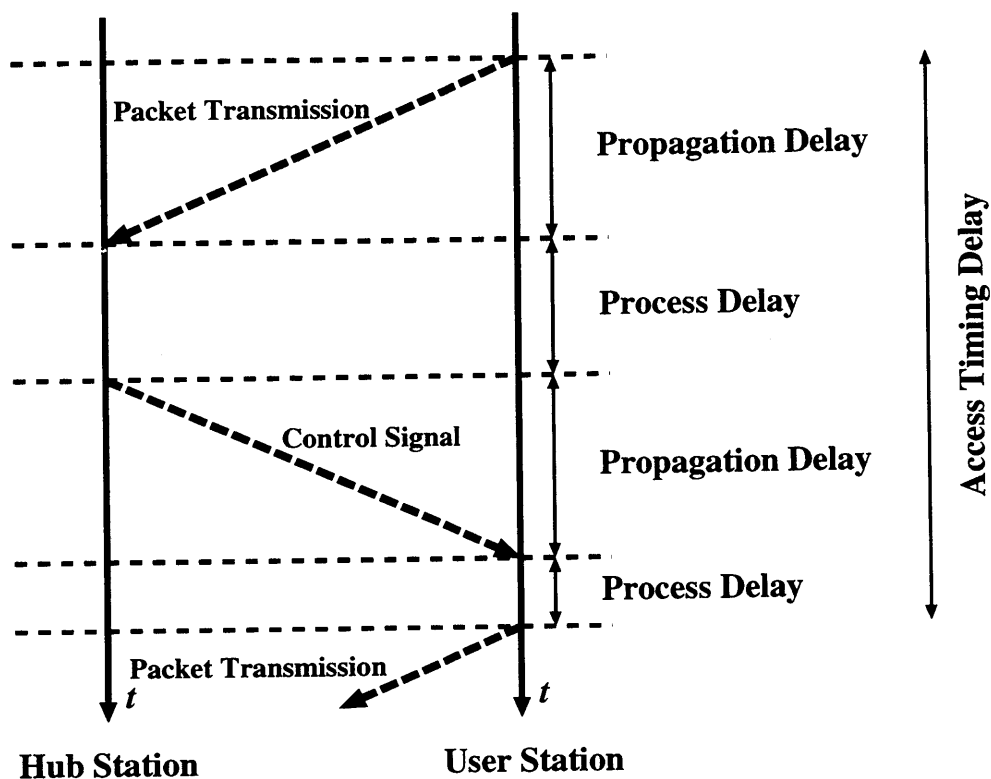


図 6.1: アクセス制御遅延の概念図

間を  $T_D$  とする。また、パケット長  $T_p$  で正規化したアクセス制御遅延を  $\tau_D$  とする。また、中央局においてチャネルロードの観測は完全に行えるものとする。

### 6.3 アクセス制御遅延による影響

先に述べたように、中央局で観測されるチャネルロードは、ユーザー局がパケット送信を開始してから中央局に伝わるまでの伝搬時間や、チャネルロードを観測するために必要な時間だけ過去の値となる。さらに、その値に基づいて、ユーザー局でパケット送信が制御されるまでにも、パケットの処理や伝搬による時間遅れが生じてしまう。CLSP では瞬時のチャネルロードの値に基づいてアクセス

制御を行っているので、このような時間遅れ(アクセス制御遅延)による影響が絶大である。

図6.2に CDMA U-ALOHA 方式に CLSP を用いた場合のスループット特性を示す。ここで、 $L = 1000$  [bits],  $N = 31$ ,  $E_b/N_0 = \infty$ , スレッシュホールド  $\alpha = 7$  としている。アクセス制御遅延がない場合、CLSP を用いたシステムはアクセス制御を行っていない場合と比べ、スループットの最大値がおよそ 1.5 倍になる。しかしながら、アクセス制御遅延による影響を無視できない場合、特性の劣化が見られる。アクセス制御遅延が比較的小さい場合 ( $\tau_D = 0.2$ ), 特にオフアードロードの大きいところで特性が劣化している。これは転送レート  $R$  を  $9,600$  [bps] とすると、低軌道衛星を用いた場合に相当する。さらに、 $\tau_D = 5.0$  の場合、アクセス制御を行わない場合よりもスループット特性が悪くなってしまう。これは、静止衛星を用いた場合に相当する。このように、アクセス制御遅延が存在する場合、アクセス制御が過去の情報に基づいて制御されるために特性が劣化してしまうことがわかる [19]。

## 6.4 Modified Channel Load Sensing Protocol (MCLSP)

前節で示したアクセス制御遅延による影響を和らげる方策として、MCLSP を提案する。これは、CLSP とは異なり推定したオフアードロードの値に基づいてアクセス制御を行う。オフアードロード  $G$  は通常ゆっくりと変化するので、アクセス制御に要する時間では一定であるとみなすことができる。このことを考慮し、観測時間  $T_s$  に観測されたチャンネルロードからオフアードロードを推定する。そしてこのオフアードロードの推定値に基づいてアクセス制御を行うことによって、アクセス制御遅延によって生じる特性の劣化を和らげることができると予想される。

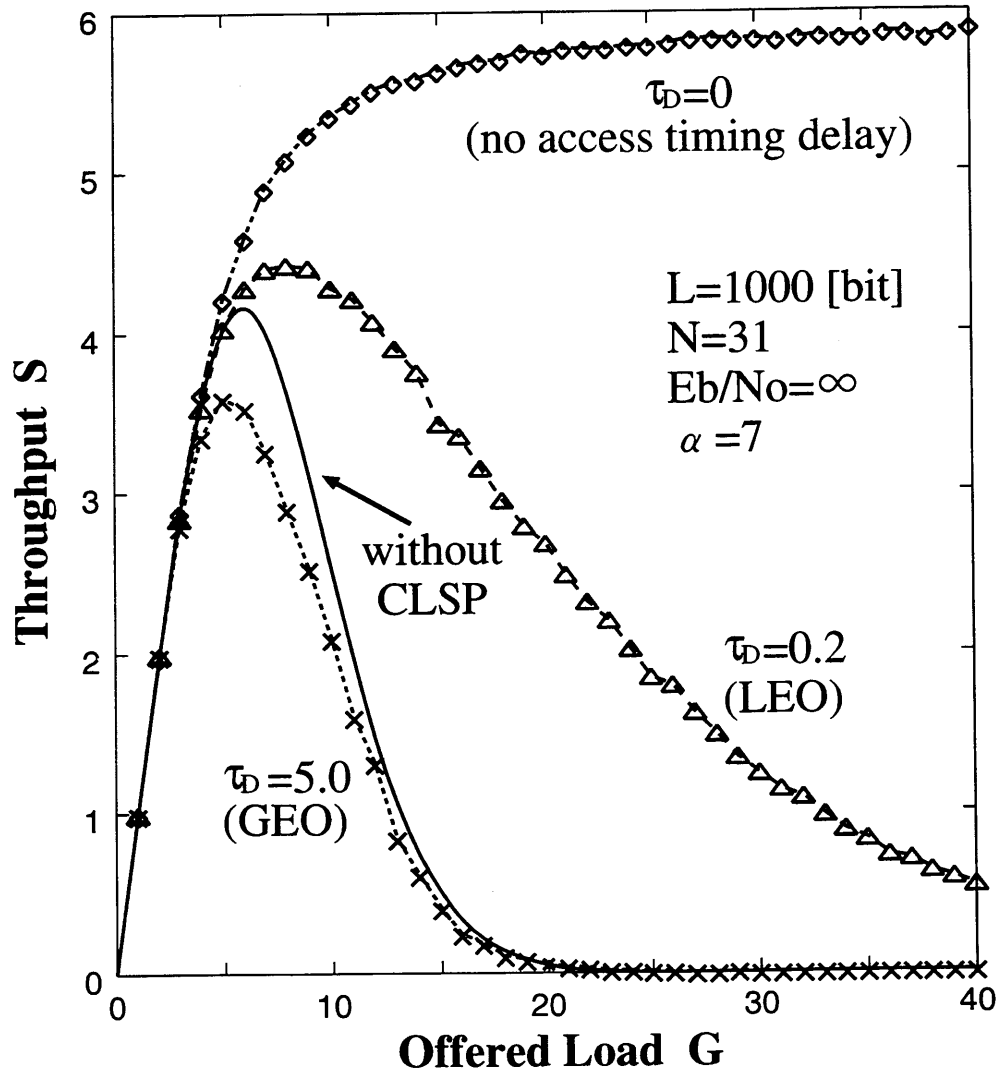


図 6.2: CLSP を用いた CDMA U-ALOHA 方式のアクセス制御遅延による影響

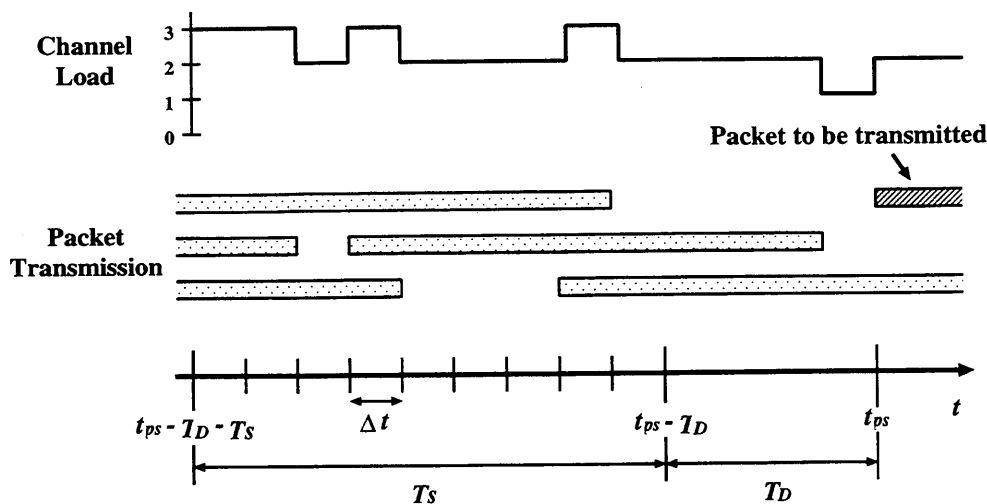


図 6.3: MCLSP を用いた CDMA Unslotted ALOHA のチャンネルの観測モデル

MCLSP は、CLSP と同様に中央局がチャンネルロードを観測する。CLSP では一時点での観測結果に基づいてパケット送信を制御していたが、MCLSP では中央局は一定時間のチャンネルロードの観測を行なう。その際、チャンネル観測時間  $T_s$  を微小時間間隔  $\Delta t$  に分割する (図6.3)。 $\Delta t$  は十分微小であると仮定すると、隣合う  $\Delta t$  におけるチャンネルロードの差は 0 又は  $\pm 1$  となる。ここで、チャンネルロードの差が  $+1$ ,  $-1$  とは、 $\Delta t$  におけるパケットの到着 (中央局での受信)、終了を意味し、0 はそのいずれも起こらなかったことを意味する。

中央局は  $T_s$  内の各  $\Delta t$  に観測されたチャンネルロードからオフロードの推定を行い、この推定値に基づいてパケット送信確率  $P_{tr}$  を算出し、それをユーザー局に放送して知らせる。ユーザー局ではこの放送された送信確率に従って、パケットの送信を行う。パケットの送信要求が発生したとき、ユーザー局は確率  $P_{tr}$  でパケットの送信を行い、確率  $1 - P_{tr}$  でパケットの送信を控える。

パケットの再送過程を図2.2に示す。もし、ユーザー局がパケットの送信を控えたとき、そのパケットを送り直す必要が生じる。そのため適度な時間 (再送間隔時



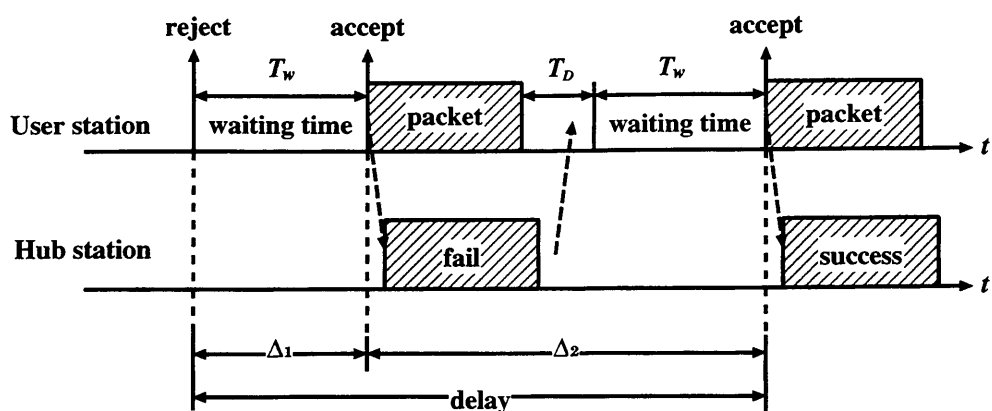


図 6.4: MCLSP を用いたときのパケットの再送過程

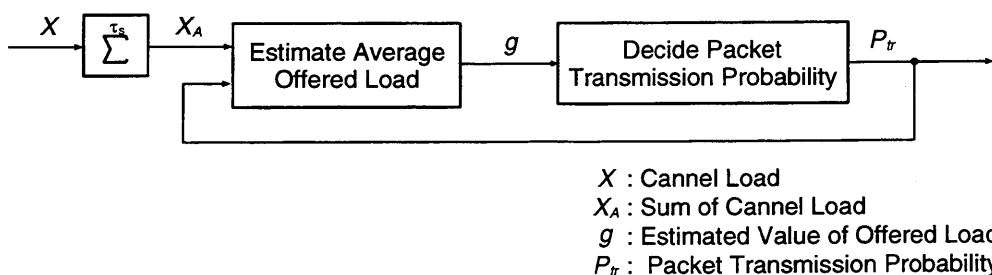


図 6.5: パケット送信確率を算出するアルゴリズム

間  $T_w$ ) をおいてから、再びそのパケットの送信要求を行う。また、パケットの送信に失敗した場合も、そのパケットを送り直さなければならない。このときも同様に適度な時間をおいてから、再びそのパケットの送信要求を行う。

このプロトコルを効果的に実行するには、パケット送信確率  $P_{tr}$  を導出するアルゴリズムが非常に重要となる。そこで、以下に述べるようなアルゴリズムを用いて、パケット送信確率  $P_{tr}$  を求める [20].

#### 6.4.1 送信確率の導出アルゴリズム

時刻  $t = t_{ps}$  にあるユーザー局がパケットの送信を始めるとする。ここで、 $X_A(t_{ps} - T_D, T_s)$  を時刻  $(t_{ps} - T_D - T_s)$  から  $(t_{ps} - T_D)$  に中央局が受け取ったパケットの数とする。中央局はチャネルロードを観測し、受け取ったパケットを数えることによって  $X_A(t_{ps} - T_D, T_s)$  を得る。また、 $\overline{P_{tr}(t_{ps} - T_D, T_s)}$  を同じ期間における平均パケット送信確率とする。中央局は、オフアードロードを推定するのに十分な時間、パケット送信確率を記憶し、この記憶した送信確率の値を平均することによって  $\overline{P_{tr}(t_{ps} - T_D, T_s)}$  を得る。これらの値から、同じ期間においてパケットの送信要求が発生した個数  $X_O(t_{ps} - T_D, T_s)$  は、

$$X_O(t_{ps} - T_D, T_s) = \frac{X_A(t_{ps} - T_D, T_s)}{\overline{P_{tr}(t_{ps} - T_D, T_s)}} \quad (6.1)$$

と推定される。オフアードロードの推定値  $g$  は、パケット長時間に発生するパケットの送信要求の平均値の推定値であるので、この  $X_O(t_{ps} - T_D, T_s)$  を用いることにより、

$$\begin{aligned} g(t_{ps} - T_D, T_s) &= \frac{X_O(t_{ps} - T_D, T_s)}{\tau_s} \\ &= \frac{X_A(t_{ps} - T_D, T_s)}{\overline{P_{tr}(t_{ps} - T_D, T_s)} \cdot \tau_s} \end{aligned} \quad (6.2)$$

と得られる。ここで、 $\tau_s$  はパケット長で正規化した観測時間であり、 $\tau_s = T_s/T_p$  である。

このオフアードロードの推定値  $g$  に基づいて、時刻  $t = t_{ps}$  におけるパケット送信確率  $P_{tr}(t_{ps})$  を以下のように決める。アクセス制御を行っていない CDMA U-ALOHA 方式で得られるスループットの最大値を、アクセス制御遅延が存在しても得ることができるようにする。そのため、時刻  $t = t_{ps}$  におけるパケット送信確率  $P_{tr}(t_{ps})$  は、

$$P_{tr}(t_{ps}) = \min \left\{ \frac{G_{max}}{g(t_{ps} - T_D, T_s)}, 1.0 \right\} \quad (6.3)$$

となる。ここで、 $G_{max}$  はアクセス制御を行っていないときの CDMA U-ALOHA 方式の最大値を得ることができるオフロードの値である。この式のようにパケット送信確率を定めると、もし、オフロードの推定値が  $G_{max}$  よりも大きければ、ユーザー局はパケットを確率  $G_{max}/g$  で送信し、そうでないならば、ユーザー局はパケットを送信要求があったらすぐに送ることになる。

#### 6.4.2 特性解析

本節では、MCLSP を適応した CDMA U-ALOHA 方式のスループットおよび遅延特性を解析的に導出する。

観測時間は十分長く、オフロードの推定誤りは起こらないと仮定する。このとき、オフロードの推定値  $g$  は実際のオフロード  $G$  と等しくなる。アクセス制御の操作を行っている間、オフロードの値は変化しないと見なすことができるので、パケットの送信確率  $P_{tr}$  は時刻  $t$  に関係なく、

$$P_{tr} = \min \left\{ \frac{G_{max}}{G}, 1.0 \right\} \quad (6.4)$$

となる。よって、パケットの送信要求の生起率は  $\lambda$  なので、中央局へのパケットの到着は生起率  $P_{tr}\lambda$  となる。

パケットの発生は生起率  $P_{tr}\lambda$  のポアソン過程、パケット長は固定長であるので、MCLSP を適応したシステムは待ち行列モデル M/D/ $\infty$  と一致する。2.3.2節で述べた指数長近似法を用いると終了率は  $k\mu = k/T_p$  となるので、システムは図6.6に示されるような状態遷移図に従うと近似される。

図6.6の状態遷移図より、システムは出生死滅過程に従うので、干渉パケット数の定常状態確率  $P_k$  は式(2.4)より、

$$P_k = \frac{(P_{tr}\lambda T_p)^k}{k!} e^{-P_{tr}\lambda T_p} = \frac{(P_{tr}G)^k}{k!} e^{-P_{tr}G} \quad (6.5)$$

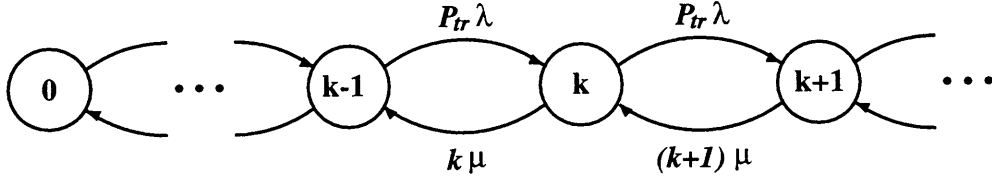


図 6.6: MCLSP を用いたときの干渉パケット数の状態遷移図

となる.

ここで,  $P_S(k, i)$  をあるパケットにおいて 1 ビット目から  $i-1$  ビット目まで成功し,  $i$  ビット目の干渉パケット数が  $k$  である確率とする.

(i)  $i = 1$  のとき;

定常状態の式 (6.5) より,

$$P_S(k, i) = \frac{(P_{tr}G)^k}{k!} e^{-P_{tr}G} \quad (6.6)$$

となる.

(ii)  $i > 1$  のとき;

$P_S(k, i)$  は図6.6の状態遷移図より次式のように得られる.

$$\begin{aligned} P_S(k, i) &= P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t - P_{tr}\lambda\Delta t\} \cdot \{1 - P_b(k)\} \\ &\quad + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \cdot \{1 - P_b(k+1)\} \\ &\quad + P_S(k-1, i-1) \cdot P_{tr}\lambda\Delta t \cdot \{1 - P_b(k-1)\} \end{aligned} \quad (6.7)$$

$P_S(k, i)$  を用いて, パケット成功確率  $Q_S(G)$  は,

$$Q_S(G) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \cdot (1 - P_b(k)) \quad (6.8)$$

となる。

従って、スループット特性は、

$$S(G) = P_{tr}G \cdot Q_S(G) \quad (6.9)$$

となる。

次に、遅延特性を求める。MCLSPを適応したシステムでは、パケットの再送過程は図6.4に示されるようになる。ここで、送信が拒否されることによって生じる遅延時間を  $\Delta_1$ 、パケットの伝送に失敗したことに生じる遅延時間を  $\Delta_2$  とすると、 $\Delta_1, \Delta_2$  は、

$$\Delta_1 = K \frac{T_p}{G} \quad (6.10)$$

$$\Delta_2 = \Delta_1 + T_p + T_D \quad (6.11)$$

と表される。

確率  $1 - P_{tr}$  でパケットの送信を控える確率を  $Q_R(G)$ 、パケットの伝送に失敗する確率を  $Q_F(G)$  とすると、

$$Q_R(G) = 1 - P_{tr} \quad (6.12)$$

$$Q_F(G) = 1 - Q_S(G) \quad (6.13)$$

となる。これらを用いて遅延特性は次式のように表される。

$$\begin{aligned} D(G) &= \frac{1}{T_p} \{ \Delta_1 Q_R(G) + \Delta_2 P_{tr} Q_F(G) \\ &\quad + 2\Delta_1 Q_R^2(G) + 2(\Delta_1 + \Delta_2) Q_R(G) P_{tr} Q_F(G) \\ &\quad + 2\Delta_2 (P_{tr} Q_F(G))^2 + \dots \} \cdot P_{tr} Q_S(G) \\ &= \frac{1}{T_p} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \{ m\Delta_1 + (n-m)\Delta_2 \} \\ &\quad \cdot Q_R^m(G) (P_{tr} Q_F(G))^{n-m} P_{tr} Q_S(G) \end{aligned} \quad (6.14)$$

### 6.4.3 数値例

図6.7に MCLSP を適応したときの CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性を示す。ここで、 $N = 31$ ,  $L = 1000$  [bit],  $E_b/N_0 = \infty$  としている。図6.7に、解析結果とシミュレーション結果の両方が示されている。シミュレーションにおいては、6.4.1節で述べた方法で実際に中央局に到着したパケットの数を数えてオフアードロードを推定している。それゆえ、オフアードロードの推定誤りが起こる可能性がある。観測時間が十分長いとき (例えば  $\tau_s = 10$  の場合), オフアードロードの推定誤りはほとんど起きていないことがわかる。このとき、解析結果とシミュレーション結果が一致していることがわかる。またこの図より、アクセス制御遅延が大きくても、またオフアードロードが大きくても、MCLSP を用いたシステムのスループット特性は MCLSP を用いていない場合のスループットの最大値を維持できることがわかる。

図6.7に MCLSP を適応したときの CDMA U-ALOHA 方式の遅延特性を示す。ここで、 $N = 31$ ,  $L = 1000$  [bit],  $K = 1000$ ,  $E_b/N_0 = \infty$  としている。アクセス制御を行わない場合、オフアードロードが  $G_{max}$  より小さいところでは遅延時間は短い、 $G_{max}$  より大きくなると急激に増加している。これに対し MCLSP を用いた場合、オフアードロードが  $G_{max}$  より小さいところではアクセス制御を行わない場合と遅延時間は同じであるが、 $G_{max}$  より大きくなると遅延時間は徐々に増加し、アクセス制御を行わない場合よりも短くなることがわかる。

## 6.5 まとめ

本章では MCLSP を用いた CDMA U-ALOHA 方式を提案した。MCLSP とはオフアードロードの推定値に基づいてアクセス制御を行う方式である。スループット特性および遅延特性を解析的に導出し、アクセス制御が大きくても高い

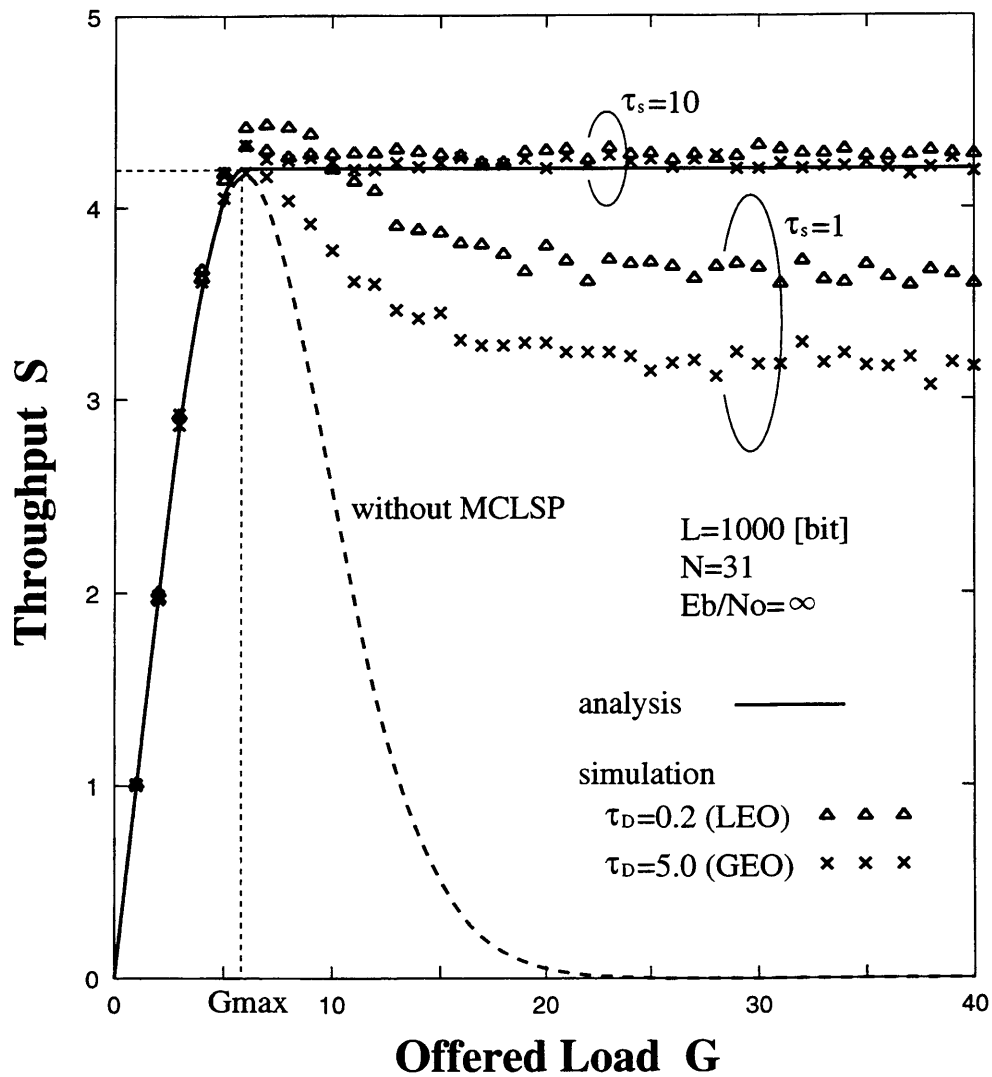


図 6.7: MCLSP を用いた CDMA Unslotted ALOHA 方式のスループット特性

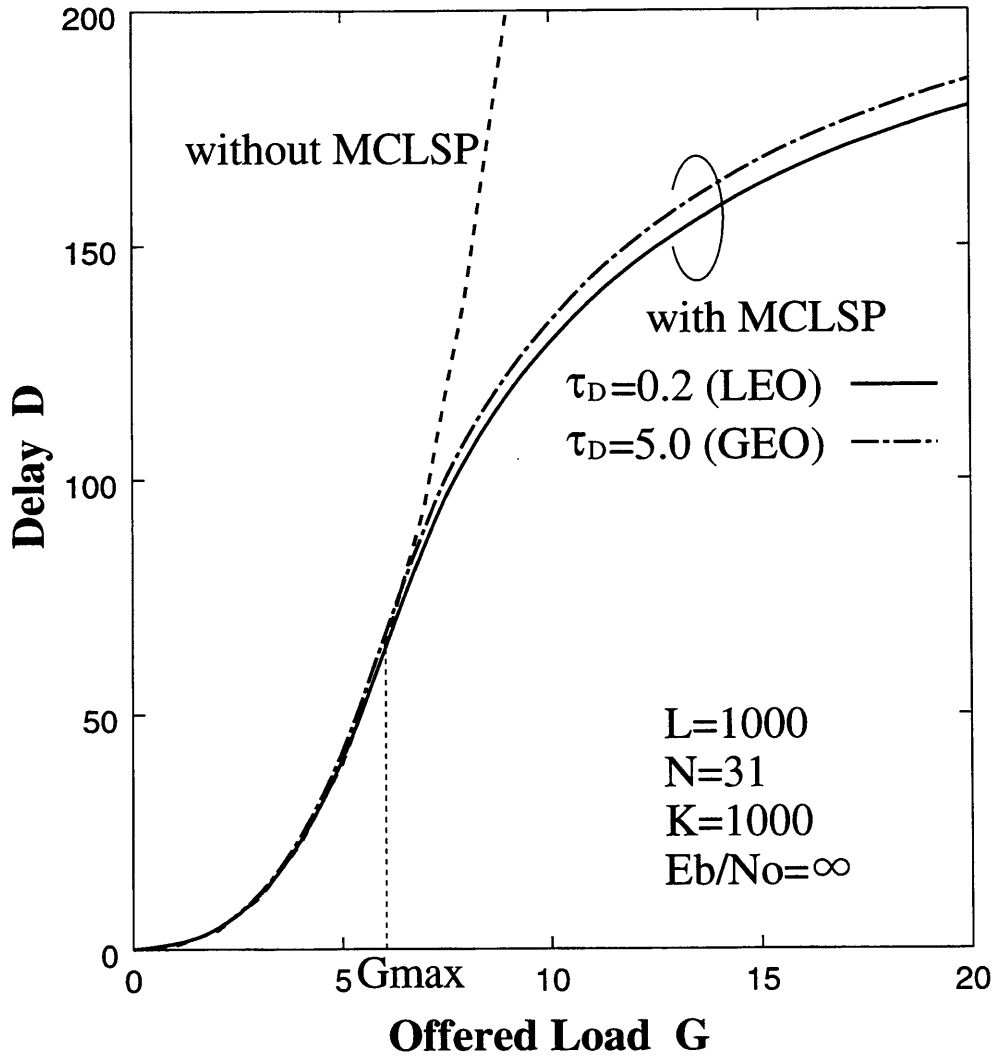


図 6.8: MCLSP を用いた CDMA Unslotted ALOHA 方式の遅延特性



スループット特性を維持できることを示した。MCLSP は伝搬距離が非常に長い  
静止衛星の場合にも特性の劣化が生じないので、衛星通信のようなアクセス制御  
遅延が非常に大きくなる場合にふさわしい方式であると言える。

## 第 7 章

# セルラー環境での CDMA ALOHA 方式の スループット解析

### 7.1 はじめに

近年、ALOHA 方式にスペクトル拡散技術を適用した符号分割多元接続 (CDMA) によるパケット通信方式 (CDMA ALOHA) が注目を浴びている [28]- [31]. CDMA ALOHA は CDMA の持つ対干渉性, 多元接続性, 秘匿性などの特徴および ALOHA 方式のランダムアクセスの簡便性等の両者の利点を持ち、効率の高いパケット通信を実現できる可能性を有している. CDMA ALOHA には狭帯域 ALOHA 方式と同様に slotted system と unslotted system とがある. 本稿では unslotted system について解析を行うものとし, それを CDMA Unslotted-ALOHA (CDMA U-ALOHA) と呼ぶ事とする.

CDMA U-ALOHA をセルラー環境で用いると, 他局からの干渉のみならずマルチパスの影響を受け, そのスループットが著しく劣化する. また, 近年, 周波数の有効利用の観点からマイクロセルラーの検討が行われているがその場合, ユーザーが一様に分布しているケースは稀である (不均一トラフィック) [28], [29]. さ

らに各ユーザーの位置が異なるため、それぞれのユーザーから送信されるパケットは伝送距離による減衰を受け、さらに、統計的に異なるマルチパスを通じて基地局に到着する [30].

そこで本稿ではこの点について比較的容易に解析できるよう、新しい解析モデル提案する [29], [30]. これは、1つの基地局のカヴァー可能な範囲(セル)を、微小面積区域(セグメント)に分割して、そのそれぞれに着目し解析を行う。セグメントが十分に小さいならば、マルチパスの統計的性質、トラフィックの様子等がセグメント内で等しいものと考えられる事ができる。よって、全体の特性は各々のセグメントでの特性を加算した値として求める事ができ、複雑な環境下での解析でも比較的容易に行える。さらに、信号の生起する状態をそれぞれのセグメントごとに定める事が可能であり、ユーザーの地理的分布、すなわちトラフィックの不均一性も含めた解析が可能となる。以下、本稿ではセルラー環境を考え、その場合の CDMA U-ALOHA のスループット特性について延べていく。特に、不均一トラフィックの影響、パワーコントロールの効果、RAKE 受信機の効果、誤り訂正符号の効果を解析的に求めていく。

## 7.2 システムモデル

### 7.2.1 セグメント分割モデル

実際に無線通信システムが使用される状況を想定すると、ユーザーが平面的に一樣に分布しているケースは稀である。特にマイクロセルラーシステムではトラフィックの変動、特定の場所における高密度トラフィックによるトラフィックの不均一性が生じる。この様な環境下での解析を行うため、図7.1に示すように1つの基地局のカヴァー可能な範囲(セル)を6角形の微小面積区域に分割した領域

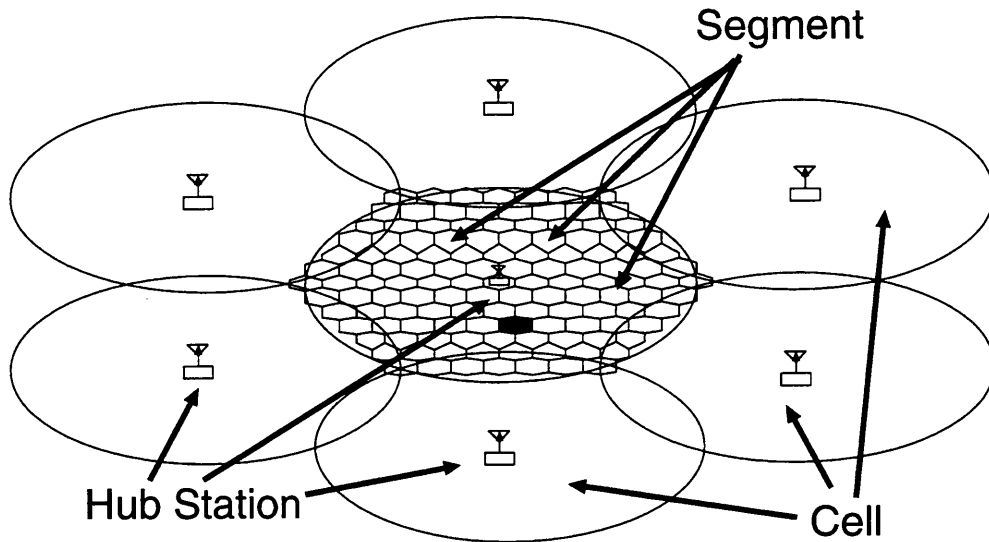


図 7.1: セグメント分割モデル

(セグメントと呼ぶ)を考え、各セグメント毎で解析を行うものとする。このセグメント内では、トラフィック、電力の伝搬距離による減衰やマルチパスの性質が、統計的に等しく、また、それぞれが独立に扱えるものと仮定する。これよりセル全体での諸特性はそれぞれのセグメントでの解析の和として与える事ができ解析が容易になる。図はセルを 90 のセグメントに分割した場合で、それぞれのセルは基地局を中心に描かれる 11 の円周に沿っている。

この様に信号 (パケット) の生起する状態をそれぞれのセグメントごとに定めることで、パケット発生の地域的分布を考慮することが可能となる。例えばセル内のユーザーの分布が次式で与えられる様な不均一トラフィックを考えてみる [28], [29].

$$P_{d_c} = \exp \left\{ -\frac{d_c^2}{2\omega^2} \right\} \quad (7.1)$$

これは、最大値が 1 のガウス分布であり、 $\omega$  を変化させる事によりその分布の形状を考慮する事ができる。  $d_c$  は分布の中心からの相対距離を示す。 図7.2に

$\omega=30, 1.0, 0.2$  の場合の分布の様子を示す。これより  $\omega$  が小さくなるにつれてトラフィックが集中する事がわかる。なお、 $\omega \geq 30$  であれば一様分布とみなす事ができる。本稿では上式を用い不均一トラフィックを表すものとする。

### 7.2.2 送信機モデル

各ユーザーは固有に割り当てられた拡散符号(ランダム符号)を用いパケットを直接拡散(DS/SS)変調する。パケットの伝送は1ホップで基地局に送出するものとし、パケットは平均到着率  $\lambda = G/L_p$  のポアソン生起する。ここで、 $L_p[\text{bit}]$  はパケット長である。また、 $G$  はオフアードロードを示し、パケット長時間  $T_p$  に生起するパケットの平均送信要求数と定義される。

今、 $k$  番目のユーザーの送信信号  $x_k(t)$  を

$$x_k(t) = \sqrt{2P}b_k(t)a_k(t)\exp(j2\pi f_c t) \quad (7.2)$$

で表す。ここで、 $b_k(t)$  は情報データであり、 $a_k(t)$  は系列長  $N$  の拡散系列、 $f_c$  はキャリア周波数である。この信号が次のマルチパスフェージングチャンネルを通過する。

### 7.2.3 通信路モデル

一般にマルチパスフェージングにより受信波の到来時間には時間差が生る。今、あるセグメント  $h1$  について考えると受信信号はいくつかのパスを経て受信される事になる。これより、受信信号は

$$y_k^{(h1)}(t) = \sum_l \text{Re}(\eta_{h1} \gamma_{k,l} A_{k,l}) x_k(t) \exp(j\theta_{k,l}), \quad (7.3)$$

と書かれる。この式において  $x_k(t)$  は DS/SS 信号を、 $\theta_{(k,l)}$  は  $[0, 2\pi)$  で一様分布する  $l$  番目のパスの位相角、 $\eta^{(h1)} (= P/r^c)$  は基地局からの距離 ( $r$ ) により決まる

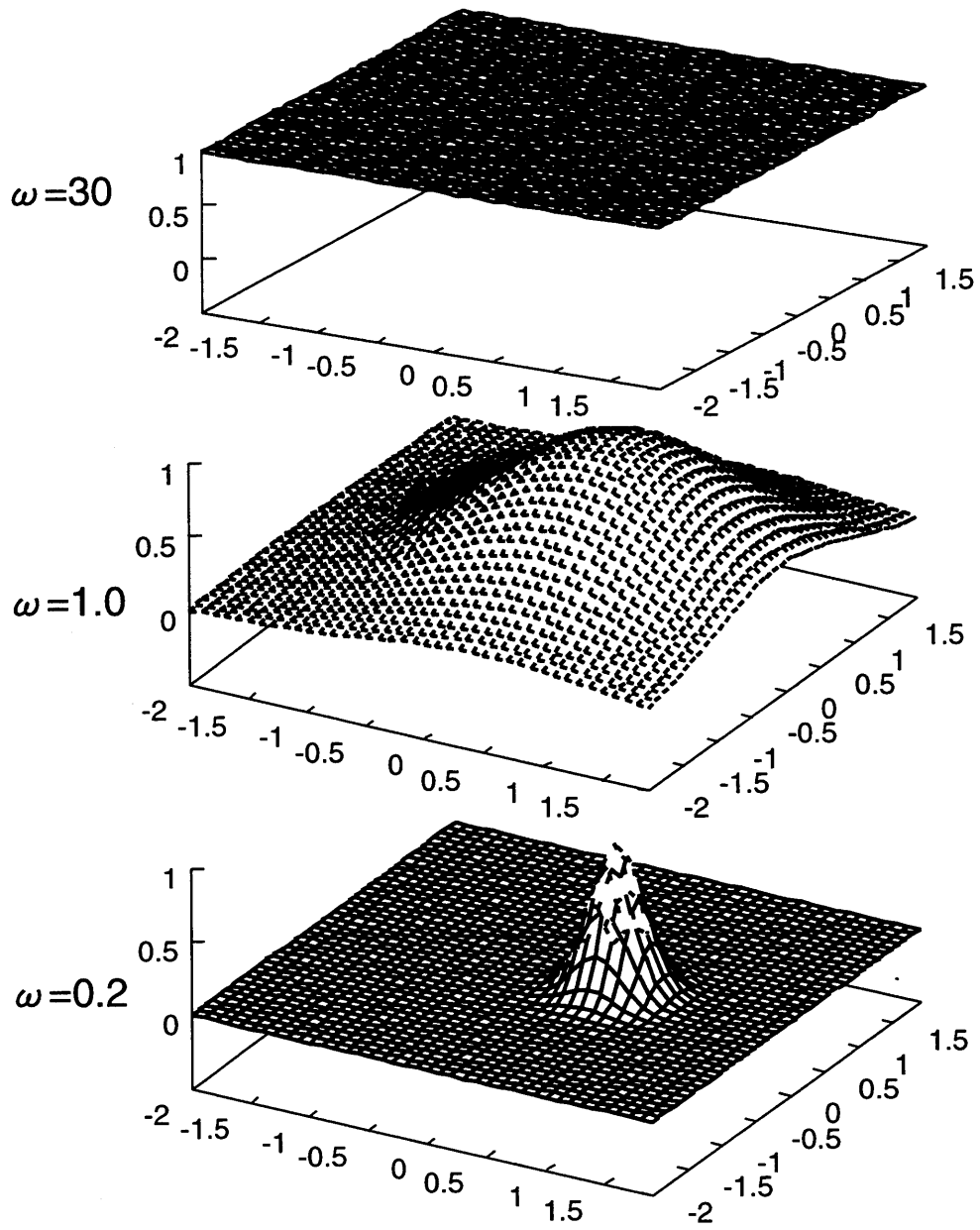


図 7.2: トラフィック分布の例

電力を表す項である。  $A_{k,l}$  はレイリー分布に従うランダム変数である。この分散を  $E(|A_{k,l}|^2) = 1$  とすることで  $\gamma_{k,l}$  は信号の相対強度を表す項となる [31].

パス間の相関が無視できるほど離れていて、各々のパスが独立であると仮定すると、これらのパスの到着はポアソン過程で近似できる。また、各パスを経て到来する信号波の受信電力は、伝搬遅延時間  $t$  とともに指数関数的に減衰するものとする。その減衰定数を  $\alpha$  とし、遅延スプレッド  $D_s$  の時間に平均  $\Lambda$  本のパスが到着したとすると各パスでの相対強度の分散は次式で表される [30], [31].

$$E(|\gamma_l|^2) = \int_0^{D_s} e^{-\alpha t} e^{-\frac{\Lambda}{D_s} t} \frac{(\frac{\Lambda}{D_s} t)^{l-1}}{(l-1)!} dt \quad (7.4)$$

#### 7.2.4 基地局モデル

基地局では総数  $K$  の  $h_1$  セグメントからの信号およびその他の  $H-1$  セグメントからの信号が受信される。

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K^{(h_1)}} y_k^{(h_1)}(t) + \sum_{h=1(H \neq h_1)}^H \sum_{k=0}^{K^{(h)}} y_k^{(h)}(t) + n(t), \quad (7.5)$$

ここで  $n(t)$  は白色ガウス雑音である。

### 7.3 BER 解析

#### 7.3.1 RAKE 受信機を用いた場合

まず、RAKE 受信機 (捕捉するパスの総数  $M$ ) を用いた場合について検討する。なお、ここでは符号化を施さない場合の BER を求めことにする。受信側で  $h_1$  セグメントの希望波 ( $k = k_1$ ) の  $l = 0$  番目のパスに完全に同期しているものとする。これよりガウス近似を用い SN 比は次のようになる [30].

$$SNR_m = \frac{1}{\sqrt{\sigma_m}} \quad (7.6)$$

ただし,

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sum_{k \neq k_1} \sum_{l \neq 0} E \left( |\eta^{(h_1)} \gamma_{k,l}|^2 \right)}{3N |\eta^{(h_1)} \gamma_{k,m}|^2} \\ &+ \frac{\sum_{h \neq h_1} \sum_l E \left( |\eta^{(h)} \gamma_l^{(h)}|^2 \right) g^{(h)}}{3N |\eta^{(h_1)} \gamma_{k,m}|^2} \\ &+ \frac{N_0}{2E_b |\eta^{(h_1)} \gamma_{k,n} A_{k,m}|^2}\end{aligned}$$

ここで、 $E_b = PT$  は1ビット当たりの受信信号エネルギーを表し、 $N$  は拡散率である。 $\sigma_m$  の右辺第1項は着目セグメント内の干渉成分を示し、第2項はその他のセグメントからの干渉成分である。第3項は AWGN 成分を示す。パワーコントロールを用いた場合、距離による減衰が無いので  $\eta^{(h)} = 1$  となる。

式 (7.6) を用い RAKE 受信時の誤り率は次のようになる。

$$P_R(k) = \frac{1}{2} \sum_n^M \pi_m \left[ 1 - \sqrt{\frac{\overline{SNR}_m}}{1 + \overline{SNR}_m}} \right], \quad (7.7)$$

ただし,

$$\pi_m = \prod_{i=1(\neq m)}^M \frac{\overline{SNR}_m}{\overline{SNR}_m - \overline{SNR}_i}$$

### 7.3.2 誤り訂正符号を用いた場合

Chernoff bound 近似を用い誤り率を求める [31]. 今、 $P(\mathbf{b} \rightarrow \hat{\mathbf{b}})$  を符号化系列  $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_p, \dots)$  を送信した時  $\hat{\mathbf{b}} = (\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_p, \dots)$  と誤る確率 (pair-wise error probability) とする。また、理想的なインターリーブ (そのサイズが  $\infty$ ) を仮定する。 $p$  番目の逆拡散後の出力は次の様に示される。

$$Z_p = \eta^{h_1} \gamma_{k,0} A_{k,0} b_p + Z_n \quad (7.8)$$



第1項は希望波成分である。雑音成分  $Z_n$  は(7.6)と同様にガウス近似を用い、その分散を次のように表す。

$$\begin{aligned} \text{var}(Z_n) = \\ \sigma_n^2 = \frac{1}{3N} \left( \sum_{k(\neq k_1)} \sum_{l(\neq 0)} E(|\eta^{(h_1)} \gamma_{k,l}|^2) \right. \\ \left. + \sum_{h(\neq h_1)} \sum_l E(|\eta^{(h)} \gamma_{k,l}|^2 g^{(h)}) \right) + \frac{N_0 T}{4} \end{aligned} \quad (7.9)$$

式(7.9)を用い  $P(\mathbf{b} \rightarrow \hat{\mathbf{b}})$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} P(\mathbf{b} \rightarrow \hat{\mathbf{b}}) \leq \\ \prod_p \int_0^\infty f_{A_0}(\xi) \left| \exp \left( -\frac{|\eta^{h_1} \gamma_{k,l}|^2}{4\sigma_n^2} |b_p - \hat{b}_p|^2 \right) \right| d\xi \\ = \prod_p \frac{1}{1 + \frac{|\eta^{h_1} \gamma_{k,l}|^2}{4\sigma_n^2} |b_p - \hat{b}_p|^2} \end{aligned} \quad (7.10)$$

ここで、 $f_{A_0}(\xi)$  は  $E|A_{k,l}|^2 = 1$  を満足するレイリー確率密度関数である。(7.9)で他局間干渉成分を無視する(すなわち  $\gamma_{k,l} = 0$ )と(7.10)は符号化 MPSK の場合と一致する。

これよりビット誤り率は次のように求められる。

$$P_b(k) = \frac{1}{\beta} \sum_{\beta(\neq \hat{\beta})} \zeta(\mathbf{b}, \hat{\mathbf{b}}) P(\mathbf{b} \rightarrow \hat{\mathbf{b}}) \quad (7.11)$$

ここで、 $\beta$  は入力ビット数を表し、 $\zeta(\mathbf{b}, \hat{\mathbf{b}})$  はそれぞれの error-event で生じる誤りの個数である。

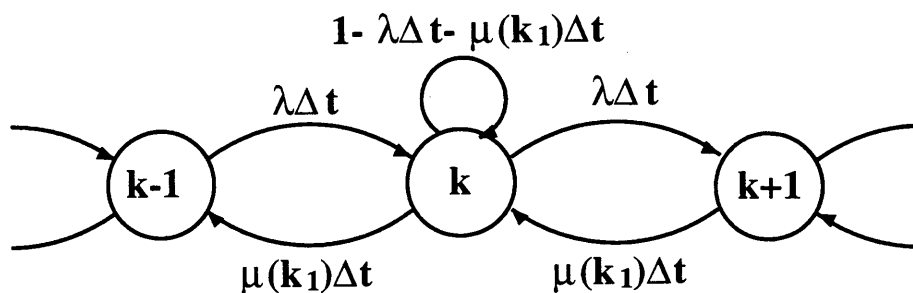


図 7.3: CDMA U-ALOHA の同時送信局数の状態遷移図

#### 7.4 スループット解析

上で求めた誤り率を用い、CDMA U-ALOHA のスループットを求める。パケットが指数間隔で発生しパケット長が固定の場合、パケットの同時送信局数の遷移は待ち行列システムの  $M/D/\infty$  と一致する。一般に固定長パケットの場合、終了率を求める事ができないので、その遷移を表す事ができない。そこで、次の様な近似を用い終了率を定める。まず、パケットの最初のビットに対する干渉数に着目する。これを  $k_1$  とする。これら  $k_1$  の干渉パケットは着目パケット長時間内に必ず終了する。よって、パケットは平均的に  $k_1/T_p$  ( $T_p$  はパケット長時間) で終了する事になり、これより、終了率  $\mu(k) = k_1/T_p$  と求められる [14]。図7.3にパケットの同時送信局数の遷移を示す。これよりセグメント  $h$  でのスループット  $s^{(h)}$  (1パケット時間当たりの平均パケット成功数) は  $M/D/\infty$  の状態遷移確率およびビット誤り率  $P_R(k)$  あるいは  $P_b(k)$ , そしてオフロード  $g^{(h)}$  (1パケット時間当たりの平均パケット生起数) から次のように求められる [14]。

$$s^{(h)} = g^{(h)} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{k_1=0}^{\infty} P_s(k, L_p; k_1) (1 - P_b(k-1)) \quad (7.12)$$

ここで  $P_s(k, L_p; k_1)$  はパケットの1ビット目の干渉パケット数が  $k_1$  で  $L_p - 1$

ビット目まで成功して、 $L_p$  ビット目の干渉パケット数が  $k$  である確率である。

システム全体のスループット  $S$  は各セグメントごとに求めたスループット  $s^{(h)}$  の和で求まる [29], [30]. オファードロード (1パケット時間当たりの平均パケット生起数)  $G$  も各セルのオファードロード  $g^{(h)}$  の和として考える.

$$S = \sum_{h=1}^H s^{(h)}, \quad G = \sum_{h=1}^H g^{(h)} \quad (7.13)$$

## 7.5 数値例

### 7.5.1 不均一トラフィックの影響

パケット長  $L_p = 1000[\text{bits}]$ , 距離による減衰定数  $\epsilon = 4$ , マルチパスの遅延分散  $D_s$  はビット長以下とし, 減衰定数を  $\alpha = 2$ , 平均パス到着数  $\Lambda = 10$ , セル数 90 とした時のスループット特性を図7.4に示す. 拡散率  $N = 1000[\text{bits}]$ ,  $E_b/N_0 = 20[\text{dB}]$  であり, スループット  $S$ , オファードロード  $G$  共に拡散率  $N$  で正規化してある. 実線はトラフィックの中心が基地局にある場合であり, 点線はその中心が4集目のセグメントにある場合である (図7.1参照). 不均一トラフィックでその中心が基地局にある場合,  $\omega$  が小さい程スループットは高くなる. しかし, 中心がそれると特性は一様トラフィックの場合より劣化する. また, 一様トラフィックでパワーコントロールを行うとスループットが高くなる. しかし, オファードロード  $G$  に対しては非常に敏感になるため, パワーコントロールはトラフィックの変動が小さく, またその値も小さい場合に有効である.

### 7.5.2 RAKE の効果

次に RAKE 受信機を用いた場合の特性を図7.5に示す. トラフィックは一様である. RAKE で捕捉するパスの本数  $M$  を増やすに従ってスループットは著しく

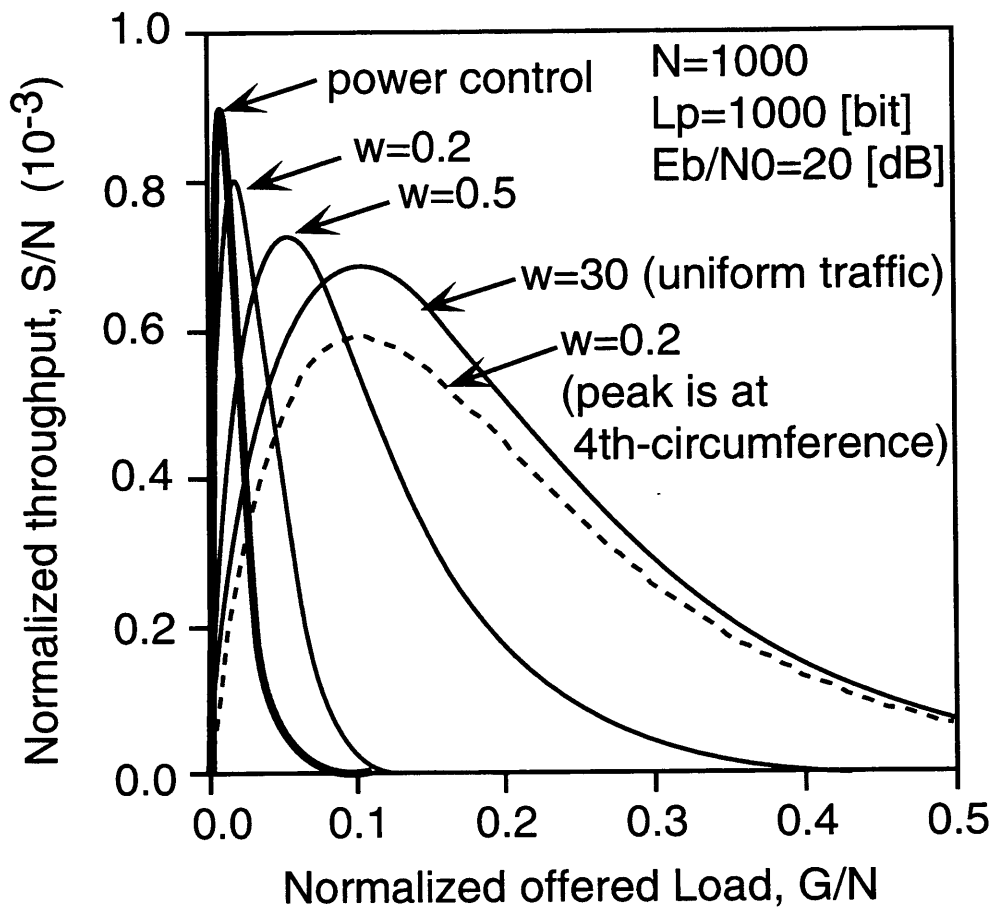


図 7.4: 不均一トラフィックの影響

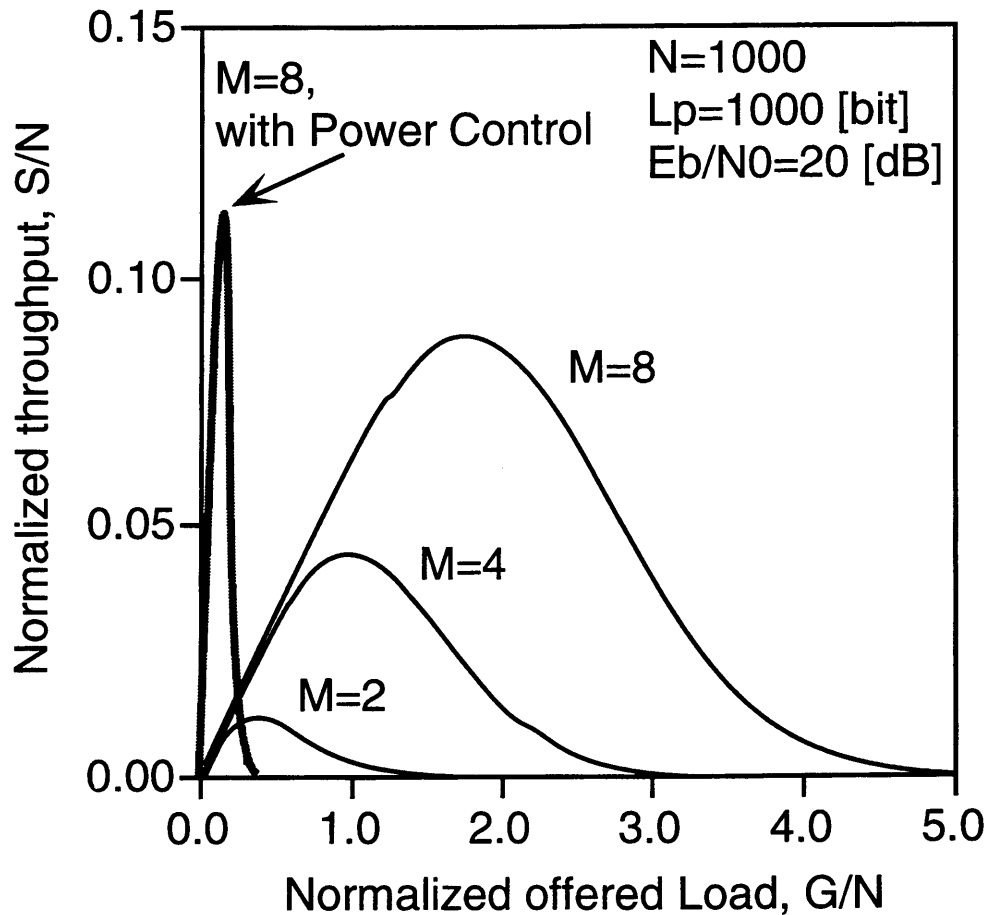


図 7.5: RAKE の効果

向上する。図7.4と比較しても分かるように、その効果はパワーコントロールのみを行った場合より顕著であり、 $M = 8$  の場合その改善は100倍程になる。また、RAKE とパワーコントロールを行った場合の特性も示してあるが、スループットの向上は見られるものの  $G$  の増加に伴い急激にスループットが劣化している。

### 7.5.3 誤り訂正符号の効果

図7.6に誤り訂正符号を用いた場合のスループットを示す。誤り訂正符号はレート  $1/2$ 、拘束長7の畳み込み符号を用い、さらにパワーコントロールも用いてい

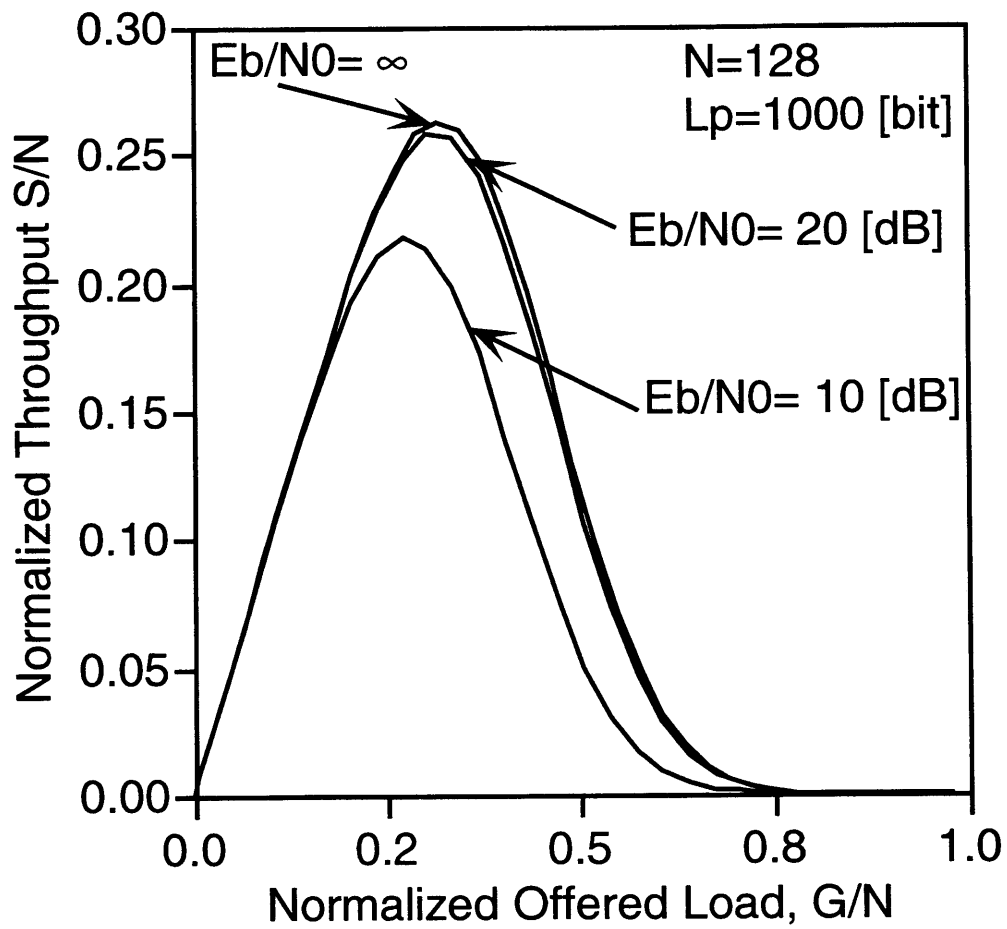


図 7.6: 誤り訂正符号の効果

る。トラフィックは一様である。また、拡散率  $N$  は 128 とし、 $E_b/N_0$  を変化させた場合の特性を示している。これより、 $E_b/N_0$  は 20[dB] 程度で理想的な(干渉のみの)特性となる事がわかる。また、誤り訂正符号によるスループットの改善も非常に大きい。誤り訂正符号は無符号化時、パワーコントロールを用いた場合に顕著であった  $G$  の大きい領域でも比較的良好な特性を示しており、パワーコントロールを用いた場合の欠点を補う効果も確認できる。

## 7.6 まとめ

本稿では、セルラー環境下における CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性をセグメント分割モデルを用いることにより解析的に求めた。その結果、トラフィックに不均一がある場合でも基地局がその中心にある場合、むしろスループット特性が高くなる事、RAKE および誤り訂正符号によるスループットの改善効果が高い事、パワーコントロールは場合によっては用いない方が特性が良い事がわかった。

## 第 8 章

### 総括

#### 8.1 本研究のまとめ

本報告では移動体通信に適用可能な簡便で高効率な無線データ通信の実現を目的として CDMA ALOHA 方式を対象とした新しいアクセス制御方式に関する検討を行った。

まず第2章において、CDMA U-ALOHA 方式の特性解析を行った。マルコフモデル、トラヒック理論を用い、干渉パケット数の変化を出生死滅過程のモデルにあてはめ、これを利用してスループットおよび遅延特性を求めた。その結果、スループット特性は初め増加し、一度最大値をとった後、オフアードロードの増加とともに減少していく、遅延特性はスループットが最大となるオフアードロードの値より大きくなると、急激に悪くなることがわかった。

次に第3章で、パケットの再送を考慮して特性解析を行った。これまで、新規パケットと、パケットの伝送に失敗したためにそのパケットを送りなおす再送パケットとを区別せずに解析を行ってきた。そこで、再送パケットを考慮してスループット特性、遅延特性を求めた。また、システムの安定性を調べるために、期待流動値を用いて特性解析を行った。その結果、安定状態が2つ存在する bi-



stable な状態が存在し、このとき、スループット特性や遅延特性が急激に変化することがわかった。

この結果を基に、第4章ではパケットの送信制御と再送制御の両方を行う OACP を提案し、これを用いたときのスループット特性を解析的に導出した。そして、OACP を用いたシステムが CDMA パケット通信において、スループット特性を最適にすることを示した。また、システムの安定性についても調べ、OACP を用いると bi-stable な状態にならないことを示した。

また、第5章において、アクセス制御を行う際に重要な問題であるアクセス制御遅延による影響を解析的に明らかにした。従来の解析においてはこのアクセス制御遅延は考慮されていなかった。遅延時間を考慮しない解析では、待ち行列システム  $M/D/\alpha/\alpha$  を用いて解析を行なうことができた。ところが、遅延時間が存在する場合このシステムを用いることができない。そこでアクセス制御遅延時間をパケット長時間にたしあわせた疑似パケットを定義し、さらにそのパケットに対する CLSP の新たなスレシヨルド  $\gamma$  を決定した。疑似パケットの到着が待ち行列システム  $M/D/\gamma/\gamma$  に従うことを仮定し、解析を行った。

その結果、アクセス制御遅延がスループット、最適スレシヨルドに強く影響を与え、アクセス制御遅延の大きさによって CLSP のスレシヨルドを最適な値にかえることが必要であることがわかった。

第5章の検討を基に、第6章において、アクセス制御遅延の影響を和らげることのできる MCLSP を提案した。MCLSP とはオフロードの推定値に基づいてアクセス制御を行う方式である。スループット特性および遅延特性を解析的に導出し、アクセス制御が大きくても高いスループット特性を維持できることを示した。MCLSP は伝搬距離が非常に長い静止衛星の場合にも特性の劣化が生じないので、衛星通信のようなアクセス制御遅延が非常に大きくなる場合にふさわしい方式であると言える。

第7章ではセルラー環境下における CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性をセグメント分割モデルを用いることにより解析的に求めた。その結果、トラフィックに不均一がある場合でも基地局がその中心にある場合、むしろスループット特性が高くなる事、RAKE および誤り訂正符号によるスループットの改善効果が高い事、パワーコントロールは場合によっては用いない方が特性が良い事がわかった。

## 8.2 今後の課題

これまで述べてきたように、CDMA ALOHA 方式は、ランダムアクセスの簡便性の利点を維持しつつ、効率の高いパケット通信を実現できる可能性を有するものとして将来の移動体通信、特にモバイル・コンピューティングや移動体マルチメディア通信にとって有望な方式である。また、第4章で述べたように、トラフィックに応じてパケットの送信を制御するアクセス制御方式が特性向上を図るために有効であり、幾つかの方策が提案されている。しかし、これまでは理想化された環境条件のもとでの研究が多く、実際の通信に適用しようとする、問題があるのが現状である。たとえば、第5章で述べたように、アクセス制御遅延が存在すると、特性に劣化が生じてしまう。したがって、このアクセス制御遅延によるより正確にその影響を明らかにすると共に、これを和らげる効果的な方策を検討する必要がある。第6章でアクセス制御遅延の影響を和らげる mclsp について提案を行ったが、まだまだ十分な特性を示したとは言いがたく、よって改良が必要である。

また、移動体通信では、厳しいフェージングの影響を受けるのが通常であり、さらに CDMA では遠近問題が無視できない。CDMA ALOHA 方式についてもこれらの環境下での特性評価とその影響軽減のための対策を検討することが必要

で、特にこれらの環境下でも効率性を維持できるアクセス制御方式を開発することが重要である。以上の2点は、移動体通信における高効率な無線パケット通信を実現するための鍵となるべきものである。

これより今後の課題としては引続き移動体通信に適用可能な簡便で高効率な無線パケット通信の実現を目指して、CDMA ALOHA方式を対象とし、実際に遭遇する環境下で高効率を維持できる新しいアクセス制御方式の確立を目的として次の2点が具体的な検討課題としてあげらる。

- アクセス制御遅延の影響を明らかにすると共に、この影響を緩和できるアクセス制御方式の検討
- フェージングや遠近問題の存在下における特性評価と最適なアクセス制御方式の検討。

## 参考文献

- [1] 小川明, “CDMA 方式と次世代移動体通信システム”, トリケップス, 1995.
- [2] 横山光雄, “スペクトル拡散通信方式,” 科学技術出版社, 1988.
- [3] Michael B. Pursley, “The Role of Spread Spectrum in Packet Radio Networks,” Proceedings of the IEEE, vol.75, no.1, Jan. 1987.
- [4] Norman Abramson: “THE ALOHA SYSTEM-Another alternative for computer communications,” Fall Joint Computer Conference, 1970.
- [5] Herbert Taub and Donald L. Schilling, “Principles of Communication Systems,” McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [6] R. K. Morrow, Jr. and J. S. Lehnert, “Packet Throughput in Slotted ALOHA DS/SSMA Radio Systems with Random Signature Sequences,” IEEE Trans. Commun., vol.40, No.7, pp.1223-30, July 1992.
- [7] D. Makrakis and K. M. S. Murthy, “Spread Slotted ALOHA Techniques for Mobile and Personal Satellite Communication Systems,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.10, No.6, pp.985-1002, Aug. 1992.

- [8] K. Toshimitsu, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "A Novel Spread Slotted Aloha System with Channel Load Sensing Protocol," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.12, No.4, pp.665-672, Aug. 1994.
- [9] Richard D. J. van Nee, Rogier N. van Wolfswinkel, and Ramjee Prasad, "Slotted ALOHA and Code Division Multiple Access Techniques for Land-Mobile Satellite Personal Communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.13, no.2, pp.382-388, Feb. 1995.
- [10] T. Yamazato, T. Sato, H. Okada, K. Nishida, M. Katayama, A. Ogawa, "Performance Analysis of CDMA ALOHA," *ISCOM '95*, pp.434-441, Dec. 1995.
- [11] M. -S. Chen, R. Boorstyn, and A. Kershenbaum, "Throughput analysis of multiple hop packet radio networks using a code division multiple access(CDMA) protocol," *22nd Ann. Allerton Conf.*, pp.20-29, 1984.
- [12] E. S. Sousa and J. A. Silvester, "Determination of optimum transmission ranges in a multi-hop spread spectrum network," *IEEE MILCOM*, pp.25.3.1-25.3.6, Oct. 1985.
- [13] K. Joseph and D. Raychaudhuri, "Stability analysis of asynchronous random access CDMA systems," *GLOBECOM*, pp.48.1.1-48.1.7, Dec. 1986.
- [14] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, "Throughput Analysis of DS/SSMA Unslotted Aloha with Channel Load Sensing," *GLOBECOM '95*, vol.2, pp.1492-96, 1995.

- [15] 岡田 啓, 佐藤 毅, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, “固定長パケット CDMA Unslotted ALOHA 方式の近似法に関する一検討,” 信学技法, SST96-61, pp.13-18, Dec. 1996.
- [16] H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, “CDMA Unslotted ALOHA Systems with Packet Retransmission Control,” IEICE Trans., vol.E79-A, No.7, pp.1004-1010, July 1996.
- [17] M. Yin and V. O. K. Li, “Unslotted CDMA with Fixed Packet Lengths,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.8, No.4, pp.529-541, May 1990.
- [18] A. H. Abdelmonem and T. N. Saadawi, “Performance Analysis of Spread Spectrum Packet Radio Network with Channel Load Sensing,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.7, No.1, pp.161-166, Jan. 1989.
- [19] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, “Effects of The Access Timing Delay on CDMA Unslotted ALOHA with Channle Load Sensing,” IEICE Transactions, E79-B, No.9, pp.1339-1345, Sep. 1996.
- [20] A. Ogawa, T. Yamazato, M. Katayama, K. Toshimitsu, “A New Access Protocol for Asynchronous Packet CDMA Systems,” ISITA '94, pp.917-920, 1994.
- [21] Aydano B.Carleial and Martin E.Hellman, “Bistable Behavior of ALOHA-Type Systems,” IEEE Trans. Commun., vol.COM-23, No.4, pp.401-410, April 1975.
- [22] Y. -C. JENQ, “On the Stability of Slotted ALOHA Systems,” IEEE Trans. Commun., vol.COM-28, No.11, pp.1936-1939, Nov. 1980.

- [23] Y. -C. JENQ, "Optimal Retransmission Control of Slotted ALOHA Systems," IEEE Trans. Commun., vol.COM-29, No.6, pp.891-895, June 1981.
- [24] Jack M. Holtzman, "A Simple, Accurate Method to Calculate Spread-Spectrum Multiple-Access Error Probabilities," IEEE Trans. Commun., Vol.40, No.3, March 1992.
- [25] L. Kleinrock, "Queueing Systems, vol. 1," New York : Wiley-Inter-Science, 1975.
- [26] Ming Yin and Victor O. K. Li : "Unslotted CDMA with Fixed Packet Lengths," IEEE J. Sel. Areas Commun. , vol. 8, No. 4, pp. 529-541, May 1990
- [27] Michael B. Pursley : "Performance Evaluation for Phase-Coded Spread Spectrum Multiple-Access Communication\_Part 1 System Analysis, " IEEE Trans. Commun. , vol. COM\_25, No. 8, August 1977
- [28] A. Jamalipour,et.al:"Throughput Analysis of Spread-Slotted ALOHA in LEO Satellite Communication Systems with Nonuniform Traffic Distribution," IEICE Trans. on Commun., Vol.E78-B, No.12, pp.1657-1665 (1995-12)
- [29] A. Ogawa,et.al:"Throughput of CDMA Unslotted-ALOHA System in Cellular Environment," Proc. of WMWCC'96, (1996-9)
- [30] 西田,et.al: "遠近問題とフェージングを考慮したCDMA ALOHA方式のスループット特性についての一考察,"1996年電子情報通信学会総合大会, vol.SA-5-4 (1996-3)

- [31] T. Yamazato, et. al: "Performance Analysis of DS/SSMA with Error Correcting Code in Rayleigh Fading Channel," IEEE GLOBECOM'95, pp.1121-1125, (1995-11)



## 研究実績

1. A. Jamalipour, M. Katayama, T. Yamazato, A. Ogawa, "Throughput Analysis of Spread-Slotted ALOHA in LEO Satellite Communication System with Nonuniform Traffic Distribution," IEICE Transactions, E78-B, pp.1657-1665, Dec. 1995.
2. A. Jamalipour, M. Katayama, T. Yamazato, A. Ogawa, "Adaptive Transmit Permission Control on Spread Slotted Aloha Applicable in LEOS Systems," IEICE Transactions, E79-B, pp.257-265, March 1996.
3. H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "CDMA Unslotted ALOHA Systems with Packet Retransmission Control," IEICE Transactions, E79-A, pp1339-1345, July 1996.
4. H. Okada, M. Saito, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "CDMA ALOHA Systems with Modified Channel Load Sensing Protocol for Satellite Communications," IEICE Transactions, E79-A, pp.2035-2042, Dec. 1996.
5. A. Jamalipour, M. Katayama, T. Yamazato, A. Ogawa, "Transmit Permission Control on Spread ALOHA Packets in LEO Satellite Systems,"

- IEEE Journal on Selected Areas in Communications, JSAC-14, pp.1748-1757, Dec. 1996.
6. T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Effects of The Access Timing Delay on CDMA Unslotted ALOHA with Channle Load Sensing," IEICE Transactions, E79-B, pp.1339-1345, Sep. 1996.
  7. M. Saito, H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Throughput Improvement on CDMA Slotted ALOHA System," IEICE Transactions, E80-B, pp.74-80, Jan. 1997.
  8. H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "A Novel Access Control Method for CDMA Unslotted ALOHA Systems," MDMC '96, pp.391-395 (1996.7.18-20).
  9. H. Okada, M. Saito, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Performance Evaluation of CDMA ALOHA Systems with Modified Channel Load Sensing Protocol," IEEE GLOBECOM '96, pp.1291-1295 (1996.11.18-22).
  10. T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Performance Degradation due to the Access Timing Delay on CDMA Unslotted ALOHA with Channel Load Sensing," IEEE ICUPC '96, pp.111-114 (1996.9.29-10.2).
  11. M. Saito, H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "Throughput Improvement on CDMA Slotted ALOHA System by Modified Channel Load Sensing Protocol," PIMRC '96, pp.103-107 (1996.10.15-18).

12. A. Ogawa, T. Yamazato, K. Nishida, H. Okada, T. Sato, M. Katayama, "Throughput of CDMA Unslotted-ALOHA System in Cellular Environment," WMWCC '96, pp.23-24 (1996.9.17-20).
13. 西田邦生, 岡田啓, 佐藤毅, 山里敬也, 片山正昭, 小川明, "遠近問題とフェージングを考慮した CDMA ALOHA 方式のスループット特性についての一考察," 1996 年電子情報通信学会総合大会, vol.SA-5-4, pp.472 (1996.3).
14. 山里敬也, 浅井裕介, ジャマリプール・アバス, 片山正昭, 小川明, "セルラー環境での CDMA ALOHA 方式のスループット解析," 第 19 回情報理論とその応用シンポジウム, pp.313-316 (1996.12).