

# CDMA ALOHA 方式における 最適アクセス制御方式の研究

|         |         |
|---------|---------|
| 名古屋大学図書 |         |
| 和       | 1292118 |

岡田 啓

1998 年 12 月 25 日

# もくじ

|          |                           |           |
|----------|---------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>序論</b>                 | <b>1</b>  |
| 1.1      | 移動体通信の動向                  | 1         |
| 1.2      | CDMA ALOHA 方式における問題点と課題   | 5         |
| 1.3      | 研究の目的                     | 6         |
| 1.4      | 本論文の構成                    | 7         |
|          | 参考文献                      | 9         |
| <b>2</b> | <b>パケット無線通信</b>           | <b>12</b> |
| 2.1      | 回線交換方式とパケット交換方式           | 12        |
| 2.2      | Pure (Unslotted) ALOHA 方式 | 12        |
| 2.3      | Slotted ALOHA 方式          | 15        |
| 2.4      | CSMA 方式                   | 16        |
| 2.5      | 数値例                       | 20        |
|          | 参考文献                      | 22        |
| <b>3</b> | <b>CDMA 方式</b>            | <b>23</b> |
| 3.1      | 多元接続方式                    | 23        |
| 3.2      | スペクトル拡散通信                 | 24        |
| 3.2.1    | スペクトル拡散通信の概要              | 25        |
| 3.2.2    | ビット誤り率特性                  | 26        |
| 3.2.3    | ビット誤り率の数値例                | 30        |
| 3.3      | CDMA 方式の効率                | 32        |
| 3.3.1    | 周波数利用効率                   | 32        |
| 3.3.2    | 回線容量                      | 35        |
|          | 参考文献                      | 39        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>4</b> | <b>CDMA ALOHA 方式</b>                         | <b>41</b> |
| 4.1      | はじめに . . . . .                               | 41        |
| 4.2      | システムモデル . . . . .                            | 42        |
| 4.3      | CDMA Slotted ALOHA 方式 . . . . .              | 43        |
| 4.4      | CDMA Unslotted ALOHA 方式 . . . . .            | 44        |
| 4.4.1    | 指数長パケット . . . . .                            | 44        |
| 4.4.2    | 固定長パケット . . . . .                            | 47        |
| 4.4.3    | ユーザ数有限 . . . . .                             | 50        |
| 4.5      | 数値例 . . . . .                                | 52        |
| 4.6      | まとめ . . . . .                                | 56        |
|          | 参考文献 . . . . .                               | 58        |
| <b>5</b> | <b>パケットの再送を考慮に入れた特性解析</b>                    | <b>60</b> |
| 5.1      | はじめに . . . . .                               | 60        |
| 5.2      | システムモデル . . . . .                            | 61        |
| 5.3      | 状態占有確率とスループット, 遅延特性 . . . . .                | 61        |
| 5.4      | 期待流動値とシステムの安定性 . . . . .                     | 63        |
| 5.5      | 数値例 . . . . .                                | 65        |
| 5.6      | まとめ . . . . .                                | 68        |
|          | 参考文献 . . . . .                               | 69        |
| <b>6</b> | <b>パケットのアクセス制御</b>                           | <b>70</b> |
| 6.1      | はじめに . . . . .                               | 70        |
| 6.2      | アクセス制御方式 . . . . .                           | 71        |
| 6.2.1    | パケットの送信制御 (CLSP) . . . . .                   | 72        |
| 6.2.2    | パケットの再送制御 (ORC) . . . . .                    | 73        |
| 6.2.3    | 最適アクセス制御プロトコル (OACP) . . . . .               | 74        |
| 6.3      | 特性解析 . . . . .                               | 75        |
| 6.4      | CDMA パケット無線通信におけるスループット特性の上限と OACP . . . . . | 79        |
| 6.4.1    | スループット特性の上限値 . . . . .                       | 79        |
| 6.4.2    | OACP のパラメータの決定方法 . . . . .                   | 80        |
| 6.5      | 数値例 . . . . .                                | 81        |
| 6.6      | まとめ . . . . .                                | 85        |
|          | 参考文献 . . . . .                               | 86        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>7</b> | <b>アクセス制御遅延の影響とその方策</b>                          | <b>88</b>  |
| 7.1      | はじめに . . . . .                                   | 88         |
| 7.2      | アクセス制御遅延による影響 . . . . .                          | 90         |
| 7.3      | Modified Channel Load Sensing Protocol . . . . . | 91         |
| 7.3.1    | MCLSP の原理 . . . . .                              | 91         |
| 7.3.2    | 特性解析 . . . . .                                   | 93         |
| 7.3.3    | 数値例 . . . . .                                    | 95         |
| 7.4      | アクセス制御遅延存在下の OACP . . . . .                      | 97         |
| 7.5      | まとめ . . . . .                                    | 99         |
|          | 参考文献 . . . . .                                   | 100        |
| <b>8</b> | <b>待時式 CDMA ALOHA 方式</b>                         | <b>102</b> |
| 8.1      | はじめに . . . . .                                   | 102        |
| 8.2      | 待時式 CDMA Slotted ALOHA 方式 . . . . .              | 103        |
| 8.2.1    | システムモデル . . . . .                                | 104        |
| 8.2.2    | 特性解析 . . . . .                                   | 105        |
| 8.2.3    | 数値例 . . . . .                                    | 108        |
| 8.3      | 待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式 . . . . .            | 112        |
| 8.3.1    | システムモデル . . . . .                                | 113        |
| 8.3.2    | 特性解析 . . . . .                                   | 114        |
| 8.3.3    | 数値例 . . . . .                                    | 121        |
| 8.4      | CLSP を用いた待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式 . . . . .   | 126        |
| 8.4.1    | システムモデル . . . . .                                | 126        |
| 8.4.2    | 数値例 . . . . .                                    | 127        |
| 8.5      | まとめ . . . . .                                    | 130        |
|          | 参考文献 . . . . .                                   | 132        |
| <b>9</b> | <b>総括</b>  | <b>134</b> |
| 9.1      | 本研究のまとめ . . . . .                                | 134        |
| 9.2      | 今後の展開 . . . . .                                  | 136        |
|          | <b>謝辞</b>  | <b>137</b> |
|          | <b>付録</b>  | <b>138</b> |
| A.1      | 待ち行列理論 . . . . .                                 | 138        |



|                    |     |
|--------------------|-----|
| A.2 記号一覧 . . . . . | 142 |
| 業績一覧               | 145 |

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 移動体通信の動向

シャノンの情報理論から今年で 50 年、この半世紀の間の情報産業の発展には目覚ましいものがある。今日では、情報というものが我々の生活に必要不可欠なものとなってきた。このような時代の情報化に伴い、情報を伝達する通信の分野も急速な発展を成し遂げてきた。

移動体通信の分野では、携帯電話や PHS、ポケットベルの需要がここ数年倍増している。郵政省の発表によると、1998 年 5 月末時点の我が国における加入者数は上記 3 サービス合わせて 5,000 万人を突破した (図1.1)。このような動きは世界各国でもみられ、さらに今後も加入者数は増加するものと予想される [1] ~ [5]。

一方、データ通信の分野でもインターネットの目覚ましい普及により、全世界 140ヶ国の人々が利用する時代になってきた。郵政省が行った「インターネットビジネスに関する研究会」報告によれば、我が国のインターネットの利用者は、1997 年には 1,155 万人に達した。また、利用世帯数は 287 万世帯 (世帯普及率 6.4%) となっている。さらに、2005 年における利用者数は 4,136 万人と、97 年の 3.6 倍に拡大するほか、利用世帯数は 1,929 万世帯と現在の携帯電話並に半数近い世帯でインターネットが導入されると予想している (表1.1)。

これらのモバイル通信加入者およびデータ通信ユーザの急増と同時に、小型で軽量かつ安価なコンピュータや PDA が普及し、携帯電話等とコンピュータを組み合わせたモバイル・コンピューティングを実現する環境も急速に整いつつある。このため、今後、携帯電話等を利用した無線データ通信の需要が更に高まるものと予想される [6] ~ [9]。

現在、我が国でモバイル・コンピューティングに用いられている通信方式として、デジタル携帯電話に用いられている Personal Digital Cellular telecommunication

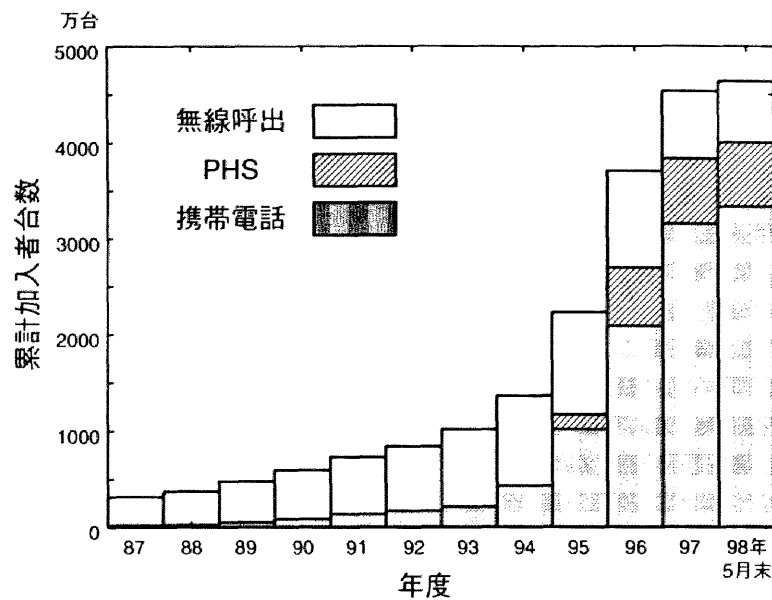


図 1.1: 我が国の移動電気通信事業加入数の推移

表 1.1: 情報通信メディアの普及予想

|         |       | 1997 年  | 2005 年  | 2010 年        |
|---------|-------|---------|---------|---------------|
| インターネット | 利用者数  | 1,155 万 | 4,136 万 | 4,459 万       |
|         | 利用世帯数 | 287 万   | 1,929 万 | 2,755 万       |
|         | 世帯普及率 | 6.4%    | 41.8%   | 54.9%         |
| 携帯電話    | 普及率   | 46.0%   | —       | 46.9% ~ 51.9% |

system (PDC) や Personal Handyphone System (PHS) がある。これらは通信をはじめる前に回線を確保してから通信を行う回線交換方式が採用されている。ここでデータ通信を行おうとする場合、伝送する情報は音声等と比べ非常に短くバースト的に発生するのが通常である。データ通信を回線交換方式で行うと、実際に情報がながれていないときにも無線回線を独占してしまう。このため、全体の通信時間に比べて実際のデータ伝送時間が短い間欠型通信では無線回線の使用効率は極端に悪くなる。また音声用回線をデータ通信に流用しているため、PDC では 9.6kbit/s, PHS では 29.2kbit/s の通信速度が限度である。

一方、回線交換方式に対し、送りたい情報を宛先などの情報を付加してパケット化して送るパケット交換方式というのがある。パケット交換方式では、パケット単位

表 1.2: モバイル環境でデータ通信ができる通信サービスのデータ伝送速度の推移

| 主なデータ通信向けサービス             | 現在                                    | 1999年    | 2000年         | 2001年     |
|---------------------------|---------------------------------------|----------|---------------|-----------|
| ISDN公衆電話 (回線交換型)          | 64kbps                                |          |               |           |
| PHS (PIAFS) (回線交換型)       | 29.2kbps                              |          | 約64kbps       |           |
| PDC携帯電話                   | (回線交換型)                               | 9.6kbps  |               |           |
|                           | (パケット交換型)                             | 28.8kbps |               |           |
| cdmaOne 携帯電話              | (回線交換型)                               | 14.4kbps |               |           |
|                           | (パケット交換型)                             | 64kbps   |               |           |
| 衛星携帯電話 (回線交換型)            | 2.4kbps (イリジウム)<br>9.6kbps (グローバルスター) |          | 2.4kbps (ICO) |           |
| IMT-2000 (回線交換型, パケット交換型) |                                       |          |               | 144kbps以上 |

データ速度  9.6kbps以下  14.4k~29.2kbps  64kbps以上

に待ち合わせが可能となるため、複数のユーザで無線回線を共用することができ、間欠型通信においても無線回線の使用効率を高くすることができる[10]～[14]。また、このような場合、回線交換方式では全体の通信時間に対して課金されるため通信料金が上がるが、パケット交換方式では、実際のデータ量に見合った課金方式、つまり情報量に対して課金されるので、安価にサービスを受けることができる。そこで、モバイルコンピューティングにおけるユーザの利便性、周波数利用効率の向上を目的としてPDCパケット通信(PDC-P)のサービスが1997年3月より始まった[9],[15]。このPDC-Pにより、最大28.8kbit/sの通信速度が可能となった。この他にも、今後、データ通信のためにパケット交換方式を用いたサービスが始まると予測される(表1.2)[6]。

ところで、移動体通信の急速な需要増加のために、現行のシステムではほぼ通信容量の限界にまで達してきている。また、音声やデータ、画像等が伝送できるマルチメディア移動体通信への要求が高まっている。さらに、世界中どこでも使えるようなグローバルなシステムも要求されている。アナログ方式を第一世代、今日のPDCやPHSなどのデジタル方式を第二世代の移動通信方式とすると、このようなマルチメディアに対応し、世界規模でのローミングを可能とするデジタル移動通信方式は第三世代方式とよばれる。この第三世代方式は国際電気通信連合-無線通信部門(ITU-R)でIMT-2000(International Mobile Telecommunications - 2000)と名称をつけら

れ、標準化への検討が進められている [3] ~ [6], [16], [17].

また、陸上の移動体通信のみではなく、衛星を用いた移動体通信に関しても注目を浴びている [18] ~ [20]. これは、経済的な理由などで陸上移動体通信の施設が難しい地域や震災などの災害時等に有効であり、また世界中どこでも利用できるのも大きな魅力の一つである。現在、衛星通信の中でも特に注目されているのが、低軌道周回衛星 (Low Earth Orbit Satellite: LEO Satellite) や中軌道周回衛星 (Medium Earth Orbit Satellite: MEO Satellite) を用いたシステムである。これらの衛星は静止衛星 (Geostationary Orbit Satellite: GEO Satellite) の約 36,000km に比べ非常に低い高度を航行している。LEO では、1,500km 以下、MEO では 10,000km 前後の高度である。1998 年 11 月にサービスが始まった Iridium では、高度 780km に打ち上げられた 66 機の衛星を用いて全世界をカバーする。

このように、地上系、衛星系を問わず次世代移動体通信方式に関する検討が盛んに行われている。そして、次世代通信方式の最も有力な候補として、符号分割多元接続 (Code-Division Multiple-Access: CDMA) 方式が注目を集めている。アナログ方式で用いられた周波数分割多元接続 (Frequency-Division Multiple-Access: FDMA) は、周波数帯域を分割して多元接続を行なう。また、現在のデジタル携帯電話や PHS で用いられている時分割多元接続 (Time-Division Multiple-Access: TDMA) では、同じ周波数を複数のユーザで時間的に分割して共有する。これに対し CDMA 方式では、各ユーザは同じ時間および周波数を共有し、各ユーザに割り当てられる符号によって識別される。このため、CDMA 方式では周波数帯域とか時間長といった明確な限界がなく、信号品質の劣化のみによって回線数が制限され、FDMA 方式や TDMA 方式とは大きく異なった特徴を有している [21] ~ [27].

これまでに実用化された CDMA 方式を用いた移動体通信システムに米国 Qualcomm 社によって開発された IS-95 がある。これは cdmaOne ともよばれ、米国のみならず、韓国、香港等で採用されており、日本においても 1998 年 7 月にサービスが始まっている。そして、これを発展させた cdma2000 が IMT-2000 の候補に挙がっている。また、IMT-2000 の候補として日本では広帯域 CDMA(W-CDMA) という方式が提案されている [28]. 本方式では 144k ~ 2Mbit/s の伝送速度が得られ、2001 年を目処に実用化が進められている。衛星通信においても、グローバルスターが CDMA 方式を採用する。

CDMA 方式では、同時に送信している他ユーザは干渉 (多元接続干渉) として働く。このため、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[13],[14]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。従って、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マルチメディア無線通信にとって有望な方式である。

## 1.2 CDMA ALOHA 方式における問題点と課題

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。これは、“graceful degradation (緩やかな品質劣化)”と呼ばれている。これまで、待ち行列理論を適用することによって、パケット交換ネットワークはさまざまな研究がなされてきた[12],[29]。しかしながら、これらは有線系のネットワークや無線系であっても狭帯域のものを前提にしていたために、伝搬誤りを考慮に入れていなかったり、同時に1つもパケットが送信されていない、1つしか送信されていない、2つ以上送信されているために衝突が起こるという3状態しか考えていない。このため、緩やかな品質劣化という特徴を考慮するためには単純に待ち行列理論を適用することはできない。また、ランダムアクセスが可能であり、同時に送信されているパケットの数は時々刻々と変化することも、特性解析を複雑にする原因となっている。これまで、CDMA ALOHA 方式に関して解析を行った研究もあるが、様々な仮定を用いて CDMA の特徴である緩やかな品質劣化や ALOHA 方式の特徴であるランダムアクセス性が無視されていた[30]～[32]。このため、CDMA ALOHA 方式の特徴を考慮した特性解析が望まれている。

そこで、小川研究室の佐藤氏がこれらの特徴を考慮して、ユーザ数が無限、パケット長が指数分布に従う場合について、同時送信局数の遷移をマルコフ連鎖モデルで表すことにより解析を行っている[33]。さらに、この手法を拡張してパケット長が固定長の場合についても解析している[34]。パケット長が固定長の場合、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り、パケットの終了率を一意に求めることができない。そこで、パケット長は固定長なのでパケットの頭の部分の干渉パケットが必ずパケット長時間内に終了することを利用して終了率を定めている。しかしながら、この手法ではマルコフ性が成り立たず、パケットの発生がより複雑なシステムを解析することが困難である。

さらにこれまでの解析では、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の影響が考慮されていなかった。しかし、実際には新しく生成されるパケット(新規パケット)と再送パケットとを区別して解析を行うことが必要である。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することが可能であるからである。

また、CDMA ALOHA 方式には同時に複数のパケットを送ることができるが、同時に送られているパケット数が多くなりすぎると、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同時に送信されているパケット全てに及ぶ。このため、高トラヒック時は特性の劣化が激しい。そこで、トラヒ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。特性向上を図る方策として、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) [35], [36] がある。CLSP を用いることにより、アクセス制御を行わない場合より特性向上を図ることができるものの、まだまだ特性向上の余地が残されている。また、パケットの再送に関しても考慮されていない。

さらに、これまでの研究は理想に近い状況下での特性であり、より現実的な状況を想定することが望まれる。例えばアクセス制御遅延による影響がある。アクセス制御遅延とは、パケットの伝搬遅延や処理時間に要する遅延で、アクセス制御を行うとき、この遅延時間の分だけ制御に関する情報が古くなってしまい、特性劣化の原因になってしまう [37]。また、待時式システムの適用の課題もある。これまで、解析の簡単さのためにパケットの送信要求が発生したらそのパケットを直ちに送信する、または呼損として扱うという即時式のシステムを仮定してきた。しかしながら、現実的なシステムでは、発生したパケットをいったんバッファに蓄えてから送信するという待時式システムを想定することが必要である。その上、このシステムでは各ユーザがバッファを有することで呼損率を低くすることができ、さらにユーザのみによる自律的な制御によって特性向上をはかることができる可能性を持っている。この他にも、セルラーシステムを想定した場合や、マルチメディア通信を行う場合等が挙げられる。このように、より現実的な状況下でシステムの検討を行う必要性がある。

### 1.3 研究の目的

本論文の目的は、パケット通信におけるもっとも基本的なランダムアクセスプロトコルである ALOHA 方式に CDMA を適用した CDMA ALOHA 方式の特性解析お

よび特性評価を行い、さらに特性向上を図る方策を提案することにある。具体的に本論文において以下の3つの点について検討を行う。

1. CDMA ALOHA 方式の特徴を考慮して、本方式の特性解析、特性評価を行う。新たな方法で終了率を定めることにより、パケット長が固定長であるようなシステムで、ユーザ数が無限、有限の両方の場合について解析する。さらに、パケットの再送を考慮して特性解析を行う。
2. CDMA ALOHA 方式において特性向上を図る方策の提案を行う。ここで、システムの簡単さやランダムアクセス性を失わずに、高能率化を図ることができるアクセス制御方式を目指す。さらに、提案方式がスループット特性に関し最適になることを示す。
3. より現実的な状況を想定する。ここでは特に以下の2つについて検討する。
  - (a) アクセス制御遅延の影響を明かにし、またこの影響を和らげる方策の検討を行う。
  - (b) 待時式システムの特性解析、特性評価を行う。そして、バッファを有することが特性にどのような影響を与えるのかを調べる。

## 1.4 本論文の構成

本論文は次のような内容で構成される。

第2章では、CDMA を用いていないパケット通信について簡単に説明する。ここでは、特に基本的な Pure ALOHA 方式、Slotted ALOHA 方式、および CSMA 方式について、システム構成や特性解析について記述する。

第3章では、CDMA 方式について記述する。まずは、各多元接続方式について簡単に述べ、そして CDMA 方式の基となっているスペクトル拡散通信の概要や特性について示す。

第4章では、CDMA ALOHA 方式の特性解析を行う。待ち行列理論を用い、チャンネルに同時に伝送されているパケットの数をマルコフの状態遷移図で表すことにより、同時送信局数の遷移を考慮して解析する。また、同時送信局数の関数で表されるビット誤り率を導入することで、CDMA 方式の特徴である緩やかな品質劣化を考慮する。始めに、Slotted ALOHA 方式に CDMA を適用した CDMA Slotted ALOHA 方式の特性解析を行う。次に Pure ALOHA 方式に CDMA を適用した CDMA Unslotted ALOHA 方式の特性解析を行う。まずはユーザ数が無限、パケット長が指数分布に従



う場合について解析する。そしてこれを発展させて、パケット長が固定長の場合についても検討を行う。ここでは、マルコフ性が成立するように終了率を定める手法を提案することで特性解析を行う。さらに、ユーザ数有限を仮定した場合についても、提案手法を用いてスループット特性を解析的に求める。

第5章では、新規パケットと再送パケットとを区別して解析を行う。全ユーザに対してパケットの再送を行っているユーザの割合をシステムの状態と定義し、この状態の占有確率を求めることで解析を行う。さらに、システムの安定性についても調べる。このために、システムの安定性を示す指標として期待流動値を導入する。そして、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の両方が存在し、統計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という双安定な状態が存在することを示す。

第6章では、特性の向上を図るためのアクセス制御方式について検討する。まず始めに、同時に送信されるパケットの数がある値以下に抑えることができる Channel Load Sensing Protocol (CLSP) について検討する。また、パケットの再送を制御することにより特性の向上を図る Optimal Retransmission Control (ORC) を提案する。そして、これら両方を用いた Optimal Access Control Protocol (OACP) を提案する。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。

第7章では、アクセス制御遅延の影響を無視できない状況を想定してシステムの検討を行う。まずはアクセス制御遅延により CLSP の特性がどのような影響を受けるかを示す。そしてこのアクセス制御遅延の影響を和らげることができる Modified Channel Load Sensing Protocol (MCLSP) を提案する。また、OACP が比較的アクセス制御遅延が小さい場合に有効であることを示す。

第8章では、待時式 CDMA ALOHA 方式の特性解析、特性評価を行う。まず始めに、制限付つば占有モデルに基づく線形近似法を用いることにより、待時式 CDMA Slotted ALOHA 方式の特性解析を行う。次に、2 マルコフ連鎖モデルを提案し、待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式の特性解析を行う。そして、スループット特性、呼損率特性、遅延特性の観点から特性評価を行い、各ユーザがバッファを備えることにより特性にどのような変化が生じるかを明かにする。また、CLSP を用いた待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式についても計算機シミュレーションを用いることにより特性評価を行う。そして、この方式が OACP のスループット特性に近付くことを示す。

本論文の総括を第9章で行い、今後の課題についても述べる。

## 第 1 章の参考文献

- [1] 郵政省, 通信白書 平成 10 年版, 1998 年.
- [2] R. Kohno and M. Nakagawa, "International cooperative research and development of wireless personal communications in Asian-Pacific countries," IEEE Personal Commun., vol.4, no.2, pp.6-12, April 1997.
- [3] 小川明他, マルチメディア時代のワイヤレスコミュニケーション, 平成 8 年度電子情報通信学会東海支部専門講習会資料, 1997 年 2 月.
- [4] 羽鳥光俊, "パーソナル移動通信小特集 – パーソナル移動通信の展望," 電子情報通信学会誌, vol.78, no.2, pp.122-126, 1995 年 2 月.
- [5] 本間光一, 加藤修, "欧米における技術動向," 電子情報通信学会誌, vol.78, no.2, pp.173-178, 1995 年 2 月.
- [6] 杉山泰一, "モバイル通信 2000 年への展望," 日経コミュニケーション, 1 月 5 日号, no.261, pp.129-137, 1998 年 1 月.
- [7] 水野忠則, 太田賢, "モバイルコンピューティングの現状と将来像," 電子情報通信学会誌, vol.80, no.4, pp.318-323, 1997 年 4 月.
- [8] 杉山泰一, "高速モバイル・データ通信始動," 日経コミュニケーション, 5 月 5 日号, no.245, pp.54-74, 1997 年 5 月.
- [9] 大貫雅史他, "移動パケット通信システム特集 – システム概要," NTT DoCoMo テクニカル・ジャーナル, vol.5, no.2, pp.6-9, 1997 年 7 月.
- [10] 奏 正人, 山内 雪路, パケット通信ハンドブック, CQ 出版社, 1987 年.
- [11] 奏 正人, 山内 雪路, パケット無線ネットワーク, CQ 出版社, 1990 年.
- [12] L. Kleinrock, Queueing systems, vol.2: Computer applications, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.

- [13] N. Abramson, "The ALOHA system-Another alteernative for computer communications," Fall Joint Computer Conference, pp.281-285, 1970.
- [14] H. Taub and D. L. Schilling, Principles of communication systems, McGrw-Hill Book Company, 1986.
- [15] 大貫雅史, 小林勝美, 永田清人, 村瀬淳, "PDC パケット通信方式," 電子情報通信学会誌, vol.81, no.3, pp.253-258, 1998 年 3 月.
- [16] 渡辺文夫, 奏正治, 佐々木秋穂, "IMT-2000 の無線方式標準化プロセス," 電子情報通信学会誌, vol.81, no.5, pp.473-478, 1998 年 5 月.
- [17] 三宅常之, "次世代移動体通信システム IMT-2000 の実像," 日経エレクトロニクス, 2 月 23 日号, no.710, pp.47-54, 1998 年 2 月.
- [18] 藤川雅朗, "衛星で話そう," 日経コミュニケーション, 1 月 15 日号, no.214, pp.86-101, 1996 年 1 月.
- [19] 藤川雅朗, 吉野次郎, "インターネットは衛星で進化する," 日経コミュニケーション, 9 月 1 日号, no.253, pp.92-113, 1997 年 9 月.
- [20] 小野寺正, 高橋康文, 篠永英之, 上野晋, "移動体衛星通信サービス," 電子情報通信学会誌, vol.80, no.4, pp.392-398, 1996 年 4 月.
- [21] 小川明他, CDMA 方式と次世代移動体通信システム, トリケップス, 1995 年.
- [22] 小川明他, IS-95 ベース CDMA システム, トリケップス, 1998 年.
- [23] 深沢敦司, 瀧澤由美, 羽島光俊, "スペクトル拡散通信の基礎と移動体通信への応用," 電子情報通信学会誌, vol.81, no.1, pp.51-59, 1998 年 1 月.
- [24] 山里敬也他, CDMA の基礎とシステム技術, JIEC セミナ資料, 1997 年 3 月.
- [25] K. S. Gilhousen, M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley, "On the capacity of a cellular CDMA system," IEEE Trans. Vehic. Technol., vol.40, no.2, pp.303-312, May 1991.
- [26] J. G. Proakis, Digital communications – third edition, McGrw-Hill, 1995.
- [27] A. J. Viterbi, CDMA : Principles of spread spectrum communication, Addison Wesley, 1995.

- [28] Association of Radio Industries and Businesses (ARIB), Japan's proposal for candidate radio transmission technology on IMT-2000 : W-CDMA, June 1998.
- [29] L. Kleinrock, *Queueing systems, vol.1: Theory*, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.
- [30] 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.
- [31] E. S. Sousa and J. A. Silvester, "Determination of optimum transmission ranges in a multi-hop spread spectrum network," IEEE MILCOM'85, vol.2, pp.449-454, Oct. 1985.
- [32] D. M. Lim and H. S. Lee, "Throughput-delay and stability analysis of an asynchronous spread spectrum packet radio network," IEEE Trans. Vehic. Technol., vol.41, no.4, pp.469-478, Nov. 1992.
- [33] 佐藤 毅, 利光 清, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "熱雑音を考慮した Spread Unslotted Aloha 方式のスループット解析," 電子情報通信学会技術研究報告, SST94-9, pp.25-30, 1994 年 6 月.
- [34] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, "Throughput analysis of DS/SSMA unslotted aloha with fixed packet lengths," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.14, no. 4, pp.750-756, May 1996.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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 Trans., vol.E79-B, no.9, pp.1339-1345, Sep. 1996.

## 第 2 章

### パケット無線通信

本章では、まずはじめに回線交換方式とパケット交換方式について述べる。そして、パケット通信の最も基本的なプロトコルである ALOHA 方式と、チャンネルをモニタすることにより特性向上を図る CSMA 方式について簡単にまとめる。

#### 2.1 回線交換方式とパケット交換方式

交換方式には回線交換とパケット交換がある。回線交換方式は通信を始める前に回線を確保してから情報の伝送をおこなう。この代表的な例が電話である。この方式では一度回線を確保してしまえば、会話が終わるまでその回線を独占できるので、会話が途中で途切れることはない。しかし、データのように情報が間欠的に発生する場合、実際に情報が流れていないときにも回線を占有しているため、使用効率が非常に悪くなる。これに対し、パケット交換方式は情報をパケットと呼ばれるかたまりに分割して送る。このため、パケット単位で待ち合わせが可能となり、複数のユーザで無線回線を共有することができる。この方式はデータのような間欠型通信に向いている。しかし、一般にリアルタイムに回線を確保できる補償がないため、電話のように遅延時間に対する要求が厳しいメディアには向いていない。

このように、回線交換方式とパケット交換方式では特徴が大きく異なり、送信する情報の性質によって使い分けることで、効率よく情報を伝送できる。

#### 2.2 Pure (Unslotted) ALOHA 方式

分散型通信ネットワークにおけるランダムアクセス用プロトコルとして最も基本的な方式が、この Pure ALOHA である。この方式においては、各ユーザーは好きな時に自由にパケットを送出することができる。そのため送受信の制御が簡単になると

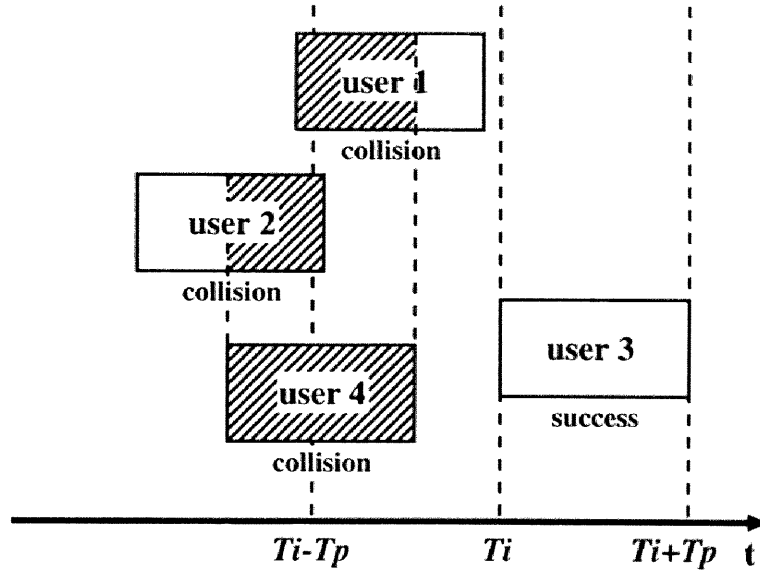


図 2.1: Pure ALOHA 方式におけるパケットの到着状況

いう利点がある．ところがその反面，送出パケットが他ユーザーからのパケットと衝突しやすいという欠点がある．パケット長が固定長である場合のパケットの到着の様子を図2.1に示す．この図において，斜線部分は他のパケットの重なり部分を示している．つまり斜線のかかったパケットはすべて消滅してしまう．よって，4つのパケットのうち，ユーザ3からのパケットのみが成功したことになる．

今，パケット長を固定長  $T_p$  とし，パケットが生起率  $\lambda$  (パケット数 / 秒) のポアソン過程に従って発生するものとする．間隔時間  $\tau$  に  $k$  個のパケットが発生する確率は，

$$P(k, \tau) = \frac{e^{-\lambda\tau} (\lambda\tau)^k}{k!} \quad (2.1)$$

となる．時刻  $T_i$  にユーザ3のパケットが到着したとする．時間区間  $[T_i - T_p, T_i + T_p]$  の間隔時間  $2T_p$  の間に他のユーザーのパケットが到着したとき，衝突が起こり2つのパケットは壊れて消滅してしまう．間隔時間  $2T_p$  の間にパケットが発生しない確率は，式 (2.1) において  $k = 0, \tau = 2T_p$  とすると，

$$Q_s = P(k = 0, \tau = 2T_p) = e^{-2\lambda T_p} \quad (2.2)$$

と求められる．これは，平均  $\lambda$  でパケットを送出したときのパケット成功確率に相当する．スループットをパケット長時間に成功する平均パケット数と定義すると，これは平均トラヒック量とパケット成功確率の積で求められ，次式のようになる．

$$S = \lambda T_p e^{-2\lambda T_p} = G e^{-2G} \quad [\text{packet}/T_p] \quad (2.3)$$

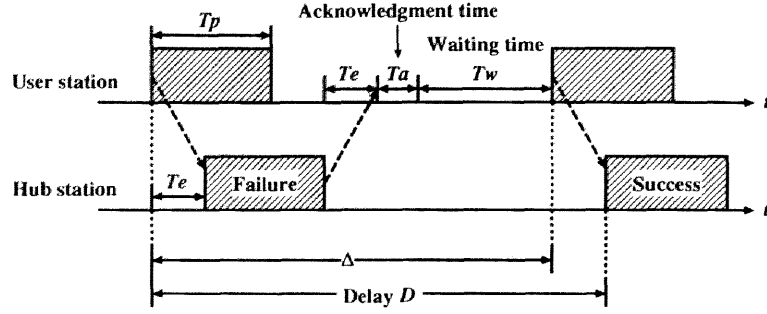


図 2.2: パケットの再送過程

ただし,  $G$  は  $G = \lambda T_p$  で示される平均トラヒック量 (オフアードロード) である. 式 (2.3) の両辺を  $G$  で微分すると,

$$\frac{dS}{dG} = e^{-2G} - 2Ge^{-2G} \quad (2.4)$$

となる. (左辺) = 0 とおくことにより, Pure ALOHA 方式の最大スループットは  $G = 1/2$  のときとなり, 次式のように求めることができる.

$$S_{max} = \frac{1}{2e} [\text{packet}/T_p] \quad (2.5)$$

図2.2のようにユーザがパケットの再送を行うものとする. まず, ユーザがパケットを生成し中央局にパケットを送る. このとき, 伝送遅延が生じるのでこれを  $T_e$  とする. 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伝送されたかどうか調べる. これに要する時間を処理時間  $T_a$  とする. もしパケットが正しく伝送されていなければ, 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をおいてから, このパケットの再送を行なう. この時間を再送間隔時間  $T_w$  とする. 再度衝突してしまうのを避けるために, 再送間隔時間は平均  $\overline{T_w}$  の指数分布に従うランダムな時間とする. そして, 再送されたパケットが正しく伝送されれば, パケットの送信は終了する. この処理はパケットが正しく伝送されるまで繰り返される. このような再送過程において, 初めのパケットを送信してから成功したパケットを送信するのに要する時間を遅延時間とする.

あるパケットを送出してから次の再送パケットを送出するまでの時間を  $\Delta$  とすると,  $\Delta$  は次式のように表される.

$$\Delta = T_p + T_a + \overline{T_w} + 2T_e \quad (2.6)$$

これを用いて, パケット長時間  $T_p$  で正規化した遅延時間  $D$  は,

$$D = \frac{1}{T_p} \{ T_e Q_S + (T_e + \Delta)(1 - Q_S) Q_S + (T_e + 2\Delta)(1 - Q_S)^2 Q_S + \dots \}$$

$$+(T_e + q\Delta)(1 - Q_s)^q Q_s + \dots\} \quad (2.7)$$

と表される。ここで、 $T_e + q\Delta$  は全部で  $q + 1$  回繰り返した時、最初のパケットを送ったとき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、 $(1 - Q_s)^q Q_s$  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 (2.7) を簡単にして、

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{T_p} \left\{ T_e + \frac{\Delta}{Q_s} (1 - Q_s) \right\} \\ &= \frac{1}{T_p} \{ T_e + \Delta(e^{2G} - 1) \} \quad [\text{s}/T_p] \end{aligned} \quad (2.8)$$

となる。

## 2.3 Slotted ALOHA 方式

Pure ALOHA 方式の特性を向上させるために、時間軸をスロットと呼ばれるパケット長に等しい時間枠に同期させてパケットを送出する方式が Slotted ALOHA 方式である。すべてのユーザがスロットに同期させてパケットを送出しなければならないのがこの方式の難点ではあるが、中央局がパイロット信号を放送し、各ユーザがそれに同期してパケットを送ることにより実現される。ただし、実際にはパケットの同期ずれが隣接スロットへ影響を与えるのを防ぐために、各スロット間にガードタイムと呼ばれる時間間隔を設ける。ここでは、解析の簡単さのために同期ずれが起らず、ガードタイムは無いものとする。

この方式のパケットの到着の様子を図2.3に示す。Slotted ALOHA 方式では各ユーザがパケット長に等しい長さのスロットに同期してパケットを送出するため、パケットは完全に重なるかまったく重ならないかのどちらかになる。このため、Pure ALOHA 方式のようなパケットの一部分だけが他のパケットと重なってしまうという状態が避けられる。

では、ユーザ3に着目してスループット特性を解析的に求める。時間区間  $[T_i - T_p, T_i)$  で発生したパケットは時間区間  $[T_i, T_i + T_p)$  にチャネルに送出される。ユーザ3のパケットが伝送に成功するためには、時間区間  $[T_i - T_p, T_i)$  に他のパケットが発生しない確率と等しくなる。これは、 $P(k, \tau)$  に  $k = 0, \tau = T_p$  を代入して、

$$Q_s = P(k = 0, \tau = T_p) = e^{-\lambda T_p} \quad (2.9)$$

となる。これより、スループット特性は、

$$S = \lambda T_p e^{-\lambda T_p} = G e^{-G} \quad [\text{packet}/T_p] \quad (2.10)$$



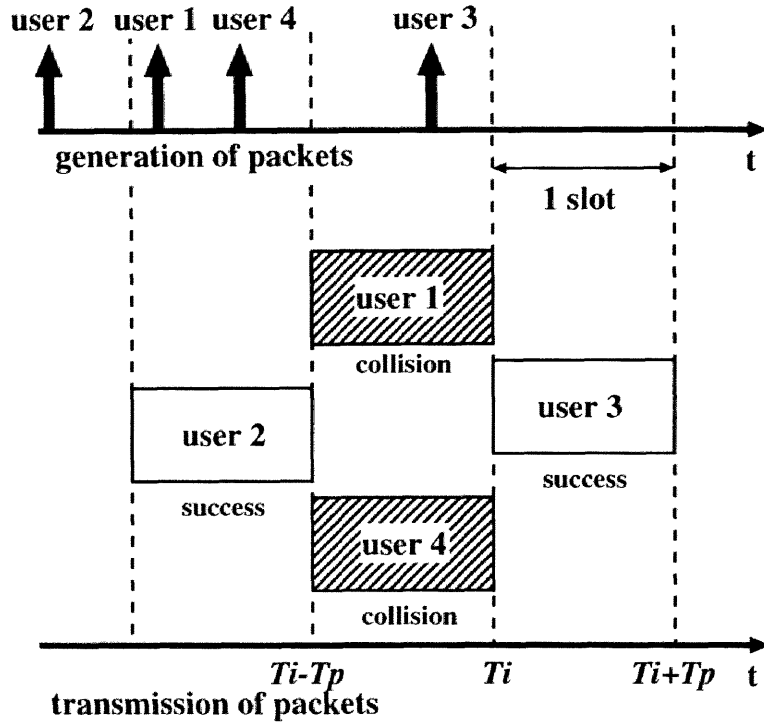


図 2.3: Slotted ALOHA 方式におけるパケットの到着状況

となる。また、最大スループットは  $G = 1$  のときに得られ、

$$S_{max} = \frac{1}{e} [\text{packet}/T_p] \quad (2.11)$$

となる。

遅延時間は式 (2.8) と同様にして求められ、

$$D = \frac{1}{T_p} \{T_e + \Delta(e^G - 1)\} [s/T_p] \quad (2.12)$$

となる。

## 2.4 CSMA 方式

上記の方式の特性をさらに改善するために提案されたのが、Carrier Sense Multiple Access (CSMA) 方式である。この方式では、各ユーザがパケットを送出する前にチャネルをモニタし、空きならばパケットを送信、使用中ならばパケットを送信するのを控えるというアクセス制御が行われる。

CSMA 方式ではチャネルの観測を行うが、この観測結果は図2.4に示されるように、伝搬遅延や処理遅延の分だけ古い情報になってしまう。この遅延時間をアクセス制御

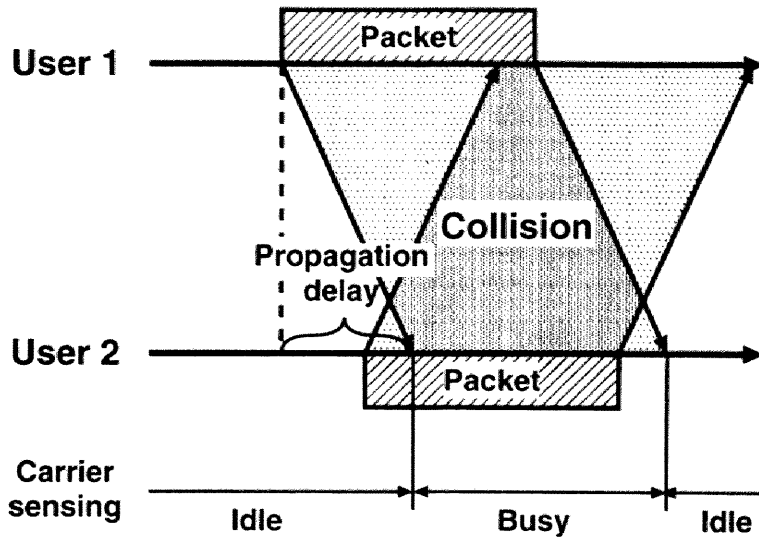


図 2.4: CSMA での伝搬時間と判断のずれ

遅延と呼ぶことにする。アクセス制御遅延が存在すると古い情報にしたがってアクセス制御が行われてしまうため、特性の劣化につながる。

CSMA 方式のスループット特性は、以下のように求まる [6]。図2.5に CSMA におけるチャネルの様子を示す。なお、この図において横軸はパケット長で正規化された時間を表す。時刻  $t$  を、他にパケットが一つも送信されていないときに、あるパケットがチャネルが空いていると判断してパケットを送信しはじめた時刻とする。  $\tau_e$  をパケット長  $T_p$  で正規化された伝搬遅延時間  $T_e$  とする。時刻  $t$  から  $t + \tau_e$  の間に発生したパケットはチャネルが空いていると判断され、パケットが送信され、衝突してしまう。もし、この時間間隔にパケットが発生しなければ、パケットの伝送は成功することになる。

ここで、  $t + Y$  を、時刻  $t$  から  $t + \tau_e$  の間に発生したパケットのうち、最後のパケットが発生した時間とする。時間間隔  $(t, t + Y)$  に発生したパケットはすべて  $t + Y + 1$  までに終了する。そして、  $\tau_e$  後にチャネルが空き状態と判断されるようになる。時刻  $t + \tau_e$  から  $t + Y + 1 + \tau_e$  の間はチャネルが使用中と判断される。また、時刻  $t$  から  $t + Y + 1 + \tau_e$  の間をビジー期間と呼ぶことにする。それ以外の時間をアイドル期間と呼ぶ。さらに、  $\bar{B}$  を平均ビジー時間、  $\bar{I}$  を平均アイドル時間、  $\bar{U}$  をパケットが衝突なく伝送される時間の平均値とする。このとき、スループット特性は、

$$S = \frac{\bar{U}}{\bar{B} + \bar{I}} \quad (2.13)$$

と表される。パケットが衝突なく伝送される確率は、ビジー期間の初めの  $\tau_e$  の間に一

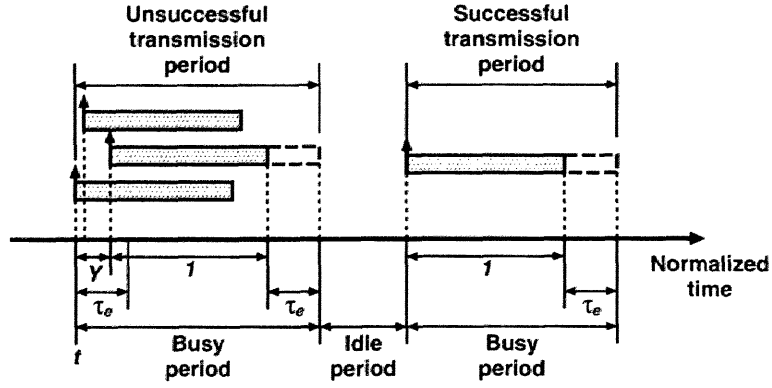


図 2.5: CSMA におけるパケットの到着の様子

つもパケットが発生しなかった場合であるので,  $e^{-\tau_e G}$  となり,  $\bar{U}$  は,

$$\bar{U} = e^{-\tau_e G} \quad (2.14)$$

となる. アイドル期間の平均値は単純に

$$\bar{I} = \frac{1}{G} \quad (2.15)$$

となる. ビジー期間の平均値は,

$$\bar{B} = 1 + \bar{Y} + \tau_e \quad (2.16)$$

となる. ただし,  $\bar{Y}$  は  $Y$  の平均値である.

次に  $Y$  の分布関数を求める. これは,

$$F_Y(y) \equiv \Pr\{Y \leq y\} \quad (2.17)$$

で定義され, 時間  $a - y$  の間に一つもパケットが発生しない確率に等しくなる. よって,

$$F_Y(y) = \exp\{-G(\tau_e - y)\} \quad (2.18)$$

となる. 上式を平均して,

$$\bar{Y} = \tau_e - \frac{1}{G}(1 - e^{-\tau_e G}) \quad (2.19)$$

となる.

式 (2.13) に, 式 (2.14), (2.15), (2.16), (2.19) を代入して, スループット特性は

$$S = \frac{Ge^{-\tau_e G}}{G(1 + 2\tau_e) + e^{-\tau_e G}} \quad [\text{packet}/T_p] \quad (2.20)$$

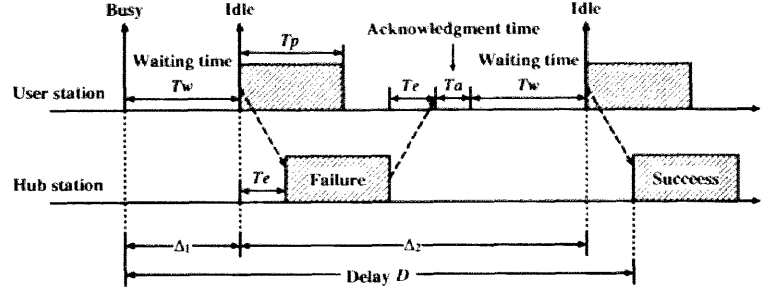


図 2.6: CSMA を用いた場合のパケットの再送過程

となる。また、パケット成功確率  $Q_S$  は、

$$Q_S = \frac{S}{G} = \frac{e^{-\tau_e G}}{G(1 + 2\tau_e) + e^{-\tau_e G}} \quad (2.21)$$

となる。

もし、アクセス制御遅延が無視できるほど小さいとすると、スループット特性は、

$$\lim_{a \rightarrow 0} S = \frac{G}{1 + G} [\text{packet}/T_p] \quad (2.22)$$

となる。このとき、 $G \rightarrow \infty$  とすると、 $S \rightarrow 1$  となる。

次に遅延特性を求める。CSMA を用いた場合のパケットの再送過程を図2.6に示す。CSMA では、パケットを送信する前にチャネルをモニタし、チャネルが使用中の場合は送信を控える。このとき、再送間隔時間  $T_w$  だけ待った後、再度チャネルをモニタする。そしてチャネルが空いていた場合はパケットの送信を行う。この場合は Pure ALOHA の場合と同じ再送過程になる。

図2.6に示されるようなパケットの再送過程において、送信が拒否されることによって生じる遅延時間を  $\Delta_1$ 、パケットを送信し中央局で正しく受信されなかったために生じる遅延時間を  $\Delta_2$  とすると、 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$  は、

$$\Delta_1 = \overline{T_w} \quad (2.23)$$

$$\Delta_2 = T_p + T_a + \overline{T_w} + 2T_e \quad (2.24)$$

と表される。

ここで、チャネルが使用中であるためにパケットの送信を控える確率を  $Q_R$  とすると、

$$1 - Q_R = \frac{1 + \tau_e G}{1 + G(1 + \tau_e + \bar{Y})} \quad (2.25)$$

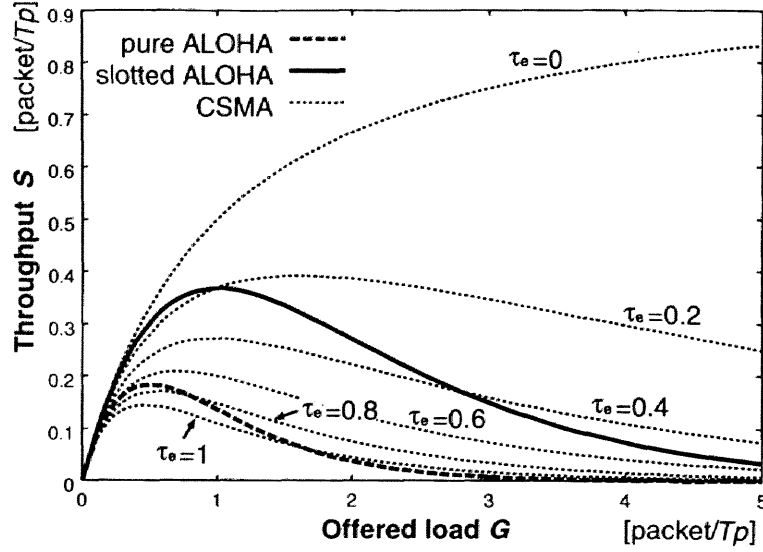


図 2.7: スループット特性

となる。また、

$$Q_F = 1 - Q_R - Q_S \quad (2.26)$$

とする。これらを用いて遅延特性は次式のように表される。

$$\begin{aligned} D &= \frac{1}{T_p} \{ T_e \cdot Q_S + (T_e + \Delta_1) Q_R Q_S + (T_e + \Delta_2) Q_F Q_S \\ &\quad + (T_e + 2\Delta_1) Q_R^2 Q_S + \{ T_e + 2(\Delta_1 + \Delta_2) \} Q_R Q_F Q_S \\ &\quad + (T_e + 2\Delta_2) Q_F^2 Q_S + \dots \} \\ &= \frac{1}{T_p} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \{ T_e + m\Delta_1 + (n-m)\Delta_2 \} \cdot Q_R^m Q_F^{n-m} Q_S \quad (2.27) \end{aligned}$$

ここで、 $T_e + m\Delta_1 + (n-m)\Delta_2$  は、全部で  $n+1$  回繰り返したとき、 $m$  回はチャネルが使用中のために送信を控え、 $n-m$  回パケットを送信し、中央局で正しく受信できなかった場合の遅延時間である。そして、これが起こる確率は  $Q_R^m Q_F^{n-m} Q_S$  である。式 (2.27) を簡単にして、

$$D = \frac{1}{T_p} \left\{ T_e + \frac{\Delta_1}{Q_S} Q_R + \frac{\Delta_2}{Q_S} (1 - Q_S - Q_R) \right\} [s/T_p] \quad (2.28)$$

となる。

## 2.5 数値例

図2.7にスループット特性を示す。Pure ALOHA 方式と Slotted ALOHA 方式を比べると、式 (2.5), (2.11) から明らかなように、スループットの最大値はそれぞれ

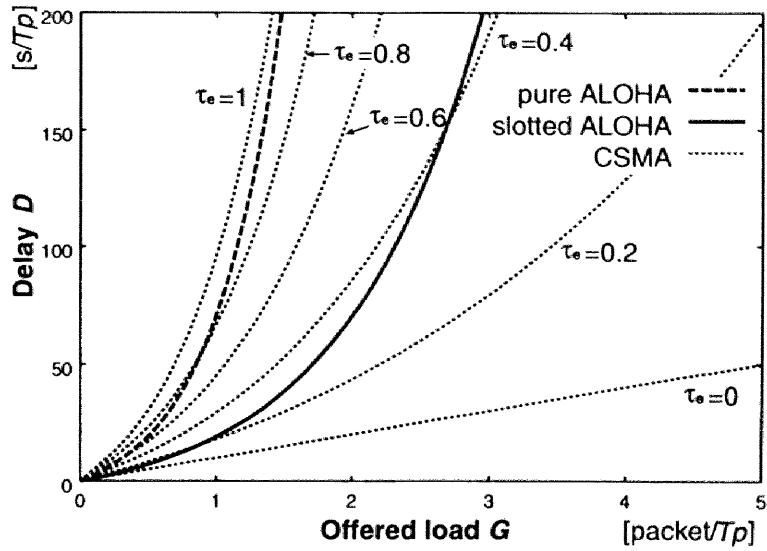


図 2.8: 遅延特性

0.184, 0.368 と 2 倍の差がある。また CSMA 方式と比較すると、アクセス制御遅延が存在しない場合は CSMA 方式が一番特性が良いが、 $\tau_e = 0.2$  程度で Slotted ALOHA 方式の方が、 $\tau_e = 0.8$  程度で Pure ALOHA 方式の方が特性が良くなる。

図2.7に遅延特性を示す。Pure ALOHA 方式や Slotted ALOHA 方式では  $\tau_e$  によってパケット成功確率は劣化しないので、遅延特性にそれほど大きな影響を与えない。そこで、これらの方式では、 $\tau_e = 0$  とした。また、 $\overline{T_w} = 10T_p$ ,  $T_a = 0$  としている。 $\tau_e$  が小さい場合の CSMA 方式では、遅延時間は緩やかに増加しているが、ALOHA 方式や  $\tau_e$  が大きい場合の CSMA 方式では、オフロードが増加すると遅延時間が急激に増加する。これは、スループット特性がオフロードの大きいところで 0 に近付いており、ほとんどのパケットが伝送に失敗するためである。

## 第 2 章の参考文献

- [1] 奏 正人, 山内 雪路, パケット通信ハンドブック, CQ 出版社, 1987 年.
- [2] 奏 正人, 山内 雪路, パケット無線ネットワーク, CQ 出版社, 1990 年.
- [3] N. Abramson, "The ALOHA system – Another alteernative for computer communications," Fall Joint Computer Conference, pp.281-285, 1970.
- [4] N. Abramson, "Fundamentals of packet multiple access for satellite networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.10, no.2, pp.309-316, Feb. 1992.
- [5] N. Abramson, "Multiple access in wireless digital networks," Proc. of IEEE, vol.82, no.9, pp.1360-1370, Sep. 1994.
- [6] 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., vol.COM-23, no.12, pp.1400-1416, Dec. 1975.
- [7] F. A. 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., vol.COM-23, no.12, pp.1417-1433, Dec. 1975.
- [8] H. Taub and D. L. Schilling, Principles of communication systems, McGrw-Hill, 1986.
- [9] J. G. Proakis, Digital communications – third edition, McGrw-Hill, 1995.
- [10] L. Kleinrock, Queueing systems, vol.1: Theory, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.
- [11] L. Kleinrock, Queueing systems, vol.2: Computer applications, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.

## 第 3 章

# CDMA 方式

本章では、符号分割多元接続 (CDMA) 方式について述べる。まず、多元接続方式について簡単にまとめる。そして、CDMA 方式の基となっているスペクトル拡散通信の概要や特性について記述する。さらに、CDMA 方式の効率について他の多元接続方式と比較しながら評価する。

### 3.1 多元接続方式

移動体通信や衛星通信等において、一つに基地局に対し複数のユーザ局が接続する形態をとることが一般的である。この場合、システムに与えられた信号空間を各ユーザ局に分割して割り当てて通信を行うことになる。このような方法を多元接続という。

この多元接続方式として、主に周波数分割多元接続 (Frequency-Devision Multiple-Access: FDMA)、時分割多元接続 (Time-Devision Multiple-Access: TDMA)、符号分割多元接続 (Code-Devision Multiple-Access: CDMA) の 3 方式がある [1], [2].

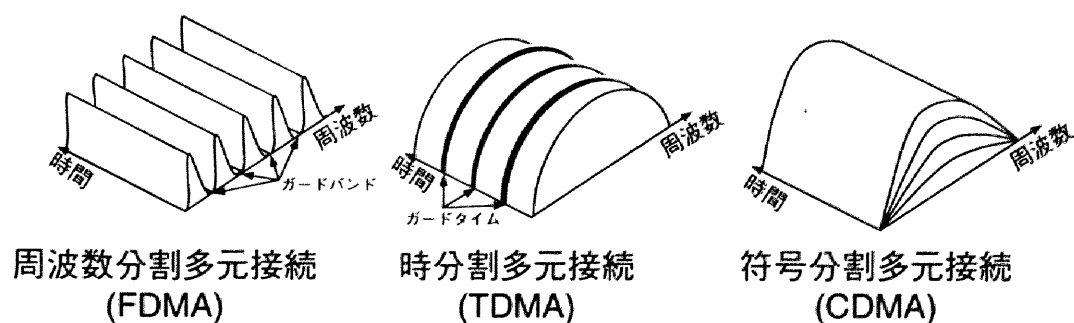


図 3.1: 各多元接続方式の概念図



図3.1にこれらの方式の概念図を示す。

FDMA 方式では、システムに与えられた周波数帯域を分割して各局に割り当てられるので、信号は狭帯域で伝送される。信号は連続的であるので、送信にあたって時間的な同期を必要としない。また受信に際しても、信号の復調に伴って高速な同期を必要としない。このように実用化に向けての技術的困難の少ない方式であり、FDMA はアナログ式セルラー自動車携帯電話などで用いられてきた。しかし、移動体がひとつのセルから他のセルに移る際に必要となるハンドオフを的確に行うことが困難で、周波数利用効率向上のためにセルサイズを小さくするとハンドオフの機会が増えて不利となる。

TDMA 方式では、時間を分割して各局に割り当てる。各局は、信号を断続的かつ周期的（この周期をフレーム周期という）に送信する。このため、各ユーザからの信号の同期が必要となる。特に、高速の通信を行う際にこの同期が難しい問題となる。通常、移動局の位置の変化などに伴う信号タイミングのずれに対応できるように、ガードタイムが設定されているが、このガードタイムは効率の劣化につながる。また、信号を断続的に送信するため、各ユーザの信号電力を高くしなければ、信号対雑音比を維持することができない。TDMA 方式は現在日本で広く用いられているデジタルセルラーシステムである PDC(Personal Digital Cellular telecommunication system) などに用いられている。

CDMA 方式はこれまで述べてきた FDMA 方式や TDMA 方式とは異なる特徴を多数有する。本方式はそれぞれの利用者は通信を行う空間を物理的に分割して使用するのではなく、周波数も時間も重なりあった状態の中から目的の信号を符号を用いることにより識別する方式である。このため、CDMA 方式では、周波数帯域とか時間長といった明確な限界がなく、信号品質の劣化のみによって回線数が制限される。

CDMA 方式では一般に各ユーザに割り当てられた符号によって、ある周波数帯域に制限された信号のスペクトルを、広帯域化して通信を行うこととなり、CDMA はスペクトル拡散通信方式に基づく方式であるといえる。

### 3.2 スペクトル拡散通信

先に述べたように、CDMA 方式はスペクトル拡散通信に基づく方式である。そこで本節では、まずスペクトル拡散通信の概要について述べ、そしてビット誤り率について評価を行う。

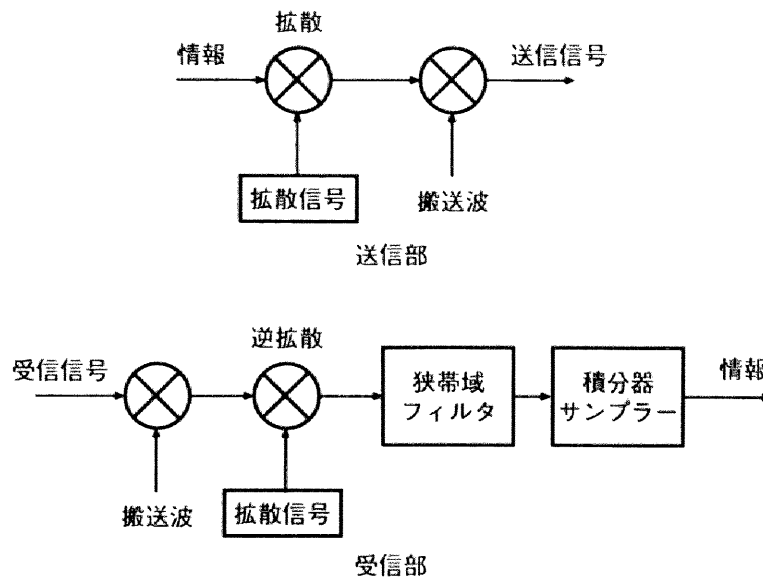


図 3.2: DS/SS 方式の基本構成図

### 3.2.1 スペクトル拡散通信の概要

CDMA 方式で用いられるスペクトル拡散方式は、通常直接拡散 (Direct-Sequence Spread Spectrum: DS/SS) 方式が用いられる。図3.2に DS/SS 方式の基本的なシステム構成を示す。送信部において、情報信号にその信号の帯域よりも大きな帯域を持った拡散信号を掛け合わせ、その広帯域信号を送出する。受信部では送信部で用いたものと同じ拡散信号を掛け合わせるにより逆拡散を行なう。ここで、拡散信号は CDMA においてはユーザを識別するために用いられる符号から生成された信号であり、情報信号とは無関係である。

DS/SS 方式を用いると、信号のパワースペクトル密度が拡散率分だけ低く抑えることができる。このため、複数の利用者が時間的・周波数的に重なっていても、信号品質の劣化と引き替えに通信が可能となる。信号品質の劣化は、通信を同時に行うユーザ数が増加するに従い、拡散符号の相互相関特性に伴なって緩やかに生じる。これは、“graceful degradation (緩やかな品質劣化)” とよばれており、DS/SS 方式の大きな特徴とも言える。

また、時間と周波数を共有しているため、各ユーザ間での同期が不必要であり、ランダムアクセスが可能という特徴も備えている。この他にも、マルチメディア通信に柔軟に対応できること、フェージングに強い、ソフトハンドオフが可能であることなど、移動体通信に適した特徴を持っている。

### 3.2.2 ビット誤り率特性

DS/SS 通信方式を用いた場合のビット誤り率特性を導出する。

今、1 次変調として Binary Phase-Shift Keying(BPSK) を用い、各局は送信データ信号  $b_k(t)$  を固有に割り当てられた拡散信号  $a_k(t)$  で直接拡散しているものとする。このとき、送信データ信号は以下のように表される。

$$b_k(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_{k,l} p_T(t - lT) \quad (3.1)$$

ただし、 $b_{k,l} \in \{+1, -1\}$ ,  $T$  は 1 シンボル時間、

$$p_T(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < T) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.2)$$

である。また、 $a_k(t)$  は、

$$a_k(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j^{(k)} p_{T_c}(t - jT_c) \quad (3.3)$$

となる。ただし、 $a_j^{(k)} \in \{+1, -1\}$ ,  $T_c$  は 1 チップ時間である。ここで  $N$  を拡散率とすると、 $T = NT_c$  となる。 $k$  番目のユーザの送信信号は、

$$s_k = \sqrt{2P} a_k(t) b_k(t) \cos(\omega_c t + \theta_k) \quad (3.4)$$

となる。

通信路で両側電力スペクトル密度  $N_0/2$  の加法性白色ガウス雑音 (AWGN) が加わり、各ユーザからの信号は非同期に送信されるものと仮定する。さらに、各ユーザの信号は等電力で受信されたとすると、受信機入力

$$r(t) = n(t) + \sum_{k=1}^K \sqrt{2P} a_k(t - \tau_k) b_k(t - \tau_k) \cos(\omega_c t + \phi_k) \quad (3.5)$$

と表すことができる。ただし、 $\phi_k = \theta_k - \omega_c \tau_k$  である。

ここで、受信機では  $i$  番目のユーザの信号を復調するものとする。このとき、受信機における拡散信号同期、搬送波同期が完全であると仮定すると、一般性を失うことなく、 $\tau_i = 0$ ,  $\phi_i = 0$  とすることができる。また、 $k \neq i$  においては、 $0 \leq \tau_k < T$ ,  $0 \leq \theta_k < 2\pi$  である。

図3.3に受信機構成を示す。受信機では、受信信号に搬送波および拡散信号を乗積した後積分することで逆拡散を行い、情報の再生を行う。ここで、 $m$  番目の情報ビットに対応する積分出力は、

$$Z_{i,m} = \int_{mT}^{(m+1)T} r(t) a_i(t) \cos \omega_c t dt \quad (3.6)$$

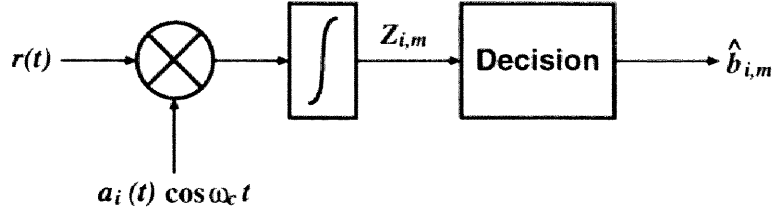


図 3.3: 受信機構成

となる. 以下,  $m = 0$  で考える. このとき上式に式 (3.5) を代入し整理すると,

$$Z_i = Z_{i,0} = \sqrt{P/2} T b_{i,0} + \sqrt{P/2} \sum_{k=1, k \neq i} [b_{k,-1} R_{k,i}(\tau_k) + b_{k,0} \hat{R}_{k,i}(\tau_k)] \cos \phi_k + \int_0^T n(t) a_i(t) \cos \omega_c t dt \quad (3.7)$$

となる. ただし, 式中の  $R_{k,i}(\tau)$  および  $\hat{R}_{k,i}(\tau)$  はそれぞれ拡散系列間の部分相互相関であり,

$$R_{k,i}(\tau) = \int_0^\tau a_k(t - \tau) a_i(t) dt \quad (3.8)$$

$$\hat{R}_{k,i}(\tau) = \int_\tau^T a_k(t - \tau) a_i(t) dt \quad (3.9)$$

で定義される. これらは  $k$  番目と  $i$  番目のユーザの信号間のタイミングの違い, および各々の拡散符号の部分相互相関で定まる. なお, 拡散符号の部分相互相関の性質は文献 [11] に詳しく述べられている.

式 (3.7) の第 1 項目は信号成分, 第 2 項目は干渉成分, 第 3 項目は雑音成分を表す. これらをそれぞれ  $Z_{i,D}$ ,  $Z_{i,U}$ ,  $Z_{i,N}$  と表記すると以下ようになる.

$$Z_{i,D} = \sqrt{P/2} T b_{i,0} \quad (3.10)$$

$$Z_{i,U} = \sqrt{P/2} \sum_{k=1, k \neq i}^K [b_{k,-1} R_{k,i}(\tau_k) + b_{k,0} \hat{R}_{k,i}(\tau_k)] \cos \phi_k \quad (3.11)$$

$$Z_{i,N} = \int_0^T n(t) a_i(t) \cos \omega_c t dt \quad (3.12)$$

これらのうち,  $Z_{i,N}$  は分散

$$\text{Var}\{Z_{i,N}\} = \frac{N_0 T}{4} \quad (3.13)$$

のガウス・ランダム変数である.

また, 各ユーザの信号における搬送波初期位相, 情報ビットの値, 遅延量  $\tau_k$  が互いに独立かつランダムであることより, ユーザ数  $K$  が十分大きい場合は, 干渉成分  $Z_{i,U}$

もガウス・ランダム変数とみなすことが可能である. 式 (3.11) より明らかに干渉成分  $Z_{i,U}$  の平均値は零である. また, この分散は,

$$\text{Var}\{Z_{i,U}\} = \frac{P}{2} E \left[ \left\{ \sum_{k=1, k \neq i}^K [b_{k,-1} R_{k,i}(\tau_k) + b_{k,0} \hat{R}_{k,i}(\tau_k)] \cos \phi_k \right\}^2 \right] \quad (3.14)$$

となる. ここで  $E[\cdot]$  は, 遅延量  $\tau_k$ , 搬送波初期位相  $\phi_k$ , 情報ビット  $b_{k,m}$  に関する集合平均である. このうち  $\tau_k$  について, 集合平均を時間平均に読み替え, さらに  $\tau_k$  が  $k$ ,  $m$  に関して独立であることを考慮すると, 式 (3.14) は,

$$\text{Var}\{Z_{i,U}\} = \frac{P}{4T} \sum_{k=1, k \neq i}^K \int_0^T \{R_{k,i}^2(\tau_k) + \hat{R}_{k,i}^2(\tau_k)\} d\tau_k \quad (3.15)$$

となる. このように干渉成分の分散は, 各ユーザの信号の拡散信号の部分相互相関によって与えられる. さらに式 (3.15) を計算し,

$$\begin{aligned} \text{Var}\{Z_{i,U}\} &= \frac{P}{4T} \sum_{k=1, k \neq i}^K \sum_{l=0}^{N-1} \int_{lT_c}^{(l+1)T_c} \{R_{k,i}^2(\tau_k) + \hat{R}_{k,i}^2(\tau_k)\} d\tau_k \\ &= \frac{PT^2}{12N^3} \left( \sum_{k=1, k \neq i}^K r_{k,i} \right) \end{aligned} \quad (3.16)$$

となる. ここで,

$$\begin{aligned} r_{k,i} &= \sum_{l=0}^{N-1} \{C_{k,i}^2(l-N) + C_{k,i}(l-N)C_{k,i}(l-N+1) + C_{k,i}^2(l-N+1) \\ &\quad + C_{k,i}^2(l) + C_{k,i}(l)C_{k,i}(l+1) + C_{k,i}^2(l+1)\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

である.  $C_{k,i}(l)$  は非周期相互相関関数であり,

$$C_{k,i}(l) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-1-l} a_j^{(k)} a_{j+l}^{(i)} & (0 \leq l \leq N-1) \\ \sum_{j=0}^{N-1+l} a_{j-l}^{(k)} a_j^{(i)} & (1-N \leq l < 0) \\ 0 & |l| \geq N \end{cases} \quad (3.18)$$

で定義される.

また, 特に拡散系列がランダム符号とみなせるような場合には,

$$\frac{1}{6N^3} \sum_{k=1, k \neq i}^K r_{k,i} \approx \frac{K-1}{3N} \quad (3.19)$$

となる [11]. これを式 (3.16) に代入して,

$$\text{Var}\{Z_{i,U}\} \approx \frac{PT^2}{2} \frac{K-1}{3N} \quad (3.20)$$

となる.

上に述べたように, 雑音成分はもちろん干渉成分もガウス・ランダム変数とみなすことができる. そこで, これらの和もガウス・ランダム変数となる. これらの分散値の和と信号成分の 2 乗値の比, 信号対雑音干渉比 (SNIR) を

$$SNIR = \frac{Z_{i,D}^2}{Var\{Z_{i,U}\} + Var\{Z_{i,N}\}} \quad (3.21)$$

と定義すると, 式 (3.21) に式 (3.10), (3.13), (3.20) を代入して,

$$SNIR \approx \left\{ \frac{K-1}{3N} + \frac{N_0}{2E_b} \right\}^{-1} \quad (3.22)$$

となる. ただし,  $E_b$  はビット当りのエネルギーを表し,

$$E_b = PT \quad (3.23)$$

である.

よって, ビット誤り率 (Bit Error Rate: BER) は,

$$\begin{aligned} P_b(K) &= Q[\sqrt{SNIR}] \\ &= Q\left[\left(\frac{K-1}{3N} + \frac{N_0}{2E_b}\right)^{-\frac{1}{2}}\right] \end{aligned} \quad (3.24)$$

と表すことができる. ただし,

$$Q[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2/2) du \quad (3.25)$$

である.

ところで, 式 (3.24) で得られるビット誤り率特性は, 同時送信局数  $K$  が小さい場合には, ガウス近似の正当性が成り立たなくなり, 正確とは言いがたくなる. そこで, 文献 [12] において, より正確なビット誤り率特性を得る式が導出されている. これは,

$$\begin{aligned} P_b(K) &= \frac{2}{3} Q\left[\left\{\frac{K-1}{3N} + \frac{N_0}{2E_b}\right\}^{-\frac{1}{2}}\right] \\ &\quad + \frac{1}{6} Q\left[\left\{\frac{(K-1) \cdot N/3 + \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b}\right\}^{-\frac{1}{2}}\right] \\ &\quad + \frac{1}{6} Q\left[\left\{\frac{(K-1) \cdot N/3 - \sqrt{3}\sigma}{N^2} + \frac{N_0}{2E_b}\right\}^{-\frac{1}{2}}\right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

となる. ただし,

$$\sigma^2 = (K-1) \left\{ N^2 \frac{23}{360} + N \left( \frac{1}{20} + \frac{K-2}{36} \right) - \frac{1}{20} - \frac{K-2}{36} \right\} \quad (3.27)$$

である. 本研究ではこのビット誤り率を用いることにする.

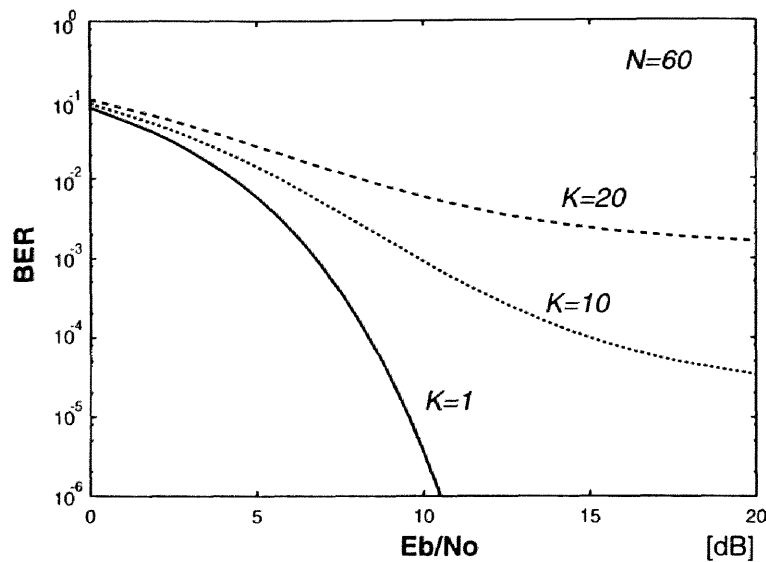


図 3.4:  $E_b/N_0$  対ビット誤り率特性

### 3.2.3 ビット誤り率の数値例

図3.4に式 (3.26) によって得られた  $E_b/N_0$  対ビット誤り率特性を示す。ここで、拡散率  $N = 60$  としている。同時送信局数  $K = 1, 10, 20$  とした。なお、 $K = 1$  の場合、多元接続干渉はない。 $E_b/N_0$  の増加に対し、 $K = 1$  の場合は特性がよくなっていくものの、 $K = 10, 20$  の場合はある値に漸近的に近付くことがわかる。これは、 $E_b/N_0$  が大きいところでは、多元接続干渉による影響が支配的であるためである。

また、図3.5に同時送信局数対ビット誤り率特性を示す。同じく、拡散率  $N = 60$  としている。同時送信局数が増加するにつれ、特性が緩やかに劣化していくのがわかる。さらに、この誤り率特性を用いて、パケット成功確率がどの程度になるかを調べてみる。同時送信局数  $K$  がパケット継続時間内で一定であり、1ビットでも誤るとパケットの伝送に失敗すると仮定すると、パケット成功確率は  $(1 - P_b(K))^L$  となる。ただし、 $L$  はパケットのビット数である。図3.6にビット誤り率対パケット成功確率を示す。 $L = 500$  [bits] とした。この図から明らかなように、パケット成功確率の立場からみても、同時送信局数の増加に対し、特性は穏やかに劣化することがわかる。

参考までに、パケット通信にはどの程度のビット誤り率が要求されるのかを調べてみる。通信路として2元対称通信路 (Binary Symmetric Channel: BSC) を考え、パケット継続時間内においてビット誤り率は変化しないと仮定してパケット成功確率を求める。1ビットでも誤るとパケットの伝送に失敗すると仮定すると、パケット成功確率は  $(1 - BER)^L$  となる。ただし、 $BER$  はビット誤り率である。図3.7にビッ

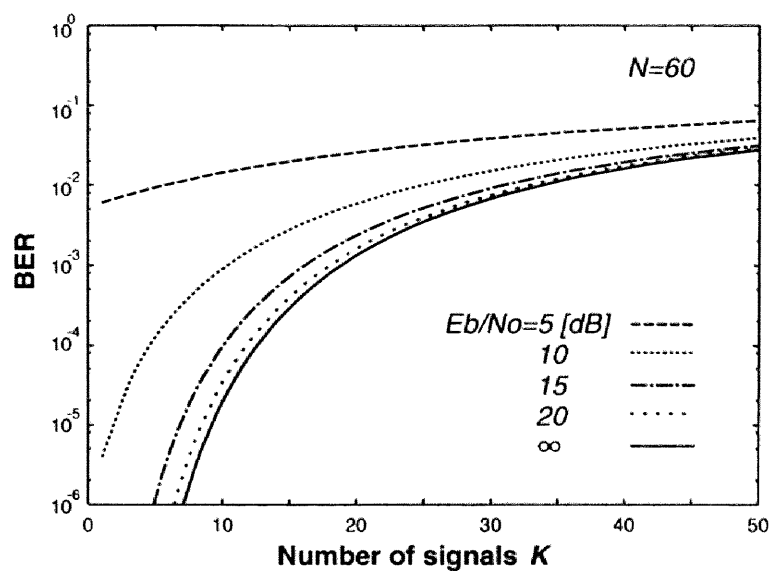


図 3.5: 同時送信局数対ビット誤り率特性

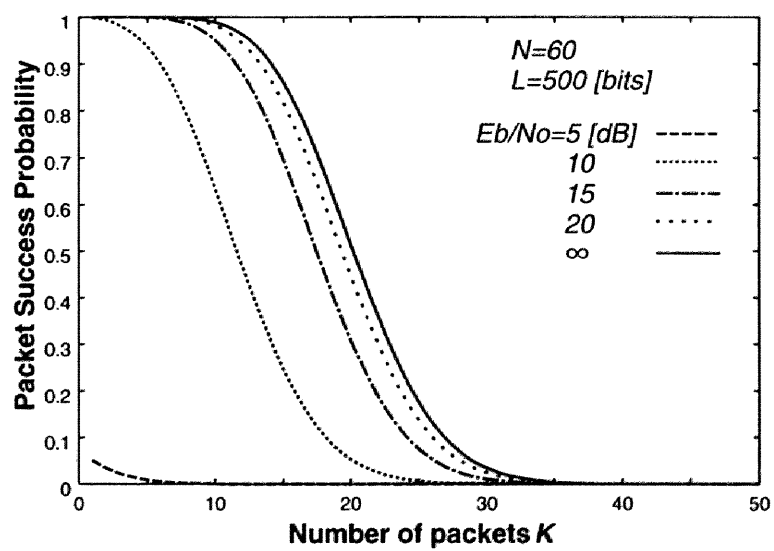


図 3.6: 同時送信局数対パケット成功確率



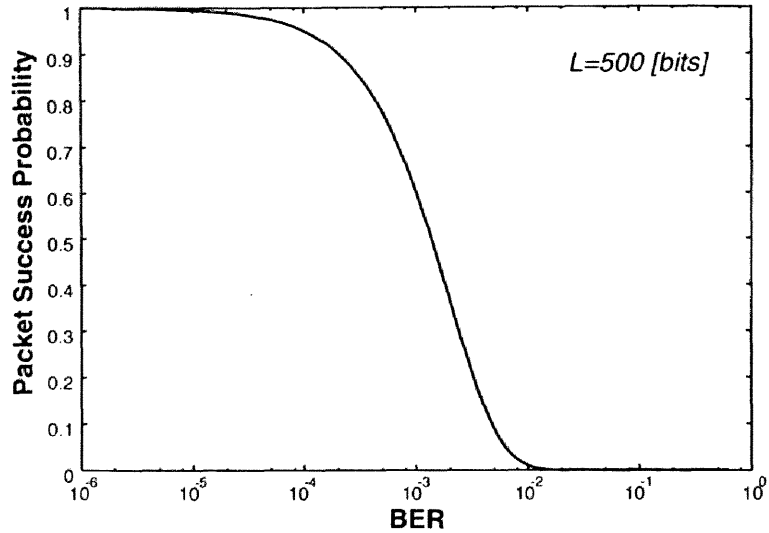


図 3.7: ビット誤り率とパケット成功確率の関係

ト誤り率対パケット成功確率を示す。この図より、誤り率が  $10^{-4}$  から  $10^{-3}$  付近でパケット成功確率が劣化することがわかる。よって、この場合は誤り率が  $10^{-4}$  から  $10^{-3}$  程度あればよいことがわかる。

### 3.3 CDMA 方式の効率

ここでは、CDMA 方式の効率を FDMA 方式や TDMA 方式と比較しつつ評価する。この評価尺度として、周波数利用効率、回線容量を用いることにする。これは、移動体通信システムの効率を示す尺度としてよく用いられている。

#### 3.3.1 周波数利用効率

周波数利用効率とは、単位帯域あたりに送ることができる最大情報量を示し、多元接続方式の評価基準としてよく用いられる。この尺度はシステムにおける各チャネルの状態 (例えば音声チャネルやデータチャネル) に関係なく規定できる。しかし、実際にどれだけのユーザがアクセスできるのかがすぐにはわからないという欠点を有する。

周波数利用効率は次式で定義される [13]。

$$\eta = \frac{MR_b}{W_s} = \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{\frac{E_b}{N_0}} \quad [\text{bit/s/Hz}] \quad (3.28)$$

ただし,  $R_b$  は各チャネルの情報速度 [bit/s],  $M$  は最大ユーザ数,  $W_s$  はそのシステムに割り当てられた全帯域幅,  $C$  は全搬送波電力であり,  $ME_bR_b$  に等しい.  $E_b$  は各チャネルにおける 1 情報ビットあたりのエネルギー,  $N_0$  は片側雑音電力密度である.

CDMA 方式では他ユーザからの干渉を考える必要がある. この干渉レベルを熱雑音と同じくガウス分布に従うと仮定すると, その電力密度  $I_0$  は,

$$I_0 = (M - 1) \frac{E_b R_b}{W_s} \quad (3.29)$$

となる. このとき, 信号品質は信号対雑音干渉電力比  $E_b/(N_0 + I_0)$  で決まるので,

$$\begin{aligned} \frac{E_b}{N_0 + I_0} &= \frac{E_b}{N_0 + (M - 1) \frac{E_b R_b}{W_s}} \\ &= \frac{\frac{E_b}{N_0}}{1 + \frac{M - 1}{M} \frac{C}{N_0 W_s}} \end{aligned} \quad (3.30)$$

となる. これより,  $E_b/N_0$  は,

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_b}{N_0 + I_0} \left( 1 + \frac{M - 1}{M} \frac{C}{N_0 W_s} \right) \quad (3.31)$$

となる. これを, (3.28) 式に代入して,

$$\eta_{\text{CDMA}} = \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{\frac{E_b}{N_0 + I_0} \left( 1 + \frac{M - 1}{M} \frac{C}{N_0 W_s} \right)} \quad (3.32)$$

となる. 通常, 最大ユーザ数  $M$  は大きいので,  $M - 1 \approx M$  より,

$$\eta_{\text{CDMA}} \approx \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{\frac{E_b}{N_0 + I_0} \left( 1 + \frac{C}{N_0 W_s} \right)} \quad (3.33)$$

となる.

ところで, CDMA 方式では干渉量を減らす方策として, ボイス・アクチベーション (VA) のように送信側で干渉源を減らすものと, セルシステム, マルチビームアンテナ, 干渉波除去のように受信側で干渉量を減らすものがある. VA とは, 情報の含まれていない信号はできるだけ送らないようにすることである. 音声の場合, 実際には全会話期間中の約 40% しか有音期間はないと言われており, VA の効果は非常に大きい. 送信側での減少係数を  $V$  ( $0 \leq V \leq 1$ ) とすると, これは等価的に  $M$  を  $VM$  に減

表 3.1: BER=10<sup>-5</sup> を得るのに必要な  $E_b/(N_0 + I_0)$

| 符号化率        | $E_b/(N_0 + I_0)$ |
|-------------|-------------------|
| 1 (uncoded) | 9.6               |
| 7/8         | 6.4               |
| 3/4         | 5.5               |
| 1/2         | 4.5               |
| 1/3         | 4.0               |

拘束長 7 で 3 ビット軟判定ビタビ復号を想定

らす効果がある。また、受信側での減少係数を  $A$  ( $0 \leq A \leq 1$ ) とすると、これは  $I_0$  を減らす効果がある。以上より、CDMA 方式の周波数利用効率は、

$$\eta_{\text{CDMA}} \approx \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{V \frac{E_b}{N_0 + I_0} \left(1 + \frac{AC}{N_0 W_s}\right)} \quad (3.34)$$

となる。

次に FDMA 方式と TDMA 方式について考える。電力制限が支配的な場合には、式 (3.28) が成り立つが、帯域制限が支配的な場合には用いることができない。また、周波数再利用が可能なおきには、その数だけ周波数利用効率が向上する。これらのことを考慮して、FDMA 方式あるいは TDMA 方式の周波数利用効率は、

$$\eta_{\text{FDMA}} = \eta_{\text{TDMA}} = \begin{cases} B \cdot \frac{\frac{C}{N_0 W_s}}{\frac{E_b}{N_0}} & \left(\frac{MR_b}{W_s} < rH \log_2 m\right) \\ BrH \log_2 m & \left(\frac{MR_b}{W_s} \geq rH \log_2 m\right) \end{cases} \quad (3.35)$$

となる [16]。ただし、 $B$  は周波数再利用数、 $r$  は誤り訂正符号の符号化率、 $H$  ( $0 \leq H \leq 1$ ) はガードバンドまたはガードタイムによる損失分、 $m$  は変調における信号点数 (例えば、位相変調の場合の位相数に相当) である。

図3.8に周波数利用効率を示す [13]。この図では、誤り訂正符号を採用することとして評価している。それぞれの符号化率に対応して 10<sup>-5</sup> のビット誤り率を得るのに必要な  $E_b/(N_0 + I_0)$  を表3.1に示す [13]。これは、FDMA や TDMA の場合は  $E_b/N_0$  に相当する。また、各パラメータ  $V$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $H$ ,  $\log_2 m$  は、それぞれ 1 とした。

この図より、誤り訂正を行わない場合は CDMA 方式の周波数利用効率が他の方式より低いことがわかる。しかし、CDMA 方式では誤り訂正符号の効果が顕著に表れ

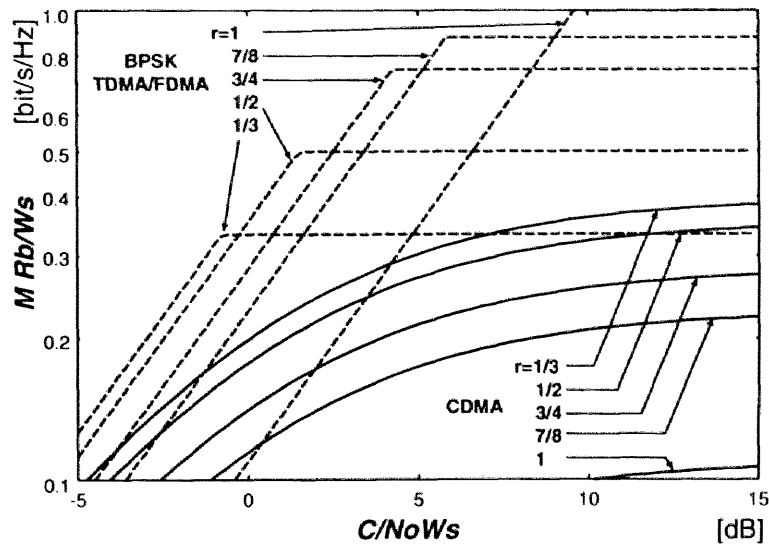


図 3.8: 周波数利用効率

る。他の方式では、電力制限の領域(直線的に増加している部分)で効果が見られるものの、帯域制限の領域(一定値を保っている部分)では、誤り訂正符号を採用しない方が周波数利用効率が高くなっている。

CDMA 方式では、システムの信号対雑音比  $C/N_0W_s$  は、ユーザ数  $M$  が大きいとき  $I_0/N_0$  と等しくなる。すなわち、図3.8の横軸は、干渉電力密度と熱雑音電力密度との比を示しており、この比が大きいほど高い周波数利用効率を得ることができる。

図3.8では、送信側や受信側での干渉低減策を考慮していないが、これらを採用することで CDMA 方式の周波数利用効率を更に向上させることができる。特に VA のような送信側での干渉低減策の効果は大きく表れる。受信側での干渉低減策の効果は送信側ほど直接的ではないが、システム構成次第では  $A$  を小さくすることができる。もし、 $A$  がとても小さく、式 (3.34) の分母の括弧中の第 2 項を 1 に比べて無視できるならば、周波数利用効率は  $V = 1$  の場合でも FDMA や TDMA の電力制限の場合と同等になる。

### 3.3.2 回線容量

回線容量は、ユーザが同時に使うことができる最大チャネル数を示す。FDMA 方式や TDMA 方式では、回線容量の概念が明確であり、与えられた回線容量内で通信需要に増減があっても、通常、通信品質に影響しない。また、回線容量を越える呼が発生した場合、この呼は拒否され、呼損となる。しかし、CDMA 方式では回線容量の概念が明確でない。これは、CDMA 方式ではチャネルを物理的に分割しているのではな

く、信号品質の劣化のみによって回線数が制限されるからである。このことを考慮して、CDMA 方式の回線容量を定義しなければならない。ここでは、アップリンク（移動局から基地局への回線）における回線容量について考える。

FDMA 方式や TDMA 方式の帯域制限下における回線容量は、式 (3.35) より、

$$M = \frac{W_s B r H \log_2 m}{R_b} \quad (3.36)$$

となる。

CDMA 方式の場合、同時使用回線数の増加が干渉数の増加となる。そこで、回線容量を品質が所定値より低くなる場合のユーザ数と定める。式 (3.30) より回線容量は、

$$\begin{aligned} M &= 1 + \frac{W_s}{R_b} \cdot \frac{N_0 + I_0}{E_b} - \frac{W_s N_0}{R_b E_b} \\ &= 1 + \frac{W_s}{R_b} \cdot \frac{N_0 + I_0}{E_b} - \frac{N_s}{C} \end{aligned} \quad (3.37)$$

となる。ここで、 $N_s$  はシステム全体の熱雑音電力、 $C$  は全搬送波電力である。

例えば、所定のビット誤り率を  $10^{-3}$  とし、これが  $E_b/(N_0 + I_0)$  が 5 [dB] で得られるとする。また、システムの  $C/N_s$  を 1 に設定できるとすると、 $W_s/R_b = 100$  のとき、 $M = 20$  となる。

次に、より現実に近い状況を考える。複数のセルを想定し、他セルからの影響を受けると仮定する。そして、基地局のアンテナのビームは 3 分割されている（セクタ化という）。また、ボイス・アクチベーションも考慮する。この場合、ビット誤り率が  $10^{-3}$  を越える確率を  $P_{out}$  とすると、

$$P_{out} = P_r(BER > 10^{-3}) = P_r\left(\sum_{i=1}^{M_s} x_i + \frac{I}{C} > \delta\right) \quad (3.38)$$

で表される。ただし、 $I$  は他セルから到来する総干渉電力、 $M_s$  は 1 セクタ内におけるユーザ数、 $x_i$  は 1 会話中での音声の発生を表すランダム変数であり、確率  $v$  (この確率を音声活性化率とよぶ) で 1 をとり、確率  $(1 - v)$  で 0 をとる。したがって、ある時点に存在する音声の数は 2 項分布に従う。また、 $\delta$  は次式で表される。

$$\delta = \frac{W_s}{R_b} \cdot \frac{N_0 + I_0}{E_b} - \frac{N_s}{C} \quad (3.39)$$

先程と同様に、所定のビット誤り率を  $10^{-3}$  とし、これが  $E_b/(N_0 + I_0) = 5$  [dB] で得られるとする。他セルから到来する総干渉電力  $I$  はランダム変数であり、ガウス分布に従うとみなすことができる。この場合、他セルが全負荷のとき、 $I/C$  の平均は  $0.247M_s$ 、分散は  $0.078M_s$  になることが示されている [14]。以上を式 (3.38) に適用して、

$$P_{out} = \sum_{i=1}^{M_s-1} \binom{M_s-1}{i} v^i (1-v)^{M_s-1-i} \cdot Q\left[\frac{\delta - i - 0.247M_s}{\sqrt{0.078M_s}}\right] \quad (3.40)$$

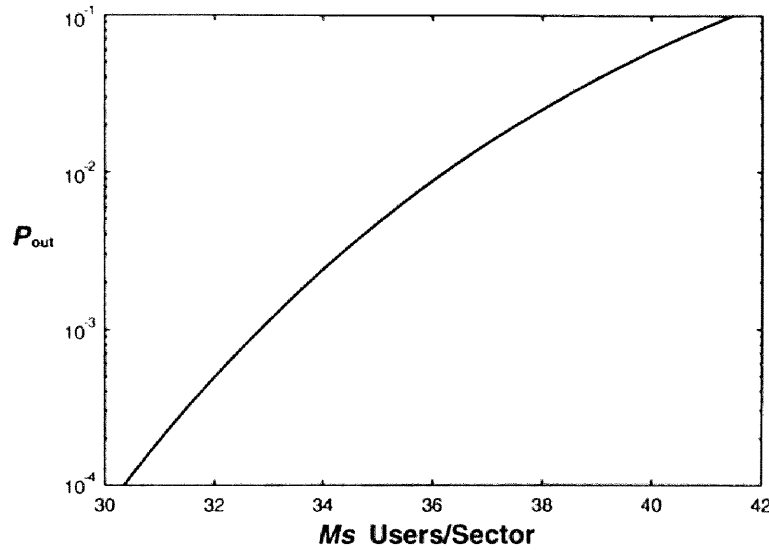


図 3.9: アップリンクにおける回線容量例

となる. ただし,  $Q[\cdot]$  は式 (3.25) で得られる.

図3.9に  $M_s$  に対する  $P_{out}$  を示す. ここで, 音声活性化率  $v = 3/8$ ,  $\delta = 30$  とした. この図より, サービス限界の通信品質を誤り率  $10^{-3}$  としたとき, 例えばこの品質を全体に対し 99% の時間, 維持できる回線容量はセクタあたり 36 回線になることを意味している.

システムの運用状態やトラヒック状態も考慮して効率を評価するには, 最大呼量が適している. これは, 回線容量と呼損率が与えられたとき, その制限内でとり得る最大の呼量を表し, アーラン・キャパシティ [15] とかトラヒック・キャパシティ [16] と呼ばれている. 呼量とは単位時間当たりの呼の延保留時間を表し, その単位はアーラン [erl] である.

呼がポアソン生起し, その保留時間が指数分布であり, 回線容量が  $S$  チャンネルの場合, システムは待ち行列モデル  $M/M/S$  で表さる. このときの呼量  $a$  と呼損率  $Q_R$  の関係は, アーラン B 式で表され, 次式のようになる [17].

$$Q_R = \frac{\frac{a^S}{S!}}{\sum_{i=0}^S \frac{a^i}{i!}} \quad (3.41)$$

図3.10に, 許容できる呼損率が  $B_a = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$  のときの, 回線容量対呼量を示している. この図より, 回線容量の増加分以上に呼量が増加することがわかる. つまり, 回線容量を 2 倍に増やしたとき, 呼量は 2 倍以上になる. この効果は大群

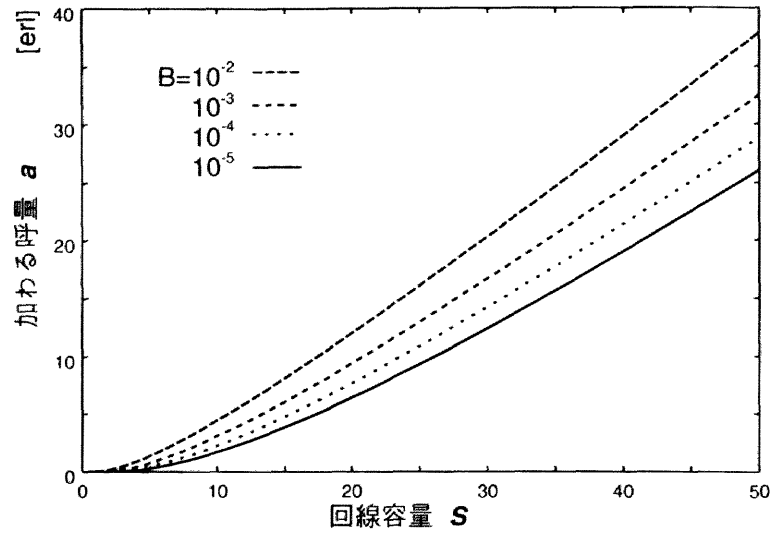


図 3.10: 回線容量対呼量

効果と呼ばれ, 回線数が大きくなるほど能率が大となることを示している.

図3.9において, 誤り率が所要値の  $10^{-3}$  を越える確率  $P_{out}$  を若干高めることを許せば, ユーザ数を増やすことができる. さらに, 大群効果によって同じ呼損率を与える呼量をユーザ数の増加分以上に増やすことができる. このような CDMA 方式に特有の性質はソフトキャパシティと呼ばれ, トラヒックの変動に対して CDMA 方式が柔軟に対応できることを示している [16].

### 第 3 章の参考文献

- [1] 小川明他, マルチメディア時代のワイヤレスコミュニケーション, 平成 8 年度電子情報通信学会東海支部専門講習会資料, 1997 年 2 月.
- [2] 山里敬也他, CDMA の基礎とシステム技術, JIEC セミナ資料, 1997 年 3 月.
- [3] 小川明他, CDMA 方式と次世代移動体通信システム, トリケップス, 1995 年.
- [4] H. Taub and D. L. Schilling, Principles of Communication Systems, McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [5] J. G. Proakis, Digital communications – third edition, McGraw-Hill, 1995.
- [6] 深沢敦司, 瀧澤由美, 羽島光俊, “スペクトル拡散通信の基礎と移動体通信への応用,” 電子情報通信学会誌, vol.81, no.1, pp.51-59, 1998 年 1 月.
- [7] 横山光雄, スペクトル拡散通信システム, 科学技術出版社, 1988 年.
- [8] 丸林元, 中川正雄, 河野隆二, スペクトル拡散通信とその応用, 電子情報通信学会, 1998 年.
- [9] A. J. Viterbi, CDMA : principles of spread spectrum communication, Addison Wesley, 1995.
- [10] M. B. Pursley, “Performance Evaluation for Phase-Code Spread-Spectrum Multiple-Access Communication – Part I: System Analysis,” IEEE Trans. Commun., Vol.COM-25, No.8, pp.795-799, Aug. 1977.
- [11] M. B. Pursley and D. V. Sarwate, “Performance Evaluation for Phase-Code Spread-Spectrum Multiple-Access Communication – Part II: Code Sequence Analysis,” IEEE Trans. Commun., Vol.COM-25, No.8, pp.800-803, Aug. 1977.



- [12] J. M. Holtzman, "A Simple, Accurate Method to Calculate Spread-Spectrum Multiple-Access Error Probabilities," IEEE Trans. Commun., Vol.40, No.3, March 1992.
- [13] A. J. Viterbi, "When not to spread spectrum – a sequel," IEEE Commun. Magazine, vol.23, no.4, pp.12-17, April 1985.
- [14] K. S. Gilhousen, M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley, "On the capacity of a cellular CDMA system," IEEE Trans. Vehic. Technol., vol.40, no.2, pp.303-312, May 1991.
- [15] A. M. Viterbi, and A. J. Viterbi, "Erlang capacity of a power controlled CDMA system," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.11, no.6, pp.892-900, Aug. 1993.
- [16] D. E. Everitt, "Traffic engineering of the radio interface for cellular mobile networks," Proc. of IEEE, vol.82, no.9, pp.1371-1382, Sep. 1994.
- [17] L. Kleinrock, Queueing systems, vol.1: Theory, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.

## 第 4 章

# CDMA ALOHA 方式

### 4.1 はじめに

単純な ALOHA 方式では同時に 1 つのユーザーしかパケットを送出することはできない。このため、パケットが送信されているか、送信されていないかということに着目して解析すれば良かった [1], [2]。しかし、CDMA ALOHA 方式では、多元接続可能という性質により、同時に複数のユーザーがパケットを送出することが可能になる。さらに、Pure ALOHA 方式に CDMA 技術を適用した CDMA Unslotted ALOHA (CDMA U-ALOHA) 方式においては、各局が非同期にパケットを送出できるといった特長を持っているため、同時にチャネルに伝送されているパケットの数 (同時送信局数) が時々刻々と変化する。これらの特長のために解析が複雑なものとなる。

CDMA U-ALOHA 方式の解析を行った文献もあるが、パケットの伝送の成功、失敗はそのパケットの始めの部分にのみ依存するというパーフェクトキャプチャを仮定したり [3] ~ [5]、同時送信局数が常にあるスレッシュホールド以下ならパケットの伝送に成功するというチャネルモデル (ここでは  $\beta$  チャネルモデルと呼ぶ) を仮定している [6], [7]。しかし、パーフェクトキャプチャは、パケット継続時間内の同時送信局数の遷移を考慮していない、 $\beta$  チャネルモデルは、スペクトル拡散の特徴である誤り率の緩やかな変化を考慮していないといった欠点がある。

そこで、小川研究室の佐藤氏がこれらの仮定を用いていない新たな解析手法を提案した [8]。ユーザ数を無限と仮定し、パケットの発生がポアソン分布、パケット長が指数分布に従う場合について、同時送信局数の遷移をマルコフ連鎖モデルで表すことにより解析を行っている。さらに、パケット長が固定長の場合についても解析がなされている [9]。固定長パケットを用いると、可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優れている等の利点がある。しかし、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

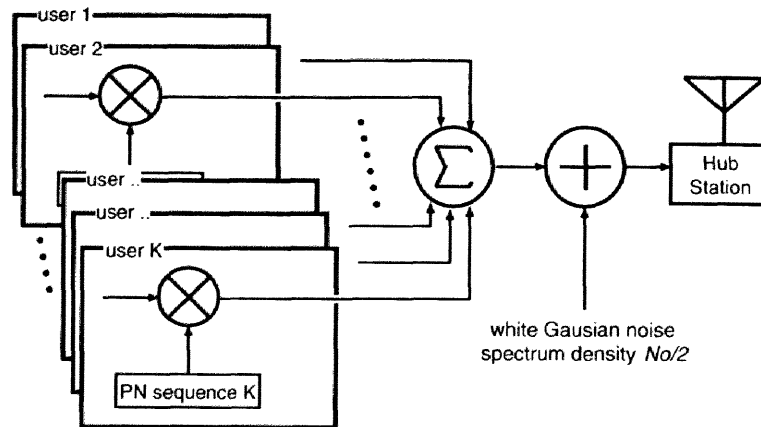


図 4.1: システムモデル

存することになり、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、パケット長は固定長なのでパケットの頭の部分の干渉パケットが必ずパケット長時間内に終了することを利用して終了率を定めている。しかしながら、この手法では相変わらずマルコフ性が成り立たず、パケットの発生がより複雑なシステムを解析することが困難である。

本章では CDMA ALOHA 方式の特性解析、特性評価を行う。まず始めに、Slotted ALOHA 方式に CDMA 技術を適用した CDMA Slotted ALOHA (CDMA S-ALOHA) 方式の特性解析について述べる [10] ~ [13]。この方式ではパケットがスロットと呼ばれる時間枠に同期して送出されるため、スロット内において同時送信局数が一定になり、解析が容易に行える。次に、CDMA U-ALOHA 方式の特性解析を行う。まずはユーザ数が無限、パケット長が指数分布に従う場合についての佐藤氏の解析手法 [8] について述べる。そしてこれを発展させて、パケット長が固定長の場合についても検討を行う。ここでは佐藤氏の手法 [9] とは違い、マルコフ性が成立するように終了率を定める手法を提案することで特性解析を行う [14]。さらに、佐藤氏の手法では解析が困難であったユーザ数有限を仮定した場合について、提案手法を用いてスループット特性を解析的に求める [15], [16]。

## 4.2 システムモデル

システムモデルを図4.1に示す。各ユーザーは固有に割り当てられた拡散符号を用いて、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。

- 各パケットは、全て等しい電力で受信される。

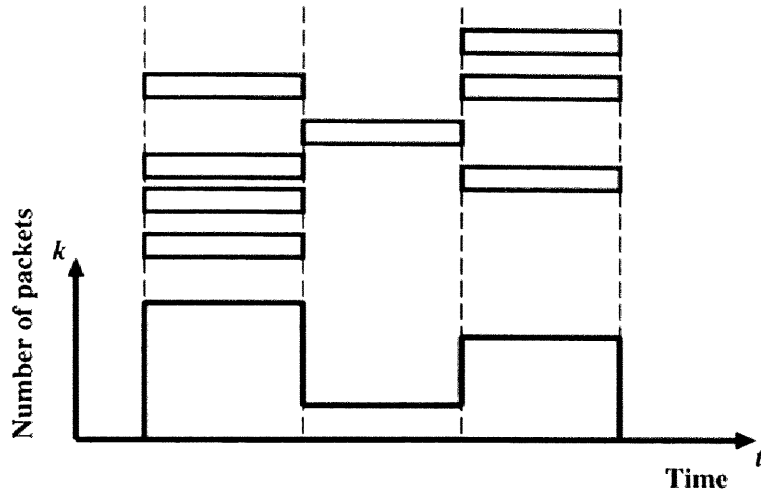


図 4.2: CDMA S-ALOHA 方式のパケットの到着の様子

- 各ユーザーに割り当てられる拡散符号はランダム符号である。また、誤りの原因として多元接続干渉と熱雑音の影響を考慮したとき、ビット誤り率  $P_b(m)$  は式 (3.26) によって得られる。
- 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。

### 4.3 CDMA Slotted ALOHA 方式

本節では Slotted ALOHA 方式に CDMA を適用した CDMA S-ALOHA 方式について検討を行う。各ユーザはスロットの長さに等しい固定長パケットを生成し、スロットに同期してパケットを送出する。パケット長を  $L$  ビット、ユーザ数を  $K$  とする。さらに、各ユーザは 1 スロットあたり生起率  $\lambda$  でパケットを送出するものとする。このときのパケットの到着状況を図 4.2 に示す。

それぞれのスロットにおいて、各ユーザは他ユーザに対して独立にパケットを送ることになる。このため、各スロットにおける同時送信局数は、生起率  $\lambda$  でパケットを送信するという独立な試行を  $K$  回繰り返した結果になる。つまり同時送信局数は 2 項分布に従う。同時送信局数が  $m$  となる確率を  $P_m$  とすると、

$$P_m = \binom{K}{m} \lambda^m (1 - \lambda)^{K-m} \quad (4.1)$$

となる。ユーザ数が十分大きいとき、 $P_m$  は

$$P_m \approx \frac{G^m}{m!} e^{-G} \quad (4.2)$$

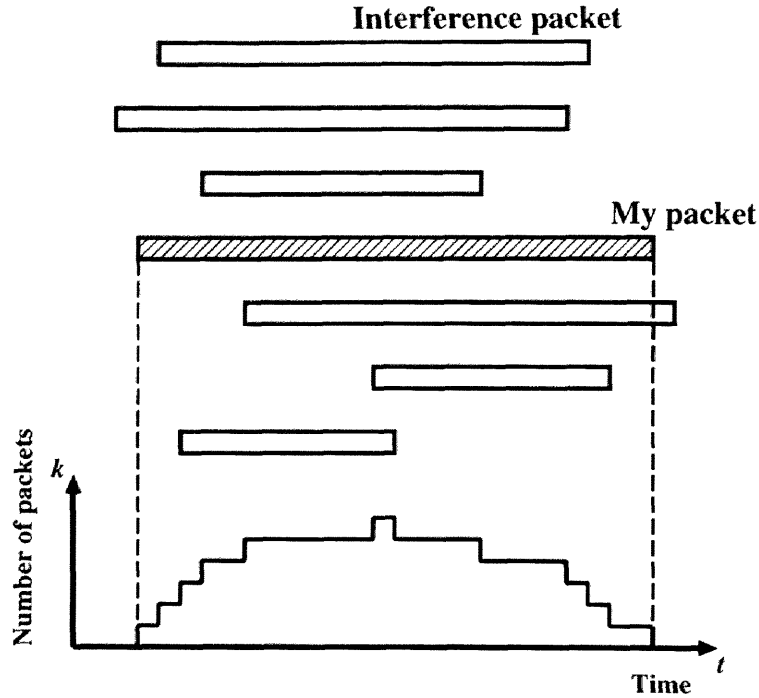


図 4.3: 指数長パケットの到着の様子

とポアソン分布で近似できる。ただし、オフロードロード  $G$  は 1 スロットに発生する平均パケット数であり、 $G = K\lambda$  となる。なお、式 (4.2) はユーザ数を無限と仮定した場合の同時送信局数の分布ともみなすことができる。

スループット特性を 1 スロット (1 パケット長時間) に成功する平均パケット数と定義する。同時送信局数は 1 スロット内において一定になるので、スループット特性は

$$S = \sum_{m=1}^K m \cdot P_m \cdot (1 - P_b(m))^L \quad [\text{packet/slot}] \quad (4.3)$$

となる。

## 4.4 CDMA Unslotted ALOHA 方式

CDMA U-ALOHA 方式の特性を、ユーザ数無限と仮定して、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。さらに、ユーザ数有限を仮定した場合についても解析を行う。

### 4.4.1 指数長パケット

パケット長が指数分布に従うとすると指数分布のマルコフ性により特性解析が簡

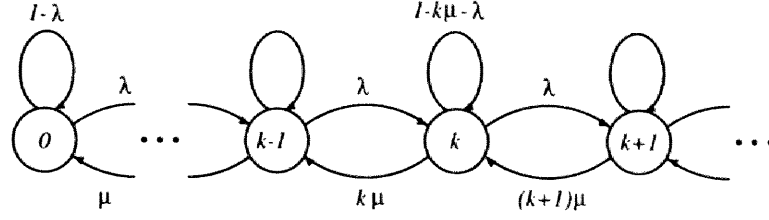


図 4.4: 指数長パケットにおける干渉パケット数の状態遷移図

単になる．このようなパケットを指数長パケットと呼ぶことにする．この指数長パケットの到着の様子を図4.3に示す．CDMA U-ALOHA 方式では，CDMA S-ALOHA 方式と異なり，各ユーザがパケットを非同期に送出するため同時送信局数が時々刻々と変化する．

パケット長が平均  $\bar{L}$  (平均パケット長時間は  $\bar{T}_p = \bar{L}/R$ ,  $R$  は伝送レート) の指数分布に従う指数長パケットの場合を考える．ユーザ数無限を仮定し，パケットの発生は生起率  $\lambda$  のポアソン分布に従うものとする．各ユーザはいつでもパケットを送出することができるので，同時に送信されるパケット数に制限はない．よって，このシステムにおける同時送信局数の分布は待ち行列モデルにおける  $M/M/\infty$  と一致する [8]．このような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，同時送信局数が遷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 [17]．

ここで，あるパケットに着目し，このパケットのパケット成功確率を求める．まず始めに，着目パケットに対する干渉パケット数  $k$  の定常状態確率  $P_k$  を求める．待ち行列モデル  $M/M/\infty$  に従うシステムの干渉パケット数の状態遷移図を，図4.4に示す．ただし，終了率は干渉パケット数を  $k$  とすると， $k\mu = k/\bar{T}_p$  と表される．

定常状態確率  $P_k$  は，式 (A.10) において  $\lambda_k = \lambda$ ,  $\mu_k = k\mu$  とすればよいので，

$$P_k = \frac{(\lambda \bar{T}_p)^k}{k!} e^{-\lambda \bar{T}_p} = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \quad (4.4)$$

となる．ただし，オフロード  $G$  は平均パケット長時間に発生するパケットの呼量であり， $G = \lambda \bar{T}_p$  となる．

ここで， $P_S(k, i)$  を着目パケットにおいて，1 ビット目から  $i$  ビット目までパケットの伝送に成功し，さらに  $i$  ビット目の干渉パケット数が  $k$  である確率とする． $P_S(k, i)$  は以下のように求めることができる．

(i)  $i = 1$  のとき;

パケットの1ビット目における干渉パケット数はパケットが送信される直前の干渉パケット数に等しいので、式(4.4)の定常状態確率より、

$$P_S(k, i) = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \cdot P_c(k) \quad (4.5)$$

となる。ただし、 $P_c(k)$  は干渉パケット数が  $k$  のとき、 $\Delta t (=1 \text{ ビット時間})$  における成功確率であり、

$$P_c(k) = 1 - P_b(k + 1) \quad (4.6)$$

となる。

(ii)  $i > 1$  のとき;

微小時間  $\Delta t$  を1ビット時間とする。この微小時間内にパケットの複数個の生起、複数個の終了、および生起、終了が同時に起こることは無視できると仮定する。さらに、干渉パケット数の遷移は微小時間  $\Delta t$  ごとに起こるものと仮定する。つまり時間  $\Delta t$  内では干渉パケット数は一定であるとする。これらの仮定の下で干渉パケット数の遷移は、 $\Delta t$  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。

これらの仮定と状態遷移図4.4より、 $P_S(k, i)$  は次式のように得られる。

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & \{P_S(k, i-1) \cdot (1 - k\mu\Delta t - \lambda\Delta t) \\ & + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \\ & + P_S(k-1, i-1) \cdot \lambda\Delta t\} \cdot P_c(k) \end{aligned} \quad (4.7)$$

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、 $i = L$  を代入して

$$Q_S(G, L) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \quad (4.8)$$

となる。

パケット長が指数分布に従う場合、これまで定義したようにスループットを1パケット長時間に成功する平均パケット数とすると、パケットの長さを考慮していないために特性を評価する上で不適切な指標になってしまう。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して評価を行うことにする。呼量で表したスループットは、

$$S = G \cdot \frac{1}{L} \sum_{L=1}^{\infty} L \cdot Q_S(G, L) \cdot f(L) \quad [\text{erl}] \quad (4.9)$$

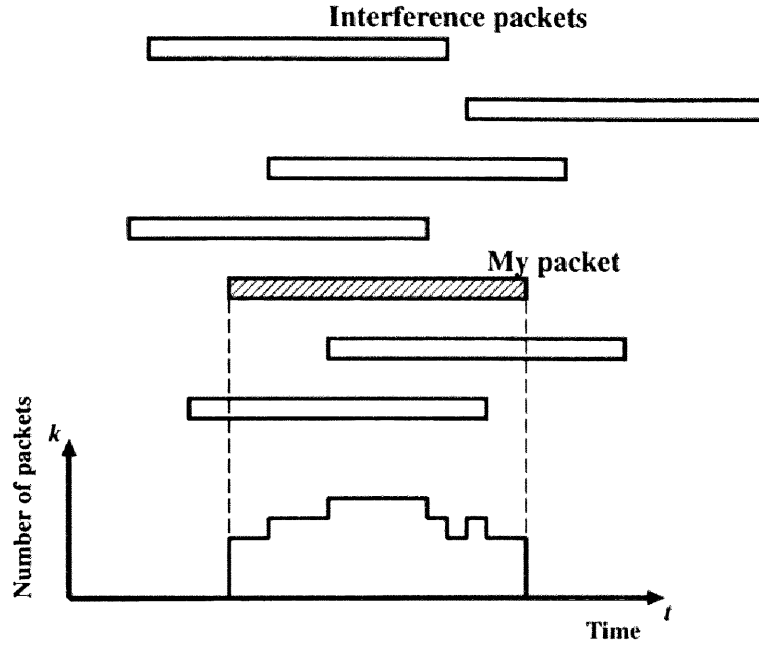


図 4.5: 固定長パケットの到着の様子

となる. ここで,  $f(L)$  はパケット長の確率密度関数であり,

$$f(L) = \mu e^{\mu L/R} \quad (4.10)$$

である.

#### 4.4.2 固定長パケット

次にパケット長が固定の場合について考える. 図4.5に固定長パケットの到着状況を示す. 指数長パケットの場合と同じくユーザ数無限を仮定し, パケットの発生は生起率 $\lambda$ のポアソン分布に従うものとする. 同時に送信されるパケット数に制限はない. よって, 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 [9], [14].

ところで, 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. しかし, 待ち行列モデル  $M/D/\infty$  で表されるような呼がランダム生起する即時式の待ち行列モデルは, 系内呼数の定常状態確率はサービス時間分布に依存しないという性質を持っている [18]. つまり, 待ち行列モデル  $M/D/\infty$  の



定常状態確率は  $M/M/\infty$  の場合と等しくなる。以下においてこのことを利用し、指数長パケットに用いた手法を参考にして固定長パケットの場合の解析を行う。

指数長パケットの場合と同様に  $P_S(k, i)$  を着目パケットにおいて、1 ビット目から  $i$  ビット目までパケットの伝送に成功し、さらに  $i$  ビット目の干渉パケット数が  $k$  である確率とする。

(i)  $i = 1$  のとき;

待ち行列モデル  $M/D/\infty$  で表されるシステムの定常状態確率は  $M/M/\infty$  の定常状態確率と同じなので、式 (4.4) より、

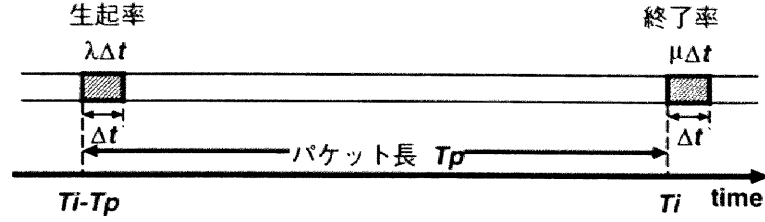
$$P_S(k, i) = \frac{G^k}{k!} e^{-G} \cdot P_c(k) \quad (4.11)$$

となる。

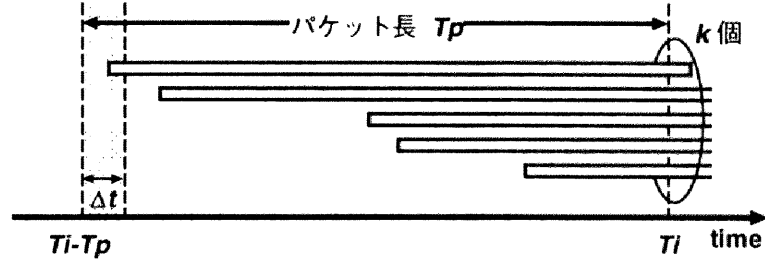
(ii)  $i > 1$  のとき;

$i > 1$  の場合も指数長パケットの場合と同様に  $P_S(k, i)$  を求める。そのためには、干渉パケット数の遷移を出生死滅過程として表すことが必要である。パケットの発生はポアソン過程に従うので、生起率は指数長パケットの場合と同様に  $\lambda$  となる。しかし、終了率は固定長パケットのためにマルコフ性が成り立たず、一意に定めることができない。そこで、固定長パケットの終了率を指数長パケットの場合と同様に定める指数長近似法を提案する [14]。この近似法の原理を以下に述べる。

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4.6 (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4.6 (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、もしパケットの発生がポアソン分布にしたがうならば、 $k$  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 [17]。



(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 4.6: 指数長近似法の原理

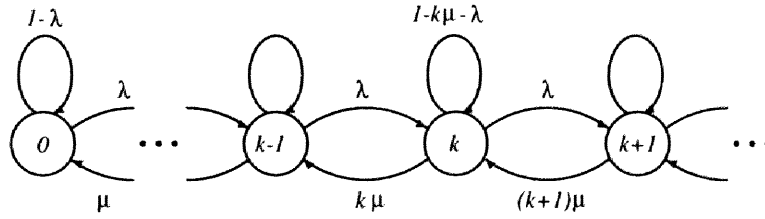


図 4.7: 固定長パケットにおける干渉パケット数の状態遷移図

よって、システムは図4.7に示されるような状態遷移図に従うと近似される。指数長パケットの場合と同様に、微小時間内にパケットの複数個の生起、複数個の終了、および生起、終了が同時に起こることは無視できる、干渉パケット数の遷移は微小時間  $\Delta t$  ごとに起こるものと仮定する。このとき、図4.7の状態遷移図を用いて、 $P_S(k, i)$  は次式のように得られる。

$$\begin{aligned}
 P_S(k, i) = & \{P_S(k, i-1) \cdot (1 - k\mu\Delta t - \lambda\Delta t) \\
 & + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \\
 & + P_S(k-1, i-1) \cdot \lambda\Delta t\} \cdot P_c(k)
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

ここで得られた  $P_S(k, i)$  を漸化的に計算して  $P_S(k, L)$  を求め、これを使ってパケッ

ト成功確率  $Q_S(G)$  は,

$$Q_S(G) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \quad (4.13)$$

となる.

よってスループット特性をパケット長時間に成功する平均パケット数と定義すると,

$$S = G \cdot Q_S(G) \text{ [packet}/T_p] \quad (4.14)$$

となる.

#### 4.4.3 ユーザ数有限

ここまでの CDMA U-ALOHA 方式の特性解析ではユーザ数を無限を仮定してきた. しかし, 現実的なシステムを想定した場合, ユーザ数を有限と仮定することが必要である. 例えば拡散符号として Gold 符号を用いた場合, 各ユーザに対して固有の拡散符号を割り当てるとすると, ユーザ数は最大 (拡散率 + 2) となる. このためユーザ数を有限と仮定し, ユーザ数を変化させたときに特性にどのような影響を与えるかを明かにする必要がある. そこで, 本節ではユーザ数有限の場合の特性解析を行う [15], [16]. 4.4.1, 4.4.2 節に述べられていたように, パケット長が固定長でも指数長でも解析手法はさほど大きな差がないので, ここでは固定長パケットについて検討する.

各ユーザにおけるパケットの発生間隔は平均  $1/\lambda$  の指数分布に従うものとする. そして, パケットを送信している間は新たにパケットの発生は起こらない. パケット長は固定長 ( $L$ [bits]) とし, パケット長時間を  $T_p (= L/R, R$  は転送レート) とする. そしてユーザ数無限の場合と比較するために, オファードロードを  $G = \lambda \cdot T_p \cdot K$  と定める.

このようなシステムでは, パケットの生起間隔は平均  $1/\lambda$  の指数分布, サービス時間分布 (パケット長) は固定, 同時に送信されるパケット数に制限はないので窓口は無限, ユーザ数は有限である. よって, 同時送信局数は待ち行列モデルにおける  $M/D/\infty//K$  に従うとみなすことができる. さらに,  $M/D/\infty//K$  のような準ランダム生起する即時式の待ち行列モデルは, サービス時間のロバストネスという性質により定常状態においては  $M/M/\infty//K$  と等価である [18].

まず始めに, 同時送信局数の平均値  $G_{sys}$  を求める. ユーザ数有限の場合,  $G_{sys}$  と  $G$  は等しくならない. これは, パケットを送信しているユーザ局において, 新たにパケットは発生しないと仮定しているためである.  $G_{sys}$  は  $M/M/\infty//K$  の定常状態確

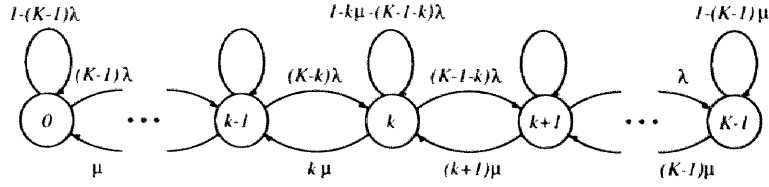


図 4.8: 有限ユーザ, CDMA U-ALOHA 方式における干渉パケット数の状態遷移図

率 [17] より次式のように求められる.

$$G_{sys} = \sum_{m=0}^K m \cdot \frac{(\lambda/\mu)^m \binom{K}{m}}{(1 + \lambda/\mu)^K} = \frac{G}{1 + G/K} \quad (4.15)$$

但し, 終了率  $\mu = 1/T_p$  とする.

次にパケット成功確率を求める. 指数長近似法に基づき, 終了率をサービス時間分布が指数分布の場合と同様に定めると, 干渉パケット数の状態遷移は図4.8のような出生死滅過程に従う.

(i)  $i = 1$  のとき

図4.8に表される状態遷移図の定常状態確率 [17] より  $P_S(k, i)$  は以下のようになる.

$$P_S(k, i) = \begin{cases} \frac{(\lambda/\mu)^k \binom{K-1}{k}}{(1 + \lambda/\mu)^{K-1}} \cdot P_c(k) & ; \text{if } k < K \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.16)$$

(ii)  $i > 1$  のとき

微小時間内にパケットの複数個の生起, 複数個の終了, および生起, 終了が同時に起こることは無視できる, 干渉パケット数の遷移は微小時間  $\Delta t$  ごとに起こるものと仮定する. これらの仮定と図4.8の状態遷移図より, 以下のように  $P_S(k, i)$  が得られる.

(a)  $k < K - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & [P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t - (K-1-k)\lambda\Delta t\} \\ & + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \\ & + P_S(k-1, i-1) \cdot (K-k)\lambda\Delta t] \cdot P_c(k) \end{aligned} \quad (4.17-a)$$

(b)  $k = K - 1$  のとき

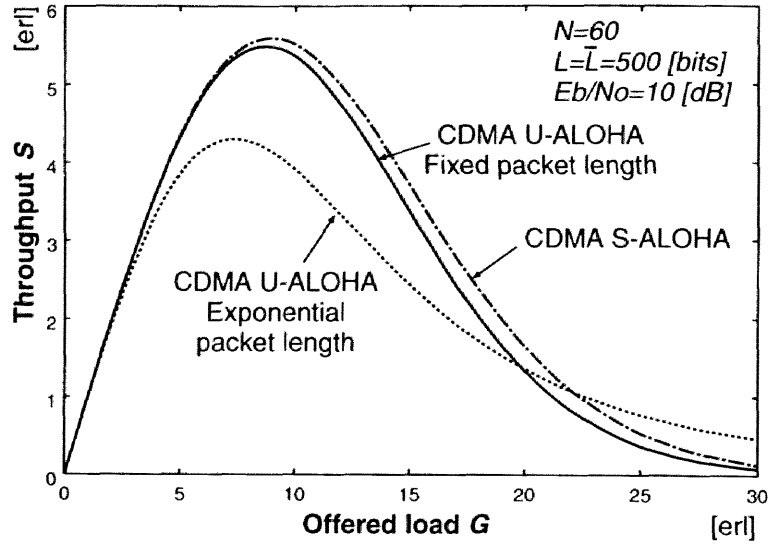


図 4.9: CDMA S-ALOHA 方式と指数長及び固定長パケット CDMA U-ALOHA 方式の比較

$$\begin{aligned}
 P_S(k, i) = & [P_S(K-1, i-1) \cdot \{1 - (K-1)\mu\Delta t\} \\
 & + P_S(K-2, i-1) \cdot \lambda\Delta t] \cdot P_c(K-1)
 \end{aligned}
 \tag{4.17-b}$$

(c)  $k > K-1$  のとき

$$P_S(k, i) = 0 \tag{4.17-c}$$

$P_S(k, i)$  を漸化的に計算して  $P_S(k, L)$  を求め、これを用いてパケット成功確率は、

$$Q_S(G) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \tag{4.18}$$

となる。

よって、スループット特性は実際に送信されているパケットの平均トラヒック量とパケット成功確率との積で求めることができるので、

$$S = G_{sys} \cdot Q_S(G) \text{ [packet}/T_p] \tag{4.19}$$

となる。

## 4.5 数値例

図4.9に CDMA S-ALOHA 方式と指数長及び固定長パケット CDMAU-ALOHA 方式の特性比較を示す。 拡散率  $N = 60$ , (平均) パケット長  $L = \bar{L} = 500$  [bits],

$E_b/N_0 = 10 [\text{dB}]$  の場合である。比較は呼量で評価したスループット特性を用いる。固定長パケット CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性は、4.4.2節においてパケット長時間に成功する平均パケット数と定義して導出したが、パケット長が一定であるので、呼量で求めたスループット特性と等しくなる。また、4.3節で求めた CDMA S-ALOHA 方式のスループット特性は 1 スロットに成功する平均パケット数と定義したが、1 スロットの長さとはパケット長時間は等しいので、パケット長時間に成功する平均パケット数と等価であり、呼量で求めたスループット特性と等しくなる。

図4.9より、どの場合もスループット特性は、はじめオフアド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アドロードの増加とともに減少していくことがわかる。これはオフアドロードの低いところではパケット衝突に起因するパケット伝送誤りがありすぎないため、パケットが多く発生した方が特性がよいが、オフアドロードが大きくなると、同時にパケットがたくさん発生しすぎるために、パケット成功確率が低くなってしまいうからである。

CDMA S-ALOHA 方式と固定長パケット CDMA U-ALOHA 方式を比較すると、CDMA S-ALOHA 方式の方が常に特性が良いものの、CDMA を用いない場合のような大きな差は生じない。Slotted ALOHA 方式の方が特性がよくなる理由は、同時送信局数がパケットを送っている間、常に一定になり、パケットがほんの一部分重なってしまうことによってパケットの伝送が失敗するのを防ぐためである。CDMA を用いた場合、ビット誤り率は同時送信局数に対し緩やかに変化する。そのため、同時送信局数がパケット継続時間内において少しくらいふらつきが生じて、大きな特性劣化は生じない。

また、CDMA U-ALOHA 方式において、指数長パケットと固定長パケットの場合を比較すると、オフアドロードが 20 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く、この値よりオフア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。最大スループットは両者では大きな差が生じる。指数長パケットの場合、短いパケットは伝送に成功しやすいものの、呼量は少なく、長いパケットは伝送に失敗しやすいために特性が悪くなる。しかし、オフア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ため、オフアドロードの大きいところで固定長パケットの場合よりよくなる。固定長パケットを用いると、上に示したように可変長パケットよりスループット特性がよいといった利点がある。これに加え、本来、可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という利点があるため、以下においては、固定長パケットを扱うことにする。

図4.10に拡散率を変化させたときの固定長パケット CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性を示す。拡散率を  $N = 30, 60, 100, 300$  と変化させている。オフア

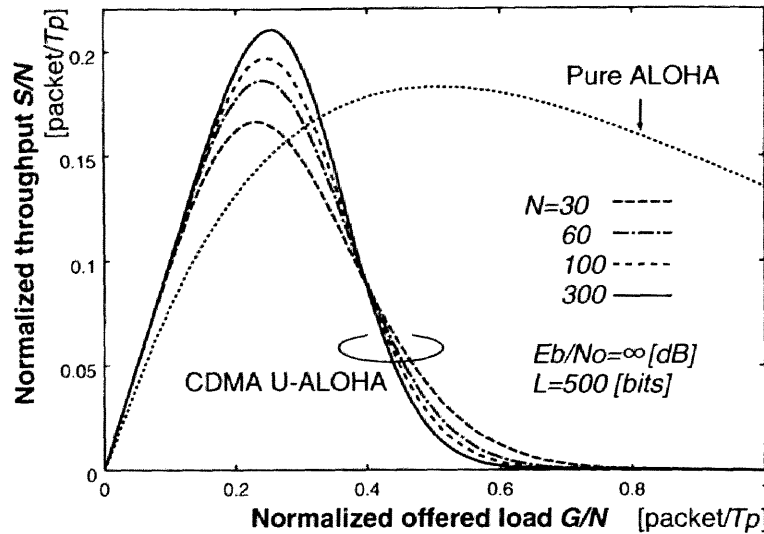


図 4.10: 拡散率を変化させた場合の固定長パケット CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性

ドロードおよびスループットを拡散率で規格化している。また、比較のため、Pure ALOHA 方式の特性も示している。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。これは、大群効果により拡散率が大きくなると特性が向上することを示している。また、CDMA U-ALOHA 方式と Pure ALOHA 方式を比べると、CDMA U-ALOHA 方式はオフアドロードの低いところで Pure ALOHA 方式より特性が良く、オフアドロードの高いところでは Pure ALOHA 方式より悪くなる。この理由は以下の通りである。Pure ALOHA 方式ではパケットの一部分でも重なってしまうとパケットの伝送に失敗する。これに対し、CDMA U-ALOHA 方式では多少の重なりが許されるが、あまりにも多くのパケットが同時に送信されるとそれらすべてのパケットが誤ってしまう。さらに、CDMA U-ALOHA 方式ではスループットが最大値をとるまで、直線的に傾き 1 で増加する。この場合、発生したパケットはほぼすべて伝送に成功するため、パケットの伝送誤りがあまり発生しないことになる。

図 4.11 に  $E_b/N_0$  を変化させたときの固定長パケット CDMA U-ALOHA のスループット特性の解析結果を示す。拡散率  $N = 60$ 、パケット長  $L = 500$  [bits]、 $E_b/N_0 = 10, 20, \infty$  [dB] の場合である。 $E_b/N_0$  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 4.12 にパケット長を変化させたときの固定長パケット CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性を示す。パケット長を  $L = 100, 500, 1000, 5000$  [bits] としている。

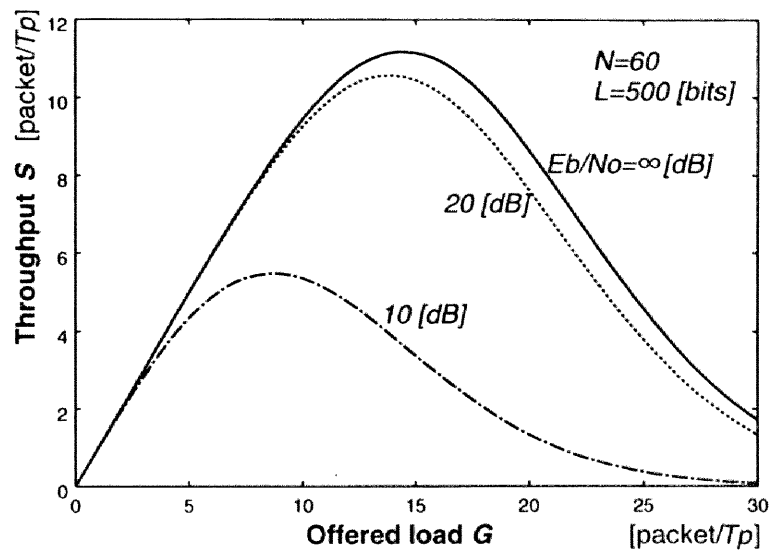


図 4.11:  $E_b/N_0$  を変化させたときの固定長パケットのスループット特性

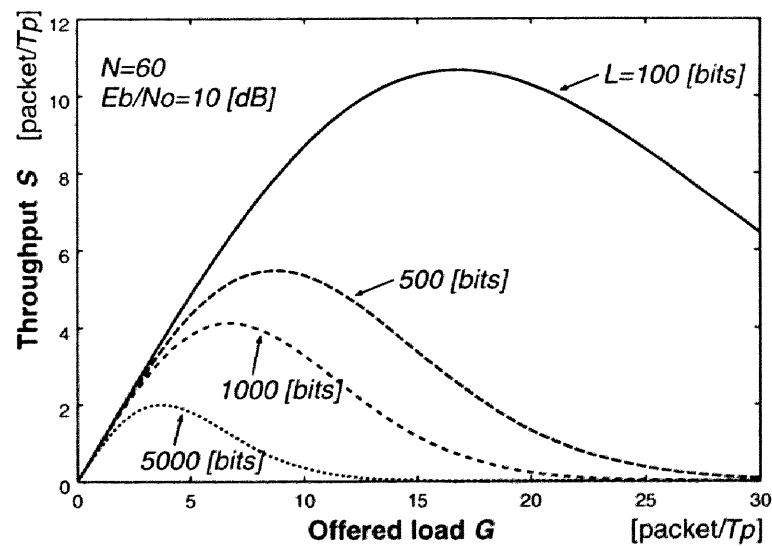


図 4.12: パケット長を変化させた場合の固定長パケットのスループット特性



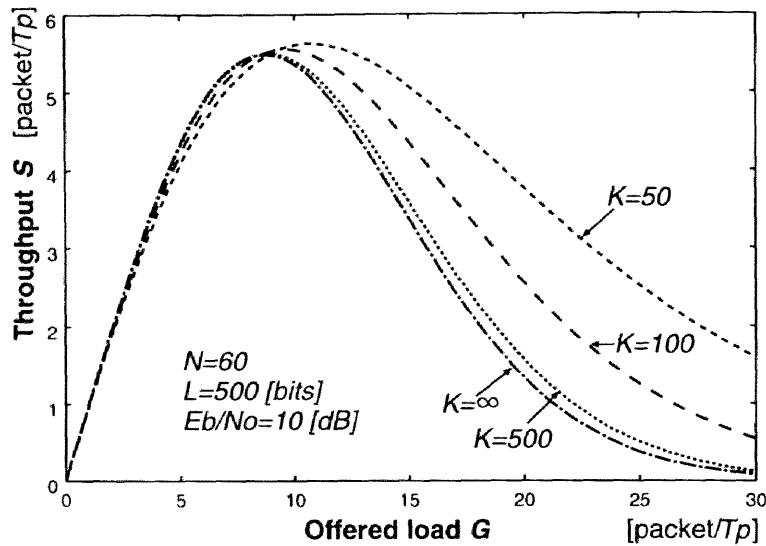


図 4.13: 有限ユーザ数の場合の固定長パケットのスループット特性

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特性はよくなることがわかる。ただし、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4.13にユーザ数が有限の場合のスループット特性を示す。比較のためにユーザ数が無限と仮定したときの解析結果も示してある。拡散率  $N = 60$ ,  $E_b/N_0 = 10$  [dB], パケット長  $L = 500$  [bits] である。この図より、ユーザ数が増えるにつれユーザ数無限を仮定した場合に近付いていくことがわかる。およそ  $K = 500$  くらいでユーザ数無限を仮定した場合とほぼ一致する。また、ユーザ数が増えるにつれ特性が劣化することがわかる。これは、ユーザ数が増えると送信されるパケットの数も増えるので、特性の劣化が生じるためである。

## 4.6 まとめ

本章では CDMA ALOHA 方式のスループット特性を解析的に導出し、特性評価を行った。CDMA S-ALOHA 方式では、同時送信局数の分布が2項分布またはポアソン分布に従うことを用いて解析を行った。CDMA U-ALOHA 方式においては、干渉パケット数の遷移を待ち行列モデルで表すことにより解析を行った。干渉パケット数の遷移はそれぞれ、指数長パケットの場合は  $M/M/\infty$ , 固定長パケットの場合は  $M/D/\infty$ , ユーザ数有限固定長パケットの場合は  $M/D/\infty//K$  に従う。このことを利用し、パケット成功確率を導出し、スループット特性を得た。

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。CDMA S-ALOHA 方式は CDMA U-ALOHA 方式より特性は良いものの、両者の間でそれほど大きな差はない。CDMA U-ALOHA 方式は Pure ALOHA 方式と比べると、大群効果によりスループットの最大値が向上する。そして、CDMA U-ALOHA 方式はトラヒックが低いところで特性が良くなることがわかった。

## 第 4 章の参考文献

- [1] N. Abramson, "The ALOHA system – Another alteernative for computer communications," Fall Joint Computer Conference, pp.281-285, 1970.
- [2] N. Abramson, "Fundamentals of packet multiple access for satellite networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.10, no.2, pp.309-316, Feb. 1992.
- [3] 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.
- [4] E. S. Sousa and J. A. Silvester, "Determination of optimum transmission ranges in a multi-hop spread spectrum network," IEEE MILCOM'85, vol.2, pp.449-454, Oct. 1985.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] D. -M. Lim and H. -S. Lee, "Throughput-delay and stability analysis of an asynchronous spread spectrum packet radio network," IEEE Trans. Commun., vol.41, no.4, pp.469-478, Nov. 1992.
- [8] 佐藤 毅, 利光 清, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "熱雑音を考慮した Spread Unslotted Aloha 方式のスループット解析," 電子情報通信学会技術報告, SST94-9, pp.25-30, 1994 年 6 月.

- [9] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, "Throughput analysis of DS/SSMA unslotted aloha with fixed packet lengths," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.14, no. 4, pp.750-756, May 1996.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] R. D. J. van Nee, R. N. van Wolfswinkel, and R. 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.
- [13] 小川明他, CDMA 方式と次世代移動体通信システム, トリケップス, 1995.
- [14] 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," 電子情報通信学会技術報告, SST96-61, pp.13-18, 1996 年 12 月.
- [15] 岡田 啓, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "ユーザー数有限, 固定長パケットにおける CDMA unslotted ALOHA 方式の特性解析," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, vol.A-5-11, pp.112, 1997 年 9 月.
- [16] 岡田 啓, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, "有限ユーザ CDMA unslotted ALOHA 方式のスループット解析法に関する一検討," 電子情報通信学会論文誌, vol.J81-A, no.7, pp.1089-1092, 1998 年 7 月.
- [17] L. Kleinrock, Queueing Systems, vol. 1, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.
- [18] 藤木正也, 雁部頼一, 通信トラヒック理論, 丸善, 1980 年.

## 第 5 章

### パケットの再送を考慮に入れた特性解析

#### 5.1 はじめに

第4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では発生の様子が異なるため、これらを区別して解析を行うことが必要である。なぜなら、新規パケットの発生は各ユーザ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。

また、Pure ALOHA 方式においてシステムの安定性について調べられており、双安定な状態が生じることがあると報告されている [1] ~ [5]。この双安定な状態とは、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ち込むと特性の劣化は避けられない。CDMA ALOHA 方式においても双安定な状態になる可能性がある。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 [6], [7]。第4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。また、システムの安定性に関し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6章で検討する。

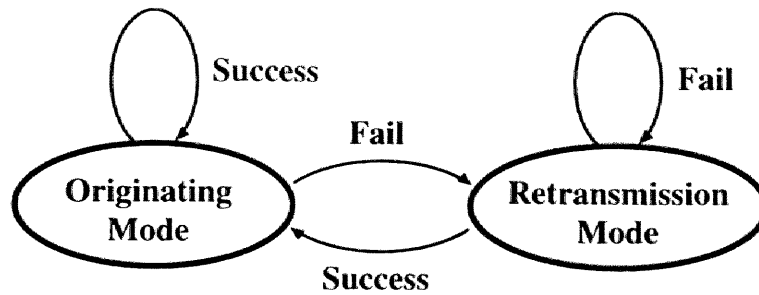


図 5.1: ユーザ局における新規モードと再送モードの変化

## 5.2 システムモデル

CDMA U-ALOHA 方式を考える。第4.2節で述べたシステムモデルと同様に、各ユーザは固有に割り当てられた拡散符号を用いてパケットを直接拡散し、このパケットを1ホップで中央局に送信する。そして、パケット長は固定長、ユーザ数  $K$  は無限大とみなせれる程十分大きいものとする。

さらに、以下の手順でパケットの再送を行うものとする。各ユーザは図5.1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はユーザあたり生起率  $\lambda_o$  で新規パケットを発生する。生起率  $\lambda_o$  はシステムのトラヒックの発生状況によって決まる値である。そして、発生したパケットは直ちにチャンネルに送信され、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、正しく伝送されない場合は再送モードに移る。再送モードにあるユーザはユーザあたり生起率  $\lambda_r$  でパケットを再送し、そのパケット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。生起率  $\lambda_r$  はシステムを設計する上で決めることができる値である。ここではすべてのユーザで同じ生起率  $\lambda_r$  を用いることにする。すべてのユーザが新規モードにいと仮定したときのパケット生起率を  $\Lambda_o(= K\lambda_o)$ 、オフロードを  $G_o(= \Lambda_o \cdot T_p)$ 、また全ユーザが再送モードにいと仮定したときの生起率を  $\Lambda_r(= K\lambda_r)$ 、オフロードを  $G_r(= \Lambda_r \cdot T_p)$  とする。すべてのユーザに対して再送モードにあるユーザの割合を状態  $r$  とする。なお、 $G_o$ 、 $G_r$  はそれぞれ新規パケットの生起率  $\lambda_o$ 、再送パケットの生起率  $\lambda_r$  を定数倍した値であり、新規発生率、再送率を表すものである。

## 5.3 状態占有確率とスループット、遅延特性

本節では、再送パケットの影響を考慮して特性解析を行う。

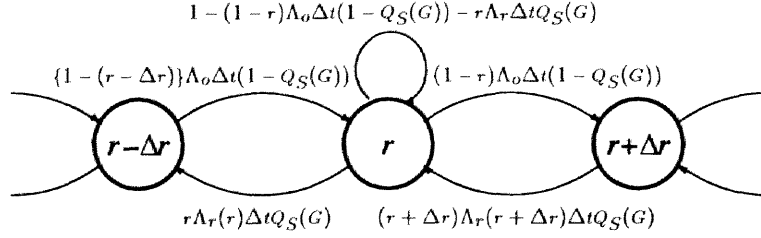


図 5.2: 状態  $r$  の遷移

システムが定常状態にあるときを想定しているので、状態  $r$  は非常にゆっくりと変化するとみなすことができ、短時間では一定と仮定できる。また、ユーザ数は無限大とみなせれる程大きいものとしている。そこで、システム全体における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。そして、オフアードロード  $G$  はパケット長時間  $T_p$  に発生する平均パケットの数なので、

$$G = \lambda \cdot T_p = (1-r)G_o + rG_r \quad (5.1)$$

と表される。

式 (5.1) より、 $G_o$  と  $G_r$  の値が異なるとき、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。第4章で行なった解析手法ではこれ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、状態  $r$  に着目して特性解析を行っていく。式 (5.1) より状態  $r$  における全体のオフアードロードが求まるので、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。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。

まず始めに、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5.2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。よって状態占有確率  $\pi(r)$  は、

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

$$+(r + \Delta r) \Lambda_r \Delta t \cdot Q_S(G) \cdot \pi(r + \Delta r) \quad (5.2)$$

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 (4.13) の  $Q_S(G)$  を用いて次のようになる。

$$S(G_o) = \int_0^1 \{(1-r)G_o + rG_r\} \cdot Q_S((1-r)G_o + rG_r) \cdot \pi(r) dr \quad (5.3)$$

また、遅延特性も同様にして、

$$D(G_o) = \int_0^1 D_U((1-r)G_o + rG_r) \cdot \pi(r) dr \quad (5.4)$$

となる。ただし、 $D_U(G)$  はオフアードロードが  $G$  のときの遅延時間であり、2.2節と同様にして次のように求められる。

$$\begin{aligned} D_U(G) &= \frac{1}{T_p} \left\{ T_e \cdot Q_S(G) + (T_e + \Delta)(1 - Q_S(G))Q_S(G) \right. \\ &\quad + (T_e + 2\Delta)(1 - Q_S(G))^2 Q_S(G) + \cdots \\ &\quad \left. + (T_e + q\Delta)(1 - Q_S(G))^q Q_S(G) + \cdots \right\} \\ &= \frac{1}{T_p} \left\{ \frac{\Delta}{Q_S(G)} (1 - Q_S(G)) + T_e \right\} \end{aligned} \quad (5.5)$$

ただし、

$$\Delta = T_p + T_a + \overline{T_w} + 2T_e \quad (5.6)$$

である。また、平均再送間隔時間  $\overline{T_w}$  は、

$$\overline{T_w} = \frac{1}{\lambda_r} = \frac{K}{\Lambda_r} \quad (5.7)$$

として求められる。

## 5.4 期待流動値とシステムの安定性

本節では、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 [1]。これは再送モードのユーザが増加する割合と定義し、

$$\begin{aligned} d(r) &= (\text{新規モードから再送モードに移る割合}) \\ &\quad - (\text{再送モードから新規モードに移る割合}) \end{aligned} \quad (5.8)$$



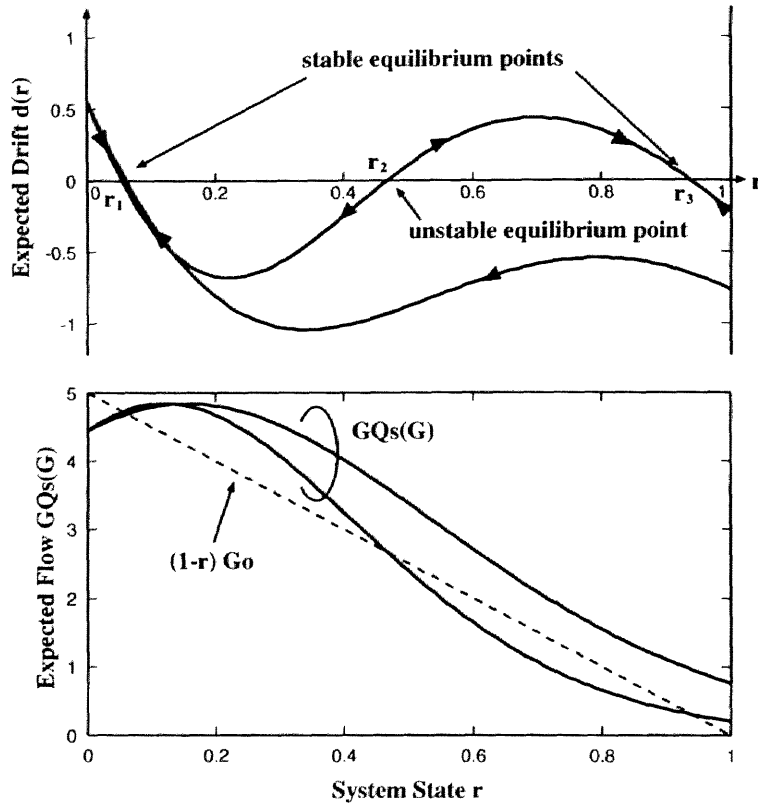


図 5.3: 期待流動値

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 (5.8) は次式のようになる．

$$\begin{aligned} d(r) &= (1 - r)G_o(1 - Q_s(G)) - rG_rQ_s(G) \\ &= (1 - r)G_o - GQ_s(G) \end{aligned} \quad (5.9)$$

式 (5.9) 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 5.3 は期待流動値と Expected Flow を表している．式 (5.9) 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， $GQ_s(G) \leq (1 - r)G_o$ ．
2. もし  $r = 1$  ならば， $GQ_s(G) \geq (1 - r)G_o$ ．

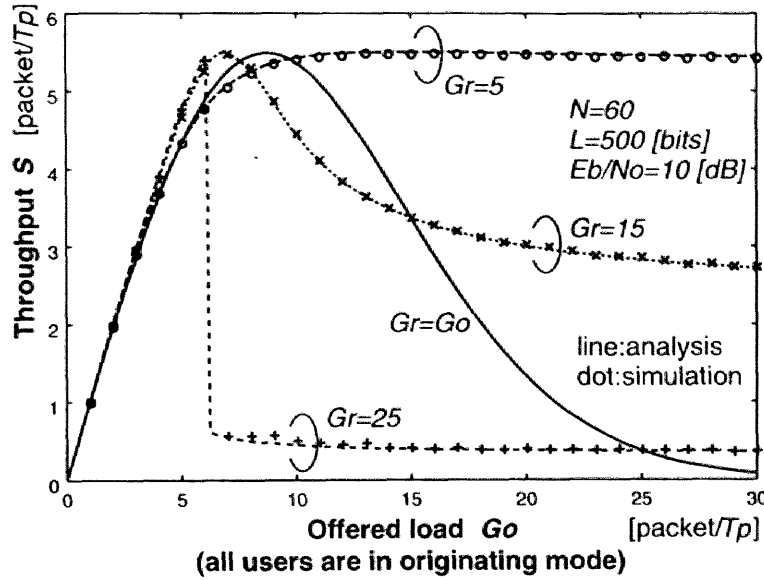


図 5.4: 再送パケットを考慮したスループット特性

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  $G$  の関数としてみたとき, 上に凸の曲線となる.  $G$  は式 (5.1) からわかるように, 状態  $r$  に関して  $G_o$  と  $G_r$  の間を直線的に変化する. よって,  $GQ_S(G)$  は状態  $r$  の関数とみたとき,  $G_o$  と  $G_r$  の値により, 単調増加するか, 単調減少するか, 上に凸の曲線になるか, 一定値を保つことになる. また,  $(1-r)G_o$  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図 5.3 に示すように, 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が多いため, 望ましくない安定状態であると言える. 統計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.

## 5.5 数値例

図 5.4, 5.5 に拡散率  $N = 60$ ,  $E_b/N_0 = 10$  [dB], パケット長  $L = 500$  [bits], ユーザ数

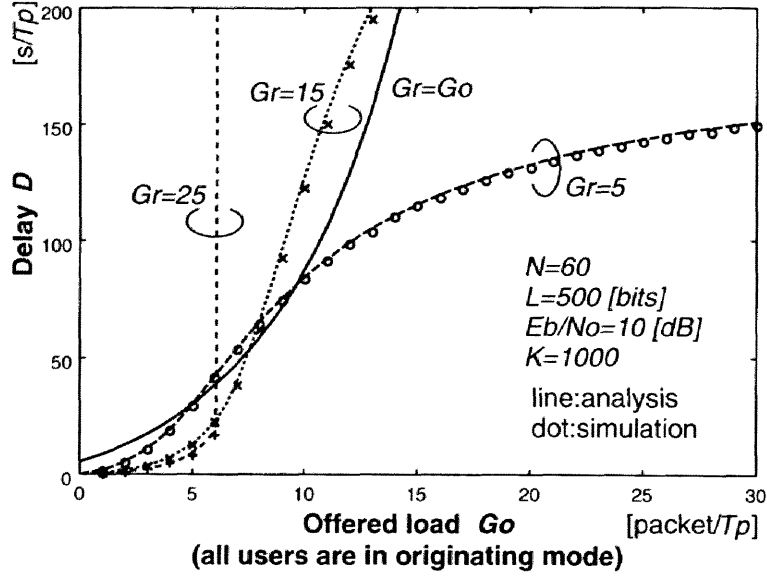


図 5.5: 再送パケットを考慮した遅延特性

$K = 1000$ , 再送率  $G_r = 5, 15, 25$  のときのスループット特性および遅延特性を示す。比較のために,  $G_r = G_o$  とした場合についても示してある。ここでは, 伝搬遅延時間  $T_e$  や処理時間  $T_a$  は 0 とした。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。計算機シミュレーションは 5.2 節で述べたシステムモデルに基づいてパケットの発生や再送が行われており, 解析で用いた, 「短時間では状態  $r$  を一定とみなし, この状態  $r$  から算出される発生率に従ってパケットがチャネルに送信される」という仮定を用いていない。これらの図から, 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, 再送率が最も大きい  $G_r = 25$  の場合について着目する。他の場合と比べて, 新規発生率  $G_o$  が小さいところでは,  $G_r = 25$  のときの方がスループット特性および遅延特性が共に良くなるが,  $G_o$  がおよそ 6 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。  $G_o$  が小さいところでは, 他の場合と比べて特性は悪くなるが,  $G_o$  が大きくなってくると, 再送率  $G_r = 5$  のときの方が特性は良くなる。  $G_r = 15$  の場合は  $G_r = 5$  の場合と  $G_r = 25$  の場合の中間の特性になっている。これらの理由は以下のとおりである。新規発生率が小さいとき, パケットの伝送が成功する確率が高いので, 再送率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。また新規発生率が大きいとき, 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, 再送率が小さい方が全体のオフ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。このように, 特性は再送率に大

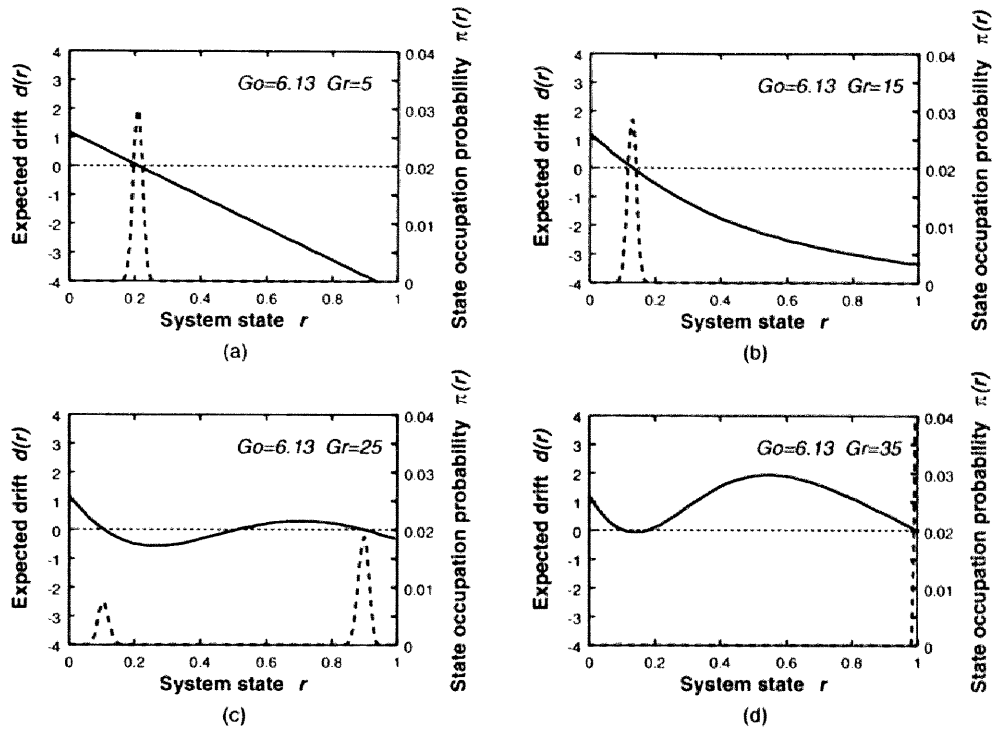


図 5.6: 期待流動値と状態占有確率

きく左右されることになる。

図5.6に新規発生率  $G_o = 6.13$ , 再送率  $G_r = 5, 15, 25, 35$  のときの期待流動値と状態占有確率を示す。  $G_o = 6.13$  を選んだ理由は  $G_r = 25$  の場合に生じている特性の急激な変化について着目するためである。  $G_r = 5$  の場合, 図5.6(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。状態占有確率はピーク値をとる付近を中心に多少幅を有することがわかる。この幅は確率的なふらつきのために存在する。図5.6(b) に示されているように,  $G_r = 15$  の場合, 再送率が大きくなるので, 再送パケットがより速く処理され, 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。平衡点が状態  $r$  のより小さいところに移るということは, 平衡状態における再送モードにいるユーザの割合が減少するため, 特性はよくなる。さらに再送率を大きくした  $G_r = 25$  の場合 (図5.6(c)), 平衡状態が 3 つ存在してしまうのがわかる。再送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アード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。5.4 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。このため、図5.4や図5.5において、 $G_r = 25$  の場合の  $G_o = 6$  付近で見られるような特性の急激な変化が起こる。 $G_r = 35$  の場合になると(図5.6(d)), 再送率が大きくなりすぎ、平衡点は状態  $r$  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が再送モードにある、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。

## 5.6 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、再送率が大きいとき、新規発生率が小さいところで特性がよく、再送率が小さいとき、新規発生率が大きいところで特性がよいのがわかった。このことから、再送率を固定したシステムでは、新規発生率が大きく変化する場合に対し、高スループット、低遅延時間を維持することができないことがわかる。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つ存在する双安定な状態が存在し、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5章の参考文献

- [1] A. B. Carleial and M. E. Hellman, "Bistable behavior of ALOHA-type systems," IEEE Trans. Commun., vol.COM-23, no.4, pp.401-410, April 1975.
- [2] Y. -C. JENQ, "On the stability of slotted ALOHA systems," IEEE Trans. Commun., vol.COM-28, no.11, pp.1936-1939, Nov. 1980.
- [3] Y. -C. JENQ, "Optimal retransmission control of slotted ALOHA systems," IEEE Trans. Commun., vol.COM-29, no.6, pp.891-895, June 1981.
- [4] 福田 明, "アロハ形システムの平衡点による特性解析," 電子通信学会論文誌, vol.J61-B, no.11, pp.959-966, 1978 年 11 月.
- [5] 福田 明, "可変パケット長純アロハシステムの安定性と諸特性," 電子通信学会論文誌, vol.J62-B, no.10, pp.901-908, 1979 年 10 月.
- [6] 岡田啓, 佐藤毅, 山里敬也, 片山正昭, 小川明, "再送を考慮した Spread Unslotted Aloha 方式の特性解析," 電子情報通信学会技術研究報告, SST95-4, pp.19-24, 1995 年 5 月.
- [7] 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.
- [8] T. Yamazato, T. Sato, H. Okada, K. Nishida, M. Katayama, A. Ogawa, "Performance analysis of CDMA ALOHA," ISCOM '95, pp.434-441, Dec. 1995.
- [9] L. Kleinrock, Queueing systems, vol. 1, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.

## 第 6 章

### パケットのアクセス制御

#### 6.1 はじめに

CDMA ALOHA 方式では同時に複数のパケットが送信されることが許される。しかし、同時に送信されるパケットの数が多くなりすぎると、ビット誤り率は劣化し、この影響は同時に送信されているパケット全部におよんでしまう。このため、パケットの送信を何らかの方法で制御するアクセス制御が重要となってくる。そこで、本章ではパケットのアクセス制御について議論する。特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、システムの安定性についても調べ、システムが2つの安定状態が存在する場合があります、このときに望ましくない安定状態に落ち込む可能性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安定状態に落ち込むと、その影響は伝送中の全てのパケットにおよぶ。このとき、殆んど全てのパケットが伝送に失敗してしまい、スループット特性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。そこで、パケットの再送制御の方策として Optimal Retransmission Control (ORC) を提案する [1], [2]。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、パケットの再送が効率良く行われるため、システムが望ましくない状態に落ち込むのを防ぐだけでなく、遅延時間を短くすることができる。さらに、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、実際にチャネルに送信されるパケット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らない。

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、チャン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) [3] ~ [8] 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、中央局がチャンネル伝送中のパケットの数 (同時送信局数) 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 [8] 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より向上し、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、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 [9], [10]。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、パケットの再送をより効率的に行うためにパケットの再送制御を行う。パケットの送信制御は中央局でのアクセス制御、パケットの再送制御はユーザ局でのアクセス制御と言えるので、両方を同時に制御することが可能である。OACP は両方の利点を兼ね備えたアクセス制御方式であるため、それぞれのアクセス制御方式のみを用いる場合より更なる特性の向上が期待できる。

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、使用するチャン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。ここではパケット無線通信におけるアクセスプロトコルに注目し、チャンネルの状態や変復調技術等については考慮しないことにする。

## 6.2 アクセス制御方式

本節では CDMA U-ALOHA 方式の特性向上を図るアクセス制御方式について検討する。まず始めにパケットの送信制御 (CLSP) について述べ、パケットの再送制御



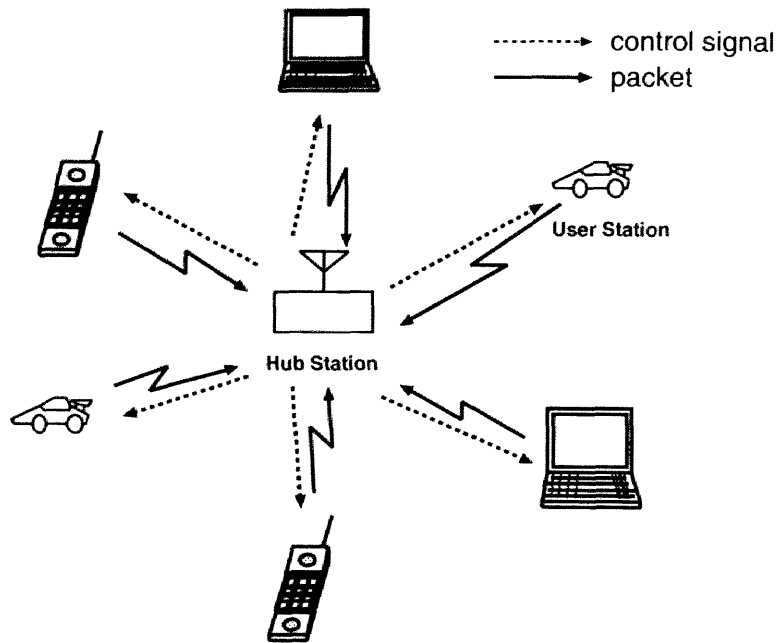


図 6.1: パケットのアクセス制御

(ORC) について述べる。そして、パケットの送信制御と再送制御の両方を用いる最適アクセス制御プロトコル (OACP) について述べる。

アクセス制御を行うにあたって、図6.1に示されるようなシステムを用いる。第4.2節でも述べたが、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ている。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して知らせる。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。

### 6.2.1 パケットの送信制御 (CLSP)

CLSP に基づくパケットの送信制御は、同時に伝送されるパケット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、まず同時送信局数が観測される。同時送信局数の観測は、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。同時送信局数が  $\alpha$  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、同時送信局数が  $\alpha$  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

随時各ユーザに放送して知らせる。ユーザ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。

このようなパケットの送信制御を行うと、同時送信局数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、同時送信局数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。

### 6.2.2 パケットの再送制御 (ORC)

ここではパケットの再送を制御する ORC を提案する [1], [2]。再送パケットは、再送パケットの生起率  $\lambda_r(r) (= G_r(r)/T_p K)$  に従って送信される。これは新規パケットの生起率と異なり、任意に設定することができる。ORC に基づくパケットの再送制御では、この再送パケットの生起率を適切に調節することにより、アクセス制御を行う。

まず、中央局で状態  $r$  の推定を行う。状態  $r$  とは全ユーザに対する再送モードにあるユーザの割合である。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。

$\lambda_r(r)$  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、 $d(r) < 0$  の場合はシステムはより小さい  $r$  に移ろうとし、 $d(r) \geq 0$  の場合でも状態  $r$  が大きくなる量がより小さくなるため、 $r$  の値が小さいところで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 (5.9) 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 (5.1) より次式を満足しなければならない。

$$G_{max} = (1 - r)G_o + rG_r(r) \quad (6.1)$$

従って、再送パケットのオフロードロード  $G_r(r)$  は、

$$G_r(r) = \begin{cases} \frac{G_{max} - (1-r)G_o}{r} & ; \text{if } r \geq 1 - \frac{G_{max}}{G_o} \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.2)$$

となり、 $\lambda_r(r) = G_r(r)/T_p K$  より  $\lambda_r(r)$  が決まる。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。

ところで、提案したパケットの再送制御を行うには、状態  $r$  を推定しなければならない。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。

では、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、システム全体のオフロードロード  $G$  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。

### 6.2.3 最適アクセス制御プロトコル (OACP)

本節で提案する 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 [9], [10]。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については特に考慮されておらず、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。さらに、再送パケットをただ送信するのではなく、パケットの再送制御により再送パケットを効率よく送る。

図6.2に OACP を用いたときのパケットの流れ図を示す。新規に発生したパケットはパケットの送信制御を受ける。新規パケットと再送パケットの両方を合わせた同時送信局数がスレッシュホールドより小さければ、パケットをチャンネルに送信する。このとき、パケットの送信を拒否されたユーザは、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。また、パケットが送信されたけれども、中央局で正しく受信できなかった場合も、このパケットを再送するために再送モードに移る。再送モードのパケットはパケットの再送制御に従って、再送パケットの生起率  $\Lambda_r(r)$  に従いパケット

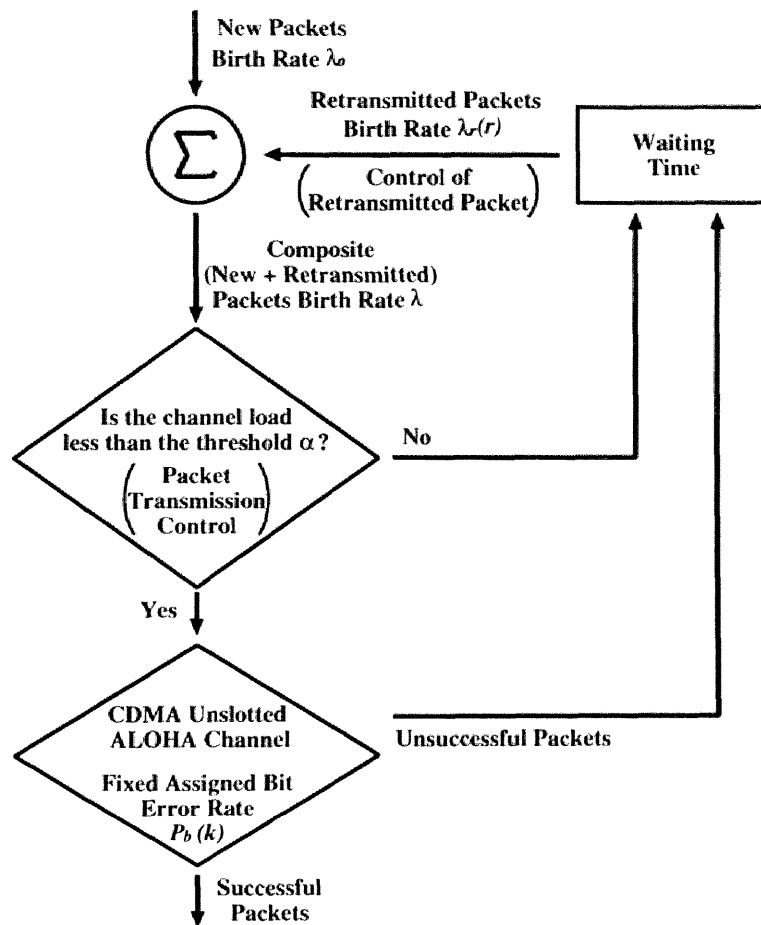


図 6.2: OACP を用いたときのパケットの流れ図

の送信要求を発生する。再送パケットの送信要求が発生したときも、パケットの送信制御を受ける。同時送信局数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。この操作をパケットの送信に成功するまで続ける。

### 6.3 特性解析

まず始めにパケットの送信制御を行なった場合の特性解析を行う。6.2.1節で述べたようなパケットの送信制御を行なった場合、同時送信局数は常に  $\alpha$  以下に抑えられる。パケットの送信要求の発生はポアソン分布に従い、パケット長は固定長なので、同時送信局数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。

実際に送信されているパケットの平均トラヒック量  $G_{sys}$  は同時送信局数の平均値

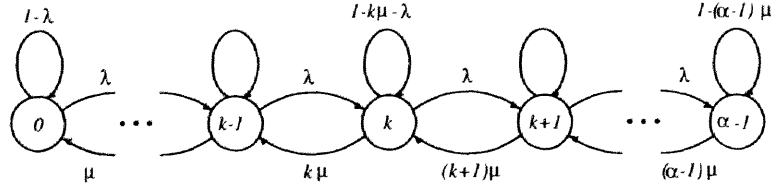


図 6.3: パケットの送信制御を行ったときの干渉パケット数の状態遷移図

として求めることができるので,  $G_{sys}$  は次式のようなになる [13].

$$G_{sys} = \frac{\sum_{j=0}^{\alpha} j \cdot G^j / j!}{\sum_{j=0}^{\alpha} G^j / j!} \quad (6.3)$$

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  $i$  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. 指数長近似法に基づいて終了率を定めると, 干渉パケット数は図 6.3 に示されるような状態遷移図に従う.

(i)  $i = 1$  のとき;

M/D/ $\alpha/\alpha$  の定常状態の式より  $P_S(k, i)$  は以下のようなになる [13].

$$P_S(k, i) = \begin{cases} \frac{G^k / k!}{\sum_{j=0}^{\alpha-1} G^j / j!} \cdot P_c(k) & ; \text{if } k < \alpha - 1 \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.4)$$

(ii)  $i > 1$  のとき;

状態遷移図 6.3 より, 以下のように  $P_S(k, i)$  が得られる.

(a)  $k < \alpha - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & [P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t - \lambda\Delta t\} \\ & + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \\ & + P_S(k-1, i-1) \cdot \lambda\Delta t] \cdot P_c(k) \end{aligned} \quad (6.5-a)$$

(b)  $k = \alpha - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & [P_S(\alpha-1, i-1) \cdot \{1 - (\alpha-1)\mu\Delta t\} \\ & + P_S(\alpha-2, i-1) \cdot \lambda\Delta t] \cdot P_c(\alpha-1) \end{aligned} \quad (6.5-b)$$

(c)  $k > \alpha - 1$  のとき

$$P_S(k, i) = 0 \quad (6.5-c)$$

ここで得られた  $P_S(k, i)$  を漸化的に計算して  $P_S(k, L)$  を求め、これを用いてパケットの送信制御を行った場合のスループット特性は、

$$S(G) = G_{sys} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \quad (6.6)$$

となる。また、パケット成功確率  $Q_S(G)$  は

$$Q_S(G) = \frac{G_{sys}}{G} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \quad (6.7)$$

となる。

なお、ここではユーザ数が無限とみなせれる程十分多い場合の特性解析を行ったが、ユーザ数が有限の場合の特性解析も同様にして行うことができる。ただし、この場合はシステムは待ち行列モデルにおける  $M/D/\alpha/\alpha/K$  に従うことになる [14]。

次にパケットの再送制御を行った場合の特性解析を行う。パケットの再送制御を行ったときの状態占有確率  $\pi(r)$  は、式 (5.2) 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、

$$\begin{aligned} \pi(r) = & \{1 - (r - \Delta r)\} \Lambda_o \Delta t \cdot (1 - Q_S(G)) \cdot \pi(r - \Delta r) \\ & + \{1 - (1 - r) \Lambda_o \Delta t \cdot (1 - Q_S(G)) - r \Lambda_r(r) \Delta t \cdot Q_S(G)\} \cdot \pi(r) \\ & + (r + \Delta r) \Lambda_r(r + \Delta r) \Delta t \cdot Q_S(G) \cdot \pi(r + \Delta r) \end{aligned} \quad (6.8)$$

となる。

従って、OACP を用いたときのスループットは、式 (5.3) 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、

$$S(G_o) = \int_0^1 \{(1 - r) G_o + r G_r(r)\} \cdot Q_S((1 - r) G_o + r G_r(r)) \cdot \pi(r) dr \quad (6.9)$$

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6.4に示す。OACP では、同時送信局数がスレッシュホールド以上の場合、送信を控えることになる。このとき、再送間隔時間  $T_w$  だけ待った後、パケットの送信を試みる。そして同時送信局数がスレッシュホールド未満の場合はパケットの送信を行う。この再送過程は2.4節で述べた CSMA 方式の再送過程とはほぼ同じである。そこで、CSMA 方式の場合と同様にして遅延時間を求める。

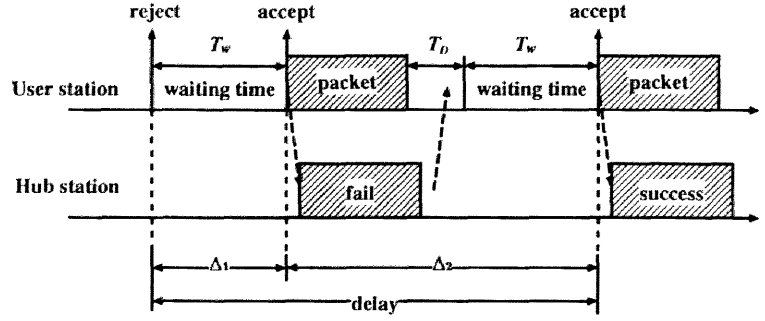


図 6.4: OACP を用いたときのパケットの再送過程

図6.4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、

$$\Delta_1 = \overline{T_w} = K \frac{T_p}{G_r(r)} \quad (6.10)$$

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

と表される。

ここで、同時送信局数がスレッシュホー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、

$$Q_R(G) = \frac{G^\alpha / \alpha!}{\sum_{j=0}^{\alpha} G^j / j!} \quad (6.12)$$

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

となる。これらを用いてオフロードロードが  $G$  のときの遅延特性は次式のように表される。

$$\begin{aligned} D_C(G) &= \frac{1}{T_p} \{ 0 \cdot Q_S(G) + \Delta_1 Q_R(G) Q_S(G) + \Delta_2 Q_F(G) Q_S(G) \\ &\quad + 2\Delta_1 Q_R^2(G) Q_S(G) + 2(\Delta_1 + \Delta_2) Q_R(G) Q_F(G) Q_S(G) \\ &\quad + 2\Delta_2 Q_F^2(G) Q_S(G) + \dots \} \\ &= \frac{1}{T_p} \left\{ \frac{\Delta_1}{Q_S(G)} Q_R(G) + \frac{\Delta_2}{Q_S(G)} (1 - Q_S(G) - Q_R(G)) \right\} \end{aligned} \quad (6.14)$$

よって、遅延特性は式 (6.8) で得られた  $\pi(r)$  を用いて、

$$D(G_o) = \int_0^1 D_C((1-r)G_o + rG_r) \cdot \pi(r) dr \quad (6.15)$$

となる。

なお、パケットの送信制御のみを行った場合のスループット特性は、(6.6) 式に、遅延特性は (6.14) 式になる。また、パケットの再送制御のみを行った場合のスループット特性および遅延特性は、それぞれ (6.9) 式、(6.15) 式において、 $Q_s(G)$  を (4.13) 式によって得られたものを用いればよい。

## 6.4 CDMA パケット無線通信におけるスループット特性の上限と OACP

ある与えられたチャネルや通信方式の下で、CDMA パケット無線通信におけるスループット特性には上限値が存在する。どんなアクセス方式を用いても上限値を超えることはできない。このため、上限値を達成することができるアクセス制御方式がスループット特性の観点からみると最適なアクセス制御方式であるといえる。

本節では、まずはじめに 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求める。そして、OACP がスループット特性の上限値を達成できるように、アクセス制御に必要なパラメータを決める。

### 6.4.1 スループット特性の上限値

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、発生したすべ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、

$$S_{opt} = \begin{cases} G_o & ; \text{if } G_o \leq S_{max} \\ S_u & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.16)$$

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。まず、スループットが最大となるためには、ある着目パケット継続時間内において、同時送信局数が一定にならなければならない。なぜなら、着目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。さらに、同様の理由で、着目パケット継続時



間内だけでなく、常に一定でなければならない。今、同時送信局数が常に  $m$  であるとすると、このときのスループットは  $m \cdot \{1 - P_b(m)\}^L$  となるので、 $S_u$  は

$$S_u = \max_m [m \cdot \{1 - P_b(m)\}^L] \quad (6.17)$$

となる。

#### 6.4.2 OACP のパラメータの決定方法

OACP では、同時送信局数がスレッシュホールド  $\alpha$  の値を越えないようにパケットの送信が制御されるので、スレッシュホールド  $\alpha$  を決める必要がある。また、実際に送信されるパケットのオフアードロードがスループットが  $G_{max}$  になるようにパケットの再送制御を行うので、 $G_{max}$  を求めなければならない。本節では、スループット特性が上限値を達成できるようにパラメータを決める。

式 (6.17) の  $m \cdot \{1 - P_b(m)\}^L$  は、CLSP において、オフアードロード  $G$  を無限大にしたときのスループット特性  $S_{G \rightarrow \infty} = \alpha \cdot \{1 - P_b(\alpha)\}^L$  と一致する [8]。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。スループットの上限値は  $m \cdot \{1 - P_b(m)\}^L$  が最大になるので、 $S_{G \rightarrow \infty}$  が最大となるようにスレッシュホールド  $\alpha$  を選べばよいことになる。

上記のようにスレッシュホールド  $\alpha$  を選ぶと、 $G_{max}$  は無限大になる。パケットの再送は、実際に送信されるパケットのオフアードロードが  $G_{max}$  になるように制御されるので、OACP はオフアードロードが  $G_{max}$  のときのスループット、つまり  $S_u$  を維持できるように動作する。このことから OACP は上限値までスループット特性を高めることができると思われる。

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 (7.2 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。オフアード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。 $G_{max}$  を無限大にすると、非常に微小のアクセス制御遅延が存在しても特性の劣化は著しいと予想される。このため、 $G_{max}$  をむやみに大きな値にするのは得策ではなく、ある程度の値にした方がよいことになる。

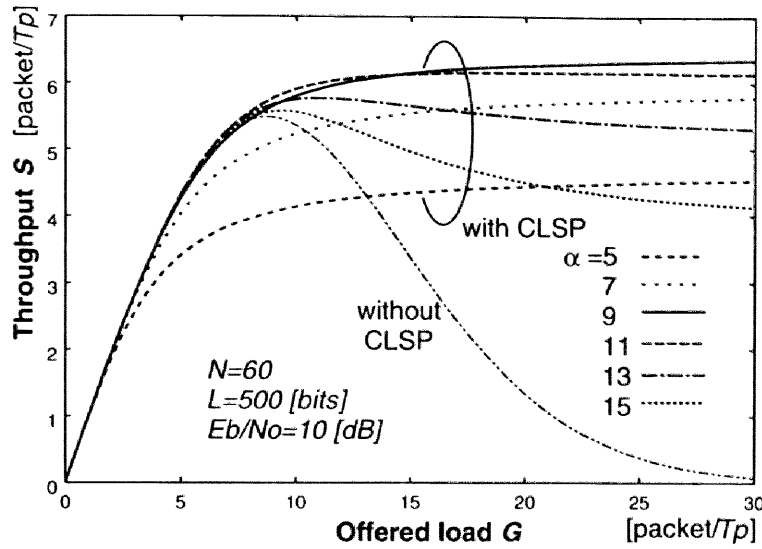


図 6.5: パケットの送信制御 (CLSP) のみを用いたときのスループット特性

## 6.5 数値例

まず初めにパケットの送信制御のみ (CLSP) を行った場合の特性を図6.5に示す。各パラメータの値は、 $N = 60$ ,  $L = 500$  [bits],  $K = 1000$ ,  $E_b/N_0 = 10$  [dB] としている。スレッシュホールドが9以下の場合、スループットはオフロードの増加とともに緩やかに単調増加する。また、スレッシュホールドが大きい方が特性も良くなる。スレッシュホールドが9より大きい場合は、オフロードが大きいく所での特性の劣化がみられ、グラフは上に凸の形になる。これは、パケットが多く送信されてしまい、パケット成功確率が劣化するためである。そして、スレッシュホールドを大きくしていくにつれ、アクセス制御を用いない場合の特性に近付いていく。第6.4.2節で述べた方法によりスレッシュホールドを選ぶと、これは9になる。図より、スレッシュホールドが9の場合の特性は、オフロードが大きいく所での特性劣化がなく、さらにアクセス制御を用いていない場合よりスループットの最大値が高くなることがわかる。

図6.6にユーザ数有限を仮定した場合の CLSP のスループット特性を示す。スレッシュホールドは9とした。ここで、オフロード  $G$  は比較を行うために  $G = K \cdot T_p \cdot \lambda$  とした。ただし、 $\lambda$  は1ユーザにおけるパケット生起率である。また、CLSP を用いない場合についても示してある (図4.13参照)。この図より、 $K = 50$  くらいでもユーザ数無限を仮定した場合にはほぼ近づくのがわかる。CLSP を用いない場合よりも、CLSP を用いた場合の方がユーザ数が少ないときに無限を仮定した場合に近づくのは、同時送信局数が常にスレッシュホールド以下に抑えられており、ユーザ全体に対してパケット

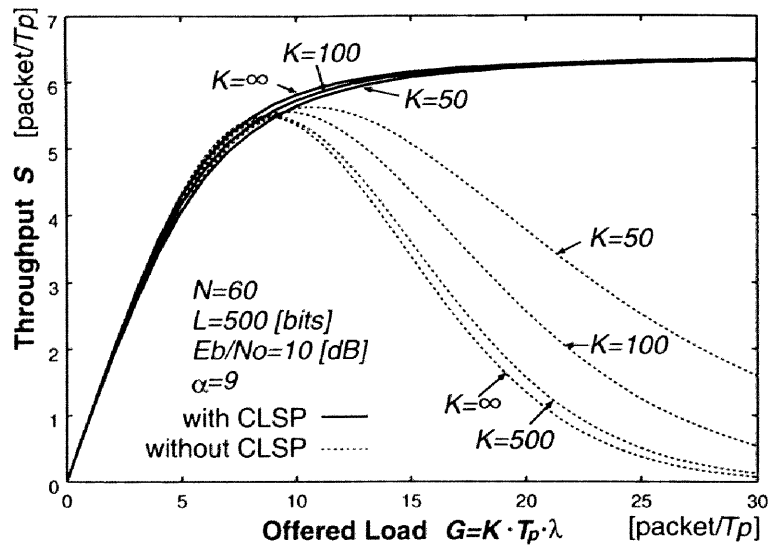


図 6.6: ユーザ数有限の場合の CLSP のスループット特性

送信中のユーザの割合が低くなるからである。またユーザ数が増えるにつれ、アクセス制御を用いない場合は特性が劣化していくが、CLSP を用いた場合はわずかながら特性が向上することがわかる。アクセス制御を用いない場合、ユーザ数が増えると送信されるパケットの数も増えるので特性の劣化が生じる。これに対し、CLSP を用いた場合はパケット送信要求の発生が増えると、同時送信局数がスレッシュホールドに満たない状態が減り、スレッシュホールドに等しい数のパケットを送信している状態が増えるので、チャンネルを有効に利用でき、特性の向上が見られる。

次に本章で述べた各アクセス制御方式の比較を行う。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。図6.7および図6.8に各アクセス制御方式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。パラメータは上記の場合と同様に定める。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。

パケットの送信制御のみを行ったとき (CLSP)、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よりも高く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 (ORC) 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

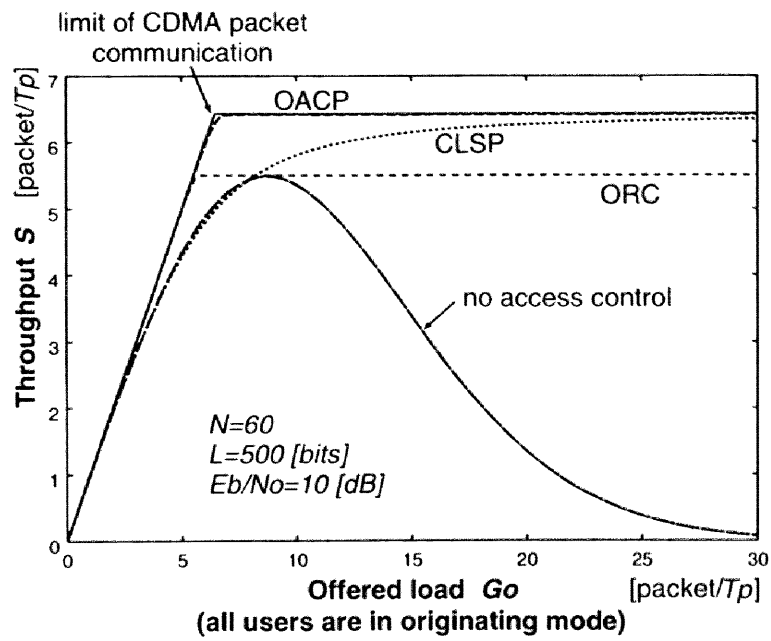


図 6.7: アクセス制御を行ったときのスループット特性

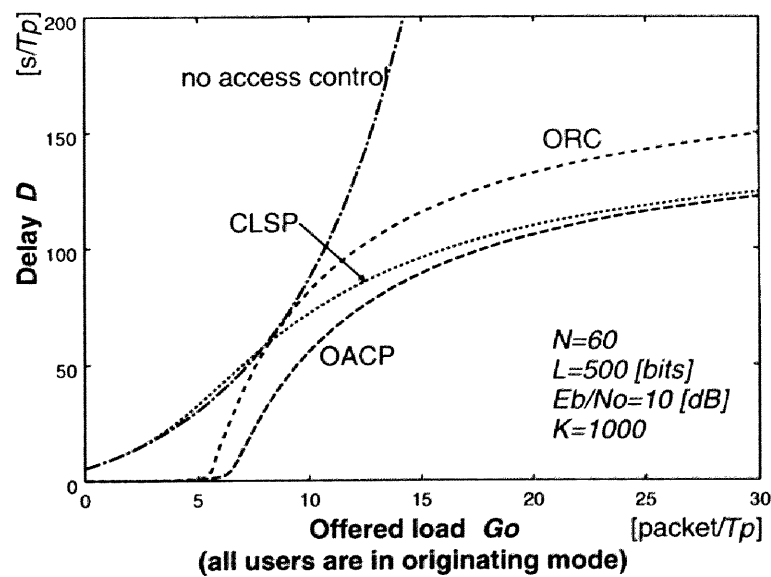


図 6.8: アクセス制御を行ったときの遅延特性

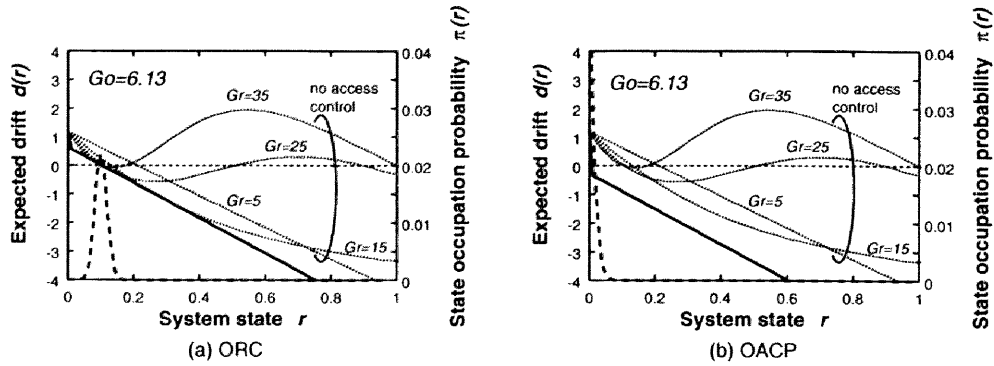


図 6.9: OACP および ORC を用いたときの期待流動値と状態占有確率

を行うことにより、全体のオフロード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  $G_0$  が 5 付近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よりも高くなっている。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、 $G_0$  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、チャネルロードはスレッシュホールドを維持し続け、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6.9に OACP と ORC の期待流動値  $d(r)$  と状態占有確率  $\pi(r)$  を示す。比較のためにパケットの再送制御を行わなかった場合 (図5.6) の期待流動値も示してある。図6.9(a) に示されるようなパケットの再送制御のみを用いた場合、期待流動値はアクセス制御を行わないで  $G_r$  を変化した場合の常に低い値になっていることがわかる。それゆえ、平衡状態はアクセス制御を行わない場合より小さな状態  $r$  に存在しており、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。さらに、

図6.9(b) に示されるように、OACP を用いた場合、パケットの再送制御のみを行った場合より、さらに期待流動値が低い値になっている。これは、パケットの送信制御も同時に行うことによりパケットの成功確率が高くなり、再送モードに移るユーザの割合を減らすことができるためである。よって、さらに小さい状態  $r$  に平衡状態は存在することになる。また、どちらの図からも、パケットの再送制御を行うことにより期待流動値が状態  $r$  が 0 付近を除いて直線的に減少することがわかる。このため、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、双安定な状態にはならない。

## 6.6 まとめ

本章では、特性の向上を図るためにアクセス制御方式の検討を行った。まず、同時送信局数に基づいてアクセス制御を行うパケットの送信制御 (CLSP) について述べ、次に状態  $r$  に基づいてパケットの再送を最適に行う ORC を適用した。さらに、パケットの送信制御と再送制御の両方を行う OACP を提案した。そして、これらを用いたときの特性解析、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、ORC や OACP を用いたシステムの安定性についても調べ、双安定な状態にならないことを示した。

## 第 6 章の参考文献

- [1] 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.
- [2] 岡田啓, 佐藤毅, 山里敬也, 片山正昭, 小川明, "再送を考慮した Spread Unslotted Aloha 方式の特性解析," 電子情報通信学会技術研究報告, SST95-4, pp.19-24, 1995 年 5 月.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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, No.9, pp.1339-1345, Sep. 1996.
- [7] A. Ogawa, T. Yamazato, M. Katayama, K. Toshimitsu, "A new access protocol for asynchronous packet CDMA systems," ISITA '94, pp.917-920, 1994.
- [8] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, "Throughput analysis of DS/SSMA unslotted aloha with channel load sensing," IEEE GLOBECOM '95, vol.2, pp.1492-96, 1995.

- [9] H. Okada, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, "A novel access control method for CDMA unslotted ALOHA systems," MDMC'96, pp.391-395, July 1996.
- [10] 岡田啓, 佐藤毅, 山里敬也, 片山正昭, 小川明, "Spread Unslotted ALOHA 方式における新アクセス制御方法," 電子情報通信学会技術研究報告 SST95-127, pp.67-72, 1995 年 12 月.
- [11] Y. -C. JENQ, "On the stability of slotted ALOHA systems," IEEE Trans. Commun., vol.COM-28, No.11, pp.1936-1939, Nov. 1980.
- [12] Y. -C. JENQ, "Optimal retransmission control of slotted ALOHA systems," IEEE Trans. Commun., vol.COM-29, No.6, pp.891-895, June 1981.
- [13] L. Kleinrock, Queueing systems, vol. 1, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.
- [14] 岡田啓, 山里敬也, 片山正昭, 小川 明, "有限ユーザ CDMA Unslotted ALOHA 方式のスループット解析法に関する一検討," 電子情報通信学会論文誌, vol.J81-A, no.7, pp.1089-1092, 1998 年 7 月.



## 第 7 章

# アクセス制御遅延の影響とその方策

### 7.1 はじめに

第6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 [1] ~ [6]. CLSP では中央局が同時送信局数を観測し, 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同時送信局数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同時送信局数は, ユーザ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, 同時送信局数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局でパケット送信が制御されるまでも, 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同時送信局数に基づきパケット送信が制御されることになる. 従って, 送信したい時刻の同時送信局数が  $\alpha$  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 [6].

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 (LEO) 衛星の場合, アクセス制御遅延はおよそ 0.013 [sec] になる. さらに, 高度 36,000 [km] の静止 (GEO) 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, アクセス制御遅延の影響を和らげることのできるアクセス制御方式として Modified Channel Load Sensing Protocol (MCLSP) が提案された [7]. MCLSP では, 中央局はある一定時間チャネルロードを観測し, オファードロードの推定を行い,

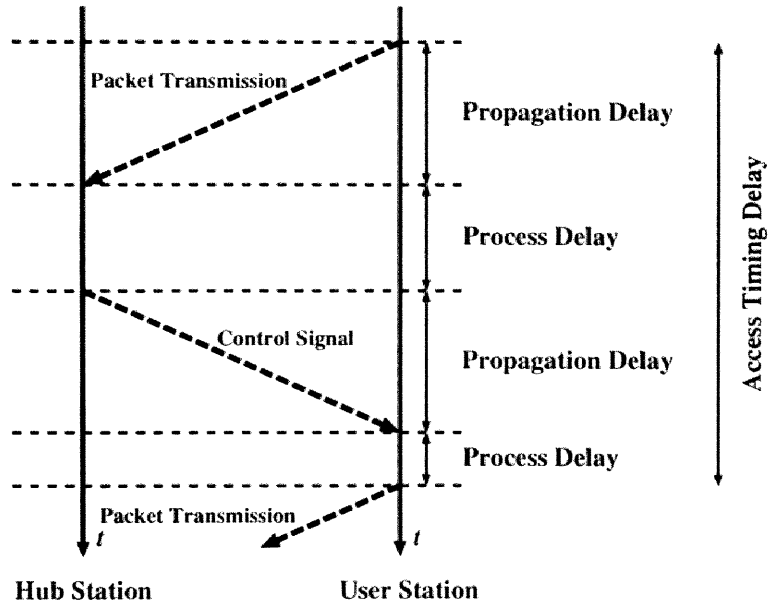


図 7.1: アクセス制御遅延の概念図

この値に基づいてアクセス制御を行う。オフロード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り、短時間ではあまり変化しない。このため、オフロード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。しかしながら、文献[7]では特性評価が計算機シミュレーションのみによって行われており、解析的に導出されていない。また、MCLSPはスループットの最大値はアクセス制御を行わない場合の最大値と同じにしかない。

本章では、まず始めに 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 MCLSP の特性を解析的に導出し、アクセス制御遅延が存在してもスループットの劣化を防ぐことができるのを示す[8],[9]。さらに、前章で提案した OACP がアクセス制御遅延による影響を和らげることができ、非常に有効なアクセス制御方式であることを示す[10]。OACP ではパケットの送信制御と再送制御が同時に行われる。パケットの送信制御は CLSP を用いているため、アクセス制御遅延の影響を受けやすい。しかし、パケットの再送制御は状態  $r$  に基づいて制御を行っており、状態  $r$  は短時間では変化しないとみなすことができる。このため、パケットの再送制御はアクセス制御遅延の影響を受けにくいと考えられる。更に、パケットの送信制御を行っているために、アクセス制御遅延が比較的小さい場合はスループットの最大値を高くする効果が生じることが期待できる。

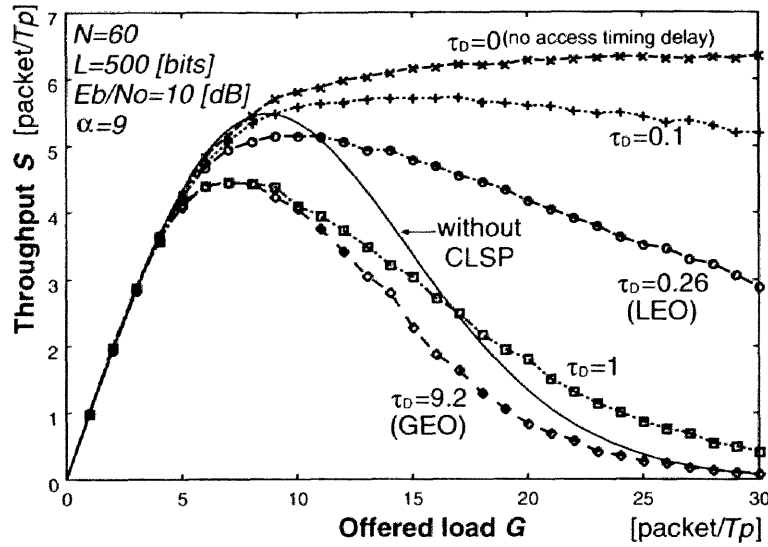


図 7.2: CLSP を用いた CDMA U-ALOHA 方式のアクセス制御遅延による影響

## 7.2 アクセス制御遅延による影響

図7.1に示されるような、パケットの処理や伝搬によって生じるアクセス制御遅延による影響を考える。中央局で観測される同時送信局数は、ユーザ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、同時送信局数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局でパケット送信が制御されるまでの間にも、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 では瞬時の同時送信局数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7.2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、アクセス制御遅延は各ユーザにおいて等しいものとし、この遅延時間を  $T_D$  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。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、スループット特性の向上がみられる。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、特性の劣化が生じる。アクセス制御遅延が比較的小さい場合 ( $\tau_D = 0.26$ )、特にオフ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、 $\tau_D = 9.2$  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

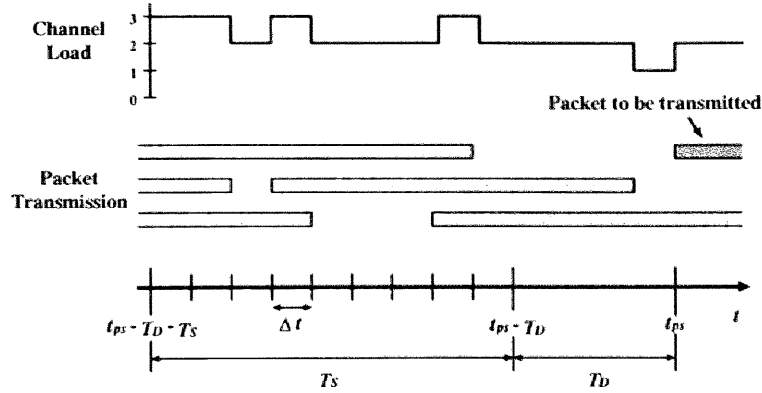


図 7.3: MCLSP を用いた CDMA Unslotted ALOHA のチャネルの観測モデル

てしまうことがわかる [6].

### 7.3 Modified Channel Load Sensing Protocol

アクセス制御遅延による影響を和らげる方策として, MCLSP がある [7]. これは, CLSP とは異なり推定したオフロードの値に基づいてアクセス制御を行う. オフロードロード  $G$  は通常ゆっくりと変化するので, アクセス制御に要する期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  $T_s$  に観測されたチャネルロードからオフロードを推定する. そしてこのオフ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. この MCLSP を適用した CDMA U-ALOHA 方式および CDMA S-ALOHA 方式の特性を解析的に導出し, アクセス制御遅延に対して非常に有効であることを示す [8], [9].

#### 7.3.1 MCLSP の原理

まず始めに MCLSP の原理を述べる. ここでは CDMA U-ALOHA 方式に MCLSP を適用した場合について説明するが, CDMA S-ALOHA 方式にもほぼ同様の操作により MCLSP を適用することができる.

##### 観測モデル

MCLSP は, CLSP と同様に中央局が同時送信局数を観測する. 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同時送信局数の観測を行なう. その際, チャネル観測時間  $T_s$  を微小時間間隔

$\Delta t$  に分割する (図7.3).  $\Delta t$  は十分微小であると仮定すると, 隣合う  $\Delta t$  における同時送信局数の差は 0 又は  $\pm 1$  となる. ここで, 同時送信局数の差が  $+1$ ,  $-1$  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  $\Delta t$  に観測された同時送信局数からオフアード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, それをユーザ局に放送して知らせる. ユーザ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.

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.

#### 送信確率の導出アルゴリズム

時刻  $t = t_{ps}$  にあるユーザ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,

$$X_O(t_{ps} - T_D, T_s) = \frac{X_A(t_{ps} - T_D, T_s)}{\overline{P_{tr}(t_{ps} - T_D, T_s)}} \quad (7.1)$$

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,

$$\begin{aligned} g(t_{ps} - T_D, T_s) &= \frac{X_O(t_{ps} - T_D, T_s)}{\tau_s} \\ &= \frac{X_A(t_{ps} - T_D, T_s)}{\overline{P_{tr}(t_{ps} - T_D, T_s)} \cdot \tau_s} \end{aligned} \quad (7.2)$$

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-

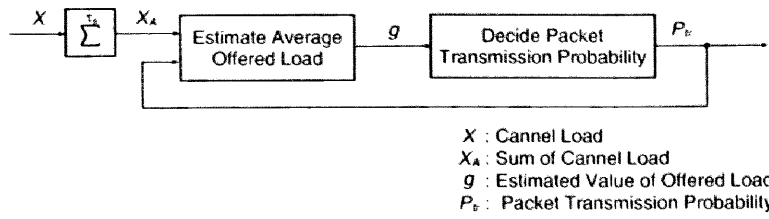


図 7.4: パケット送信確率を算出するアルゴリズム

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，

$$P_{tr}(t_{ps}) = \min \left\{ \frac{G_{max}}{g(t_{ps} - T_D, T_s)}, 1.0 \right\} \quad (7.3)$$

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アードロードの値である．この式のようにパケット送信確率を定めると，もし，オフアードロードの推定値が  $G_{max}$  よりも大きければ，ユーザ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．

### 7.3.2 特性解析

以下において，MCLSP を適用した CDMA U-ALOHA 方式および CDMA S-ALOHA 方式のスループット特性を解析的に導出する．

#### MCLSP を適用した CDMA U-ALOHA 方式

観測時間は十分長く，オフアードロードの推定誤りは起こらないと仮定する．このとき，オフアードロードの推定値  $g$  は実際のオフアードロード  $G$  と等しくなる．アクセス制御の操作を行っている間，オフアード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，

$$P_{tr} = \min \left\{ \frac{G_{max}}{G}, 1.0 \right\} \quad (7.4)$$

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．そこで，4.4.2節

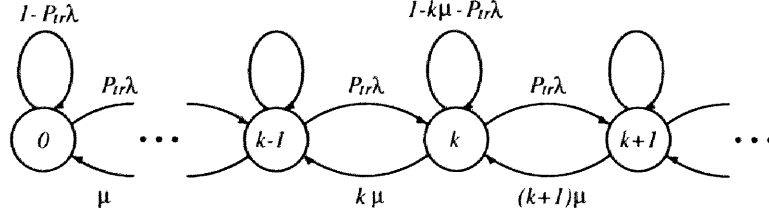


図 7.5: MCLSP を適用した CDMA U-ALOHA 方式の干渉パケット数の状態遷移図

で述べた手法と同様に、特性解析を行う。このとき、干渉パケット数の状態遷移図は図7.5のようになる。

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  $i$  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;

待ち行列モデル M/D/ $\infty$  で表されるシステムの定常状態確率は M/M/ $\infty$  の定常状態確率と同じなので、M/M/ $\infty$  の定常状態の式 [11] より、

$$P_S(k, i) = \frac{(P_{tr}G)^k}{k!} e^{-P_{tr}G} \cdot P_c(k) \quad (7.5)$$

となる。

(ii)  $i > 1$  のとき;

$P_S(k, i)$  は図7.5の状態遷移図より次式のように得られる。

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & [P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu\Delta t - P_{tr}\lambda\Delta t\} \\ & + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu\Delta t \\ & + P_S(k-1, i-1) \cdot P_{tr}\lambda\Delta t] \cdot P_c(k) \end{aligned} \quad (7.6)$$

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

$$Q_S(G) = \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \quad (7.7)$$

となる。

従って、スループット特性は、

$$S(G) = P_{tr}G \cdot Q_S(G) \quad (7.8)$$

となる。

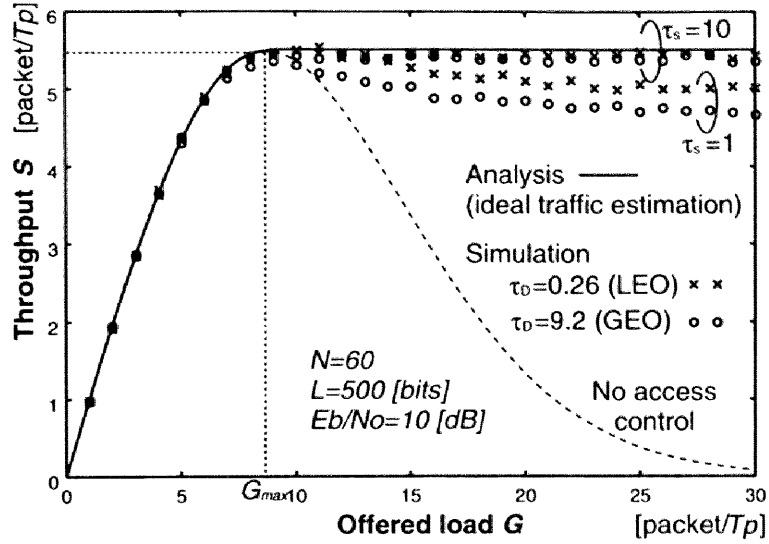


図 7.6: MCLSP を用いた CDMA Unslotted ALOHA 方式のスループット特性

### MCLSP を適用した CDMA S-ALOHA 方式

同じく、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、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  $P_{tr}$  はスロットに関係なく、

$$P_{tr} = \min \left\{ \frac{G_{max}}{G}, 1.0 \right\} \quad (7.9)$$

となる。よって、実際に送信されているパケットのオフロードは  $P_{tr}G$  となる。

4.3節と同様にして、スループット特性を求める。ユーザ数無限を仮定した場合、各スロットにおいて同時送信局数が  $m$  となる確率  $P_m$  は、

$$P_m = \frac{(P_{tr}G)^m}{m!} e^{-P_{tr}G} \quad (7.10)$$

となる。よって、スループット特性は、

$$S = \sum_{m=1}^{\infty} m \cdot P_m \cdot (1 - P_b(m))^L \quad (7.11)$$

となる。

#### 7.3.3 数値例

図7.6に MCLSP を適用したときの CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性を示す。ここで、 $N = 60$ ,  $L = 500$  [bit],  $E_b/N_0 = 10$  [dB] としている。この図に、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



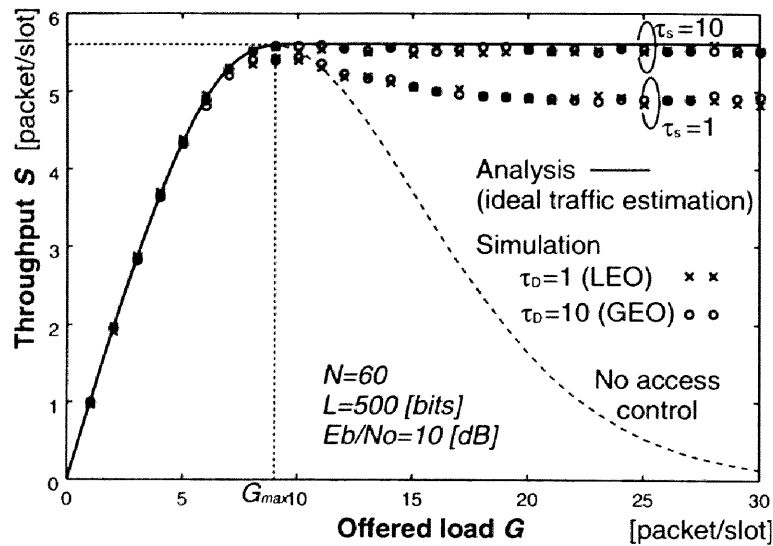


図 7.7: MCLSP を用いた CDMA Slotted ALOHA 方式のスループット特性

では、7.3.1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。実際、観測時間が短いとき (例えば  $\tau_s = 1$  の場合)、オフアードロードの推定誤りが起きているために特性の劣化がみられる。このとき、アクセス制御遅延が大きい方が特性の劣化が顕著である。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、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7.7に MCLSP を適用したときの CDMA S-ALOHA 方式のスループット特性を示す。CDMA U-ALOHA 方式の場合と同様に、観測時間が短いとき、オフアードロードの推定誤りが起きているために特性の劣化がみられる。ただ、アクセス制御遅延の大きさに依存せず、ほぼ同じ程度劣化している。これは、CDMA S-ALOHA 方式の場合、パケットが各スロットに同期して送信されており、各スロットは独立な振舞をみせるため、アクセス制御遅延の大きさに依存しない。また、観測時間が十分長いとき、オフアードロードの推定誤りはほとんど起きていないために高スループットを維持できているのがわかる。

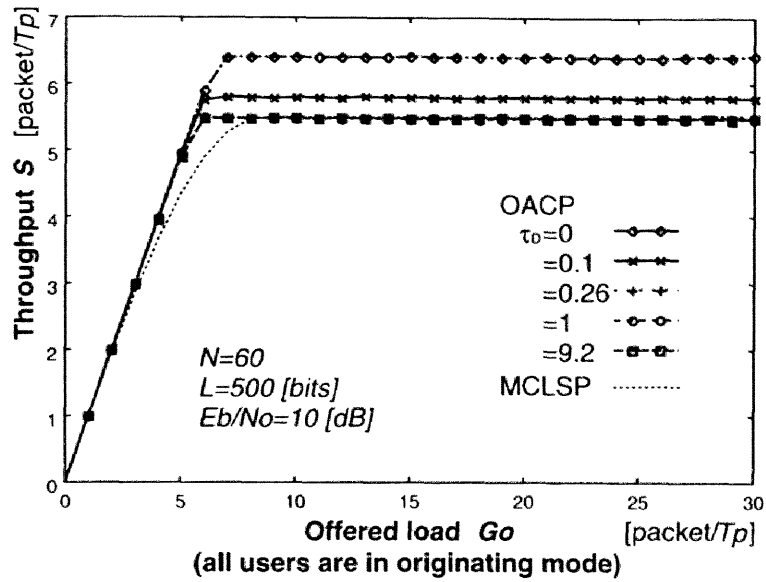


図 7.8: アクセス制御遅延存在下の OACP のスループット特性

## 7.4 アクセス制御遅延存在下の OACP

前節で述べた MCLSP はアクセス制御遅延が大きくても特性の劣化を防ぐことができるものの、スループットの最大値はアクセス制御を行わない場合の最大値と同じにしかない。これは、MCLSP ではオフロードという平均的な値に基づいてアクセス制御が行われており、瞬時変動するものまで制御することができないためである。

そこで、OACP をアクセス制御遅延が存在する状況に用いることで、アクセス制御遅延が比較的小さい場合には MCLSP よりも良い特性が得られることを示す [10]。OACP において、パケットの再送制御はユーザー全体における再送モードのユーザーの割合 (状態  $r$ ) に基づいて行われる。状態  $r$  の変化は非常にゆっくりであり、短時間ならば一定であるとみなすことができ、アクセス制御遅延による影響を受けないと予想される。さらに、パケットの送信制御は同時送信局数に基づいて行われ、瞬時変動に対応してアクセス制御をすることが可能である。ただし、瞬時変動に対応するためにはアクセス制御遅延が比較的小さいことが要求されるため、アクセス制御遅延が大きいところでは、パケットの送信制御による特性の向上は望めない。

図7.8, 7.9に、アクセス制御遅延存在下における OACP のスループット特性および遅延特性を示す。制御に必要なパラメータの値がアクセス制御遅延の分だけ古いものとして、計算機シミュレーションを行った。各パラメータの値は、 $N = 60$ ,  $E_b/N_0 = 10$  [dB],  $L = 500$  [bits],  $K = 1000$  である。スレッシュホールド  $\alpha$  および  $G_{max}$  は表7.1に

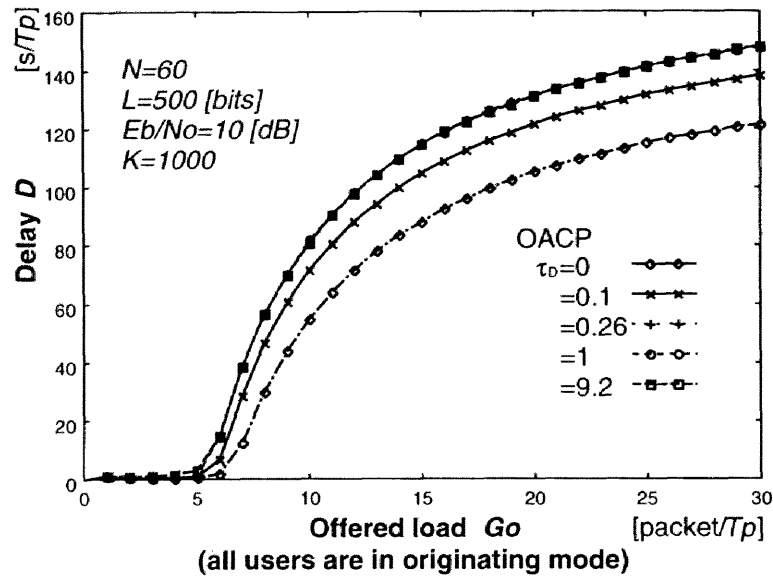


図 7.9: アクセス制御遅延存在下の OACP の遅延特性

表 7.1: 計算機シミュレーションに用いたパラメータ

| アクセス制御遅延 $\tau_D$ | スレッシュホールド $\alpha$ | $G_{max}$ |
|-------------------|--------------------|-----------|
| 0                 | 9                  | 100       |
| 0.1               | 10                 | 13        |
| 0.26 (LEO)        | 12                 | 10        |
| 1                 | 20                 | 9         |
| 9.2 (GEO)         | 28                 | 9         |

示されるものを用いた。なお、スレッシュホールド  $\alpha$  はスループットの最大値が最も大きくなるものを選んだ。

パケットの再送制御がアクセス制御遅延の影響を受けていないため、スループット特性は新規パケットのオフロード  $G_o$  の小さいところでは直線的に増加し、最大値をとった後、その値を維持し続けている。また、 $\tau_D$  が 0.26 以上の場合では MCLSP を用いた場合とほぼ同じ特性になるが、 $\tau_D$  が 0.1 の場合はアクセス制御遅延がない場合の OACP より特性は劣化してしまうものの、 $\tau_D$  が 0.26 以上の場合や MCLSP を用いた場合よりは特性が向上している。これはアクセス制御遅延が小さい場合、パケットの送信制御により特性の向上を図ることができるためである。このように、アクセス制御遅延が比較的小さい場合は OACP を用いることにより、MCLSP

よりも特性が良くなる。なお、 $\tau_D$  が 0.1 の場合、パケットの処理による遅延を無視すると、伝搬距離はおよそ 400km に相当する。

## 7.5 まとめ

本章ではアクセス制御遅延の影響が無視できない場合において、特性がどのような影響を受けるかを明かにした。そして、アクセス制御遅延の影響を和らげることができる方式として、MCLSP と OACP の特性を評価した。MCLSP では、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。OACP はアクセス制御遅延が大きい場合は MCLSP とほぼ同じ特性を得ることができ、更にアクセス制御遅延が小さい場合には MCLSP よりも特性がよくなることを示した。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相応しい方式であると言える。また、OACP は伝搬距離が比較的短い場合にも有効であるといえ、陸上無線通信にも相応しい方式である。

## 第 7 章の参考文献

- [1] 小川明他, CDMA 方式と次世代移動体通信システム, トリケップス, 1995 年.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] T. Sato, H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama and A. Ogawa, "Throughput analysis of DS/SSMA unslotted aloha with channel load sensing," IEEE GLOBECOM '95, vol.2, pp.1492-96, 1995.
- [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 Trans., vol.E79-B, no.9, pp.1339-1345, Sep. 1996.
- [7] A. Ogawa, T. Yamazato, M. Katayama, K. Toshimitsu, "A new access protocol for asynchronous packet CDMA systems," ISITA '94, pp.917-920, 1994.
- [8] H. Okada, M. Saito, T. Sato, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, "CDMA ALOHA systems with modified channel load sensing protocol," IEEE GLOBECOM '96, vol.2, pp.1291-1295, Nov. 1996.
- [9] 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 Trans., vol.E79-A, no.12, pp.2035-2042, Dec. 1996.

- [10] 岡田 啓, 佐藤 毅, 山里 敬也, 片山 正昭, 小川 明, “Optimal Access Control Protocol を用いた CDMA Unslotted ALOHA 方式のアクセス制御遅延による影響,” 電子情報通信学会総合大会, B-5-39, pp.426, 1997 年 3 月.
- [11] L. Kleinrock, Queueing systems, vol. 1, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.

## 第 8 章

# 待時式 CDMA ALOHA 方式

### 8.1 はじめに

これまで、解析の簡単さのためにパケットの送信要求が発生したらそのパケットをただちに送信する、または呼損として扱うシステムやこれにパケットの再送を考慮したシステムを仮定してきた。しかしながら、現実的なシステムでは、発生したパケットをいったんバッファに蓄えてから送信するという待時式システムが想定され、その場合、各ユーザが有限のバッファを持つことを仮定して解析を行うことが必要である。その上このシステムでは、各ユーザがバッファを有することで呼損率を低くすることができ、さらにユーザのみによる自律的な制御によって特性向上をはかることができる可能性を持っている。

ところで、スペクトル拡散されていない Slotted ALOHA 方式においては、いくつか待時式システムの特性解析がなされている [1] ~ [9]。単純な Slotted ALOHA 方式では、同時に 1 つのユーザしかパケットを送出することはできない。このため、同時に 1 つもパケットが送信されていない、1 つしか送信されていない、2 つ以上送信されているために衝突が起こるという 3 状態しか存在しないことに着目して解析がなされてきた。他方、CDMA ALOHA 方式では多元接続可能という性質により、同時に複数のユーザがパケットを伝送することが可能になる。このため、CDMA ALOHA 方式ではこの性質を考慮して解析しなければならない。

本章では、各ユーザが有限のバッファを持つシステムを提案し、待時式 CDMA ALOHA 方式の特性解析を行う。そして、スループット特性、遅延特性、呼損率の観点から特性評価を行い、バッファ数を変化させたときに特性にどのような影響があるかを明らかにする。

待時式 CDMA ALOHA 方式において、パケットに蓄えられた方法をチャンネルに送信するのに以下の方法が考えられる。

1. バッファに一旦パケットを蓄え、そのすべてのパケットを送信レート  $p$  で送信する。この場合、全てのパケットは送信レート  $p$  でチャネルに送出されることになるため、比較的解析が容易になる。
2. バッファが空のときに発生したパケットは直ちに (確率 1 で) 送信し、それ以外のパケット (再送パケットも含む) は送信レート  $p$  で送信する。この場合、送信方法 1 に比べると遅延時間が減らせれると思われるが、解析が少し複雑になる。

まず始めに解析が比較的簡単である送信方法 1 を用いた待時式 CDMA S-ALOHA 方式の解析を行う [10] ~ [12]。このシステムの場合、制限付つば占有モデルに基づく線形近似法 [7], [8] を用いることにより解析することができる。制限付つば占有モデルは、各ユーザのバッファを最大  $B$  個しかボールを入れることができないつばと、パケットをボールと見立て、確率論的にあるつばにボールが何個入っているかを求めていく解析モデルである。線形近似法というのは、Slotted ALOHA 方式のために提案された解析手法で、パケットの発生、およびパケットの成功が全てのユーザに対して一様に分布していなければならない。この条件さえ満たしていれば、同時に複数のパケットが送ることができる多チャネルモデルにも適用可能であり、CDMA S-ALOHA 方式にも用いることが容易な解析手法である。しかし、送信方法 2 に対しては、パケットの送信レートがバッファが空のユーザについては異なるため、この解析手法を用いることができない。

そこで、送信方法 2 に適用可能でさらに CDMA U-ALOHA 方式を解析するための手法として、2 マルコフ連鎖モデルを提案する [13], [14]。これはシステムをユーザ部分とチャネル部分に分け、それぞれをマルコフ連鎖モデルで表すことにより解析を行う手法である。

また、CLSP を用いた待時式 CDMA U-ALOHA 方式についても検討する。CLSP ではチャネルの状態に応じてパケットの送信を控えるために、各ユーザがバッファを設けることが特に要求される。ここでは、計算機シミュレーションを用いて特性評価を行う。そして、この方式が OACP のスループット特性に近付くことを示す。

## 8.2 待時式 CDMA Slotted ALOHA 方式

本節では、待時式 CDMA Slotted ALOHA 方式を提案し、このシステムの特性解析を線形近似法 [7], [8] を用いて行う [10] ~ [12]。そして、特性評価をスループット特性、呼損率特性、遅延特性の観点から行い、バッファを設けることにより、特性にどのような影響を与えるかを示す。



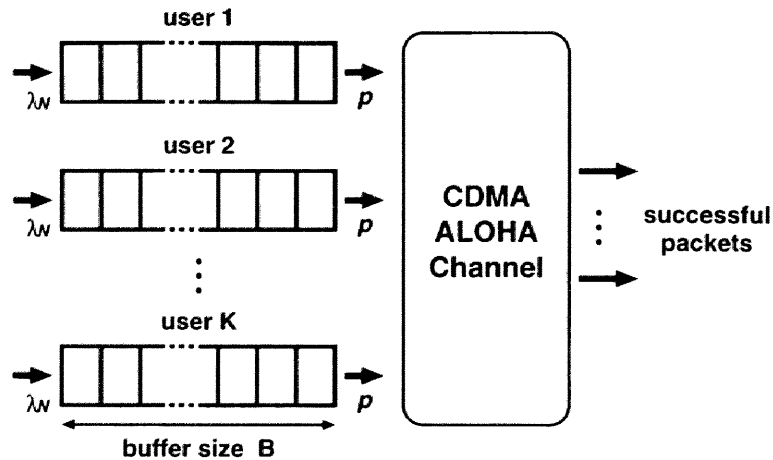


図 8.1: バッファモデル

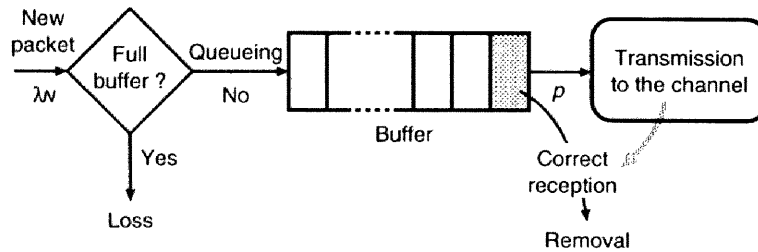


図 8.2: パケットの送信方法 1 の流れ図

### 8.2.1 システムモデル

図8.1に示されるように各ユーザはバッファを有するものとする。ここで、ユーザ数を  $K$  とし、各ユーザは送信中のパケットを含めて  $B$  パケット分蓄えることができるバッファを持っているとする。そして、新規パケットは、各ユーザ局においてスロットあたり生起率  $\lambda_N$  で発生する。

パケットの送信方法 1 を用いる。このときのパケットの流れ図を図8.2に示す。発生したパケットはいったんバッファに蓄えられる。バッファに蓄えられたパケットは、ファーストイン・ファーストアウト (FIFO) に従ってサービスされる。ここで、バッファが空のユーザをアイドルユーザ、バッファが空でないユーザをビジーユーザと呼ぶことにする。ビジーユーザはバッファに蓄えられたパケットの一番先頭のパケットを送信確率  $p$  で送信する。もし、パケットをチャネルに送信し、中央局においてパケットの受信に失敗したならば、このパケットは再送される。再送パケットも送信確率  $p$  で送信される。中央局においてパケットの受信に成功したとき、このパケットは

バッファから削除される。また、ユーザ局においてバッファが満杯のときに発生したパケットは呼損として扱われる。

### 8.2.2 特性解析

制限付つば占有モデルに基づく線形近似法 [7] を用いてシステムの特性解析を行う。この線形近似法というのは、Slotted ALOHA 方式のために提案された解析手法で、パケットの発生、およびパケットの成功が全てのユーザに対して一様に分布していなければならない。この場合、それぞれのユーザは対称的な振舞をするようになる。

ここで、システムの状態をシステム全体に存在しているパケット数、つまり各ユーザのバッファに蓄えているパケット数の総和と定義する。そして、 $P$  を  $(B \cdot K + 1) \times (B \cdot K + 1)$  行列で表される遷移確率行列とする。この行列の成分  $p_{ij}$  は、1つ前のスロットにおいてユーザが保有しているパケットの数が総計  $i$  個あるとき、着目スロットで  $j$  個のパケットが存在する遷移確率である。また、 $\Pi$  を定常状態ベクトルとする。このベクトルの成分  $\pi_i$  はユーザに総計  $i$  個のパケットがあるという定常状態確率である。この  $\Pi$  は次式を解くことによって得られる。

$$\begin{cases} \Pi \cdot P = \Pi \\ \sum_{i=0}^{B \cdot K} \pi_i = 1 \end{cases} \quad (8.1)$$

式 (8.1) を解くためには遷移確率行列を求める必要がある。遷移確率を正確に求めるためには、各ユーザがバッファにいくつパケットを蓄えているかを知る必要があり、システムの状態、つまりシステム全体に存在しているパケット数のみから遷移確率を求めることは不可能である。線形近似法では、システム全体に存在しているパケット数から各ユーザが所有しているパケットの数を推定することにより、遷移確率行列を求める。また、システムの対称性より、バッファに  $v$  個のパケットを蓄えているユーザが  $u$  いるということさえ知っていればよいことになる。そこで、バッファに  $v$  個のパケットを蓄えているユーザが  $u$  いるという確率を以下に述べる制限付つば占有モデル [7] を用いて導出する。

#### 制限付つば占有モデル

制限付つば占有モデルでは、各ユーザのバッファを最大  $B$  個しかボールを入れることができないつばと、パケットをボールと見立てる。このとき、ボールは区別することができないが、つばは区別することができるとする。なぜなら、どのユーザがいくつパケットを持っているかということが重要だからである。

そして、 $n$  個の区別できないボールを  $B$  個までしか入らない  $K$  個の区別できるつぼに入れる組合せが  $R(n, K, B)$  通りあるとする。これは、

$$R(n, K, B) = \sum_{j=0}^K (-1)^j \binom{K}{j} \binom{n + K - j(B+1) - 1}{K-1} \quad (8.2)$$

となる。更に、 $v$  個のボールが入っているつぼが  $u$  個あるとき、 $n$  個のボールを  $B$  個までしか入らない  $K$  個のつぼに入れる組合せが  $R(n, K, B|b_v = u)$  通りあるとする

$$R(n, K, B|b_v = u) = \binom{K}{u} \sum_{j=0}^{K-u} (-1)^j \binom{K-u}{j} R(n - (u+j)v, K - (u+j), B) \quad (8.3)$$

となる。

これらの組合せを使うことにより、ユーザ全体で  $n$  個のパケットがあるとき、バッファに  $v$  個のパケットを蓄えているユーザが  $u$  いるという確率を次式のように求めることができる。

$$Pr(b_v = u|n) = \frac{R(n, K, B|b_v = u)}{R(n, K, B)} \quad (8.4)$$

この確率を用いることで、以下のように遷移確率を求めることができる。

#### 遷移確率の導出

システムの状態遷移は新規パケットの発生と伝送に成功したパケットの数に依存するので、遷移確率  $p_{nj}$  は、

$$p_{nj} = \sum_{l=0}^{\min(K,n)} a_{j-n+l}(n) \cdot t(n, l) \quad (8.5)$$

となる。ここで、 $a_j(n)$  は全ユーザに合計  $n$  パケットあるとき、 $j$  パケット新たに生起する確率、 $t(n, l)$  は全ユーザに合計  $n$  パケットあるとき、 $l$  個のパケットが伝送に成功する確率である。

バッファが満杯のユーザは新規に発生したパケットを呼損として扱うので、確率  $a_j(n)$  は

$$a_j(n) = \sum_{u=j}^K w_{K-u}(B, n) \cdot \binom{u}{j} \lambda_N^j (1 - \lambda_N)^{u-j} \quad (8.6)$$

となる。ただし、 $w_i(B, n)$  は全ユーザに合計  $n$  個のパケットがあるとき、バッファが満杯のユーザが  $i$  いる確率である。この確率は、制限付つぼ占有モデルを用いて

$$w_i(B, n) = \frac{R(n, K, B|b_B = i)}{R(n, K, B)} \quad (8.7)$$

となる。

確率  $q_i(n)$  を全ユーザに合計  $n$  パケットあるとき、ビジーユーザが  $i$  いる確率、確率  $s(i, l)$  をビジーユーザが  $i$  いるとき、1 スロットに  $l$  個のパケットが伝送に成功する確率とする。この  $q_i(n)$  と  $s(i, l)$  を用いて、 $t(n, l)$  は

$$t(n, l) = \sum_{i=l}^{\min(K, n)} q_i(n) \cdot s(i, l) \quad (8.8)$$

となる。

また、 $q_i(n)$  は全ユーザに合計  $n$  個のパケットがあるとき、バッファが空のユーザが  $K - i$  いる確率として得られるので、

$$q_i(n) = \frac{R(n, K, B | b_0 = K - i)}{R(n, K, B)} \quad (8.9)$$

となる。

ところで、CDMA S-ALOHA 方式は干渉パケット数が増加するにつれ、緩やかにビット誤り率が劣化していくという特徴がある。確率  $s(i, l)$  を求めるにあたって、このことを考慮して解析を行う必要がある。まず、 $b(i, k)$  をビジーユーザが  $i$  いるとき、あるスロットに  $k$  個のパケットが同時に送信される確率とする。この確率は

$$b(i, k) = \binom{i}{k} p^k (1 - p)^{i-k} \quad (8.10)$$

となる。また、 $d(k, l)$  を  $k$  個のパケットが同時に送信されたとき、 $l$  個のパケットが伝送に成功する確率とする。これは、ビット誤り率の緩やかな変化を考慮し、

$$d(k, l) = \binom{k}{l} P_s^l(k) (1 - P_s(k))^{k-l} \quad (8.11)$$

となる。ここで、 $P_s(k)$  は  $k$  個のパケットが同時に送信されているときのパケット成功確率であり、

$$P_s(k) = (1 - P_b(k))^L \quad (8.12)$$

となる。これらの確率を用いて、 $s(i, l)$  は、

$$s(i, l) = \sum_{k=l}^i b(i, k) \cdot d(k, l) \quad (8.13)$$

となる。

### スループット特性, 遅延特性, 呼損率特性

以上より, 遷移確率を求めることができ, また式 (8.1) に代入して解くと, 定常状態確率を求めることができる. そこで, これらの結果を用いてスループット特性, 遅延特性, 呼損率を求める.

スループット特性を 1 スロットあたりに成功する平均パケット数とすると, スループット  $S$  は,

$$S = \sum_{n=1}^{K \cdot B} \pi_n \sum_{l=1}^{\min(K, n)} l \cdot t(n, l) \quad [\text{packet/slot}] \quad (8.14)$$

となる.

各ユーザの平均系内呼数  $Q$  は,

$$Q = \frac{1}{K} \sum_{n=1}^{K \cdot B} n \cdot \pi_n \quad (8.15)$$

となる. よって, リトルの公式より, 遅延特性はスループット  $S$  と平均系内呼数  $Q$  を用いて

$$D = \frac{Q}{S/K} \quad [\text{slot}] \quad (8.16)$$

となる.

呼損率  $Q_R$  は

$$Q_R = \sum_{n=B}^{K \cdot B} \pi_n \cdot Z_B(n) \quad (8.17)$$

となる. ただし,  $Z_B(n)$  はシステムに  $n$  パケットあるとき, あるユーザのバッファが満杯である (つまり  $B$  パケット持っている) 確率であり, 次式によって得られる.

$$Z_B(n) = \frac{R(n - B, K - 1, B)}{R(n, K, B)} \quad (8.18)$$

### 8.2.3 数値例

スループット特性, 遅延特性, 呼損率を図8.3~8.5に示す. ここで,  $N = 60$ ,  $K = 100$ ,  $L = 500$  [bits],  $B = 3$  としている. また, 新規パケットのオフロード  $G_N$  は  $G_N = K \cdot \lambda_N$  と定義する. 第8.2.1節で述べたシステムモデルに基づいて行った計算機シミュレーションの結果も示してある. 特性が急変するところで若干の不一致がみられるものの, 解析結果がシミュレーション結果とほぼ一致していることがわかる. 特性が急変するところでは, 第5章で述べた双安定な状態が発生していると思われる. 線形近似法ではシステム全体に存在しているパケットの数から各ユーザが所有しているパケットの数を推定することで解析を行っているが, 推定するときに双安定な状態を考慮していないため, 解析とシミュレーションにずれが生じる.

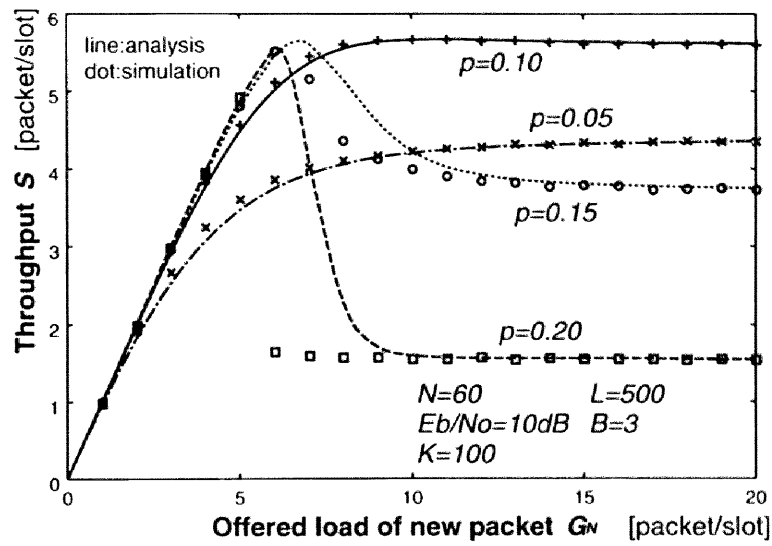


図 8.3:  $B = 3$  のときの待時式 CDMA S-ALOHA 方式のスループット特性

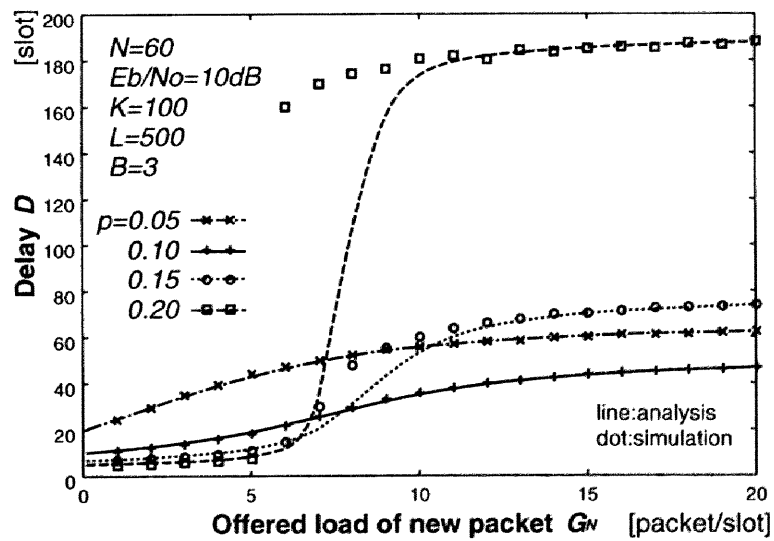


図 8.4:  $B = 3$  のときの待時式 CDMA S-ALOHA 方式の遅延特性

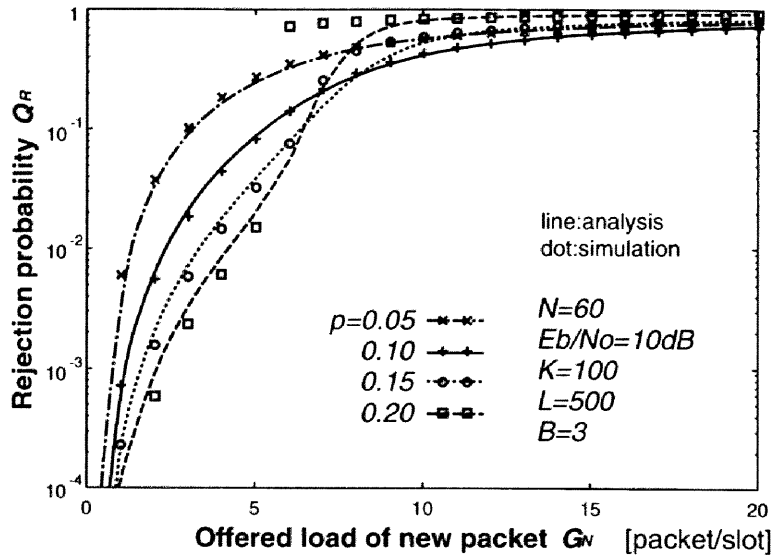


図 8.5:  $B = 3$  のときの待時式 CDMA S-ALOHA 方式の呼損率特性

これらの図より、送信確率が  $p \leq 0.10$  の範囲ではスループット特性、遅延特性、呼損率は緩やかに単調増加することがわかる。また、 $p$  が増加するにつれ、これらの特性が良くなっていくことがわかる。しかし、 $p > 0.10$  では、スループット特性は上に凸の曲線になることがわかる。また、オフロードロードが小さいところでは遅延時間は短く、呼損率は低い、スループットが最大になる付近でこれらの特性は急激に増加する。この特徴は  $p$  が大きくなるとより顕著に現われる。これらの理由は以下の通りである。送信確率  $p$  を大きくした方がパケットはより早く処理される。しかしながら、 $p > 0.10$  ではチャネル容量以上にパケットを送信しようとしてしまい、パケット成功確率が悪くなり、再送パケットの増加につながるために、特性が急激に劣化することになる。

このように  $p = 0.1$  付近に境界があることがわかる。このことは以下のように説明できる。実際にチャネルに送信されるパケットのオフロードロードを  $G_c$  とする。スループットを  $G_c$  の関数として描くとき、上に凸の曲線になるのは第4の結果から明らかであり、この最大値はユーザ数が十分多いときには式 (4.3) より求めることができ、 $G_c = 8.9$  のときに最大値 5.6 をとる。このスループットの最大値を  $S_{max}$  とし、最大値を得るときの  $G_c$  を  $G_{max}$  とする。また、 $G_c$  はビジーユーザ数と  $p$  の積に等しくなる。新規パケットのオフロードロード  $G_N$  が増加するにつれ、ビジーユーザ数は増加していくので、 $G_c$  は 0 から  $K \cdot p$  まで変化する。よって、 $K \cdot p$  が  $G_{max}$  より小さい場合は  $G_c$  が  $G_{max}$  より大きくなるので、スループットは単調増加する。  $K \cdot p$  が  $G_{max}$  より大きい場合は  $G_c$  が  $G_{max}$  より大きくなるので、スループットは上に凸の曲

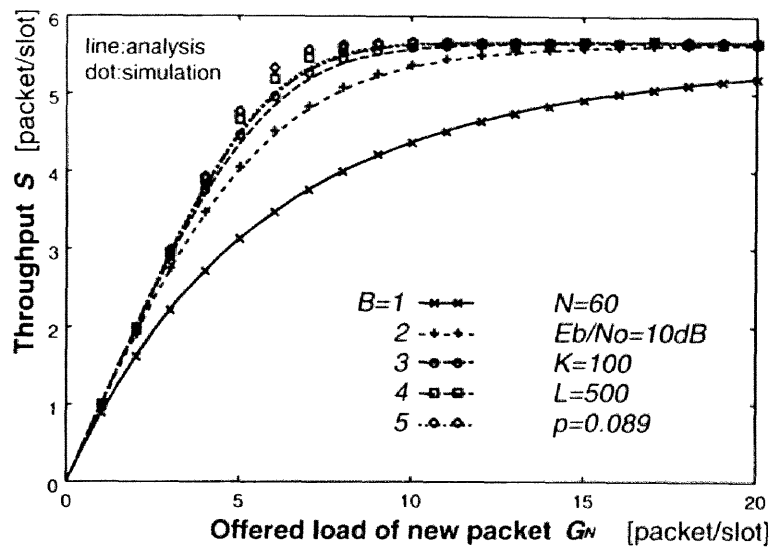


図 8.6:  $p = 0.089$  での待時式 CDMA S-ALOHA 方式のスループット特性

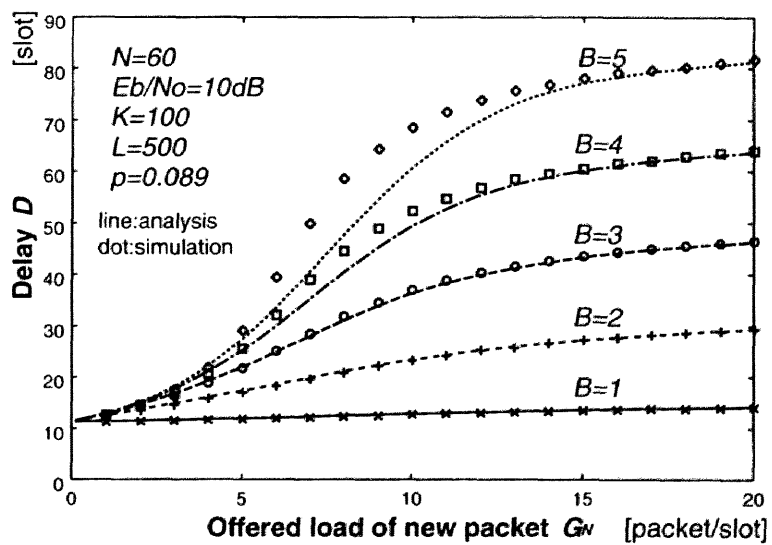


図 8.7:  $p = 0.089$  での待時式 CDMA S-ALOHA 方式の遅延特性



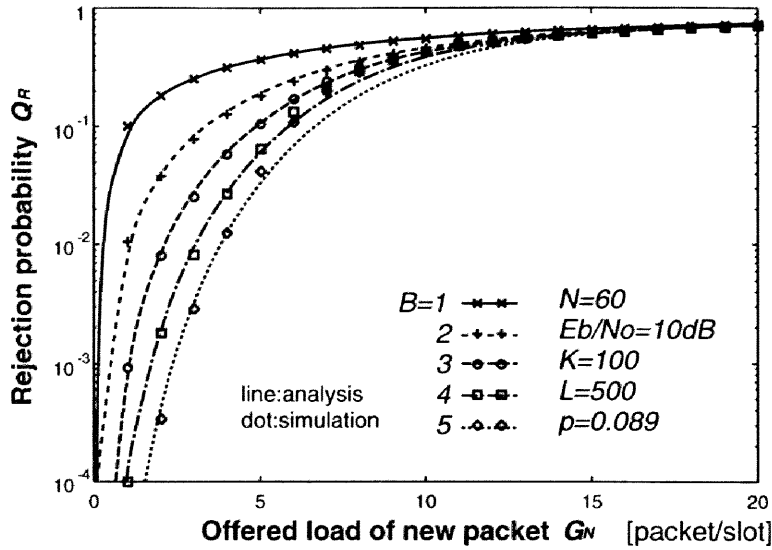


図 8.8:  $p = 0.089$  での待時式 CDMA S-ALOHA 方式の呼損率特性

線になる.  $K \cdot p = G_{max}$  のとき  $p = 0.089$  となるので,  $p = 0.1$  付近で境界が表れることになる.

図8.6～8.8は, この境界  $p = 0.089$  でバッファ数  $B$  を変化させたときの特性を示す. バッファ数が大きくなると, オファードロードの小さいところでスループット特性はより急峻に増加する. そして  $B = 5$  では, スループット特性はほぼ直線的に増加し, 一度最大値を取った後その値を維持し続ける. これは, バッファ数が大きくなると各ユーザはより多くのパケットを蓄えることができ, ビジーユーザの割合が増えるので, 平均同時送信局数はより早く  $G_{max}$  に近づくからである. また, バッファ数が増加すると遅延時間も増加することが図8.7から分かる. 呼損率はバッファ数が増加することによって, オファードロードの小さいところでは改善が見られる. しかし, オファードロードの大きいところではあまり改善が見られない. これは, オファードロードが大きいところではチャネル容量以上のパケットが発生し, これらのパケットを処理できないために, ほとんどすべてのユーザのバッファが満杯になってしまうからである.

### 8.3 待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式

本節では, 待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式を提案し, この方式の特性解析を行う [13], [14]. 解析を行うにあたり, システムをユーザ部分とチャネル部分に分け, それぞれをマルコフ連鎖モデルで表す 2 マルコフ連鎖モデルを提案する. そして, これ

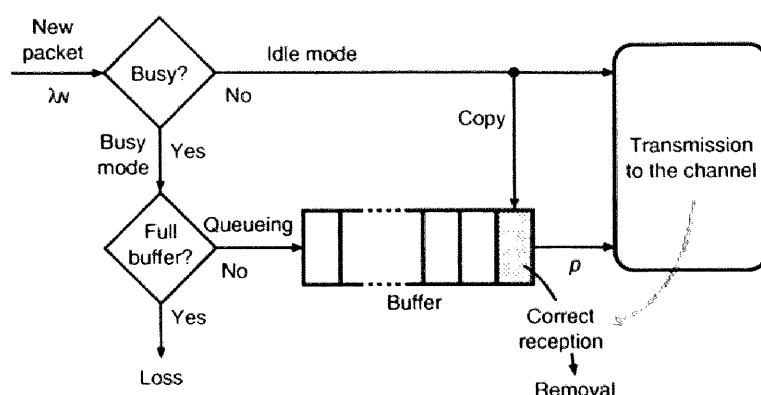


図 8.9: パケットの送信方法 2 の流れ図

を用いてスループット特性, 呼損率特性, 遅延特性を導出し, 特性評価を行う.

### 8.3.1 システムモデル

待時式 CDMA S-ALOHA 方式の場合と同様に, 各ユーザは有限のバッファを有するものとする. ここで, ユーザ数を  $K$  とし, 各ユーザは送信中のパケットを含めて  $B$  パケット分蓄えることができるバッファを持っているとする.

パケットの送信方法 2 を用いる. このときのパケットの流れ図を図 8.9 に示す. バッファが空のユーザをアイドルユーザ, バッファが空でないユーザをビジーユーザと呼ぶことにする. 新規パケットは生起率  $\lambda_N$  (発生間隔は平均  $1/\lambda_N$  の指数分布) で発生する. アイドルユーザにおいて新規パケットが発生したとき, このパケットはチャネルに送信されると同時にこのパケットのコピーをバッファに蓄える. ビジーユーザにおいてパケットが発生したときは, このパケットはいったんバッファに蓄えられる. バッファに蓄えられたパケットは, ファーストイン・ファーストアウト (FIFO) に従ってサービスされる. ビジーユーザはバッファに蓄えられたパケットの一番先頭のパケットを送信レート  $p$  (送信間隔が平均  $1/p$  の指数分布) で送信する. もし, パケットをチャネルに送信し, 中央局においてパケットの受信に失敗したならば, このパケットは再送される. 再送パケットも送信レート  $p$  で送信される. 中央局においてパケットの受信に成功したとき, このパケットはバッファから削除される. また, ユーザ局においてバッファが満杯のときに発生したパケットは呼損として扱われる.

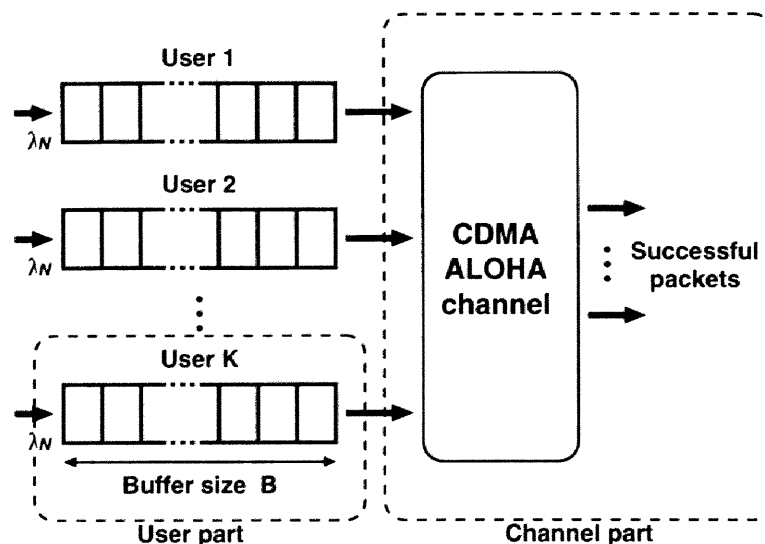


図 8.10: ユーザ部分とチャンネル部分

### 8.3.2 特性解析

#### 2 マルコフ連鎖モデル

2 マルコフ連鎖モデルでは、システムを図8.10に示すようにシステムをユーザ部分とチャンネル部分の2つに分けて考える。

ユーザ部分では、各ユーザのバッファの振舞に着目される。このユーザ部分において、チャンネル部分の影響を受けるものは、パケット成功確率のみである。パケット成功確率によって、あるパケットを初めて送信してから中央局で正しく受信されるまでに要する時間が決まる。一方、チャンネル部分では、実際に送信されているパケットに着目する。チャンネル部分において、ユーザ部分の影響を受けるものは実際にチャンネルに送信されるパケットの生起率である。アイドルユーザはチャンネルに対し生起率  $\lambda_N$  でパケットを送出し、ビジーユーザは生起率  $p$  でパケットを送出するので、実際にチャンネルに送信されるパケットの生起率は全ユーザに対するアイドルユーザの割合によって決まる。そして、この割合はユーザが1個もパケットを蓄えていない確率に相当する。

ここで  $P_j$  をあるユーザが  $j$  個のパケットをバッファに蓄えているという定常状態確率とする。システムの状態は定常状態確率  $P_j$  やパケット成功確率  $Q_s$  が変化しないと見なすことができる程ゆっくりであると仮定する。この仮定によって、 $P_j$  や  $Q_s$  を固定値であると考えることができ、ユーザ部分とチャンネル部分を別々に考えることができる。

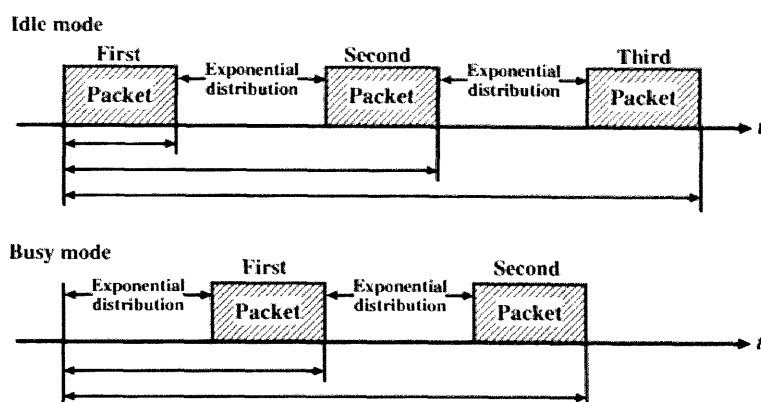


図 8.11: アイドルユーザとビジーユーザのサービス時間分布

ユーザ部分においては、対称性よりある 1 ユーザにだけ着目すればよい。ある着目ユーザにおいて、パケットの発生はポアソン過程に従い、同時に送信できるパケットは 1 つ、送信中のパケットを含めてバッファに  $B$  パケット蓄えることができる。そして、パケットの再送を考慮してサービス時間分布は一般分布になるので、ユーザのバッファに蓄えられるパケット数は待ち行列モデル  $M/G/1/B$  に従う。

チャネル部分では、実際に送信されるパケット数に着目する。各ユーザ局のパケットの送信間隔は、アイドルユーザの場合は平均  $1/\lambda_N$  の指数分布、ビジーユーザの場合は平均  $1/p$  の指数分布に従う。サービス時間はパケット長と等しいので固定、同時に送信されるパケット数に制限はない。よって、同時に送信されるパケット数は待ち行列モデル  $M_1 + M_2/D/\infty//K$  に従う。

以下において、それぞれの部分における議論をすすめる。

## ユーザ部分

まず初めにサービス時間、つまりあるパケットがバッファの先頭に来てから正しく伝送されるのに要する時間の確率密度関数 (pdf) を求める。アイドルユーザは新規にパケットが発生したら直ちにパケットを送出し、ビジーユーザは送信レート  $p$  で蓄えられたパケットを送出する。よって図 8.11 に示されるように、アイドルユーザかビジーユーザかによって、新たにサービスを受けるパケットのサービス時間分布が異なる。

アイドルユーザに新たにパケットが到着した場合、新規パケットは直ちに送信される。この場合のサービス時間の pdf を  $d_I(t)$  とする。もし、1 回の送信でパケットを正しく伝送できた場合、サービス時間は  $T_p$  となり、これが起こる確率は  $Q_S$  である。パ

ケットが1回で正しく伝送できない場合は、正しく伝送されるまで送信が繰り返される。ここで、最初に送信したのも含めて  $m+1$  回送信した後に正しく伝送できたとする。この確率は  $(1-Q_S)^m Q_S$  となり、これに要する時間はパケットを  $m+1$  回送信するのに要する時間  $(m+1)T_p$  と、 $m$  個の指数分布に従う送信間隔の和である。 $k$  個の指数分布の和の分布は  $k$  アーラン分布に従う。それゆえ、サービス時間の pdf は、

$$d_I(t) = Q_S \cdot \delta(t - T_p) + \sum_{m=1}^{\infty} (1 - Q_S)^m Q_S \cdot E_m(t - (m+1)T_p; p/m) \quad (8.19)$$

となる。ただし、 $\delta(t)$  はデルタ関数、 $E_k(t; \nu)$  は平均  $1/\nu$  の  $k$  アーラン分布であり、

$$E_k(t; \nu) \equiv \begin{cases} \frac{(k\nu t)^{k-1}}{(k-1)!} k\nu e^{-k\nu t} & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (8.20)$$

となる。 $d_I(t)$  を平均化して、平均サービス時間  $1/\mu_I$  は、

$$1/\mu_I = T_p + \frac{T_p + 1/p}{Q_S} (1 - Q_S) \quad (8.21)$$

となる。

ビジーユーザにおいて新たにパケットがサービスされる場合、このパケットはレート  $p$  で送出される。この場合のサービス時間の pdf を  $d_B(t)$  とする。パケットの送出は毎回指数分布に従う送信間隔の後に起こる。ここで、全部で  $m$  回、あるパケットを送信したとすると、これが起こる確率は  $(1 - Q_S)^{m-1} Q_S$  であり、サービス時間は  $m$  回パケットを送るのに要する時間  $mT_p$  と  $m$  個の指数分布に従う送信間隔の和になる。よって、サービス時間の pdf は、

$$d_B(t) = \sum_{m=1}^{\infty} (1 - Q_S)^{m-1} Q_S \cdot E_m(t - mT_p; p/m) \quad (8.22)$$

となり、平均サービス時間  $1/\mu_B$  は、

$$1/\mu_B = \frac{T_p + 1/p}{Q_S} \quad (8.23)$$

となる。

次に、ユーザが  $j$  個のパケットを蓄えているという定常状態確率を求める。この定常状態確率を求めるにあたり、待ち行列モデル  $M/G/1/B$  の定常状態確率を求める手法を用いる [15]。ここで、 $D_I(s)$  と  $D_B(s)$  をそれぞれ  $d_I(t)$  と  $d_B(t)$  のラプラス-ステュルチェス変換 (LST) とする。これらは以下のように得られる。

$$D_I(s) \equiv \int_0^{\infty} e^{-st} d_I(t) dt$$

$$= \sum_{m=0}^{\infty} (1 - Q_S)^m Q_S \cdot e^{-(m+1)T_p s} \left( \frac{p}{s+p} \right)^m \quad (8.24)$$

$$D_B(s) = \sum_{m=1}^{\infty} (1 - Q_S)^{m-1} Q_S \cdot e^{-mT_p s} \left( \frac{p}{s+p} \right)^m \quad (8.25)$$

ここで、 $p_{Ij}$  をアイドルユーザに新たにパケットが到着した場合において、このパケットを処理している間に  $j$  個、新規パケットが発生する確率とする。パケットの発生はポアソン過程に従うので、この確率は

$$p_{Ij} = \int_0^{\infty} \frac{(\lambda_N t)^j}{j!} e^{-\lambda_N t} d_I(t) dt \quad (8.26)$$

となる。そして、 $p_{Ij}$  の確率母関数は、

$$\begin{aligned} h(z) &\equiv \sum_{j=0}^{\infty} z^j p_{Ij} = \int_0^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} z^j \frac{(\lambda_N t)^j}{j!} e^{-\lambda_N t} d_I(t) dt \\ &= D_I([1-z]\lambda_N) \end{aligned} \quad (8.27)$$

となる。反転公式より、 $p_{Ij}$  は

$$\begin{aligned} p_{Ij} &= \frac{1}{j!} \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\partial^j}{\partial z^j} D_I([1-z]\lambda_N) \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{j!} \left( -\frac{\lambda_N}{p} \right)^j (1 - Q_S)^m Q_S e^{-(m+1)T_p \lambda_N} \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^j \binom{j}{n} \frac{(-m)! \{-(m+1)T_p p\}^{j-n}}{(-m-n)!} \cdot \left( \frac{p}{\lambda_N + p} \right)^{m+n} \end{aligned} \quad (8.28)$$

となる。同様にして、ビジーユーザにおいて新たにパケットがサービスされる場合で、このパケットを処理している間に  $j$  個、新規パケットが発生する確率は、

$$\begin{aligned} p_{Bj} &= \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \left( -\frac{\lambda_N}{p} \right)^j (1 - Q_S)^{m-1} Q_S e^{-mT_p \lambda_N} \\ &\quad \cdot \sum_{n=0}^j \binom{j}{n} \frac{(-m)! (-mT_p p)^{j-n}}{(-m-n)!} \cdot \left( \frac{p}{\lambda_N + p} \right)^{m+n} \end{aligned} \quad (8.29)$$

となる。

式 (8.28) と (8.29) より、あるユーザにおいて、パケットが正しく伝送されたためにバッファからこのパケットが削除された直後に  $j$  パケット蓄えている確率  $\Pi_j$  は以下の漸化式で得られる。

$$\begin{aligned} \Pi_{j+1} &= (\Pi_j - p_{Ij}\Pi_0 - \sum_{m=1}^j p_{Bj-m+1}\Pi_m) p_{B0}^{-1} \\ &\quad (j = 0, 1, \dots, B-2) \end{aligned} \quad (8.30)$$

ただし、正規化条件として

$$\sum_{j=0}^{B-1} \Pi_j = 1 \quad (8.31)$$

が与えられる。式 (8.30) において、 $C_j = \Pi_j / \Pi_0$  と置くと、

$$C_{j+1} = (C_j - p_{Ij} - \sum_{m=1}^j p_{Bj-m+1} C_m) p_{B0}^{-1} \quad (j = 0, 1, \dots, B-2) \quad (8.32-a)$$

$$C_0 = 1 \quad (8.32-b)$$

が得られる。また、

$$C = 1 + \sum_{j=1}^{B-1} C_j \quad (8.33)$$

と定める。定常状態確率  $P_j$  は  $\Pi_j$  を使って以下のように得られる [15].

$$P_j = \begin{cases} \frac{\Pi_j}{\Pi_0 + a} & (j = 0, 1, \dots, B-1) \\ 1 - \frac{1}{\Pi_0 + a} & (j = B) \end{cases} \quad (8.34)$$

ここで、 $a$  は各ユーザにおける呼量であり、

$$a = \lambda_N / \mu \quad (8.35)$$

として得られる。ただし、

$$1/\mu = \Pi_0 / \mu_I + (1 - \Pi_0) / \mu_B \quad (8.36)$$

である。式 (8.32) ~ (8.36) より、

$$P_j = \begin{cases} \frac{C_j}{1 + aC} & (j = 0, 1, \dots, B-1) \\ 1 - \frac{C}{1 + aC} & (j = B) \end{cases} \quad (8.37)$$

が得られる。ただし、

$$aC = \frac{\lambda_N}{\mu_I} + \frac{\lambda_N}{\mu_B} \cdot (C - 1) \quad (8.38)$$

である。

式 (8.37) において  $j = 0$  と定めることにより、ユーザ全体に対するアイドルユーザの割合は、

$$P_0 = \frac{C_0}{1 + aC} = \frac{1}{1 + aC} \quad (8.39)$$

と求められる。

## チャネル部分

チャネル部分では、同時に送信されているパケット数は待ち行列モデル  $M_1 + M_2/D/\infty//K$  に従うとみなせれる。待ち行列モデル  $M_1 + M_2/D/\infty//K$  の定常状態確率は、待ち行列モデル  $M/M/\infty//K$  の定常状態確率に等しい [16]。そこで、4.4.3節と同様にしてパケット成功確率を求める。

全ユーザに対してレート  $\lambda_N$  でパケットを送信しているユーザの割合を  $P_0^*$  とする。レート  $\lambda_N$  でパケットを送信しているユーザはアイドルユーザと、ビジューザの内、新規パケットを扱っているユーザ（つまり現在処理しているパケットを扱う直前がアイドル状態であり、このパケットを初めて送信しているユーザ）である。全ユーザに対する前者の割合は  $P_0$  で与えられる。後者の割合は以下のようにして求められる。定常状態確率  $P_j$  が時間に対し独立であると仮定する。このとき、現在処理しているパケットを扱う直前がアイドル状態である確率は  $(1 - P_0)P_0$  となる。そして、パケットの伝送に成功するまでに費やす時間に対し、パケットを初めて送るのに要する時間の割合は、

$$\begin{aligned} b &= \frac{T_p}{T_p} Q_s + \frac{T_p}{T_p + (T_p + 1/p)} (1 - Q_s) Q_s + \cdots \\ &\quad + \frac{T_p}{T_p + m(T_p + 1/p)} (1 - Q_s)^m Q_s + \cdots \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{T_p}{T_p + m(T_p + 1/p)} (1 - Q_s)^m Q_s \end{aligned} \quad (8.40)$$

となる。よって、ビジューザの内、新規パケットを扱っているユーザの割合は、 $(1 - P_0)P_0 \cdot b$  となる。結局、 $P_0^*$  は、

$$P_0^* = P_0 + (1 - P_0)P_0 \cdot b \quad (8.41)$$

となる。そしてチャネルに送信されるパケットの生起率  $\lambda_c$  は、

$$\lambda_c = \lambda_N P_0^* + p(1 - P_0^*) \quad (8.42)$$

となる。

ここで、同時送信局数の平均値を  $G_{sys}$  とすると、これは  $M/M/\infty//K$  の定常状態確率 [17] より

$$G_{sys} = \sum_{m=0}^K m \cdot \frac{(\lambda_c/\mu_c)^m \binom{K}{m}}{(1 + \lambda_c/\mu_c)^K} = \frac{G_c}{1 + G_c/K} \quad (8.43)$$

となる。ただし、 $\mu_c = 1/T_p$ ,  $G_c = K \cdot \lambda_c \cdot T_p$  である。



次に,  $P_S(k, i)$  を求める. これは着目パケットにおいて, 1 ビット目から  $i$  ビット目までパケットの伝送に成功し,  $i$  ビット目における干渉パケット数が  $k$  である確率である.

(i)  $i = 1$  のとき

待ち行列モデル  $M/M/\infty/K$  の定常状態の式より,

$$P_S(k, i) = \begin{cases} \frac{(\lambda_c/\mu_c)^k \binom{K-1}{k}}{(1 + \lambda_c/\mu_c)^{K-1}} \cdot P_c(k) & ; \text{if } k < K \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (8.44)$$

となる.

(ii)  $i > 1$  のとき

$P_S(k, i)$  は式 (4.17) より, 以下のようになる.

(a)  $k < K - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & [P_S(k, i-1) \cdot \{1 - k\mu_c\Delta t - (K-1-k)\lambda_c\Delta t\} \\ & + P_S(k+1, i-1) \cdot (k+1)\mu_c\Delta t \\ & + P_S(k-1, i-1) \cdot (K-k)\lambda_c\Delta t] \cdot P_c(k) \end{aligned} \quad (8.45-a)$$

(b)  $k = K - 1$  のとき

$$\begin{aligned} P_S(k, i) = & [P_S(K-1, i-1) \cdot \{1 - (K-1)\mu_c\Delta t\} \\ & + P_S(K-2, i-1) \cdot \lambda_c\Delta t] \cdot P_c(K-1) \end{aligned} \quad (8.45-b)$$

(c)  $k > K - 1$  のとき

$$P_S(k, i) = 0 \quad (8.45-c)$$

$P_S(k, i)$  を用いてスループットは

$$S = G_{sys} \sum_{k=0}^{\infty} P_S(k, L) \quad [\text{packet}/T_p] \quad (8.46)$$

となる.

従って, パケット成功確率  $Q_S$  は,

$$Q_S = S/G_c \quad (8.47)$$

となる.

## ユーザ部分とチャネル部分の結合

ユーザ部分とチャネル部分のそれぞれから得られた式 (8.39) と式 (8.47) を解く。ここで、もしパケット成功確率  $Q_S$  が 0 ならば、全てのパケットは伝送に失敗するので、ユーザが 1 つもバッファにパケットを蓄えていない確率  $P_0$  は 0 になる。逆にもし  $Q_S$  が 1 ならば、全てのパケットは伝送に成功するので、バッファにパケットは蓄えられず、 $P_0$  は 1 に近づく。よって、式 (8.39) と式 (8.47) の解は必ず存在する。また、もし解が複数存在するならば平衡点解析法 [18] により、もっともスループット特性が悪くなるものを用いるとする。この場合、システムは 5 章で述べた双安定な状態になり、特性に急激な変化が生じることになる。

では、実際に式 (8.39) と式 (8.47) を解く。まず式 (8.39) を式 (8.47) に代入する。そして適当な数値解析法、例えば 2 分法などを用いて  $Q_S$  および  $P_0$  を求める。この解を用いてシステムの特性を導出する。スループット特性は式 (8.46) によって得られる。あるユーザにおいて新規に発生したパケットがバッファが満杯であるために呼損として扱われる確率、呼損率  $Q_R$  は、

$$Q_R = P_B = 1 - \frac{C}{1 + aC} \quad (8.48)$$

となる。また、平均遅延時間をパケットが発生してからこのパケットが正しく伝送されるまでの時間とすると、パケット長で正規化した平均遅延時間はリトルの公式より、

$$D = \frac{1}{T_p} \cdot \frac{Q}{S/K} \quad [\text{s}/T_p] \quad (8.49)$$

となる。ただし、 $Q$  はバッファに蓄えられている平均パケット数であり、

$$Q = \sum_{j=1}^B j \cdot P_j \quad (8.50)$$

として求められる。

### 8.3.3 数値例

図 8.12～8.14 に、それぞれスループット特性、呼損率特性、遅延特性を示す。拡散率  $N = 60$ ,  $E_b/N_0 = 10 [\text{dB}]$ , ユーザ数  $K = 100$ , パケット長  $L = 500 [\text{bits}]$ , バッファ数  $B = 3$  とした。新規パケットのオフロード  $G_N$  は 1 パケット長時間に新規に発生する平均パケット数であり、 $G_N = K \cdot \lambda_N \cdot T_p$  となる。パケット長時間  $T_p$  は 1 に正規化した。この図にはシミュレーション結果も示してある。シミュレーションは 8.3.1 節に述べられているパケットの送信方法に基づいて、 $K$  ユーザがそれぞれパケットを発生し、このパケットをバッファに蓄えチャネルに送信している。特性解析

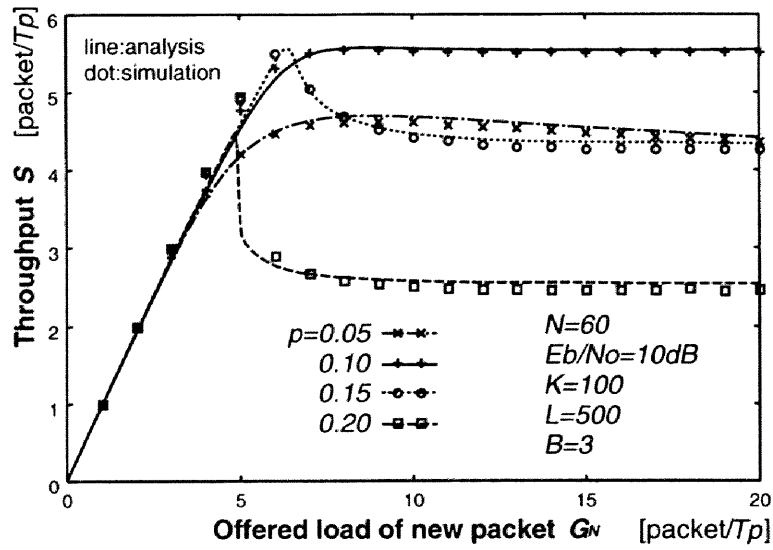


図 8.12:  $B = 3$  のときの待時式 CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性

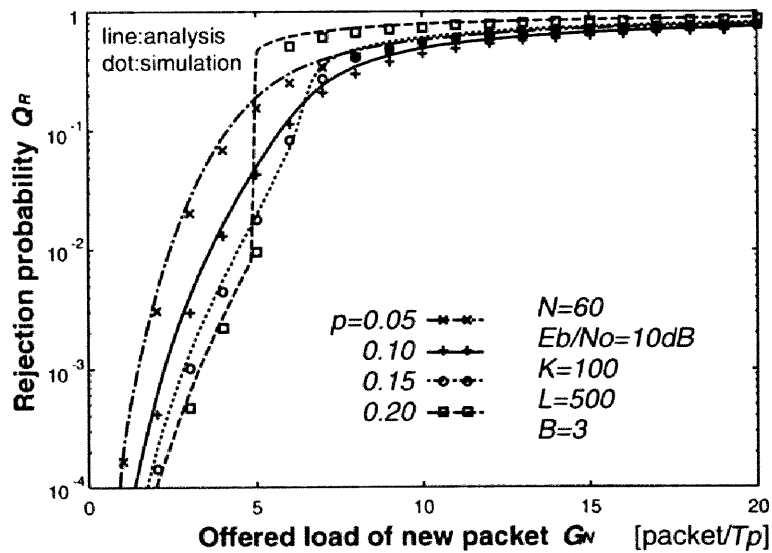


図 8.13:  $B = 3$  のときの待時式 CDMA U-ALOHA 方式の呼損率特性

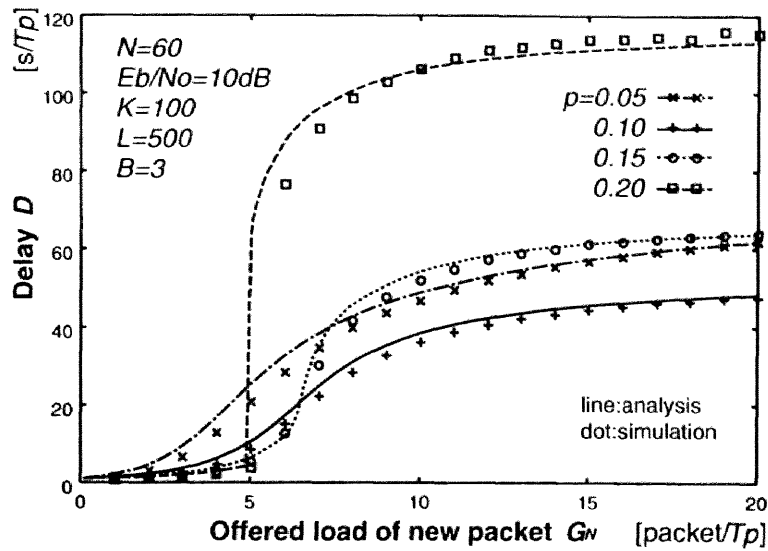


図 8.14:  $B = 3$  のときの待時式 CDMA U-ALOHA 方式の遅延特性

は、システムの状態は定常状態確率やパケット成功確率が変化しないとみなすことができる程ゆっくりであるという仮定を基に行われているが、図より、解析結果とシミュレーション結果がほぼ一致しており、解析で用いられた仮定がさほど影響ないことがわかる。

送信レートが  $p \leq 0.1$  の場合、スループット、呼損率、および遅延特性はオフロードの増加とともに緩やかに増加する。そして、送信レートが大きい方が特性も良くなっている。しかし、 $p > 0.1$  の場合、スループット特性はオフロードの増加とともにはじめ増加し、最大値をとったあと減少する。呼損率や遅延特性はオフロードが低いときは小さな値を保ち、オフロードが大きくなると急激に増加する。この特徴は送信レート  $p$  が大きい方がより顕著に現れる。この理由は以下の通りである。スループット特性はチャンネル部分における実際に送信されるパケットの生起率  $\lambda_c$  に依存する。 $\lambda_c$  の関数としてスループット特性を描くと上に凸の曲線になり、最大値を持つことになる。上記の条件では、 $\lambda_c = 0.096$  のとき、スループットは最大値  $S_{max} = 5.6$  をとる。式 (8.42) より、 $P_0^*$  が減少するにつれ、 $\lambda_c$  は  $\lambda_N$  から  $p$  まで変化する。また、オフロードが大きいところではパケット成功確率は劣化するので、 $P_0^*$  はオフロードが増加するにつれ、1 から 0 に変化する。従って、オフロードが増加するにつれ、 $\lambda_c$  は  $p$  に近づく。送信レートが  $p \leq 0.096$  の範囲では、送信レートが大きい方がよりパケットを早く処理でき特性が良くなる。しかし、 $p > 0.096$  では、たくさんのパケットが同時に送信されてパケット成功確率が劣化するために、オフロードが大きいところで特性が悪くなる。

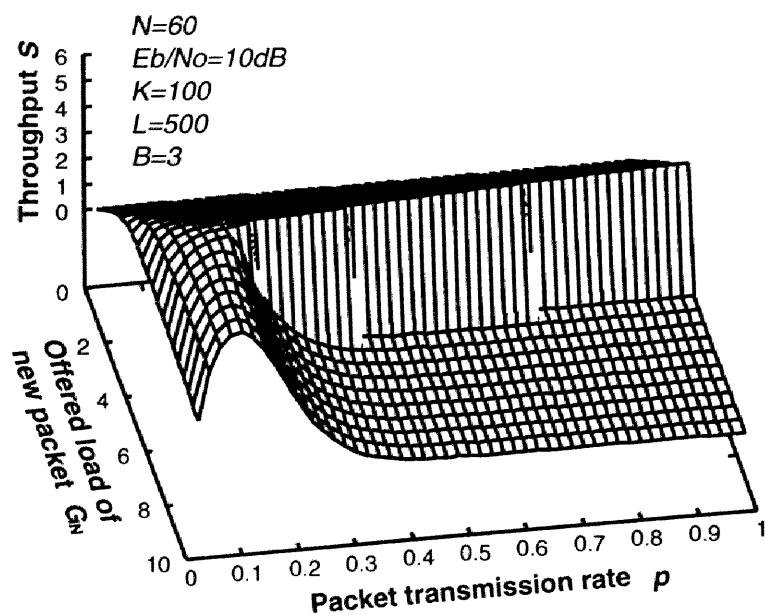


図 8.15: 送信レートとオフロードロードをパラメータとしたときのスループット特性

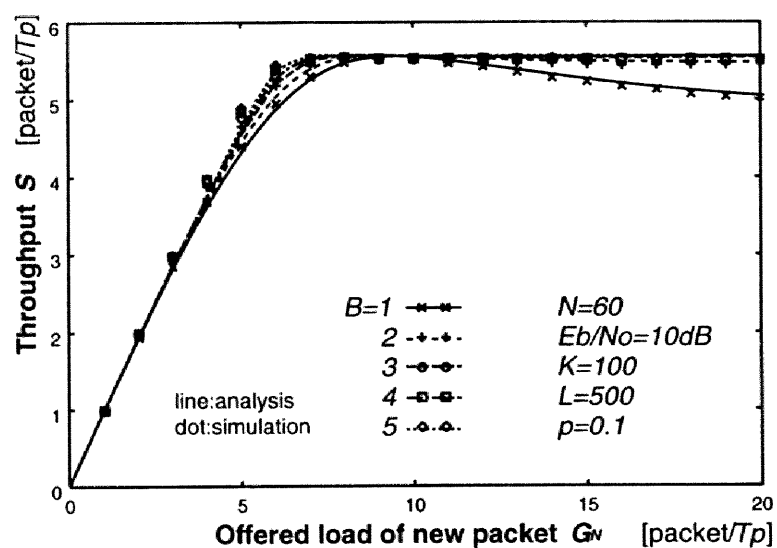


図 8.16:  $p = 0.1$  での待時式 CDMA U-ALOHA 方式のスループット特性

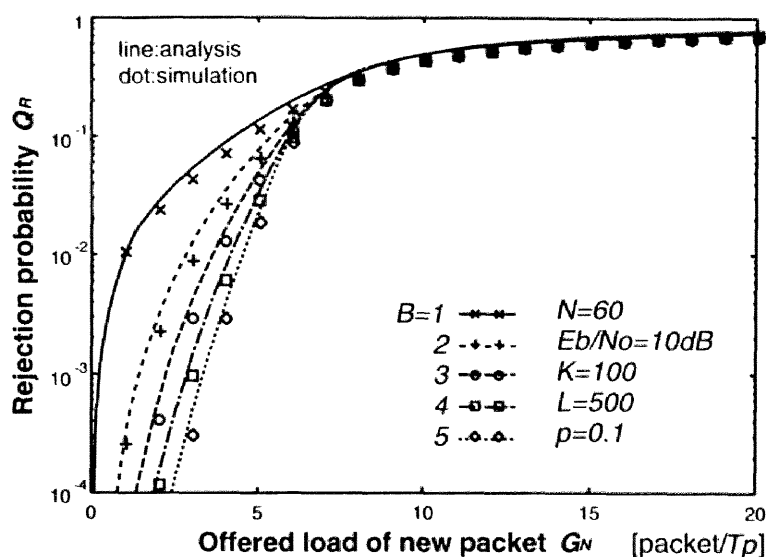


図 8.17:  $p = 0.1$  での待時式 CDMA U-ALOHA 方式の呼損率特性

また,  $p = 0.20$  の場合, 図8.12～8.14からわかるように,  $G_N \simeq 5$  で特性に急激な変化がみられる. これは,  $5 < G_N < 6$  の範囲で  $Q_S$  と  $P_0$  の解が複数存在しており, このために双安定な状態が生じているからである.

ここで, スループット特性を別の観点からみてみる. 図8.15は送信レートとオフロードロードをパラメータとしたときのスループット特性である. この図より, スループットを最大にする送信レート  $p$  の値はオフロードロードに依存することがわかる. この値はオフロードロードが増加するに連れ, 1 から 0.096 に漸近的に減少する.

図8.16～8.18はバッファサイズ  $B$  を 1 ～ 5 まで変化させたときの特性である. 送信レート  $p$  は 0.1 とした. バッファサイズが大きければ大きい程, オフロードロードが小さいところでのスループットの増加が急峻である. これは,  $p = 0.1$  の場合, バッファ数が多い方がより早く  $\lambda_c$  が 0.1 に近付き, スループットが最大になるためである. また図8.17より, 呼損率特性はオフロードロードの小さいところではバッファ数を増やすことにより良くなるが, オフロードロードの大きいところでは, あまり改善がみられない. 図8.18から, バッファ数を大きくすると遅延特性が悪くなることがわかる. しかし, これは本来呼損として扱われてしまうはずだったパケットをバッファを増やすことにより呼損とならずに伝送されるために生じた遅延時間であり,それほど深刻な問題ではない.

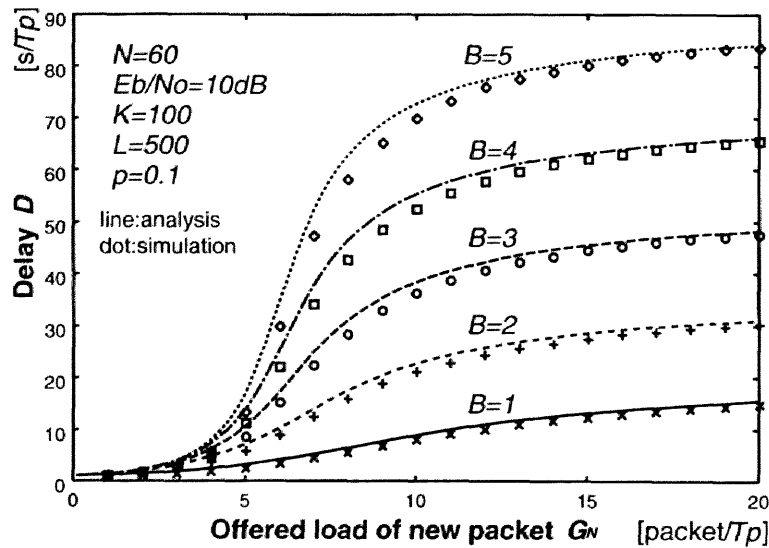


図 8.18:  $p = 0.1$  での待時式 CDMA U-ALOHA 方式の遅延特性

## 8.4 CLSP を用いた待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式

本節では、第8.3節で述べた待時式 CDMA U-ALOHA 方式に CLSP を適用することにより、特性向上を図る。CLSP を用いると、チャネルの状態に応じてパケットの送信を控えるために、各ユーザがバッファを設けることが特に要求される。そこで、計算機シミュレーションを用いて特性評価を行う。

### 8.4.1 システムモデル

待時式 CDMA U-ALOHA 方式の場合と同様に、各ユーザは有限のバッファを有するものとする。ここで、ユーザ数を  $K$  とし、各ユーザは送信中のパケットを含めて  $B$  パケット分蓄えることができるバッファを持っているとする。

CLSP を用いた待時式 CDMA Unslotted ALOHA 方式のパケットの流れ図を図8.19に示す。アイドルユーザにおいて新規にパケットが発生した場合、このパケットのコピーをバッファに蓄えると同時に CLSP によるアクセス制御を受ける。同時送信局数がスレッシュホールドより小さければ、パケットを送信する。同時送信局数がスレッシュホールド以上の場合、パケットの送信は拒否される。バッファに蓄えられたパケットは送信レート  $p$  (送信間隔が平均  $1/p$  の指数分布) で送信しようとする。ただし、このときも CLSP による制御を受ける。同時送信局数がスレッシュホールドより小さければ、このパケットは送信される。この操作を中央局で正しく受信されるまで続け、正しく受信されたとき、バッファからパケットが削除される。

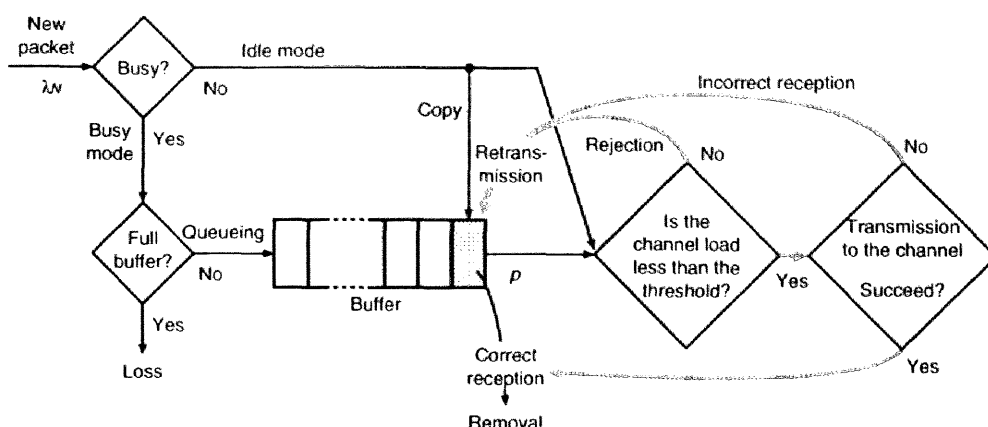


図 8.19: CLSP を用いた待時式 CDMA U-ALOHA 方式のパケットの流れ図

表 8.1: 計算機シミュレーションに用いたパラメータ

| アクセス制御遅延 $\tau_D$ | スレッシュホールド $\alpha$ | 送信レート $p$ |
|-------------------|--------------------|-----------|
| 0                 | 9                  | 0.99      |
| 0.1               | 10                 | 0.13      |
| 0.26              | 12                 | 0.10      |
| 1.0               | 20                 | 0.09      |
| 9.2               | 28                 | 0.09      |

#### 8.4.2 数値例

CLSP を用いた待時式 CDMA U-ALOHA 方式の特性を計算機シミュレーションによって求める。各パラメータは、拡散率  $N = 60$ , ユーザ数  $K = 100$ , パケット長  $L = 500$  [bit] とした。スレッシュホールド  $\alpha$  は、スループットの最大値が最も高くなるように選んだ。送信レート  $p$  は、全てのユーザがレート  $p$  でパケットを送信する場合に、スループットが最大値をとるように選んだ。このように選ぶと、スレッシュホールドは表8.1のようになる。

図8.20にパケット長で正規化したアクセス制御遅延  $\tau_D$  を変化させたときの特性を示す。アクセス制御遅延がない場合 ( $\tau_D = 0$ ) が最も特性が良い。  $\tau_D$  が増すと特性は劣化し、CLSP を用いない場合に漸近的に近付いていく。低軌道衛星を用いた場合、  $\tau_D = 0.26$  となるが、この場合ですら CLSP を用いない場合とほぼ同じ特性になる。

この特性は OACP を用いた場合と非常によく似ている (第7.4節参照)。これは、以下の理由による。スレッシュホールドは OACP の場合と同様に定めたので、スループット



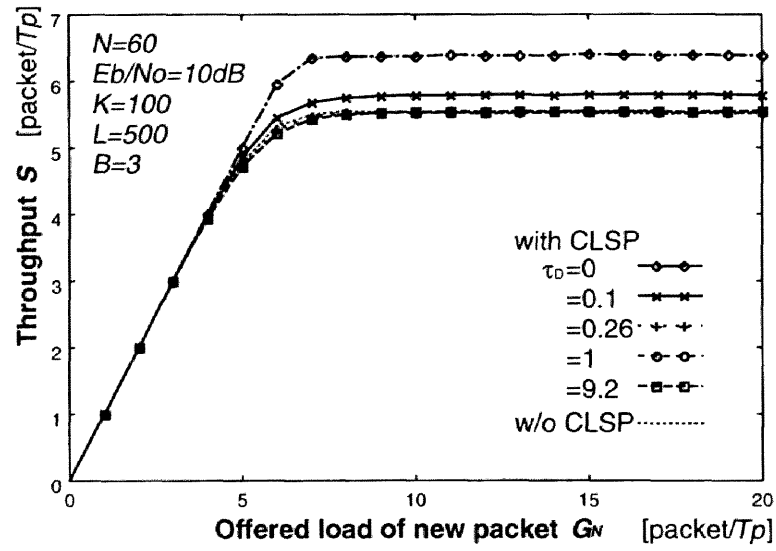


図 8.20: アクセス制御遅延を変化させたときのスループット特性

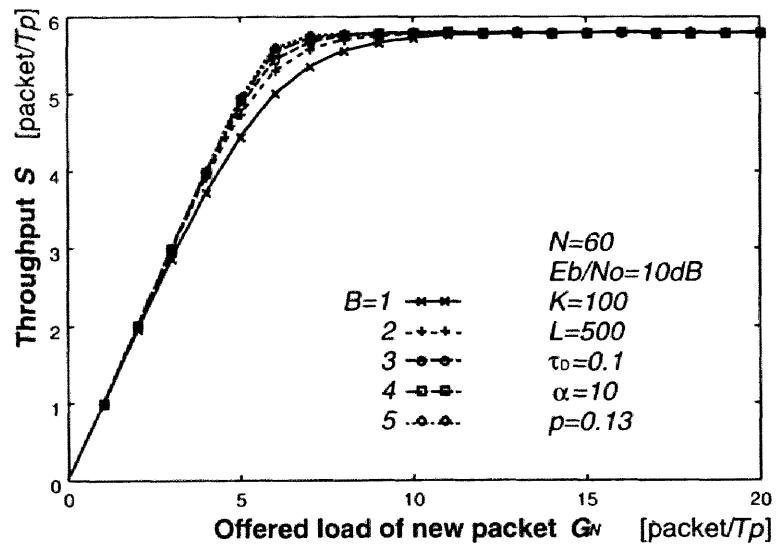


図 8.21:  $\tau_D = 0.1$  のときのスループット特性

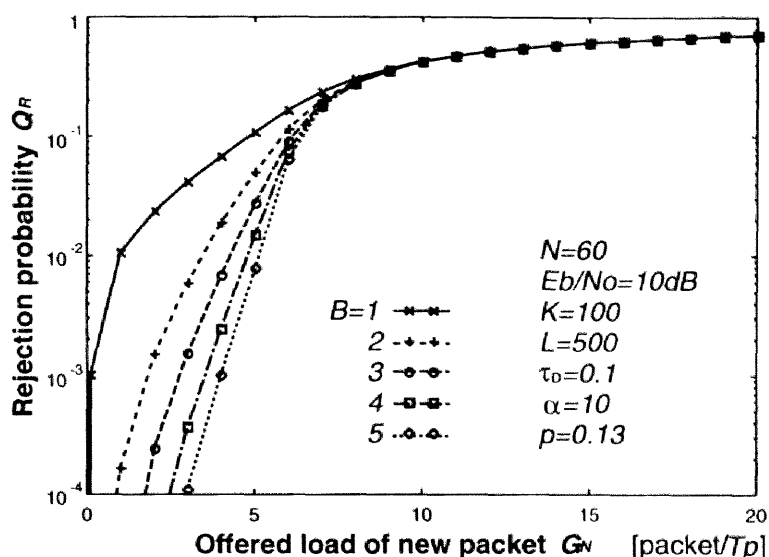


図 8.22:  $\tau_D = 0.1$  のときの呼損率特性

の最大値は OACP の場合と同じ値になる。また、送信レート  $p$  は全てのユーザがレート  $p$  でパケットを送信する場合に、スループットが最大値をとるように選んだ。この場合、オファードロードが大きいところでは、ある程度の数のバッファを設けることにより、全てのユーザがビジー状態になり、スループットは最大値を保つ。このため、OACP を用いた場合とよく似た特徴を持つ。

さらに、図8.21に、 $\tau_D = 0.1$ ,  $p = 0.13$  とし、バッファ数を変化させたときのスループット特性を示す。ここで、CLSP を用いた待時式 CDMA U-ALOHA 方式と第6章で提案した OACP を比較しつつ、特性を評価する。CLSP を用いた待時式 CDMA U-ALOHA 方式ではパケットの再送はレート  $p$  に従って送信される。図8.21では送信レート  $p$  は固定された値を用いている。特に、 $B = 1$  の場合はパケットをバッファに蓄えることは行わず、CLSP においてパケットの再送のみを考慮したものに相当する。これに対し、OACP は CLSP にパケットの再送制御を加えたものであり、パケットの再送を状態  $r$  に基づいて制御している。つまり、両者の大きな違いは再送パケットを固定された送信レートに従って送信しているのと再送パケットを制御しながら送信している点にある。送信レートを固定すると、スループットの増加が比較的緩やかになるが、再送制御を用いることにより、スループットが直線的に増加する。しかし、送信レートを固定していても、バッファ数を増やすことにより、スループットが直線的に増加し、両者の差が少なくなっていく。このように、バッファ数を増やすことにより、わざわざ再送パケットの発生を制御しなくても OACP の特性に近付くことがわかる。もちろん、OACP に待時式システムを適用することは可能であるが、スルー

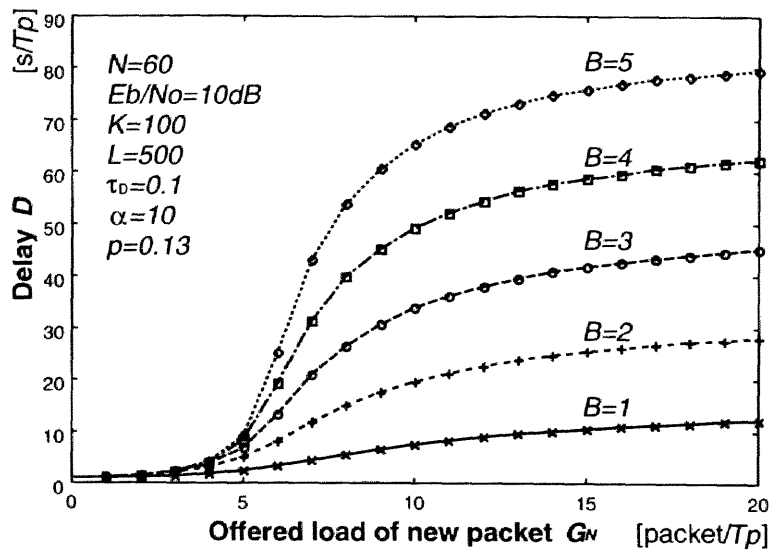


図 8.23:  $\tau_D = 0.1$  のときの遅延特性

プット特性の観点からは改善効果は期待できず、呼損率を下げる利点しかないと予想できる。

図8.22にバッファ数を変化させたときの呼損率特性を示す。要求される呼損率はパケットの種類にもよるが、例えば音声パケットでは  $10^{-3}$  程度と言われている。この呼損率を達成するためにはバッファを設けることが必要であることが、図から明らかである。

また、図8.23に遅延特性を示す。CLSP を用いない待時式 CDMA U-ALOHA 方式と比べると、CLSP を用いた場合の方が、多少、遅延時間が短くなっている。これは CLSP を用いることによりスループット特性が良くなり、その分パケットを処理する時間が短くなるためである。

## 8.5 まとめ

本章では発生したパケットをいったんバッファに蓄えてから送信する待時式 CDMA ALOHA 方式について検討した。

まず、制限付つば占有モデルに基づく線形近似法を用いて、各ユーザが有限バッファを持つ CDMA S-ALOHA 方式の特性解析を行った。次に、2 マルコフ連鎖モデルを提案し、これを用いて待時式 CDMA U-ALOHA 方式の特性解析を行った。そして特性評価を行い、バッファ数を増やすことによりスループット特性や呼損率特性の向上を図ることができるのがわかった。また、このとき遅延時間が増加することわ

かった。

本章で提案した2マルコフ連鎖モデルはユーザ部分とチャネル部分をそれぞれマルコフモデルで表すという解析手法である。このため、ここで検討したシステム以外でも、マルコフモデルで表すことができれば、本解析手法は適用可能である。さらに、これまで様々なマルコフモデルについて研究がなされており、これらを用いることができる点も本解析手法の利点であり、非常に有用性のある解析手法と言える。

また、CLSPを適用した待時式CDMA U-ALOHA方式の特性を計算機シミュレーションを用いて評価した。この結果、アクセス制御遅延が比較的小さい場合に特性が向上することを示した。さらに、バッファ数を増やすことにより、パケットの再送を制御しなくてもOACPのスループット特性に近付くことがわかった。要求される呼損率を達成するために、バッファを設けること自体は必要とされるので、より簡単なアクセス制御によって、同程度のスループット特性を得られるということになる。

本章で提案した待時式CDMA ALOHA方式は、送信レートが非常に重要なパラメータになる。送信レートを決めるにあたり、発生するトラヒックの量には左右されないが、 $E_b/N_0$ のような伝送路の特性を表すパラメータには影響をうける。このため、実際にはその状況に応じて送信レートを変えてやる必要がある。この操作は、チャネルを中央局が監視し、その観測結果に基づいて中央局が行うこともできるが、各ユーザにおいて、バッファに蓄えてあるパケット数やパケットの伝送に失敗した回数等から送信レートを調節することによっても行えるであろう。今後、このようなユーザによる自律制御についても検討していきたい。

## 第 8 章の参考文献

- [1] S. S. Kamal and S. A. Mahmoud, "A Study of users' buffer variations in random access satellite channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-27, no.6, pp.857-868, June 1979; correction, pp.1745-1746, Nov. 1979.
- [2] T. Saadawi and A. Ephremides, "Comments on 'A study of users' buffer variations in random access satellite channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-28, no.8, Aug. 1980.
- [3] K. K. Mittal and A. N. Venetsanopoulos, "Comments on 'A study of users' buffer variations in random access satellite channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-28, no.8, Aug. 1980.
- [4] D. V. Ramana, V. V. S. Sarma, "Performance of slotted ALOHA satellite channels with finite buffer," *IEE Proc.*, part F, vol.129, pp.19-24, Feb. 1982.
- [5] 田坂修二, 古川一憲, "バッファリング機能を持つアロハ形衛星パケット通信網," *電子通信学会論文誌*, vol.J65-B, pp.62-69, 1982 年 1 月.
- [6] E. D. Sykas, D. E. Karvelas and E. N. Protonotarios, "Queueing analysis of some buffered random multiple access schemes," *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-34, no.8, pp.790-798, Aug. 1986.
- [7] A. Ganz and I. Chlamtac, "A linear solution to queueing analysis of synchronous finite buffer networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol.38, no.4, pp.440-446, Apr. 1990.
- [8] R. Al-Naami, "Queueing analysis of slotted ALOHA with finite buffer capacity," *IEEE GLOBECOM'93*, pp.1139-1143, 1993.
- [9] X. X. Yao and O. W. W. Yang, "A queueing analysis of slotted ALOHA systems," *IEEE CCECE'93*, pp.1234-38, 1993.

- [10] 岡田啓, 山里敬也, 片山正昭, 小川明, “各ユーザが有限バッファを持つ CDMA ALOHA 方式の特性解析,” 第 20 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA'97), 4.3.6, pp.409-412, 1997 年 12 月.
- [11] H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, “CDMA slotted ALOHA system with finite buffers,” IEICE Trans., vol.E81-A, no.7, pp.1473-1478, July 1998.
- [12] H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, “Queueing analysis of CDMA slotted ALOHA systems with finite buffer and finite population assumptions,” IEEE ICC'98, vol.1, pp.407-411, June 1998.
- [13] H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, “Queueing analysis of CDMA unslotted ALOHA systems with finite buffers,” IEICE Trans., vol.E81-A, no.10, pp.2083-2091, Oct. 1998.
- [14] H. Okada, T. Yamazato, M. Katayama, A. Ogawa, “CDMA unslotted ALOHA systems with finite buffers,” IEEE ICUPC'98, pp.1143-1147, Oct. 1998.
- [15] 秋丸春夫, 川島幸之助, 情報通信トラヒック – 基礎と応用 –, 電気通信協会, 1990 年.
- [16] 藤木正也, 雁部頼一, 通信トラヒック理論, 丸善, 1980 年.
- [17] L. Kleinrock, Queueing systems, vol. 1, New York : Wiley-Inter-Science, 1975.
- [18] A. Fukuda and S. Tasaka, “The equilibrium point analysis – A unified analytic tool for packet broadcast networks,” IEEE GLOBECOM'83, pp.1133-40, 1983.

## 第 9 章

### 総括

#### 9.1 本研究のまとめ

本研究では、今後、重要な役割を果たすと思われる CDMA パケット通信に関する検討を行った。特にもっとも基本的な CDMA ALOHA 方式に重点をおき、特性解析および特性評価を行った。また、CDMA ALOHA 方式の特性向上を目的とし、それを実現するアクセス制御方式に関する検討を行った。

まず、第2章および第3章において、本論文の基礎になっているパケット通信や CDMA 方式について簡単にまとめた。

第4章において、CDMA ALOHA 方式の特性解析を行った。CDMA S-ALOHA 方式では、同時送信局数の分布が2項分布またはポアソン分布に従うことを用いて解析を行った。CDMA U-ALOHA 方式においては、マルコフモデル、待ち行列理論を用い、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特性を求めた。その結果、スループット特性は始め増加し、一度最大値をとった後、オフロードの増加とともに減少していくことがわかった。また、CDMA U-ALOHA 方式は Pure ALOHA 方式と比べると、CDMA U-ALOHA 方式はトラヒックが低いところで特性がよくなることがわかった。

次に第5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つ存在する双安定な状態が存在し、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6章ではパケットの再送を制御する ORC の提案を行った。さ

らに、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 を用いると双安定な状態にならないことを示した。

また、第7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明らかにし、この影響を和らげることのできる MCLSP を適用した。そして、この MCLSP を用いたシステムでは、アクセス制御遅延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。さらに、OACP についてもアクセス制御遅延の影響を調べ、アクセス制御遅延が比較的短い場合に MCLSP よりも有効であることを示した。

第8章では、制限付つば占有モデルに基づく線形近似法を用いることにより、待時式 CDMA S-ALOHA 方式の特性解析を行なった。さらに、2 マルコフ連鎖モデルを提案し、待時式 CDMA U-ALOHA 方式の特性解析も行なった。2 マルコフ連鎖モデルとは、システムをユーザ部分とチャネル部分に分け、それぞれをマルコフ連鎖でモデル化したものである。そして両方の場合において、スループット特性、呼損率特性、遅延特性の観点から特性評価を行なった。その結果、バッファ数を増やすことによりスループット特性や呼損率特性の向上を図ることができるのがわかった。また、このとき遅延時間が増加することでもわかった。また、CLSP を適用した待時式 CDMA U-ALOHA 方式についても特性評価を行った。そして、バッファ数を増やすことにより、パケットの再送を制御しなくても OACP の特性に近付くことがわかった。

以上、本研究の概要を示した。

従来、無線通信の特性評価の指標としてビット誤り率特性が広く用いられている。しかし、このビット誤り率特性は多元接続方式やパケット通信方式の特性を評価するのには適していない。また、有線系ネットワーク等での特性評価において、待ち行列理論が重要な役割を果たしている。しかし、待ち行列理論のみを用いたのであれば、CDMA 方式の特徴である緩やかな品質劣化を考慮することができない。そこで本研究では、チャネルに同時に送信されているパケットの振舞いを待ち行列理論を用いて明らかにし、これにビット誤り率解析を導入することでスループット解析を行った。このように、スループット解析は待ち行列理論とビット誤り率解析の両方が基盤となっている。ところで、スループットを拡散率で正規化した正規化スループット特性は、単位帯域あたりに送られる平均情報量と解釈することができ、一種のチャネルキャパシティを表す。同じような評価基準として第3.3節で述べた周波数利用効率がある。周



波数利用効率も単位帯域あたりに送られる最大情報量を表すが、ビットを基本としてチャネルキャパシティを求めており、パケット通信システムの評価基準として用いるにはあまり実用的でない。これに対し、正規化スループット特性はパケットを基本としている。つまり、スループット解析はCDMAパケット通信におけるチャネルキャパシティを導出したことになり、これはCDMAパケット通信の効率を示す上で非常に重要な役割を果たす。よって、本研究はCDMAパケット通信システムに関する研究の基礎を築くものであると言える。

また、本研究ではいくつかのアクセス制御方式を提案したが、これらはCDMA ALOHA方式の単純さを保ちつつ、高能率を図ることができる方式である。提案方式を実用化するためには本論文で検討した事項以外にもいくつか課題が残されており、より複雑な状況やシステム構成を想定することになる。しかし、現実的な状況においても本研究で提案したアクセス制御方式は基盤となり、その有用性は維持できる。

## 9.2 今後の展開

本研究においては扱うトラヒックの種類としてデータのみを想定してきた。しかし、今後はデータのみならず音声や画像などの複数メディアを一括して扱う無線マルチメディア通信が実現されるであろう。マルチメディア通信ではそれぞれのメディアにより要求されるサービス品質 (Quality of Service: QoS) が異なり、それぞれに適した方法で伝送することが必要となる。また、現在の携帯電話では音声は回線交換を用いており、パケット交換との共存を図ることが求められる。CDMAでは周波数や時間といった物理的な制約がないために、これらの共存に対して柔軟に対応できる。

また、有線系のネットワークでは、現在、ATMへの移行が進んでいる。このため、無線通信の分野でもATMをベースとしたシステムの検討を行う必要性が生じてくるだろう。ATMで送られる情報はヘッダも含め53バイトという短いパケットに分割される。これまで回線交換が用いられてきた音声等も今後はパケット化されて伝送されることになる。この場合、パケットの発生はデータの場合とことになってくる。このため、マルチメディア通信を実現するためには、QoSとともにそれぞれのメディア自体の性質も考慮しなければならない。

さらに、移動体通信における通信路の状態は変動するものであり、このことも考慮に入れた上でアクセス制御を行わなければならない。今後、それぞれのメディアおよび通信路に応じて適応的にアクセス制御を行うシステムを検討していく。この場合においても、本研究で用いた解析手法は有効であり、また、提案したアクセス制御方式は改良を加えることで適用可能になるだろう。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多大なるご指導とご鞭撻を賜りました名古屋大学大学院工学研究科教授 小川明先生に心より感謝致します。また、本論文を御査読下さり、御意見、御助言を頂きました名古屋大学情報メディア教育センター教授 板倉文忠先生に深く感謝致します。

本研究を遂行するにあたり懇切丁寧に御指導下さいました名古屋大学大学院工学研究科助教授 片山正昭先生に深く感謝致します。名古屋大学情報メディア教育センター助教授 山里敬也助先生には研究を行うにあたり数々の御指導、御助言を頂きましたことに心より感謝致します。さらに、鬼頭良彦技官、中西縁事務員をはじめ、本研究の遂行を支えて下さいました名古屋大学大学院工学研究科電子情報学専攻 小川研究室の諸氏に深く感謝致します。

最後に本研究を進めるにあたり、貴重な研究データを提供して頂いた日本電気株式会社 佐藤毅氏に心より感謝いたします。

# 付録

## A.1 待ち行列理論

無線通信に限らず、あるシステムを設計し構築する場合、そのシステムの性能を明かにする必要がある。システムのモデル化と性能評価はそのための道具となるものであり、性能評価を行うにあたって対象システムをモデル化して数学的に扱う。パケット通信においては、この数学的解析手法として待ち行列理論が考え出されてきた。これは、パケットを交換機のバッファに蓄積し、順番にパケットの配送処理を行う振舞を統計的に表し、確率論を応用することによって数学的に表した物である。

本研究ではこの待ち行列理論を用い、チャンネルに同時に送信されているパケットの数をマルコフの状態遷移で表し、これに同時送信局数の関数で表されるビット誤り率を導入することでパケットの成功確率を求め、特性解析を行っている。さらに、待時式 CDMA ALOHA 方式では、チャンネル部分だけでなく、各ユーザの振舞もマルコフモデルで表す解析手法を用いている。

そこで、ここでは本研究において非常に重要な役割を果たしている待ち行列理論について簡単に述べる。

### 待ち行列モデルの表記法

待ち行列モデルを表すのに、一般的に Kendall の記号  $A/B/C/D/E$  が用いられる。但し、 $A$  は到着時間分布、 $B$  はサービス時間分布、 $C$  は窓口の数、 $D$  は許される待ち行列の最大長 (サービス中の客を含む)、 $E$  は呼の発生源の数である。また、到着時間分布、サービス時間分布としてよく用いられる記号に、 $M$ : 指数分布、 $D$ : 一定 (固定)、 $G$ : 一般分布などがある。

例えば、到着時間分布およびサービス時間分布が指数分布、窓口が 1 つ、待ち行列長や呼の発生源の数が無限にあるとすると、このシステムは  $M/M/1/\infty/\infty$  と表される。ただし、この場合は  $M/M/1$  と書き直すことが多い。

## 確率過程

任意に選ばれた  $m$  個のパラメータ  $t_1 \leq t_2 \leq \cdots \leq t_m$  に対して、確率変数  $X(t)(t = t_1, t_2, \dots, t_m)$  が結合分布関数  $F(x_1, x_2, \dots, x_m)$  に従うとき、集合  $\{X(t)\}$  を確率過程とよぶ。  $t$  は通常時間のパラメータを表すことが多い。特に条件付分布関数に関して、

$$F(x_i | x_{i-1}, x_{i-2}, \dots, x_1) = F(x_i | x_{i-1}) \quad (\text{A.1})$$

が成立するとき、 $\{X(t)\}$  をマルコフ過程という。マルコフ過程では、任意の時刻  $t$  以後の変化が  $t$  における状態のみで決定され、 $t$  より前の経過には無関係になるという特性を有しており、この性質をマルコフ性とよぶ。マルコフ性は連続分布の場合は指数分布のみがこの性質を有しており、このため、マルコフ過程は指数分布と密接な関係がある。

また、状態遷移が隣り合う状態間だけで起こるとき、この確率過程を出生死滅過程という。以下において、出生死滅過程について述べる。

## 出生死滅過程

あるシステムの時刻  $t$  における状態パラメータ (例えば系内呼数) を  $N(t)$  とし、 $N(t) = k$  のとき、このシステムは時刻  $t$  に状態  $E_k$  にあるということにする。確率過程  $\{N(t)\}$  が出生死滅過程に従うとする。ある時刻  $t + \Delta t$  に状態  $E_k$  にあるとすると、時刻  $t$  から時刻  $(t + \Delta t)$  への状態の変化は以下の3つの場合に限定される。

1. 時刻  $t$  に状態  $E_k$  にあり、状態の変化が起こらなかった。
2. 時刻  $t$  に状態  $E_{k-1}$  にあり、 $(t, t + \Delta t)$  間に1つ出生した。
3. 時刻  $t$  に状態  $E_{k+1}$  にあり、 $(t, t + \Delta t)$  間に1つ死滅した。

これら3つの場合が図A.1に示される。この図より、状態方程式は以下のようになる。

$$P_k(t + \Delta t) = \begin{cases} P_k(t) \cdot \{1 - (\lambda_k + \mu_k)\Delta t\} \\ \quad + P_{k-1}\lambda_{k-1}\Delta t + P_{k+1}\mu_{k+1}\Delta t + o(\Delta t) & (k \geq 1) \\ P_0(t) \cdot (1 - \lambda_0\Delta t) + P_1\mu_1\Delta t + o(\Delta t) & (k = 0) \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

ただし、 $\lambda_k$  は状態  $E_k$  における生起率、 $\mu_k$  は状態  $E_k$  における終了率、 $P_k(t) \equiv P\{N(t) = k\}$ 、 $o(\Delta t)$  は高次の無限小で  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} o(\Delta t)/\Delta t = 0$  である。さらに、すべての  $t$  の値に対して、確率が保存されなければならないので、

$$\sum_{k=0}^{\infty} P_k(t) = 1 \quad (\text{A.3})$$

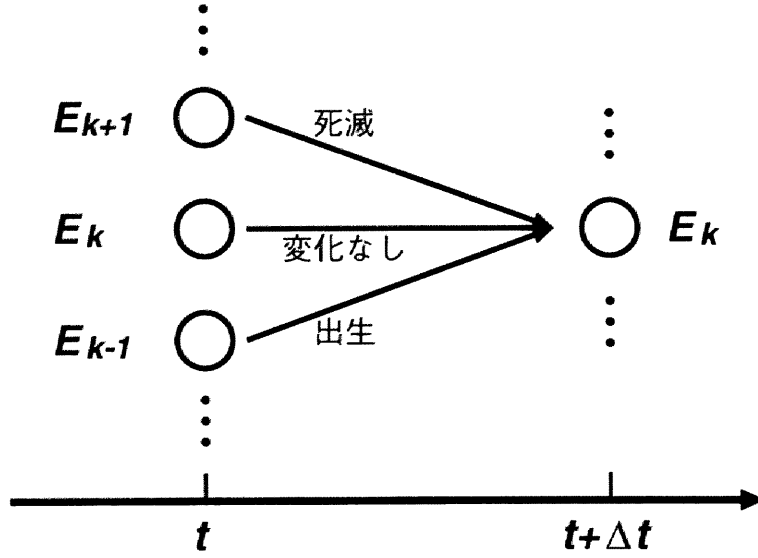


図 A.1: 状態  $E_k$  への可能な遷移

である.

ここで, 式A.2の両辺から  $P_k(t)$  を引き,  $\Delta t$  で割ると,

$$\frac{P_k(t + \Delta t) - P_k(t)}{\Delta t} = \begin{cases} -(\lambda_k + \mu_k)P_k(t) + \lambda_{k-1}P_{k-1} + \mu_{k+1}P_{k+1} + \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} & (k \geq 1) \\ -\lambda_0P_0(t) + \mu_1P_1 + \frac{o(\Delta t)}{\Delta t} & (k = 0) \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

となる.  $\Delta t$  が 0 に近づくときの極限をとると, 上式の左辺は  $t$  に関する  $P_k(t)$  の導関数の形をしており, また,  $o(\Delta t)/\Delta t$  の項は 0 に近づく. 結局, 次式が得られる.

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = \begin{cases} -(\lambda_k + \mu_k)P_k(t) + \lambda_{k-1}P_{k-1} + \mu_{k+1}P_{k+1} & (k \geq 1) \\ -\lambda_0P_0(t) + \mu_1P_1 & (k = 0) \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

次に出生死滅過程の統計的平衡状態における一般解を示す. これは, 初期状態から時間が十分経過した時点におけるシステムの状態であり,  $t \rightarrow \infty$  としたときの  $P_k(t)$  である. これは, 定常状態確率と呼ばれ, ここでは

$$P_k \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} P_k(t) \quad (\text{A.6})$$

とおくことにする. 平衡状態においては  $P_k(t)$  が時間と共に変化しないので,  $dP_k(t)/dt \rightarrow 0$  である. よって式 (A.5) より,

$$\lambda_{k-1}P_{k-1} + \mu_{k+1}P_{k+1} - (\lambda_k + \mu_k)P_k = 0 \quad (\text{A.7})$$

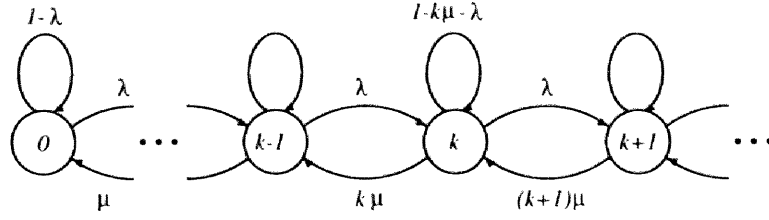


図 A.2: 待ち行列モデル  $M/M/\infty$  の状態遷移図

が得られる。ただし,  $P_{-1} = 0$  とする。この漸化式を解くと,

$$\lambda_{k-1} P_{k-1} = \mu_k P_k \quad (\text{A.8})$$

が得られる。これより,

$$P_k = \frac{\lambda_{k-1}}{\mu_k} P_{k-1} = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{k-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_k} P_0 \quad (\text{A.9})$$

となる。また, 正規化条件より,  $P_0$  が決まる。結局, 次式が得られる。

$$P_k = \begin{cases} \frac{1}{1 + \sum_{n=1}^{\infty} \prod_{m=0}^{n-1} \frac{\lambda_m}{\mu_{m+1}}} & (k = 0) \\ P_0 \prod_{m=0}^{k-1} \frac{\lambda_m}{\mu_{m+1}} & (k \geq 1) \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

### 待ち行列モデル $M/M/\infty$

出生死滅過程の例として待ち行列モデル  $M/M/\infty$  の定常状態確率を求める。この待ち行列モデルでは, 呼の発生間隔およびサービス時間が指数分布に従い, 窓口数が無限にある。このときの状態遷移図は図A.2のようになる。待ち行列モデル  $M/M/\infty$  では, 生起率および終了率はそれぞれ  $\lambda_k = \lambda$ ,  $\mu_k = k\mu$  となる。これを式 (A.10) に代入して, 定常状態確率は

$$P_k = \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!} e^{-\lambda/\mu} \quad (\text{A.11})$$

となる。

## A.2 記号一覧

| 記号          | パラメータ   |
|-------------|---|
| $\lambda$   | 生起率, [packet/s] または [packet/slot]   |
| $\mu$       | 終了率, [packet/s] または [packet/slot]   |
| $S$         | スループット, [packet/ $T_p$ ] または [packet/slot] または [erl]                        |
| $S_{max}$   | スループットの最大値  |
| $S_{opt}$   | スループットの上限   |
| $D$         | 遅延時間 [s/ $T_p$ ] または [slot]   |
| $G$         | オフアードロード, [packet/ $T_p$ ] または [packet/slot] または [erl]                      |
| $G_{max}$   | 最大スループットを得るオフアードロード   |
| $G_{sys}$   | 同時送信局数の平均値  |
| $Q_S$       | パケット成功確率  |
| $Q_R$       | 呼損率   |
| $Q_F$       | $Q_F = 1 - Q_S - Q_R$   |
| $P_b(m)$    | 同時送信局数が $m$ のときのビット誤り率  |
| $P_c(k)$    | 干渉パケット数が $k$ のとき, 1 ビット時間における成功確率,<br>$P_c(k) = 1 - P_b(k + 1)$             |
| $P_k$       | 定常状態確率  |
| $P_S(k, i)$ | 着目パケットにおいて, 1 ビット目から $i$ ビット目までパケット<br>の伝送に成功し, $i$ ビット目の干渉パケット数が $k$ である確率 |
| $\eta$      | 周波数利用効率 [bit/s/Hz]  |
| $N$         | 拡散率, 数値例では主に $N = 60$ を用いた  |
| $E_b$       | ビットエネルギー, 数値例では主に $E_b/N_0 = 10$ [dB] を用いた                                  |
| $N_0$       | 熱雑音の片側電力スペクトル密度   |
| $L$         | パケット長 [bit], 数値例では主に $L = 500$ [bits] を用いた                                  |
| $R$         | 伝送レート [bit/s]   |
| $K$         | ユーザ数  |
| $T_p$       | パケット長時間 [s] ( $T_p = L/R$ )   |
| $T_a$       | 処理遅延時間 [s]  |
| $T_e$       | 伝搬遅延時間 [s]  |
| $\tau_e$    | 正規化伝搬遅延時間 ( $\tau_e = T_e/T_p$ )  |
| $T_w$       | 再送間隔時間 [s]  |

| 記号          | パラメータ  |
|-------------|--|
| $T_D$       | アクセス制御遅延 [s]   |
| $\tau_D$    | 正規化アクセス制御遅延 ( $\tau_D = T_D/T_p$ )                         |
| $T_s$       | MCLSP におけるチャネル観測時間 [s]                                     |
| $\tau_s$    | 正規化チャネル観測時間 ( $\tau_s = T_s/T_p$ )                         |
| $T$         | 1 シンボル時間   |
| $T_c$       | 1 チップ時間  |
| $\Delta$    | 1 回パケットを再送するのに要する時間 [s]                                    |
| $\Delta_1$  | 1 回の送信拒否による遅延時間 [s]  |
| $\Delta_2$  | 1 回の伝送失敗による遅延時間 [s]  |
| $P_{tr}$    | MCLSP におけるパケットの送信確率  |
| $g$         | MCLSP におけるオフロードの推定値  |
| $f(L)$      | パケット長の確率密度関数   |
| $r$         | 状態 $r$ : 全てのユーザに対する再送モードのユーザの割合                            |
| $d(r)$      | 期待流動値  |
| $\pi(r)$    | 状態 $r$ の状態占有確率   |
| $\alpha$    | パケットの送信制御におけるスレッシュホールド                                     |
| $\lambda_o$ | ユーザあたりの新規パケットの生起率 [packet/s]                               |
| $\lambda_r$ | ユーザあたりの再送パケットの生起率 [packet/s]                               |
| $\Lambda_o$ | 全ユーザが新規モードと仮定したときの生起率 [packet/s], $\Lambda_o = K\lambda_o$ |
| $\Lambda_r$ | 全ユーザが再送モードと仮定したときの生起率 [packet/s], $\Lambda_r = K\lambda_r$ |
| $G_o$       | 全ユーザが新規モードと仮定したときのオフロード<br>[packet/ $T_p$ ]                |
| $G_r$       | 全ユーザが再送モードと仮定したときのオフロード<br>[packet/ $T_p$ ]                |
| $G_N$       | 新規パケットのオフロード,<br>[packet/ $T_p$ ] または [packet/slot]        |
| $\lambda_N$ | 新規パケットの生起率 [packet/s]                                      |
| $G_c$       | チャネルに送信されるパケットのオフロード [packet/ $T_p$ ]                      |
| $\lambda_c$ | チャネルに送信されるパケットの生起率 [packet/s]                              |
| $\mu_c$     | チャネルに送信されるパケットの終了率 [packet/s]                              |



| 記号  | パラメータ   |
|-----|---|
| $p$ | バッファに蓄えられたパケットの送信確率 [packet/slot] または送信レート [packet/s] |
| $B$ | バッファ数   |
| $Q$ | バッファに蓄えられている平均パケット数                                   |

## 業績一覧

( 丸印は本論文に関係のある文献・発表を表している)

### I. 学会誌等

| 論文題目  | 公表の方法及び時期   | 著者  |
|---|---|---|
| 1. Throughput Analysis of DS/SSMA Unslotted ALOHA with Fixed Packet Lengths                   | IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.14, No.4, pp.750-756, May 1996. | T. Sato,<br>H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa              |
| ② CDMA Unslotted ALOHA Systems with Packet Retransmission Control                             | IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E79-A, No.7, pp.1004-1010, July 1996.               | H. Okada,<br>T. Sato,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa              |
| 3. Effects of The Access Timing Delay on CDMA Unslotted ALOHA with Channle Load Sensing       | IEICE Trans. on Communications, Vol.E79-B, No.9, pp.1339-1345, Sep. 1996.             | T. Sato,<br>H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa              |
| ④ CDMA ALOHA Systems with Modified Channel Load Sensing Protocol for Satellite Communications | IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E79-A, No.12, pp.2035-2042, Dec. 1996.              | H. Okada,<br>M. Saito,<br>T. Sato,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa |

| 論文題目   | 公表の方法及び時期  | 著者  |
|--|--|---|
| 5. Throughput Improvement on CDMA Slotted ALOHA System                 | IEICE Trans. on Communications, Vol.E80-B, No.1, pp.74-80, Jan. 1997.    | M. Saito,<br>H. Okada,<br>T. Sato,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa |
| ⑥ CDMA Slotted ALOHA System with Finite Buffers                        | IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E81-A, No.7, pp.1473-1478, July 1998.  | H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa                          |
| ⑦ 有限ユーザ CDMA Unslotted ALOHA 方式のスループット解析法に関する一検討                       | 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-A, No.7, pp.1089-1092, 1998 年 7 月.                  | 岡田 啓,<br>山里 敬也,<br>片山 正昭,<br>小川 明   |
| ⑧ Queuing Analysis of CDMA Unslotted ALOHA Systems with Finite Buffers | IEICE Trans. on Fundamentals, Vol.E81-A, No.10, pp.2083-2091, Oct. 1998. | H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa                          |

・ IEICE: 電子情報通信学会, IEEE: 米国電気電子学会

## II. 国際会議

| 論文題目   | 公表の方法及び時期   | 著者  |
|--|---|---|
| 1. Throughput and Delay Analysis of DS/SSMA Unslotted Aloha by Non-Perfect Capture | IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC'95), Tokyo, Japan, C8.3, pp.738-742, Nov. 1995. | T.Yamazato,<br>T. Sato,<br>H. Okada,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa                |
| 2. Throughput Analysis of DS/SSMA Unslotted Aloha with Channel Load Sensing        | IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'95), Singapore, 43.5, pp.1492-1496, Nov. 1995.                        | T. Sato,<br>H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa                |
| 3. Performance Analysis of CDMA ALOHA  | IEEE International Symposium on Communications (ISCOM'95), Taipei, ROC, ThD1, pp.434-441, Dec. 1995.                      | T.Yamazato,<br>T. Sato,<br>H. Okada,<br>K. Nishida,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa |
| ④ A Novel Access Control Method for CDMA Unslotted ALOHA Systems                   | International Workshop on Multi-Dimensional Mobile Communications (MDMC'96), Seoul, Korea, A-IV.3, pp.391-395, July 1996. | H. Okada,<br>T. Sato,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa                |

| 論文題目  | 公表の方法及び時期  | 著者  |
|---|--|---|
| 5. Throughput of CDMA Unslotted-ALOHA System in Cellular Environment  | Japan-Canada International Workshop on Multimedia Wireless Communications and Computing (WMWCC'96), pp.23-24, Sep. 1996.               | A.Ogawa,<br>T.Yamazato,<br>K. Nishida,<br>H. Okada,<br>T. Sato,<br>M.Katayama |
| 6. Performance Degradation due to the Access Timing Delay on CDMA Unslotted ALOHA with Channel Load Sensing | IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC'96), Massachusetts, U.S.A., 3A4, pp.111-114, Sep. 1996.      | T. Sato,<br>H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa                |
| 7. Throughput Improvement on CDMA Slotted ALOHA System by Modified Channel Load Sensing Protocol            | IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'96), Taipei, ROC, C1.5, pp.103-107, Oct. 1996. | M. Saito,<br>H. Okada,<br>T. Sato,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa   |
| ⑧ Performance Evaluation of CDMA ALOHA Systems with Modified Channel Load Sensing Protocol                  | IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'96), London, U.K., 32.3, pp.1291-1295. Nov. 1996.                                  | H. Okada,<br>M. Saito,<br>T. Sato,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa   |

| 論文題目   | 公表の方法及び時期   | 著者   |
|--|---|--|
| ⑨ Queueing Analysis of CDMA Slotted ALOHA Systems with Finite Buffer and Finite Population Assumptions | IEEE International Conference on Communications (ICC'98), Atlanta, U.S.A., S12.3, pp.407-411, June 1998.                                      | H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa |
| 10. Access Control Techniques for CDMA ALOHA   | IEEE Fifth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA'98), Sun City, South Africa, pp.293-297, Sep. 1998. | T.Yamazato,<br>H. Okada,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa |
| ⑩ CDMA Unslotted ALOHA Systems with Finite Buffers   | IEEE International Conference on Universal Personal Communications (ICUPC'98), Florence, Italy, pp.1143-1147, Oct. 1998.                      | H. Okada,<br>T.Yamazato,<br>M.Katayama,<br>A.Ogawa |

### III. その他

| 論文題目  | 公表の方法及び時期  | 著者   |
|---|--|--|
| (電子情報通信学会研究会)   |  |  |
| ① 再送を考慮した Spread Unslotted Aloha 方式の特性解析                      | 電子情報通信学会スペクトル拡散研究会技術研究報告 SST95-4, pp.19-24, 1995 年 5 月.    | 岡田 啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明         |
| 2. チャネルロードセンシングプロトコルを用いたスプレッドアロハ方式に対するアクセス制御遅延の影響             | 電子情報通信学会スペクトル拡散研究会技術研究報告 SST95-47, pp.7-12, 1995 年 9 月.    | 佐藤毅,<br>岡田 啓,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明         |
| ③ Spread Unslotted ALOHA 方式における新アクセス制御方法                      | 電子情報通信学会スペクトル拡散研究会技術研究報告 SST95-127, pp.67-72, 1995 年 12 月. | 岡田 啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明         |
| 4. 修正チャネルロードセンシングプロトコルを用いた Spread Unslotted ALOHA 方式のスループット特性 | 電子情報通信学会衛星通信研究会技術研究報告 SAT95-83, pp.67-72, 1995 年 12 月.     | 斎藤将人,<br>岡田啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明 |

| 論文題目  | 公表の方法及び時期  | 著者   |
|---|--|--|
| ⑤ 固定長パケット CDMA Unslotted ALOHA 方式の近似法に関する一検討  | 電子情報通信学会スペクトル拡散研究会技術研究報告 SST96-61, pp.13-18, 1996 年 12 月.        | 岡田啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明                            |
| (情報理論とその応用シンポジウム)   |  |  |
| ⑥ 各ユーザが有限バッファを持つ CDMA ALOHA 方式の特性解析   | 第 20 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA'97), 4.3.6, pp.409-412, 1997 年 12 月. | 岡田啓,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明                                    |
| 7. An Integrated Voice and Multi-Code CDMA Data System for CDMA Slotted-ALOHA with Modified Channel Load Sensing Protocol | 第 21 回情報理論とその応用シンポジウム (SITA'98), 22.2, pp.523-526, 1998 年 12 月.  | A. Sandouk<br>H. Okada<br>T. Yamazato<br>M. Katayama<br>A. Ogawa |
| (電子情報通信学会全国大会)  |  |  |
| ⑧ Spread Unslotted Aloha 方式のスループット及び遅延特性  | 1995 年電子情報通信学会総合大会, A-233, pp.233, 1995 年 3 月.                   | 岡田啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明                            |
| 9. フェージング環境下での Spread Unslotted Aloha 方式のスループット特性   | 1995 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, SB-4-2, pp.364-365, 1995 年 9 月.          | 山里敬也,<br>佐藤毅,<br>岡田啓,<br>片山正昭,<br>小川明                            |



| 論文題目   | 公表の方法及び時期   | 著者   |
|--|---|--|
| 10. 誤り訂正符号を用いた CDMA unslotted ALOHA 方式のスループット特性                              | 1996 年電子情報通信学会総合大会, SA-5-3, pp.470-471, 1996 年 3 月. | 山里敬也,<br>西田邦生,<br>佐藤毅,<br>岡田啓,<br>片山正昭,<br>小川明 |
| 11. 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, SA-5-4, pp.472, 1996 年 3 月.     | 西田邦生,<br>岡田啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明 |
| ② Optimal Access Control Protocol を用いた CDMA Unslotted ALOHA 方式のアクセス制御遅延による影響 | 1997 年電子情報通信学会総合大会, B-5-39, pp.426, 1997 年 3 月.     | 岡田啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明          |
| ③ ユーザー数有限, 固定長パケットにおける CDMA Unslotted ALOHA 方式の特性解析                          | 1997 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-5-11, pp.112, 1997 年 9 月. | 岡田啓,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明                  |
| (電気関係学会東海支部連合大会)   |   |  |
| ④ Spread Unslotted Aloha 方式のスループット特性   | 1994 年電気関係学会東海支部連合大会, 516, pp.258, 1994 年 10 月.     | 岡田啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明          |

| 論文題目                        | 公表の方法及び時期                                      | 著者  |
|-----------------------------|--|---|
| 15. ALOHA 方式と拡散 ALOHA 方式の比較 | 1995 年電気関係学会東海支部連合大会, 537, pp.269, 1995 年 9 月. | 西田 邦生,<br>岡田啓,<br>佐藤毅,<br>山里敬也,<br>片山正昭,<br>小川明 |

#### IV. 受賞歴

1. 電子情報通信学会東海支部学生会：平成7年度 学生研究奨励賞.
2. 電気・電子情報学術振興財団：平成8年度 猪瀬学術奨励賞.
3. 日本学術振興会：平成9年度 特別研究員 (DC).
4. 電子情報通信学会：平成9年度 学術奨励賞.