

決定的木型アルゴリズムを用いた 予約送信方式

河野浩之, 西尾章治郎, 長谷川利治
京都大学工学部数理工学科

ランダム多重アクセス方式における通信プロトコルとして, 近年提案された木型アルゴリズムは安定したスループット特性を示すものとして注目され, 幅広い研究が行われている. また, スループット特性を改善するために予約機構を取り入れた木型アルゴリズムもいくつか提案されている. 本稿では, 各端末のアドレスに基づいた決定的木型アルゴリズムを再送アルゴリズムとして用いた予約機構付きTREE-DTA方式を新たに提案し, その性能を評価する近似解析式を求める. さらに, 端末数, トラヒック量, 一つのメッセージを構成するパケット数などを主要なパラメータとするシミュレーション実験により, 予約機構付きTREE-DTA方式の性能を評価する. さらに, システムエラーに対する強靱性についても論ずる.

TREE ALGORITHMS WITH MESSAGE RESERVATION IN RANDOM MULTIPLE-ACCESS COMMUNICATIONS

Hiroyuki KAWANO, Shojiro NISHIO, and Toshiharu HASEGAWA

Department of Applied Mathematics and Physics
Faculty of Engineering, Kyoto University
Kyoto, 606 Japan

In random multiple-access communication systems, it has been shown that tree type collision resolution algorithms excel in the channel stability. Recently, several tree type algorithms employing reservation mechanisms have been proposed for achieving higher channel throughput. In this paper, extending the algorithm of Tsybakov and Berkovskii, a new tree type algorithm with message reservation function is proposed. This algorithm is based on the Q-ary (address-based) deterministic tree algorithm. The throughput-delay performance of the proposed scheme will be approximately analyzed under finite population model, and the superiority of our algorithm will be shown under the simulation experiments. The robustness against system error will be also discussed.

1. はじめに

ランダム多重アクセス通信システムにおける通信回線の有効利用に関しては、集中処理制御を行わない従来のALOHAタイプの通信プロトコルを用いた場合、送信局数が多く回線の負荷が一時的に急激に増大したときなどに、回線の状態が必ずしも安定しないという問題点が指摘されてきた⁽⁴⁾。一方、近年、米国のCapetanakis^{(1),(2)}とソ連のTsybakov, Mikhailov⁽³⁾により独立に提案された木型アルゴリズム(tree type algorithm)を用いた通信プロトコルは、安定したスループット特性を示すものとして注目され、衝突解消区間の解析やスループットを向上するための改良など、幅広い研究が多くの研究者によって行われてきた⁽⁴⁾。木型アルゴリズムの特徴は、衝突を解消していく過程において、衝突が起こるたびに同時に再送を試みる端末の集合を細分化する点にあり、この特徴が回線の安定性を保証する要因である。

ところで、木型アルゴリズムに対して予約機構を用いるアイデアとしては、Capetanakis⁽²⁾の予約専用のチャンネルを用いる方式、Tsybakovら⁽⁷⁾の送信成功パケットを利用して将来の送信スロットを予約する方式、Oieら⁽⁵⁾のミニスロットを導入した予約方式などがあるが、これら何れの方式も回線の有効利用率を改善するために予約機構が導入された。本稿では、音声パケット通信システムなどへの適用も考え、各端末からの連続したパケットの送信間隔(つまり、応答時間)が固定割当なしで可能な限り均一になり、しかも、安定した回線状態を提供するランダム多重アクセス方式を実現するために、Tybakovらの方式を発展させた木型予約アルゴリズムを新たに提案し、解析とシミュレーション実験によりその方式の性能特性を評価する。特に、過去の解析は、無限端末で構成されるシステムを対象としたり、たとえ有限局のシステムを扱った場合でもバッファ容量が1パケット分であり、現実的な通信システムに見られる連続的なパケットの到着や到着率の偏りを想定したものではなかった。そこで本稿では、これらの非現実性をできるだけ緩和する解析モデルを仮定したうえで、自端末からの送信成功パケットを通じて将来の送信パケット用のスロットを予約するという方式が、どの程度優れた性能特性を木型アルゴリズムに付与できるかについて考察する。

なお本稿では、回線へのアクセス方法の特徴に

より二つのタイプに分類される木型アルゴリズムのうち、パケットの送信に際し一旦衝突が起これば、その衝突を起こしたパケットすべての伝送が成功するまで、新しく到着したパケットの伝送を禁止するブロックアクセス方式⁽²⁾を用いる。それは、もう一方のフリーアクセス方式⁽³⁾に比べ、アルゴリズムの制御が容易であり、また、フレームに相当する区間を容易に構成できるからである。

以下では、まず、ブロックアクセス方式の木型アルゴリズムに対して予約機構を付加した送信プロトコルである予約機構付きTREE-DTA方式を提案する。次に、予約機構付きTREE-DTA方式のスループット対平均伝送遅延時間の近似評価式を求める。さらに、予約機構付きTREE-DTA方式の性能特性をシミュレーション実験により評価する。これらの性能評価の結果、木型アルゴリズムに本稿で提案したような簡単な予約機構を付加することにより、分散処理制御環境下で実行されるにも拘わらず、高スループット、安定なシステム性能、優れた応答性などの好ましい特性を兼ね備えた送信プロトコルが構築できる可能性があることが明らかにされた。なお、本稿では、予約機構付きTREE-DTA方式のシステムエラーに対する強靱性(robustness)についても論ずる。

2. 予約機構付きTREE-DTA方式

まず最初に、パケット長が一定であり、しかも回線時間が1パケットを送信するのに要する時間でスロット化されているシステムにおいて、各局に付与されている二進のアドレスを衝突解消過程で用いる決定的木型アルゴリズム(この方式は、DTA(Deterministic Tree Algorithm)と呼ばれる)の一種である二進左優先線形探索木型アルゴリズム⁽¹⁾、つまり、木の左側で深さの大きい節点から探索するアルゴリズムについて説明する(図1に示した木型アルゴリズムの衝突解消区間の回線状態に対応する通信回線の状態を図2に示す)。なお、説明に使用する各端末A, B, Cのアドレスは、それぞれ、001, 101, 011で与えられているものとする。まず、スロット1において、端末A, B, Cから発せられたパケットが衝突したとき、スロット1における衝突を解消する端末A, B, Cは、アドレスの最低位である一桁目の値を各局が独立に用い、値0を用いた端末が、次のスロット2で伝送する。もし、スロット2が空スロット

または成功スロットの場合は、値1を用いた端末がスロット3で伝送する。スロット2が再度衝突スロットの場合は、値1を用いた端末は、スロット2で再送したすべての局が送信に成功するまで送信を控える。図1では、A, B, Cすべてが1の値を用いたためスロット2が空となり、スロット3で再度端末A, B, Cからのパケットが衝突する。そこで、新たにA, B, Cが第二桁目の値を用いて、A, Bが0, Cが1を用いたことにより、スロット4では、A, Bからのパケットの衝突が起きる。再びA, Bは第三桁目の値を用いて、Aが0, Bが1となり、スロット5でAが送信に成功し、スロット6で、Bが送信に成功する。最後に、スロット3の衝突後1の値を用いたため送信を控えていたCが、スロット7で送信し、スロット1で起きた衝突が解消する。

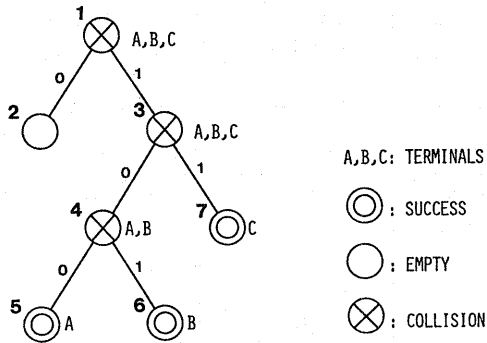


図1. 二進左優先線形探索木型アルゴリズム

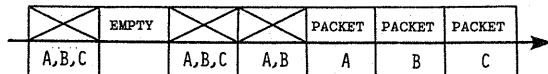


図2. 図1に対応する回線状態

次に、予約機構付きTREE-DTA方式について述べる。予約機構付きTREE-DTA方式では、次に示す二つのサブセッションから一つのセッションが構成されている。第一のサブセッションは、既に前のセッションで予約されているパケットの送信を行う区間であり、これを予約送信サブセッションと呼ぶ。第二のサブセッションは、新しく送信すべきメッセージを持った端末が回線にアクセスする区間であり、これを衝突解消サブセッションと呼ぶ。まず、予約送信サブセッションでは、衝突解消サブセッションおよび予約送信サブセッションで既に送信予約をしているメッセージの残りのパケットの送信を決められたパケット数のみ送信す

ることが許される(つまり、Limited方式で送信される)。この時、送信しきれなかったパケットは先にその局の送信したパケットに予約信号を付加することによってさらに予約され、次のセッションの予約送信サブセッションで送信されることになる。次に、衝突解消サブセッションでは各端末に到着している複数のパケットで構成されているメッセージのうち第一パケットの送信を、決定的木型アルゴリズムによって行う。その際、その局にメッセージを構成する残りのパケットがあれば、第一パケットの送信成功時に予約信号を付加しておく。以上の予約機構付きTREE-DTA方式による回線の状態を図3に示す。

従来提案されている木型アルゴリズムを用いた通信プロトコルは、単一のパケットや、複数のパケットからなるマルチパケットによる単一のメッセージを対象としているのに対し、上記で提案した予約機構付きTREE-DTA方式は、送信に成功パケットからの情報を利用して、連続的に到着するメッセージにより構成されるスーパーメッセージの送信を安定して行うことを目的とするプロトコルである。つまり、図3の端末Aへのメッセージを構成するパケットの到着過程は図4のようにみならずことも出来る。一般的にこのような到着過程を解析的に論じることは非常に難しい。特に、局数が多いときに、木型アルゴリズムが有効に機能することを考えると一層困難な問題となる。

3. 予約機構付きTREE-DTA方式の性能の近似解析

予約機構付きTREE-DTA方式のスループット対平均伝送遅延特性の性能解析のために次のようなモデルを仮定する。

- (1) システムには Q^m ($Q \geq 2, m \geq 1$) 局の端末よりなるものとする。すなわち、 Q 進数をアドレスとして用いる決定的木型アルゴリズムにおいては深さ m の対称な Q 進木グラフを構成する。以後、 Q^m を N で表す。
- (2) 時間軸はスロット化されており、1スロットは1パケット伝送時間に等しく、すべての端末はスロットの始まりでパケットを送信するものとする。
- (3) パケット同士の衝突を除いて伝送エラーは無いものとする。さらに、伝播遅延時間は考えないものとする。
- (4) 各端末に到着する各メッセージは、パラメータ p の幾何分布に従う個数のパケットからな

るものとする。

- (5) すべての端末では、メッセージの到着は平均入の独立なポアソン過程に従う。
- (6) 各端末はメッセージバッファをもち、その容量は、1メッセージを構成するバケットを蓄えるのに十分であるとする。また、新しく端末に到着したメッセージは、まずメッセージバッファに入り、送信アルゴリズムに従いながらメッセージを構成するバケットの送信を行う。端末がそのメッセージの最後のバケットの送信を行うセッションになるまでに到着した新たなメッセージは、バッファに入れず棄却されるものとする。現実のシステムでは、到着したメッセージが可能な限りバッファに蓄積され棄却されることが無いように設計される。本稿でのバッファに関する仮定は、木型アルゴリズムの特性が活かされる限りにおける解析の容易さに基づいている。すなわち、変則的なバッファシステムの導入により、

各端末に到着しているメッセージのうち1バケットは次の衝突解消区間で送られる権利があるようにしている。

3.1 平均セッション長の近似解析

あるセッションにおいて、予約送信サブセッションで送信するバケット数が r 個、衝突解消サブセッションの第一スロットで発生した衝突の重複度が k であるとする。すなわち、このセッションの前のセッションでの予約バケット数が r 個、さらに前のセッションにおいて新しく到着し、この区間における衝突解消サブセッションで送信するバケット数が k 個の場合を考える。このとき、そのセッションが終了するために必要な時間の一次モーメントを $t(r, k, m, Q)$ で表す。

ところで、 r 個の予約バケットを送信するのに必要なスロット数は、明らかに r スロットである。すなわち、既に求められている衝突解消サブセッションの平均解消時間 $t_{DTA}(k, m, Q)$ を用いること

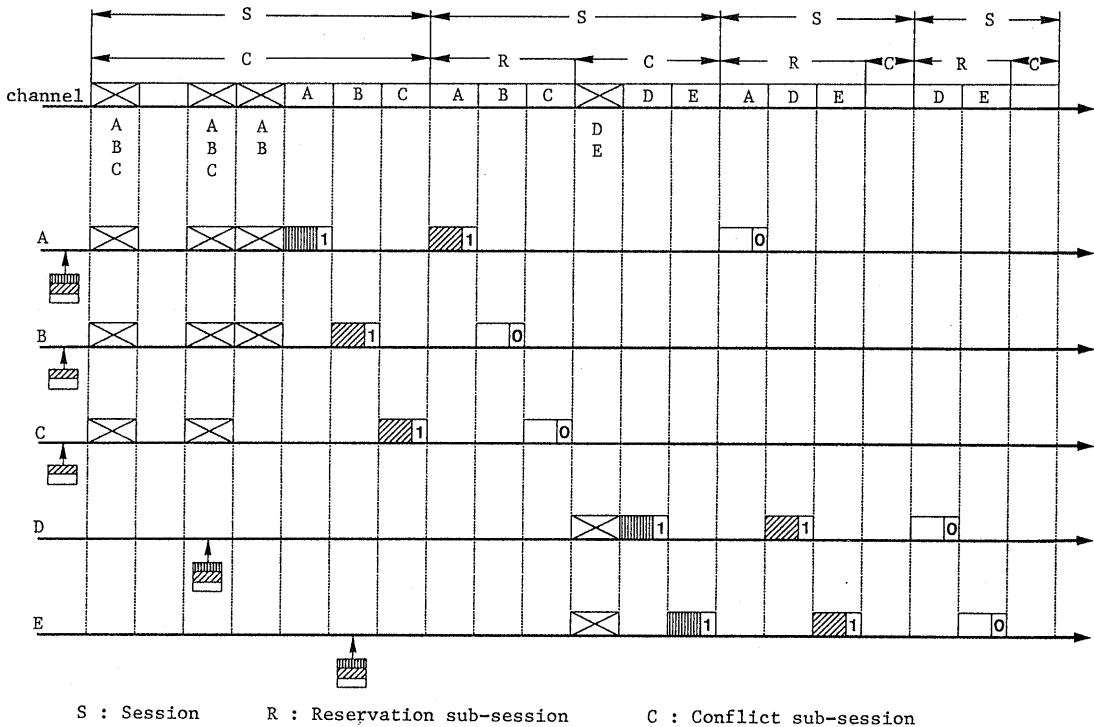


図3. 予約機構付きTREE-DTA方式の回線状態

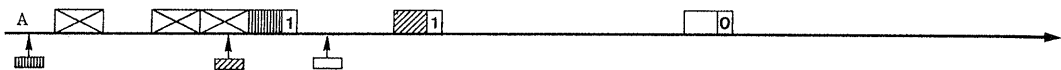


図4. バケットの到着過程

によって、 $t(r, k, m, Q)$ は、次のように表される。
ただし、 $t_{DTA}(k, m, Q)$ は、最初の衝突が起こったス
ロットは数えないものとする。なお、伝送が成功
した場合の多重度を1、伝送が行われていない場
合の多重度は0とする。

$$t(r, k, m, Q) = r + \{1 + t_{DTA}(k, m, Q)\} \quad (1)$$

$$t_{DTA}(k, m, Q) = \frac{\sum_{\sigma} \left\{ \prod_{i=1}^Q \binom{N/Q}{n_i} \right\} (Q + \sum_{j=1}^Q t_{DTA}(k, m, Q))}{\binom{N}{k}}$$

$$t_{DTA}(0, m, Q) = t_{DTA}(1, m, Q) = 0 \quad (m \geq 1)$$

$$t_{DTA}(j, 1, Q) = 0 \quad (2 \leq j \leq Q)$$

ここで、 \sum_{σ} は、

$$n_1 + n_2 + \dots + n_Q = k, 0 \leq n_i \leq k \quad (1 \leq i \leq Q)$$

を満たす全ての組 (n_1, n_2, \dots, n_Q) に関する和を表す。

以上の $t_{DTA}(k, m, Q)$ の議論では、決定的木型ア
ルゴリズムによる単一の衝突解消時間の特徴に注
目し厳密に議論しているため局数が多い場合、計
算が困難な再帰式となる。しかし、端末数が無限
大のとき決定的木型アルゴリズムの挙動が、確率
的木型アルゴリズムの挙動に一致する⁽⁶⁾ こと
を用いれば、計算が容易になる。

3.2 スループットの近似解析

システムが上記六つの仮定に従い、定常状態
であるとする。あるセッションが終了した地点を隠
れマルコフ点であると考え、その時点で新たな送
信待のバケット数により隠れマルコフ連鎖を定義
する。

ここで、第 i 番目の予約サブセッションで送
信を行うバケット数を r 、衝突サブセッションで送
信を行うバケット数を k 、その時の衝突解消時間
が L (スロット) である確率 $P(L, r, k, m, Q)$ を求
める。その時、 $1 + t_{DTA}(k, m, Q)$ が L' と等しくなる確率
 $P(L', k, m, Q)$ を用いて評価する。なお、 $P(L', k, m, Q)$
は既に文献(6)で求められており、次のように与
えられる。

$$P(L', k, m, Q) =$$

$$\frac{\sum_{\sigma} \left[\prod_{i=1}^Q \binom{N/Q}{n_i} \right] \left\{ Q + \sum_{j=1}^Q P(L'_j, n_i, m-1, Q) \right\}}{\binom{N}{k}}$$

$$P(1, 0, m, Q) = 1.0 \quad (m \geq 1)$$

$$P(1, 1, m, Q) = 1.0 \quad (m \geq 1)$$

$$P(Q+1, k, 1, Q) = 1.0 \quad (k \geq 2)$$

$$P(L', k, m, Q) = 0.0 \quad (L' > Q^{m+1} - 1, L' \leq 0)$$

ここで、 ρ は、

$$L'_1 + L'_2 + \dots + L'_Q = L' - 1 \text{ と } 1 \leq L'_j \leq L' - Q$$

を満たす全ての組 $(L'_1, L'_2, \dots, L'_Q)$ に関する和を表す。

よって、

$$P(L, r, k, m, Q) = P(L-r, k, m, Q) \\ = P(L', k, m, Q)$$

$P(L, r, k, m, Q)$ を上式のように評価するために、(1)
式の関係を用いた。

次に、二つの連続するセッションに関する遷移
確率を求める。第 i 番目のセッションが予約送信サ
ブセッションにおいて送信する予約バケット r 個
と衝突解消サブセッションにおいて送信する k 個
のメッセージの第一バケットから構成されている
とき、次の第 $(i+1)$ 番目の各々のサブセッションで
 r' 個の予約バケットと k' 個の新しいメッセージの
第一バケットが送信される確率 $P((r', k'), (r, k))$
は次のように求められる。

まず、第 i 番目のセッションで送信するバケッ
トがそのセッションで送信が完了せず、次のセッ
ションでの送信を予約する確率 $PR(r', r, k)$ は、次
のように求まる。

$$PR(r', r, k) = \binom{r+k}{r} (1-P)^r P^{r+k-r'}$$

さらに、第 i 番目のセッションの進行中に新しく
端末にメッセージが到着する確率 $PC(k', L, r, k)$ は、
次のように、求められる。

$$PC(k', L, r, k) =$$

$$\binom{N-r'}{k'} (1 - \exp(-\lambda L/N))^{k'} \cdot \exp(-\lambda L/N)^{N-r'-k'}$$

以上より、 $P((r', k'), (r, k))$ は、次のように与
えられる。

$$P((r', k'), (r, k)) =$$

$$\sum_{L=1}^{LMAX} PR(r', r, k) \cdot PC(k', L, r, k) \cdot P(L, r, k, m, Q)$$

このとき、 $LMAX$ は $(Q^{m+1} - 1) / (Q - 1) + Q^m$ である。なお、
この $LMAX$ が決定的木型アルゴリズムを用いた際の
衝突解消サブセッションの最長時間となる。

遷移確率 $P((r', k'), (r, k))$ の極限確率 $P(r, k)$ は、
あるセッションの予約送信サブセッションに r 個
のバケットが、衝突解消サブセッションに k 個の
バケットが含まれる確率となる。

$$\bar{P} \triangleq (P(0,0), P(1,0), \dots, P(N,0), \dots, P(0,i), P(1,i), \dots, P(N-i,i), \dots, P(0,N))$$

および

$$\bar{W} \triangleq \{P((r',k'), (r,k)) | r=0,1,\dots,N, k=0,1,\dots,N, N \geq r+k \geq 0, r'=0,1,\dots,N, k'=0,1,\dots,N, N \geq r'+k' \geq 0\}$$

とすると、

$$\bar{W}\bar{P} = \bar{P}$$

を解いて、 $P(r,k)$ が求まる。以上より、この予約機構付きTREE-DTA方式のスループット S を次のように求めることができる。

$$S = \frac{\sum_{r,k} (r+k)P(r,k)}{\sum_{r,k} [P(r,k) \cdot t(r,k,m,Q)]}$$

3.3 平均伝送遅延時間特性の近似解析

平均伝送遅延時間 D を図5で示した区間と考え、 D を D_1 および D_2 の二種の区間に分けて考えることにする。 D_1 、 D_2 は以下のように与えられる。

$$D_1 = \frac{\sum_{r',k',r,k} (r'+k')P(r,k)P((r',k'), (r,k)) \cdot \sum_{L=1}^{LMAX} d_1(L)P(L,r,k,m,Q)}{\sum_{r',k',r,k} (r'+k')P(r,k)P((r',k'), (r,k))} \quad (2)$$

$$d_1(L) = \frac{L}{1 - \exp(-\lambda L/N)} - \frac{1}{\lambda/N}$$

ただし、 $\sum_{r,k,r',k'}$ は、 $0 \leq r+k \leq N, 0 \leq r' \leq r+k, 0 \leq k' \leq N-r'$ を満たす、 r,k,r',k' で和を取ること示す。

$$D_2 = \frac{\sum_{r',k'} [r'P(r',k') + k'P(r',k')]d_{2c}(r',k')]}{\sum_{r',k'} (r'+k')P(r',k')}$$

$$d_{2c}(r',k') = r' + d_2(k',m,Q) \quad (3)$$

$$d_2(k',m,Q) = \left[\sum_{\sigma=1}^Q \sum_{i=1}^{\binom{N/Q}{\sigma}} \left\{ \sum_{j=1}^{j-1} [1 + d_2(n_j, m-1, Q)] n_j + \sum_{j=2}^Q \left\{ \sum_{j=1}^{j-1} [1 + t(n_j, m-1, Q)] + \{1 + d_2(n, m-1, Q)\} n \right\} / k \right\} / \binom{N}{k} \right]$$

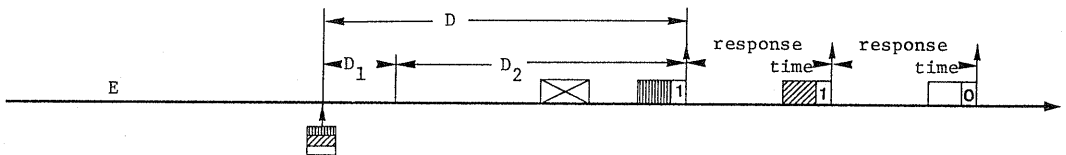


図5. 遅延時間の定義

$$d_2(0,m,Q) = 0$$

$$d_2(1,m,Q) = 0$$

(2),(3)式より平均伝送遅延時間 D が求まる。

$$D = D_1 + D_2$$

4. シミュレーション実験による性能評価

予約機構付きTREE-DTA方式の性能を調べるため、シミュレーション実験を行った。

4.1 シミュレーション実験モデル

本稿では、以下の条件を満たすシミュレーション実験モデルを構築した。

- (1) システムの端末は、対称な2進木を構成する 2^m ($m=3,4,5,6$) 局の端末よりなるものとする。さらに、各端末にはTREE-DTA方式を実行するのに必要なアドレスが与えられているものとする。
- (2) 時間軸はスロット化されており、1スロットは1パケット伝送時間に等しく、すべての端末はスロットの始まりでパケットを送信するものとする。
- (3) 各端末に到着する各メッセージは、パラメータ p の幾何分布に従う個数のパケットからなるものとする。 ($1/p=2,3,\dots,10$)
- (4) すべての端末では、メッセージの到着は平均 λ (メッセージ/スロット) の独立なポアソン過程に従う。
- (5) 各端末はメッセージバッファをもち、その機構は解析の仮定と同様であるとし、送信できないメッセージは棄却されるものとする。

なお、シミュレーション実験では、メッセージが到着してからそのメッセージの第一パケットが送信されるまでの平均遅延時間、第一パケット送信後の残りのパケットが送信される際の応答時間 (response time) の平均および応答時間の変動係数を求めた。その際、40000個のパケットの伝送が成功するまで計算機シミュレーションを行い、そのうち、定常状態を示していると思われる区間より1000パケットを単位とし31個の標本をとり、合計31000個のパケットを利用してデータ値を求めた。

4.2 性能評価

シミュレーション実験で得られた平均伝送遅延時間の特性に関する結果を図6に、各メッセージの平均応答時間を図7に、各バケットの応答時間の変動係数に関する結果を図8に、さらに幾何分布のパラメータ p とスループット特性に関する結果を図9に示した。以上の結果より、分散制御環境下にも関わらず、予約機構付きTREE-DTA方式が優れた送信プロトコルを実現していることが明らかになり、特に、本稿で問題にした応答時間に関しても良い特性が得られることが分かる。

また、シミュレーション結果を用いて、局数とスループット対平均遅延特性の関係を考えると、図6に示されたように局数が多くなるほどスループット対平均遅延特性を劣化させることが観察される。

さらに、高負荷時でもALOHA方式に顕著な双安定性(bistability)⁽⁴⁾が見られず、予約機構付きTREE-DTA方式が安定した回線状態を提供するプロトコルであることがわかる。

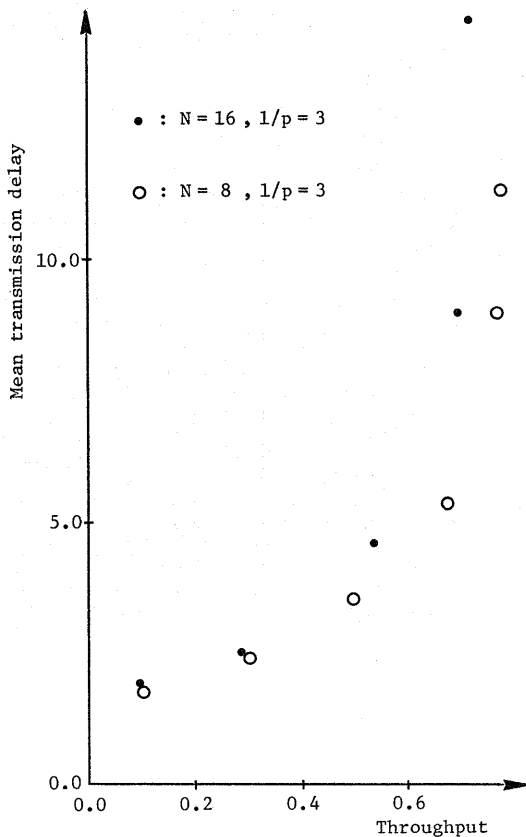


図6. スループット対平均伝送遅延時間特性

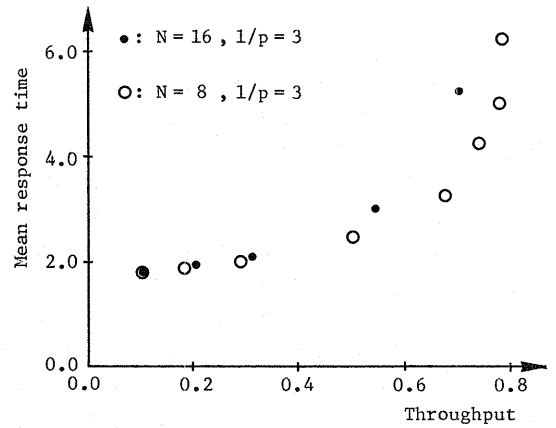


図7. スループット対平均応答時間特性

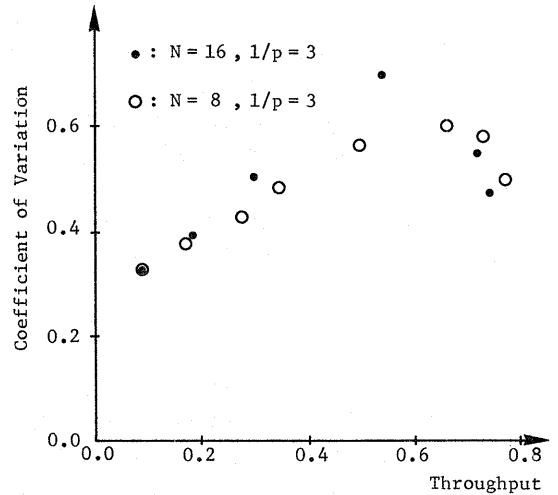


図8. スループット対応答時間の変動係数

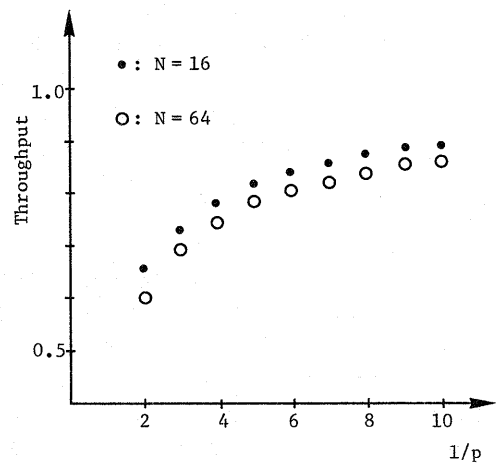


図9. パラメータ p 対スループット特性

5. プロトコルの強靱性

本稿で提案したプロトコルは、決定的木型アルゴリズムによるブロックアクセス方式を用いており、ブロックアクセス方式であることが、予約機構を簡単に実現できる要因であった。しかし、ブロックアクセス方式は、アルゴリズムの実行中に回線状態の検出のエラーなどが発生した場合に、継続実行に関して問題が生じる危険性が指摘されており、そのため、フリーアクセス方式の木型アルゴリズムが多く提案されている⁽³⁾。すなわち、予約機構付きTREE-DTA方式においても、システムエラーに対するプロトコルの強靱性を保証する必要がある。以下に、予約機構付きTREE-DTA方式において強靱性を備える方法について示す。

既に、決定的木型アルゴリズムでは、衝突解消区間の最大長を求められることが明らかにされている⁽⁶⁾。そこで、各局がその最大長を過ぎてもランダム多重アクセス送信での送信に成功しない場合、システムエラーの信号を全局に送信することにし、その次のスロットを待って、再び衝突解消サブセッションにおける送信方式に従ったプロトコルを実行すれば、エラー回復が可能である。

6. むすび

本稿では、予約機構付きTREE-DTA方式を提案し、その性能特性を評価した。その結果、安定した回線状態の実現性、優れた応答性、高スループット特性、システムエラーに対する強靱性の保証など、好ましい諸特性を予約機構付きTREE-DTA方式が具備していることが明らかになった。

なお、本稿で提案した予約機構付きTREE-DTA方式の性能をより向上させる方法として、衝突解消区間中の冗長となるスロットを取り除くITA(Improved Tree Algorithm)や、衝突の多重度を動的に変化させる動的木アルゴリズム(詳細は文献(4)参照)を用いるなど多くの可能性が考えられる。しかし、ITAは、プロトコルが複雑になるだけで、ブロックアクセス方式による予約機構付きTREE-DTA方式がもつ特性が曖昧になることが懸念され、採用しなかった。また、動的木アルゴリズムを実現するためには回線の制御パラメータが増え、分散処理制御下で回線を最適な状態に維持するには困難になると思われるため、急激なトラヒックの増大に対して一定時間内に回線を安定にできること

の方が重要であるという立場からは、本稿の予約機構付きTREE-DTA方式で十分であると考えた。

今後の課題として、さらに詳しくマルチメディアのデータが送信される際の解析を行うことや、より現実のバッファシステムに近いモデルに対する解析を行うことが残されている。

謝辞 本稿に関して貴重なコメントを頂いた佐世保工業高等専門学校尾家祐二講師、および、本学大学院生滝根哲也氏に深謝の意を表す。

文 献

- (1) Capetanakis, J.I., "Tree algorithm for packet broadcast channels", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol.IT-25, No.5 (1979) pp.505-515.
- (2) Capetanakis, J.I., "Generalized TDMA: The multi-accessing tree protocol", IEEE Trans. Commun., Vol.COM-27, No.10 (1979) pp.1476-1484.
- (3) Mathys, P. and Flajolet, P., "Q-ary collision resolution algorithms in random-access systems with free or blocked channel access", IEEE Trans. Inf. Theory, Vol.IT-31, No.2 (1985) pp.217-243.
- (4) 室,尾家,長谷川:"通信プロトコルにおける木型アルゴリズム", 情報処理, Vol.27, No.5 (昭61-5) PP.508-522.
- (5) Oie, Y., Muro, S., and Hasegawa, T., "Tree algorithm for reservation multiple access", Proc. 1985 IEEE Inter. Conf. on Commun. (1985) pp.3.5.1-3.5.5.
- (6) Shima, N., Muro, S., Oie, Y., and Hasegawa, T., "Performance evaluation of a deterministic tree collision resolution algorithm", Proc. of Inter. Computer Symp. 1986, (1986) pp.1525-1534.
- (7) Tsybakov, B.S. and Berkovskii, M.A., "Multiple access with reservation", Prob. Inform. Transmission, Plenum Publishing Company, New York, (1980) pp.35-54; translated from Problemy Peredachi Informatsii, Vol.16, No.1 (1980) pp.50-76.
- (8) Tsybakov, B.S. and Mikhailov, V.A., "Free synchronous packet access in a broadcast channel with feedback", Prob. Inform. Transmission, Vol.14, No.4 (1978) pp.259-280; translated from Problemy Peredachi Informatsii, Vol.14, No.4 (1978) pp.32-49.