

論文

アロハ形予約衛星パケット通信網における アクノリッジ方式の解析

正員 田坂 修二[†] 准員 深谷 和義[†]

Analysis of Acknowledgment Schemes in the ALOHA-Reservation Satellite Packet Communication Network

Shuji TASAKA[†], Member and Kazuyoshi FUKAYA[†], Associate Member

あらまし 衛星パケット通信網の性能評価に関しては、既に多くの研究が行われている。しかし、そのほとんどが送達確認応答パケット(ACK)の存在を無視している。本論文は、衛星パケット通信用多元接続プロトコルの中でも、比較的実用性が高いと考えられるスロット付アロハ予約チャネルを用いた予約プロトコル(アロハ形予約プロトコル)を採用したシステムにおけるACK問題を解析したものである。本システムでは、ACKと予約パケットは同一のサブフレームで送信される。ACKの衝突が生じうる通常のACK伝送方式の解析に加えて、無衝突ACK伝送を実現する一つの優先ACK方式を新たに提案し、その解析も行っている。解析には、平衡点解析の手法を用いている。非優先および優先の両ACK方式について、スループットと平均応答時間を求め、システムの安定性も評価している。また、ACKトラヒックの存在が最適フレーム長の決定に及ぼす影響について考察し、その影響は低負荷では小さく、高負荷になると大きいことを示している。更に、ACKに優先権を付与することによって、システムの安定性は増大し、性能全般が改善されることも示している。

1. まえがき

送達確認(acknowledgment)は、パケット通信網において高効率・高信頼性の通信を実現するためには必須の機能である。送達確認応答パケット(以下、簡単のためACKと略す)の伝送には、網の伝送容量の一部を使用し通常のデータパケットの伝送と競合することになるので、その伝送方法には特別の工夫が必要である。また、通信網の性能を正確に評価するためには、ACKトラヒックの存在を考慮に入れることが重要である。パケット通信網の中でも、特に、衛星チャネルや分岐ケーブルチャネルのような放送形チャネルを用いた通信網、すなわち、放送形パケット通信網においては、多元接続の問題があるため、ACKの伝送方式やシステムの性能評価に関する状況は一層複雑になる。

放送形パケット通信網の性能評価については、既に多くの研究が行われている。しかし、その大部分は、多元接続プロトコルのみを考慮した評価であり^{(1)~(3)},

それより上位のプロトコルの影響は、無視されている。多元接続プロトコルより上位のプロトコルにおいては、必ずACKの返送機能が組み込まれており、システムの性能を正しく評価するためには、何らかの形でこのことを考慮に入れる必要がある。

ACKを考慮した場合、放送形パケット通信網においては、データパケットとACKとの相互干渉に加えて、データパケットとACKとの間の相関が解析を難しくする。すなわち、ACKはデータパケットの正常受信に伴って返送されるので、データパケットとACKとの間には相関が生じるのである。この相関を厳密に考慮した解析的モデルを構成することは、一般には困難である。そのため、この相関まで考慮した放送形パケット通信網の性能解析は、地上無線パケット通信網⁽⁴⁾やローカルエリアネットワーク(LAN)^{(5)~(8)}でわずかに行われているにすぎない。これらの通信網では、チャネル伝搬遅延が小さいため、そのことを利用してACKにデータパケットに対する優先権を付与し、無衝突ACK伝送が容易に実現できる。この優先ACK方式では、データパケットに引き続いて対応するACKが直ちに送信されるため、相関のモデル化が極

† 名古屋工業大学工学部電気情報工学科、名古屋市
Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Nagoya-shi, 466 Japan

めて簡単になり、従って性能解析も容易になる。このため、地上無線パケット通信網や LAN に関する従来の研究のほとんどが、優先 ACK 方式を扱ったものである。一方、衛星パケット通信網では、チャネル伝搬遅延が大きいため、地上無線パケット通信網や LAN の優先 ACK 方式をそのまま適用することはできない。一般に、衛星パケット通信網では、約 0.25 秒の往復チャネル伝搬遅延がシステムの運用を複雑にし、また、その性能評価を難しくしている⁽³⁾。こうして、衛星パケット通信網における ACK 問題を、データパケット・ACK 間の相関まで考慮して解析的に取り扱った研究は、これまでに見当たらない。従って、衛星パケット通信網についても、このような性能解析の研究を行なうことが望まれる。

本論文は、多元接続プロトコルとしてスロット付アロハ予約チャネルを用いた予約プロトコル⁽⁹⁾(以下、アロハ形予約プロトコル (ALOHA-Reservation protocol) と呼ぶ^{(3),(10)}) を採用した衛星パケット通信網の ACK 問題を解析的に取り扱ったものである。本システムでは、ACK と予約パケットは同一のサブフレームで送信される。ACK の衝突が生じる通常の ACK 伝送方式の解析に加えて、無衝突 ACK 伝送を実現する一つの優先 ACK 方式を新たに提案し、その解析も行っている。解析においては、データパケット・ACK 間の相関が考慮されている。前述の解析に伴う種々の問題点は、筆者らがこれまで各種の多元接続プロトコルの性能解析に利用してきた平衡点解析 (Equilibrium Point Analysis: EPA)^{(3),(11),(12)} の手法によって解決を図った。アロハ形予約プロトコルは、比較的長いメッセージをバースト的に発生する多数の局が存在するような場合には極めて優れた性能を示す⁽¹⁰⁾。このため、同一の原理に基づいた CPODA⁽¹³⁾ など、実験システムにインプリメントされている例もあり、今後実用システムに採用される可能性も少なくないと考えられる。なお、アロハ形予約プロトコルは、有名な Roberts の予約プロトコル⁽¹⁴⁾ と実質的には同じものである。

以下、本論文では、まず、2.で非優先 ACK 方式の解析を行い、続いて、3.で優先 ACK 方式を解析する。4.では、数値例により、EPA による解析結果の精度を検討すると共に、ACK トラヒックがシステム性能に及ぼす影響や優先 ACK 方式の効果などについて調べている。

2. 非優先 ACK 方式の解析

2.1 モデル化

本論文で検討するアロハ形予約プロトコルは、文献(9)のものと同じである。従って、モデル化においても同様の方法を用いる。衛星チャネルは、データパケット伝送時間に等しい大きさのスロットに分割されており、一定数 F 個のスロットがまとめられ、フレームが構成されている。一つのフレームは、最初の K スロットより成る制御サブフレームと残りの L スロット(但し、 $L \leq F - K$) より成るデータサブフレームとに分けられる。制御サブフレーム内の各スロットは、更に V 個の制御用小スロットに分割されている。

一つの局は、一つまたは複数個のパケットより成るメッセージを発生する(以下の議論において、単にパケットという場合にはデータパケットを意味するものとする)。あるフレームにおいてメッセージを発生した局は、次のフレームの KV 個の制御用小スロットのうち一個を等確率でランダムに選んで予約パケットを送信する。また、予約パケットの送信の失敗を知った局は、ランダムな遅延の後に予約パケットの再送を行う。この再送も、 KV 個の制御用小スロットのうち 1 個を等確率でランダムに選んで行われる。衛星チャネルの放送性により、すべての局が任意の予約パケットの成功を知ることができる。従って、システム全体に共通に一つ存在する、予約の論理的な待ち行列が構成される。予約パケットの送信に成功した局は、それを確認した後、その論理的な待ち行列に加わる。そして、先着順にデータサブフレーム内のスロットを使用してメッセージを構成するパケットを送信する。自分へのメッセージを受信した局は、受信後 ACK を返送する。ACK の送信も制御用小スロットを使用し⁽¹⁴⁾、その送信方法は予約パケットの場合と同様である。

このシステムをモデル化するために次の仮定を置く。

- (1) システムは M 個の局をもつ。
- (2) 各局は、スロット当たり確率 σ でメッセージを発生する。但し、 $\sigma \ll 1$ とする。
- (3) 各局は、一つのメッセージの伝送が完了しそれに対する ACK を受信するまでは次のメッセージを発生しない。
- (4) 一つのメッセージに含まれるパケット数は、平均 a 、分散 b (変動係数 $C_m \triangleq \sqrt{b}/a$) の一般分布をす

る。

(5) 衛星チャネルは R スロット長の往復伝搬遅延を含む。

(6) 予約パケットおよび ACK の誤りは互いの衝突によってのみ起こるものとし、他の誤りは無視する。また、データパケットに誤りは生じない。

(7) 予約パケット、ACK ともに固定長であり、どちらも制御用小スロット長に等しい。

(8) 1 個のメッセージは 1 個の局にのみ向けられる。そして、1 個のメッセージに対しては 1 個の ACK が対応する。

(9) 自分あてのメッセージを正しく受信した局は、次のフレームの制御用小スロットの一つをランダムに選んで ACK を返送する。

(10) 受信されたデータパケットのチェックと ACK の準備のための時間は、十分小さく無視できる。

(11) 予約パケットまたは ACK の送信の失敗を知った局は、次のフレームからフレーム当り確率 β で再送を試みる。一つのフレームで再送を決定した局は、そのフレームの KV 個の制御用小スロットの中から 1 個を等確率でランダムに選んで再送を行う。

(12) 一つの局で予約パケットと ACK の送信要求が同時に生じた場合には ACK を優先する。ACK の送信完了後に予約パケットの送信に取りかかる。また、複数個の ACK の再送要求がある場合には先着順とする（一つの ACK の最初の送信は仮定(9)に従う）。

平衡点解析 (EPA) を適用すべきマルコフモデルを構成する場合、まず、各局の取りうる状態、すなわちモード (mode) を見出し、それらのモードの相互の関係を指定してモード遷移図を作成するという手順に従う。モード遷移図は、簡単なシステムに対しては厳密に作成できるが、システムがある程度複雑になると近似的に作成せざるをえない。現システムも動作原理がかなり複雑であるので、モード遷移図の作成に当って次の二つの大きな近似を用いる。

(a 1) システムの状態は、フレームの開始時点でのみ変化する。

(a 2) 各局が、他局あてに返送する ACK に関する状態をすべて無視する。言い換えると、一つの局が送信したメッセージがどの局に向けられたものであるかということは、モデルには反映しない。

まず、近似 (a 1) は、システムの状態変化は厳密に言えばスロット単位で変化するにもかかわらず、モデル化の簡単のため、フレーム単位で変化するとみなそ

うというものである。この近似は、システムの状態変化の速度が、チャネルのフレーム速度と比べて十分緩やかであれば、精度の高いものと考えられる。ACK トライピックを無視した場合には、十分よい近似であることが文献(9)で示されている。

近似(a 2)も、考慮すべき状態数を削減するためのものである。この近似を、ACK 仮説 (ACK assumption) と呼ぶことにする。その意味を明らかにするために、前記の仮定(1)～(12)の下で一つの局の取りうる状態を考えよう。それは、自分が送信するメッセージに関するものと、他局から受信した自分宛のメッセージに対する ACK に関するものとの 2 種類に大別できる。前者の状態としては、その局が送るべきメッセージをもっていない状態、メッセージを発生した後予約パケットの送信に成功しその確認を待っている状態、同じく失敗しその確認を待っている状態、予約を完了しチャネルの使用を待っているかあるいは使用中である状態、相手局がメッセージの受信を完了しそれに対する ACK の送信に成功している状態、同じく相手局が ACK の送信に失敗し再送しようとしている状態などが考えられる。後者には、他局から何らメッセージを受信していない状態、一つのメッセージを受信しそれに対する ACK の送信に成功している状態、同じく失敗している状態、2 個のメッセージを受信しその各々に対する ACK の送信に成功または失敗している状態、3 個以上のメッセージに対する同様の状態等々がある。これら 2 種類の状態のすべての組合せを考えることによって必要なモードが得られる。しかし、このように直接的な方法ではモード数が膨大なものとなる。これでは、とても解析可能なモデルは構成できないことは容易に想像できよう。そこで後者の状態、すなわち、他局あての ACK に関する状態を無視することによってモード数を大幅に削減しようというのである。これが、ACK 仮説の意味するところである。ACK 仮説は、一見乱暴な方法に見えるが、後の数値例よりわかるように、結構よい近似となる。仮定(2) ($\sigma \ll 1$) より、一つの局において、メッセージの送信要求と受信とが同時に生じる確率は極めて小さい。それゆえ、メッセージの受信、従って ACK の送信に関する状態を無視しても、それほど大きな誤差は生じないのである。

近似(a 1)を用いることによって、仮定(2)は次のようにフレーム単位のものに修正される。

(2 F) 各局は、フレーム当り確率 $\alpha \triangleq F\sigma$ でメッセージ

を発生する。メッセージは、フレームの開始時点で発生するものとし、メッセージを発生した局はそのフレームの制御用小スロットを用いて予約パケットを送信する。

以上の条件の下で近似モデルを構成すると、図1のようになる。図中の J , K_0 および L_0 は、非負の整数であり、次式で定義される。

$$JF \leq R \leq (J+1)F - 1 \quad (1)$$

$$K_0 \triangleq \min[(J+1)F - R, K] \quad (2)$$

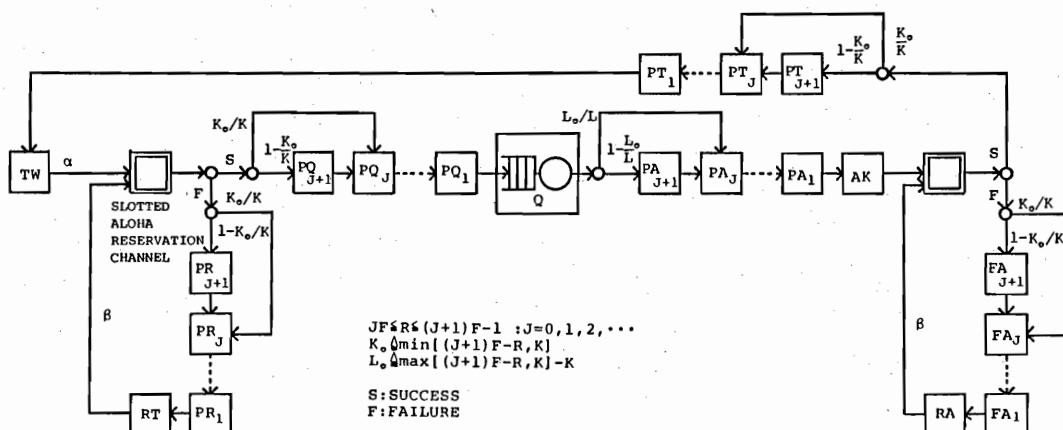
$$L_0 \triangleq \max[(J+1)F - R, K] - K \quad (3)$$

これらのパラメータの定義は、近似(a1)を用いたことによる一つの帰結である。 J は、スロット単位の往復伝搬遅延 R をフレーム単位に換算したものである。また、 K_0 については、予約パケットの送信に際して制御サブフレーム内の最初の K_0 スロット ($K_0 V$ 小スロット) のいずれか一つを選べば、 J フレーム後にその成否が判明し、残りの $(K - K_0)$ スロットのいずれかを選ぶと $(J+1)$ フレーム後に判明するという意味をもつ。 L_0 はメッセージの送信に関して類似の意味をもつ。すなわち、一つのメッセージを構成するデータパケットは連続したスロットで送信される。このとき、その最後のデータパケットの送信がデータサブフレーム内の最初の L_0 スロットのうちのいずれかで行われれば、そのメッセージは送信終了後 J フレームで相手側に受信されることになる。残りの $(L - L_0)$ スロットのいずれかであれば $(J+1)$ フレーム後になることは明らかであろう。

図1において、四角の箱がモードを表し、この図はフレーム単位のモード遷移図となっている。これらの

モードの意味は次の通りである。まず TW モードは、送信すべきメッセージをもっていない状態であり、フレーム当たり確率 α でメッセージを発生する。RT, RA モードは、それぞれ予約パケット、ACK の送信の失敗を確認し、確率 β で再送を行う状態である。Q モードは、予約パケットの成功を確認し、メッセージ送信のためシステム全体に共通の論理的な待ち行列に加わっている状態である。AK モードは、送信されたメッセージが相手局にちょうど受信された状態を表し、相手局は現フレームで ACK を送信する。PQ_i, PR_i, PA_i, PT_i, FA_i ($1 \leq i \leq J+1$) モードは、現フレームから i フレーム先で、それぞれ Q, RT, AK, TW, RA モードとなる状態である。いずれのモードも伝搬遅延の影響を表している。このうち、PT_i, FA_i, RA モードは、メッセージが相手局に正しく受信され、相手局がそれに対して送信する ACK の送信状況を表現したものである。ここで、我々は近似(a2)(ACK 仮説)を用いているため、どの局が ACK を返送しようとしているかは全く問題とならないことに注意されたい。例えば、今、A 局が送信したメッセージを B 局が受信し、B 局はそれに対する ACK の返送に失敗したとしよう。このとき、B 局は ACK を再送しようとする。ACK の再送を表す状態は RA モードであるが、ここで RA モードにある局は A 局であり、B 局ではない。B 局はモデル上には全く現れないものである。

このように図1のモデルは ACK 仮説に基づいているため、実際に起こりうる状態変化を反映しきれないという欠点をもっている。例えば、他局からメッセージを受信し ACK を返送しようとしているところ



ヘッセージが発生すると、仮定(12)より予約パケットの送信は保留される。従って、図1のモデルのモード遷移には矛盾が生じる。しかし、以前にも述べたように、仮定(2)より α が十分小さいため、このような同時事象が生じる確率は極めて小さく、ほとんど問題とならない。

2.2 平衡点解析

図1のモデルにEPAを適用するに当っては、文献(9)でも行われているように、解析の簡単のためにモデルの変形⁽³⁾を行う。仮定(2)より $\alpha \ll 1$ であるので、ふつう $\alpha \leq \beta$ となる。この条件の下で、図1のモデルのTWおよびRTモードを、図2に示すように確率的に等価なTHおよびTRモードに変形する。TWモードは、THとTRの継続した二つのモードに分割され、RTモードはTRモードの一部になっている。

図2において、TR, Q, RA, AK, PQ_i, PR_i, PA_i, PT_i, FA_i ($1 \leq i \leq J+1$) モードにある局数をそれぞれ $n_1, n_2, n_3, w_0, m_i, l_i, w_i, x_i, y_i$ とし、システムの状態ベクトルを $\mathbf{n} \triangleq (n_1, n_2, n_3, w_0, m_i, l_i, w_i, x_i, y_i : 1 \leq i \leq J+1)$ と定義する。そして、現フレームの状態 \mathbf{n} が与えられたとき、次のフレームにおける状態は現フレームの状態 \mathbf{n} にのみ依存すると仮定する。すなわち、 \mathbf{n} は、マルコフ連鎖をなすと仮定する。この仮定は厳密な意味では正しくないが、後の数値例でもわかるように十分よい近似となる。

EPAでは、システムは常に平衡点に留まっていると仮定する。平衡点は次のようにして求められる。まず、状態 \mathbf{n} が与えられたとして、各モードにおける1フレーム当たりの増加局数の条件付期待値を計算する。次に、

こうして得られたすべてのモードについての条件付期待値を0と置き、連立方程式を得る。この連立方程式を平衡点方程式と呼ぶ。平衡点方程式を \mathbf{n} について解くことによって得られる解が平衡点となる。

平衡点を求めるために、まず、システムの状態が \mathbf{n} のとき、Qモードから出る平均局数を $X(\mathbf{n})$ で表す。また、一つの制御サブフレームで予約パケット、ACKの送信に成功する平均局数を、それぞれ $s_1(\mathbf{n}), s_2(\mathbf{n})$ で表す。

i 個の予約パケットと j 個のACKが一つの制御サブフレームにおいて送信されるものとする。このとき送信に成功する予約パケットの平均数 $A_1(i, j)$ とACKの平均数 $A_2(i, j)$ は、それぞれ、

$$A_1(i, j) = i \left(1 - \frac{1}{KV}\right)^{i+j-1} \quad (4)$$

$$A_2(i, j) = j \left(1 - \frac{1}{KV}\right)^{i+j-1} \quad (5)$$

となる。また、システムが状態 \mathbf{n} にあるとき、一つの制御サブフレームにおいて、 i 個の予約パケットと j 個のACKが送信される条件付確率 $B(i, j)$ は、

$$B(i, j) = \begin{bmatrix} n_1 \\ i \end{bmatrix} \beta^i (1-\beta)^{n_1-i} \cdot \begin{bmatrix} n_3 \\ j-w_0 \end{bmatrix} \beta^{j-w_0} (1-\beta)^{n_3-j+w_0}, \quad (6)$$

$$(0 \leq i \leq n_1, w_0 \leq j \leq n_3 + w_0)$$

となる。ここで、AKモードにある w_0 個の局は、現フレームで必ずACKを送信するので、 j 個のACKが送信されるためには $(j-w_0)$ 個のRAモードにある局がACKを送信する必要があることに注意されたい。式

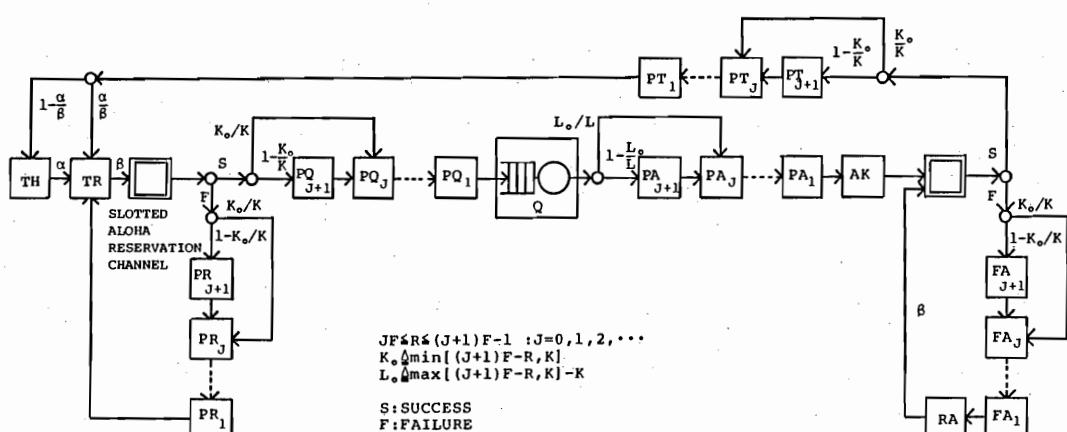


図2 図1のモデルの変形モデル ($\alpha \leq \beta$ のとき)
Fig. 2 A modified model of the model in Fig. 1 in the case of $\alpha \leq \beta$.

(4)～(6)より、次式が得られる。

$$s_1(\mathbf{n}) = \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=w_0}^{n_3+w_0} A_1(i, j) B(i, j) \\ = n_1 \beta \left(1 - \frac{1}{KV}\right)^{w_0} \left(1 - \frac{\beta}{KV}\right)^{n_1+n_3-1} \quad (7)$$

$$s_2(\mathbf{n}) = \sum_{i=0}^{n_1} \sum_{j=w_0}^{n_3+w_0} A_2(i, j) B(i, j) \\ = n_3 \beta \left(1 - \frac{1}{KV}\right)^{w_0} \left(1 - \frac{\beta}{KV}\right)^{n_1+n_3-1} \\ + w_0 \left(1 - \frac{1}{KV}\right)^{w_0-1} \left(1 - \frac{\beta}{KV}\right)^{n_1+n_3} \quad (8)$$

このとき、各モードにおける1フレーム当たりの平均増加局数を求めて0とおき、その結果の独立な式をまとめると次のようになる。

$$\{M - n_1 - n_2 - n_3 - w_0 - \sum_{i=1}^{J+1} (m_i + l_i + w_i + x_i + y_i)\} \alpha \\ = x_1 \left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right) \quad (9)$$

$$m_{J+1} = (1 - K_0/K) s_1(\mathbf{n}) \quad (10)$$

$$m_1 = m_2 = \dots = m_J = m_{J+1} + (K_0/K) s_1(\mathbf{n}) \quad (11)$$

$$l_{J+1} = (1 - K_0/K) \{n_1 \beta - s_1(\mathbf{n})\} \quad (12)$$

$$l_1 = l_2 = \dots = l_J = l_{J+1} + (K_0/K) \{n_1 \beta - s_1(\mathbf{n})\} \quad (13)$$

$$X(\mathbf{n}) = m_1 \quad (14)$$

$$w_{J+1} = (1 - L_0/L) X(\mathbf{n}) \quad (15)$$

$$w_0 = w_1 = w_2 = \dots = w_J = w_{J+1} + (L_0/L) X(\mathbf{n}) \quad (16)$$

$$x_{J+1} = (1 - K_0/K) s_2(\mathbf{n}) \quad (17)$$

$$x_1 = x_2 = \dots = x_J = x_{J+1} + (K_0/K) s_2(\mathbf{n}) \quad (18)$$

$$y_{J+1} = (1 - K_0/K) \{n_3 \beta + w_0 - s_2(\mathbf{n})\} \quad (19)$$

$$y_1 = y_2 = \dots = y_J = y_{J+1} + (K_0/K) \{n_3 \beta + w_0 - s_2(\mathbf{n})\} \quad (20)$$

$$n_3 \beta = y_1 \quad (21)$$

以上の連立方程式の解が平衡点 $\mathbf{n}_e \triangleq (n_{1e}, n_{2e}, n_{3e}, w_{0e}, m_{ie}, l_{ie}, w_{ie}, x_{ie}, y_{ie} : 1 \leq i \leq J+1)$ である。この連立方程式を解くためには関数 $X(\mathbf{n})$ を具体的に与えることが必要である。そこで、文献(9)と同様に、Qモードの待ち行列系を集団到着個別処理待ち行列 $D/G/1$ とみなし、また、一つの到着集団に含まれる局数を表す不規則変数を平均 $s_1(\mathbf{n}_e)$ のポアソン分布で近似する。このとき文献(9)と同様の議論により、

$$X(\mathbf{n}_e) = L\rho/a \quad (22)$$

となる。但し、 ρ は Qモードの待ち行列における窓口利用率である。更に、次の平衡点方程式を得る。

$$n_1 \beta \left(1 - \frac{1}{KV}\right)^{L\rho/a} \left(1 - \frac{\beta}{KV}\right)^{n_1+n_3-1} - \frac{L\rho}{a} = 0 \quad (23)$$

$$n_3 = n_1 - \left\{ L\rho \left(1 - \frac{\beta}{KV}\right) \right\} / \left\{ a\beta \left(1 - \frac{1}{KV}\right) \right\} \quad (24)$$

$$n_1 = \frac{M - n_2 - \left(2J + 3 - \frac{K_0}{K} - \frac{L_0}{L} + \frac{1}{a} - \frac{1}{\beta}\right) \frac{L\rho}{a}}{2 + 2\beta \left(J + 1 - \frac{K_0}{K}\right)} \quad (25)$$

$$+ \frac{L\rho \left(1 - \frac{\beta}{KV}\right)}{2a\beta \left(1 - \frac{1}{KV}\right)} \\ n_2 = \rho + \frac{ap \left\{1 - \exp\left(-\frac{L\rho}{a}\right)\right\} (1 + C_m^2)}{2L(1-\rho)} \\ \cdot \exp\left[-\frac{2L(1-\rho) \left\{1 - \exp\left(-\frac{L\rho}{a}\right)\right\}}{3a(1+C_m^2)}\right] + \frac{L\rho^2}{2a} \quad (26)$$

上式では平衡点を表す添字 e は省略してある。以下の議論においても、添字 e を明記しなければ誤解を生じるような場合以外は、この添字は省略する。平衡点方程式(23)～(26)は、 $\rho(0 \leq \rho < 1)$ について数値的に解くことができるるのは明らかであろう。この解が1個であればシステムは安定であり、複数個であれば不安定であるという。

次に、スループット (throughput) \bar{S} と平均応答時間 (average response time) D_r とを計算しよう。スループットは、1データパケット伝送時間当たり正しく伝送される平均データパケット数と定義される。また、平均応答時間は、一つのメッセージが発生してからその伝送が完了し、対応する ACK が正しく受信されるまでの平均時間と定義され、1データパケット伝送時間を単位として表される。

まず、状態 \mathbf{n} における条件付スループット $S(\mathbf{n})$ は、

$$S(\mathbf{n}) = aX(\mathbf{n})/F \quad (27)$$

で与えられることは明らかであろう。EPAでは、 $\bar{S} = S(\mathbf{n}_e)$ とするので、式(22)より次式が得られる。

$$\bar{S} = L\rho/F \quad (28)$$

また、 D_r は次式で与えられる（付録参照）。

$$D_r = \frac{aM}{\bar{S}} - \frac{1}{\sigma} + F + 1 - L_0 - \frac{1}{2}L + \frac{K_0}{K}L$$

[単位：データパケット伝送時間] (29)

2.3 最適フレーム長

前節の理論を用いて、システムが安定であるという条件の下で、 L 、 K および β の最適な集合を決定することができる。ここで、最適とは、平均応答時間 D_r が最小であることとする⁽⁹⁾。このとき、 K と L の値を固定して、システムが安定であるという条件の下で、 D_r が最小となるように β を選ぶ。この β における D_r を

$D_{r,\min}(K, L)$ で表す。 K と L の値を種々変化させて得られる $D_{r,\min}(K, L)$ の集合の中からその最小のものを選べば、最終的に D_r が最小となる K と L を選択することができる。こうして、ACK を考慮した場合の最適なフレーム長を知ることができる。この結果と文献(9)の ACK を無視した場合の結果とを比較することによって、ACK による影響を考察することができる。

3. 優先 ACK 方式の解析

本章では、ACK に予約パケットに対する優先権を与え、ACK には衝突が生じないようにした ACK 返送方式を新たに提案し、その性能を解析している。優先権の与え方は以下の通りである。あるフレーム内でメッセージを受信完了した局は、その順番に従って次のフレームの制御用小スロットを先頭から予約したものとみなす。ここで、衛星チャネルの放送性により、すべての局がこの順番を知ることができることに注意されたい。受信完了した局の数が、次のフレームの制御用小スロット数よりも多い場合には、もう一つ先のフレームのものも使用するものとする。ACK を送信する局は自分が予約した小スロットを使用し、他の局はその小スロットでは送信を行わない。これにより衝突なしで ACK を送信することが可能となる。予約パケットの送信には予約されていない残りの小スロットのみを使用し、その送信は従来と同様に、等確率でランダムに選んで行われるものとする。

無衝突 ACK 伝送を実現するのに、よく知られている piggybacking 法⁽¹⁵⁾ を用いることも考えられる。しかし、この方法では、ACK を返送すべき局が、送るべきデータパケットをもっていることが必要である。しかも、ACK 返送の時点で既にデータパケット送信の予約が完了していないと、必ずしも ACK の返送は迅速に行われないことは明らかであろう。piggybacking 法と本論文の優先 ACK 方式との比較や、両方式を併用した場合の性能評価は今後の課題である。

ここで、優先 ACK 方式の解析を容易にするために、次の仮定を置く。

(13) 一つのフレーム内でメッセージを受信完了した局数は、一フレーム内にある制御用小スロット数より少ない。

この仮定により、すべての ACK は次のフレームで必ず送信することができる。この仮定が必ずしも妥当でないことは明白である。しかし、筆者らが行った数値計算の範囲内では、平衡点においては常に仮定(13)

は満足され、少なくとも理論上の矛盾が生じることはなかった。

以下、この方式の解析を行う。解析においての仮定は、仮定(9)と仮定(12)の最後の部分を除けば前章のものと同じである。仮定(9)と仮定(12)の最後の部分は優先 ACK 用に修正すればよい。優先 ACK 方式では ACK の衝突がないため、図 2 において RA, FA_i ($1 \leq i \leq J+1$) モードを取り除いたものが、本方式を用いたシステムのモデルとなる。本章においても、各モードにある局数を表す変数や他の諸量に関して、2. と同じ定義のものを用いる。但し、現方式に対しては、状態ベクトル \mathbf{n} は、 $\mathbf{n} \triangleq (n_1, n_2, w_0, m_i, l_i, w_i, x_i : 1 \leq i \leq J+1)$ と定義される。

現フレームでシステムが状態 \mathbf{n} にあるとし、 i 個の予約パケットが制御サブフレームにおいて送信されるとする。このとき、送信に成功する予約パケットの平均数 $A_1(i)$ は、 KV 個の制御用小スロットのうち w_0 個が既に予約されているため、

$$A_1(i) = i \left(1 - \frac{1}{KV - w_0}\right)^{i-1}, \quad w_0 < KV \quad (30)$$

となる。また、状態 \mathbf{n} が与えられたとき、一つの制御サブフレームにおいて、 i 個の予約パケットが送信される条件付確率は、

$$B(i) = \begin{bmatrix} n_1 \\ i \end{bmatrix} \beta^i (1-\beta)^{n_1-i}, \quad (0 \leq i \leq n_1) \quad (31)$$

となる。従って、 $s_1(\mathbf{n})$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} s_1(\mathbf{n}) &= \sum_{i=0}^{n_1} A_1(i) B(i) \\ &= n_1 \beta \left(1 - \frac{\beta}{KV - w_0}\right)^{n_1-1} \end{aligned} \quad (32)$$

以下の議論は、前章のものとほぼ並行しているので省略し、次に平衡点方程式のみを示す。

$$n_1 \beta \left(1 - \frac{\beta}{KV - L\rho/a}\right)^{n_1-1} - L\rho/a = 0 \quad (33)$$

$$n_1 = \frac{M - n_2 \left(2J + 3 - \frac{K_0}{K} - \frac{L_0}{L} + \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta}\right) \frac{L\rho}{a}}{1 + \beta \left(J + 1 - \frac{K_0}{K}\right)} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} n_2 &= \rho + \frac{a\rho \left\{1 - \exp\left(-\frac{L\rho}{a}\right)\right\} (1 + C_m^2)}{2L(1-\rho)} \\ &\quad \cdot \exp\left[-\frac{2L(1-\rho) \left\{1 - \exp\left(-\frac{L\rho}{a}\right)\right\}}{3a(1+C_m^2)}\right] + \frac{L\rho^2}{2a} \end{aligned} \quad (35)$$

スループット \bar{S} と平均応答時間 D_r は、前章と同様、それぞれ式(28), (29)で与えられる。但し、 D_r につい

ては、実際には ACK の送信が先着順に予約された制御用小スロットで行われるにもかかわらず、前章と同じく制御サブフレーム内で一様分布していると近似して計算した。

4. 数値例と考察

本章では、2.および3.で得られた理論結果の精度をシミュレーションによって検討すると共に各方式の性能比較も行う。以下の数値例では、文献(9)で得られた結果との比較を容易にするため、 $M=100$, $R=12$, $K=2$, $V=6$ とする。

また、対象とするトラヒックは、文献(9)と同じく、单一パケットメッセージと8パケットメッセージとの混合とし、各局においてこれら2種類のメッセージがある一定の比率で発生するものとする。ここでは、次の二つの場合を考える。

- (i) 1:1(両者が等確率で発生。 $a=4.5$, $b=12.25$)
- (ii) 0:1(8パケットメッセージのみ。 $a=8$, $b=0$)

シミュレーションは、仮定(1)～(12)(優先 ACK 方式では、それを修正したもの)のみの下で行われ、近似(a1), (a2)や仮定(2F), (13)などは用いなかった。シミュレーションにおいては、各局は残りの($M-1$)個の局の各々に対して等確率でメッセージを送信するとした。一つのシミュレーションの長さは、50000 データパケット伝送時間である。

β に対するスループットと平均応答時間との関係を図3～5に示す。図3, 4は、いずれも $F=14$, $\sigma=0.8 \times 10^{-3}$ の場合であり、トラヒック混合は、それぞれ1:1, 0:1となっている。図5は、図3のシステムにおいてメッセージの発生確率のみを大きくして高負荷にした場合に対応し、 $F=14$, $\sigma=1.4 \times 10^{-3}$ 、トラヒック混合1:1である。

各図には、非優先 ACK 方式(図では、NP-ACK と記す)、優先 ACK 方式(同じく、P-ACK)、ACK を考慮しない場合(NO-ACK)の3種類の性能が示されている。但し、ACK を考慮しない場合の平均応答時間は、メッセージが相手局に受信されるまでの平均時間、すなわち平均メッセージ遅延である。理論値は実線で示しており、システムが不安定(双安定)な場合には、これはスループットの小さい方の安定平衡点⁽³⁾に対応している。更に、双安定領域では、参考のため、スループットが大きい方の安定平衡点に対する理論値も破線で示してある。シミュレーション結果で黒く塗り

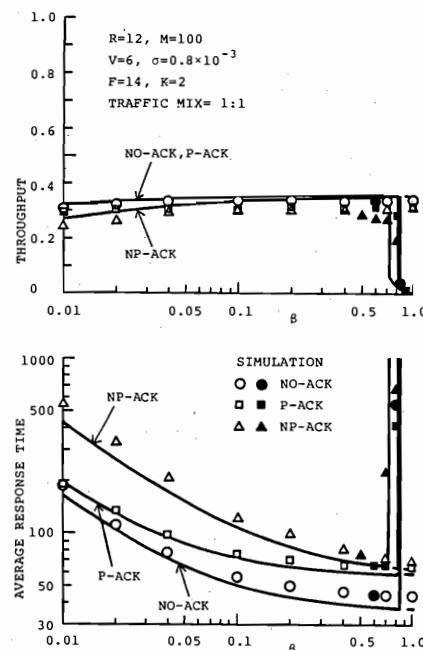


図3 スループットおよび平均応答時間特性(1)： $\sigma=0.8 \times 10^{-3}$ 、トラヒック混合=1:1

Fig. 3 Throughput and average response time versus β
(1) : $\sigma=0.8 \times 10^{-3}$ and traffic mix=1:1.

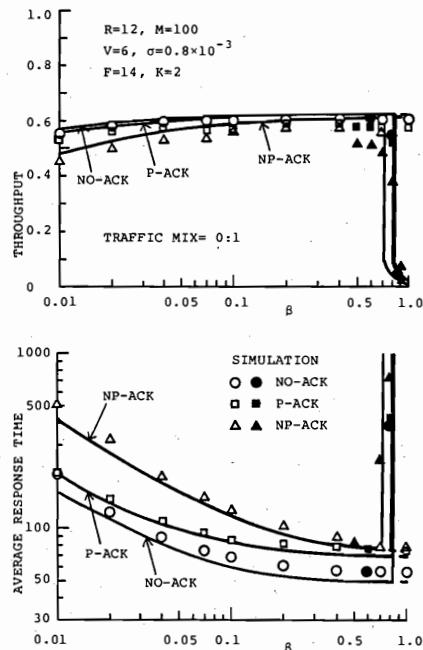


図4 スループットおよび平均応答時間特性(2)： $\sigma=0.8 \times 10^{-3}$ 、トラヒック混合=0:1

Fig. 4 Throughput and average time versus β
(2) : $\sigma=0.8 \times 10^{-3}$ and traffic mix=0:1.

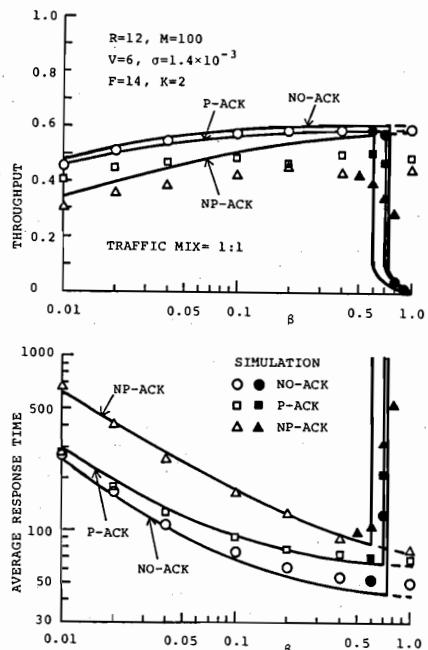


図5 スループットおよび平均応答時間特性(3): $\sigma = 1.4 \times 10^{-3}$, トラヒック混合=1:1

Fig. 5 Throughput and average response time versus β (3): $\sigma = 1.4 \times 10^{-3}$ and traffic mix=1:1.

つぶしてある方は、すべての局が初期状態においてメッセージをもっているが他局への ACK はもっていないとした場合の結果であり、塗りつぶしていない方はメッセージも ACK ももっていないとした場合のものである。

図3～5において、理論値とシミュレーション値は全般に近い値となっている。但し、図5のように負荷が高くなると、スループットの理論値の誤差がやや大きくなる。システムの性能は、いずれの図においても、ACK を考慮しない場合が最もよく、以下、優先 ACK 方式、非優先 ACK 方式の順となっている。図3と図5とを比較すると、優先権付与による性能の改善は、負荷が高いほど大きいことがわかる。非優先 ACK 方式では、高負荷になると ACK の衝突が起こりやすくなることを考えれば、これは当然の結果である。一方、低負荷においては、優先権付与による改善効果がそれほど顕著ではない。しかし、この場合でさえも、優先 ACK 方式のシステムは、非優先 ACK 方式のそれと比べて、大きな β の値まで安定である。従って、システムが一時的に高負荷になり非優先 ACK 方式が不安定になっても、優先 ACK 方式は安定なままである可能

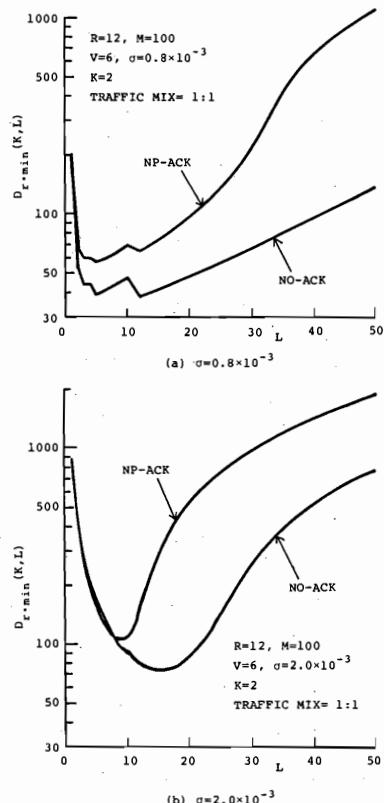


図6 ACK トラヒックが最適フレーム長に及ぼす影響
Fig. 6 The effect of ACK traffic on the optimum frame length.

性が大きいと考えられる。これは、その動作原理から考えれば当然のことである。この意味において、低負荷においても優先権付与による改善効果はあると言えよう。

なお、図3と図4とを比較すると、トラヒック混合の違いにもかかわらず、システムが不安定になる β の値が両図ともほぼ同じであることがわかる。これは、システムが不安定になるのは、予約パケットや ACK の衝突にのみ起因することから明らかである。すなわち、予約パケットと ACK は、1 メッセージに各々 1 個が対応し、メッセージの長さには無関係であるからである。

更に、図6に非優先 ACK 方式と ACK を考慮しない場合について、最適フレーム長を求めるグラフを示す。トラヒック混合を 1:1 としたときの(a) $\sigma = 0.8 \times 10^{-3}$, (b) $\sigma = 2.0 \times 10^{-3}$ の二つの場合について示している。これらを比較すると、K が一定の場合、 σ が

小さいときは ACK の有無による最適フレーム長の差が小さいことがわかる。一方、 σ が大きくなると、非優先 ACK 方式の方が、ACK を考慮しない場合より小さな最適フレーム長をもっている。これは、 K を一定としているため、 L が小さくなると、チャネルの容量のうち、制御サブフレームに割り当てられる比率が相対的に大きくなることを意味する。非優先 ACK 方式においては、負荷が高くなると ACK の送信が増えるため、相対的に多くの制御用小スロットを必要とするところを考えれば、この結果は当然である。なお、図 6 のうち、(a) の NO-ACK に対するカーブの上昇の傾向は、他の三つのカーブとは異なっている。(a) の NO-ACK において、 L の増加に伴う応答時間の増大は、主として制御サブフレーム（予約パケットや ACK が送信可能な時間帯）の出現間隔が長くなることに起因する。一方、他の三つの場合には、上記の原因よりも、 L の増加によって制御サブフレームに割り当てられるチャネル容量の割合が減少し、予約パケットや ACK の衝突が起こりやすくなることによる応答時間の増大の方が支配的となる。このような原因の差が上昇傾向の違いとなって現れている。

以上より、アロハ形予約プロトコルが適している比較的高負荷の状況においては、ACK の存在を考慮に入れてフレーム長を最適化しなければ、最適化の意味がなくなることがわかる。

5. むすび

本論文では、アロハ形予約衛星パケット通信網における二つの ACK 伝送方式、すなわち、非優先 ACK 方式と優先 ACK 方式とを、平衡点解析の手法を用いて解析した。まず、非優先 ACK 方式については、ACK トラヒックが、スループット、平均応答時間およびシステムの安定性に及ぼす影響について考察し、更に最適フレーム長に対する影響についても検討した。その結果、当然のことではあるが、ACK トラヒックの存在によってシステム性能が劣化することが示された。また、最適フレーム長に関しては、低負荷では ACK トラヒックの影響は小さく、負荷が高くなると影響も大きくなることがわかった。アロハ形予約プロトコルは、本来、中程度の負荷から比較的高負荷の環境に適しているので^{(3),(10)}、システム設計においては ACK トラヒックの影響を是非とも考慮すべきであるということになる。

次に、無衝突 ACK 伝送を実現する優先 ACK 方式

について検討し、非優先 ACK 方式との性能比較も行った。その結果、ACK に優先権を付与することにより、システムの安定性は増大し、性能全般が改善されることが示された。その改善効果は、低負荷では小さいが、負荷が高くなるにつれて大きくなる。この優先 ACK 方式と piggybacking 法とを併用することによって、より一層の性能の改善が期待できる。本論文の優先 ACK 方式、piggybacking 法、両者の併用方式の性能の相互比較は、今後の検討課題である。

謝辞 御討論頂いた本学高橋健一講師に感謝する。本研究は、昭和 61 年度文部省科学研究費補助金一般研究(C)(課題番号 61550240)および村田学術振興財団昭和 61 年度研究助成金によって行われたものである。

文 献

- (1) F. A. Tobagi: "Multiaccess protocols in packet communication systems", IEEE Trans. Commun., COM-28, 4, pp. 468-488 (April 1980).
- (2) S. S. Lam: "Multiple access protocols", Computer Communications Vol. I: Principles, W. Chou ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1983).
- (3) S. Tasaka: "Performance Analysis of Multiple Access Protocols", Computer Systems Series, Research Reports and Notes, MIT Press, Cambridge, MA (1986).
- (4) F. A. Tobagi and L. Kleinrock: "The effect of acknowledgment traffic on the capacity of packet-switched radio channels", IEEE Trans. Commun., COM-26, 6, pp. 815-826 (June 1978).
- (5) 田丸, 所: "CSMA-CD 方式における各種衝突制御方式とアクノリッジ方式の性能解析", 信学論(D), J65-D, 5, pp. 527-534 (昭 57-05).
- (6) 田坂, 谷, 高橋: "CSMA-CD システムにおける ACK トラヒックの解析", 信学論(B), J68-B, 10, pp. 1093-1102 (昭 60-10).
- (7) 申, 室, 長谷川: "Acknowledging Ethernet の性能評価", 信学論(D), J68-D, 10, pp. 1777-1784 (昭 60-10).
- (8) M. A. Marsan and P. Camarda: "The effect of acknowledgment traffic on the performances on multi-channel CSMA-CD protocols", Proc. IEEE INFOCOM '85, pp. 410-418 (March 1985).
- (9) S. Tasaka and Y. Ishibashi: "A reservation protocol for satellite packet communication—A performance analysis and stability considerations", IEEE Trans. Commun., COM-32, 8, pp. 920-927 (Aug. 1984).
- (10) S. Tasaka: "Multiple-access protocols for satellite packet communication networks: A performance comparison", Proc. IEEE, 72, 11, pp. 1573-1582 (Nov. 1984).
- (11) 福田, 田坂: "確率的フローオンシステムと平衡点解析", 信学誌, 66, 12, pp. 1228-1233 (昭 58-12).
- (12) A. Fukuda and S. Tasaka: "The equilibrium point analysis—A unified analytic tool for packet broadcast networks", Conf. Rec. GLOBECOM '83, pp. 1133-1140

- (Nov. 1983).
- (13) I. M. Jacobs et al. : "CPODA-A demand assignment protocol for SATNET", Proc. 5th Data Commun. Symp., pp. 2-5 to 2-9(Sept. 1977).
 - (14) L. G. Roberts: "Dynamic allocation of satellite capacity through packet reservation", NCC AFIPS Conf. Proc., pp. 711-716(1973).
 - (15) A. S. Tanenbaum: "Computer Networks", Chap. 4, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1981).

付 錄

式(29)の導出

導出の方法は、基本的には文献(9)と同じであるが、ACKを考慮した分だけ複雑になっている。まず、一つの局がTWモードを出て再びTWモードに帰ってくるまでのフレーム数を表す不規則変数をYとする。このとき、図1のモデルにリトルの公式を適用すると、次式が得られる。

$$E[Y] = aM/(F\bar{S}) - 1/1/\alpha \quad (\text{A} \cdot 1)$$

次に、一つの局において、メッセージの発生がフレーム内の第*i*スロットで起こり、それに対するACKがフレーム内の第*j*スロットで受信されるとする。この条件の下での応答時間の条件付期待値 $D_r(i, j)$ は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} D_r(i, j) &= F\{E[Y]+1\} + \{F-(i-1)\} - (F-j) \\ &= F\{E[Y]+1\} - i + 1 + j \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 2)$$

*i*と*j*は互いに独立であり、更に、*i*は $1 \leq i \leq F$ で一様分布すると仮定する。このとき、

$$E[i] = (F+1)/2 \quad (\text{A} \cdot 3)$$

となる。一方、*j*については、ACKを送信する制御サブフレームの受信位置が、一つのフレーム内に収まる場合と、二つのフレームにまたがる場合があるので、(1) $K_0 = K$ のとき、(2) $K_0 < K$ のとき、の2通りに分けて考える必要がある。

(1) $K_0 = K$ のとき

$L - L_0 + 1 \leq j \leq L - L_0 + K$ となるので、*j*はこの区間で一様分布すると近似すると、次式が得られる。

$$E[j] = -L_0 + L + (K+1)/2 \quad (\text{A} \cdot 4)$$

(2) $K_0 < K$ のとき (このとき、 $L_0 = 0$)

*j*は、区間 $F - K_0 + 1 \leq j \leq F$ と $1 \leq j \leq K - K_0$ とで、それぞれ、確率 K_0/K , $1 - K_0/K$ で一様分布すると近似すると、次式が得られる。

$$E[j] = L(K_0/K) + (K+1)/2 \quad (\text{A} \cdot 5)$$

式(A・4)と(A・5)は、次式で統一的に表現できる。

$$E[j] = -L_0 + L(K_0/K) + (K+1)/2 \quad (\text{A} \cdot 6)$$

式(A・2)を *i*と*j*について平均し、式(A・1), (A・3), (A・6)と $\alpha = F\sigma$ の関係を利用すると、式(29)が得られる。

(昭和 61 年 11 月 28 日受付, 62 年 3 月 5 日再受付)



田坂 修二

昭 46 名工大・工・電気卒。昭 51 東大大学院博士課程了。工博。同年名工大情報勤務。現在、同大助教授。昭 59 UCLA 客員研究員(文部省在外研究員)。計算機網の性能評価の研究に従事。IEEE、情報処理学会各会員。著書「Performance Analysis of Multiple Access Protocols」(MIT Press)。



深谷 和義

昭 60 名工大・工・情報卒。現在、同大学院修士課程在学中。放送形パケット通信網の研究に従事。