

無線ローカルエリアネットワークにおけるプロトコル構成法と性能評価に関する基礎研究

田坂 修二
名古屋工業大学工学部
電気情報工学科 教授

1 はじめに

ローカルエリアネットワーク (LAN) は、分散型情報処理システムの代表的な形態として、今や情報インフラストラクチャの一つとなっている。LAN の導入に伴い、ネットワーク構築時や構成変更時における配線が重要な問題となってきている。そこで、この問題を解決する一つの方法として、有線系 LAN の末端部分を無線化することが考えられる。また、最近の携帯型パソコンやワークステーションの急速な普及に伴い、これらのコンピュータを無線チャネルを用いて LAN に接続したいという要求が顕在化してきた。これらの要因により、近年、無線 LAN の研究開発や標準化作業が活発に行われている。

本研究では、代表的な無線 LAN 構築法であるマイクロセル方式を取り上げ、マイクロセル内でのプロトコル構成法と性能評価の研究を行う。無線 LAN においてもマルチメディア化の要求が高まっていることに鑑み、その MAC(Media Access Control) プロトコルとして、TDD(Time Division Duplex) チャネルを用いたアロハ形予約プロトコルを検討の対象とした。この種のプロトコルは、実用化された無線 LAN の中では、Motorola の ALTAIR[1] で採用されている。更に、無線 LAN の標準化組織である IEEE 802.11 委員会に提案されている多くのプロトコルは、これと類似の動作原理に基づいている。

本研究では、まず、伝送誤りが無視できる場合のシステム性能を評価する。平衡点解析 (Equilibrium Point Analysis: EPA)[2] の手法によって、スループット、平均メッセージ遅延及び平均応答時間を求める [3],[4]。続いて、伝送誤りを考慮し、それがシステム性能に及ぼす影響をシミュレーションによって調べている [5]。更に、マルチメディア化の第一歩として、音声・データ統合伝送について予備的な検討を行っている [6]。

2 システム構成

典型的な無線 LAN のシステム構成として、図1のような複数のマイクロセルからなる構成が考えられる [1]。本研究では、このタイプの無線 LAN の一つのマイクロセルに焦点を絞って考察する。

一つのマイクロセルは、有線系ネットワークに接続された一つの基地局と、複数の無線端末からなる。各端末は基地局とのみ通信できるものとする。一つのセルには、一つの周波数帯域が割り当てられており、これを用いて、上り(端末—基地局)方向と下り(基地局—端末)方向との両方の通信が行われる。一つのセル内の全ての無線端末は、上りチャネルを共有しており、このチャネルを用いて基地局にパケットを送信する。一方、基地局は、下りチャネルを用いて全端末にパケットを放送する。

本研究では、上りチャネルと下りチャネルとを時分割によって割り当てる TDD(Time Division Duplex) 方式を用いる。上りチャネルの MAC プロトコルとしては、ランダムアクセス予約チャネルを用いた予約プロトコルを採用する。このプロトコルを、ここでは、TDD アロハ形予約プロトコル (TDD ALOHA—Reservation protocol) と呼ぶ。

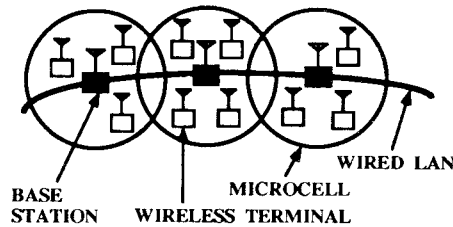


図 1: システム構成

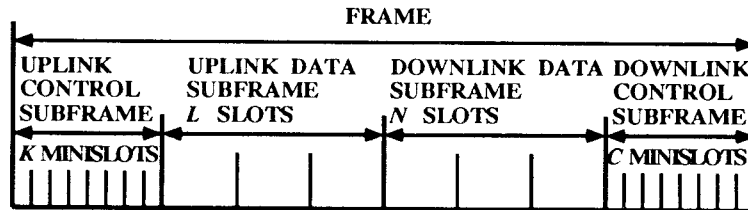


図 2: TDD アロハ形予約プロトコルのチャネルフレーム構成

3 TDD アロハ形予約プロトコル

このプロトコルでは、基地局による集中制御が行われ、図2のようなフレーム構成の無線チャネルが用いられる。フレーム内の各スロットの長さは1データパケット伝送時間に等しく、各小スロットの長さは1制御パケット伝送時間に等しい。制御パケットには、予約パケットとチャネル割当てパケットの2種類がある。

あるフレームでメッセージを発生した端末は、次のフレームからフレーム当たり一定の確率 β で予約パケットの送信を行う。予約パケットの送信は、上り制御サブフレームの K 個の小スロットの中から、等確率で一つの小スロットを選んで行われる。予約パケットの送信に成功すると、その端末は、基地局内の予約待ち行列に加わる。基地局は、待ち行列の先頭の端末から順に、以後のフレームの上りデータサブフレーム内のまだ割り当てていないスロットを、予約パケットに示されたスロット数だけ連続的に割り当てる。そして、基地局は同じフレームの下り制御サブフレームの小スロットを用いて、該当端末にチャネル割当てパケットを送信する。端末は、割り当てられたスロットを用いて、発生メッセージを基地局に送信する。予約パケットの送信に失敗した端末は、次のフレームから確率 β で再送を行う。

基地局は、自セルまたは他セルの端末から自セル宛のメッセージを受信すると、それを下り方向待ち行列に加える。下り方向待ち行列に加わったメッセージは、先着順に下りデータサブフレーム内のスロットを用いて、宛先の端末に送信される。一方、基地局は、他セルに向けられたメッセージを受信した場合には、そのメッセージを外方向待ち行列に加える。この待ち行列に加えられたメッセージは、有線 LAN を経由して相手端末の所属するセルの基地局に送信される。

4 性能評価

最初に、4.1~4.3 で、伝送誤りが無視できる場合のシステム性能を、平衡点解析 (EPA) の手法により解析的にモデル化し評価する。次に、4.4 で伝送誤りを考慮した場合のシミュレーションによる評価について簡単に述べる。

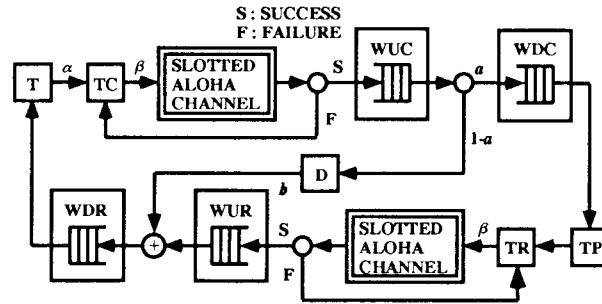


図 3: TDD アロハ予約プロトコルの近似モデル

4.1 モデル化のための仮定

まず、パケットの衝突以外の誤りは無視できるものとする。セル内の端末数を M とし、各端末はフレーム当たり確率 α で、フレームの終了時点でメッセージを発生する。一つのメッセージは一個以上のパケットからなり、その数は平均 h_c の幾何分布をなす。一つのメッセージの宛先が同じセル内の端末である確率を a 、他セル端末である確率を $1-a$ とする。あるフレームで自セル宛のメッセージを基地局が受信し終えた場合、基地局はそのフレームの終了時点でそれを下り方向待ち行列に加える。あるフレームで、基地局が自セル宛のメッセージを送信し終わると、相手端末は次のフレームの終了時点で一つの応答メッセージを発生する。この場合の応答メッセージの長さは、平均 h_l の幾何分布に従って決定される。あるフレームで他セル宛のメッセージを基地局が受信し終えた場合、その次のフレームからフレーム当たり確率 b で、相手端末からの応答メッセージが基地局に到着する。その応答メッセージは、そのフレームの終了時点で、基地局内の下り方向待ち行列に加えられる。この場合の応答メッセージの長さは、平均 h_o の幾何分布に従う。各端末は、一つのメッセージを発生すると、それに対応した応答メッセージを受信し終えるまで、次のメッセージを発生しない。

4.2 モデル図

EPA のためのこのシステムの近似モデルを図 3 に示す。モード遷移はフレームの開始時点で起こるものとする。 T モードは、端末が送信すべきメッセージを持っていない状態を表す。 TC モードは、端末が送信すべきメッセージを持っているが、まだ、予約パケットの送信に成功していない状態である。 WUC モードは、端末が基地局から上りデータサブフレーム内のスロットを割り当てられている状態を表す。 D モードは、他セル宛のメッセージを基地局が受信し終えたが、それに対応した応答メッセージがまだ基地局に到着していない状態を表す。 WDC モードは、基地局が下りデータサブフレーム内のスロットを用いて、メッセージを送信しようとしている状態を表す。 TP モードは、相手端末が応答メッセージ送信の準備をしている状態を表す。また、 TR 、 WUR 、 WDR の各モードは、全て、相手端末による応答メッセージ送信を表したものであり、各々、 TC 、 WUC 、 WDC の各モードに対応している。

このモデルを EPA によって解析した。解析の詳細は、文献 [4] を参照されたい。なお、文献 [3] では、相手端末が応答メッセージを返送しない場合のモデル化と解析が行われている。

性能の評価尺度として、スループット、平均メッセージ遅延、平均応答時間を用いる。まず、上りスループット \bar{S}_U を、1 パケット伝送時間当りに送信される上り方向のパケットの平均数、下りスループット \bar{S}_D を、1 パケット伝送時間当りに送信される下り方向のパケットの平均数と定義する。上り平均メッセージ遅延 D_U を、端末でメッセージまたは応答メッセージが発生してから、それが基地局で完全に受信されるまでの平均スロット数と定義する。また、下り平均メッセージ

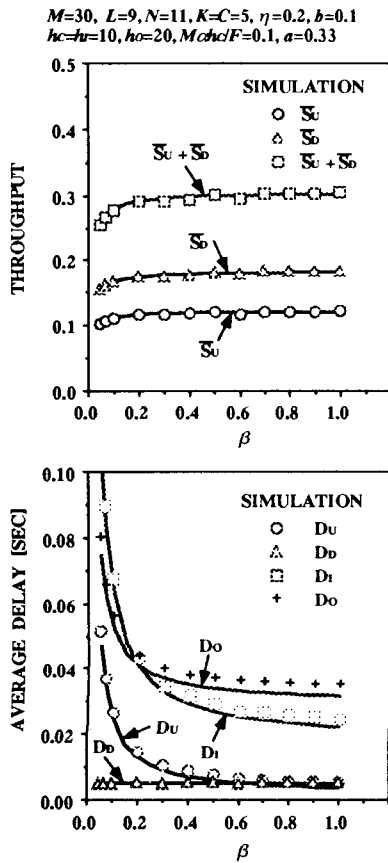


図 4: スループット及び平均遅延と β との関係 (1)

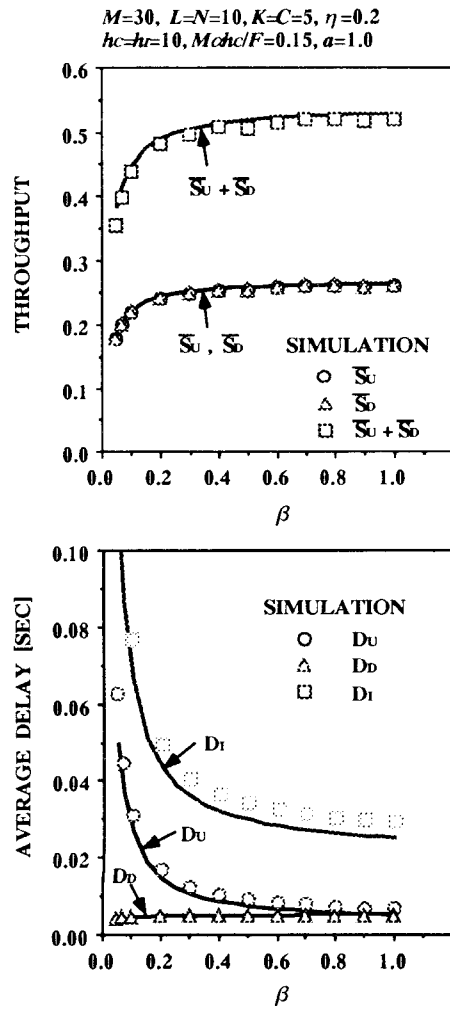


図 5: スループット及び平均遅延と β との関係 (2)

遅延 D_D を、基地局でメッセージまたは応答メッセージが送信可能となってから、それが端末で完全に受信されるまでの平均スロット数と定義する。更に、自セル宛のメッセージに対する平均応答時間 D_I を、一つの端末が自セル内の他端末宛のメッセージを発生してからそれに対する応答メッセージを受信し終えるまでの平均スロット数、他セル宛のメッセージに対する平均応答時間 D_O を、一つの端末が他セルの端末宛のメッセージを発生してからそれに対する応答メッセージを受信し終えるまでの平均スロット数と定義する。

4.3 数値例

EPA による理論値と対応するシミュレーション結果を以下に示す。図での表記法は、EPA の慣例 [2] に従っている。

図 4 と図 5 に、スループット及び平均遅延 (平均メッセージ遅延または平均応答時間) と送信確率 β との関係を示す。これらの図において、スループットと平均メッセージ遅延に関しては、理論値とシミュレーション値とは良く一致していることが分かる。また、平均応答時間については、理論値とシミュレーション値との間に幾分の差が見られる場合がある。しかし、全般に EPA による解析結果の精度は十分高いことが分かる。

次に、上りデータサブフレーム長 L と下りデータサブフレーム長 N の値を変化させたときの

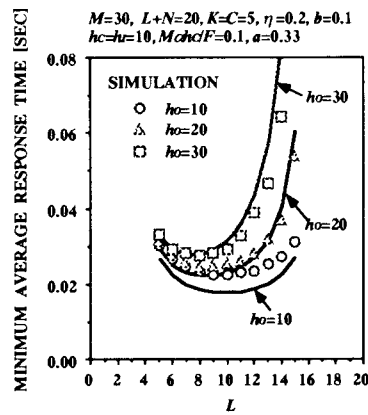


図 6: 最小平均応答時間と L との関係

システム性能への影響を検討する。 L の値を大きくし、 N の値を小さくするほど、上り平均メッセージ遅延の値は小さくなり、下り平均メッセージ遅延の値は大きくなることは容易に予想できる。ここで、このプロトコル設計の際に問題となるのは、システム性能を最適にする L と N の比である。

そこで、図 6 に、最小平均応答時間の値を L の関数として示す。ここで、最小平均応答時間とは、システムが安定であるという条件の下で β の値を変化させて、平均応答時間を最小にしたものである。図では、 h_0 の値を 10, 20, 30 と変化させている。この図の理論値から、システム性能が最も良くなる L の値は、各々、 10, 9, 7 であることが分かる。また、シミュレーション値においてもほぼ同じ結果が見られる。図 6 の条件の下では、 h_0 の値が大きいほど、下りチャンネルのトラヒック量が上りチャンネルのトラヒック量と比較して大きくなる。従って、 h_0 の値が大きいほど、 N の値を大きくして、 L の値を小さくすべきであるということになる。

4.4 伝送誤りを考慮した場合の性能評価

伝送誤りを考慮すると解析モデルの構築が困難になるため、シミュレーションによる性能評価を行った。まず、負荷や平均メッセージ長を変化させて、パケット誤り率とスループット及び平均メッセージ遅延との関係を調べた。更に、一定のパケット誤り率という条件の下での、予約チャンネルとデータチャンネルとの最適なチャンネル容量比についても考察した。その結果、次のようなことが明らかになった [5]。

- パケット誤り率が変化しても、送信確率 β の最適値はほとんど変化しない。
- 負荷や平均メッセージ長の大きな場合ほど、パケット誤り率がシステム性能に及ぼす影響は大きい。
- パケット誤り率が大きい場合には、1チャンネルフレームにおける上り制御サブフレームの容量に対する最適なデータサブフレームの容量は小さくなる。

5 音声・データ統合伝送

本研究では、無線 LAN マルチメディア化のための一検討として、アロハ形予約プロトコルによる音声・データ統合伝送方式のシミュレーションによる性能評価も行った。更に、無線チャンネルによる音声・データ統合伝送のためのプロトコルとしてこれまでよく研究が行われている PRMA

との比較も行った。ここで用いたアロハ予約プロトコルは、PRMA と同一条件での比較を可能にするために、上り・下りのチャンネルを周波数分割 (Frequency Division Duplex) で実現している。

与えられた値以下の音声パケット欠落確率であるという条件の下で、二つの方式の平均メッセージ遅延を比較した。その結果、端末数があまり多くなければ、広範囲のデータメッセージ長に対して、アロハ予約プロトコルの平均メッセージ遅延は、PRMA のそれよりも小さいことが分かった。この平均メッセージ遅延の差は、データメッセージ長が長くなるほど、またチャンネル伝送速度が増加するほど、大きくなる。より詳細な結果は、文献 [6] を参照されたい。

6 おわりに

本研究では、まず、伝送誤りが無視できる場合の TDD アロハ予約プロトコルの性能を、平衡点解析 (EPA) の手法により解析し、その精度をシミュレーションによって調べた。その結果、スループットや平均メッセージ遅延に関しては、理論値とシミュレーション値とは良く一致した。一方、平均応答時間については、理論値とシミュレーション値との間には、幾分差が見られた。また、上りデータサブフレームのスロット数 L と下りデータサブフレームのスロット数 N とは、平均メッセージ長や負荷が大きいくほど、システム性能に大きな影響を及ぼすことも分かった。

更に、伝送誤りを考慮した場合や音声・データ統合伝送方式の性能も評価した。

本研究では、各サブフレーム長を固定として議論した。しかし、TDD チャンネルの特徴を活用するためには、トラヒック状況の変化に応じて、各サブフレームの容量を動的に変化させることが望ましい。更に、複数のセルを対象とした場合や、データトラヒックのみならず音声・ビデオまで含めたマルチメディアトラヒックを考慮した場合のモデル化や解析を行うことも重要である。

最後に、本研究の実施に当り、多大な御援助を賜った (財) 高柳記念電子科学技術振興財団ならびに関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- [1] D. Buchholz, P. Odlyzko, M. Taylor and R. White, "Wireless in-building network architecture and protocols", *IEEE Network Mag.*, vol.5, pp.31-38, Nov. 1991.
- [2] S. Tasaka, *Performance Analysis of Multiple Access Protocols*, Cambridge, MA: The MIT Press, 1986.
- [3] T. Suzuki and S. Tasaka, "A contention-based reservation protocol using a TDD channel for wireless local area networks: A performance analysis", *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp.1010-1016, May 1993.
- [4] 鈴木隆宏, 田坂修二, "上り下りチャンネル容量割当を考慮した TDD チャンネル無線 LAN の性能解析", 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol.J76-B-I, No.12, pp.933-943, 1993 年 12 月.
- [5] 鈴木隆宏, 田坂修二, 石橋豊, "伝送誤りを考慮した TDD ALOHA-Reservation 無線 LAN の性能評価", 電子情報通信学会技術研究報告 IN93-43, 1993 年 8 月.
- [6] T. Suzuki, S. Tasaka and Yutaka Ishibashi, "Performance evaluation of ALOHA-Reservation for integrated voice and data wireless local area networks", *Proc. Joint Technical Conference on Circuits/Systems, Computer and Communications*, pp.454-459, July 1993.