

CTMA 方式における中央局機能向上の効果

松野浩嗣[†] 戎井徹^{††} 安藤宏行^{†††}

CSMA 方式によってパケット無線ネットワークを構築する場合の重要な問題として隠れ端末問題がある。これを解決する方法として重野ら (1992) は CTMA 方式を提案し、隠れ端末が存在しない場合でさえ CSMA 方式より伝送効率が向上するという興味ある結果を示している。本論文では、端末局のトーン検出時間と独立でかつ短い時間でトーンの検出ができるように中央局機能をあげることによって、CTMA 方式の伝送効率がより向上することをスループットの理論解析と計算機シミュレーションによって示す。

Effect of an Extra Ability to Central Station in CTMA

HIROSHI MATSUNO,[†] THORU EBISUI^{††} and HIROYUKI ANDO^{†††}

Hidden terminal problem is one of the important problems when we use CSMA as a media access control (MAC) protocol on a packet radio network. In order to eliminate the problem, Sigeno, et al. (1992) proposed a new MAC protocol, Channel Tone Multiple Access (CTMA), and show that the performance of CTMA is higher than the that of CSMA even if no hidden terminal exists. The CTMA system consists of terminals and a central station which can see all the terminals. In this paper, by both of analytic and experimental aspects, we show that an extra ability adding to the central station makes the performance of CTMA more powerful than the original one.

1. ま え が き

Kleinrock と Tobagi はパケット無線ネットワークにおけるメディアアクセス制御プロトコルとして CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 方式を提案した¹⁾。CSMA 方式ではデータの送信前に伝送メディアをアクセスして、他の端末局の信号が出ているか否かを調べる (キャリアセンス)。もしお互いに見えない端末局がある場合、これら 2 つの端末局の信号が他の端末局で衝突して少なくとも一方のデータが損傷してしまうことが起こりうる。これが「隠れ端末問題」であり、CSMA 方式によってパケット無線ネットワークを構築する場合の重要な問題の 1 つである。Kleinrock と Tobagi も CSMA 方式を提案した時点でこの問題に気づいており、文献 1) のすぐあとに続く文献 2) で隠れ

Multiple Access) 方式を提案している。

隠れ端末問題を解決するため、これまでに多くの研究がなされている。BTMA 方式と同様に、全端末局を見渡せる中央局を設置して隠れ端末による問題を解決しようとする方式として ISMA³⁾ や CTMA⁷⁾ などがあり、中央局を設置することなくこの問題を解決する試みとして STMA/DA¹⁰⁾ などがある。また、パケット送信中に送信出力を変化させることで補そく効果を誘導し、隠れ端末による性能劣化を改善しようとする方式として CSMA/PCT⁶⁾ がある。さらに、キャリアセンスをやめることで隠れ端末が生じる状況自体をなくしてしまおうとする新しい考えのプロトコル MACA⁴⁾、MACAW⁸⁾ は IEEE802.11 の基本概念として採用されている⁹⁾。このほか、IEEE802.3 (イーサネット) インターフェースを持つ 2.4 GHz 帯スペクトル拡散による装置を製作し、実際の利用環境における隠れ端末の影響について考察した報告もある¹²⁾。

以上の方式のなかで、我々は CTMA 方式に注目する。この方法は BTMA 方式と同様にすべての端末局を見渡すことができる中央局を配置するが、BTMA 方式の中央局が端末局からのデータ信号を検出してビジートーンを出していたのに対して、CTMA 方式

[†] 山口大学理学部
Faculty of Science, Yamaguchi University

^{††} ハイエレコンコワ
Hi-Elecom-Kowa

^{†††} システムリサーチ
System Research

の中央局はある種のレピータとして動作し、送信データを持つ端末局はこの中央局を介して自局のトーンを他の端末局に伝える。nonpersistent の場合においては、文献 2) で考察されているように BTMA 方式では CSMA 方式の最大スループットを超えることはできないが、文献 7) において CTMA 方式は CSMA 方式を超える最大スループットを得ることができるといふ興味ある結果が計算機シミュレーションによって示されている。

本論文ではまず、CTMA 方式のスループットの式の導出を行うことによって、CTMA 方式の有用性を理論的に確かめる。次に、端末局のトーン認識時間と独立でかつ短い時間でトーンの検出ができる機能を中央局に付加した中央局強化型 CTMA 方式を提案し、スループットの理論式を求め、先の CTMA 方式のスループットの理論式との比較によって、提案した方式の有用性を検討する。さらに、CTMA 方式と中央局強化型 CTMA 方式について計算機シミュレーションを行い、両方式の特性の違いについて実験的な考察も加える。特に伝搬遅延時間が大きく、かつトラフィックの多い状況下において、中央局強化型 CTMA 方式は CTMA 方式と比べて大きな改善がみられる。

本論文で断りなく使われる用語などについては、文献 5) を参照されたい。

2. 隠れ端末問題と CTMA 方式

2.1 隠れ端末問題

図 1 は、CSMA 方式によるパケット無線ネットワークにおける端末局間のリンクの関係を表すグラフである。節点を端末局とし、お互いに相手の信号を受信することができる節点間を枝で結ぶ。図 1(a) のように、A, B, C, D すべての節点の間に枝がある場合は、キャリアセンスにより、対応するどの端末局もチャンネルの利用状況を正確に知ることができる。図 1(b) のように B と C の 2 つの端末局の間に枝がない場合について考えてみよう。いま端末局 B から端末局 D にデータが送られているとすると、節点 A と節点 B の間には枝があるので、端末局 A はキャリアセンスにより端末局 B の存在を知ることができ、送信を差し控えることができる。しかし、節点 B と節点 C の間には枝がないため、端末局 C は端末局 B が送信中であることを知ることができない。したがって、もし端末局 C が端末局 A にデータを送信した場合、端末局 A で端末局 B と C からのデータが衝突してしまう。この場合、端末局 B と端末局 C はお互いに隠れ端末であるといい、CSMA 方式においてチャンネルのスループッ

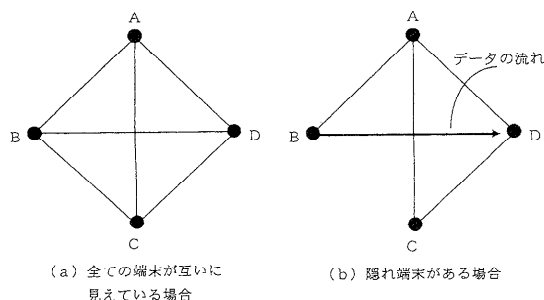


図 1 端末局のリンク関係図
Fig. 1 Link relation graph.

トの低下や伝送遅延の増加をまねく原因となる²⁾。

2.2 CTMA 方式

隠れ端末によるスループット低下の影響を避けるための方法として、CTMA 方式が文献 7) で提案されている。この方式では、使用する周波数帯域をデータ伝送用のチャンネルと、チャンネルトーン上りとチャンネルトーン下りの 3 つに分割し、全端末局を見渡せる位置に置かれた中央局がチャンネルトーン上りの信号をチャンネルトーン下りに中継する。動作の概略は以下のとおりである。詳細については文献 7) を参照されたい。

- (1) 端末局はデータの送信前にチャンネルトーンをセンスする。チャンネルトーンが上り下りともにセンスされなければ、データ伝送用チャンネルがアイドルであると判断し、チャンネルトーン上りに信号を送信する。
- (2) チャンネルトーン上りを受信した中央局は、同じ信号をチャンネルトーン下りに送信する。中央局がチャンネルトーンが衝突したと判断した場合で、上りトーンが来ている間中は、ジャム信号をチャンネルトーン下りに送信する。
- (3) チャンネルトーンを送信した端末局は、自局の送信したトーンがチャンネルトーン下りに返ってきたことを確認してからデータ伝送チャンネルにデータの送信を開始する。データ送信が完了するまで上りトーンも送信し続ける。もし、自局の送信したトーン以外の信号が返ってきた場合は再送信動作に入る。

後に行う理論解析の説明の都合上、データパケットの時間長は 1 とする。また、端末局がトーンチャンネル下りの信号の種類 (自分のトーン/他の端末局のトーン/ジャム信号) を判別するのに要する時間 (トーン認識時間と呼ぶ) を τ とし、最大伝搬遅延時間を a とする。トーン認識時間について文献 7) では、「端末局にチャンネルトーン下りの信号 ct が到着してから τ 時間以内になんかの信号が到着しても、最初の信号 ct が

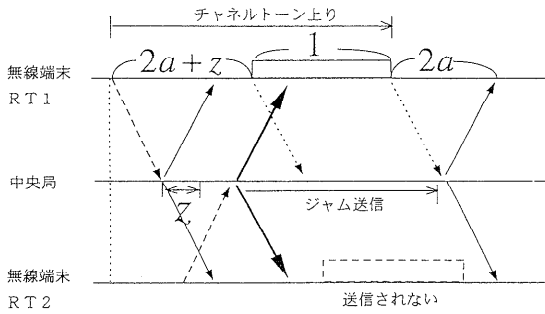


図2 片方の送信が成功する場合 (CTMA)

Fig. 2 Succeed in transmitting a data packet (CTMA).

到着してから z 時間後にはデータパケット送信の判定ができる」という仮定のもとに議論を進めている。本論文ではこれよりも自然な仮定として、トーン認識時間を「1つのチャンネルトーン下りの信号に対して、その種類を判別するのに要する時間」とする。

図2は、端末局 RT1 のトーンが中央局に到着してから z 時間より後に端末局 RT2 のトーンが中央局に到着した場合である。RT1 は自分の発したトーンが最大で時間 $2a$ 後に戻ってきてから、さらにトーン認識時間 z 後にデータパケットを送信する。中央局は RT2 のトーンが到着するとジャム信号をチャンネルトーン下りに送信するが、RT1 はデータパケットを送信し続け、RT2 はジャム信号によって、送信を取りやめる。

図3は、端末局 RT1 のトーンが発せられてから時間 $Y (< z)$ 後に端末局 RT2 のトーンが発せられた場合である。この場合も中央局はジャム信号をチャンネルトーン下りに送信するが、RT1 と RT2 ともデータパケットの送信を行わない。RT1 にジャム信号が到着するのは、上りトーンを発してから $2a+Y$ 時間後であり、それからトーン認識時間 z 後にデータパケット送信取りやめの判定を下し、上りトーンを送信を中止する。

CSMA 方式ではある端末局がデータを送信した時点から伝搬遅延時間内に他の端末がデータを送信した場合に、衝突によって両方のデータパケットが損傷してしまうことが起こりうる。すなわち、少なくとも1パケットの時間が無駄なものとなる。

これに比べて CTMA 方式では、データパケットの送信前にトーンのやりとりを行うので、1パケットの時間が衝突によって失われるという状況は生じない。このことより、文献7)の計算機シミュレーションの結果に見られるように、隠れ端末がない場合においても、CTMA 方式は CSMA 方式より高いスループットを得ることができる。

先に述べたように CTMA 方式の各端末局は、トー

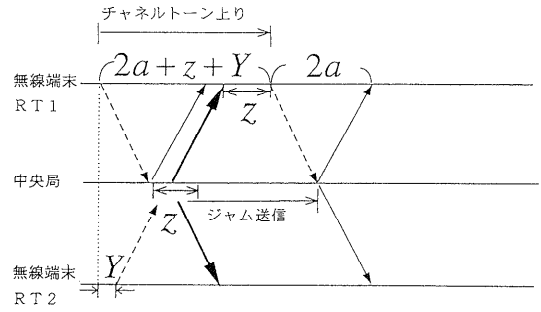


図3 両方の送信が見送られる場合 (CTMA)

Fig. 3 Leave transmitting data packets (CTMA).

ンが到着してから z 時間後にこのトーンが自局のものか、他局のものか、またはジャム信号なのかを判断する。中央局はトーンの衝突を検出すると、ただちにジャム信号をチャンネルトーン下りに返す。すなわち、ある端末局 A のトーンが中央局に到着してから z 時間内に別の端末局 B からの衝突が起これば A, B 両方の端末局の送信が見合わされ、端末局 B からの衝突が z 時間以降に起これば、端末局 A のパケットの送信のみが行われることになる。以上のことより CTMA 方式においては、トーン認識時間 z 内でトーンの衝突が起こる確率が伝送効率を左右するといえる。

以上の CTMA 方式のスループット性能を解析的に導出する。以下の議論は文献1)の nonpersistent-CSMA 方式のスループット性能の解析と同様な技法によっているので、その概略のみを示す。まず、解析で用いるパラメータについて整理する。トラフィック G を、パケット時間長あたりの新しく生じたパケットと再計画されて生じたパケットの個数の和とする。これらのパケットの生起は、単位時間あたりに平均 G 回のポアソン分布に従うものとする。正規化伝搬遅延 a を、最大伝搬遅延時間をパケット時間長で割ったものとする。さらに以下の議論では、パケット時間長 T を単位時間として (すなわち $T=1$ として) 考える。

データパケットの時間長を1としているのでデータパケットの時間長の期待値 \bar{U} は、ある端末局がパケットを送信してから時間 z の間に他の端末局が送信をしない確率に一致し、

$$\bar{U} = e^{-zG}$$

と書ける。

チャンネルトーン上りかチャンネルトーン下りにトーン信号またはジャム信号が送信されている区間を話中区間 (busy period)、送信されていない区間を空き区間 (idle period) と呼び、話中区間の期待値を \bar{B} 、空き区間の期待値を \bar{I} とすると、スループット S は

$$S = \frac{\bar{U}}{\bar{B} + \bar{I}}$$

で与えられる.

データパケットの送信が成功する場合の確率 P_{ct0} は, 図2のようにある端末局がチャネルトーン上りを送信してから時間 z の間に他の端末局が送信しない確率と等しいから,

$$P_{ct0} = e^{-zG}$$

となり, そのときの話中区間の時間長を B_{ct0} とすると,

$$B_{ct0} = 1 + 4a + z$$

となる. 一方, データパケットの送信が見送られる確率 P_{ct1} は,

$$P_{ct1} = 1 - e^{-zG}$$

で与えられる. z 時間以内に, チャネルトーン上りにいくつもの端末局がトーンを発生した状況を考える (図3). 最初の端末局がトーンを発生してから, 最後の局がトーンを発生するまでの時間を $Y (< z)$ とし時間 Y の期待値を \bar{Y} とすると, この場合の話中区間の時間長の期待値 B_{ct1} は,

$$B_{ct1} = 4a + z + \bar{Y}$$

で与えられる. Y の分布関数 $F_Y(y)$ は

$$\begin{aligned} F_Y(y) &\triangleq \Pr\{Y \leq y\} \\ &= \Pr\{\text{長さ } z-y \text{ の間隔内に到着が起らない}\} \\ &= \exp\{-G(z-y)\}, \quad (y \leq z) \end{aligned}$$

で与えられるので, 関数 $F_Y(y)$ の確率密度関数を $f_Y(y)$ とすると

$$Y = \int_0^z y f_Y(y) dy = z - \frac{1}{G}(1 - e^{-zG})$$

となる. 以上のことより,

$$B_{ct1} = 2(2a + z) - \frac{1}{G}(1 - e^{-zG})$$

となるので, 話中期間の期待値 \bar{B} は,

$$\begin{aligned} \bar{B} &= P_{ct0} B_{ct0} + P_{ct1} B_{ct1} \\ &= e^{-zG}(1 + 4a + z) + (1 - e^{-zG}) \left\{ 2(2a + z) - \frac{1}{G}(1 - e^{-zG}) \right\} \\ &= (1 - z)e^{-zG} + 2(2a + z) - \frac{1}{G} \\ &\quad - (1 - e^{-zG})^2 \end{aligned}$$

となる. また, 空き期間の期待値は

$$\bar{I} = \frac{1}{G}$$

で与えられるので, CTMA 方式のスループット S は

$$\begin{aligned} S &= \frac{\bar{U}}{\bar{B} + \bar{I}} \\ &= \frac{Ge^{-zG}}{G\{(1-z)e^{-zG} + 2(2a+z)\} - (1 - e^{-zG})^2 + 1} \end{aligned}$$

となる.

一般に, パケット無線ネットワークにおいて端末局は携帯可能なものが想定されるので, 端末局には高い機能を付加することは望めない. したがって, 伝送効率を向上させるためにトーン認識時間 z を短くすることには限界がある. それに代わる手段として, 次のように中央局の機能を強化させることを考える.

2.3 中央局機能の強化

中央局は端末局からのトーンを受信するが, 複数のトーンが衝突しているか否かを端末局のトーン認識時間 z に比べてかなり短い時間 w で判断できるとする. この時間 w を, 衝突検出時間と呼ぶ.

- 中央局は, ある端末局からのトーンをチャネルトーン上りに受信すると, 同じトーンをチャネルトーン下りに送信し, その後その端末局からの上りトーンを受信が終了するまでは, 他の端末局からの上りトーンが来てもそれを無視して動作を継続する. ただし, 衝突検出時間 w 内に複数の端末局からの上りトーンが来た場合はジャム信号を送信する.
- 端末局の動作は CTMA 方式と変わらないが, 中央局を介さないトーンを受信は行えないものとする.

すなわち, 端末局のトーン認識時間と独立でかつ短い時間でトーンの衝突の検出が中央局でできるようにする. 端末局はチャネルトーン上りにトーンを送信した後に, 自局のものでないトーンやジャム信号を受信した場合に再送信動作に入る. ここで提案した CTMA 方式を以下では「中央局強化型 CTMA 方式」と呼ぶ.

中央局に複数のトーンが到着する場合について, 衝突検出時間 w に着目して詳しく考えてみよう.

端末局と中央局との間の最大伝搬遅延時間を a とする. 図4は中央局が端末局 RT1 からのトーンを検出して, 時間 w 以降に端末局 RT2 からのトーンが到着する場合である. この場合端末局 RT1 は中央局から返された自局のトーンを時間 z 後に認識して, データ伝送用チャネルに時間長 1 のパケットを送信する. RT2 は上りトーンを送信するが, 自局のものと違うトーンが返ってきたことを認識して再送信動作に入る. したがって, RT1 の送信は成功する.

図5は中央局が端末局 RT1 からのトーンを検出し

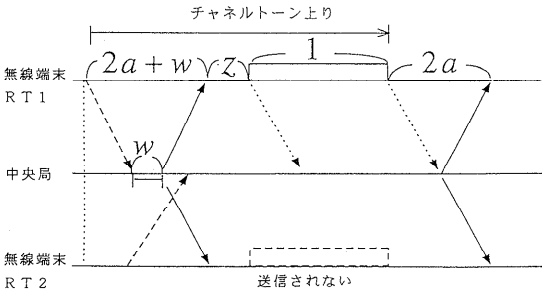


図4 片方の送信が成功する場合
 Fig. 4 Succeeded in transmitting a data packet (proposed CTMA).

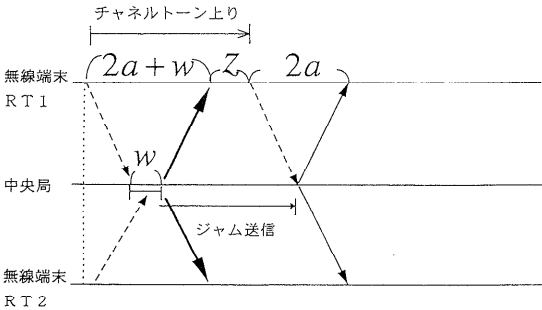


図5 両方の送信が見送られる場合
 Fig. 5 Leave transmitting data packets (proposed CTMA).

て、時間 w 以内に端末局 RT2 からのトーンが到着する場合である。この場合端末局 RT1 と RT2 ともに中央局からのジャム信号を受け取るので、両方の端末局とも再送信動作に入る。

文献 7) の CTMA 方式では、中央局は上りトーンの衝突を検出するとただちにジャム信号を送信していた。端末局はこの自局のトーン、他局のトーン、またはジャム信号が来るかによってデータの送信が可能かどうかを判断しているので、先に述べたことから分かるように、ある端末局からの上りトーンが中央局に到着してから時間 z 以内に他の端末局からの上りトーンが中央局に来る確率が、この CTMA 方式の伝送効率を左右する。

中央局強化型 CTMA 方式では、ある端末局からの上りトーンが中央局に来てから衝突検出時間 w 以内にこれ以外の上りトーンが来なければ、その端末局からの上りトーンをチャンネルトーン下りに返し、これ以降に上りトーンが来ても中央局はそのトーンをチャンネルトーン下りに返さない。衝突検出時間 w 以内に上りトーンの衝突が起これば、ジャム信号をチャンネルトーン下りに返す。これらのことと端末局では中央局からの下りトーンしか受信できないという仮定より、端末

局のトーン認識時間 z 内でトーンの衝突が起こることはない。

以上のことより、中央局強化型 CTMA 方式の伝送効率は中央局の衝突検出時間 w に依存し、端末局のトーン認識時間 z には影響されないことが分かる。つまり、CTMA 方式では端末局でトーンの衝突の検出を行っていたのに対し、中央局強化型 CTMA 方式では、中央局でトーンの衝突の検出を行い、その結果を端末局に伝達する方式であるといえる。

中央局強化型 CTMA 方式のスループット性能を表す式を導出しよう。

データパケットの送信が成功する場合の確率 P_{ck0} は、図 4 のようにチャンネルトーン上りを送信してから時間 w の間に他の端末局が送信しない確率と等しいから、

$$P_{ck0} = e^{-wG}$$

となり、そのときの話中区間の時間長を B_{ck0} とすると、

$$B_{ck0} = 1 + 4a + z + w$$

となる。一方、データパケットの送信が見送られる確率 P_{ck1} は、

$$P_{ck1} = 1 - e^{-wG}$$

で与えられる。このときの話中区間の時間長を B_{ck1} とすると、

$$B_{ck1} = 4a + z + w$$

となるので、話中期間の期待値 \bar{B} は、

$$\begin{aligned} \bar{B} &= P_{ck0}B_{ck0} + P_{ck1}B_{ck1} \\ &= e^{-wG}(1 + 4a + z + w) \\ &\quad + (1 - e^{-wG})(4a + z + w) \\ &= e^{-wG} + 4a + z + w \end{aligned}$$

となる。データパケット長の期待値は $\bar{U} = e^{-wG}$ であり、空き期間の期待値は先の CTMA 方式の場合と同様に与えられるので、中央局強化型 CTMA 方式のスループット S は

$$S = \frac{Ge^{-wG}}{G\{e^{-wG} + 4a + z + w\} + 1}$$

となる。

3. 端末局と中央局の性能の影響

ここでは、端末局の機器性能と中央局の機器性能が CTMA 方式のスループット性能にどのような影響を与えるかを調べる。これに先だって、まず、パケット無線ネットワークにおける伝搬遅延の影響について考えてみる。

現在製品化されている無線 LAN は、数十 m から 300 m 程度の伝送距離で、伝送速度は 1 Mbps から

速くて 10 Mbps 程度のものである¹¹⁾。電波の到達範囲が 50 m, 伝送速度が 2 Mbps とし, 1 パケットの長さを 1000 ビットとすると正規化伝搬遅延 a は $a = 3.3 \times 10^{-4}$ という十分に小さな値となる。文献 7) では, このように伝搬遅延の小さい状況で CTMA 方式が有効であることが指摘されている。

現在, 無線において数百 Mbps を実現するための研究開発が積極的に行われており¹¹⁾, また最近では, 高速なアクセス回線を提供する手段として 300 m から 10 km を超える伝送距離を視野にいたした WLL (Wireless Local Loop) が注目されている¹³⁾。このように, 数十 Mbps の伝送速度のデータを数 km の伝送範囲でやりとりするパケット無線システムを実現するための技術的背景は整いつつあることから, 我々は, 高速かつ広範囲なパケット無線ネットワークに焦点をあてて考察する。

1 パケットの長さが 1000 ビット, 伝送速度が 10 Mbps, 伝送距離が 3 km の状況を考えてみよう。1 パケットの時間長は 0.1 ms, 伝搬時間は 0.01 ms となり正規化伝搬遅延 $a = 0.1$ となる。このように, 伝送速度が速くなり, 伝送距離が増大するほど, 正規化伝搬遅延の影響は大きくなっていく。さらに, 端末局内のネットワーク制御装置の動作時間も伝搬遅延として加えなくてはならないことにも注意する必要がある。以上のことから, 本論文では, パケット無線ネットワークにおいて, 主に伝搬遅延が大きい状況を対象とし, 以下の議論では, 正規化伝搬遅延が $a = 0.1$ の場合を中心に考察する。

図 6 に 2.2 節と 2.3 節で述べられた各方式の $a = 0.1$ の場合のトラフィックスループット特性を示す。トーン認識時間 z は正規化伝搬遅延時間の半分, すなわち $z = 0.05$ とした。また中央局の衝突検出時間 w はトーン認識時間 z の 10 分の 1 としており (すなわち $w = 0.005$), これは中央局の性能が端末局の性能の 10 倍であるという仮定を反映している。この図より, 高トラフィック時において CTMA 方式と中央局強化型 CTMA 方式との性能の間に大きな差が出てくることが分かる。

次に, トーン認識時間 z の値によって 2 つの CTMA 方式の性能の差がどうなるかを正規化伝搬遅延 $a = 0.1$ の場合について考えてみよう。

図 7 は CTMA 方式の場合であるが, z が大きくなると高トラフィック時においてスループット性能が極端に低下することが分かる。これに対して, 図 8 の中央局強化型 CTMA 方式の場合は z が大きくなってもスループット性能がそれほど低下しない。トーン認識

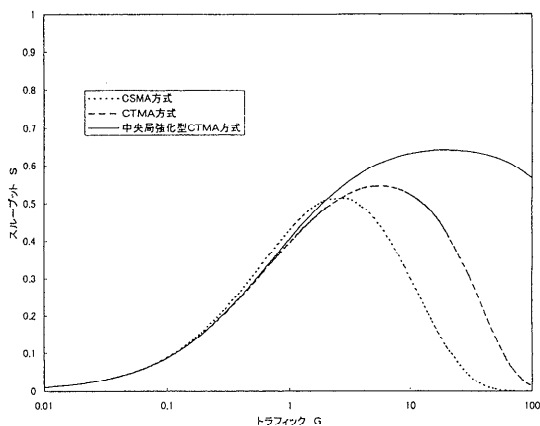


図 6 トラフィックスループット特性 ($a = 0.1$)

Fig. 6 Traffic versus throughput characteristics ($a = 0.1$).

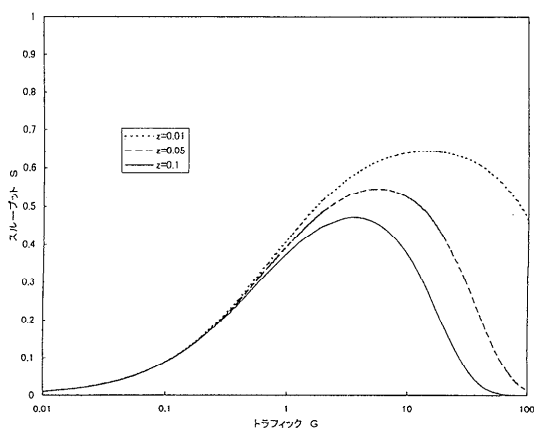


図 7 トーン認識時間 z による CTMA 方式の特性の違い ($a = 0.1$)

Fig. 7 Performances of CTMA with respect to tone recognition time z ($a = 0.1$).

時間 z は端末局の性能を反映していると考えられるので, 以上のことは中央局強化型 CTMA 方式の導入によって, システム全体の性能を低下させることなく端末局の構成を簡単にできることを示している。一般に, 端末局として用いられるのはノートパソコン程度のものであることが想定される。端末局のコストや大きさなどの要因や, 中央局のスケールメリットが活かせるという面からこの中央局強化型 CTMA 方式は望ましい特徴を持つといえる。

図 9 は, 伝搬遅延時間が短く ($a = 0.01$) 端末局と中央局のネットワーク制御機器の性能が十分に良い場合 ($z = 0.005, w = 0.0005$) の各方式のスループット性能の比較である。この図から, 高トラフィック時においては CSMA 方式は他の方式との間に性能の開きが出るものの, 2 つの CTMA 方式の差はほとんど

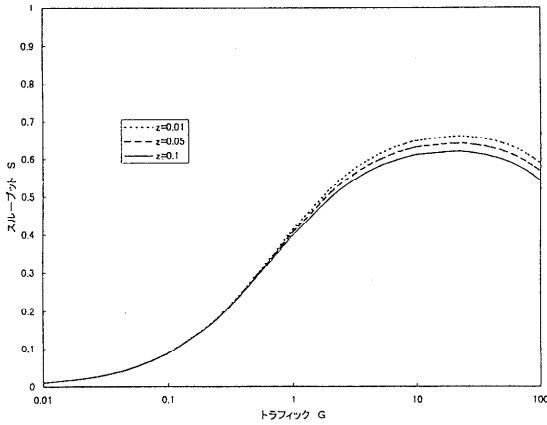


図8 トーン認識時間 z による中央局強化型 CTMA 方式の特性の違い ($a = 0.1$)

Fig. 8 Performances of proposed CTMA with respect to tone recognition time z ($a = 0.1$).

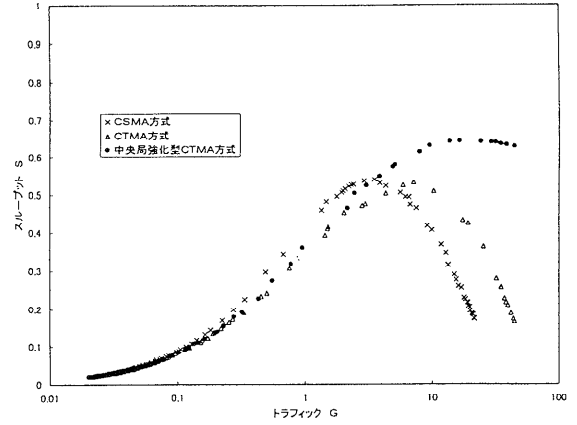


図10 トラフィック-スループット特性のシミュレーション結果 ($a = 0.1$)

Fig. 10 Traffic versus throughput characteristics from simulation ($a = 0.1$).

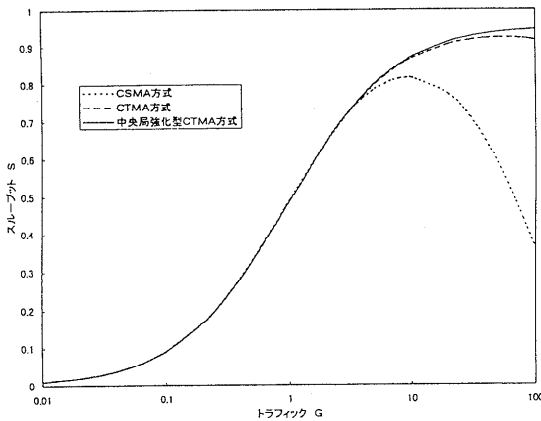


図9 トラフィック-スループット特性 ($a = 0.01$)

Fig. 9 Traffic versus throughput characteristics ($a = 0.01$).

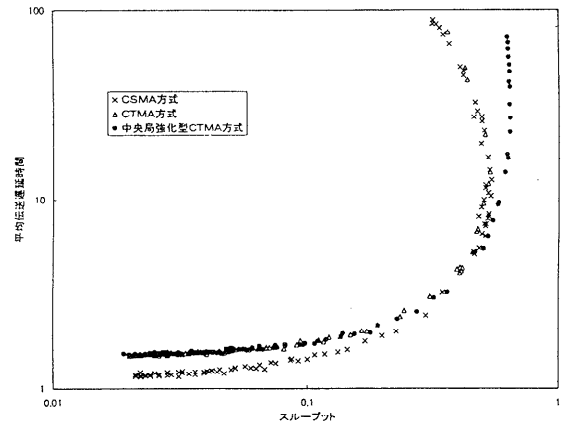


図11 スループット-平均伝送遅延時間特性 ($a = 0.1$)

Fig. 11 Throughput-delay tradeoffs from simulation ($a = 0.1$).

ないことが読みとれる。すなわち伝搬遅延時間が短く端末局の性能が十分に良い場合は、本論文のような中央局機能強化による影響は少ないといえる。

4. 計算機シミュレーション

CSMA 方式, CTMA 方式, および中央局強化型 CTMA 方式の性能を比較するために計算機シミュレーションによる実験を行った。中央局を中心にして伝搬時間 τ に対応する距離を半径とする円周上に 50 個の端末局を配置した。50 個の端末局はすべてお互いに通信が可能な状況にある, すなわち隠れ端末は存在しないものとする。端末局のトーン認識時間 z の 2 倍の値を伝搬遅延時間 τ とした。正規化伝搬遅延 a の値は可変として, パケット長は $T_f = \tau/a$ とした。衝突検出時間は理論解析の場合と同様に, 端末局のトーン

認識時間の 10 分の 1 の値, すなわち $w = z/10$ とした。他局のトーンやジャム信号を受信したときは, ランダムに設定される時間を待ってから再送信を行う。

理論解析の場合と同様に, $a = 0.1$ の場合のトラフィック-スループット特性のシミュレーション結果を図 10 に示す。この結果は図 6 のグラフによく一致しており, 理論解析の正当性を裏づけている。

図 11 に $a = 0.1$ の場合のスループット-平均伝送遅延時間特性を示す。平均伝送遅延時間とは, 端末局が送信要求を起こしたときから, 送信成功し, パケットの送信が終了するまでの時間の平均をパケット長で正規化したものである。これについても先のトラフィック-スループット特性と同様なことがいえ, このように伝搬遅延が比較的大きい場合は, スループットが大きくなるにつれて 2 つの CTMA 方式の性能に開きが

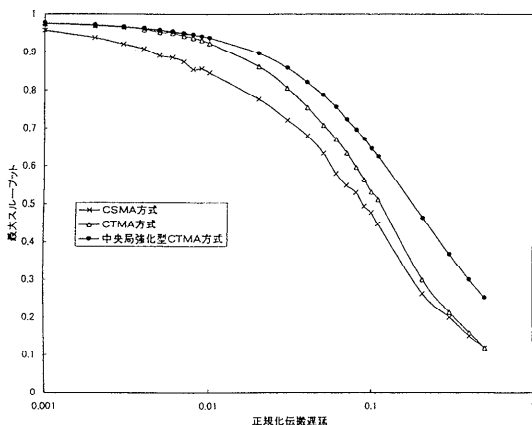


図12 正規化伝搬遅延-最大スループット特性
Fig.12 Effect of propagation delay on maximum throughput from simulation.

出てくる。

図12に正規化伝搬遅延-最大スループット特性を示す。正規化伝搬遅延の増加に従って最大スループットは低下するが、CTMA方式はCSMA方式に比べて低下の割合はゆるやかである。中央局強化型CTMA方式については、さらにその割合はゆるやかになっていく。

5. むすび

CTMA方式における中央局のトーン検出能力に着目して、その性能を向上させる1つの方法を提案し、伝搬遅延が大きくかつ高トラフィックの場合に、この方法によってより伝送効率が高まることをスループット性能の解析と計算機シミュレーションによって確認した。

文献7)では、伝搬遅延が小さい場合にCTMA方式はCSMA方式に比べて優れた性能を持つと結論づけている。つまりこの論文では、屋内の無線LANを想定していると考えられる。これに対して本論文で提案した方式は、数km、数十kmの広範囲なネットワークの場合や、送受信機を含むネットワーク制御装置の動作速度が遅い場合などの、伝搬遅延が大きい状況下において有効である。伝搬遅延が小さくネットワーク制御装置の性能が十分に良い場合には、中央局の構成がシンプルで済むという点から、文献7)の方が有利であると考えられる。

本論文では、CTMA方式において、端末局がトーンを認識するのに多くの時間を要しても、中央局がトーンを検出する時間が十分小さければ全体のネットワークシステムとしては高い性能を維持できることを示し

た。中央局の設置は隠れ端末問題を解決するための手段としてだけでなく、一般に技術的制約の多い端末局の性能を補うための手段としても利用できるという視点を、この事実に見いだすことができる。

中央局の構成方法について、本論文ではその設計指針だけを述べているが、中央局でのトーン信号衝突の検出方法をはじめとする、その具体的な実現方法について考察することが今後の課題の1つである。

謝辞 本論文に対して、多くの有益なコメントをいただいた査読者の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) Kleinrock, L. and Tobagi, F.A.: 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 (1975).
- 2) Tobagi, F.A. and Kleinrock, L.: 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 (1975).
- 3) 椋本介士, 福田 明: アイドル信号多元接続(ISMA)方式による無線パケット通信システム, 電子通信学会論文誌, Vol.J64-B, No.10, pp.1107-1114 (1981).
- 4) Karn, P.: MACA - A new channel access protocol for packet radio, *ARRL/CRRL Amateur Radio Ninth Computer Networking Conf.*, pp.134-140 (1990).
- 5) 秦 正人, 山内雪路(編): パケット無線ネットワーク, CQ出版社(1990).
- 6) 石田 朗, 六浦光一, 山本 幹, 岡田博美, 手塚慶一: 隠れ端末を考慮したCSMAパケット無線網における時変出力制御の基本特性, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J74-B-I, No.9, pp.707-710 (1991).
- 7) 重野 寛, 大西祥浩, 横山光男, 松下 温: 隠れ端末問題を考慮したCTMA方式の評価, 電子情報通信学会技術研究報告, SAT92-18(IN92-17) (1992).
- 8) Bharghavan, V., Demers, A., Shenker, S., and Zhang, L.: MACAW: A media access protocol for wireless LANs, *Proc. SIGCOMM'94 Conf.*, ACM, pp.212-225 (1994).
- 9) Tanenbaum, A.S.: *Computer Networks* (third edition), Prentice-Hall (1996).
- 10) 重野 寛, 松下 温: 指向性アンテナを利用した無線LANの対等分散型MAC方式STMA/DAとその性能評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-B-I, No.2, pp.41-50 (1996).

- 11) 松下 温, 中川正雄編著: ワイヤレス LAN アーキテクチャ, 共立出版, (1996).
- 12) 浅見重幸, 田子 晃, 小林 保: 2.4 GHz 帯スペクトル拡散無線 LAN の性能評価, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J79-B-I, No.8, pp.519-527 (1996).
- 13) 見えてきたローカル無線網, 日経コミュニケーション, No.254, pp.132-149 (1997).

(平成 9 年 3 月 26 日受付)

(平成 10 年 1 月 16 日採録)



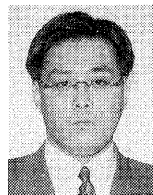
松野 浩嗣 (正会員)

昭和 35 年生。昭和 59 年山口大学大学院工学研究科修士課程修了。同年学校法人第二麻生学園山口短期大学講師。昭和 62~平成 6 年大島商船高等専門学校勤務。平成 7 年 4 月山口大学理学部自然情報科学科助教授。計算機科学の教育と研究に従事。計算機ネットワークの運用と構築技術にも興味を持つ。電子情報通信学会会員。理学博士。



戎井 徹

昭和 47 年生。平成 8 年山口大学理学部物理学科卒業。同年(株)ハイエレクトロニクス入社。山口大学在学中, パケット無線ネットワークの研究に従事。



安藤 宏行 (正会員)

昭和 49 年生。平成 7 年豊田工業高等専門学校電気工学科卒業。平成 7 年山口大学理学部物理学科編入学。平成 9 年(株)システムリサーチ入社。山口大学在学中, パケット無線ネットワークの研究に従事。