

PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/MCA 方式の衝突回避スロットの可変化

森 谷 修[†] 小 林 浩^{††}

Synchronous CSMA with multiple CA 方式の運用性の改善を図るべく、負荷トラヒックに応じて衝突回避 (CA) 用スロット数を適応的に設定する可変スロット方式について考察した。実現にあたっては、同時アクセス数の予測法や CA スロット数の設定法の確立がポイントとなる。実装例を用いたシミュレーションにより特性を評価したところ、多数の CA スロットを装備した固定スロット方式とほぼ同等の性能を発揮しながら、CA スロットの有効利用率を高めることによって、ネットワーク資源の効率かつ安定な運用を実現した。さらに、固定スロット方式では回避できなかったシステム管理者がネットワーク長や伝送速度に応じて CA スロット数を設定しなければならなかった運用管理上の煩雑さを回避できる見通しを得た。

Variable Collision Avoidance Slots for Synchronous CSMA/MCA System on PTMP Access Networks

OSAMU MORIYA[†] and HIROSHI KOBAYASHI^{††}

A contention-based access system with variable collision avoidance slots has been developed in order to improve operation abilities of a synchronous CSMA/MCA (carrier sense multiple access with multiple collision avoidance) system. This proposed system sets the number of CA slots adaptively according to offered traffic. Simulation results show that it provides high throughput performances comparable to those of fixed-slot systems with a lot of CA slots, avoiding the waste of network resources and complicated network managements on fixed-slots systems.

1. ま え が き

近年、ADSL やケーブルモデムを用いた常時接続型の高速度インターネットアクセスサービスが、先進国の都市部や市街地を中心に急速に普及してきている。今後は人口密度の少ない郊外や過疎地さらには発展途上国などへの展開、すなわちデジタルデバイド解消のためのアクセスネットワークの整備が課題となってくる。

こうした地域で、短期間で経済性良くアクセスネットワークの整備を進めていくには、既設の電話線や光ファイバなどの有線伝送媒体はもとより、マイクロ波帯などの無線伝送媒体の利用、すなわち劣悪な伝送環境での運用も考慮のうえ、半径数十キロメートルにも及ぶ広範囲なエリアで、伝送媒体を効率良く共有し合う新たなアクセス方式の開発が必要である¹⁾。

HFC (Hybrid Fiber and Coaxial) や加入者無線アクセス (FWA; Fixed Wireless Access) など、広帯域な伝送媒体を複数の加入者で共有し合う PTMP (Point-To-MultiPoint) 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/CD (以下、S-CSMA/CD と略) 方式は、イーサネットとの整合性に優れた CSMA 系のアクセス方式を採用しており、アクセス遅延時間が少ないという特徴を活かしながら、最大ネットワーク長を最短パケット長 (最短 MAC フレーム長) に依存することなく任意に設定することを可能とするものであった^{2),3)}。

特に、アクセス遅延時間が少ないことは、ウィンドサイズが小さくても高速広帯域サービスを実現できることから、パケット抜けが頻発する劣悪な伝送環境にも適応しやすいことを意味する。HFC で多用されている DOCSIS (Data-Over-Cable Service Interface Specifications)^{1),12)} のように、2~4 msec 程度の予約周期の中で予約手続きを行う方式にはない特徴といえよう。

しかしながら、S-CSMA/CD 方式には、往復伝播

[†] 株式会社東芝社会ネットワークインフラ社
Social Network & Infrastructure Systems Company

^{††} 東京電機大学情報環境学部
School of Information Environment, Tokyo Denki University

遅延時間の介在にともなうアクセスの集中化と、上りペイロードの送信時間の削減という2つの要因の相乗によって、ネットワーク長が長くなるほどスループット特性が急速に劣化するという課題が潜んでいる。

こうした事情をふまえて提案された Synchronous CSMA with Multiple CA (以下、S-CSMA/MCA と略) 方式は、衝突回避用スロット (以下、CA スロットと略) を固定的に複数個設定することによってアクセスの分散化を促し、スループット特性の改善を図ろうとするものであった。同方式は衝突発生確率の低減に顕著な効果があり、S-CSMA/CD 方式はもとより、短ネットワーク長領域でもこれまでの CSMA/CD 方式をも凌ぐ高い潜在能力を有することが明らかになった。そして、その潜在能力を最大限に引き出すためには、さらに CA スロット数の可変性や、送信タイミングの前倒し (フライングスタート) など、いくつかの課題克服が必要なことが指摘された⁴⁾。

本論文は、CA スロット数の可変性 (以下、可変スロット方式と略) の有用性について考察しようとするもので、負荷トラヒックやネットワーク長に応じて適応的に個数を可変制御することによって、ネットワーク資源の効率的な利用を実現するとともに、固定スロット方式では不可欠なネットワーク敷設工事などの際の煩雑なパラメータ設定作業を回避することを目的とする。

なお、トラヒックに対して適応的な制御を行おうとするアクセス制御方式として、adaptive tree walk protocol¹⁰⁾ や adaptive random/reservation MAC protocol¹³⁾ などがある。前者は競合を限定するため複数個設けた競合スロットを介して局間で何度か情報交換し合うもので、本論文が目的とする長距離ネットワークには適用し難い方式である。また後者はトラヒックに応じて帯域制御用スロットと予約用スロットの比率を変更しようとするもので、ネットワーク内の遅延時間が極端に大きい衛星通信用のプロトコルであり、本論文と目的を異にする。

以下、S-CSMA/MCA 方式の概要とその課題を整理した後、可変スロット方式の実現においてポイントとなる同時アクセス数の予測と CA スロット数の設定法について論じ、さらにシミュレーション結果をもとに固定スロット方式と対比しながら方式の有効性について考察する。また、付録に同時アクセス数の予測のベースとした興味あるシミュレーションデータ例を示した。

2. PTMP 型ネットワークと Synchronous CSMA/MCA 方式

本論文が対象とするネットワークは、1 台のハブ装置 (SCH) と複数台の加入者装置 (CPE) とで伝送媒体を共有し合う PTMP 型と呼ばれるもので、たとえば HFC や FTTH (Fiber To The Home) などの有線ネットワーク、あるいはマイクロ波帯やミリ波帯を利用した FWA (Fixed Wireless Access) などの加入者無線アクセスネットワーク¹⁾ などがある。インターネット接続サービスや電子メールサービスなどを主要なサービスとする同ネットワークでは、下り方向の情報はサービスノード (インターネットとの接続ゲートウェイや電子メールサーバなどの設置サイト) 側において多重化が行われるため、アクセスネットワーク内では多重化にともなう競合制御は必要ないが、上り方向は複数の CPE からの情報送信が競合し合うためなんらかのアクセス制御が必要になる^{2)~4)}。

ところで、PTMP 型ネットワークは、対等分散型制御を基本とするイーサネットなどの LAN にはない特徴を備えている。すなわち、対等分散型のアクセス方式では、キャリア検知や衝突検出を個々の CPE が自らの責任において行うことになっている。これに対して、PTMP 型では CPE に代わって、SCH がキャリア検知や衝突検出を行い、さらに MAC フレームなどの送信タイミングを精度良く制御することができる^{8),9)}。この特徴を活かすことによって、対等分散を基本とする LAN の世界では考えられなかったアクセス方式や特性の実現が可能になる。

文献 4) で提案された S-CSMA/MCA 方式は、この特徴を利用したもので、その骨子は、(a) SCH へのフレーム信号の到着を所定のタイミングに同期させ、かつ SCH でのフレーム信号の受信レベルを等しくさせる、(b) CPE は上り MAC フレームの送信に先立って、複数個の CA スロットの中から 1 つをランダムに選択し CA フレームを送信する CA 手続きを行う、(c) SCH は CA 手続きに成功した 1 つまたは複数の CPE に対して順に MAC フレームの送信を促すことにある。

ここに (a) は、同じ CA スロットに複数の CA フレームが送信されたときに確実に衝突を検出したり、あるいは CA 手続きに成功した CPE が他の CPE からの信号と衝突しないように MAC フレームの送信タイミングを調整したりするためのベースとなるものである。(b) は、IEEE802.11 標準の無線 LAN における RTS/CTS 方式⁶⁾ と同様に、MAC フレームの送信

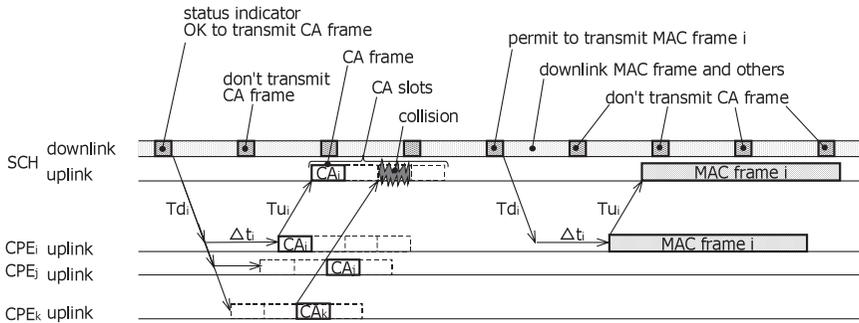


図 1 S-CSMA/MCA 方式の実装例と動作メカニズム
Fig. 1 An implementation of S-CSMA/MCA.

に先立って CA 手続きを行うものであるが、この CA 手続きの窓口 (CA スロット) を複数化し、ランダムに窓口を選択させることによってアクセスを分散化させ、CA 手続きにおける衝突発生確率を低減しようとするものである。さらに (c) は、1 回の CA 手続きで複数の CPE が成功した場合には、成功した CPE すべてについて MAC フレームの送信を行わせることによって、伝送媒体の利用効率の向上を図ろうとするものである。

そして、CA スロットの個数を n 、CA 手続きを同時に行う CPE 数 (以下、同時アクセス数と呼ぶ) を k とすると、CA フレームを受信しなかった CA スロットの平均個数 A_N 、CA フレームを 1 つだけ受信 (CA 手続き成功) した CA スロットの平均個数 A_S 、2 つ以上の CA フレームを受信 (CA 手続き失敗) した CA スロットの平均個数 A_C は、各々次式で表される。

$$A_N = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^k \times n \quad (1)$$

$$A_S = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{k-1} \times k \quad (2)$$

$$A_C = n - A_N - A_S \quad (3)$$

ここに $n = 1$ は、RTS/CTS 方式や、予約スロットを ALOHA によりアクセスする RS-ISMA 方式⁷⁾などにみられる衝突回避用あるいは予約用に 1 個のアクセススロットを備えた方式に相当する。

ところで、 k が多くなるほど A_N は減少し、逆に A_C は増加するが、 A_S は k と n に依存するピーク値を持つ。この平均ピーク値 $A_{S \max}$ は式 (4) によって表すことができ、さらにそのとき、CA スロットあたりの平均 CA 手続き成功確率 P_S は式 (5) によって表されるピーク値 $P_{S \max}$ を持つ¹⁰⁾。

$$A_{S \max} = n \times \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} \Big|_{k=n-1, n} = A_N \Big|_{k=n-1} \quad (4)$$

$$1.0 \Big|_{n=1} > P_{S \max} = \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} > 0.368 \Big|_{n=\infty} \quad (5)$$

これは、同時アクセス数が CA スロット数より 1 つ少ないか同数となったときに、 P_S は最大になる、あるいは予想される同時アクセス数と同じ個数の CA スロットを設定すれば、少なくとも平均 36.8%以上の CPE が CA 手続きに成功することを意味している。

図 1 に示す 4 個 (個数一定) の CA スロットを装備した実装例を用いたシミュレーションによる方式評価によれば、比較的短い 2.5 km のネットワーク長 (SCH と最遠端の CPE 間の距離) でも最大スループットを CSMA/CD 方式に対して 35%、S-CSMA/CD 方式に対して 56%改善でき、さらに 10~80 km の長いネットワーク長では S-CSMA/CD 方式に対して 100~200%も最大スループットを高められることが確認されている⁴⁾。

ところで、CA スロット数を増やせば、高負荷領域においてスループット特性をさらに改善できることは想像に難くない。しかしながら、過剰に CA スロットを設定すれば、CA 手続き成功に寄与する CA スロットの割合を低下させ、ネットワーク資源を固定的に浪費することになる。逆に、過少に設定すれば十分なスループット特性が得られず、これもまたネットワーク資源の効率的な利用を阻害する。さらに、ネットワークの敷設工事や構成変更の際して、運用管理者はネットワーク長や物理伝送速度などに応じて適正な CA スロット数を求め、これを入力し維持管理するなどの煩雑な作業を強いられることになる。次章に詳述する可変スロット方式によって、その解決が図られよう。

なお、図 1 において、 T_{di} , T_{ui} , Δt_i などは、(a) で述べた送信タイミングを調整するためのもので、各々の CPE i の下り伝播遅延時間、上り伝播遅延時間、送信タイミング調整時間(最大伝播遅延時間から ($T_{di} + T_{ui}$) を差引いた値)を表しており、その他の実装条件は次のとおりであるが、動作メカニズムの詳細は文献 4) を参照されたい。

(1) CA フレームは 64 ビットとし、この中には衝突検出用のランダムデータと誤り検査符号、MAC フレーム長などが含まれる。

(2) アクセス制御を行うための状態表示(SI; status indicator)信号は 64 ビットとし、この中には CA スロットの個数や CA フレームの送信許可、さらに CA 手続きに成功した CPE に対して MAC フレームの送信順序を通知するための制御情報などがビットマップ形式で表示される。さらに SI 信号は $25.6 \mu\text{sec}$ ごとに下り伝送路を介して、すべての CPE に対して放送される。

(3) CA 手続きに失敗した CPE は、CA スロットを単位とする 2 乗バックオフ処理、すなわち m 回目の失敗を行った CPE は、CA スロット区間 $[0, 2^m - 1]$ の中でランダムに CA スロットを選択して再度 CA 手続きを試みる。

3. 可変スロット方式

3.1 方式の概要と具体化例

本論文で取り上げる可変スロット方式の骨子は、(A) SCH が前回の CA 手続きにおけるアクセス状態から同時アクセス数を推定し、(B) 次回の CA 手続きにおいて発生しうる同時アクセス数の上限を予測し、(C) それに適した CA スロット数を設定することにある。

その結果、(I) 多数の CA スロットを備えた固定スロット方式並みのスループット特性や (II) 遅延特性を実現しつつ、(III) 少数の CA スロットを備えた固定スロット方式並みに CA スロットの有効利用率を高め、ひいては (IV) 効率の良い安定性に富んだシステムの実現と、CA スロット数設定の自動化による運用管理性の向上を図ろうとするものである。

以下に (A) ~ (C) に関する具体化方法を考察し、(I) ~ (IV) については 3.2 節で考察する。

(A) 同時アクセス数中央値の推定

前回 ($q - 1$ 回目) の CA 手続きで設定した CA スロット数 n_{q-1} とアクセスされなかったスロット数 $A_{N_{q-1}}$ から、同回での同時アクセス数の中央値 \tilde{k}_{q-1} は、式 (1) を変形した式 (6) によって推定できる。

$$\tilde{k}_{q-1} = \log(A_{N_{q-1}}/n_{q-1}) / \log(1 - 1/n_{q-1}) \quad (6)$$

ただし、式 (6) による推定では、同じ A_N であっても衝突した CA フレーム数 (SCH では把握できない) が多ければ、 \tilde{k}_{q-1} は少なく推定され、逆に衝突 CA フレーム数が少なければ、多く推定されるという推定誤差が潜在していることに注意する必要がある。

(B) 同時アクセス数の上限予測

同時アクセス数は前回の CA 手続きからの時間経過内に新たに生じた新規トラヒックと、前回までに CA 手続きに失敗し所定のバックオフ処理後に再度 CA 手続きを試みる再送トラヒックとに依存する。一方、CA 手続きの時間間隔は最大ネットワーク長や CA スロット数、CA 手続きに成功した CPE から送信される MAC フレームの個数とその長さなどに依存し、SCH は CA 手続きごとにその時間間隔を把握することができる。

(i) 平均負荷トラヒックは大きく変動することなく、隣接する CA 手続き間でほぼ等しい、これより、(ii) 同時アクセス数と CA 手続きの時間間隔とは相関し、両者は比例関係にあると仮定するならば、式 (7) により次回の同時アクセス数の中央値を予測することができる。

$$\hat{k}_q = \tilde{k}_{q-1} \times (T_{CA_q}/T_{CA_{q-1}}) \quad (7)$$

ただし、 $T_{CA_{q-1}}$, T_{CA_q} は各々 $q - 2$ 回目と $q - 1$ 回目、 $q - 1$ 回目と q 回目の CA 手続き間の時間間隔である。

しかしながら、上述の推定誤差や付録に示した同時アクセス数と CA 手続き時間間隔の分散のため、式 (7) で予測した中央値に対して、実際にはこれより少ない場合や多い場合が存在する。そして、予測中央値と実際値との隔たり度合いを正確に予測できないことはいうまでもない。

ところで、同時アクセス数を少な目に予測し、CA スロットを過少に設定すれば、衝突の頻発を招きスループットの劣化や遅延時間の増大など、システム性能を大きく損なうことになる。これに対して、同時アクセス数を多目に予測し、CA スロットを過剰に設定しても、一時的な上り伝送資源の浪費をとまらすが、システム性能を大きく損なうことはない。このため、予測中央値と実際値との隔たり度合いを意味する偏位係数 $\alpha (> 1)$ を導入し、 $\alpha \cdot \hat{k}_q$ を同時アクセス数の予測上限危険値と呼ぶこととする。

なお、(i) でいう平均負荷トラヒックとは、単位時間あたりの平均アクセス数(新規トラヒックと再送トラヒックの和)と平均 MAC フレーム長との積を意味し、後述の正規化平均負荷トラヒック (ρ) はこれを

物理伝送速度で正規化したものである。

また、(ii) の仮定はシミュレーションデータ例から導出したもので、付録において同時アクセス数と CA 手続きの時間間隔との相関性や比例性、さらに予測中央値や予測上限危険値の意味合いについて議論しているので参照されたい。

(C) CA スロット数の設定

式 (5) の P_s が最大となる条件と予測上限危険値から、 q 回目の CA 手続きで設定すべき CA スロット数 n_q を式 (8) により求める。

$$n_q = \lceil \alpha \cdot \hat{k}_q \rceil \tag{8}$$

ただし、 $\lceil \cdot \rceil$ は四捨五入による整数化。

また、 $A_{N_{q-1}} = n_{q-1}$ (アクセスなし) のとき、
 $n_q = 2$; 最少 2 個を設定 (9)

$A_{N_{q-1}} = 0$ (空スロットなし) のとき、
 $n_q = \lceil 2n_{q-1} \times (T_{CA_q}/T_{CA_{q-1}}) \rceil$
 ; 2 倍に増加 (10)

とする。なお、最少 CA スロット数を 2 としたのは、前述のバックオフ処理を適用した場合、1 回目の衝突であれば次の CA 手続きで再送信を試みることになるが、その際に再び衝突が発生する確率を下げるためである。

以上を適用すれば、CA スロット数はつねに多目になるよう制御される。これは、CA スロットの有効利用率を最大化することにはならないが、CA スロットの有効利用率を高めつつ、良好なスループット特性が得られることが期待されよう。

3.2 方式の有効性評価

提案方式の有効性を評価するために、 $\alpha = 1, 8$ を典型値とする 2 つの可変スロット方式 (最大 CA スロット数はともに 32 個) と、4 個および 32 個の CA スロットを固定的に装備した 2 つの固定スロット方式について、表 1 に示すパラメータで文献 4) と同じ方法でシミュレーションを行った。なお、印加トラヒックごとに乱数の初期値を変えて 5 回シミュレーションを行い、その平均値を採用した。

なお、 $\alpha = 1, 8$ を典型値とした理由は、(III) で述べる。

また、以下の議論では、10 km のネットワーク長を中心に置き、生起トラヒックが支配的でエンドユーザが高速広帯域性を感じ得る負荷トラヒック ($\rho < 0.6$) を通常負荷状態、再送トラヒックが支配的になる負荷トラヒック ($\rho > 2.0$) を過負荷状態と呼ぶこととする。なお、ネットワーク長が短いときはより大きな ρ で、逆にネットワーク長が長いときはより小さな ρ で

表 1 シミュレーション上の主要パラメータ

Table 1 Key parameters on computer simulations.

Parameters	Values
Transmission speed	10 Mbps (downlink and uplink)
Number of CPEs	Infinity
Traffic arrival model	Poisson distribution
MAC frame length	Short: 64 bytes, long: 1518 bytes
Number ratio of short to long MAC frames	Short : long = 8:2
CA frame length	64 bits
Maximum number of CA slots	32
Interval of SI signal	25.6 μ sec
Length of SI signal	64 bits
Network length	2.5 km, 10 km, 40 km

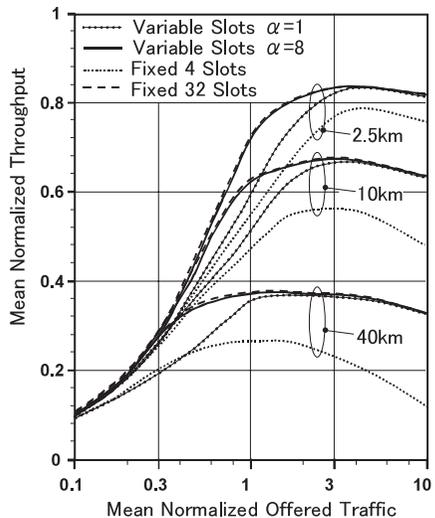


図 2 可変スロット方式と固定スロット方式のスループット特性比較
 Fig.2 Throughput comparison among variable slots and fixed-slots systems.

上述の状態に至るが、その目安は表 2 を参照されたい。

(I) スループット特性

図 2 はスループット特性を比較したもので、ネットワーク長にかかわらず $\alpha = 1$ の可変スロット方式は、通常負荷状態では固定 4 スロット方式と、過負荷状態

表 2 可変スロット方式と固定スロット方式の総合比較
Table 2 Total comparison among variable and fixed slots systems.

Offered Traffic	Throughput		Delay		Usability of CA Slots		Operation
	Regular	Over	Regular	Over	Regular	Over	Ability
Variable Slots $\alpha=1$	Poor	Good	Good	Reasonable	Good	Good	Good
Variable Slots $\alpha=8$	Good	Good	Acceptable	Reasonable	Acceptable	Good	
Fixed 4 Slots	Poor	Poor	Good	Poor	Acceptable	Good	Poor
Fixed 32 Slots	Good	Good	Acceptable	Reasonable	Poor	Poor	

Regular: $\rho < 0.8$ for 2.5km, $\rho < 0.6$ for 10km, $\rho < 0.33$ for 40km

Over: $\rho > 2.7$ for 2.5km, $\rho > 2.0$ for 10km, $\rho > 1.1$ for 40km

では固定 32 スロット方式とほぼ等しい特性を示している。一方、 $\alpha = 8$ の可変スロット方式は、負荷トラヒックにかかわらず固定 32 スロット方式とほぼ同等のスループット特性を示している。これより、 $\alpha = 1$ の可変スロット方式は通常負荷状態では実際のアクセス数に見合った CA スロット数が設定されずに不足気味であるのに対して、 $\alpha = 8$ の可変スロット方式は通常負荷状態でも CA スロットが充足され、良好なスループット特性を呈していることが分かる。また、過負荷状態で $\alpha = 1$ 、 $\alpha = 8$ とともに可変スロット方式の特性が固定 32 スロット方式とほぼ等しくなるのは、可変スロット方式の最大 CA スロット数を 32 個としたためである。

なお、同状態では CA スロットが不足しているものの、CSMA/CD 方式や S-CSMA/CD 方式にみられるように急速にスループットが劣化することはなく、ペイロードの伝送能力を維持していることが分かる。これはネットワークの安定性の点から注目に値しよう。(II) 遅延特性

図 3 は遅延特性を比較したもので、スループット特性と同様に、 $\alpha = 8$ の可変スロット方式は固定 32 スロット方式と類似した特性を示している。これは、トラヒックの増加とともに CA スロット数が増加し、CA 手続きあたりの手続き成功 CPE 数の増加とともに MAC フレームの連続送信数も増え、その結果、CA 手続きの時間間隔が広がるためである(付録 図 7 参照)。しかしながら、縮尺の関係で読み取りにくいですが、10 km のネットワーク長の場合、通常負荷状態では $\alpha = 8$ の可変スロット方式の遅延量は固定 32 スロット方式より 20~50% 少なく、優れた遅延特性を示している。

一方、 $\alpha = 1$ の可変スロット方式は、通常負荷状態ではスループット特性が $\alpha = 8$ の可変スロット方式や

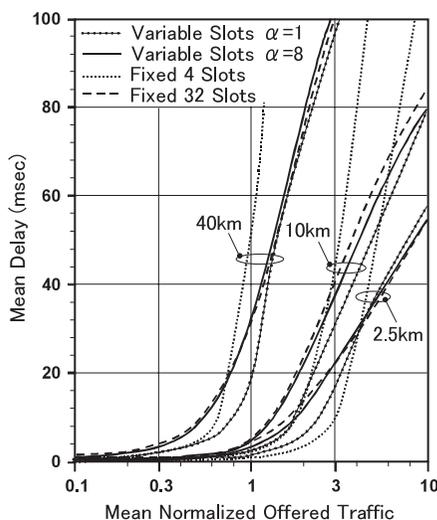


図 3 可変スロット方式と固定スロット方式の遅延特性比較
Fig. 3 Access delay comparison among variable slots and fixed-slots systems.

固定 32 スロット方式より劣る、すなわちこれらの方式より衝突が多く発生しているはずにもかかわらず、遅延が少ないことが分かる。これは、S-CSMA/MCA 方式は衝突発生を CA フレームの受信によって SCH が検出し、ただちにバックオフ処理に入るよう CPE に指示し、しかも前述したように 1 回目の衝突であれば次回の CA 手続きで再送を試みるためである。なお、固定 4 スロット方式の遅延特性が他の方式に比べ負荷の増大とともに急速に劣化しているのは、CA スロットの不足により CA フレームどうしの衝突が多発し、バックオフ処理にともなう遅延が急増しているためである。

(III) CA スロットの有効利用率と偏位係数 α

図 4 は、ネットワーク長 10 km について、 $\rho = 0.6$ を標本点として、固定 32 スロット方式のスループット

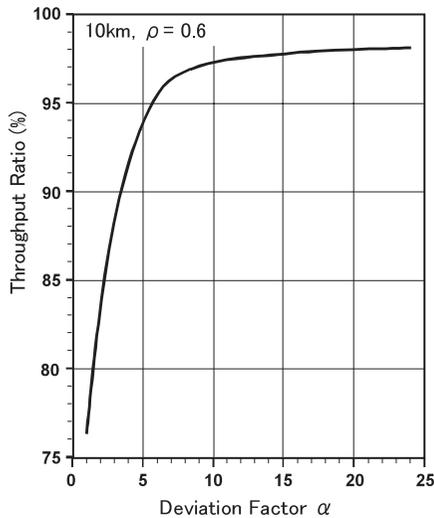


図4 固定32スロット方式に対するスループット比率
Fig. 4 Throughput ratio to fixed 32 slots system.

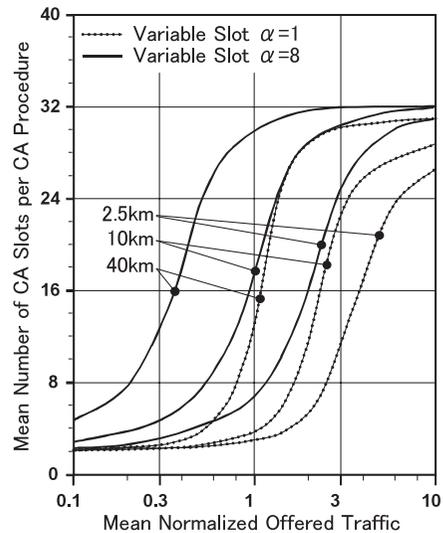


図5 CA手続きあたりのCAスロット数の変化
Fig. 5 Number transition of CA slots per CA procedure.

トに対する可変スロット方式のスループットの比率を、偏位係数 α を変数にプロットしたものである。同図によれば、 $\alpha = 1 \sim 7$ の間は α の増加により急速にスループットは改善されるが、 α がこれより大きくなると改善の度合いは鈍化する。ちなみに、 $\alpha = 8$ における比率は約 97% であり、スループット特性を大きく損ねない下限値といえよう。これが、予測中央値である $\alpha = 1$ とともに $\alpha = 8$ を典型値として選択した理由である。

また、図5は負荷トラヒックに対するCA手続きあたりの平均CAスロット数の増加傾向を示したもので、負荷トラヒックの増加に対してS字曲線、すなわちCAスロット数の増加は低負荷では緩慢に、負荷の増加によって衝突が頻発すると急速に、そして過負荷では最大個数(32個)に接近するにつれて再び緩慢になることを確認できる。前述したようにネットワーク長が長くなるほどアクセスの集中化を招くため、また α が大きくなるほど低い負荷でもより多くのCAスロットを割り当てるため、S字曲線の傾向を維持したまま低負荷側に移動、すなわち低負荷でより多くのCAスロットが設定されていることが分かる。

図6はネットワーク長10kmにおけるCAスロットの状態確率、すなわちCAスロットの中でアクセスされないスロット(A_N)の発生確率 P_N と、CA手続きに成功したスロット(A_S)の発生確率(CAスロットあたりの平均CA手続き成功確率) P_S を示したものである。可変スロット方式($\alpha = 1, \alpha = 8$)と固定4スロット方式は P_N, P_S とともに類似した変化を示しているが、固定32スロット方式は大きく異なっ

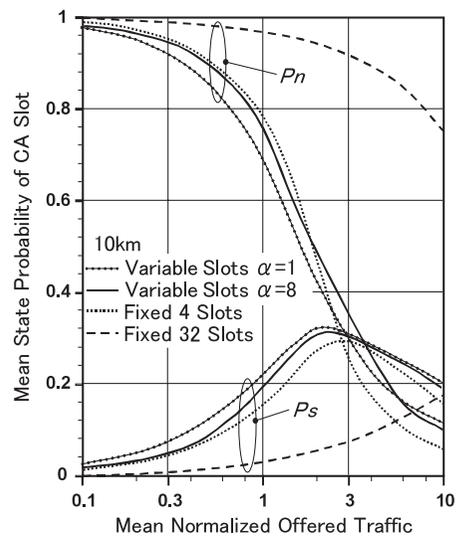


図6 CAスロットの状態確率変化
Fig. 6 State probability transition of CA slots.

た変化を示している。すなわち、固定32スロット方式では負荷状態にかかわらず P_N はきわめて高く、32個のCAスロットが有効に活用されていないことが分かる。逆に、他の3方式は負荷状態にかかわらず P_S が固定32スロット方式より高い、すなわちCA手続きの成功に寄与したCAスロットの割合が高く、CAスロットの有効利用率が高いことが分かる。

特に、 $\alpha = 8$ の可変スロット方式は、前述したように通常負荷状態で固定32スロット方式並みの高いスループット特性を得ながら、 $\alpha = 1$ の可変スロット方式に及ばないものの固定4スロット方式より高いCA

スロット有効利用率を示しており、偏位係数 $\alpha = 8$ が有効であることが分かる。これは、式 (7) による同時アクセス数の予測中央値よりも 8 倍大きい予測上限危険値に近いアクセスが実際に起きていることを意味するが、これは付録 図 8(b) でも確認することができる。

なお、可変スロット方式は、付録に示したように、過負荷状態では CA スロット数の増減や同時アクセス数の増減、CA 手続きの時間間隔の増減などが複雑に絡み合っただけの振動現象を来すが、図 2 ~ 図 6 に示す過負荷状態の範囲では、スループットや CA スロット有効利用率などが極端に劣化しないことから、偏位係数の値によらずこの振動現象に良好に追従していることが推察される。

(IV) 運用管理性

以上の評価では、一例として物理伝送速度を 10 Mbps とし、またネットワーク長を 2.5 km, 10 km, 40 km としてシミュレーションを行ったが、S-CSMA/MCA 方式はイーサネットと同様に 100 Mbps や 1 Gbps といった超高速アクセスネットワークへの展開も期待される。運用現場では、それぞれの環境および運用ポリシーなどに応じて物理伝送速度やネットワーク長が決まってくる。当然、設定すべき CA スロット数も大きく異なってくる。また、サービス開始後も加入者の増減にともなってネットワークを増減設工しなければならぬ。固定スロット方式では、ネットワーク管理者がこれらの状況を見ながら適切な CA スロット数を算出し入力するとともに、運用状態を見ながら設定値の妥当性を評価しなければならないという煩雑さがつきまとう。

ところで、式 (7) ~ (10) を見ると、これらの式には物理伝送速度やネットワーク長に関するパラメータはいっさい含まれておらず、すべて SCH がネットワークの運用の中で逐一把握することが可能なパラメータから構成されていることが分かる。可変スロット方式は、こうした煩雑な運用管理を不要とするもので、産業的に有益であることに疑う余地はなからう。

表 2 は、以上の議論をネットワーク長 2.5 km, 10 km を含めて総合的にまとめたものである。同表によれば、全体的に可変スロット方式の方が固定スロット方式よりバランスがとれていることが分かる。また、可変スロット方式の中にあっても、 $\alpha = 1$ は通常負荷において遅延特性に優れているものの、スループット特性では $\alpha = 8$ が勝っている。 α の適正值はこれらのバランスのとり方に依存するが、これは設計マターとし、ここではこれ以上言及しないこととする。

4. む す び

Synchronous CSMA/MCA 方式の潜在能力を發揮させるうえでの課題の 1 つであった可変スロット化について考察した。方式改良にあたっては、同時アクセス数の予測法や CA スロット数の設定法の確立がポイントとなる。特に、CA 手続き時間間隔と同時アクセス数との間には、比例関係にある新規トラヒックとそうでない再送トラヒック、さらに同時アクセス数の推定誤差や飽和をとともなう CA スロットの増減制御などの要因が介在し、実際値は予測中央値を中心に広く分布することを示した。提案方式は、その多くを予測上限危険値内に収容し、それに見合った CA スロットを可変制御することによって、多数の CA スロットを固定的に備えたシステム並みの性能を發揮させながら、ネットワーク資源の効率的かつ安定な運用と、運用管理上の煩雑さの回避を可能にした。

デジタルデバインド解消のために、数十 km にも及ぶ広範なエリアで伝送媒体を効率良く共有し合う新たなアクセス方式の確立を目指して、可変スロット方式のさらなる改良(予測精度の向上など)やフライングスタート方式⁴⁾の導入など、Synchronous CSMA/MCA 方式の改良に取り組んでいきたい。

参 考 文 献

- 1) 小林 浩, 江崎 浩: インターネット総論, 共立出版, pp.69-75 (2002).
- 2) 小林 浩: 情報システム, このシステムで使用される中央情報通信制御装置及び情報通信装置, 情報伝送方式並びに変調方法, 特願平 7-023012, USP 6,256 (Feb. 1995).
- 3) 小林 浩, 小澤和義, 嘉村幸一郎, 森谷 修: PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA/CD, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B, No.4, pp.471-479 (2002).
- 4) 森谷 修, 小林 浩: PTMP 型アクセスネットワークにおける Synchronous CSMA with Multiple CA による衝突確率の低減, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.3, pp.932-941 (2003).
- 5) Vecchi, M.: Evolution of hybrid fiber/coax networks, *Annual Review of Communication*, Vol.49, pp.681-685, International Engineering Consortium (1996).
- 6) ANSI/IEEE Standard 802.11, 1999 Edition Part.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (1999).
- 7) Wu, G., 井上真杉, 村上 誉, 長谷良裕: 38GHz 帯の 156Mbps 超高速無線 LAN 試作システム,

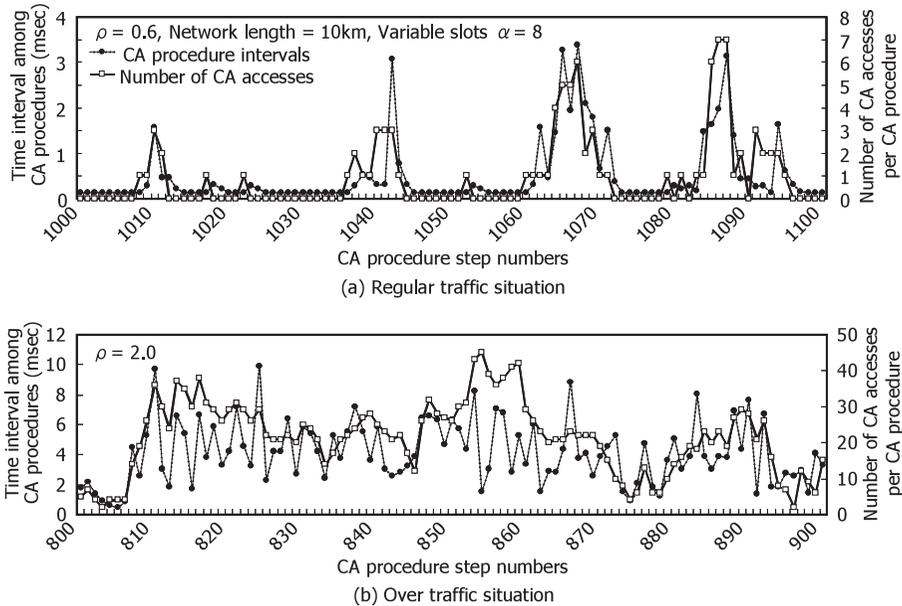


図 7 CA 手続き間隔と同時アクセス数の相関を示すシミュレーション例
 Fig. 7 Examples of computer simulation showing correlation between CA procedure intervals and number of CA accesses.

通信総合研究所季報, Vol.47, No.4, pp.23-33 (2001).

- 8) 小林 浩, 春山秀朗, 広瀬次広: ツリー形マルチメディアネットワークにおける伝播遅延時間計測を施した TDMA 即時系サービス, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J69-B, No.10, pp.1083-1091 (1986).
- 9) 小林 浩, 春山秀朗, 広瀬次広: 衝突検出に振幅情報を用いた広帯域 LAN CSMA/CD, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J69-B, No.12, pp.1607-1615 (1986).
- 10) Tanenbaum, A.S.: *Computer Networks*, 4th Edition, pp.259-265, Prentice Hall (2003).
- 11) Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Cable Modem Termination System Network Side Interface Specification, SP-CMTS-NSH01-960702, MCNS Holdings, L.P. (July 1996).
- 12) Data-Over-Cable Service Interface Specifications, Cable Modem to Customer Premise Equipment Interface Specification, SP-CMCI-101-960702, MCNS Holdings, L.P. (July 1996).
- 13) Ors, T., Sun, Z. and Evans, B.G.: Analysis of an adaptive random/reservation MAC protocol for ATM over satellite, Vol.2, pp.1523-1527, IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) (1998).

付 録

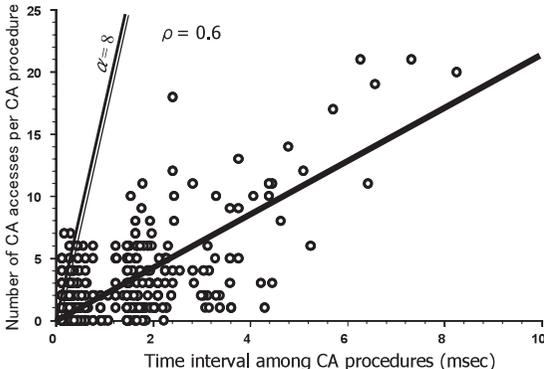
A. 相関性

CA 手続き時間間隔と同時アクセス数の相関性を調べるため, 表 1 の可変スロット方式 ($\alpha = 8, 10 \text{ km}$) を用いて行ったシミュレーションデータ例を図 7 に示す. (a) は通常負荷状態の上限 ($\rho = 0.6$), (b) は過負荷状態の下限 ($\rho = 2.0$) であり, 両例とも, CA 手続き回数は 101 回であるが, 観測時間は各々 51 msec, 424 msec である.

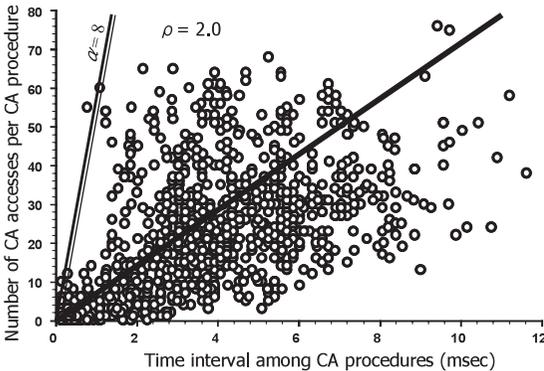
図 7 (a) より, 通常の運用状態では比較的重い $\rho = 0.6$ という負荷状態であっても, CA 手続きの 60% でアクセスがなく, このときの CA 手続き時間間隔は最少 ($128 \mu\text{sec}$) となっている. アクセスがあった残りの約 40% でも, 同時アクセス数と CA 手続き時間間隔との増減は連動しており, 全体として強い相関関係を示していることが分かる.

一方, 同図 (b) の過負荷状態では, 本文で触れたように一種の振動現象が起こっている. これは新規トラヒックと再送トラヒックの瞬間的な変動や, 多数の CA 手続きの同時成功による一時的なアクセス数の減少, 式 (6) による推定誤差や飽和をともなう CA スロット数の増減制御などが複雑に絡み合った結果であり, 周期的には 2~5 CA 手続きのものが混在している.

こうした振動現象を来たしながらも, 同時アクセス



(a) Regular traffic situation



(b) Over traffic situation

図 8 CA 手続き間隔と同時アクセス数の比例関係

Fig.8 CA procedure intervals vs. number of CA accesses.

数と CA 手続き時間間隔との増減には連動がみられ、全体として相関性を有していることが分かる。

B. 比例性

次に、CA 手続き時間間隔と同時アクセス数の比例性を調べるために、上記と同じモデルで行ったシミュレーションデータ例を図 8 に示す。ただし、(a)、(b)とも CA 手続き回数は、1,000 回である。同図を見ると、(a)、(b)ともに太実線 (CA 手続き時間間隔と同時アクセス数とが比例すると仮定したときの比例直線で、式 (6) による推定誤差が 0 のときの予測中央値に相当する) を中心に実測値が広く分布していることが分かる。

ところで、新規トラヒックはポアソン分布で発生するため、平均 CA 手続き時間間隔と平均同時アクセス数は比例する。一方、再送トラヒックは CA スロットを単位にバックオフ処理を行うため、CA スロットあたりの平均アクセス数は一定である。図 8 における

実測値の広がり、前述の振動現象と同様に新規トラヒック (乱数) 発生上の揺らぎや再送トラヒックの非時間依存性、推定誤差や飽和をとまなう CA スロット数の増減制御などが相乗し合った結果と思われる。

こうした広がり、特にシステム性能を大きく損ねかねない上限側の分散に適應するために、変位係数 α が導入された。同図 (a)、(b) には $\alpha = 8$ のときの予測上限危険値が二重実線で示されているが、新規トラヒックが支配的 (82%) な通常負荷状態と、再送トラヒックが支配的 (67%) な過負荷状態の両ケースにおいて、予測上限危険値内に大半の実測値が分布していることが理解されよう。

(平成 14 年 10 月 18 日受付)

(平成 15 年 6 月 3 日採録)



森谷 修 (正会員)

昭和 41 年生。平成 2 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業、平成 4 年東京大学工学系研究科電気工学専攻博士前期課程修了、同年 (株) 東芝入社。現在 (株) 東芝社会ネットワークインフラ社通信システム事業部所属。移动通信システムのアクセス方式、セキュリティゲートウェイシステム、広帯域移動アクセス通信システムの研究開発に従事。電子情報通信学会、電気学会各会員。



小林 浩 (正会員)

昭和 45 年東京工業大学工学部電気工学科卒業、同年東京芝浦電気 (株) 入社。昭和 48 年から昭和 52 年までの間宇宙開発事業団へ出向。現在、東京電機大学環境情報学部所属。人工衛星搭載電子機器、人工衛星軌道解析プログラム、ロケット慣性誘導システム、小容量構内電子交換機、大容量分散型電子交換システム、広帯域ツリー型マルチメディアネットワーク、OA システム、OA フロア、最適網設計ツール、無線 LAN、ATM 交換方式、高速インターネットアクセスシステム、加入者系無線アクセスシステムの研究開発に従事。「OA 概論」(共著、共立出版)、「インターネット総論」(共著、共立出版)。電子情報通信学会、IEEE 各会員。工学博士。