

STOC対応ネットワーク帯域、性能見積りとその管理の検討

中野 宣政[†]、安藤 勉[‡]、佐藤 文明[‡]、水野 忠則[‡][†]三菱電機(株)名古屋製作所

〒461 名古屋市東区矢田南5-1-14

[‡]静岡大学工学部

〒432 浜松市城北3-5-1

CSMA/CDの軽量負荷対応のスループットに関する理論解析を、先のDPS-70における報告に引続き行い、バックオフシーケンスの解析内容の修正を施すとともに、理論に基づく数値解析とシミュレーション結果との突き合せを行い、良い一致を得、本解析の正当性を検証できた。また、一律であったユーザパラメータをユーザ対応任意とする拡張を行い、FAにおいて問題と考えられる、制御用短伝文の全体トラフィックに与える影響について理論的に検討を加えた。結果として、この種の混在トラフィックにおいては、単一モダル条件を上/下限とする性能範囲に包含されることが判った。また、これら得られた結果により、イーサネットを利用する、FA用TCCS対応帯域、性能見積りと管理の方針としてまとめている。

Performance and Bandwidth Estimation & Management regarding Soft TCCS Object Class ; STOC

Nobumasa Nakano*, Tsutomu Ando#, Humiaki Sato#, Tadanori Mizuno#

*Mitsubishi Electric co. Ltd.

5-1-14Yada-minami, Higashiku, Nagoya

#Shizuoka University Faculty of Engineering

3-5-1 Jyohoku, Hamamatsu

We have continuously analyzed after the previous DPS meeting the CSMA/CD Datalink to acquire the method of estimation regarding performance and Bandwidth and also management of them. We had found the consistency between the calculation result based on the analysis and the simulation data. In this paper the analyzed result regarding the throughput in the single and also the multi-modal circumstances where all the user (Node) offers arbitrarily different ratio of messages to the network is presented. Finally we summarize the scheme of TCCS Network management for the Ethernet under the light load condition.

1. はじめに

筆者らが95-DPS-70(東北大通信研)にて報告した¹CSMA/CD(イーサネット)のスループットの解析内容に関し、バックオフシーケンスをルート存在確率として修正を行うとともに、シミュレーション実施結果とのつきあわせを行い、本解析の妥当性を確かめた。また、ユーザパラメータをユーザー一律条件から、ユーザ対応任意可変とする拡張を行い、特にFAシステムの機器間通信において顕著な、短(制御データ)伝文による長伝文通信への影響を解析したので報告する。

さらに今回得られた以上の結果を総合し、CSMA/CDをデータリンク層として使用するLAN上のタイムクリティカル通信対応帯域管理方針についてまとめる。

2. CSMA/CD(イーサネット)LANの解析

マルコフチェイン状態遷移理論³に基づくモデルにより解析した。前提条件、モデル¹およびプロトコル²は先の報告と同一であるが再掲する。本モデリングにおける前提条件、記号を下記に示す(先回報告と同一)。

(1)チャンネルディレイは総てのユーザに対等であり、 $\tau = d/V$ 秒である。但し d はメディア長(m)、 V は信号伝達速度(m/s)。

(2)アイドル状態のユーザは、スロットあたり確率 σ で伝文を発生する(但しユーザ数は N)。

(3)メッセージ長は平均 $1/\gamma$ にて幾何分布している。(但し一回に送る伝文長は H スロットタイムの伝送量に相当する固定長)

(4)各ユーザは伝送しようとする伝文として、最大でも一つのみを持つことを許容される。

(5)チャンネルが空いていたら(確率 $1-r$)、伝送を試みるが、衝突したら k スロットのジャミング信号を出力し、ついで衝突の回数 j により $2^j - 1$ 通りのいずれかのスロットタイムの整数

倍の長さのバックオフシーケンスを実行する。

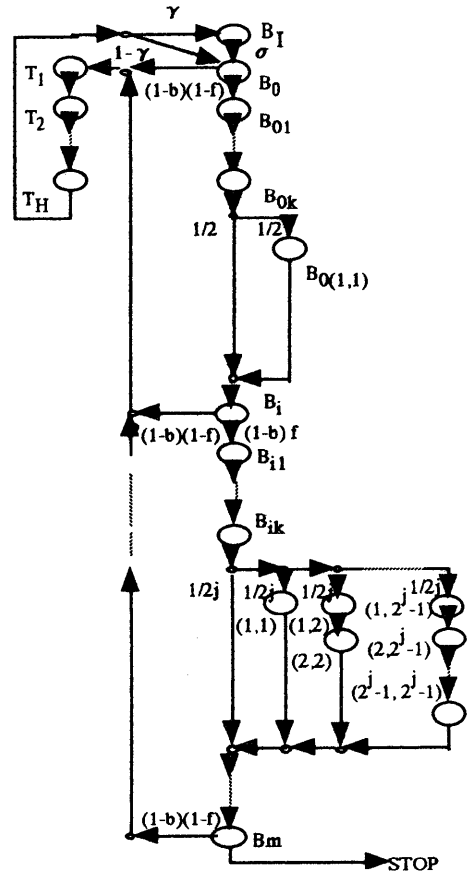


図1. CSMA/CD(イーサネット)の離散時間キュー・モデル

以下、先回報告内容に一部修正を加へ再掲する。

$$x^B \sigma = x^T \gamma \quad (1)$$

$$x^B (1-b) = x^{B+1} (1-b) f, \quad \therefore x^B = f x^{B+1} \quad (2)$$

$$x^{B+1} = x^B f (1-b) = x^{B+1} (1-b) \quad (3)$$

$$\frac{1}{2^{j+1}} x^{B_j} = x^{B_j+1/2^j-1} = x^{B_j+1/2^j} = x^{B_j+1/2^{j-1}} = x^{B_j+1/2} \quad (4)$$

$$= x^{B_j+1/4} = x^{B_j+1/8} = \dots = x^{B_j+1/2^j} = \dots = x^{B_j+1/2^j} \quad (4)$$

$$x^T = x^T + \dots = x^T + (1-b)(1-f) \sum_{j=0}^m x^B$$

$$= (1-b)(1-f) x^B \sum_{j=0}^m f = x^B (1-b)(1-f^{m+1}) \quad (5)$$

ノーマライジング条件より、

$$x^{B_i} + \sum_{i=1}^H x^{T_i} + \sum_{i=0}^m x^{B_i} + \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=1}^K x^{B_{i,k}}$$

$$+ \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{2^i} \sum_{l=0}^{2^i} x^{B_{(i,j,l)}} = N \quad (6)$$

(1) 式より、

$$x^{B_i} = \frac{\gamma}{\sigma} x^{T_n} \quad (7)$$

(5) 式より、

$$\sum_{i=1}^H x^{T_i} = H x^{T_n} \quad (8)$$

(5) 式より、

$$\sum_{i=0}^m x^{B_i} = \frac{x^{T_n}}{(1-b)(1-f)} \quad (9)$$

(3) 式より、

$$\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=1}^K x^{B_{i,k}} = K \sum_{i=0}^{m-1} x^{B_i} f(1-b)$$

$$= K(1-b) \sum_{i=0}^{m-1} x^{B_{i+1}} f^2 = K(1-b) \sum_{i=0}^{m-1} x^{B_i} f^{i+1}$$

$$= K(1-b) \frac{f(f^m - 1)}{f - 1} x^{B_0} \quad (10)$$

(5) 式より、

$$x^{B_0} = \frac{x^{T_n}}{(1-b)(1-f^{m+1})} \quad (11)$$

(11) 式を (10) 式に代入して、

$$\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=1}^K x^{B_{i,k}} = K \frac{f(1-f^m)}{(1-f)(1-f^{m+1})} x^{T_n} \quad (12)$$

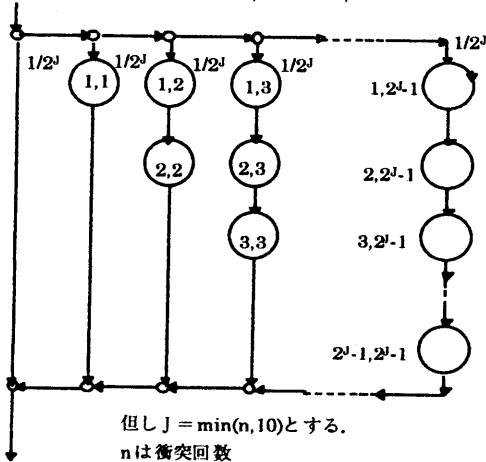


図2. イーサネットバックオフ動作のマルコフ状態遷移図

次に、(4) 式のバックオフシーケンスを導出す

る。(図2.)

(4) 式より、

$$\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{l=0}^{2^i-1} x^{B_{(i,j,l)}} = \sum_{i=0}^9 \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{l=0}^{2^i-1} x^{B_{(i,j,l)}} + \sum_{i=10}^{15} \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{l=0}^{2^i-1} x^{B_{(i,j,l)}}$$

$$\sum_{i=0}^9 \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{l=0}^{2^i-1} x^{B_{(i,j,l)}} = \sum_{i=0}^9 \sum_{j=0}^{2^i-1} (j) x^{B_{(i,j,0)}} = \sum_{i=0}^9 \frac{x^{B_{i,0}}}{2^{i+1}} \sum_{j=0}^{2^i-1} (j)$$

$$= \sum_{i=0}^9 x^{B_i} f(1-b) \frac{2(2^i-1)}{2^{i+1}}$$

$$= (1-b)x^{B_0} \sum_{i=0}^9 f^{i+1} \frac{(2^i-1)}{2}$$

$$= (1-b)x^{B_0} * \frac{-1+2^9-9}{2} * \frac{f(-1+f^{10})}{-1+f}$$

$$\sum_{i=10}^{15} \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{l=0}^{2^i-1} x^{B_{(i,j,l)}} = (1-b)x^{B_0} \sum_{i=10}^{15} f^{i+1} \frac{(2^{10}-1)}{2}$$

$$= (1-b)x^{B_0} \left(2^9 - \frac{1}{2}\right) \sum_{i=10}^{15} f^{i+1}$$

$$= (1-b)x^{B_0} \left(2^9 - \frac{1}{2}\right) \frac{f^{11}(-1+f^6)}{-1+f}$$

(11) 式を代入して、

$$\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{l=0}^{2^i-1} x^{B_{(i,j,l)}} = \frac{x^{T_n}}{(1-f)^2} \left(f(2^9-5) + f^{11} \frac{(-1+f^6)}{(-1+f^{16})} \left(2^9 - \frac{1}{2}\right) \right) \quad (13)$$

(7)、(8)、(9)、(12)、(13) 式を (6) 式に代入して、

$$x^{T_n} = \frac{N}{\left(\frac{\gamma}{\sigma} + H + \frac{1}{(1-b)(1-f)} + K \frac{f(1-f^m)}{(1-f)(1-f^{m+1})} \right) \left(1 + \frac{f}{(1-f)^2} \left(251 + f^{10} \frac{(-1+f^6)}{(-1+f^{16})} (511.5) \right) \right)} \quad (14)$$

次に、f、bを求める。

$$\lambda x^{B_i} = (\alpha x^{B_i} + (1-\gamma)x^{T_n}) = \left(\sigma + \frac{\sigma}{\gamma}(1-\gamma) \right) x^{B_i} \prod(I) + \sum_0^{m-1} (K+1) \prod(C_{K_i}) +$$

$$= \frac{\sigma}{\gamma} x^{B_i}, \therefore \lambda = \frac{\sigma}{\gamma} \quad (15)$$

$$f = 1 - e^{-\lambda(N-1)} \quad (16)$$

チャンネルの状態遷移をマルコフ遷移として表す。すなわち、その空き状態 (I)、転送状態 (t_1, t_2, \dots, t_{H+1})、衝突状態 ($C_{k_i} + C_{b_i} \ i=0, 1, 2, \dots$) とする。

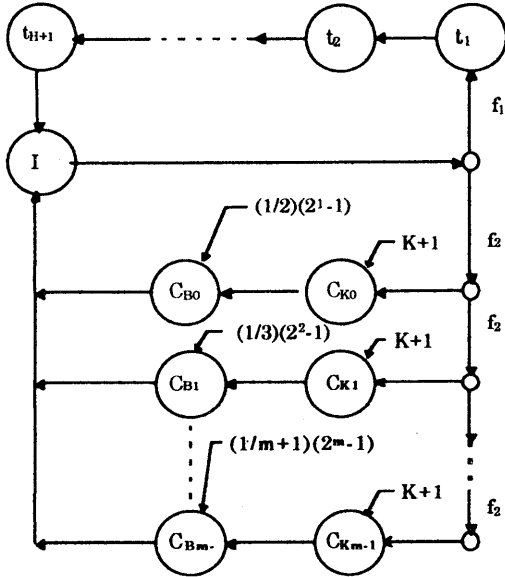


図3. チャンネル空き状態マルコフ遷移モデル

$$f_1 = e^{-\lambda(N-1)} \lambda(N-1) \quad (18)$$

$$f_2 = 1 - e^{-\lambda(N-1)} - e^{-\lambda(N-1)} \lambda(N-1) \quad (19)$$

図3. において、マルコフ過程 j の平衡状態における状態確率を $\Pi(j)$ と表すと

$$\prod(C_{k_i}) = \prod(C_{b_i}) = (f_2)^{i+1} \prod(I) \quad 0 \leq i \leq m-1 \quad (20)$$

$$\prod(t_1) = \dots = \prod(t_{H+1}) = f_1 \prod(I) \quad (21)$$

ノーマライジング条件は、

$$\prod(I) + \sum_0^{m-1} (K+1) \prod(C_{K_i}) + \sum_0^{m-1} \frac{2^{i+1}-1}{(i+2)} \prod(C_{B_i}) + \sum_1^{H+1} \prod(t_i) = 1$$

$$\prod(I) + (K+1) \left(\prod(C_{K_0}) + \prod(C_{K_1}) + \dots + \prod(C_{K_{m-1}}) \right) + \frac{1}{2} \prod(C_{B_0}) + \frac{3}{3} \prod(C_{B_1}) + \frac{7}{4} \prod(C_{B_2}) + \dots + \frac{2^9}{10} \prod(C_{B_8}) + \frac{2^{10}}{11} \sum_{m=10}^{15} \prod(C_{B_{m-1}}) + (H+1)f_1 \prod(t_i) = 1 \quad (22)$$

(22) 式に、(20)、(21) 式を代入して、 $(1-b) = \prod(I)$

$$= \frac{1}{(K+1)f_2(1-(f_2)^m) + \frac{1-f_2}{-4 \cdot 2^9 f_2^{2+9} \text{Hyp}2F1[] + 4f_2^{2+9} \text{Lerch}[] + | 2f_2^{2+9} \text{Lerch}[] - 2\text{Log}[1-2f_2] + | 9\text{Log}[1-2f_2] + 4\text{Log}[1-f_2] + | 2 \cdot 9\text{Log}[1-f_2])} + \frac{2f_2(2+9)}{2^{10} f_2^{11} \frac{f_2(1-f_2^5)}{1-f_2} + (H+1)f_1 + 1} \quad (23)$$

但し上式に於いて、 $\text{Hyp}[]$ は超越幾何関数 ${}_2F_2$

($1, 2+9; 3+9, 2f_2$) を表し、 $\text{Hyp}[] := \text{HyperGeometric}2F1[a, b, c, z]$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a)_k (b)_k z^k}{c_k k!}$$

また、 $\text{Lerch}[]$ は、レルヒの超越関数 ${}_4\text{LerchPhi}(f_2, 1, 2+m)$ を表し、

$$\text{LerchPhi}[z, s, a] = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{(a+k)^s}$$

3. 解析結果による数値計算と、そのシミュレーションデータによる検証

以下、前節で求めた論理式を元に、種々のパラメータで数値計算した結果を示す。また別途求めたシミュレーションデータとのつきあわせを行う。

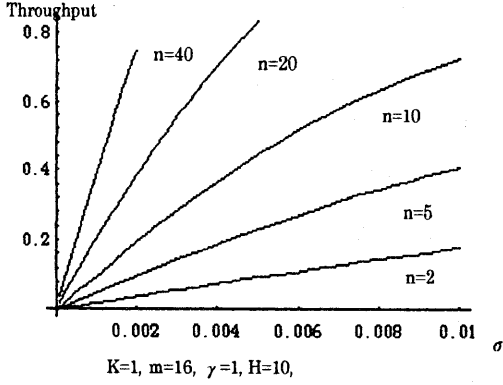


図4. ユーザ数可変対応スループット

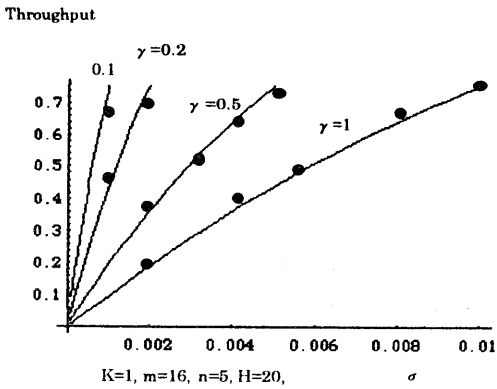


図5. 伝文長可変対応スループットとそのシミュレーションデータとの突合わせ

図5. に伝文長を可変とした場合のスループットを示す。図中丸印は、計算と同一条件で得たシミュレーションデータを示す。良い一致を示し、本解析の正しさが検証された。

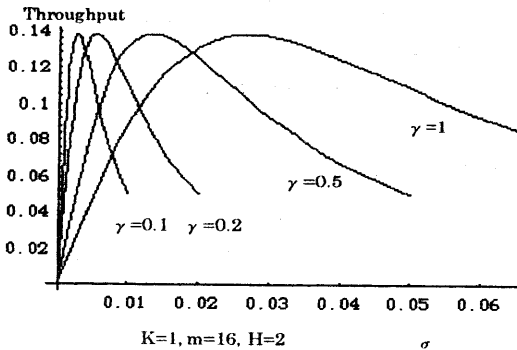


図6. 短パケット対応スループット

図6. に示す通り、短パケットの場合はスループットは極端に低下し、また極大点とオフロードの増大に対し垂下特性を有する点、帯域管理上問題を生ずる領域が存在することが判る。

4. マルチモーダル対応スループットの解析

次に、Nユーザの σ 、 γ を可変としたモデルを解析する。但し、パケット長Hは同一とする。

論理的モデルはほとんど、パラメータ同一と変わらない。

ユーザuの σ 、 γ を σ_u 、 γ_u とする。

$$x^{B_i} \sigma_u = x^{T_i} \gamma_u \quad (30)$$

次に、ノーマライジング条件は、各ユーザごとに独立に求めて、

$$x^{B_i} + \sum_{i=1}^H x^{T_i} + \sum_{i=0}^m x^{B_i} + \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{k=1}^K x^{B_{i,k}} + \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{2^i-1} x^{B_{(i,j)}} = 1 \quad \text{for all } u \quad 1 \leq u \leq N \quad (31)$$

f, bについて

$$\lambda_u = \frac{\sigma_u}{\gamma_u} \quad \text{for all } u \quad 1 \leq u \leq N \quad (32)$$

$$f_u = 1 - \prod_{i=1}^N e^{-\lambda_i} \quad \text{for all } u, \quad 1 \leq u \leq N \quad (33)$$

$$f_{1u} = \bigcup_{i=1}^N \lambda_i \prod_{j=1}^N e^{-\lambda_j} \quad \text{for all } u, \quad 1 \leq u \leq N \quad (34)$$

$$f_{2u} = f_u - f_{1u} \quad \text{for all } u, \quad 1 \leq u \leq N \quad (35)$$

(23)式に、上記(34)、(35)式を代入して、 $(1-b)_u$ を得る。

以上求めた f_u 、 $(1-b)_u$ を(31)式に代入することにより、(14)式に対応する、 x^T が求められる。これをH倍することにより、各ユーザ対応のスループットが得られ、 $Hx^T n_u =$

$$\frac{H}{\left(\frac{\gamma_u}{\sigma_u} + H + \frac{1}{(1-b)_u(1-f_u)} + K \frac{f_u(1-f_u^m)}{(1-f_u)(1-f_u^{m+1})} \right) \left(\frac{f_u}{(1-f_u)^2} \left(251 + f_u^{10} \frac{(-1+f_u^6)}{(-1+f_u^{16})} (511.5) \right) \right)} \quad (36)$$

また、総合スループットは、

$$\text{Throughput} = \sum_{\mu} Hx^{\mu} \quad (37)$$

となる。

図7.に以上シングルモデルより求めた拡張マルチモデルのスループット理論式の数値計算結果を示す。図には、 $\gamma = 1.0$ から $\gamma = 0.5$ のシングルモデル間をマルチモデルで5ユーザの γ 値を一人ずつ0.5とした経過を数値解析して点線で示している。

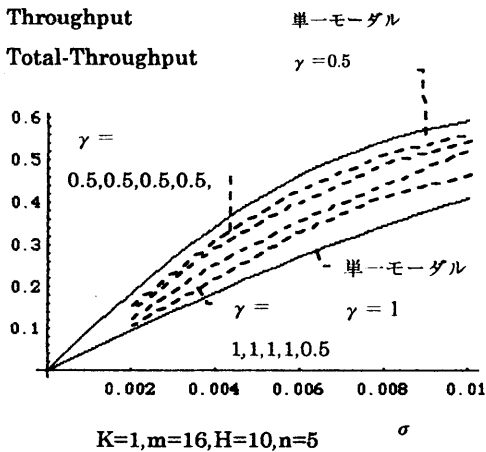


図7. マルチモデル対応スループット

5. イーサネットLANを使用するタイムクリティカル通信帯域管理について (まとめ)

(1) 利用帯域幅は、申請された値より、 $H\sigma / \gamma$ (最大スループット) として求める。

(2) 上記値は、ウィンドウサイズによりピーク低減がなされる。但し、この計算に必要な伝送遅延値は、Little's Theoryにより、スループットより一義的にもとまる。

(3) マルチモデル下での短パケットのスループットに及ぼす影響は、単一モデル特性を上下限とする特性で包含される。

(4) 同一パケットサイズ (伝文幅は可変) 下での、いかなる組合わせに関しても、そのスルー

プットの計算 (従って伝送遅延量) が可能である。

(5) 帯域管理に関し、不安定領域を避けて行う必要がある。例を図8に示す。

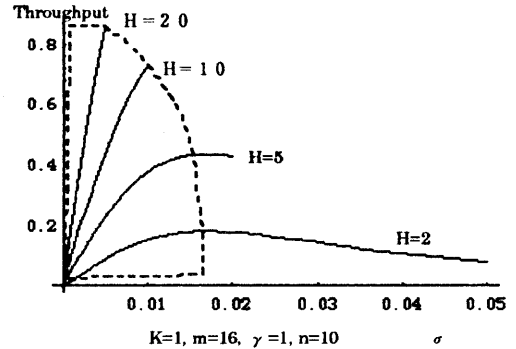


図8. 帯域管理における安定領域

図8.の点線領域が、この場合の帯域制御可能領域を示す。すなわち、 $H = 2, 5$ で示されるような、垂下特性を有せず、しかもオフアーされる負荷伝文量として、絶対最大負荷の範囲内にある領域である。但し、絶対最大負荷とは、

$$\frac{NH\sigma}{\gamma} < 1 \quad (38)$$

6. おわりに。

以上、軽量負荷を条件とする、イーサネット上のFA用タイムクリティカル通信対応帯域管理を行うための理論検討と、同一条件のシミュレーションによる理論の検証、以上の検討より得られた管理方針を述べた。今後はこれらをベースにして、さらにその実現に向けた検討を行う。

7. 参考文献

1. 中野、他、情報処理学会研究報告、95-DPS-70、情報処理学会、PP69-75、1995.5.
2. The Ethernet, A Local Area Network: Data Link and Physical Layer Specifications, Versin 1.0(1980)
3. Michael E. Woodward : Communication and Computer Networks, IEEE Computer Society Press, 1994.
4. Stephen Wolfram, Mathematica, Second Edition, Wolfram Research, inc. 1992.