

通信路の品質変化に対応する通信制御機構の評価

野口, 裕介

九州大学大学院システム情報科学府情報工学専攻 : 博士後期課程

谷口, 秀夫

九州大学大学院システム情報科学研究院情報工学部門

牛島, 和夫

九州大学大学院システム情報科学研究院情報工学部門

<https://doi.org/10.15017/1515725>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 6 (1), pp.107-112, 2001-03-26. 九州大学大学院システム情報科学研究院

バージョン :

権利関係 :

通信路の品質変化に対応する通信制御機構の評価

野口裕介*・谷口秀夫**・牛島和夫**

Evaluation of New Communication Control Mechanism to Adapt the Quality Change of Communication Line

Yusuke NOGUCHI, Hideo TANIGUCHI and Kazuo USHIJIMA

(Received December 15, 2000)

Abstract: In this paper, we propose our new communication control mechanism to adapt a quality change of communication line dynamically. First, we describe the communication control mechanism that provides dynamic support for frequent change of communication quality. Second, we formalize the "optimum window size" that keeps the increase of communication time in minimum. Third, we implement a communication control mechanism and evaluate it on the environment that simulates satellite communication line. By use of our communication mechanism, we can improve the communication efficiency.

Keywords: Communication control mechanism, Quality of communication, Wireless communication line

1. はじめに

計算機のネットワーク接続が一般化してきている。一方、通信回線としては、従来のイーサネット型LANに加え、無線LAN、電話回線、ISDN¹⁾、および衛星通信^{2),3)}などが利用可能になってきている。また、ハードウェアの低価格化や小型化が進んでおり、計算機の利用形態も様々に変化しつつある。今後、一つの計算機が複数の通信回線を有し、それらを同時に利用するような状況もあり得る。しかしながら、計算機が複数の通信路を持つ場合、各通信路の性質は全て異なることが多い。例えば、有線通信路の場合、その通信品質は高くかつ安定している。それに対して、無線通信路の場合、降雨や障害物の影響により通信品質が急激にかつ大きく変動するという特質がある。このように性質が大きく異なる通信路を同時に有する場合、従来の単一の通信路のみを想定した通信制御では効率的なデータ通信を行うことは困難である。

我々は複数の通信路を有する計算機間で、この複数の通信路を活かして効率の良いデータ通信を行う方式を検討している。通信路の性質は、データ転送の「速度」と「遅延」そして「品質」で決定できる。ここで速度とは通信路のハードウェアが提供するデータ転送速度であり、遅延とは送受信時に発生するデータ通信の遅れであり、品質とは通信誤りの発生頻度である。一般に、これらは時刻要素を持ち、通信路の*i*の時刻*t*における値として、速度を $S_i(t)$ 、遅延を $D_i(t)$ 、品質を $Q_i(t)$ と表現できる。つまり、通信路*i*の時刻*t*における有効通信速度は、

$L_i(S_i(t), D_i(t), Q_i(t))$ となる。この有効通信速度を利用して、複数の通信路におけるデータ通信を制御できる。

有効通信速度に影響を与える項目の内、通信品質の時刻変化が最も大きい。特に衛星通信路のような無線通信路ではそれが顕著である^{2),4)}。そこで我々は、これまでに通信誤りの発生する通信路で接続されている計算機間における通信時間と通信効率を最大とするための通信条件(最大パケット長、ウィンドウサイズ、タイムアウト)の定式化を行った。さらに、品質変化に適応する通信制御手順であるFCC通信制御手順を提案し、実装を進めてきている。

以降、2章では、通信路の品質変化に適応する基本機構の概要と通信路の品質変化に動的に適応するための手順を述べる。3章では、文献7)で示した最適ウィンドウサイズの導出式について、実装する上での課題を挙げる。さらに、その課題に対処した最適ウィンドウサイズの簡略式について説明する。4章では、提案した通信制御機構の評価を支援するために作成した擬似衛星通信路のシミュレータについて説明し、これを用いた通信制御機構の評価を示す。5章で、本論文をまとめる。

2. 通信品質の品質変化に適応する通信制御機構

2.1 基本機構

通信路の品質変化に適応する基本機構をFig.1に示し、その概要を以下に説明する。

通信路の品質変化は、降雨や障害物により変化する。通信路の品質変化により、受信信号レベル、ビット誤り率、パケット再送率および通信容量が変化する。受信信号レベル、ビット誤り率、パケット再送および通信容量の変化に合わせ、最大パケット長やウィンドウサイズを

平成12年12月15日受付

* 情報工学専攻博士後期課程

** 情報工学部門

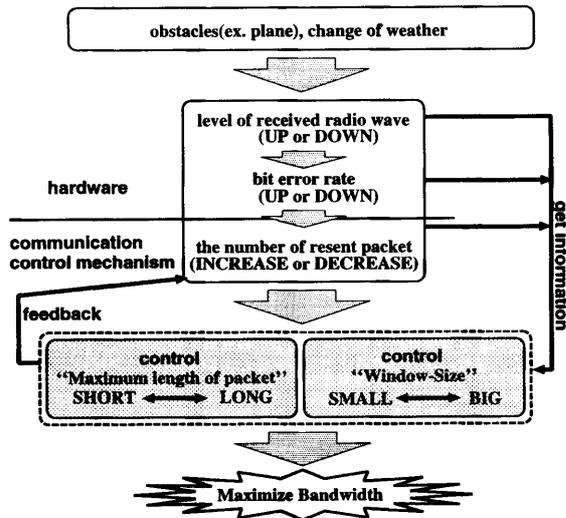


Fig.1 Mechanism

制御する。この制御を改善制御と名付ける。改善制御により、通信容量を最大化するためには、改善制御の規則が非常に重要である。改善制御においては、現在の通信路の品質に合わせた改善ではなく、今後の通信路の品質を予想した改善が有効と考えられる。このためには、

- (予想材料) 何を材料に予想するか?
- (予想手段) どのようにして予想するか?
- (改善対象) 何を変更して改善するか?
- (改善内容) 具体的な改善の内容は?

を検討する必要がある。

予想材料としては、受信信号レベル、ビット誤り率、パケット再送および通信容量がある。改善対象は通信制御手順に依存する項目であるから、通信制御手順と関係が深いパケット再送や通信容量を予想材料とすれば、その変化を把握しやすく、改善対象への処理も速やかに行える。一方、受信信号レベルやビット誤り率は、パケット再送や通信容量に比べ、通信路の品質変化の原因に近い層での変化である。このため、これらを予想材料とすれば、より確実に、かつ早い時間に通信路の品質変化を把握できると思われる。

予想手段として、時間の1次微分(単位時間前と現在の差)により、単位時間後を予想する。さらに、時間の2次微分により予想することも考えられる。

改善対象は、Fig.1に示したように、最大パケット長やウィンドウサイズである。通信制御手順の実装を考慮すると、最大パケット長の変更よりウィンドウサイズの変更が容易である。このため、ウィンドウサイズの変更を優先的に行い、不十分な場合に、最大パケット長の変更を行う。

改善制御を明らかにするためには、予想材料と通信容量の関係を明らかにする必要がある。

3. 最適ウィンドウサイズの簡略式導出

これまでに、通信の流れをモデル化し、通信時間に影響を与える要素を変数として仮定することにより、2つの計算機間におけるデータ送受信に要する通信時間 T の定式化を行った⁷⁾。また、ある通信品質の元で通信時間をにし通信効率を最大とするための通信条件の定式化を行った⁷⁾。以下に、その概要を示す。

2つの計算機間でのデータ送受信における通信手順をモデル化し、通信時間を定式化するために必要な変数を明らかにした。以下に、定式化に必要な変数の一覧を示す。

- P : 最大パケット長
- W : ウィンドウサイズ
- t : 通信速度(bit/sec)
- I_{ds} : データパケット送信処理(step)
- I_{dr} : データパケット受信処理(step)
- I_{cs} : コマンドパケット送信処理(step)
- I_{cr} : コマンドパケット受信処理(step)
- e : 通信路の伝送誤り率
- P_s : 送信プロセッサ性能(step/sec)
- P_r : 受信プロセッサ性能(step/sec)
- L_c : コマンドパケット長またはデータパケットのコマンド長(bit)
- d : 通信遅延(sec)
- D : 転送データ総量(bit)
- V : 通信誤りを起こさずに連続して送信するパケット数
- μ : 通信路の品質劣化度

通信誤りが発生する環境における通信時間は、以下の式で表される。

$$T = (aW + b) \left(\frac{V}{W} + 1 \right) \frac{D}{(P - Lc)V} \quad (1)$$

ここで、変数 a, b は、通信環境によって決定される係数である。具体的には、送信側計算機のデータ送信処理時間 ($\frac{I_{ds}}{P_s}$)、通信路のデータ転送処理時間 ($\frac{P}{t}$)、および受信側計算機のデータ受信処理時間 ($\frac{I_{dr}}{P_r}$) の大小関係によものであり、これらの関係を“通信環境”と名付ける。また、この通信時間を最小とするウィンドウサイズ(以降、最適ウィンドウサイズとする) W_0 は、以下の式で表される。

$$W_0 = \sqrt{\frac{b}{a} \times \frac{\frac{1}{e\mu} - Lc}{P}} \quad (2)$$

変数 a, b は、送信および受信処理命令数や通信遅延を含む。従って、通信制御機構を実現する場合、これらに関

する具体的な値の決定は、以下の理由により困難である。

- (1) 処理命令数は、通信制御機構が動作するプロセスや実行プログラムを生成するコンパイラの種類や版毎にそれぞれ異なる。また、通信を行う際に、他計算機の情報を取得する必要がある。
- (2) 通信遅延は、わずかな差異が最適ウィンドウサイズの結果に大きな影響を与えるため、正確な値を要求される。仮定した値が実際の値から外れると、不適切なウィンドウサイズによる制御を行ってしまい、かえって通信効率を悪化させる恐れがある。

そこで、式(2) からこれらの変数を排除することを試みる。

通信速度 t の通信路において、ウィンドウサイズ(W)が1の時、送信データ総量 D のデータ送受信に要した時間を $T_{t,W=1}$ とすると、式(1) より通信遅延 d は以下の式で表される。

$$d = \left(\frac{(P - Lc)T_{t,W=1}}{D} - \frac{P}{t} - \frac{Ids}{Ps} - \frac{Idr}{Pr} - \frac{Ics}{Pr} - \frac{Lc}{t} - \frac{Icr}{Ps} \right) \times \frac{1}{2} \quad (3)$$

式(2) と式(3) より、それぞれの通信環境における最適ウィンドウサイズは、以下の簡略式で表される。

(通信環境1) : $\frac{Ids}{Ps} > \frac{Idr}{Pr} \geq \frac{P}{t}$

$$W_{01} = \sqrt{\left(\frac{Ps(P - Lc)T_{t,W=1}}{IdsD} - 1 \right) \frac{\frac{1}{e\mu} - Lc}{P}} \quad (4)$$

(通信環境2) : $\frac{Idr}{Pr} > \frac{Ids}{Ps} \geq \frac{P}{t}$

$$W_{02} = \sqrt{\left(\frac{Pr(P - Lc)T_{t,W=1}}{IdrD} - 1 \right) \frac{\frac{1}{e\mu} - Lc}{P}} \quad (5)$$

(通信環境3) : $\frac{P}{t} > \frac{Ids}{Ps} \geq \frac{Idr}{Pr}$

$$W_{03} = \sqrt{\left(\frac{t(P - Lc)T_{t,W=1}}{PD} - 1 \right) \frac{\frac{1}{e\mu} - Lc}{P}} \quad (6)$$

式(4)、式(5)、式(6) では、式中に、正確な値を取得するのが困難な処理命令数と通信遅延の全てまたは一部を含まない式で最適ウィンドウサイズを予測することができる。

式(6)では、処理命令数および通信遅延のが全て式より除かれている。我々が制御の対象としている無線通信路の場合、そのほとんどが通信速度に対して計算機の処理速度の方が高く、最適ウィンドウサイズの予測に式(6)を用いることができるため、我々の用いた最適ウィンドウサイズ導出式の簡略化は実用上有効である。また、将来無線通信路の性能が大きく向上し計算機の処理速度を超

えた場合においても、式(5)および式(6)では、それぞれの計算機が相手計算機の命令数を利用する必要が無いため、式(2)を用いるよりも容易に最適ウィンドウサイズを予測する事が可能となる。

4. 衛星通信の実データを用いた評価

4.1 擬似衛星通信路

評価を支援するため、様々な通信路の環境を擬似的に実現する擬似衛星通信路を作成した。擬似衛星通信路では、伝送誤りと通信遅延の制御が可能である。

Fig.2に、各処理部の関係を示す。

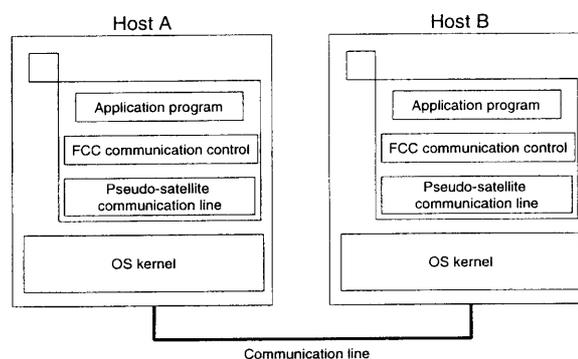


Fig.2 Pseudo-satellite communication line

通信路で接続されたそれぞれの計算機には、仮想的な衛星通信環境を実現している“擬似衛星通信路”がある。FCC通信制御手順に基づいた通信を行う処理部分は、この擬似衛星通信路を介してパケットを送信する。データを受け取った擬似衛星通信路は、受け取ったパケットをOSカーネルに渡すが、その際に遅延や通信誤りを発生させることができる。現在、擬似衛星通信路では、以下に挙げる性質の通信誤りを発生させる機能を持つ。また、通信品質は通信途中の任意の時点で変更可能である。

(1) ランダム

疑似乱数を利用して、不定期な間隔でパケットを破棄する。

(2) 周期指定

指定されたパケット数の間隔で、周期的にパケットを破棄する。

(3) 時間間隔指定

指定された時間の間隔で、周期的にパケットを破棄する。

(4) 実通信記録再生

事前に測定した、実際の通信で記録された通信誤りに基づいて通信誤りを発生させる。

4.2 評価環境

測定に用いた計算機と通信路の環境を以下に示す。今回の測定では、送信側計算機と受信側計算機には同性能の計算機を用いた。また、送信側計算機と受信側計算機の接続は、ATM switch を経由している。

- 送受信計算機
 - プロセッサ：Celeron 400MHz
 - オペレーティングシステム：BSD/OS Ver.3.1
 - ATM インタフェースボード：Efficient ENI-155S-MF-PCI
- 通信路
 - ATM スイッチ：ForeRunnerLE 155 ATM switch

4.3 実データによる評価

通信誤りの時刻変化に対して、提案した通信制御機構の有効性を明らかにするための評価を行った。実データとして、1999年7月2日の福岡における集中豪雨を取り上げた。通信速度は64kbpsである。測定結果を Fig.3, Fig.4, Fig.5 に示す。Fig.3は、1999年7月2日の福岡における、13時から16時にかけての降雨量である。Fig.4は、同じ期間に実測した衛星電波の信号減衰である。Fig.5は、当日の15時12分12秒から32秒まで20秒間隔で実測した伝送誤り率である。評価に用いた実測データは、測定期間の後半に高い伝送誤りを記録している。

評価結果を、Fig.6およびFig.7に示す。Fig.6は、Fig.5に示されている実測データを元に、擬似衛星通信路で発生させた通信誤り率の変化を示している。Fig.7は、通信速度を1Mbpsとし、ウィンドウサイズ(W)を10, 30, 50, 100の固定とした場合(それぞれ、 $W=10$, $W=30$, $W=50$, $W=100$)と、提案する通信制御機構を用いてデータ送信をした場合(“auto”)の、単位時間あたりの通信量の変化を示している。最適ウィンドウサイズによる制御を行った場合、測定期間内における単位時間あたりの送信データ量は最大で約65,440bytes、最小で約47,607bytesでありその差は約18,053bytesであった。対して、例えば $W=100$ 固定の場合、単位時間あたりの送信データ量は最大で70,476bytes、最小で13,191bytesとなりその差は約57,285bytesであった。ウィンドウサイズが固定の場合は、通信路の品質変化により単位時間あたりの通信量が大きく変動している。特に、 $W=50$ や $W=100$ の場合、通信品質が悪くなった場合の、単位時間あたりの通信量が急激に落ちている。一方、最適ウィンドウサイズの制御を行った場合には、通信品質の変化に関わらず、ウィンドウサイズ固定の場合と比べて単位時間あたりの通信量の変動は小さい。

Fig.8は、各場合における測定期間での通信総量を示し

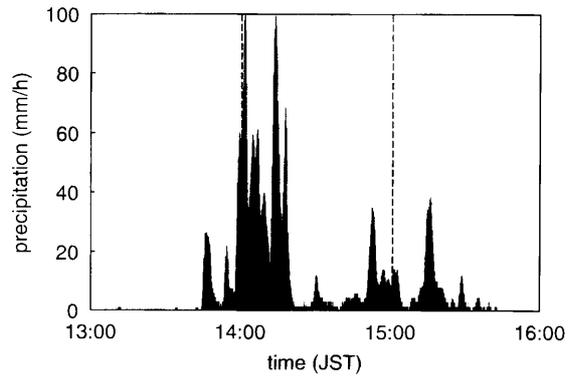


Fig.3 Rain Intensity (July 2, 1999)

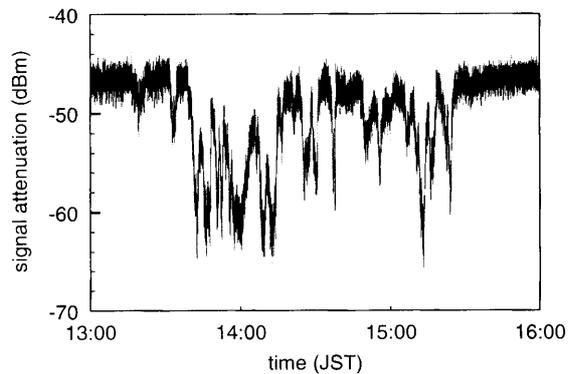


Fig.4 Signal attenuation (July 2, 1999)

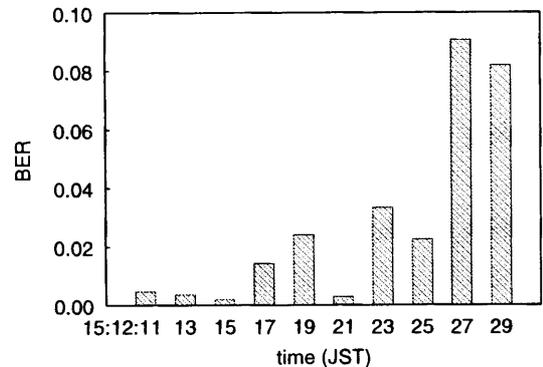


Fig.5 Bit error rate (July 2, 1999)

ている。図より、最適ウィンドウサイズを動的に変更する場合は、通信総量が多い ($W=100$ 固定に比べ、15%から20%多い) もの、 $W=10$ 固定に比べ、やや少ない。Fig.9に、測定期間における最適ウィンドウサイズの変化を示す。最適ウィンドウサイズによる制御を行った場合よりも、 $W=10$ 固定とした場合の方が多くなった理由は以下の通りである。測定した通信環境では、最適ウィンドウサイズは10以上で、あまり大きくない。したがって、 $W=10$ 固定では、ウィンドウサイズ内でのパケット欠落は起こり難く、パケットの再送は少ない。また、ウィンドウサイズが小さいことから発生するデータ転送の同期処理のオーバーヘッドも小さい。これに対し、最適ウィンドウサイズを動的に変更する場合は、ウィンドウサイズ変更

のオーバーヘッドが発生する。この場合、最適ウィンドウサイズの効果よりもウィンドウサイズ変更のオーバーヘッドの方が、全体の通信効率に大きく影響したと考えられる。

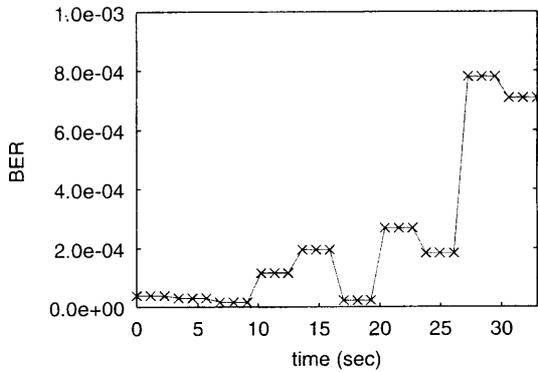


Fig.6 BER(1Mbps)

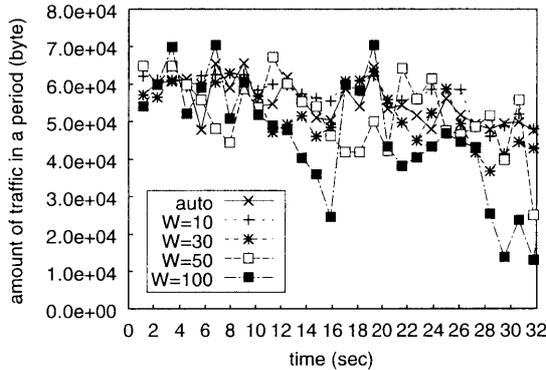


Fig.7 Effects of adaptive control (1Mbps)

そこで、通信路の通信速度を10Mbpsとした場合について、通信総量と最適ウィンドウサイズの変化をFig.10とFig.11に示す。通信速度が10Mbpsの場合、期間内の最適ウィンドウサイズは最低で18、最高で123となった。Fig.10から、最適ウィンドウサイズを動的に変更する場合は、W=100固定の場合にくらべて約15%多く、W=30固定の場合に比べて約10%多い。通信速度が10Mbpsの場合には、ウィンドウサイズを変更するためのオーバーヘッドに関わらず、我々の通信制御機構を利用することで最も良い性能を得ることができた。

5. おわりに

通信途中に通信品質が変化する環境に対して、動的に通信条件を変更することで通信効率の低下を抑制するための通信制御機構を提案した。今後、利用が広まると予想される、無線LANや衛星通信路といった無線通信路に対して本通信制御機構は有効である。本稿では、通信制御機構を提案した。さらに、通信効率を最大にする最適ウィンドウサイズの予測式について、通信制御機構を実装する上での問題点を挙げ、最適ウィンドウサイズ予測

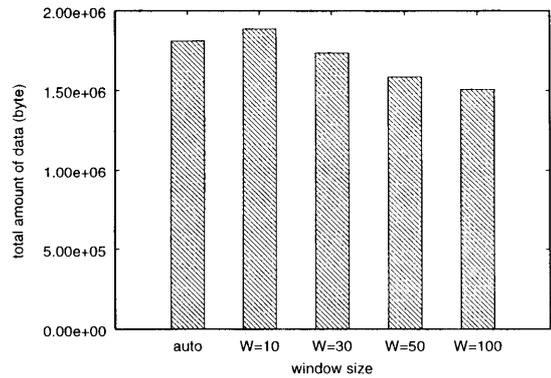


Fig.8 Total amount of traffic (1Mbps)

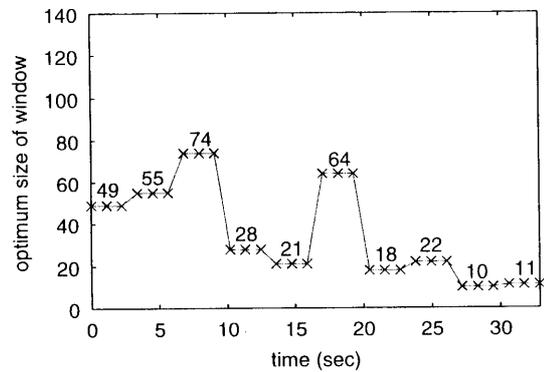


Fig.9 Optimum window size (1Mbps)

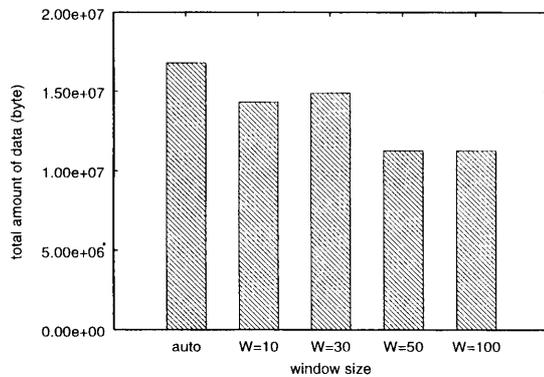


Fig.10 Total amount of traffic (10Mbps)

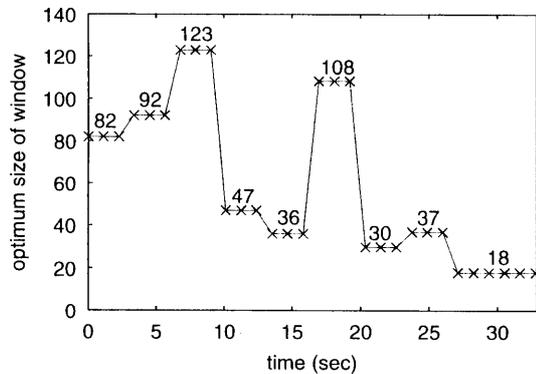


Fig.11 Optimum window size (10Mbps)

式を改善した簡略式を導いた。

提案する通信制御機構の有効性を確認するために、有線通信路上に、通信品質の変化を制御可能な擬似衛星通信路を実装し、その上で本通信制御機構を利用したデータ送受信を行い評価した。測定から、簡略式を利用した最適ウィンドウサイズに基づく制御を行うことで、通信品質の変化に関わらず、単位時間あたりの通信量を安定させることができ、ウィンドウサイズ固定とするよりも良い通信効率を実現できた。ただし、ウィンドウサイズの変更処理がオーバーヘッド増加となり得る。

今後の課題としては、実際の衛星通信を利用した評価がある。また、OS核内に本通信制御機構とFCC通信制御手順を実装し評価することがある。

本研究は、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業(プロジェクト番号: JSPS-RFTF96P00603)による。

参 考 文 献

- 1) N. Dagdeviren, J.A. Newell, L.A. Spindel, and M.J. Stefanick: "Global Networking with ISDN," IEEE Commun. Magazine, vol.32, pp.26-32 (1994).
- 2) T. Hatsuda: "Packet Communication Ultra-Small Aperture Terminal System for the Hokkaido Integrated Telecommunication Network," IEEE Trans. MTT, Vol.43, No.7, pp.1692-1698 (1995).
- 3) F. Takahata et al.: "Satellite Communication Experiments by Universities," The Journal of The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol.80, No.5, pp.435-456 (1997).
- 4) 大学間共同通信実験, 信学会誌, vol.80, no.5, pp.435-456 (1997).
- 5) K. Ono: "The Performance Tradeoffs of Periodic Reservation Satellite Channels for Packet Switching Multi-Access System," The Trans. of the IECE of Japan, Vol.E63, No.2, pp.104-111 (1990).
- 6) W. Stallings: "Handbook of Computer- Communications Standards, Volume 2: Local Network Standards," Addison-Wesley, Reading, Mass. (1987).
- 7) 野口裕介, 谷口秀夫, 牛島和夫: "通信路の品質変化に対応するための通信制御手順," 九州大学大学院システム情報科学紀要, Vol.5, No.2, pp.229-235 (2000).

