

回線エミュレーションにおいてクロストラフィックを考慮した 適応クロック回路の設計に関する研究

2006MI023 波多野 友香 2006MI202 山田 佳美

指導教員 奥村 康行

1. はじめに

回線エミュレーションは、同期通信サービスを非同期通信ネットワーク上に構築する方式で、既に複数の方式が提案され標準化もされつつある。それによって、既存同期ネットワークと非同期ネットワークの統合が可能となり、ネットワークの経済化・柔軟化をもたらすことが期待できる。

回線エミュレーションでは、非同期通信ネットワーク上に構築される同期通信サービスの品質保持・劣化抑圧が技術的課題となる。この内、端末へのクロックの配信・同期は最も重要な技術的課題の1つであり、この課題の一般的な解決手段として適応クロック法がある。

先行研究では、受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔が一定という前提で研究が行われていた。[1]しかし、実際はクロストラフィックの影響があるため、時間間隔が一定ではないと予想できる。そのため、本研究は受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔を統計的な性質を分析する。そして、その結果に基づき適応クロック法を用いた最適なクロック回路の設計を行う。

2. 回線エミュレーションと課題

回線エミュレーションとその課題について述べる。

2.1. 回線エミュレーションについて [1]

回線エミュレーションとは、ユーザ側の電気通信端末に対して擬似的に電気通信事業者の網に接続されているように見せかける機能である。図1では同期通信サービスを非同期通信ネットワークを介して接続する構成を示している。

同期通信とは、送信側と受信側でクロックの周波数を一致させる通信であり、専用線で採用されている。一方、インターネットは非同期通信ネットワークである。

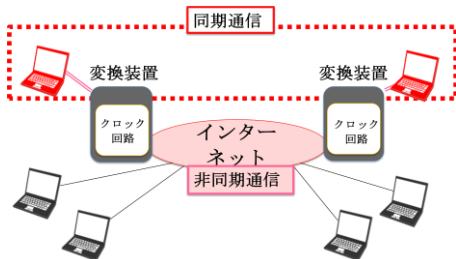


図1 回線エミュレーションの構成

2.2. 適応クロック法

図1のクロック回路に適用される方式として適応クロック法がある。適応クロック法とは非同期ネットワークを介して送信端末に同期させる技術である。具体的には、受信側のクロック回路のバッファ蓄積量によって再生周波数を決定する方式である。本研究では、適応クロック法としてPID制御とバッファ残量擬似平均方式の2つの制御方法を挙げる。

2.3. PID 制御 [2]

PID制御の基本公式は式(1)で基本原理は3つの動作から成る。式(1)の $C_p(b(t) - b_0)$ はP制御、 $C_i \int (b(t) - b_0) dt$ はI制御、 $C_d (db(t)/dt)$ はD制御である。

[基本公式]

$$f(t) - f(0) = C_p(b(t) - b_0) + C_i \int (b(t) - b_0) dt + C_d \left(\frac{db(t)}{dt} \right) \dots (1)$$

$f(t)$: t の時間の周波数 $f(0)$: 初期の周波数

$b(t)$: t の時間のバッファ占有度

C_p : 比例係数 C_d : 微分係数 C_i : 積分係数

Pは現在の偏差に比例した修正量を出す比例制御(P制御)である。Iは過去の偏差の累積値に比例した修正量を出す積分制御(I制御)である。Dは偏差が増加しつつあるか減少しつつあるか、その傾向の大きさに比例した修正量を出す微分制御(D制御)である。

この3つを加算合成したものであり、バッファ残量に応じて目的の周波数に近似するように制御する。

2.4. バッファ残量擬似平均方式 [3]

バッファ残量擬似平均方式は過去N回分のバッファ残量の擬似的な平均値を求め、その平均値に重み係数を掛けた値を制御値とするフィードバック制御である。

下記の式(2)で、サンプリングサイクル毎に過去N回分の擬似平均値 H_{S_n} を求めている。式(3)で、式(2)で求めた擬似平均値 H_{S_n} に重み係数である感度Aを掛けて制御値 U_n を算出している。

[基本公式]

$$H_{S_n} = ((N - 1) * H_{S_{n-1}} + H_n) / N \dots (2)$$

$$U_n = A * H_{S_n} \dots (3)$$

U_n : (n回目の)制御値 A : 感度 N : 平均母数

H_n : (n回目の)観測値 H_{S_n} : (n回目の)平均値

3. ネットワークシミュレーションによる

時間間隔の解析

ネットワークシミュレーションで受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔の統計的な性質を分析する。

3.1. ネットワークモデル

受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔の統計的な性質を分析する。そこで図2のようなネットワークポロジィ I と、ノードを増やして複雑化した図3のようなネットワークポロジィ II を検討する。図2において、ノード n0 とノード n23 が専用線、それ以外のホストはインターネットとする。図2の n0-n23 間のプロトコルは UDP を用い、スループットは 64kbps に固定する。ノード n1-n20...ノード n24-n43 間のプロトコルは TCP を用いる。

図2の場合、TCP の数が 20 個のとき n0 から n20, n23-n43 までをアクセスネットワーク、n21 から n22 までをバックボーンネットワークと定める。

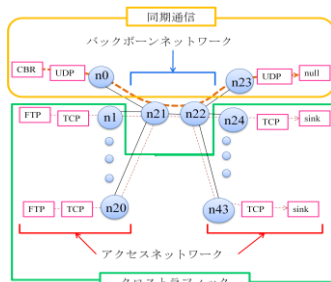


図2 ネットワークポロジィ I (TCP:20 個)

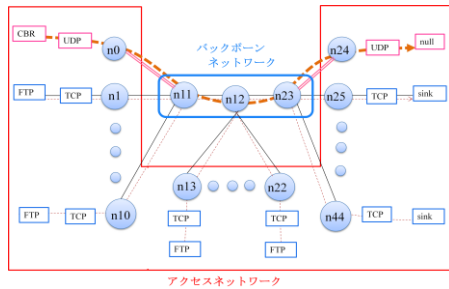


図3 ネットワークポロジィ II (TCP:20 個)

3.2. 測定項目

図2, 図3のアクセスネットワークとバックボーンネットワークのスループットとTCPの個数を変化させてNS2でシミュレーションを行う。バックボーンネットワークを100Mbpsと固定し、アクセスネットワークを1, 10, 100Mbpsと変化させ組み合わせさせたモデルを、それぞれモデル1, 2, 3とする。

3.3. 時間間隔の平均値と標準偏差

図2, 図3のネットワークポロジィでシミュレーションし、UDPのパケットが受信側のクロック回路に到着する時間間隔の平均値と標準偏差を求め、その分布を示す。

図4 (a), (b)に、TCPが20個、図5 (a), (b)に、スループットがモデル3で測定した結果をグラフで示す。

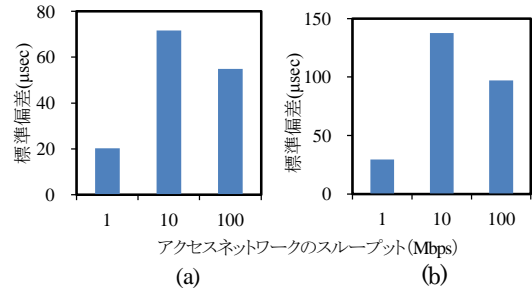
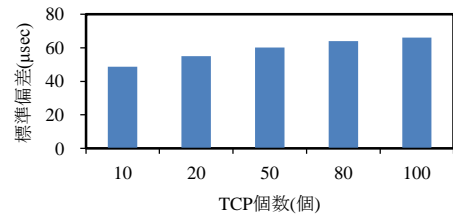
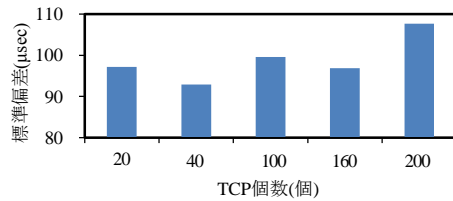


図4 TCPが20個のときUDPのパケットが到着する時間間隔の標準偏差(モデル1-3)

(a)ネットワークポロジィ I
(b)ネットワークポロジィ II



(a)



(b)

図5 スループットがモデル3のときのUDPのパケットが到着する時間間隔の標準偏差

(a)ネットワークポロジィ I
(b)ネットワークポロジィ II

図4 (a), (b)より、モデル1からモデル2の標準偏差の値は増加しているが、モデル2からモデル3の標準偏差の値は減少している。

図5(a), (b)より、TCPの個数が増えるにつれて標準偏差の値も増加している傾向がみられる。

3.4. 考察

図4, 図5の特性の理由は、次のように考えられる。クロストラフィックの影響でバックボーンネットワークに到着するパケットが増えて混雑するため、パケットの量が多い時間と少ない時間ができ、時間間隔がばらつく。

4. 数値シミュレーションの結果

PID 制御とバッファ残量擬似平均方式を用いて、数値シミュレーションの結果を述べる。

4. 1. 数値シミュレーションにおける収束・ジッタの定義

数値シミュレーションにおける収束時間は、受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔が一定ではないため、目標周波数(64,000Hz)との誤差が ± 200 ppm(12.8Hz)以内で収まったとき収束とみなす。

また、ジッタの定義は収束の定義により収束時のジッタ値を測定する。ジッタとは、クロック信号のようなパルス信号の位置や幅がずれたときのずれた量を指す。本研究でのジッタは Peak to Peak ジッタを定義する。

$$jitter[ppm] = \frac{f_{max}[Hz] - f_{min}[Hz]}{f} \times 10^6 [ppm]$$

f_{max} , f_{min} : 最大, 最小周波数 f : 目標周波数[Hz]

4. 2. PID 制御

PID 制御を具体的なパラメータを用いて数値シミュレーションを行う。初期周波数 $f_0=63,986.423518$ [Hz], 目標周波数 $f=64,000$ [Hz], 目標のバッファ占有度 30[Byte], 微分係数 $C_d=0$, バッファ使用量のサンプリングサイクル $T=1$ ms としている。送信信号は受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔が一定ではないため、正規乱数を発生させるボックスミュラー法を用いて求める。数値シミュレーションで用いる平均値 m と標準偏差 σ の値は、TCP が 20 個でモデル 3 の $m=125 \mu sec$, $\sigma=54.93 \mu sec$ とする。

このときの数値シミュレーションでは、クロック再生回路がパケットを受信し始めてからの再生クロック周波数およびバッファ使用量の時間変化を求めた。PID 制御における数値シミュレーションは、比例係数 $C_p=10000$, 積分係数 $C_i=17000$ とし、結果を図 6 でグラフに示す。

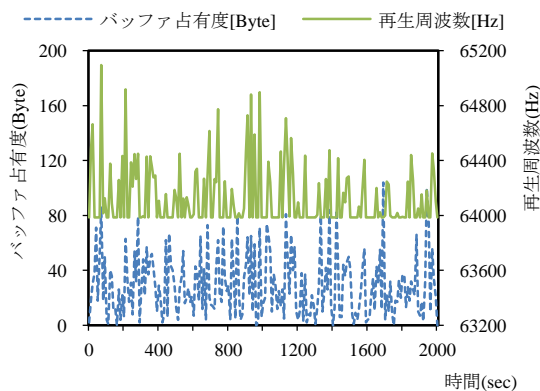


図 6 数値シミュレーション結果 ($C_p=10000$, $C_i=17000$) (PID 制御の再生周波数とバッファ占有度の特性)

図 6 のグラフは 41.5sec で収束するが、その後も振動している。それは、受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔が一定ではないためであると考えられる。

次にジッタも観点に入れて、数値シミュレーションをする。表 1 は、PID 制御における収束時間が 50sec 以内に収束する比例係数, 積分係数のモデル (V, W, X, Y, Z) を示す。図 7 は数値パラメータ (表 1) における数値シミュレーションした結果を示す。

表 1 数値シミュレーションのモデル V, W, X, Y, Z (PID 制御)

モデル V	$C_p=32000$, $C_i=23000$
モデル W	$C_p=4500$, $C_i=13000$
モデル X	$C_p=2000$, $C_i=9500$
モデル Y	$C_p=8500$, $C_i=3000$
モデル Z	$C_p=4500$, $C_i=1500$

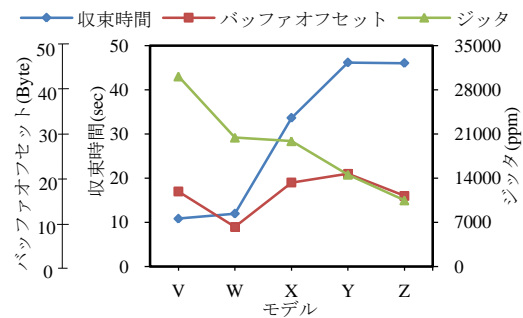


図 7 PID 制御 (バッファオフセット・収束時間・ジッタ)

図 7 から、 C_p を下げることで収束時間の縮小は達成出来ないが、バッファオフセット・ジッタの縮小は達成する。

3 つの観点 (バッファオフセット・ジッタ・収束時間) の内、バッファオフセットは C_p を下げることで減少している。

よって結果として、ジッタを優先して考えた場合はモデル Z が適している。また、収束時間を優先して考えた場合はモデル V が適している。

4. 3. バッファ残量擬似平均方式

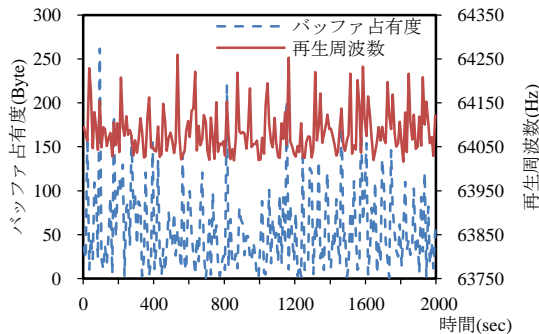
数値シミュレーションは初期周数 $f_0=63,986.423518$ [Hz], 目標周波数 $f=64,000$ [Hz], 目標のバッファ占有度 4[Byte], サンプリングサイクル $T=1$ [ms], 平均母数 $N:4096$ とする。送信信号は受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔が一定ではないため、正規乱数を発生させるボックスミュラー法を用いて求める。数値シミュレーションで用いる平均値 m と標準偏差 σ の値は、TCP が 20 個でモデル 3 の $m=125 \mu sec$, $\sigma=54.93 \mu sec$ とする。バッファ残量擬似平均方式の数値シミュレーションは表 2 の 2 通りのパラメータで行う。

表2 数値シミュレーションで用いたパラメータ
(バッファ残量擬似平均方式)

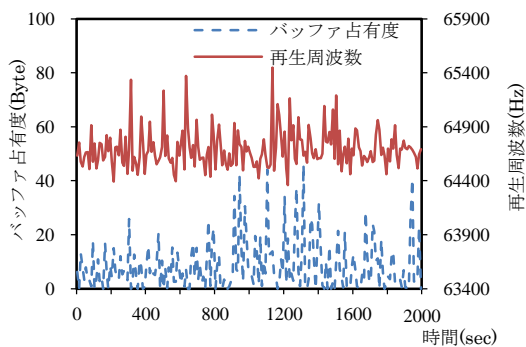
モデル D	A=2
モデル E	A=128

モデル D(図 8(a))では収束時間, バッファオフセットおよびジッタは 5.0sec, 48.2Byte, 4693.5ppm である。

モデル E(図 8(b))では収束時間, バッファオフセットおよびジッタは 25.4sec, 4.2Byte, 20689.9ppm である。



(a) 感度 A=2 (モデル D)



(b) 感度 A=128 (モデル E)

図8 数値シミュレーション結果
(バッファ残量擬似平均方式の再生周波数と
バッファ占有度の特性)

図 8(a), (b)のグラフはそれぞれ 5.0sec, 25.4sec で収束するが, その後も振動している。それは, 受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔が一定ではないためであると考えられる。

次にジッタ・収束時間も観点に入れて, 数値シミュレーションをする。

図 9 にバッファ残量擬似平均方式における感度 A(2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256)を変化させて, 収束時間が常に 160sec 以内に収束した結果を示す。

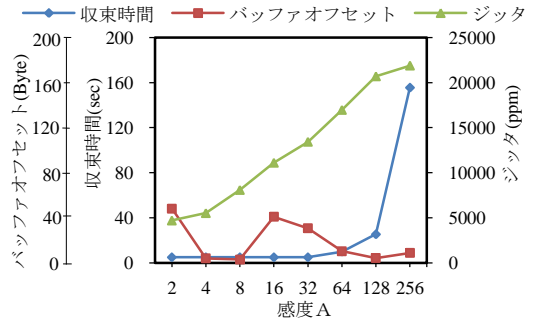


図9 バッファ残量擬似平均方式
(バッファオフセット・収束時間・ジッタ)

図 9 から, 感度 A を下げることでバッファオフセットの縮小は達成出来ないが, 収束時間・ジッタの縮小は達成する。3つの観点の内, バッファオフセットは, 感度 A を下げることで増加している。よって結果として, ジッタ・収束時間を優先して考えた場合, モデル D が適している。

5. まとめと今後の課題

本論文では, 回線エミュレーションにおける適応クロック法に PID 制御とバッファ残量擬似平均方式の制御方法を用いたときの有効性をバッファオフセット, ジッタ, 収束時間から数値シミュレーションを行い, 定性的・定量的に検証した。その結果, ジッタの安定性, 収束するまでの時間を考慮するとバッファ残量擬似平均方式が実用的である。

今後の課題として, 受信側のクロック回路に到着するパケットの時間間隔の統計的な性質を分析するときクロストラフィックのプロトコルとして TCP のみではなく UDP を付加し, さらにノードを増やして複雑なネットワークポロジでネットワークシミュレーションを行う必要がある。また, PID 制御, バッファ残量擬似平均方式のクロック再生回路について構成, 試作, 動作を検証し, コスト面から本方式がデジタル回路で実現できることを実証する必要がある。

参考文献

- [1] 舟橋 拓郎, 伊藤 寛和, 乗本 清隆:“回線エミュレーションにおける適応クロック法の比較と検証”, 2008 年度南山大学数理情報学部情報通信学科卒業論文 2009.
- [2] 深田 陽一, 安田 武, 小松 秀司, 斎藤 幸一, 前田 洋一:“Adaptive Clock Recovery Method Utilizing Proportional-Integral-Derivative(PID) Control for Circuit Emulation”, 電子情報通信学会, 信学技報 IEICE Technical ReportCS2005-43 (2005-11).
- [3] 村上 謙, 横谷 哲也:“TDM over Ethernet におけるクロック精度検証”, 電子情報通信学会, 信学技報 CS2006-1, CQ2006-5 (2006-4).