

家庭内ネットワークにおけるQoS設定とTCPの伝送特性の分析

足立 誠 田中 敏幸 北口 進

シャープ株式会社 〒632-8567 奈良県天理市櫛本町 2613-1
E-mail: adachi-makoto@sharp.co.jp

あらまし 家庭内ネットワークにおいて、高品位な映像や音声を高品質に伝送するために、帯域確保可能な通信媒体の開発が行われている。本稿では、これらの通信媒体を用いて、TCP/IP で構築された家庭内ネットワークを想定し、帯域確保技術の1つである TDMA で制御された通信媒体を1つまたは2つ跨いだ構成で、TCP によるハイビジョン映像の伝送実験と結果について考察を行った。その結果、1つの系で構成される場合では、TDMA の周期が長いと TCP の Long Fat Pipe 問題により、割り当てられた伝送帯域を有効に使えない場合を確認した。また、2つの系を跨ぐ場合においては、TDMA の各周期の開始時間の差が伝送レートに影響を及ぼし、End To End の伝送レートが最悪の場合 1/2 になることがわかった。

キーワード 家庭内ネットワーク, TCP, QoS, TDMA

The Performance Analysis of TCP on the household QoS network.

Makoto Adachi, Toshiyuki Tanaka, Susumu Kitaguchi

2613-1 Ichinomoto-cho, Tenri, Nara, 632-8567 Japan
E-mail: adachi-makoto@sharp.co.jp

Keyword household network, TCP, QoS, TDMA

Abstract In the household network, the network medium for the high quality AV transmission has been developed. In this paper, we described the performance analysis of TCP Transmission using those network medium controlled by QoS(Quality of Service) using TDMA. The result on the non hop network shows that the Long Fat Pipe problem is caused by the TDMA period. Furthermore, the result on the single hop network shows that the difference of TDMA start time of each period influences transmission rate, and in the worst case the rate becomes half.

1. はじめに

近年、家庭内の家電機器を相互に接続し、ユーザに新しい利用シーンを提供する、いわゆるホームネットワークに関する技術開発が行われている。

Digital Living Network Alliance (DLNA) [1]は、ホームネットワーク分野において、家庭内でのAV機器の相互接続性の問題を解決するために2003年6月に設立された。DLNAにおいては、PC、家電、モバイル機器の間での映像/音声等のデータのやり取りのために、HTTP/TCP/IPを用いた伝送を規定している。

また、DLNAでは、家庭内の各機器を接続するネットワークインフラとして、EthernetとIEEE 802.11a, b, gを規定しているが、今後は映像や音声の品質を確保するという面からQoS (Quality of Service) に関する要求が高まっている。

QoSの技術としては、IEEE802.1d[2] AnnexG

で規定されている優先度による制御の他、必要な帯域を通信媒体上で確保できる帯域保証による制御がある。家庭内ネットワークで伝送される映像や音声は他のストリームなどの影響によって、伝送レートが落ちることを防ぐため、伝送路上に必要な帯域を確保して伝送することが望ましい。そのため、より信頼性の高い伝送を行うには帯域保証を行う必要がある。

帯域保証によるQoSの機能を持つ通信媒体の規格としては、無線LANの拡張であるIEEE 802.11e[3]や電力線を用いた通信技術であるPLC(Power Line Communication)の標準化規格のHome Plug AV[4]などがある。

これらの通信媒体では、QoSを確保するためにTDMA(Time Division Multiple Access)を用いた制御を行うことが考えられている。

TDMAによる伝送帯域の割当では、IPアドレス、

ポート番号などによって規定された各ストリームに対して、特定の時間帯が割り当てられ、その時間帯を独占的に利用する。その為、他のストリームは伝送待ちが発生することになる。

TDMAの系においてTCPの伝送を行う場合、通常上り方向と下り方向がそれぞれ別々の伝送として取り扱われるので、ACKの遅延が引き起こされ、割り当てられた伝送帯域を十分に使用できないことが予想される。(Long Fat Pipeの問題[5])

そのため、リアルタイムにTDMA上でTCPの伝送を行うには、通信の各系の伝送特性を考慮して設計する必要があると予想される。

そこで、本稿では同軸ケーブルを用いた通信媒体であるCOAXを用いてTDMA制御を行い、今後、家庭内でのヘトログニアスなネットワークで想定される、TCPによるハイビジョン映像コンテンツの伝送実験を行った。また、実験結果についての考察について述べる。

2. 家庭内ネットワーク

2. 1. 家庭内ネットワークの構成

家庭内でネットワークを構築する上で、ユーザーにとって重要な点は、機器の設置、ネットワークの構築が容易であることである。無線LAN(IEEE 802.11a, b, g)に代表されるような無線系の通信媒体は、他の機器と物理的に繋ぐことなくネットワークを構築できるので、現在最もよく普及している通信媒体である。しかし、無線の特性上、通信距離が伸びたり遮蔽物があったりすると、伝送レートが低下するという特性があり、部屋を跨いで、家庭内の機器同士で通信するような利用シーンには不向きである。このような問題を解決するために、既存の家庭内のインフラを用いた通信技術であるPLCやCOAXの開発が進められている。

図1はそれらの通信媒体を用いて家庭内ネットワークを構築した場合の構成例である。

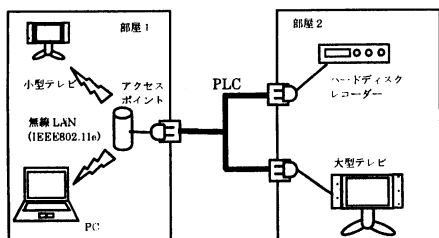


図1: 家庭内ネットワークの構成例

部屋1と部屋2をつなぐ家庭内のバックボーンとしては、PLCを用いている。また、大型のテレビやハードディスクレコーダなどの据え置き型のAV機器については、電源プラグから直接家庭内ネットワークに接続される。また、小型の持ち運び可能なテレビやノートPCなどの設置場所が固定されないような機器は、利便性を考慮した場合、ワイヤレスで接続することが望ましいので、無線

LANによって接続されている。

2. 2. 家庭内ネットワークのQoSの問題

家庭内ネットワークでの高品質なAV伝送を実現するために、IEEE802.11eやPLC、COAXはパラメータベースでのQoS機能を有しており、その代表的な制御方法はTDMAによる時分割制御である。

ところで、TDMA制御でQoSを確保することを考えた場合、それぞれの通信媒体で考慮されているのは、各通信媒体を単独で使用し、且つ割り当てられた時間帯をすべて使用した場合に、要求された伝送速度が確保できることであり、他の通信媒体と接続された場合や、上位プロトコルの伝送特性による影響については考慮されていない。

つまり、図1に示すような、IEEE802.11eとPLCが相互に接続され各系がTDMA制御された状態で、AVデータのストリーム伝送を行った場合に問題が生じる可能性がある。特に、TCPのような、再送やフロー制御などの複雑なやりとりを行うプロトコルを用いた場合は、その可能性は高いと考えられる。

本稿では、この点に着目し、1つのTDMA伝送区間を含むネットワーク構成と2つ跨った構成でのTCPによる伝送実験を行った。

3. 伝送実験

3. 1. 実験構成

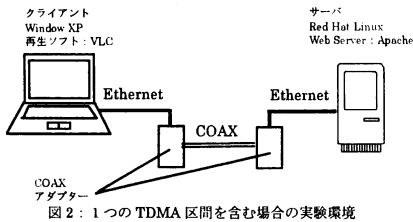
ネットワーク構成は図1のネットワーク構成を単純化し、1つのTDMA区間を含む構成と2つのTDMA区間を含む構成の2つの場合について行った。TDMA制御可能な通信媒体としては、COAXを用いた。

3.1.1. 1つのTDMA区間を含む場合

図2は、1つのTDMA区間を含む場合の実験環境である。COAXアダプターはCOAXとEthernet(100Base-TX)のブリッジであり、Ethernetフレームをトンネリングして、他のノードに伝送する機器である。

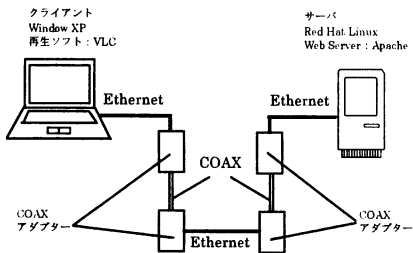
COAX上では、下り方向(サーバ→クライアント)と上り方向(クライアント→サーバ)のそれぞれに対して時間の割り当てが可能である。割り当て時間の設定条件としては、上り方向と下り方向の合計が、5msecから50msecの範囲となっている。

COAX上での最大伝送レートは約80Mbpsであり、Ethernet(約90Mbps)に比べて小さいので、Ethernetによる通信のボトルネックは発生しないと考えられる。



3.1.2. 2つの TDMA 区間を含む場合

図 3 は 2つの TDMA 制御された伝送区間を含む場合の実験環境である。基本的な構成は、1つの TDMA 区間を含む場合と同じである。COAX アダプター間の接続は Ethernet を用いるが、上記理由と同様に Ethernet によるボトルネックは発生しない。



3. 2. 実験方法

実験は、家庭内での AV 伝送において、ハイビジョンの映像データのリアルタイム配信が可能か否かという観点から、サーバ PC 上に保存されたハイビジョン映像データを、HTTP で取得し、クライアントで再生するという方法で実験を行った。

再生アプリケーションは、Video Lan Client[6] を使用し、HTTP サーバは、Apache を用いた。

また、伝送するコンテンツは、5分間の 23Mbps の MPEG2-TS コンテンツを用い、5分間の間に映像が停止したり、途切れたりする現象が発生しなければ『成功』、発生した場合は『失敗』として判定した。

また、COAX 上の TDMA の制御としては、モデルを単純化するために、上り方向と下り方向のみの制御を行い、他のストリームを流さない実験を行った。

4. 実験結果

4. 1. 実験 1 (一つの TDMA 区間を含む場合)

表 1 は、1つの TDMA 区間を含む場合の実験結果である。

なお、UDP を用いて伝送レートを計測したところ、すべての場合において 35Mbps 以上となっており、23Mbps のコンテンツを伝送するには十分である。

表 1 : 実験結果 1

下り時間 (msec)	上り時間 (msec)	合計 (msec)	成功	失敗	成功率
20	20	40	0	12	0%
15	15	30	0	12	0%
10	10	20	11	1	92%
7.5	7.5	15	12	0	100%
5	5	10	12	0	100%
2.5	2.5	5	12	0	100%

合計の割り当て時間が 20msec を超えた時点で伝送ができない場合が観測されるようになり、30msec 以上になると伝送ができなくなる。

4. 2. 実験 2 (二つの TDMA 区間を含む場合)

表 2 は、二つの TDMA 区間を含む場合の実験結果である。

実験 2 では、上りと下りの割り当て時間及び、2つの COAX の設定を同じにして実験を行った。また、実験 1 の場合と同様に UDP を用いて伝送レートを計測したところ、すべての場合において 35Mbps 以上の伝送レートが得られていた。

表 2 : 実験結果 2

下り時間 (msec)	上り時間 (msec)	合計 (msec)	成功	失敗	成功率
20	20	40×2	0	12	0%
15	15	30×2	0	12	0%
10	10	20×2	0	12	0%
7.5	7.5	15×2	5	7	42%
5	5	10×2	10	2	83%
2.5	2.5	5×2	12	0	100%

実験 1 においては、上り下りそれぞれへの割り当てが 7.5msec 以下であれば、100%成功していたのに対して、本実験においては、成功率が 100%になったのは、2.5msec の場合のみで、5msec の場合でも 83%の成功率という結果になった。

5. 考察

5. 1. 一つの TDMA 区間を含む場合

TCP では、通信路の伝送帯域に対して、往復の伝送遅延が大きいと、伝送レートが低下することが一般に知られている。

伝送路の通信能力を $r(\text{bps})$ TCP の Window Size を $W(\text{bit})$ 、往復の伝送遅延を $\text{RTT}(s)$ とした場合、TCP の伝送レートを $R(\text{bps})$ は、

$$R = \min(r, W/\text{RTT}) \quad (1)$$

と表される。

今回の実験で使用した媒体上での TDMA 制御では、ACK が伝送できるのは上り方向の時間が割り当てられている区間に限られる。また、ACK を受信して直ちに次のデータを送信したとしても、下り方向の時間割当てが開始されるまで、COAX アダプター上で伝送が待たされることになる。図 4 に

示すように、各 TCP パケットに対する ACK は下り方向の時間帯の割り当て区間が終了するまで待たされる。

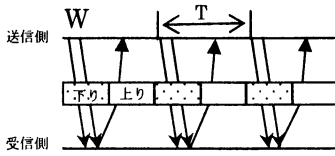


図4: TDMA 上の TCP の動作

データの伝送は下り方向の時間帯の割り当てでしか行わないとした場合、下り方向の時間帯の割り当て周期を $T(\text{sec})$ とすると、 T の間に伝送できるデータ量は最大 Window Size 分 W となるので、伝送路の通信能力を $r(\text{bps})$ とした場合、TCP の伝送レートを $R(\text{bps})$ は、

$$R = \min(r, W/T) \quad (2)$$

と表すことができる。

図5に、Window Size を 64Kbyte としたときの、TDMA の周期と Window Size の関係を示す。

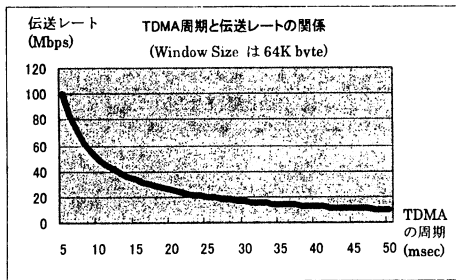


図5: TDMA の周期と伝送レートの関係

23Mbps のコンテンツを伝送する場合に設定すべき、TDMA の周期は、Window Size が 64K byte の場合、式(2)より、約 22.3 msec 以下である。これは、実験結果の上りと下りの合計が、20msec 以下の場合、ほとんど伝送が成功するのに対して、30msec 以上の設定だと、全ての場合において失敗した結果と一致する。

上りと下りの合計を 20msec に設定した場合、一度伝送エラーが確認されたが、これは、伝送レートに余裕が少ないため、

- ・ TCP の再送によるオーバーヘッド
- ・ 輻輳制御による伝送レートの一時低下の影響を受けやすいことが原因であると考えられる。

よって、TDMA 上で TCP を用いて映像、音声などのリアルタイムデータを伝送する場合には、必要な伝送レートと Window Size から適切に、TDMA の周期を設定する必要がある。

5. 2. 二つの TDMA 区間を含む場合

実験2では、実験1ですべて成功した 7.5msec や 5msec の設定において、失敗する場合があった。また、10msec の設定においては、すべて失敗という結果になった。これは次のような理由が考えられる。

今回の実験は、二つの COAX の系に対して上りと下りの時間を同じにして設定したが、各周期の開始時刻は同期されていない。仮に、図6のように第一の系と第二の系において、各周期の開始時刻が同期されていれば、第一の系を通過したデータは直ちに第二の系を通過できる。すなわち、TDMA の1周期で Window Size 分のデータを伝送できることになる。接続部によるオーバーヘッドがないと考えた場合、一つの TDMA 区間を含む場合と同じ伝送レートを得ることができる。

一方、図7のように、開始時刻が周期の 1/2 ずれているような場合においては、第一の系を通過したデータは、第二の系に入った時点で待たされることになり、ACK が送信側に到着するのは、図6の場合とくらべて、1周期分遅れることになる。つまり、Window Size 分を伝送する周期が2倍になるので、図7の場合は図6と比べて伝送レートは 1/2 になる。

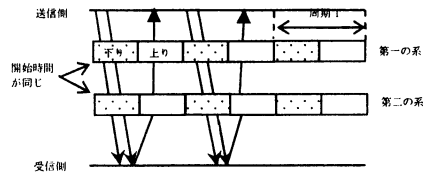


図6: 開始時刻が同じ場合の動作

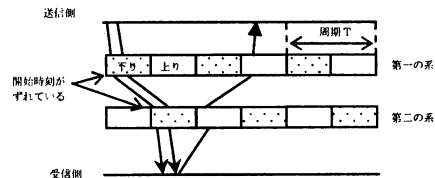


図7: 開始時刻が異なる場合の動作

つまり、ネットワークを構成する 2 つの系に対して同じ設定をしたとしても、TDMA の周期の開始時刻がどれだけずれているかによって伝送レートが変化することになる。

5. 3. 開始時間の差と伝送レートとの関係

TDMA の周期を $T(\text{sec})$ 、TCP の Window Size を $W(\text{bit})$ 、 W に対する Ack のデータ量を $A(\text{bit})$ 、通信媒体の能力を $R(\text{bps})$ とした場合、開始時間の差 $\Delta t (T/2 \leq \Delta t < T/2)$ によって TCP の伝送レートは異なる変化をする。

$$\textcircled{1} \quad -T/2 \leq \Delta t < W/R - T/2 \text{ の時}$$

Window Size 分のデータが第二の系の下り区間で伝送しきれない場合があり伝送レ

トが低下する

- ② $W/R \cdot T/2 \leq \Delta t < T/2 \cdot A/R$ の時
Window Size 分のデータの伝送と Ack が一つの周期内で伝送でき、伝送レートの低下は起こらない
- ③ $T/2 - A/R \leq \Delta t < T/2$ の時
Window Size 分のデータに対する Ack の一部が、第一の系の上り区間で伝送しきれない場合があり、伝送レートが低下する。

以下、各場合について詳細に説明する。ただし、ここでは、系と系の接続時のオーバーヘッドは考慮しない。

5.3.1. $-T/2 \leq \Delta t < W/R - T/2$ の場合

図 8 に示すように、最初の区間で W 送出したとすると、第一の系と第二の系の重なっている時間は $T/2 + \Delta t$ なので、その区間で第二の系を通過するデータ量は、 $R \times (T/2 + \Delta t)$ であり、残りのデータは第二の系の下り方向の割り当てで通過することになる。このデータに対する Ack は第一の区間内に送信側に返されることになる。

一方、第二の区間においては、 $R \times (T/2 + \Delta t)$ のデータを送出し、それに対する Ack が返されると共に、第一の区間で送出されたデータの残りの Ack も返されることになり、その合計は A となるので、次の区間においては、W の送出が可能となる。

この後、各区間での伝送データ量は、W と $R \times (T/2 + \Delta t)$ の繰り返しになるので、平均の伝送レートは、

$$\{W + R \times (T/2 + \Delta t)\} / (2 \times T) \quad (3)$$

と表すことができる。

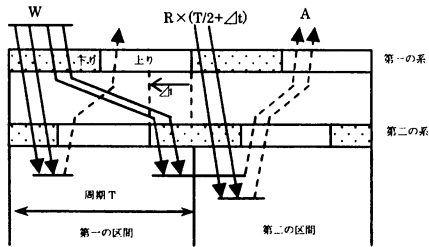


図 8 : $-T/2 \leq \Delta t < W/R - T/2$ の TCP の動作

5.3.2. $W/R \cdot T/2 \leq \Delta t < T/2 \cdot A/R$ の場合

図 9 のように、 Δt が $W/R \cdot T/2 \leq \Delta t < T/2 \cdot A/R$ の範囲にある場合は、第一の系の下りの開始時間からの第一の系と第二の系の重なり時間が、 W/R 以上あるので、第一の系と第二の系の接続部において、待ちが発生せず、Ack も直ちに返すことができるので、伝送レートの低下は発生しない。

また、図 10 のように、 Δt が $0 \leq \Delta t < T/2 \cdot A/R$ の範囲にある場合は、第一の系を通過したデータは最大 Δt 待たされることになるが、第二の系の上

り方向の開始時間から、上り方向の時間の重なりが、 A/R 以上あるため、Ack の待ちは発生せず、送信機側に伝送されるので、伝送レートの低下は発生しない。

よって、 $W/R \cdot T/2 \leq \Delta t < T/2 \cdot A/R$ の範囲における平均の伝送レートは、

$$W/T \quad (4)$$

と表すことができる。

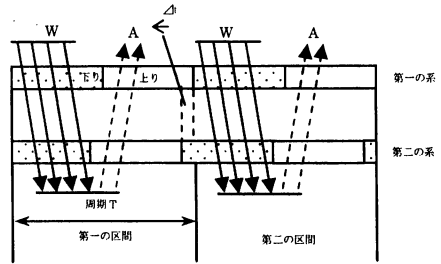


図 9 : $W/R \cdot T/2 \leq \Delta t < T/2 \cdot A/R$ の TCP の動作

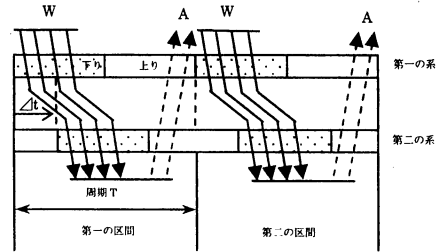


図 10 : $0 \leq \Delta t < T/2 \cdot A/R$ の TCP の動作

5.3.3. $T/2 - A/R \leq \Delta t < T/2$ の場合

図 11 に示すように、第一の系を通過したデータは最大 Δt 遅れて、第二の系を通過する。その Ack はすぐに第二の系を通過するが、上りの時間の重なりは、第二の系の上り方向の開始時刻から、 $T/2 - \Delta t$ であり、条件より A/R 以下となる。この時間においては、一部の Ack しか通過することができず、残りの Ack は次の上り方向の割り当てまで待たされることになる。

一方、第二の区間においては、送出できるデータ量は、

$$(\text{Window Size}) \times (\text{送信側に到着した Ack})$$

$$(\text{Window Size に対する総 Ack})$$

となり、

$$W \times R \times (T/2 - \Delta t) / A \quad (5)$$

と表すことができる。

この区間においては、 $W \times R \times (T/2 - \Delta t) / A$ に対する Ack と第一の区間における残りの Ack も返されることになり、その合計は A となる。

この後、各区間での伝送データ量は、W と $R \times W \times R \times (T/2 - \Delta t) / A$ の繰り返しになるので、平均の伝送レートは、

$$\{W + R \times (T/2 - \Delta t) \times W/A\} / (2 \times T) \quad (6)$$

と表すことができる。

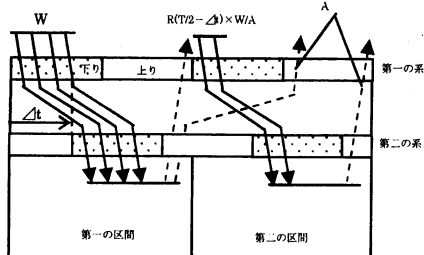


図 11: $T/2 - A/R \leq \Delta t < T/2$ の TCP の動作

5.3.4 開始時間のずれと伝送レートの関係まとめ

以上の結果から、開始時間のずれと伝送レートの関係は、図 12 に示すようになる。

図 7 で示したように、最小の場合の伝送レートは、最大の場合の伝送レートの 1/2 になる。また、映像伝送などの場合においては、上り方向のデータはほとんどなく、Ack のデータ量は非常に少ないことから、図 12 における $\Delta t = T/2 \cdot A/R$ から $T/2$ の間の傾きは非常に大きくなる。この付近では、少しの時間のずれの変化でも大きく伝送レートが変化するものと考えられる。

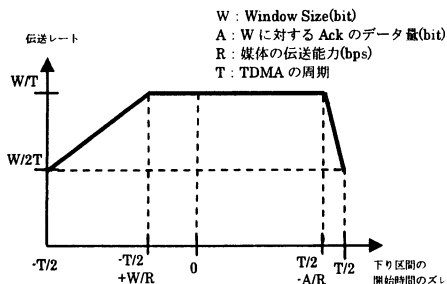


図 12: 開始時間の差と伝送レートの関係

6. クロック誤差に関する考察

2つ以上の TDMA 区間を含む場合、それぞれの系を制御する機器は異なる可能性がある。制御する機器が異なる場合は、機器内部の水晶発信機の精度から各機器の時間の進み方がわずかに異なるが、時間の経過と共に蓄積され、その差が大きくなって現れてくる。そのため、各系に対して周期及び上り/下りの比率を同じ値に設定し、必要な伝送レートが得られている場合であっても、時間の経過とともに徐々に周期の開始時間の差が変化していくため、伝送レートが低下することが予想される。

7. まとめ

以上、本稿では家庭内ネットワークで想定される 1つ又は、2つ TDMA の伝送区間を含むネットワークにおいて、TCP を伝送させた場合の伝送特性についての実験結果と、考察について述べた。

1つの TDMA 区間を含む場合では、時分割の制

御周期が往復の伝送遅延となり、Long Fat Pipe の問題が引き起こされる。特に、映像や音声などのリアルタイム通信を行う場合においては、TCP の Window Size と必要な伝送レートから適切な時分割の制御周期を設定する必要がある。

また、2つの系を跨る場合においては、各系の組合せにより往復の伝送遅延が増大するために、1つの TDMA 区間を含む場合で伝送できたものを直列に接続しても、同じ伝送レートは得られない。それは、各系における TDMA の周期の開始時間の違いによるものと考えられる。最悪の場合の伝送レートは、1つの TDMA 区間を含む場合の 1/2 になる。

さらに、各系を制御する機器のクロック誤差によっては、突然伝送レートが低下する現象が発生することも考えられる。

今後、家庭内ネットワークにおける、QoS 制御を考える場合には、これらの特性を考慮した上で検討していく必要がある。

8. 今後の課題

今回の実験では、通信媒体として現状で利用するにあたって制限が少ないことから、COAX を用いたが、今後の家庭内のネットワークを想定する場合、IEEE802.11e や PLC などの通信媒体での実験が必要であると考えられる。

また、実験の単純化のために伝送路上を流れるストリームは 1つのみで行ったが、複数のストリームで伝送路を分割された場合についても、検証していく必要がある。

さらに、二つの TDMA 区間を含む場合においては、それぞれの系に対して同一の設定で行ったが、周期の長さを異なる値に設定したり、上りと下りの割り当て比率を変化させたりした場合についても、検討していく必要がある。

文献

- [1]DLNA Web ページ <http://www.dlna.org/home>
- [2]IEEE802.1d Web Page <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1D.html>
- [3]IEEE802.11e Web ページ http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tge_update.htm
- [4]Home Plug AV Web ページ <http://homeplug.org/>
- [5] V. Jacobson, R. Braden and D. Borman. TCP extensions for long-delay paths, RFC 1323 October 1992
- [6] VLC: <http://www.videolan.org/>