

IP 放送伝送品質実証実験報告書

2018 年 7 月 24 日

日本ケーブルラボ

Japan Cable Laboratories

目次

1	本書について.....	5
2	実験実施の背景と前提.....	6
2.1	省令としての技術基準.....	6
3	メンバー構成.....	7
4	実証実験の前提.....	7
4.1	IP 放送の定義.....	7
4.2	RF 方式との関係.....	8
4.3	省令の適応範囲.....	9
4.3.1	入力信号と伝送路についての考え方.....	9
4.3.2	棟内環境についての考え方.....	10
4.3.3	宅内環境についての考え方.....	10
4.4	研究会での技術品質基準の考え方.....	10
4.5	参照すべき品質や測定に関する文書.....	10
4.5.1	ITU-T 勧告 J.241.....	10
4.5.2	ITU-T 勧告 Y.1541.....	12
4.5.3	IPTV 規定 STD-0004、0005、0009.....	12
4.6	各要素の定義.....	12
4.6.1	パケット損失 (IP Packet Loss).....	12
4.6.2	遅延 (Latency).....	13
4.6.3	揺らぎ (Jitter).....	13
4.6.4	遅延と揺らぎの測定基準.....	13
5	実験の目的と机上検討.....	14
5.1	実験の目的と呼称.....	14
5.2	物理層品質と IP 層の関係性.....	14
5.3	物理層品質とトランスポート層の関係性.....	15
5.4	IP 層品質と映像品質の関係性.....	16
6	実証実験要件.....	17
7	実験環境.....	18
7.1	物理層実験環境.....	18
7.2	IP 層実験環境.....	19
7.3	優先制御.....	19
7.3.1	FTTH における優先制御.....	19
7.3.2	HFC における優先制御.....	20
7.4	実験データと計測時間.....	22

7.4.1	実験データ	22
7.4.2	BER 計測時間.....	22
7.4.3	PLR 計測時間	23
7.4.4	データ量の想定.....	24
7.4.5	前方誤り訂正(FEC)について.....	24
8	実施結果	25
8.1	FTTH の物理層実験結果と見解.....	25
8.1.1	優先制御の確認.....	25
8.1.2	机上検討と実験結果の違い	25
8.1.3	受光パワーの計測と結果.....	25
8.2	FTTH の IP 層実験結果と見解.....	29
8.2.1	パケット損失の計測と結果	29
8.2.2	パケット遅延と揺らぎの計測と結果.....	31
8.3	HFC の物理層実験結果と見解	32
8.3.1	QoS の確認	32
8.3.2	机上検討と実験結果の違い	32
8.3.3	CN の計測と結果.....	32
8.4	HFC の IP 層実験結果と見解.....	36
8.4.1	パケット損失の計測と結果	36
8.4.2	パケット遅延と揺らぎの計測と結果.....	37
8.5	アクセス網における優先制御の考え方	37
8.6	パケット遅延と揺らぎが映像に与える影響	38
8.7	パケットの揺らぎと STB のバッファ量.....	43
8.7.1	想定するパケット揺らぎのパターン	43
8.7.2	IP 放送対応受信機の構成.....	44
8.7.3	パケットの揺らぎと受信機のバッファ使用量の関係	45
8.8	パケット損失率が映像に与える影響.....	47
8.8.1	パケット損失率と主観画質について.....	47
8.8.2	パケット損失が映像に与える影響	48
8.9	パケット損失と FEC	49
8.9.1	Pro-MPEG FEC COP3.....	49
8.9.2	Pro-MPEG 1D FEC	49
8.9.3	Pro-MPEG 2D FEC	51
8.10	測定方法についての考察.....	52
8.10.1	実験環境における測定	52
8.10.2	フィールドでの測定.....	52

8.11	宅内環境についての考察.....	59
8.11.1	ホームゲートウェイ	59
8.11.2	無線 LAN.....	60
9	エキスパートグループからの提言	63
9.1	IP 放送に関する技術的条件とする値について	63
9.1.1	IP パケットの損失率	63
9.1.2	IP パケットの遅延.....	63
9.1.3	IP パケットの揺らぎ	63
9.2	IP 放送に関する技術的条件に係る測定方法について	63
9.2.1	IP パケットの損失率の測定	63
9.2.2	IP パケットの遅延測定	63
9.2.3	IP パケットの揺らぎ測定.....	64
9.2.4	測定点について.....	64
10	今後の課題.....	65
10.1.1	MMT・TLV に関する課題	65
10.1.2	測定に関する課題	65
10.1.3	宅内環境についての課題	65
Appendix.....		66
1	参考資料（実験データ）	66
2	実験手順	66
2.1	物理層実験	66
2.1.1	期待される実験結果	66
2.1.2	実験手順.....	66
2.2	IP 層実験手順	72
2.2.1	期待される実験結果	72
2.2.2	実験手順.....	72
3	実験結果データ	78

1 本書について

本書は IP 放送サービスを提供するにあたり、どのような技術的条件を満たせば安定的にサービス提供が可能かを検証する目的の実験報告書であり、先に開かれた総務省での「4K・8K 時代に向けたケーブルテレビの映像配信の在り方に関する研究会」（以下研究会）及び情報通信審議会 情報通信技術分科会 放送システム委員会での「IP 放送作業班」（以下作業班）の議論を踏まえたうえで、仮説を提示し実証実験を行った結果をまとめたものである。

2 実験実施の背景と前提

2.1 省令としての技術基準

総務省が現在定めているケーブルテレビの一般放送の品質に関する技術基準には RF 方式に係る技術基準として有線一般放送の品質に関する技術基準を定める省令（以下品質省令）等があるものの、IP 放送については未策定であり品質省令には特定方式の技術基準として規定されていない。現在 IP 放送サービスを提供している事業者は、IPTV フォーラムの規格や日本ケーブルラボの運用仕様等に基づき、事業者毎に品質基準を設けている。総務省は、事業者からの申請に対して、品質省令の通則等に基づき、個別に審査を行っている状況である。IP 放送事業に新規参入する後発事業者が登録を受けるための技術基準について明確な指針がない状態であり、技術基準が明確に定められていない点が参入を妨げているとみることもできる。新たに技術基準を設けるにあたって、どのような技術的条件が望ましいのか、どのような測定方法が適当なのかを検討する必要があり、合理的な技術的条件を採用することが求められる。特に研究会や作業班では「現状のサービスに大きな影響がないこと」つまり既存サービス事業者の立場の意見と「事業者にとって大きなコスト負担や運用負担にならないこと」など今後参入を予定している事業者の意見がある。技術的条件を定めるにあたってはこれらの意見を集約しつつ、合理的で且つケーブルテレビの放送品質を担保しうる技術的条件等として何が適切なのか、仮説を基にこれを実験によって明らかにする必要がある。

3 メンバー構成

(一社) 日本ケーブルラボでは検討にあたりエキスパートグループ (以下 EG) を設置した。EG メンバーは (一社) 日本ケーブルラボ会員の中から IP 放送に係る知識を有する者と今後運用に関わる可能性がある者から構成した。参加メンバーは以下のとおりである。

1	NTT エレクトロニクス (株)	篠原 稔
2	NTT エレクトロニクス (株)	横川 豊和
3	SCSK (株)	久保 智
4	沖電気工業 (株)	上田 剛弘
5	KDDI (株)	河村 圭
6	(株)KDDI 総合研究所	佐々木 力
7	ケーブルテレビ徳島 (株)	佐々木 治之
8	ケーブルテレビ徳島 (株)	岩佐 達矢
9	(株) ケーブルネット鈴鹿	井ノ上 健太
10	(株) コミュニティネットワークセンター	小宮山 宏
11	シスコシステムズ合同会社	川島 誠一
12	ジャパンケーブルキャスト (株)	寺島 広道
13	ジャパンケーブルキャスト (株)	山瀬 直人
14	(株) ジュピターテレコム	上園 一知
15	住友電気工業 (株)	近藤 利徳
16	テクニカラーパイオニアジャパン (株)	渡辺 聡司
17	(一社) 日本ケーブルラボ	猪俣 亮
18	日本デジタル配信(株)	五十嵐 貴光
19	日本放送協会	倉掛 卓也
20	パナソニック システムソリューションズジャパン (株)	影山 光宏
21	HUMAX(株)	青山 泰忠

4 実証実験の前提

4.1 IP 放送の定義

研究会では IP 放送を管理された IP ネットワークを利用した IP マルチキャスト方式による通信であって、放送法における放送に該当するものと定義している。IP 放送では、地上基幹放送、衛星基幹放送の再放送や自主放送等を行い、一般的に OTT(Over The Top)と呼ばれるインターネットによるデジタルビデオ配信は含まれていない。

4.2 RF 方式との関係

研究会では「電波による放送や RF 方式による放送の伝送品質と同等程度で柔軟性の高い技術基準を検討することが適当」としており、具体的に考慮する点は主に「入力信号の品質の確保」、「伝送路上での信号品質の劣化への対処」、「STB(Set Top Box)への入力信号品質の確保」の 3 点である。なお RF 方式では品質基準値という点においては HE(Headend)への入力信号が確保すべき品質、受信者端子で確保すべき品質等が定められている。HE への入力については、例えば、復調後（誤り訂正前）のビット誤り率 BER(Bit Error Ratio)について、衛星基幹放送では「 $BER \leq 1 \times 10^{-8}$ 」、地上基幹放送では「 $BER \leq 1 \times 10^{-4}$ 」であり、受信者端子においては、復調後（誤り訂正後）の BER について、「 **$BER \leq 1 \times 10^{-11}$** 」を前提として受信者端子における技術基準が定められている。

研究会で提示された「RF の伝送品質と同等程度」という考え方については EG 内で議論を重ねた結果、元来伝送方法の違う RF 方式と IP 方式という特性上、数式的な観点では全く同じ品質を特定するのは困難という結論に至った。つまり、 $BER = 1 \times 10^{-11}$ を後述する数式に従って PER (Packet Error Rate) に変換することで $PER = 1 \times 10^{-7}$ を得ることはできるが誤りとなるビット数としては同一ではないという意味においてである。よって、EG としての解釈は RF 方式で示されている品質は、設定されたビットレートに対する時間単位における誤り発生回数を指しているもので、これと同等のビットレートにおいて時間単位における誤り発生回数を IP ネットワークの伝送路上で得られれば RF 方式の品質と同等であると定義した。

4.3 省令の適応範囲

研究会では品質省令(強制規格)の適応範囲を図 4-1 のとおりに想定しており、伝送路の品質を規定しようとしていることを明確化している。

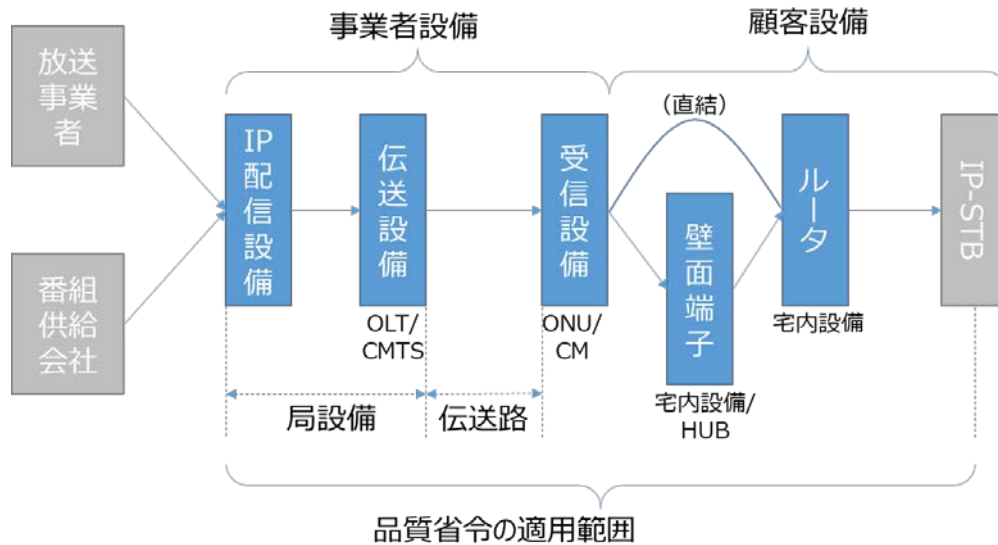


図 4-1 品質省令の適応範囲図

4.3.1 入力信号と伝送路についての考え方

入力信号とはアンテナなどの設備によって放送を受信し、これを復調した状態の放送波を指す（OFDM や IF）場合とそこから TS(Transport Stream)を取得した場合の信号を指しており、4.2 で記載した信号の品質値はこれを規定している。同じ入力信号である以上この条件は IP 放送であっても同様と考えられる。

研究会ではケーブルテレビ事業者が「中継網」および「アクセス網」において帯域を確保する点に触れており、どちらも伝送路設備として考えられている。IP 放送におけるサービス事業者がどのような形態の伝送路を構築するのかは事業者の裁量に委ねられており、当該品質基準値における伝送網とは HE から中継網を経てアクセス網へ至り、そこから STB へ到達することを前提とする。ただし、これらの網は管理されているという定義も重要な要素であり、すなわち優先制御されていることも前提となる。

中継網とは一般的にアクセス網同士をまたぐ場合や、ある一定のネットワーク領域を相互に接続する、もしくは事業者間の接続において利用されるものを指し、電氣的なスイッチまたはルータによって構成される部位を指して中継機器とする。また、アクセス網とは FTTH(Fiber To The Home)や HFC(Hybrid Fiber Coaxial)

と呼ばれる伝送方法で前者の場合 PON(Passive Optical Network)による光伝送技術があり、後者は DOCSIS(Data Over Cable Service Interface Specifications)と呼ばれる同軸線を介した伝送技術がある。本書ではこの両方の伝送方式を実験の対象としている。

4.3.2 棟内環境についての考え方

FTTH においては集合住宅などの設備で棟内共用スペースまで光化され、そこから各戸までは VDSL により伝送されている場合や管理組合が保有する既設の設備等ケースがあるが、これはサービス提供事業者が自身では管理できない機器装置が存在しうることを示唆している。測定方法や基準値などはこれらを考慮する必要がある。

4.3.3 宅内環境についての考え方

ONU(Optical Network Unit)または DOCSIS の CM(Cable Modem)から STB の間は Ethernet ケーブルで直結される場合もあるが、ルータやハブなどで分配されるケースが多くあり、これらの機器は棟内環境と同様、サービス提供事業者が管理できない機器装置である場合がある。よって棟内同様に宅内の環境を考慮して測定方法や基準値を実験実証する必要がある。

4.4 研究会での技術品質基準の考え方

研究会では伝送品質として「受信者端子において実質的に誤りを生じない技術的条件（パケット損失率・遅延・揺らぎ）の在り方」と「技術基準に適合していることを実用的に確認できる適切かつ合理的な測定方法」の 2 項目に言及されている。

4.5 参照すべき品質や測定に関する文書

4.5.1 ITU-T 勧告 J.241

ITU-T 勧告 J.241(Quality of service ranking and measurement methods for digital video services delivered over broadband IP networks)は、デジタルビデオにおける測定と品質について言及された文書である。この中で HE(Headend) から CPE(Customer Premises Equipment)(STB)における IP レイヤ の計測と計測項目が影響を与える部位を解説している。研究会で言及された IP パケットの損失率・遅延・揺らぎについては表 4-1 の様に纏められている。

表 4-1 ITU-T J.241 C.3.1 Parameters より抜粋

Parameter	Equipment	Motivation	Monitoring method
Packet loss ratio	CPE(STB)	Image quality, video information loss estimation	In service or through test streams with RTP/RTCP or sequence numbers available on packet header. Periodic PLR summary. Reports with one-minute resolution. Measurement of PLR requires analysis of a number of packets at least 10 times greater than the number related to the target PLR value. This determines the rate at which the PLR is reported.
Network latency	Test probe at user side, within CPE (STB) or as close as possible to user access link.	Smooth play-out	Test stream
Jitter	CPE (STB)	Smooth play-out	In service or through test streams with RTP/RTCP or timestamps available on packet header.

なお、遅延(latency)および揺らぎ(jitter)については次のような言及がある
「Latency and jitter values may vary according to specific multimedia service characteristics, such as interactivity, and according to the size of the de-jitter buffer and of the play-out delay employed at the CPE (STB) side。」このように IP パケットの損失率は映像品質に影響するものであり、パケットの遅延およびその揺らぎは STB のバッファによって吸収されるべき問題であり、映像の再生開始時間に影響することが判る。

IP 放送サービスでは、放送の受信から送出までの間にもパケットの遅延や揺らぎが発生する余地があり、伝送路上にもマルチキャストの分配を行うルータでパケットの損失や遅延が発生する要素がある。これらを全く排除することはかなわず、STB としてはこれらを想定して設計されるものと考えられる。

4.5.2 ITU-T 勧告 Y.1541

ITU-T 勧告 Y.1541(Network performance objectives for IP-based services)は、同 J.241 から参照されており、ネットワークの QoS を定義しており、この中でビデオサービスの QoS Class を 4 (低い値) と定義している。ただし、ここでのビデオサービスはオンデマンドビデオのような OTT サービスを指しており、この値が適当ではない可能性もある。また VIII.3.4 には放送事業者などを対象とした MPEG-2 TS に関する誤り/損失のレートが例示されており、FEC(Forward Error Correction)についても言及がある。なお、QoS Class 4 の IPLR (IP packet Loss Ratio) は 1×10^{-3} で IPER (IP packet Error Ratio) は 1×10^{-4} と定義している。

4.5.3 IPTV 規定 STD-0004、0005、0009

IPTV フォーラムでは IPTV 規定として、IPTVFJ STD-0004(IP 放送仕様)、0005(地上デジタルテレビジョン放送 IP 再送信運用規定)および 0009(BS デジタル放送 IP 再送信運用規定)においてパケット損失を考慮した FEC に関する規定がある。その中で FEC を搭載する場合、Pro-MPEG FEC Code of Practice #3 release2(Pro-MPEG FEC COP3)を推奨している。また、ジッタ(揺らぎ)の許容性能については同運用規定において 100msec 以下を推奨値、300msec 程度を当面の許容値としている。

4.6 各要素の定義

4.6.1 パケット損失 (IP Packet Loss)

パケット損失は、IP ヘッダや UDP(User Datagram Protocol)ヘッダのチェックサムで誤りと判断された場合や Ethernet のフレームチェックシーケンス (FCS: Frame Check Sequence) による誤りによってフレーム内容が消失していると判断された場合に、パケットが破棄されることを指す。パケット損失を終端装置で見た場合、FCS によって NIC (Network Interface Card) が破棄したものか、アクセス網の最終段で ONU や CM(Cable Modem)がチェックサムの誤りで破棄したものか、もしくは途中経路上のルータが破棄したものかは判断できない。ここで定義するパケット損失とは送出されたすべてのパケットに対する終端装置である IP-

STB 内で RTP(Real-time Transport Protocol)のストリームからペイロードを取り出す前段階で、何かしらの理由によって破棄された全てのパケット数の割合とする。

4.6.2 遅延 (Latency)

ここで定義するパケットの遅延とはデータが送信元サーバから送り出された送出時間 (RTP タイムスタンプ) と終端装置における受信時間との差を指し、伝送経路上のルータなどでバッファされた場合や経路切り替えなどでパケットの伝達に時間を必要とすることなどにより発生する。なお、エンコーダ内部で RTP のパケットにスタンプされた時間は、伝送経路上に配信される時点で既に遅延をはらんでいるが、ここでは伝送経路上に配信されてから終端装置にてパケットが受信される範囲である。また、RTP のシーケンス順が正順とは異なって終端装置に到達する場合も終端側で遅延とみられることがあり、単にフラグメンテーションした IP の復元というよりも、RTP のシーケンスに影響することを指す。

現状の IPTV 規定では TS(Transport Stream)にタイムスタンプが付与された TTS(Time-stamped Transport Stream)の場合、RTP のタイムスタンプを無視して TS を再構築する運用仕様となっているが、ここでは RTP のタイムスタンプを参照して実験を行う。

4.6.3 揺らぎ (Jitter)

ここでの IP パケットの揺らぎとは遅延の一種であり、遅延時間の最大値があるとするればその閾値内で到達時間に早い遅いの間隔があることを指す。この間隔は一定ではなく、揺らぎがある場合は RTP の到着シーケンス順がバラバラになると考えられる。

4.6.4 遅延と揺らぎの測定基準

本実験では測定器に到達するパケットの平均遅延時間を遅延と定義し、遅延の内最悪の値を揺らぎの値とする。

5 実験の目的と机上検討

5.1 実験の目的と呼称

実証実験では 2 つの仮説を検証することを目的とする。一つ目は物理層の品質要因が IP 層に影響を与えうるのか、また相関関係があるのかを実験するもので、これを「物理層実験」と呼ぶ。もう一つは IP 層の品質が最終的に映像品質に影響しうるのか、また相関関係があるのかを実験するものでこれを「IP 層実験」と呼ぶ。それぞれの実験において設定した項目との相関及び閾値が妥当であることを実証し、伝送品質に関する技術的条件の策定に資する。

5.2 物理層品質と IP 層の関係性

現在の品質省令における技術基準として 64QAM(Quadrature Amplitude Modulation)の変調方式による場合、入力信号の条件として、地上基幹放送は $BER=1 \times 10^{-4}$ 以下、衛星基幹放送は $BER=1 \times 10^{-8}$ 以下と規定しており、受信者端子における規定は搬送波の雑音レベル比が 26dB 以上としている。これは入力信号が伝送路上で劣化しなければ、STB への入力時点で CN 比(Carrier to Noise Ratio)を制御することで結果的に BER の値を制御しうるということであり、CN 比と BER の間には相関関係が成り立つことを示している。

品質省令に規定された RF 方式と同様に考えた場合、入力信号の条件は同様であるため考慮すべきは受信者端子 (STB) の入力となるが、BER の値を 1×10^{-11} としてパケット誤り率 PER(Packet Error Ratio)の値は、Packet size (P) と BER(Bit Error Ratio)から値を求めることができる。

$$PER = 1 - (1 - BER)^P$$

IP 放送のパケットサイズを 188 (TS のパケットサイズ) $\times$ 8 (ビット長) $\times$ 7 (IP に収納されている TS のパケット数) として PER の値を以下のとおり求める

$$PER = 1 - (1 - 1 \times 10^{-11})^{(188 \times 8 \times 7)} \approx 1 \times 10^{-7}$$

STB に入力される IP 放送のパケット誤り率 (PER) が 1×10^{-7} であって、受信者端子に至るまでの伝送路でこれよりも低い誤り率を保てるのであれば受信者端子での入力値は結果的に BER が 1×10^{-11} であると仮定する。このとき、伝送路が GE-PON であれば、規格上 BER は 10^{-12} であり入力信号よりも誤り率が低い。仮に図 5-1 の測定点 a から測定点 b の間の伝送路が PON のシステムのみであった場合、b の受光パワーが規格を満たしているとき、理論上は ONU から出力される

信号が入力時よりも劣化することがないと言えるため、受信者端子への入力も担保しうる可能性がある。また、a と b の間に PON 以外の伝送路があった場合でも、OLT への入力信号が $PER=1 \times 10^{-7}$ であれば同じことがいえる。

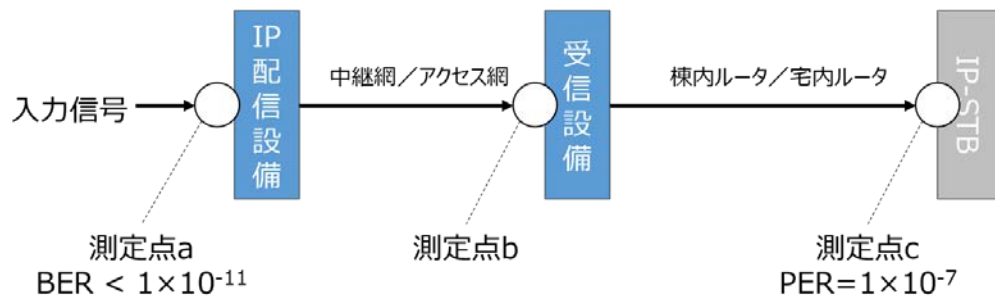


図 5-1 入力信号の BER と STB の入力信号の PER の関係

この方式は誤りを検知する必要があるが、ONU の出力では既に誤りのあるパケットが破棄されている点に問題がある。つまり、ONU の出口で検知しえるのは既に破棄されたパケットの損失という状態であり、誤りという形では検知できない。

5.3 物理層品質とトランスポート層の関係性

入力された放送波は復調後に MPEG-2 TS の TS パケットを抽出され、場合によってはタイムスタンプを付与された後、RTP パケットに格納される。またその後段では UDP ストリームとして配信される。仮に、UDP に格納された RTP パケット及び TS パケットが放送波の品質状態を保っているとして、受信者端末まで到達した場合、UDP のペイロードにあるビット誤りを見ることで入力信号と同等の品質を保っているかを検証することができる。

実験では試験信号として UDP のペイロードにランダムなビットを書き込み、これを配信と受信で比較することでビット誤りを測定する。また、このときの伝送路の品質状態と UDP の BER に相関性があれば伝送路品質によって UDP ペイロード（映像コンテンツ）の品質を担保することと規定することが可能である。

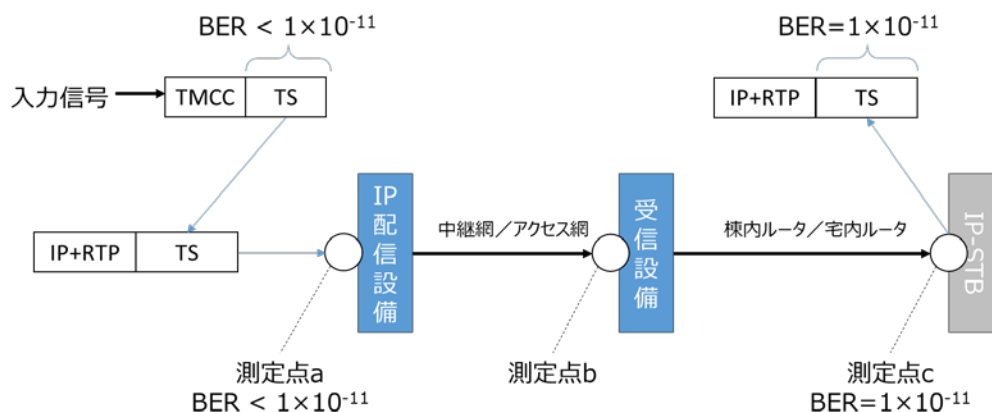


図 5-2 入力信号の BER と UDP の BER

また、UDP のヘッダにはチェックサムが付加されており、これをもってフレームの破棄を検知することができる。つまりパケット損失としてカウントすることもできるため、5.4 の映像品質との関係性実験にも利用可能である。

5.4 IP 層品質と映像品質の関係性

前述の BER と PER の関係とは違い、入力信号の BER と受信者端子で検知しえる IP パケット損失には直接的な関係性は証明できない場合がある。つまり、ビット誤りが頻発し、IP ヘッダのチェックサム誤りによる損失につながる場合に起きる経路上の IP パケットの損失だけではなく、中継網での輻輳や経路切り替えなど、何らかの要因によってパケットが破棄される場合や、STB への IP 到達遅延が結果としてパケットの破棄と同等の結果となる場合があるという意味で、BER と PER の関係ほど単純ではない。IP 層の品質実験はこういったネットワーク環境の複雑性を考慮し、何らかの要因でパケットが損失または遅延したと仮定して、これが映像品質にどのような影響を与えるのかを検証する。

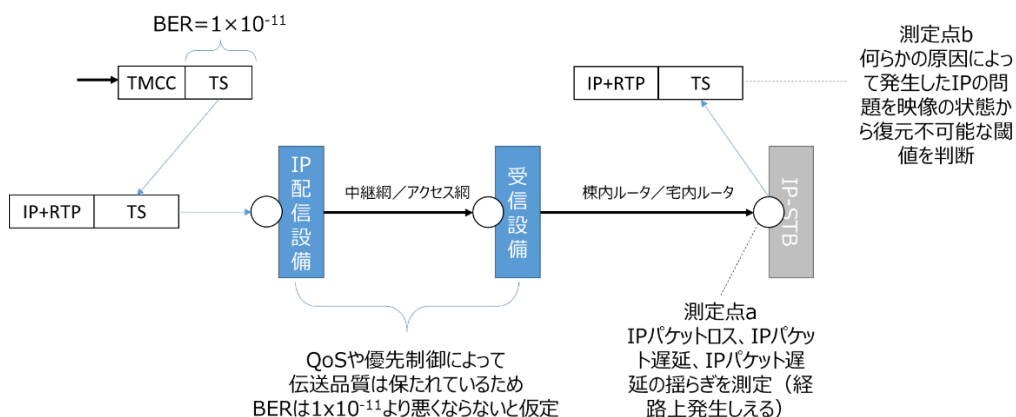


図 5-3 パケット損失と遅延と揺らぎ

ただし、伝送路の品質を保つための技術的基準を定めるにあたっては優先制御における値を検討する必要があるため GE-PON であれば LLID(Logical Link Identifier)の値であり、L3(Layer 3)スイッチや DOCSIS であれば QoS(Quality of Service)の値を検討し IP パケットの損失を防ぐための指標とする。

映像品質については MPEG-2 TS の符号的な誤りを検知することで正常、非正常を判断するため、STB 内で RTP から取得した MPEG-2 TS の正常性(コンプライアンス)を確認することになる。結果として映像品質の正常性を認められれば伝送路上で誤りが発生しなかった、もしくは誤り訂正によって復元可能な状態程度に損失していたということになり、パケットの状態から状況的に伝送路品質が担保されていたことを推測することが可能かを検証する。

6 実証実験要件

実証実験の要件を以下のとおりとする。

No.	要件	備考
1	RF 方式による放送の伝送品質と同等程度で柔軟性の高い技術基準を検討するための実験結果を提示すること	具体的に考慮する点は主に「入力信号の品質の確保」、「伝送路上での信号品質の劣化への対処」、「STB への入力信号品質の確保」
2	実際のサービスネットワークを模し、可能な限り現状の機器構成に準ずること	特殊な仕様の機器を排除し、実サービスで利用されている機器を使用する等
3	実フィールドにおいて検証可能な測定であること	現実的な測定基準であり、容易に入手可能な測定機器を利用すること
4	測定の結果、品質を担保する技術的な値が判断できるものであること	特になし
5	測定において伝送の品質劣化が映像品質に影響することを証明し、またその改善も影響する相関を証明すること	特になし

7 實驗環境

7.1 物理層實驗環境

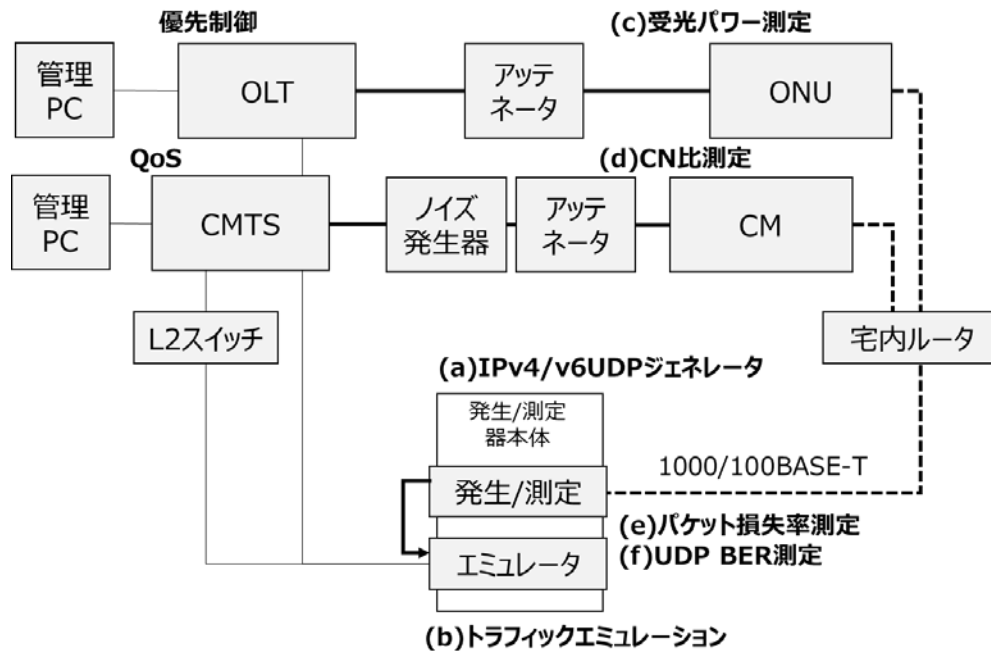


圖 7-1 物理層實驗環境

(a)の測定器の UDP ジェネレータによって発生した UDP/IP ストリームを (b)のエミュレータに入力してトラフィックに負荷をかける。ここでは中継網以上で発生しえる伝送路の状態を模することが想定される。次にエミュレータから出力されたストリームは伝送装置に送られる。FTTH のアクセス網を模した OLT と ONU 間は優先制御を施し、UDP/IP の帯域を確保する。同様に HFC のアクセス網を模した CMTS(Cable Modem Termination System)と CM(Cable Modem)の区間は QoS を設定し、帯域を確保する。アクセス網はそれぞれ(c)受光パワーと(e)CN 比を測定する。ONU と CM から出力された UDP/IP は宅内環境を模したルータなどを経て測定器へ入力される。測定器では (e)パケット損失 (f) UDP の BER を測定し、確認する。

7.2 IP 層實驗環境

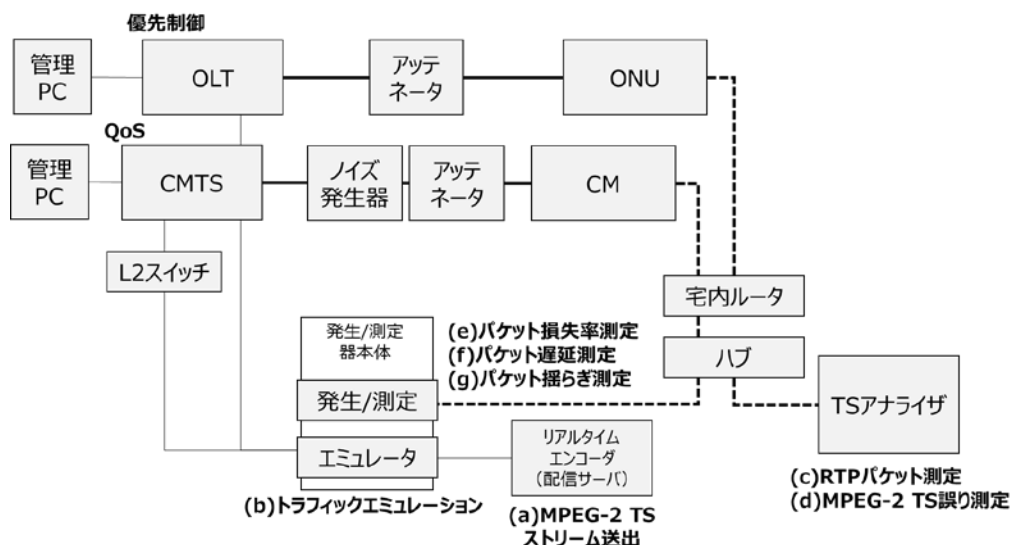


圖 7-2 IP 層實驗環境

(a)のリアルタイムエンコーダ（配信サーバ）によって発生させた MPEG-2 TS の RTP ストリームを(b)のエミュレータにて変化を加える。主な変化パラメータは IP パケットの欠損、IP パケットの遅延、IP パケットの遅延揺らぎである。ここでは中継網以上で発生しえる伝送路の状態を模することが想定される。FTTH のアクセス網を模した OLT と ONU 間は優先制御を施し、UDP/IP の帯域を確保する。同様に HFC のアクセス網を模した CMTS と CM の区間は、QoS の設定を行い、帯域を確保する。ONU と CM から出力された UDP/IP は宅内環境を模したルータなどを経て測定器へ入力される。(c)RTP 及びペイロードの(d)MPEG-2 TS の TS ストリームを TS アナライザで測定する。また、(e)パケット損失、(f)パケット遅延、(g)パケット遅延揺らぎを測定器で測定する。

なお、音声や映像などのデータストリームを伝送する RTP(Real-time Transport Protocol)は IPTV フォーラム等の規格でも採用されており、一般的に普及しているプロトコルである。

7.3 優先制御

7.3.1 FTTH における優先制御

GE-PON における優先制御は、ToS(Type of Service)によるクラシフィケーション及び最低帯域保障により行う。IP 放送を想定した UDP(RTP)/IP ストリームは ToS=5 に設定し、GE-PON の LLID (Logical Link ID) =1 に割り当て、負荷となる UDP/IP ストリームは ToS=0 に設定し、LLID=2 に割り当てる。さらに、最低保証帯域は、LLID1=100Mbps、LLID2=0Mbps (帯域保障しない) に設定する。

なお、今回の実験では優先制御機能の効果を確認するため、OLT~ONU 間の帯域をアグリゲートシェイパー(Aggregate Shaper)機能により 500Mbps に制限した。これにより、IP 放送ストリーム (ToS=5)=80Mbps、負荷ストリーム (ToS=0)=500Mbps の合計 580Mbps のストリームを流した場合、ToS=5 のストリームは帯域保障によりパケット損失が発生せず、ToS=0 の負荷ストリームは残り帯域の 420Mbps だけ伝送され、80Mbps 分は破棄される。

7.3.2 HFC における優先制御

今回 HFC ネットワーク環境における実験で使用した CMTS (Cable Modem Termination System) と CM (Cable Modem) は CableLabs®の DOCSIS(Data Over Cable Service Interface Specification)3.1 仕様に準拠したもので、DOCSIS3.1 の 1 つ前の仕様である DOCSIS3.0 仕様からは複数の搬送波を使用して下りの帯域拡張を行うチャンネルボンディングとマルチキャストに対する QoS 機能が実装されている。今回の実験においても、そのマルチキャストに対する QoS 機能を使用して、マルチキャストに対する優先制御を適用した上で実験を実施した。

DOCSIS3.0 での QoS 機能については DOCSIS3.0 仕様書の 1 つである “MAC and Upper Layer Protocols Interface Specification” (CM-SP-MULPIv3.0-C01-171207) のセクション 7.5.8 QoS Support for Joined IP Multicast Traffic に記載されており、その概要は以下のとおりである。

- (1) QoS を適用するマルチキャストの識別/設定方法
- (2) QoS を適用するマルチキャストトラフィックの CMTS からの伝送方法
- (3) 動的に QoS を適用するための IGMP/MLD を利用した CMTS—CM 間でのシグナリング方法
- (4) QoS を適用するマルチキャストトラフィック以外のマルチキャストトラフィックの取り扱い方法

DOCSIS 仕様においては、サービスフロー (SF) と呼ばれる論理的な伝送パイプを規定しており、そのサービスフロー毎に QoS を適用することが出来るようになっている。サービスフロー毎に優先順位や最大伝送帯域幅等の設定を行うことが可能となっており、トラフィック (パケット) のサービスフローへの振り分け (割り当て) はクラシファイヤーと呼ばれるパケット識別により、IP アドレスやそのレンジ、TOS ビットの設定内容等で優先順位を決めたそれぞれのサービスフローにトラフィックの振り分けを行うことができるようになっている。

DOCSIS2.0 まではユニキャストのみにこの仕組みが適用されていたが、

DOCSIS3.0からマルチキャストについてもグループサービスフローという概念を導入し、同様な QoS の適用が動的な帯域割り当てとともに行われるようになった。

今回の実験においては、以上の仕様に従ったマルチキャストの優先制御を以下の設定の下で QoS の適用を行った。

- A. 実験で使用するマルチキャストグループアドレスへのみ優先制御が行われるように設定。優先制御は特定のマルチキャストグループアドレスもしくはレンジに対して設定可能。優先制御をかけるマルチキャストの間で最大 256 段階の重み付け設定を行うことも可能。(今回の実験では未使用)
- B. 優先制御を行うマルチキャストグループアドレスに対する上限帯域幅 = 200Mbps、下限帯域幅 = 1Mbps に設定。

マルチキャストに対する優先的な帯域割り当ては、マルチキャストを受信（リッスン）する CPE（IP-STB 等）からの IGMP/MLD ジョイン(JOIN)により動的に行われ、マルチキャストが伝送されている期間は維持される。視聴が終わると IGMP/MLD のリーブ(LEAVE)、もしくはタイムアウトで帯域割り当ては削除されるため、該当するマルチキャストが伝送されていない時間は他のトラフィックで帯域を共有することが可能となっている。

上限帯域幅の設定については、当初 100Mbps と設定していたが、8.6.2 で記載のとおり、パケットの揺らぎをエミュレータで最大 500msec 加えた際に最大 200Mbps 程度のバースト的なマルチキャストストリームが CMTS に入力され、CMTS から出力される際に 100Mbps の上限設定速度を超えたことからパケットシェーピングが行われた。このとき、IP-STB で正しく再生できないことが確認されたため、バースト上限に近い 200Mbps の上限帯域幅を設定して実験を行った。

8.3.1 に記載のとおり、今回の実験は下り QAM 搬送波を 8 波ボンディングし、実質的な伝送可能なペイロード帯域としては 280Mbps であるため、IP 放送相当のマルチキャストストリームを 80Mbps で流している状態で、他のデータ通信トラフィックを想定したユニキャストトラフィックを 300Mbps で同時に流した場合、マルチキャストストリームは優先制御によりパケットの損失がなくネットワークアナライザに到達が確認され、ユニキャストトラフィックについては、

$$300\text{Mbps} - (280\text{Mbps} - 80\text{Mbps}) = 100\text{Mbps}$$

がネットワークアナライザで観測されれば、想定通りに DOCSIS3.0 仕様のマルチキャストに対する優先制御(QoS)が適用されていることを確認できる。

7.4 実験データと計測時間

7.4.1 実験データ

実験データとして以下のデータとビットレートを用いる

No.	データ内容	ビットレート	備考
1	UDP ストリーム※ ¹	12Mbps	信号発生器から出力する UDP ストリームでペイロードにはランダムなビット列を格納する
2		30Mbps	
3		60Mbps	
4		80Mbps	
5	RTP ストリーム※ ²	12Mbps	リアルタイムエンコーダから出力される RTP のストリームでペイロードに MPEG-2 TS を格納する
6		30Mbps	
7		60Mbps	
8		80Mbps	

※¹ UDP ストリームと記載しているが実際は RTP のパケットである。※² のストリームと区別するために便宜的に記載している。

※¹※² ともにビットレートは TS のみのビットレートで FEC の容量を含まない。

なお、4K と 8K の映像音声もサービスとしては対象となるが、平成 30 年 6 月現在では TLV/MMT の IP 再放送運用仕様はなく、実験するためのデータ及び伝送方法はない。TLV/MMT のパケットは仕様上 Ethernet の規定パケットサイズを超える可能性があるが、一般的な機器設備をパケットが通過することを考慮すると Ethernet の規定パケットサイズに収まることが推測される。その場合、UDP のペイロード構造が MPEG-2 TS と違うという課題が残るが、実験において検知しえるデータである必要から、この問題は本実験の対象外とする。

7.4.2 BER 計測時間

実験データの誤りを得る測定時間は、測定時間 t 、信頼度 c (Confidence Level)、ビット誤り率 b 、伝送速度 r として次の式によって定める。

$$t = -\frac{\ln(1 - c)}{b * r}$$

BER の値を 1×10^{-11} とし、信頼度 c を 95% として計算した結果を以下の表にまとめる。

No.	ビットレート	測定時間
1	12Mbps	23807 秒 (6 時間 36 分)
2	30Mbps	9523 秒 (2 時間 36 分)
3	60Mbps	4761 秒 (79 分)
4	80Mbps	3571 秒 (60 分)

7.4.3 PLR 計測時間

IP パケットの誤りを得る測定時間は、測定時間 t 、パケット誤り率 b 、映像のビットレート r 、パケット長 p として次の式によって定める。

$$t = b / (r / 8 / p)$$

誤り率を 1×10^{-3} から 1×10^{-7} として、ビットレートを 12Mbps から 80Mbps、パケット長を 1500 で計算した結果を表 7-1 にまとめる。

表 7-1 PLR 一覧

No.	ビットレート	誤り率	測定時間
1	12Mbps	1×10^{-3}	1 秒
2		1×10^{-4}	10 秒
3		1×10^{-5}	100 秒
4		1×10^{-6}	16.7 分 (1000 秒)
5		1×10^{-7}	2.8 時間 (166.7 分)
6	30Mbps	1×10^{-3}	0.4 秒
7		1×10^{-4}	4 秒
8		1×10^{-5}	40 秒
9		1×10^{-6}	6.7 分 (400 秒)
10		1×10^{-7}	1.1 時間 (66.7 分)
11	60Mbps	1×10^{-3}	0.2 秒
12		1×10^{-4}	2 秒
13		1×10^{-5}	20 秒
14		1×10^{-6}	3.3 分 (200 秒)
15		1×10^{-7}	33.3 分 (2000 秒)
16	80Mbps	1×10^{-3}	0.2 秒
17		1×10^{-4}	1.5 秒

18		1×10^{-5}	15 秒
19		1×10^{-6}	2.5 分 (150 秒)
20		1×10^{-7}	25 分 (1500 秒)

7.4.4 データ量の想定

当実験における背景データなどのデータ量を以下のとおり定義する。

No.	ビットレート	ストリームの本数	備考
1	12Mbps (UDP)	9+10	地デジ+BS 相当
2	6Mbps (UDP)	51	自主放送相当
3※1	6Mbps (TCP)	2	OTT 相当

※1 宅内環境における動画視聴を想定する場合に使用する

7.4.5 前方誤り訂正(FEC)について

ビットレートについて 7.4 に記載のものは TS のペイロードにおけるビットレートであり、FEC を含まない。なお、アプリケーションレイヤに係る FEC は実験においてリアルタイムエンコーダによって付与されることを前提とする。

8 実施結果

8.1 FTTH の物理層実験結果と見解

8.1.1 優先制御の確認

計測器の UDP ジェネレータの送出設定を 80Mbps と 500Mbps の UDP の 2 ストリームとし、PON の設備を 7.3.1 のとおりに設定した。この状態で 80Mbps に設定した UDP ストリームが全量受信できていることを確認し、500Mbps に設定した UDP ストリームが損失として計測されていることを確認した。これは事前に想定した通りの結果である。

8.1.2 机上検討と実験結果の違い

机上検討 5.2 では UDP/RTP のペイロードにある TS パケットにビット誤りが発生すればこれを比較することを想定していたが、測定器で検知することができる状態はパケットの損失であり、ビット誤りではない。これは、途中経路上でビット誤りが発生した場合、ONU がチェックサム誤りと判断し IP パケットを破棄してしまうためである。なお、信号発生側でランダムなビット誤りパターンをペイロードに挿入する実験も行ったが、ビット誤りが発生した場合前述の理由でパケットが破棄されてしまうため、測定器が受け取った段階ではビット誤りではなくパケットの損失として検知される。そのため、本実験では測定する対象を BER から IP パケット損失率に変更した。

8.1.3 受光パワーの計測と結果

本実験では、現在商用で提供されているインターネット接続サービスのアクセス技術の主流である GE-PON (IEEE 802.3 ah) のうち 1000BASE-PX20 を対象とした。GE-PON の受信仕様は表 8-1 のとおりであり、1000BASE-PX20-U が D-ONU にあたる。

表 8-1 1000BASE-PX20 の受信仕様 (IEEE 802.3ah : Table 60-8)

Description	1000BASE-PX20-D	1000BASE-PX20-U	Unit
Signaling speed (range)	1.25 ± 100 ppm	1.25 ± 100 ppm	GBd
Wavelength (range)	1260 to 1360	1480 to 1500	nm
Bit error ratio (max)	10 ⁻¹²		
Average receive power (max)	-6	-3	dBm
Damage threshold (max)	+4	+7	dBm
Receive sensitivity (max)	-27	-24	dBm
Receiver sensitivity OMA (max)	-26.2 (2.4)	-23.2 (5)	dBm (μW)

Description	1000BASE-PX20-D	1000BASE-PX20-U	Unit
Signal detect threshold (min)	-45	-44	dBm
Receiver reflectance (max)	-12	-12	dB
Stressed receive sensitivity (max)	-24.4	-22.1	dBm
Stressed receive sensitivity OMA (max)	-23.6 (4.3)	-21.3 (7.4)	dBm (μ W)
Vertical eye-closure penalty (min)	2.2	1.5	dB
T _{receiver settling} (max)	400	N/A	ns
Stressed eye jitter (min)	0.28	0.25	UI pk-pk
Jitter corner frequency	637	637	kHz
Sinusoidal jitter limits for stressed receiver conformance test (min, max)	(0.05, 0.15)	(0.05, 0.15)	UI

受信仕様ではビット誤り率が最大 10^{-12} とされており、これを満たすための各種項目が規定されている。光信号波のタイミングの時間軸方向の揺らぎの許容値は D-ONU 入力において 352(ps) 以下[IEEE 802.3ah : Table 60-10]であるが、D-ONU のフレーム復元処理において吸収されるため、出力信号のビット誤り率への影響は受信感度 (Receiver Sensitivity) が支配的である。そこで本実験における物理層実験として ONU 入力の受光レベルと出力の IP パケット損失率の相関性を検証する。

本実験に提供された試験機 D-ONU の製品仕様における許容受光レベルは-3～-25.5(dBm) (IEEE 802.3ah では-3～-24dBm)であることから、実験手順 (Appendix 2.1.2 参照) では受光レベルを-25.5(dBm)以下としたときの IP パケット損失率の測定を行った。

測定により得られた結果を表 8-2、図 8-1、表 8-3、図 8-2 に示す。なお、伝送した UDP ストリームのビットレートは 80Mbps と 12Mbps とし、波長は下り (OLT→ONU) : 1490nm、上り (ONU→OLT) : 1300nm である。

表 8-2 80Mbps における受光レベルと IP パケット損失率

受光レベル(dBm)	IP パケット損失率
-32.50	1.69E-01
-32.00	2.35E-02
-31.50	1.53E-03
-31.00	1.27E-04
-30.70	4.69E-06
-30.50	2.32E-06
-30.30	4.63E-07
-30.00	< 1.00E-07
-25.50	< 1.00E-07

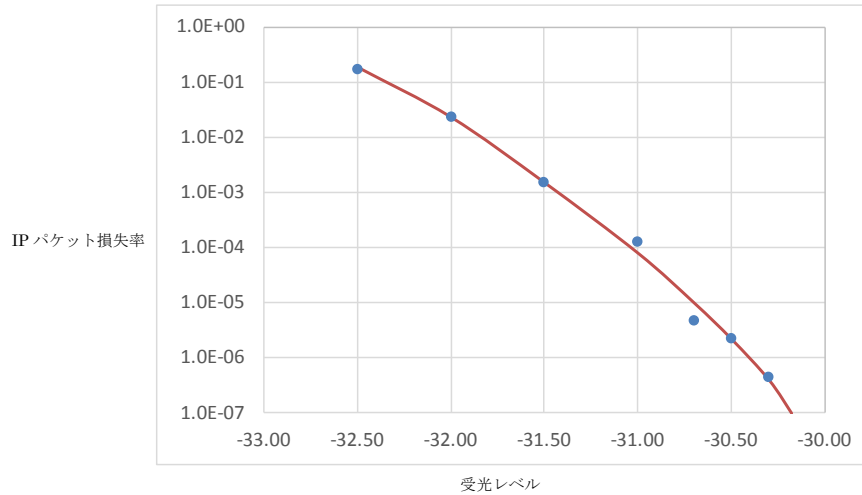


図 8-1 80Mbps における受光レベルと IP パケット損失率の関係

表 8-3 12Mbps における受光レベルと IP パケット損失率

受光レベル(dBm)	IP パケット損失率
-32.50	1.53E-01
-32.00	3.01E-02
-31.50	1.50E-03
-31.00	1.09E-04
-30.70	5.21E-06
-30.50	< 1.00E-07
-25.50	< 1.00E-07

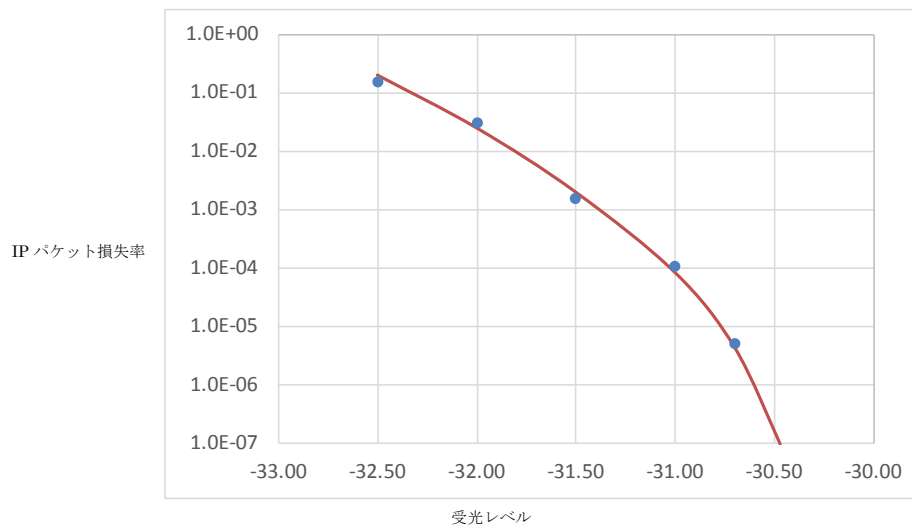


図 8-2 12Mbps における受光レベルと IP パケット損失率の関係

得られた受光レベルと IP パケット損失率との相関係数 $|R|$ を求めると、

80Mbps $|R| \doteq 0.739$

12Mbps $|R| \doteq 0.810$

であり、強い相関がみられる。したがって、IP パケット損失率は受光レベルから推測可能であると考えられる。

IP 伝送路では、誤りを含む IP パケットを検知した箇所で破棄する。そのため、IP 伝送路の始点～終点における IP パケット損失には誤りにより破棄された IP パケットが含まれる。また、IP パケット化時に IP パケットとして整合性が担保されるため、IP パケット化処理の入力信号の誤りは IP 伝送路上の誤りとしてカウントされない。そのため、入力信号の誤りがそのまま受信機へ伝送され、HE 入力品質は IP 伝送路品質に影響しない。

5.2 節から、本実験が目標とする IP パケット損失率は 1×10^{-7} 以下であり、GE-PON においては、図 8-1 と図 8-2 から $-30.2(\text{dBm})$ 以上で満たしている。IEEE 802.3ah 仕様および D-ONU 製品仕様のいずれの最低受光レベルも $-30.2(\text{dBm})$ よりも大きいことから、仕様に準じて運用することで PON 区間の信号品質は IP パケット損失率の基準を満たすことが可能である。

このほかの PON の方式についても、各方式の仕様におけるビット誤り率を 10^{-12} 以下とする前提で物理層が規定されており、同様に結論づけることができる。

また GE-PON では前方誤り訂正 (FEC) の利用が必須でないため、本実験では FEC を利用していない。FEC を利用することでビット誤り率が低減されるため、

IP 伝送路の品質によっては FEC の利用により受信信号の品質を担保することが可能である。

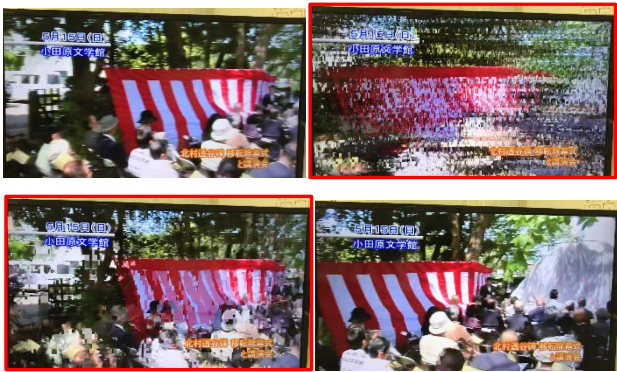
以上から、FTTH アクセス網伝送区間における IP パケット損失率は物理層の信号条件により担保可能である。ただし、PON 方式により最低受光レベルが異なるため、利用する方式が定める最低受光レベルにより運用する必要がある。

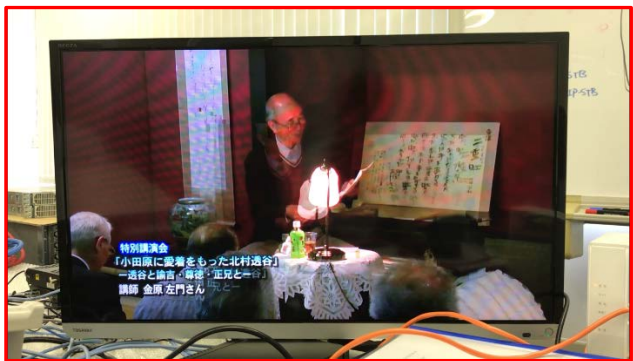
8.2 FTTH の IP 層実験結果と見解

8.2.1 パケット損失の計測と結果

本実験ではリアルタイムエンコーダから送出された UDP/RTP のストリームを測定器のエミュレータによって 1×10^{-3} から 1×10^{-6} ※1 までの幅でパケットを欠損させ TS アナライザによって、発生した MPEG-2 TS のコンプライアンス違反を観察した。なお、同時に IP-STB でも映像音声の状態を観察しているため、参考情報として画面の撮影データを掲載する。撮影した画面で映像に問題が発生しているフレームを赤枠で囲っている。

※1 本来は 10^{-7} 以下まで測定すべき事項であるが、エミュレータの性能限界のため、誤り率を 10^{-6} までの範囲で測定を行った。ただし、HFC の物理層実験ではノイズの挿入によって CN を変化させることで 10^{-7} 相当の誤り率を実現できたため、HFC の IP 層実験に 10^{-7} 時の観察結果を掲載する。

No.	ビットレート	誤り率	エラー、映像の状態
1	80Mbps	1×10^{-3}	約 50msec～200msec ごとに Continuity_Count エラー  短いフレーム間隔でブロックノイズが入る
2		1×10^{-4}	約 1.2 秒～1.5 秒ごとに Continuity_Count エラー

			 動きの多いシーンでブロックノイズが入る
3		1×10^{-5}	約 7 秒～23 秒の間隔で Continuity_Count エラー  稀にブロックノイズが入る
4		1×10^{-6}	約 2 分～3 分の間隔で Continuity_Count エラー  誤り検知時点の映像を見ると一瞬フレームがずれたように見えたが肉眼での認知は難しい

Continuity_Count は TS パケットの連続性を確認するためのカウンターであり、TS パケットの欠損を検知している。この誤りの検知は多少の揺らぎがあるものの

誤り率の範囲内であり想定通りの頻度である。誤り出現率が下がることで欠損するフレームが I フレーム以外の B フレームか P フレームである確率が増えることで画像の乱れは認知し辛くなる。

実験で使用したストリームのビットレートは 7.4.1 の RTP ストリームで 12Mbps、30Mbps、60Mbps、80Mbps の 4 種だが、実験結果は誤り検出頻度の違いであり、その頻度は 7.4.3 と一致するためここでは 80Mbps のデータのみを掲載する。また、IPv4 と IPv6 の IP アサインによって実験結果に変化はなく、Continuity_Count の出現頻度・映像のブロックノイズは同様だった。

8.2.2 パケット遅延と揺らぎの計測と結果

本実験ではリアルタイムエンコーダから送出された UDP/RTP のストリームを測定器のエミュレータによって定量的な遅延を発生させることと、遅延量を変化させて揺らぎの状態を生成することで、ネットワーク上で発生しえるパケットの状態が映像に与える影響を測定し映像を観察した。

実験では 80Mbps のビットレートで送出を行い、500msec の定量遅延を入れた状態と揺らぎの量を 500msec から 100msec の間で変化させ TS アナライザで MPEG-2 TS のコンプライアンスを確認した。TS アナライザによって確認された誤り内容は図 8-3 のとおりである。なお、TS アナライザでは IP パケットのバッファリングを行わないため、純粋に TS のストリームとしてコンプライアンスを測定している点に留意されたい。

揺らぎの幅	エラーの状態
100msec	PCR 周波数ドリフトエラー
	PCR オーバーオールジッタ エラー
	PMT 周期エラー
	PIT オーバーリミット
150msec	100msec に同じ
200msec	100msec に同じ
300msec	100msec に同じ
500msec	100msec に同じ

図 8-3 IP パケット遅延揺らぎの実験とエラーの一覧

遅延及び揺らぎの実験では誤りの発生量は異なるものの内容は同じものである。実験中に IP-STB が出力していた映像に乱れはなかったが TS アナライザで確認可能な映像のサムネイルは破たんしていたことから IP-STB にバッファがない場合

は正常に再生できない。これは IP-STB が持つ IP パケットのバッファが本来発生するであろう MPEG-2 TS のコンプライアンス違反を吸収しているものと思われる。また、IP-STB から出力された揺らぎ量は実験で挿入した量の遅延量と比して変化はするが、同量に変化しない点から実験に使用した IP-STB の特性によって吸収されているものと思われる。

8.3 HFC の物理層実験結果と見解

8.3.1 QoS の確認

測定器の UDP ジェネレータで発生させる UDP/RTP のビットレートを 80Mbps とし、背景トラフィックとして発生させる TCP の疑似データを 300Mbps に設定した。CM が受信できるビットレートは IP ヘッダなどを除いて 280Mbps 程度であり、理論的には保護されていない TCP のデータが 100Mbps 分欠損することになる。7.3.2 のとおり CMTS を設定し、計測器にて測定したところ想定通り TCP のデータが欠損し、UDP/RTP のパケットは全量受信できていることを確認した。

8.3.2 机上検討と実験結果の違い

8.1.2 と同様、測定の対象を BER から IP パケット損失率に変更した。

8.3.3 CN の計測と結果

本実験では、現在商用で提供されているケーブルテレビのネットワークによるインターネット接続サービスの通信方式として主流である DOCSIS 3.0 を対象とした。DOCSIS 3.0 仕様における端末（ケーブルモデム）の単一周波数チャンネル（6MHz）の下りストリーム受信処理性能は図 8-4 のとおりである。

6.3.3.2.1 256-QAM CM BER Performance	
Implementation loss of the CM MUST be such that the CM achieves a post-FEC BER less than or equal to 10^{-8} when operating at a carrier to noise ratio (E_s/N_0) as shown below. If it is not possible to measure post-FEC BER directly, Codeword Error Rate, R_C (as defined in Section 6.3.3.1.1) may be used. In this case, the CM MUST achieve a Codeword Error Rate of less than or equal to 9×10^{-7} when operating at a carrier to noise ratio (E_s/N_0), as shown in the following:	
Input Receive Signal Level	E_s/N_0
-6 dBmV to +15 dBmV	30 dB or greater
Less than -6 dBmV down to -15 dBmV	33 dB or greater
6.3.3.2.2 256-QAM Image Rejection Performance	
Performance as described in Section 6.3.3.2.1 MUST be met with an analog or a digital signal at +10 dBc in any portion of the RF band other than the adjacent channels.	
6.3.3.2.3 256-QAM Adjacent Channel Performance	
Performance as described in Section 6.3.3.2.1 MUST be met with an analog or a digital signal at 0 dBc in the adjacent channels.	
Performance as described in Section 6.3.3.2.1, with an additional 0.5 dB allowance, MUST be met with an analog signal at +10 dBc in the adjacent channels.	
Performance as described in Section 6.3.3.2.1, with an additional 1.0 dB allowance, MUST be met with a digital signal at +10 dBc in the adjacent channels.	

図 8-4 DOCSIS 3.0 下りストリーム (256QAM) の受信処理性能
(CM-SP-PHYv3.0-C01-171207 : 6.3.3.2)

特定の入力信号のレベルと CN 比の条件に対し誤り訂正後の BER が 10^{-8} 以下となることが受信性能として規定されている。また、伝送路符号化方式は ITU-T 勧告 J.83 Annex B を採用しており、RF 方式で採用している ITU-T 勧告 J.83 Annex C と同様に CN 比と BER との間に強い相関がある。そのため、入力信号の条件を変更することで誤り訂正後の BER を低減することが可能である。

DOCSIS 3.0 の 256QAM のときの下り伝送データレートは 1 周波数チャンネル (6MHz) で約 40Mbps であり、複数の周波数チャンネルを束ねて伝送帯域を大容量化することが可能である (チャンネルボンディング)。そこで本実験における物理層実験として、チャンネルボンディング時の端末の入力信号の CN 比と出力の IP パケット損失率の相関性を検証する。

本実験では 8 チャンネルを束ねて下り伝送容量を約 320Mbps とし、入力信号にホワイトノイズを印加して CN 比の変化に対する IP パケット損失率の測定を行った。

測定により得られた結果を表 8-4、図 8-5、表 8-5、図 8-6 に示す。なお、伝送した UDP ストリームのビットレートは 80Mbps と 12Mbps とし、下り伝送周波数は 450MHz~498MHz の連続した 8 チャンネル、CM の入力信号レベルは各チャンネルとも 6(dBmV)である。

表 8-4 80Mbps における CN 比と IP パケット損失率

CN 比(dB)	IP パケット損失率
28.70	<1.00E-07
28.60	2.03E-07
28.50	9.29E-07
28.40	1.16E-06
28.30	5.46E-06
28.20	2.16E-06
28.10	2.34E-06
28.00	1.02E-04
27.90	2.17E-04
27.50	1.29E-03
27.00	6.96E-02

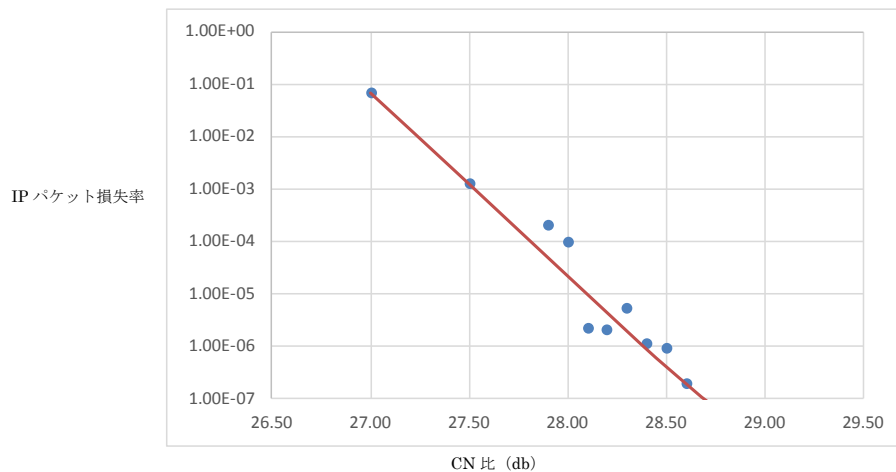


図 8-5 80Mbps における CN 比と IP パケット損失率の関係

表 8-5 12Mbps における CN 比と IP パケット損失率

CN 比(dB)	IP パケット損失率
28.60	<1.00E-07
28.30	3.62E-06
28.00	6.25E-06
27.80	6.08E-06
27.70	4.35E-05

27.60	3.52E-04
27.30	5.44E-03
27.00	4.47E-02

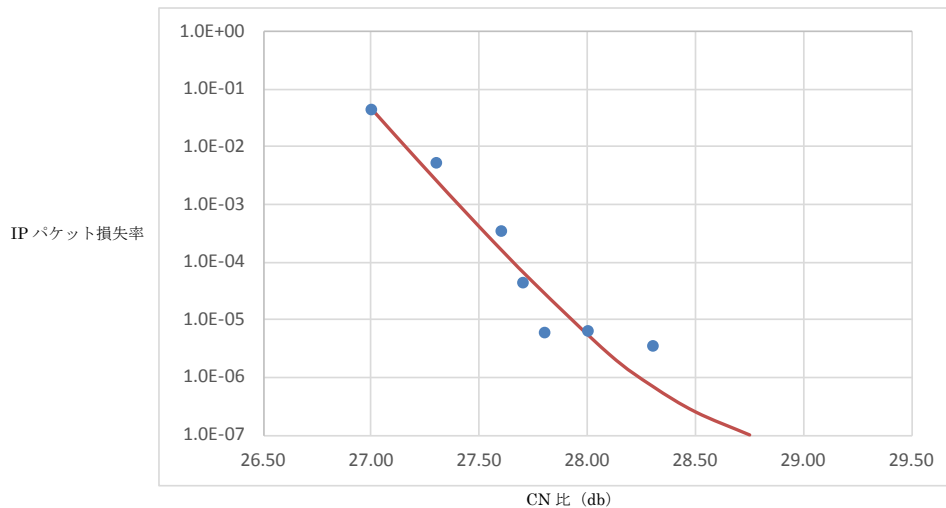


図 8-6 12Mbps における CN 比と IP パケット損失率の関係

得られた CN 比と IP パケット損失率との相関係数 $|R|$ を求めると、

$$80\text{Mbps} \quad |R| \cong 0.741$$

$$12\text{Mbps} \quad |R| \cong 0.744$$

であり、強い相関がみられる。したがって、IP パケット損失率は CN 比から推測可能であると考えられる。

IP 伝送路では、誤りを含む IP パケットを検知した箇所で破棄する。そのため、IP 伝送路の始点～終点における IP パケット損失には誤りにより破棄された IP パケットが含まれる。また、IP パケット化時に IP パケットとして整合性が担保されるため、IP パケット化処理の入力信号の誤りは IP 伝送路上の誤りとしてカウントされない。そのため、入力信号の誤りがそのまま受信機へ伝送され、HE 入力品質は IP 伝送路品質に影響しない。

FTTH と同様に 5.2 節から、本実験が目標とする IP パケット損失率は 1×10^{-7} 以下であり、DOCSIS 3.0 においては、図 8-5 と図 8-6 から 28.8(dB)以上で満たしている。DOCSIS 3.0 仕様が受信処理性能の基準とする BER の 10^{-8} は 5.2 節の式から、

$$\text{PER} = 1 - (1 - 1 \times 10^{-8})^{(188 \times 8 \times 7)} \cong 1 \times 10^{-4}$$

であり、CN 比が 27.8(dB)以上のときに満足する。したがって、DOCSIS3.0 の標準的な CN 比の基準に対し 1(dB)程度の向上により目標とする IP パケット損失率

を満たすと考えられる。

このほか、IP マルチキャスト方式をサポートする DOCSIS 方式として DOCSIS 3.1 が存在する。DOCSIS 3.1 の伝送路符号化方式は、DOCSIS 3.0 が採用する ITU-T 勧告 J.83 Annex B のチャンネルボンディングのほかに、OFDM によるブロック単位（最大 192MHz）構成が可能となっている。OFDM では FEC 方式として LDPC + BCH を採用しており、CN 比と BER との関係は本実験と異なる特性を示す。ただし、その関係は連続的であり、CN 比の確保により BER を保証することが可能であることから、本実験の結果と同様に一定の CN 比を担保することで IP パケット損失率の基準を満たすことが可能である。

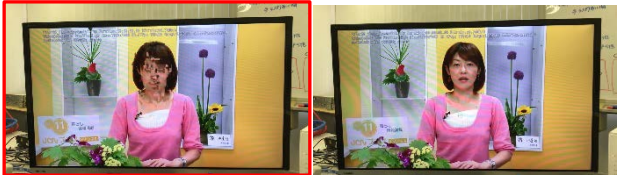
以上から、CMTS の入力 IP パケットの品質が担保されていれば、アクセス網伝送区間における品質は物理層の信号条件により担保可能である。本実験では 256QAM の入力信号レベルが 6(dBmV)のときの標準的な CN 比に対し 1(dB)程度の向上により満たすことを確認したが、実運用においては伝送信号条件と製品の処理性能を確認した上で適切な入力信号の CN 比を求めておくことが望ましい。また、DOCSIS 方式の伝送路符号化方式は複数規定されており、それぞれ受信処理性能が異なるため、利用する伝送路符号化方式で求められる CN 比を確認した上で運用する必要がある。

8.4 HFC の IP 層実験結果と見解

8.4.1 パケット損失の計測と結果

本実験ではリアルタイムエンコーダから送出された UDP/RTP のストリームを測定器のエミュレータによって 1×10^{-3} から 1×10^{-6} までの幅でパケットを欠損させ TS アナライザによって発生した MPEG-2 TS のコンプライアンス違反を観察したものと、 1×10^{-7} の値が得られるよう HFC の物理層で CN を変化させ、パケットを欠損させた状態の実験を行った。

物理的系が FTTH であれ HFC であれ、パケットが欠損する場合の MPEG-2 TS のコンプライアンスは同様の誤り内容で現象に違いはなかった。ここでは 1×10^{-7} の実験結果について記載する。

No.	ビット レート	誤り率	エラーの状態
1	80Mbps	1×10^{-7}	約 10 分～30 分ごとに Continuity_Count エラー  エラー検知時点の映像を見ると一瞬ブロックノイズが入ったように見えたが肉眼での認知は難しい

8.4.2 パケット遅延と揺らぎの計測と結果

本実験ではリアルタイムエンコーダから送出された UDP/RTP のストリームを測定器のエミュレータによって定量的な遅延を発生させることと、遅延量を変化させて揺らぎの状態を生成することで、ネットワーク上で発生しえるパケットの状態が映像に与える影響を測定し映像を観察した。ただし、実験結果は 8.2.2 の FTTH の実験結果と同様であり、経路による違いは生じなかった。

8.5 アクセス網における優先制御の考え方

7.3.1 及び 7.3.2 で記述したとおり、今回の実験においては FTTH、HFC それぞれのアクセス網において、適切な優先制御(QoS)を IP 放送で使用するマルチキャストストリームのみに適用し、想定通りに IP 放送のマルチキャストストリームが負荷ストリームに優先して伝送されることが確認できた。

HFC アクセス網(DOCSIS)の場合はデジタル放送と同様に、IP 放送専用の QAM 搬送波を設定することで QoS を適用せずに IP 放送を提供することも可能であるが、FTTH の場合や DOCSIS でもデータ通信と伝送帯域を共有して IP 放送を実施する場合、アクセス網において IP 放送提供に必要な品質を担保するための優先制御を適用する必要がある。

HFC に関しては 7.3.2 で記述のとおり、DOCSIS3.0/3.1 においてはマルチキャストに対する QoS が仕様として定義されており、CMTS、CM ともにその仕様を実装することが必須であるため、機種の違いによる実装の違いは生じないと思われるが、FTTH においては機種によって実装方法が異なる可能性があるため、必要な機能が実装されているかどうかの確認を行う必要があると思われる。

また、今回の実験内容には含まれていないが、優先制御 (QoS) 以外に検討すべ

きアクセス網における問題として、アクセス網の伝送可能帯域を超えるマルチキャストストリームに対する対応を考える必要がある。

一般的にはアドミッション・コントロールと呼ばれるもので、アクセス網で伝送可能な帯域を超えたマルチキャスト視聴のリクエストがあった場合にそれを制限するものである。

予め配信するマルチキャストストリームの総帯域をアクセス網の帯域幅以内に制限する場合は必要ないが、CH 数が多数となりそのような管理が困難である場合には、アドミッション・コントロールの適用が必要と思われる。

8.6 パケット遅延と揺らぎが映像に与える影響

8.6.1 パケット遅延

遅延時間の測定はパケットに付与されているタイムスタンプを利用する方法もあるが、送信側と受信側で厳密に時刻を同期させるか、受信側から送信側にもタイムスタンプに関する情報を送信するなどの方法が必要となり、容易に測定することはできない。

今回の実験では遅延に対する映像への影響を確認することが目的のため、遅延時間の測定には映像信号の時間差を測定する装置を用いて以下の構成で計測を行った。

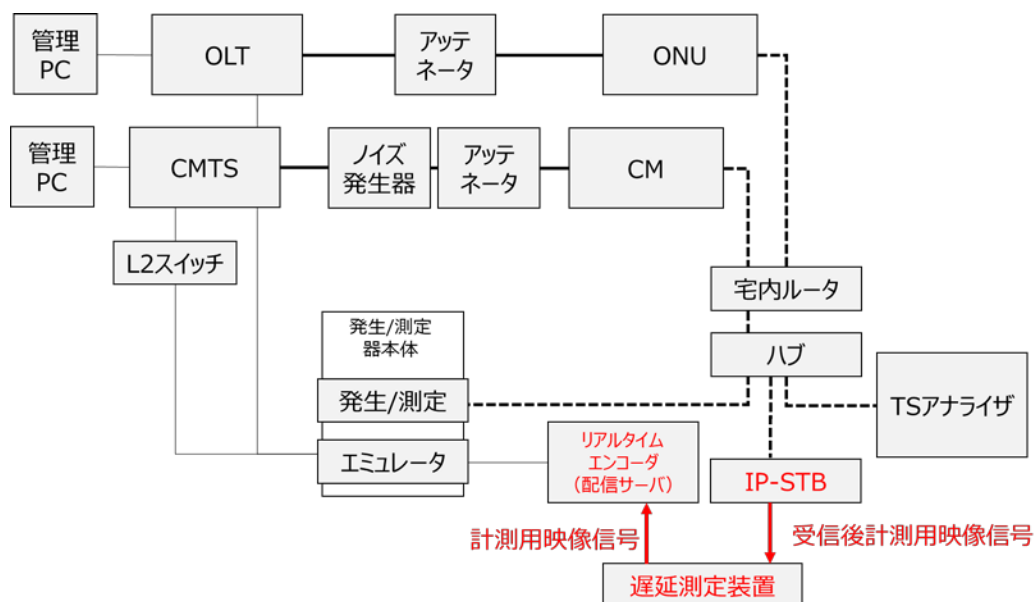


図 8-7 パケット遅延計測環境

遅延測定装置から出力した計測用映像信号をリアルタイムエンコーダで符号化して発生させた 80Mbps のストリームがエミュレータで中継され、FTTH/HFC 網を経由して宅内環境に設置した IP-STB で受信する。そして IP-STB で復号した受

信後映像信号を遅延測定装置に入力して、映像の時間差を測定することにより遅延を計測した。

エミュレータで遅延を付加しない場合、測定器で計測した遅延は 1.6 秒であった。この値はエンコード遅延、ネットワーク伝送遅延、IP-STB の受信・デコード遅延を合計した値である。

次にエミュレータで 500msec の一定の遅延を付加したストリームを IP-STB で再生したところ、計測器で測定した遅延も 2.1 秒となった。IP-STB はネットワーク伝送遅延を意識せず、受信したストリームを遅延がないストリームと同様に再生処理するだけであった。左記の結果から、伝送区間中で発生する一定の遅延量については、IP-STB の動作には影響がないことが確認できた。

8.6.2 パケット遅延揺らぎ

パケット遅延揺らぎ（ジッタ）の測定は机上検討段階では測定器を利用する想定だったが、実際の測定に即した方法を同時に検討すべく、図 8-9 のような測定用ラップトップ PC で行った。本実験ではパケットに付与されているタイムスタンプを利用する方法でパケット遅延揺らぎを測定している。RTP プロトコルを規定している RFC 3550 ではジッタの算出方法について以下のように記載されている。

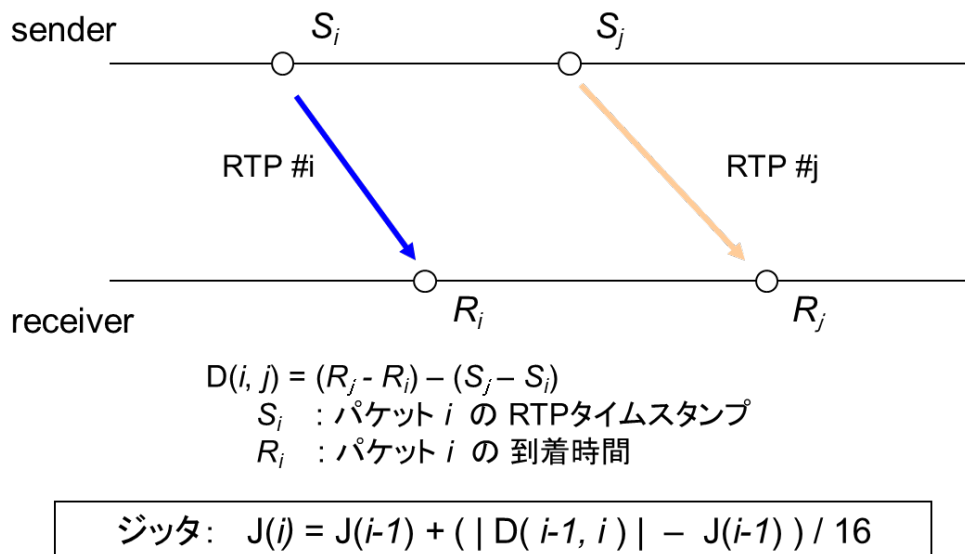
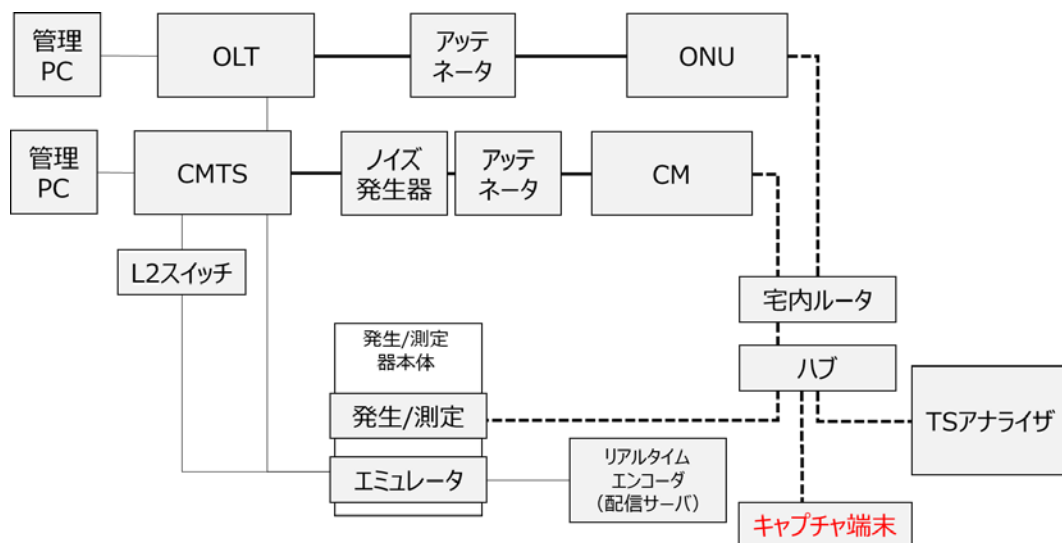


図 8-8 ジッタの算出方法

今回の実験では以下の構成で実験を行った。



実験に使用したリアルタイムエンコーダはパケットの送出時刻に合わせて RTP のタイムスタンプを正確に付与しているためジッタの算出に適しているが、規格によっては RTP のタイムスタンプの付与方法が異なるためジッタ測定時に使用するストリームには注意が必要である。

また、キャプチャ端末としては汎用 PC とオープンソースのソフトウェアによる簡易な構成を用いたが、PC の能力や稼働状況、ソフトウェアの性能によって、測定結果に影響がでることも注意が必要である。

実験では最初に揺らぎを付加しない状況でのジッタを確認するため、エミュレータで遅延を付加せずストリームを中継し、キャプチャ端末で算出したジッタとパケット間差分の最大値 D_{max} は以下の結果であった。

	FTTH		HFC	
最大遅延幅	ジッタ	D_{max}	ジッタ	D_{max}
なし	0.03msec	0.28	0.42msec	4.82

FTTH/HFC とともにジッタは 1msec 以下の非常に小さい値で、実験で構築したネットワークではほとんど揺らぎがないことが確認できた。

次にエミュレータで最大 100~500msec の遅延量を徐々に変化させることで揺らぎを発生させたとき、キャプチャ端末で測定したジッタは以下の結果であった。

	FTTH		HFC	
最大遅延幅	ジッタ	D_{max}	ジッタ	D_{max}
100msec	0.59msec	4.22	0.53msec	4.88
150msec	0.50msec	4.80	2.30msec(※)	24.31
200msec	1.92msec	6.30	0.74msec	6.33
300msec	0.86msec	6.39	0.89msec	6.33
500msec	3.63msec	10.38	1.37msec	10.40

※ キャプチャ端末で起動中の別アプリケーションの影響でパケットの取りこぼしがあり、計測誤差が大きくなったと思われる。

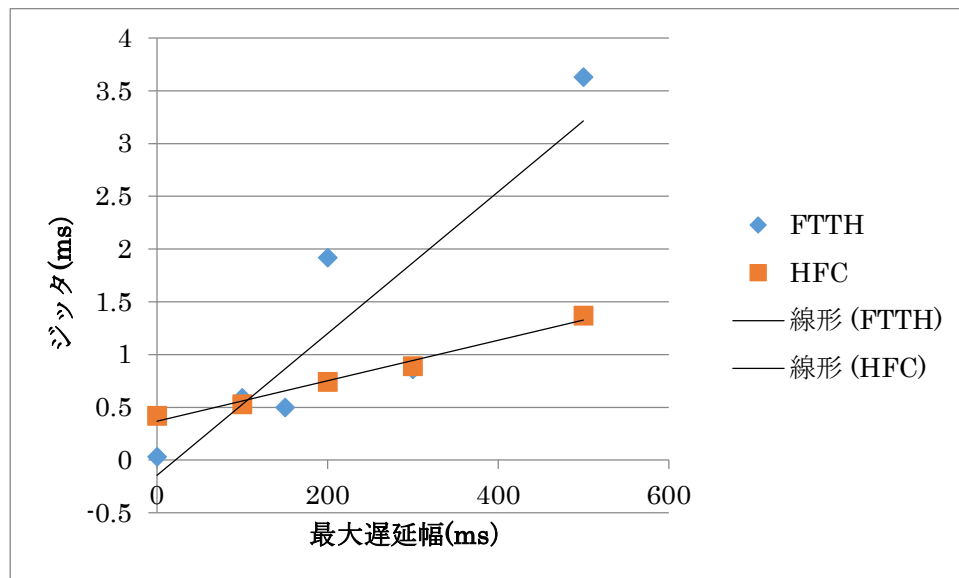


図 8-10 最大遅延幅とジッタの関係

最大遅延幅が大きくなるほどジッタの値も大きくなる傾向は見られたが、付加した遅延幅と比較してかなり小さなジッタ値が算出された。これはエミュレータが徐々に遅延量を変化させたため、RFC 3550 で規定されている計算方法のパケット間差分が小さく、その統計的な加算結果をもとにジッタを算出しているためと考えられる。

また、FTTH に対して HFC の方が小さなジッタ値が観測されたのは、HFC 区間の上限ビットレートを 200Mbps に設定していたことが関係している可能性がある。揺らぎを付加したことによりトラフィックにバーストが発生するが、下図のように 80Mbps のストリームが瞬間的に 2.5 倍の 200Mbps 程度のビットレートとなることもあり、ビットレートを制限するキューで一時的な滞留が発生し、揺らぎが平滑化されたのではないかと考えられる。実際に当初 HFC 区間の上限ビットレートを 100Mbps に設定した際は、バーストトラフィックをキューで吸収すること

ができず伝送区間内でパケットが廃棄され、受信側でもパケット損失が検出された。

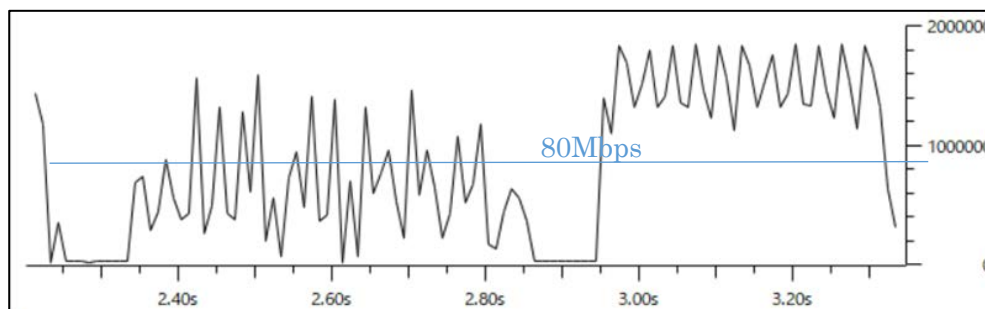


図 8-11 HFC で 500msec の遅延変動を付加した際の受信ストリームの変動

以上の結果から、伝送区間のキューイング処理によって、揺らぎが変動したりパケット廃棄が発生したりする可能性があるため、伝送するビットストリームにあわせた帯域設計と機器の設定が必要となる。

実際にジッタを付加した際の映像への影響については、使用した IP-STB は揺らぎを吸収可能なだけのバッファを有していたと思われるため、映像品質には特に影響はなかった。なお、バッファ制御を含めた再生の挙動については IP-STB の商品企画・仕様によるため詳細については不明である。

一方、使用した TS アナライザは揺らぎを吸収せず、到着した RTP パケットから TS パケットを取得し ASI(Asynchronous Serial Interface)で TS 解析部に送信して TS 解析処理を行う動作のため、PCR(Program Clock Reference)や PMT(Program Map Table)エラー等が検出されていた。PCR や PMT の到着間隔や単位時間当たりの挿入頻度が揺らぎにより規定の範囲外と判断されたためと考えられる。

上記の結果より、IP-STB が揺らぎを吸収するバッファを有していれば、映像品質には影響がないことは分かったが、ネットワークでの揺らぎと測定したジッタ値との関係性を導くことはできなかった。

今回の検証では RFC 3550 の RTP プロトコルに従って RTP のタイムスタンプを使用したジッタの算出を行ったが、RTP のタイムスタンプについては伝送するメディアストリームの形式や、各種サービスの運用仕様によって異なる使用方法が規定されている。

実際のサービスで使用されている例として、IPTV フォーラムや日本ケーブルラボの IP 放送仕様では RTP タイムスタンプについては以下のように規定されている。

- タイムスタンプは、RTP データパケットの最初のオクテットのサンプルを取得した時刻を表す
- 送信運用規定：基本的には 90kHz で運用する。ただし、本値は厳密に運用しなくてもよい。

上記の仕様では RTP タイムスタンプには基本的にはパケットを送出した時間ではなく、サンプルを取得した時間すなわちフレームの時間から算出した値が付与されている。このため、データ量が多いイントラフレームやビットレートが高いストリームの場合、1つのフレームが複数の RTP パケットに分割して送信され、同一の RTP タイムスタンプが付与された RTP パケットが連続して伝送されることになる。

このようなパケットでは送出時間と RTP タイムスタンプ自体に揺らぎが含まれているため、正しくネットワークのジッタを測定することは困難である。ネットワークのジッタを測定するためには、測定用の専用ストリームを別途伝送して計測する必要があると考えられる。

また、ビットレートに変動のない CBR ストリームを想定した場合は、パケットの送出間隔、到着間隔が一定で揺らぎがない伝送環境が理想的ではあるが、ビットレートに変動がある VBR ストリームではパケットの送出間隔は一定ではなく、揺らぎの要因が伝送方式・仕様に起因するものか、伝送環境に起因するものか判断ができない場合もあると思われる。

8.7 パケットの揺らぎと STB のバッファ量

ここでは、パケットの揺らぎが STB に与えるバッファ量の変化の影響について説明する。パケットの揺らぎはネットワーク上に流れる他のパケットの増減による影響や経路変更による影響など起こりうると考えられる。

8.7.1 想定するパケット揺らぎのパターン

以下に想定できるパケット揺らぎのパターンを図示し、揺らぎ発生時の STB へのパケットの届き方を説明する。通常、IP 放送のパケット群 (UDP/IP ストリーム) は一定の間隔で送信されることを想定するが、揺らぎが起こると一定の送信間隔が崩れ、パケットの間隔が広がったり短くなったりする。

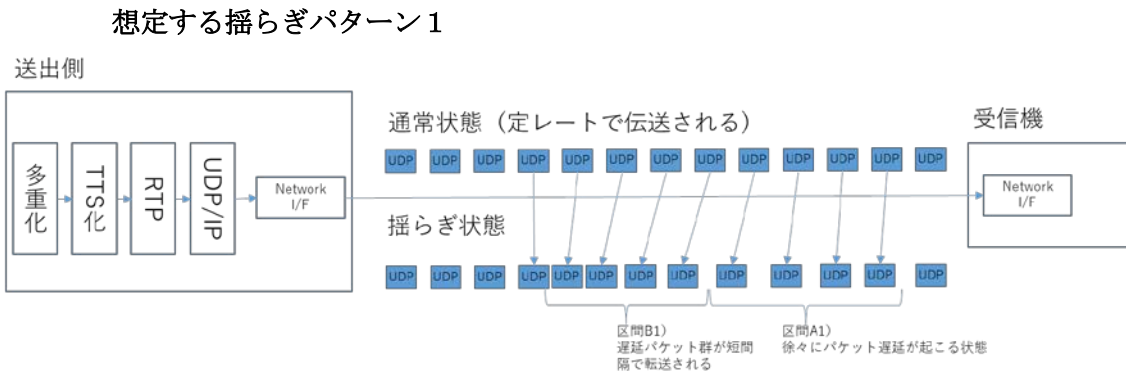


図 8-12 想定する揺らぎパターン 1

本パターンでは、パケットの送信間隔が徐々に広がって、その広がりが全体的に積み重なって大きな遅延（区間 A1）になり、その後、徐々にパケットの送信間隔が短くなっていった（区間 B1）一定の送信間隔に戻るパターンである。

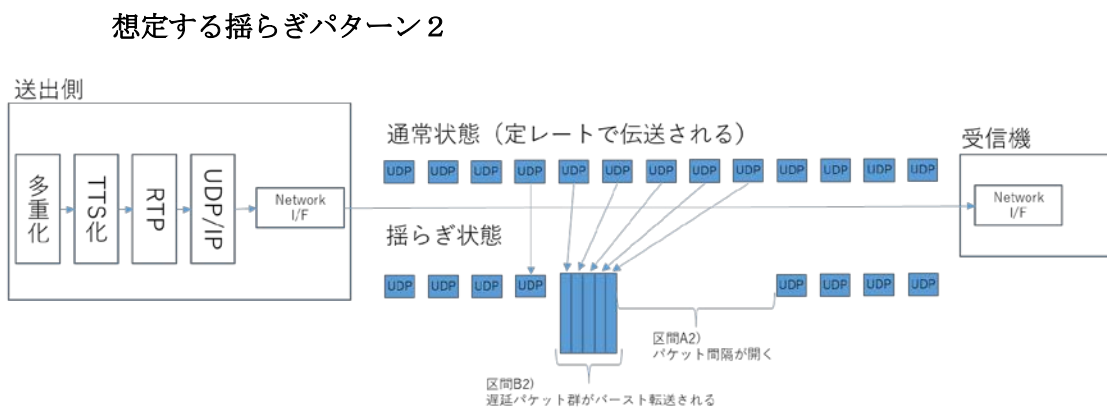


図 8-13 想定する遅延パターン 2

本パターンでは、一定間隔で送信されていたパケットが突然受信側に届かなくなり（区間 A2）、その後、届かなくなっていたパケット群が突然、短間隔でバースト的に大量に流れ込んでくる（区間 B2）パターンである。

8.7.2 IP 放送対応受信機の構成

下図 8-14 に IP 放送対応受信機の構成例を示す。

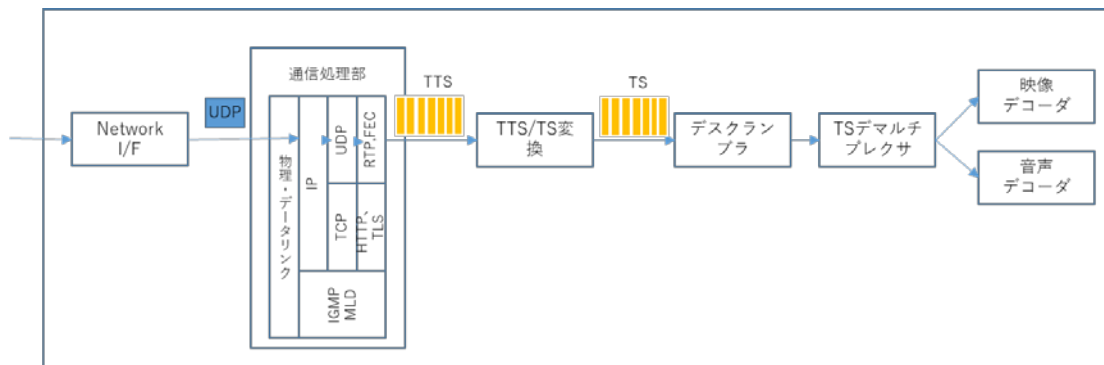


図 8-14 IP 放送受信機の構成例

受信機が IP 放送用の UDP/IP ストリームを受信してからデコードするまでの流れを説明する。IP 放送対応受信機は、ネットワーク I/F で UDP/IP ストリームを受信し、通信処理部に UDP/IP パケット単位で渡す。通信処理部は、受信した UDP/IP パケットから RTP パケットを取り出し、そこから TTS パケット群を取り出し、後段の TTS/TS 変換部に出力する。TTS/TS 変換部は、TTS のタイムスタンプを参照しながら、適切なタイミングで TS 化を行って後段のデスクランブラに出力する。デスクランブラは既定の限定受信方式に対応した暗号復号処理を行い TS デマルチプレクサに暗号復号後の TS パケットを出力する。TS デマルチプレクサは TS のデコードタイミングに合わせて映像デコーダ、・音声デコーダにデータを出力して映像・音声の出画を実現する。

このような構成において、前述のパケットの揺らぎを吸収するために、受信機にはバッファを設ける必要がある。バッファを設けるブロックは受信機商品企画matterであるが、一般的に TTS/TS 変換処理部以降の TS 出力に揺らぎの影響を与えないようにバッファが構成される。

8.7.3 パケットの揺らぎと受信機のバッファ使用量の関係

ここではパケットの揺らぎが発生したときの、受信機のバッファに対する影響について説明する。

図 8-15 は受信機が IP 放送のパケットを受信しているときのバッファ使用量の変化について模擬的に示した例である。

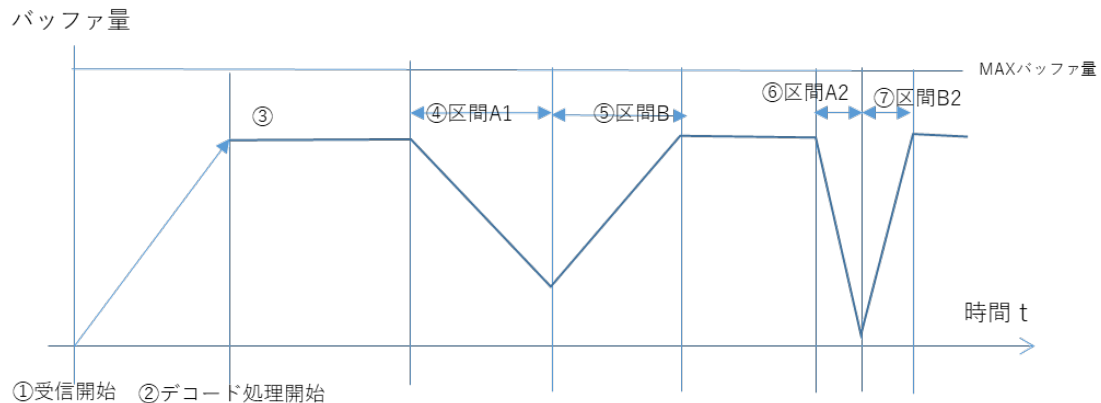


図 8-15 IP 放送受信時のバッファ使用量変化の例

受信機は IP 放送用のパケットの受信を開始すると (①)、バッファにある程度データを蓄積してからデコード処理を開始する (②)。その後、ネットワークが安定しており、一定の転送量で IP 放送用のパケットが受信できれば、受信するデータ量とデコードするデータ量が均衡し、バッファ使用量が安定する (③)。

ネットワーク上に揺らぎが発生すると、受信するデータ量とデコードするデータ量の均衡が破れ、バッファ使用量が減少する。例えば、前述の想定する揺らぎパターン 1 が起こると、パケットが遅延して到着するため、バッファの消費スピードに追いつかなくなり、受信機内のバッファ使用量が徐々に減少する (④区間 A1)。その後、遅延が解消すると、遅延していた分のパケットが定常よりも早い間隔で転送されるため、バッファ使用量が回復し (⑤区間 B1)、バッファ使用量が安定する。

また、前述の想定する揺らぎパターン 2 の場合は急激にバッファ使用量の増減が発生する。IP 放送用のパケットが全く受信できない区間においては、バッファ内のデータ消費のみが発生し (⑥区間 A2)、その後バースト的にデータ送信され、バッファ使用量が急激に回復する。

この例は、パケット到達の揺らぎを想定して受信機内にバッファとして十分にデータを蓄積しているため実現可能な動作である。

一方、揺らぎを十分に考慮せずにバッファ量を設計すると、前述の揺らぎパターン 1、2 でそれぞれ問題が発生する。図 8-16 に問題が発生する場合のバッファ使用量の変化の例を示す。

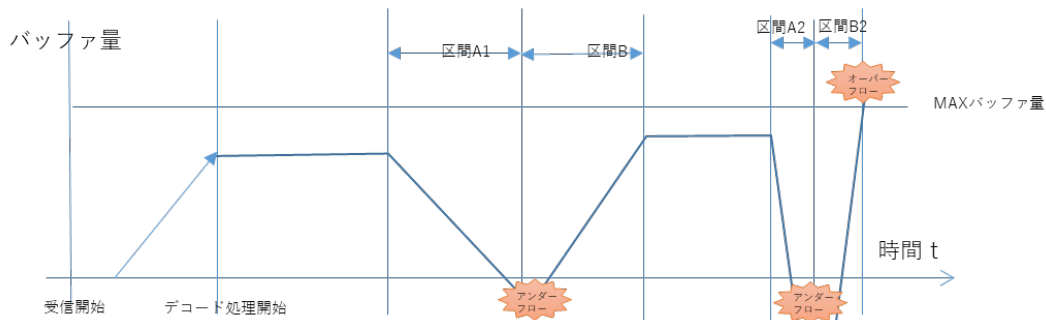


図 8-16 揺らぎを十分に考慮していない IP 放送受信時のバッファ使用量変化の例

問題が発生する場合の一つはバッファアンダーフローである。IP 放送用のパケットの受信開始後、データをバッファに十分に蓄積せずにデコード処理を開始した場合、揺らぎが起こって、データの受信量がバッファの消費量よりも少なくなる状態が継続すると、バッファにあるデータが枯渇したタイミングでバッファアンダーフローが発生（区間 A1, A2）し、出画ができなくなってしまう。

もう一つはバッファオーバーフローである。受信機側で十分なバッファ量を確保していない場合、例えばバースト的にデータが流れてきたとき（区間 B2）に受信したデータをバッファに蓄積できなくなり、バッファオーバーフローが発生し、正常な出画ができなくなってしまう。

このように、受信機のバッファはネットワーク等により生じるデータの到着時間の揺らぎの影響を吸収するうえで重要な役割を果たしている。ただし、バッファはメモリにより構成されているため、バッファ量を大きくすれば受信機コストが上昇することに留意が必要である。更に図 8-15、図 8-16 示したようにバッファ処理を行うことにより、IP 放送用のパケットの受信を開始してから実際にデコードするまでに時間を要することになるため、出画の遅延の要因にもなる。

このように、揺らぎへの対処はコスト上昇、出画遅延と直接関連しているため、システム全体として許容できる揺らぎ幅の規定は必要となる。

8.8 パケット損失率が映像に与える影響

8.8.1 パケット損失率と主観画質について

本実験において、IP パケット損失率 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-4}$ では映像視聴に問題があった。例えば、まれにしか映像が動かない動作や、フリーズ動作などが頻繁に発生するなどである。一方で、IP パケット損失率が 1×10^{-5} 程度であれば映像視聴自体は可能であった。ただし、動きのないシーンでフリーズ動作と見分けが付かなかった、落ち着いて映像視聴をすると不快になる可能性があることは否定できない。以下では、より定性的な考察を試みる。

8.8.2 パケット損失が映像に与える影響

圧縮映像のエレメンタリーストリーム、すなわち広義のヌルパケットや SI 情報を除く、復号に必須となるビットストリーム（バイトストリーム）において、1bit でも誤りがあると、少なくとも当該フレームの復号は出来ず、さらに当該フレームが参照フレーム（復号順で後続のフレームから参照されるフレームのこと）であれば、後続のフレームも復号できない。最も影響が大きい場合は、I フレームが復号できない場合であり、次の I フレームまでは復号が出来ない。反対に、最も影響が少ない場合は、非参照フレーム（B フレームなど）が復号できない場合であり、当該フレームのみが復号できない。ここでは、復号できない、またはフレーム途中までの復号などを含めて、映像が乱れると表現するが、かならずしも映像が破綻することを意味しない。例えば、映像をフリーズさせておけば主観的な影響は一定程度抑えられる。なお、多くのデコーダでは、可能な限り復号を継続し、また誤り隠蔽技術により主観画質への影響を抑制する処理が含まれている。これは商品企画に分類されるものであり、ここでは扱わない。

一般に I フレーム間隔はチャンネル切り替えが可能なタイミングと符号化効率のトレードオフとして考慮される。その結果、ARIB 規格では 0.5 秒～1.0 秒程度の間隔で I フレームを挿入することを求めている。ただし、実運用上は 2.0 秒程度でも問題ない場合がある。ビット誤りやパケット損失が生じると、最大で I フレーム間隔時間は映像が乱れることになる。

次に、1つの IP パケットに 7つの TS パケットが含まれている場合に、IP パケットに含まれるフレーム数を考察する。そのためには、符号化構造（いわゆる GOP 構造）の仮定が必要である。具体的には、4K UHD 放送（59.94P）、30Mbps を対象に、I フレーム間隔は 0.5 秒程度（59.94fps において 32 枚間隔）、階層 B 構造とする。この場合、イントラフレーム間隔の間に到達する符号量は約 16Mbits となり、イントラフレーム間隔で消費される符号量のうち、I フレーム、I フレーム以外の参照フレーム、非参照フレームが占める割合をそれぞれ 40%、35%、15%とする。すなわち、最も符号量の少ないフレームは非参照フレームであり、約 1%に対応する 160kbits≈15TS となる。ここから、1bit 誤りにより TS パケットが 1 個失われても、1 IP パケット損失により TS パケットが 7 個連続で失われても、対応するフレームはほぼ 1 フレームに限定されることが分かる。また、当該フレームが非参照フレームであった場合も、影響を受ける後続フレーム数には 1bit 誤りでも 1 IP パケット損失でも関係ない。

HD 放送（59.94i）を対象として考えた場合、より低ビットレートとなるため、1bit 誤りよりも 1 IP パケット損失により復号できないフレーム数は増加すると考えられる。ただし、1 IP パケットに複数フレームが含まれるのは依然として非参照フレームである可能性が高く、復号できないフレーム数は限定的である。また、

参照フレームであれば、1bit 誤りか 1 IP パケット損失かによらず、復号できないフレーム数は同じである。したがって、主観的に知覚でき、かつその継続時間の長さには大きな差があるとはいえない。

8.9 パケット損失と FEC

パケット損失による再生映像品質の影響を低減させるために、アプリケーションレイヤの前方誤り訂正 (Forward Error Correction; FEC) を適用することができる。リニア映像配信におけるアプリケーションレイヤの FEC の一例として、本稿では Pro-MPEG FEC COP3 を取り上げ、当該 FEC によるパケット損失率の低減を具体的に報告する。なお、ここでは伝送路に適用する FEC については検討の対象外とする。

8.9.1 Pro-MPEG FEC COP3

Pro-MPEG FEC COP3 は、 $L \times D$ 個の RTP パケットを 2 次元に配置し、D 方向に各パケットに対する XOR 演算を適用して FEC パケットを得る 1D FEC と、D 方向と L 方向にそれぞれ FEC パケットを得る 2D FEC とがある。 $L \times D$ の選択は自由であるが、以下の制約がある。

$$\begin{aligned} L \times D &\leq 100, \\ 1 &\leq L \leq 20, \\ 4 &\leq D \leq 20. \end{aligned}$$

IPTV フォーラムでは、より具体的な組み合わせとして 1D FEC $L \times D=10 \times 10$ 、1D FEC $L \times D=20 \times 5$ 、2D FEC $L \times D=10 \times 10$ 、2D FEC $L \times D=20 \times 5$ が規定されている。

以下では、各パケットの損失する確率は一定であり (定常性)、かつ過去のパケットとは無関係である (独立性) と仮定する。バースト性の損失は、その連続パケット損失数が L よりも十分小さければ、2 次元に配置するときに D 方向に対しては無関係なパケット損失と見なせる。

8.9.2 Pro-MPEG 1D FEC

1D FEC は D 方向に 1 パケットまでの損失を修復可能である。ここでは、FEC 前 IP パケット損失率と、FEC 後 IP パケット損失率の関係を考察する。なお、議論を簡素化するため、 $L \times D=10 \times 10$ と $L \times D=20 \times 5$ の 2 種類に限定する。また、IP パケット損失率は FEC バッファサイズ (100 パケット) に比べて十分小さいため、発生頻度は二項分布に従うと仮定する。

ここで、1D FEC は D 個のパケットのうち、パケットがたかだか 1 個の訂正 (回復) が可能である。したがって、FEC バッファ (100 パケット) 全てが利用可能

となる確率は以下で求められる。

$$P_{1D}(IPLR) = (1 - IPLR)^{(L*D)} + D(1 - IPLR)^{L*D-1}IPLR$$

ここで、パケット損失率(IPLR: IP packet Loss Ratio)を 1×10^{-4} 、 $L*D=10*10$ のとき、 $P_{1D=10}(1 \times 10^{-4}) = 1.0 - 4.5 \times 10^{-7}$ となる。ただし、実際にはパケットが 2 個以上損失している場合であっても、FEC バッファ内に存在する損失していないパケットは有効である。そこで、パケット単位での利用可能な確率は以下で求められる。

$$\begin{aligned} P'_{1D}(IPLR) &= (1 - IPLR)^D + D(1 - IPLR)^{D-1}IPLR \\ &\quad + \sum_{n=2}^D C_n^D (1 - IPLR)^{D-n}(IPLR)^n \frac{D-n}{D} \\ &= 1 - \sum_{n=2}^D C_n^D (1 - IPLR)^{D-n}(IPLR)^n \frac{n}{D} \end{aligned}$$

ここで、 C_n^D は二項分布係数であり、D 個のパケットから n 個のパケットが損失した場合の位置の組み合わせ数を表す。再び IPLR を 1×10^{-4} 、 $L*D=10*10$ とすると、 $P'_{1D=10}(1 \times 10^{-4}) = 1.0 - 9.0 \times 10^{-8}$ となる。すなわち、 $L*D=10*10$ の 1D FEC は、 $IPLR = 1 \times 10^{-4}$ において $9.0 \times 10^{-4} \approx 1 \times 10^{-3}$ の訂正能力があるといえる。なお、FEC の訂正能力は IP パケット損失率 IPLR に依存するため、注意されたい。

ここまでの考察をまとめ、IPLR を変数として FEC 前と FEC 後の関係を $D=5, 10$ について計算すると、図 8-17 のようになる。

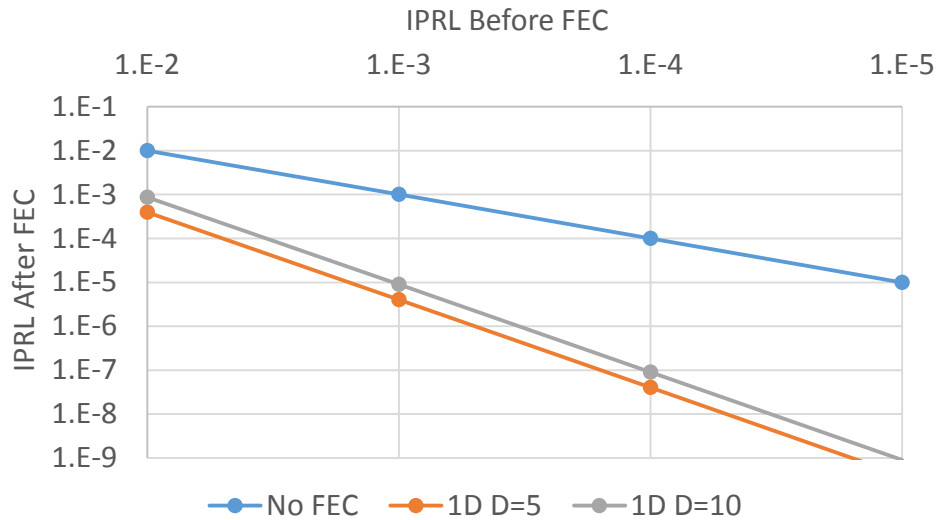


図 8-17 1D FEC による IP パケット損失率の関係。

8.9.3 Pro-MPEG 2D FEC

2D FEC は $L \times D$ 個の FEC バッファに含まれるパケットのうち、パケットがたかだか 3 個の損失に対しては必ず復元可能である。1D FEC と同様に n 個のパケット損失に対して復元できる損失パターンを数え上げると原理的には陽に利用可能なパケットの確率を導出できる。しかしながら、1D FEC と異なり一般化が難しく、さらに 1 つの FEC バッファ内で複数のパケットが損失する可能性は十分に低い ($1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-12}$) ため、パケットがたかだか 4 個損失された場合を数え上げ、5 個以上損失した場合には復元できないと仮定する。なお、すでに 1D FEC で示したように、 1×10^{-4} 以下のパケット損失率であれば、 $D=5, 10$ のいずれにおいても FEC 後パケット損失率は 1×10^{-7} を実現可能である。したがって、ここでは、 1×10^{-3} 程度の FEC 前パケット損失率であっても、2D FEC によって 1×10^{-7} 程度にパケット損失率を下げられることを示す。

ここで、2D-FEC は $L \times D$ 個のパケットのうち、パケットがたかだか 3 個の訂正（回復）が可能であり、4 個が損失した場合、 $L \times D$ 個のパケットに散らばっていれば同様に訂正（回復）が可能である。訂正不可の場合は、 D 方向と L 方向とに同時に 2 個のパケットが損失する場合のみである。すなわち、 $C_4^{L \times D}$ パターンのうち、 $C_2^L C_2^D$ 個は復元が出来ない。さらに、簡便のためにパケットが 5 個以上損失した場合は FEC バッファ全てが利用できないとし、パケットが利用可能となる確率は以下で求められる。

$$P_{2D}(IPLR, 4) = \sum_{n=0}^4 C_n^{L \times D} (1 - IPLR)^{L \times D - n} (IPLR)^n - \frac{L \times D - 4}{L \times D} C_2^L C_2^D (1 - IPLR)^{L \times D - 4} (IPLR)^4$$

ここで、 $IPLR=0.001$ のとき、 $P_{2D}(1 \times 10^{-3}, 4) = 1 - 7.1 \times 10^{-8}$ となる。すなわち、 $L \times D=10 \times 10$ の 2D FEC は、 $IPLR = 1 \times 10^{-3}$ において $7.1 \times 10^{-5} \approx 1 \times 10^{-4}$ の訂正能力があるといえる。なお、FEC の訂正能力は IP パケット損失率 $IPLR$ に依存するため、注意されたい。

ここまでの考察をまとめ、 $IPLR$ を変数として FEC 前と FEC 後の関係を $D=5, 10$ について計算すると、図 8-18 のようになる。なお、 $IPLR$ が高い場合には、 $D=5$ と $D=10$ とで訂正能力はほぼ同一となり、グラフの線は重なっている。

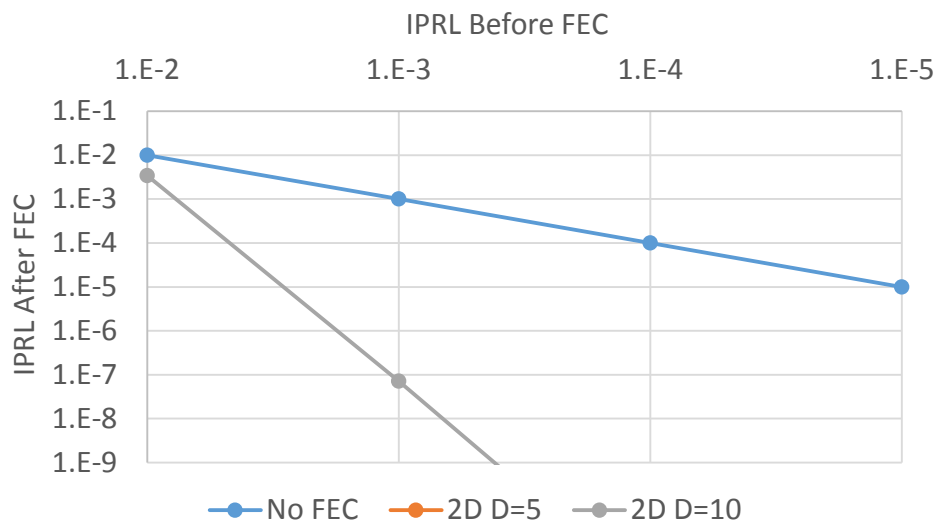


図 8-18 2D FEC によるパケット損失率の関係

8.10 測定方法についての考察

8.10.1 実験環境における測定

本実証実験では、図 7-1 の物理層実験環境にある信号発生器兼測定器（Anritsu データ クオリティ アナライザ MD1230B）によって物理層実験の数値を測定している。物理層実験における測定項目は以下のとおり。

- ・ 優先制御が正常に動作しているかを測るため試験用パケットの送信量と受信量
- ・ FTTH の受光パワー／HFC の CN 値変化によるパケット損失率の変化を測るため試験用パケットの送信量と受信量
- ・ 上記 2 項目におけるパケット損失量

また IP 層実験では図 7-2 の IP 層実験環境にある TS アナライザ（Tektronix MPEG アナライザ）によって MPEG-2 TS のコンプライアンス違反を測定している。

8.10.2 フィールドでの測定

フィールドでは、送信側と受信側が物理的・地理的に離れた位置にあるため、今回の実験環境と同様の測定は実施不可である。また必ずしも事業者で今回と同程度の測定器を利用可能とは限らない。以上を踏まえ本節ではフィールドの測定方法について考察を行う。

測定方法としては、試験パケットを利用するアクティブ計測とネットワークに流れる商用パケットを計測するパッシブ計測の 2 種類が利用可能である。アクテ

イブ計測については、試験パケット内にシーケンス番号や送信時のタイムスタンプを付与したストリームを利用する方法が考えられる。IPTV フォーラムや日本ケーブルラボの IP 放送仕様を含めて、IP マルチキャストで映像を伝送する場合に一般的には RTP プロトコルが使用されている。RTP プロトコルにはパケットの順番を表すシーケンス番号と、パケットの時刻を表すタイムスタンプがヘッダに含まれている。パッシブ計測では、この RTP ヘッダの情報を利用する方法が考えられる。

8.10.2.1 測定に関する時間と場所

測定するにあたっては、ネットワークを構築した後に終端装置を設置するフィールドで測定する方法と、HE 内に疑似フィールド環境を構築し、終端装置を設置して行う 2 つの方法が考えられる。測定の目的に応じて、フィールドで測定する方法、疑似フィールド環境を利用して測定する方法等のいずれかを適切に選択して実施することが望ましい。また、計測するタイミングについては、放送のトラヒックが優先制御されたネットワークであり、伝送帯域が十分に用意されていることが前提であるが、通信のトラフィックの時間的変動や地理的変動が極端に大きいことを踏まえ、放送の視聴状況等も勘案して、測定の時期、時間帯、場所等を適切に選定して、測定を実施する必要がある。

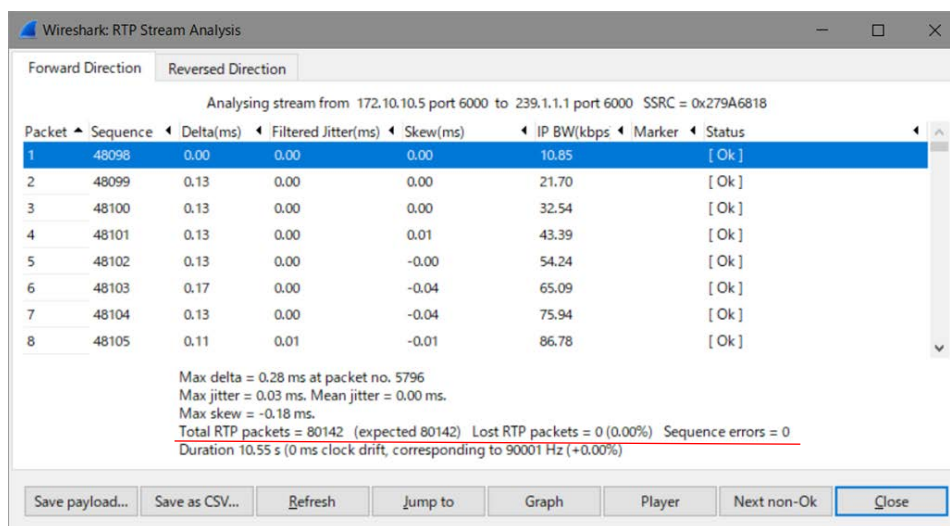
測定時間に関してはパケット損失率の測定であれば 7.4.2 にある BER の計測時間と同等の時間とすることが望ましい。これは、 $IPLR=1 \times 10^{-7}$ を BER に単純換算すると 1×10^{-11} であり、パケット損失率を計測するに当たっても測定時間は同等であると考えられるからである。なお、遅延及び遅延揺らぎについてはこの限りではないが、キャプチャしたデータから遅延揺らぎを求める場合はパケット損失率測定のために取得したキャプチャデータを流用して算出してもよいし、別途測定を行ってもよい。フィールドにおける測定か疑似フィールド環境による測定か等に応じて、適切な測定時間を検討する必要がある。

8.10.2.2 パケット損失率の測定

パケット損失率をアクティブ計測で測定する場合は、試験パケット内に損失を検知するためのシーケンス番号相当の情報を付与する必要がある。送信側装置は当該試験パケットをマルチキャストアドレスにてネットワーク側に等間隔で送信する。受信側装置は IGMP /MLD ジョイン(JOIN)によって該当試験パケットを受信し、パケット内のシーケンス番号の欠落から損失の有無を判断する。

一方、パッシブ計測を利用する場合は、RTP 等によって商用サービスのパケット内にシーケンス番号相当の情報が付与されている必要がある。受信側は、STB に

解析機能を具備したり、ネットワークタップ等を介してパケットを一般的な PC でキャプチャし、オフライン解析したりする。PC のパケットキャプチャツールとしては tcpdump や Wireshark などが有名である。図 8-19 はオープンソースのキャプチャソフト Wireshark でパケットをキャプチャ後、RTP ヘッダの解析を行った結果の一例である。



Wireshark: RTP Stream Analysis

Forward Direction Reversed Direction

Analysing stream from 172.10.10.5 port 6000 to 239.1.1.1 port 6000 SSRC = 0x279A6818

Packet	Sequence	Delta(ms)	Filtered Jitter(ms)	Skew(ms)	IP BW(kbps)	Marker	Status
1	48098	0.00	0.00	0.00	10.85		[Ok]
2	48099	0.13	0.00	0.00	21.70		[Ok]
3	48100	0.13	0.00	0.00	32.54		[Ok]
4	48101	0.13	0.00	0.01	43.39		[Ok]
5	48102	0.13	0.00	-0.00	54.24		[Ok]
6	48103	0.17	0.00	-0.04	65.09		[Ok]
7	48104	0.13	0.00	-0.04	75.94		[Ok]
8	48105	0.11	0.01	-0.01	86.78		[Ok]

Max delta = 0.28 ms at packet no. 5796
 Max jitter = 0.03 ms. Mean jitter = 0.00 ms.
 Max skew = -0.18 ms.
 Total RTP packets = 80142 (expected 80142) Lost RTP packets = 0 (0.00%) Sequence errors = 0
 Duration 10.55 s (0 ns clock drift, corresponding to 90001 Hz (+0.00%))

Save payload... Save as CSV... Refresh Jump to Graph Player Next non-Ok Close

図 8-19 RTP ヘッダ解析の一例

赤線で示した部分がパケット損失の解析結果で、上記の例では 80,142 個の RTP パケットを受信した際の損失は 0 個であったとわかる。

パケットキャプチャソフトは多機能で様々な解析を汎用 PC で行うことができるが、すべてのパケットを取得する必要があるため、パケットを保存する容量や同時に起動しているソフトウェアの影響などから、パケットの取りこぼしなどが発生しないように注意が必要である。また、キャプチャ時間が長くなればパケットデータが膨大になり、解析結果を得るのに多くの時間が必要になる場合がある。

一方、TS アナライザには RTP パケットをリアルタイムで解析して損失を検出する機能があり、パケットを保存しないため長時間の観測も負担なく行うことができる。ただ、今回の実験で使用した TS アナライザは多機能で信頼性も高いが、筐体が大きく可搬性がよいとは言えない装置である。

今回の実験ではパケットを受信しながら RTP ヘッダを解析する簡易なツールも併せてパケット損失の確認に使用した。使用したツールは Linux 上で動作する簡単なソフトウェアで、RTP のシーケンス番号に不連続が発生した場合に、欠落したシーケンス番号を出力する機能があり、今回の検証で使用した TS アナライザと同じパケット損失を検出できていることを確認している。このようなツールを可

搬性の高いラップトップや小型筐体で動作させることにより、容易にパケット損失をリアルタイムで測定することが可能になる。

8.10.2.3 遅延の測定

遅延値をアクティブで計測する場合、試験パケット内に送信時のタイムスタンプ付与が必要であるのに加えて、送信側装置と受信側装置の時刻同期が必要となる。送信者側で生成したパケットをマルチキャストアドレスにて送信し、受信装置側でパケット毎に付与されている送信時のタイムスタンプと受信者装置側での受信時刻の差分をそのパケットの遅延値として算出する。測定時間内の全てのパケットの平均を遅延値とする。

パッシブ計測でも基本的に送信側と受信側での時刻同期が必要になる。また、受信側から送信側に受信したことを報告するパケットを送る仕組みを利用する場合がある。RTP の規格では RTCP(RTP Control Protocol)による報告パケットで遅延量を確認する手段が規定されているが、マルチキャストでは RTCP を使用することは難しく、IPTV フォーラムの IP 放送仕様でも RTCP は使用しないと規定されている。

報告パケットを使用しない場合、受信側で受け取ったパケットがいつ送信されたのかを確認して、その時刻差分から遅延を算出することが可能であるが、送信側で測定対象のパケットを送出した時刻を記録し、送信側と時刻同期がとれた受信環境で測定対象のパケットを受信した時刻を記録する必要があり、受信側だけで簡易に測定することは困難である。

上述のとおり、厳密な片方向の遅延測定に関しては送信側装置と受信側装置の時刻同期が必要である。一方で GPS による時刻同期などがコスト面から実施困難であるケースも考慮して、ping などのユニキャストによる代替手法も検討が必要である。この場合、RTT(Round Trip Time)での測定となるため、実施結果を 1/2 倍にする。

実際に ping で測定する際には、

- ユニキャストの ICMP パケットのためマルチキャストの RTP パケットと異なる経路、優先キューで伝送される可能性がある
- 伝送区間の混雑状況の影響を受けた場合、測定結果に大幅な変動が含まれる可能性がある
- 伝送区間内に ICMP パケットを中継・応答しない機器が存在する可能性がある
- 上りと下りの伝送時間が異なる場合、単純に応答時間(RTT)の半分が伝送遅延とできない

等の注意が必要となる。

このような方法で遅延の測定は可能ではあるが、絶対的な遅延量については再生する映像品質には影響がなく、参考値としては把握しておいた方がよい情報と考えられる。

8.10.2.4 遅延揺らぎ（ジッタ）の測定

揺らぎも遅延の一種であることから、アクティブ計測、パッシブ計測ともに遅延測定と同等の測定が利用可能である。得られたパケット毎の遅延値をもとに遅延揺らぎの定義にしたがって、遅延揺らぎの値を算出する。この場合も送信側装置と受信側装置の時刻同期は必要である。アクティブ計測の場合は送信側で試験パケット内に送信時刻情報(タイムスタンプ)を付与して、受信側でタイムスタンプとパケット受信時刻の差分から遅延揺らぎを算出する方法となる。一方で遅延測定を時刻同期不要な代替手法で実施する場合を考慮し、遅延揺らぎについても代替手法の検討が必要と考える。例えば、アクティブ計測の場合、送信側装置から等間隔でパケットが送信されている前提のもとで、受信側でキャプチャしたパケット受信時刻の等間隔からの差分を遅延揺らぎとして測定する方法等が考えられる。

パッシブ計測では、RTP ヘッダ内のタイムスタンプと受信時刻の差分から算出可能である。しかしながら、本手法は RFC 3550 に従った RTP の送出に準拠していることが前提であり、送出側で付与するタイムスタンプ値が必ずしも測定に利用できる値とは限らない。

実際のサービスで利用されるストリームでは、各種仕様によって RTP タイムスタンプの付与方法は異なっており、送出時刻が付与されているとは限らないためである。次節では改めて揺らぎを定義するとともに、RTP を前提とした場合の測定方法についての具体的な記述を試みる。

8.10.2.5 遅延揺らぎの測定における揺らぎ値の定義

実験前の机上検討において遅延と揺らぎの定義は、揺らぎの平均量を遅延とし最悪値を揺らぎの値と定義した。また、実験中においては 8.6.2 に記載した値として RFC 3550 の計算式とそこから導き出される値を掲載した。WireShark で表示される Max Jitter もこの値であるが、この揺らぎ量は平均化された値であり、本実験が目的とする STB バッファ量の指標としては相応しいとは言えないことがわかった。本 EG では改めて揺らぎ量を導き出す式として ITU-T 勧告 Y.1541 (07/2016)の付録 II に規定されている IP 遅延変動 (IPDV : IP packet delay

variation) を採用することとして、IP 遅延変動の定義は以下の式で表される。

$$\text{IPDV} = \text{IPTDupper} - \text{IPTDmin}$$

ここで

- IPTDupper は評価期間における IPTD の $1-10^{-3}$ 分位点
- IPTDmin は評価期間における最小 IPTD

また、ITU-T 勧告 Y.1541 では IP 遅延変動について、ある短い測定期間中の最大 IPTD－最小 IPTD で定義してもよく、

$$\text{IPDV} = \text{IPTDmax} - \text{IPTDmin}$$

ここで

- IPTDmax は測定期間中に記録される最大 IPTD
- IPTDmin は測定期間中に記録される最小 IPTD

ここで IP パケット遅延 IPTD は ITU-T 勧告 Y.1540 (07/2016) にある 6.2.4 End-to-end 2-point IP packet delay variation (IPDV: IP packet delay variation) から算出する。この算出方法式は 2 点間の IP パケットの遅延を $V_k = X_k - d_{1,2}$ で求める。図 8-20 に転載した概念のとおり MP1 (送信側) と MP2 (受信側) の 2 点間でパケット 0 を基準点として、パケット 1 がそれぞれ $a_{1,1}$ と $a_{2,1}$ でそれぞれ時間情報を持ち、パケット k までの間どれだけ時間量に差異があるのかを導き出す。

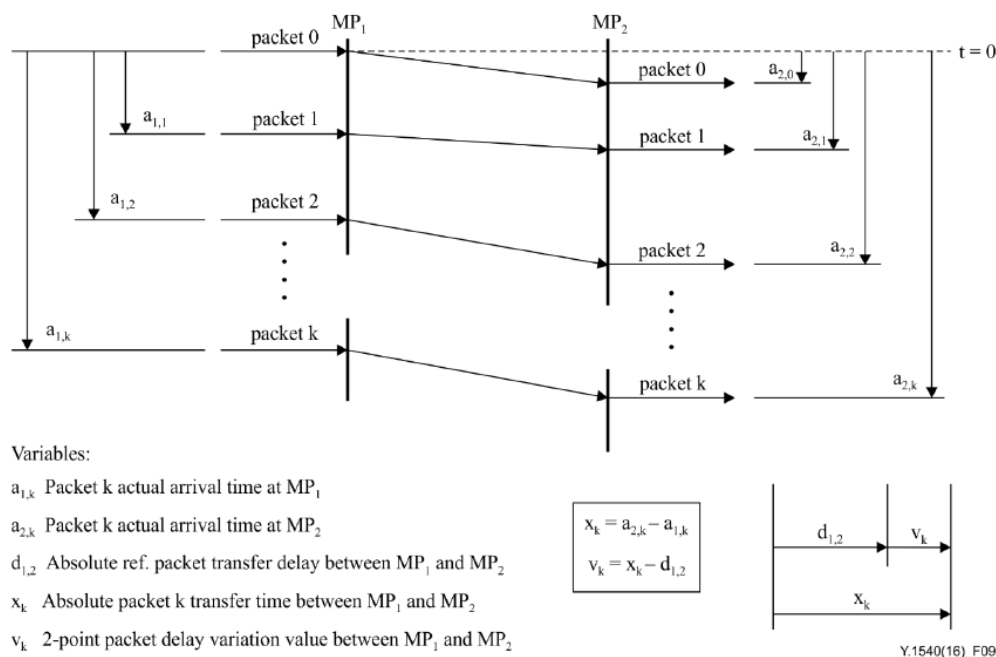


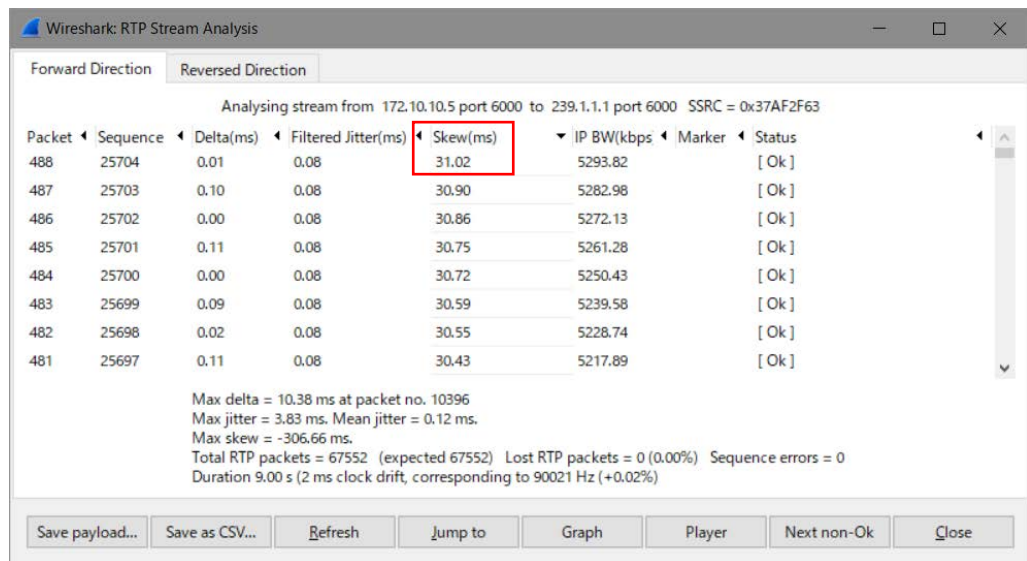
図 8-20 ITU-T Y.1540(16) F09 抜粋

8.10.2.6 遅延揺らぎの具体的測定方法

8.10.2.2 で紹介したパケット損失率を測定するための WireShark には Max Jitter を表示する機能があるが、これは RFC 3550 の計算方法を用いるため平均化されていることは前述のとおりだが、ITU-T 勧告 Y.1540 のパケット遅延変動値 (IPDV) V_k は WireShark の RTP 統計情報内で Skew 値に相当する。実験用テストストリーム 80Mbps を使用し 500msec の遅延量を挿入した場合の Skew の値を例に ITU-T 勧告 Y.1541 の IPDV の値を求めると以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 \text{IPDV} &= \text{IPTD}_{\text{max}} - \text{IPTD}_{\text{min}} \\
 &= \text{PDV}_{\text{max}} - \text{PDV}_{\text{min}} \\
 &= \text{Skew}_{\text{max}} - \text{Skew}_{\text{min}} \\
 &= 31.02 - (-306.66) \\
 &= 337.68
 \end{aligned}$$

この値の様に実験中 337.68msec の振れ幅があったということが判る。なお、IPDV はパケットの 0 番を基準に数値化しているため最小値が負の数になる場合があるが、IPDV はあくまでも遅延揺らぎの量であり最大幅を数値化している。



Wireshark: RTP Stream Analysis

Forward Direction | Reversed Direction

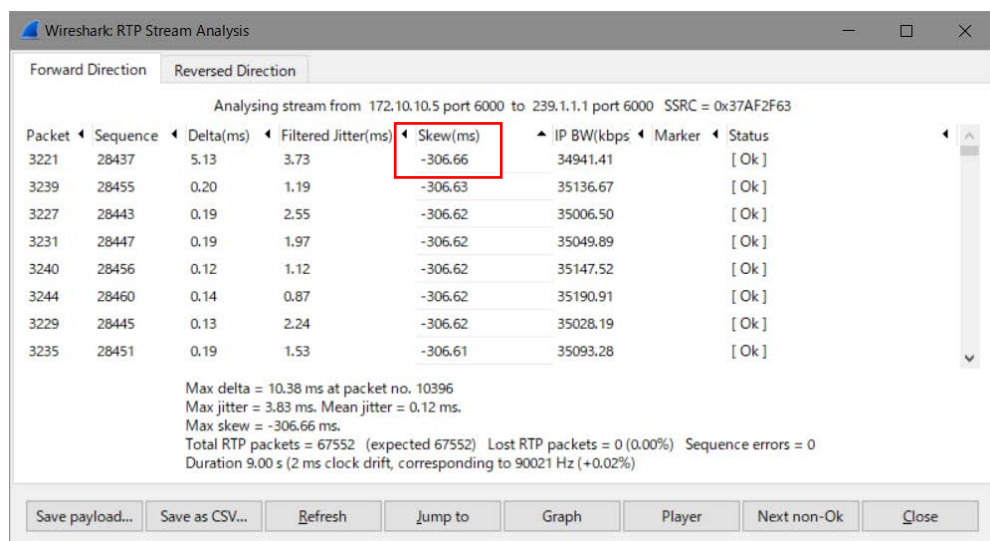
Analysing stream from 172.10.10.5 port 6000 to 239.1.1.1 port 6000 SSRC = 0x37AF2F63

Packet	Sequence	Delta(ms)	Filtered Jitter(ms)	Skew(ms)	IP BW(kbps)	Marker	Status
488	25704	0.01	0.08	31.02	5293.82		[Ok]
487	25703	0.10	0.08	30.90	5282.98		[Ok]
486	25702	0.00	0.08	30.86	5272.13		[Ok]
485	25701	0.11	0.08	30.75	5261.28		[Ok]
484	25700	0.00	0.08	30.72	5250.43		[Ok]
483	25699	0.09	0.08	30.59	5239.58		[Ok]
482	25698	0.02	0.08	30.55	5228.74		[Ok]
481	25697	0.11	0.08	30.43	5217.89		[Ok]

Max delta = 10.38 ms at packet no. 10396
Max jitter = 3.83 ms. Mean jitter = 0.12 ms.
Max skew = -306.66 ms.
Total RTP packets = 67552 (expected 67552) Lost RTP packets = 0 (0.00%) Sequence errors = 0
Duration 9.00 s (2 ms clock drift, corresponding to 90021 Hz (+0.02%))

Save payload... Save as CSV... Refresh Jump to Graph Player Next non-Ok Close

図 8-21 WireShark の Skew を降順にソート



Wireshark: RTP Stream Analysis

Forward Direction | Reversed Direction

Analysing stream from 172.10.10.5 port 6000 to 239.1.1.1 port 6000 SSRC = 0x37AF2F63

Packet	Sequence	Delta(ms)	Filtered Jitter(ms)	Skew(ms)	IP BW(kbps)	Marker	Status
3221	28437	5.13	3.73	-306.66	34941.41		[Ok]
3239	28455	0.20	1.19	-306.63	35136.67		[Ok]
3227	28443	0.19	2.55	-306.62	35006.50		[Ok]
3231	28447	0.19	1.97	-306.62	35049.89		[Ok]
3240	28456	0.12	1.12	-306.62	35147.52		[Ok]
3244	28460	0.14	0.87	-306.62	35190.91		[Ok]
3229	28445	0.13	2.24	-306.62	35028.19		[Ok]
3235	28451	0.19	1.53	-306.61	35093.28		[Ok]

Max delta = 10.38 ms at packet no. 10396
Max jitter = 3.83 ms. Mean jitter = 0.12 ms.
Max skew = -306.66 ms.
Total RTP packets = 67552 (expected 67552) Lost RTP packets = 0 (0.00%) Sequence errors = 0
Duration 9.00 s (2 ms clock drift, corresponding to 90021 Hz (+0.02%))

Save payload... Save as CSV... Refresh Jump to Graph Player Next non-Ok Close

図 8-22 WireShark の Skew を昇順にソート

8.11 宅内環境についての考察

8.11.1 ホームゲートウェイ

ここでは、実験に利用したホームゲートウェイの諸元と、期待される機能について述べる。

テレビや電話を含む FTTH サービスでは、ONU によって OLT を終端する。ONU の出力は Ethernet となっており、国内では一般的には L3 スイッチ（宅内

ルータ)により WAN 側と LAN 側のネットワークを異なるネットワークアドレスとして分断する。電話サービスが提供されている場合は、一般的に L3 スイッチを含むホームゲートウェイが通信事業者から提供（レンタル）される。電話サービスが提供されていない場合は、ONU には個人が購入したブロードバンドルータと呼ばれる機器を導入する。ただし、通信事業者によっては電話サービスの提供有無によらずホームゲートウェイを提供（レンタル）する。

テレビサービスの利用には IP マルチキャスト対応のセットトップボックス (Set Top Box: STB) が必要であり、ホームゲートウェイの LAN 側に接続される。国内では IP マルチキャスト対応の STB は基本的にレンタルである。実験に利用した。ホームゲートウェイは NEC PF 製 Aterm BL900HW であり、主な機能は、ブロードバンドルータ機能、USB ストレージ機能、電話機能、内蔵無線 LAN 親機機能 (IEEE802.11a/b/n) である。また、本機は IPv4 マルチキャスト機能に調整されており、ブロードバンドルータ機能には、IGMP をプロキシする機能が含まれている。ただし、あくまでプロキシ機能であるため、ルータと直接 PIM (Protocol Independent Multicast) プロトコルをやり取りすることはない。また、IGMP スヌーピング機能や優先制御機能が含まれている。なお、無線 LAN 親機機能も有しているが、STB 初期設定時には有線接続を必須としている。言い換えると、初期設定後は無線 LAN 接続によるテレビ視聴も機能の上では可能である。

以上のブロードバンドルータ機能のうち、安定的な映像再生を実現するためには、End-to-End での優先制御が必須である。すなわち、OLT よりも上位のネットワークにより付与された優先制御クラスをホームゲートウェイにおいても尊重し、他のインターネットトラフィックに優先して配信する必要がある。同時に、視聴の継続とチャンネル切り替えを行うためには、子機からラストホップルータ (Last Hop Router) に戻る IGMP パケットについても、優先的に処理必要がある。

マルチキャストのうち、IPv4 に対応する廉価なルータはレンタル品しか存在しない。ただし、最近では海外ベンダから廉価な IPv4 に対応するルータも市場に投入されてきた。一方、IPv6 に対応するブロードバンドルータはテレビ対応ブロードバンドルータとして複数のメーカから市販されている。なお、これまでの検証により、極端に廉価なルータの場合はマルチキャスト処理（パケット複製処理）が CPU 実装となっており、高ビットレートのマルチキャストストリームを安定的に配信できない、もしくは、通常のユニキャスト通信がほとんどできなくなる事象が報告されている。

8.11.2 無線 LAN

無線 LAN でマルチキャストを伝送する場合、無線 LAN ルータのマルチキャスト伝送速度の設定によって、十分な帯域が確保されていない場合がある。また、こ

の帯域以内のマルチキャストストリームでも、電波の状況によってはパケットが損失する場合がある。無線 LAN 機器によっては無線区間のマルチキャストをユニキャストに変換して伝送する機能があり、この機能を利用することによって安定した伝送が可能になる場合もある。今回の実験では以下の図の構成で無線 LAN を用いたマルチキャストストリームの伝送品質の確認を行った。

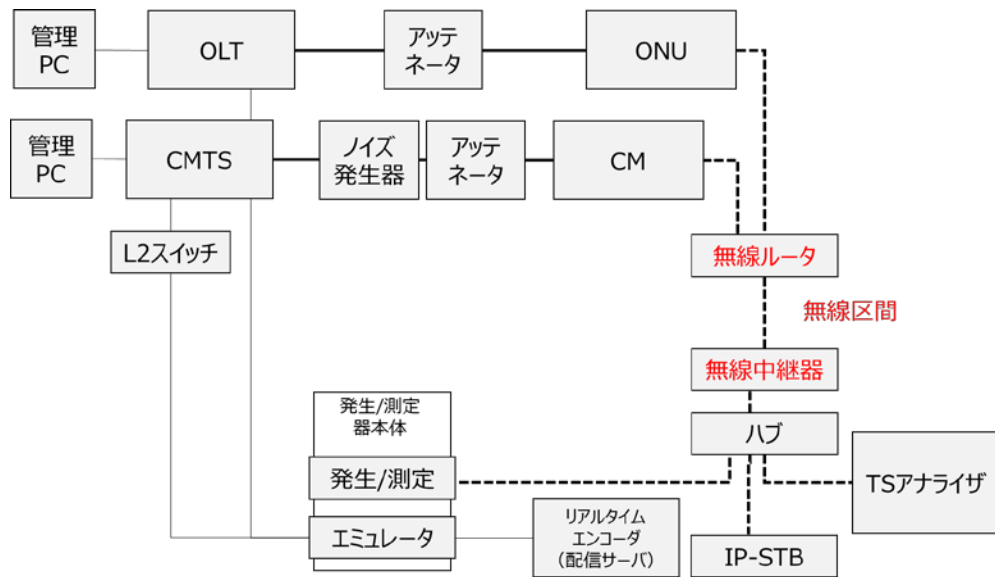


図 8-23 無線 LAN を使用した実験環境

無線 LAN ルータでは ONU/CM から受信したパケットを 802.11a/g/n(5.4GHz)の IPv6 マルチキャストで無線区間を伝送し、1 m程度離れた位置に設置した無線中継器が受信した無線パケットを有線に戻して IP-STB および TS アナライザで確認を行った。

無線 LAN のマルチキャスト伝送速度を 54Mbps に設定して、実際に 30Mbps の映像ストリームを流したところ、パケット損失率は 2.5% 程度で、再生映像は常時乱れた状態であった。本実験では FEC を使用していないが、損失のパターンを確認したところ、多くのパケット損失は FEC により回復可能と想定できたが、連続的に 10 パケット以上損失している部分もあり、すべてのパケット損失を FEC で回復することは難しいと考えられる。

次に無線 LAN のユニキャスト変換について確認した。このユニキャスト変換は無線伝送区間でマルチキャストパケットの MAC アドレスを宛先端末の MAC アドレスに変換してユニキャストとして伝送する機能で、受信端末のアプリケーションは特別な対応を行うことなく通常のマルチキャストとして処理することができる。ユニキャスト変換を有効にして検証を行った結果、30Mbps のストリームを 4 分間流しても、映像に全く乱れはなく、パケット損失も発生しな

かった。ユニキャスト通信ではパケット欠落時の再送が可能であり、電波が不安定な状況においても安定して伝送できたためと考えられる。また、このときのジッタは 0.89msec で揺らぎも小さかったと考えられる。

無線 LAN のユニキャスト変換を利用することによりにより、高ビットレートの IP マルチキャストパケットを安定して伝送できることが確認できた。

9 エキスパートグループからの提言

9.1 IP 放送に関する技術的条件とする値について

9.1.1 IP パケットの損失率

IP パケットの損失率は実験結果が確認された値として **PLR = 1×10^{-7}** 以下とする。ただし、AL-FEC を実施する場合はその FEC の誤り訂正能力を考慮し誤り訂正前の IP パケット損失率による判断も可能とする。例えば誤り訂正能力が 10^3 程度あれば 10^{-4} を基準として測定が可能と考えるものであり、Pro-MPEG FEC COP3 方式の誤り訂正能力については参考として 8.9 節に記載したが本報告書で AL-FEC の方式を定めるものではない。

9.1.2 IP パケットの遅延

伝送路に定量的にあるパケット遅延は MPEG-2 TS 再生へ悪影響を及ぼすものではなく、実験の結果からも遅延に関して適当な値が見当たらず、ここで**遅延量**を定めることはできない。

9.1.3 IP パケットの揺らぎ

パケット遅延の揺らぎは IP-STB のバッファによって吸収し MPEG-2 TS 再生への悪影響を抑制されえるものであるが、バッファサイズ的设计にとっては重要な指標であり、これを定めることが望ましい。よって実験で挿入した値のうち、**100msec の揺らぎ量**を妥当とする。

9.2 IP 放送に関する技術的条件に係る測定方法について

9.2.1 IP パケットの損失率の測定

IP パケットの損失率は RTP パケットの損失数と RTP ストリーム（ペイロードの）ビットレートによる測定時間によって算出できる。具体的な測定方法については 8.10.2.2 節を、ビットレートに対する測定時間の算出方法は 7.4.2 節を参照されたい。

9.2.2 IP パケットの遅延測定

パケット遅延の測定については受信者端子側から配信サーバ側へ PING を送信した戻り値の 2 分の 1 を参考値とすることが可能だが、マルチキャストのネットワークを通過する RTP とは違うため、厳密な意味での遅延量は測定しえない。詳細については 8.10.2.3 節を参照されたい。

9.2.3 IP パケットの揺らぎ測定

パケット遅延の揺らぎについては送信側が RTP のタイムスタンプを等間隔に打刻していることを前提に、8.10.2.6 に示した方法で揺らぎ量を測定することが可能である。また、計測時間についてはパケット損失率の測定データを利用可能だが、個別に測定する場合は数分のキャプチャデータでも揺らぎ量を測定できる。これは、定常的な遅延揺らぎ量を STB のバッファとして吸収することを想定しており、経路切り替えなどで発生するバースト的な揺らぎ量は最終的にパケット損失として検知され则认为られる。仮に伝送経路上揺らぎを発生させる問題があれば数分のキャプチャデータでも検知しえる。なお、遅延の測定を PING で代替えることを許容できる程度であれば、複数回測定した PING 値から IPDV の算出における IPTDmax と IPTDmin を割り当てることも考えられる。

9.2.4 測定点について

物理層実験においては 8.1.3 節及び 8.3.3 節のとおり ONU の受光パワーもしくは CM の CN 比と IP パケット損失率との間に相関関係が見られたため、IP パケット損失率の測定においては代替手段となり得ると考えられる。ただし、測定項目が遅延、揺らぎである場合この限りではない。

10 今後の課題

10.1.1 MMT・TLV に関する課題

本報告書では MPEG-2 TS の TS パケット長を基に IP パケットの計算をしており、一般に MMT や TLV のパケット長とは異なる。また、MMT や TLV を IP 伝送する仕様は平成 30 年 7 月現在策定されておらず、伝送実験を実施できていないため今後の課題とする。

10.1.2 測定に関する課題

本報告書では IP パケットの揺らぎについて RTP パケットのタイムスタンプを利用した測定を参考値としているが、本来であれば RTP パケットの送出側の仕様を踏まえ、どのように測定すべきかを検討する必要がある、本報告書では汎用的かつ安易な測定方法を導き出すには至っていない。揺らぎの測定方法については引き続き民間標準化団体等で検討することが妥当である。

10.1.3 宅内環境についての課題

本報告書内の実験では宅内環境の影響が反映できるようにホームゲートウェイと無線 LAN を使用した。これについては 8.11 節に考察を記載しているが、本実験に使用した機器は限定されており十分ではない。宅内環境で想定される機器の構成と仕様については別途これを民間標準化機関等において検討し、民間規格等を別途定めるべきである。

Appendix

1 参考資料（実験データ）

2 実験手順

2.1 物理層実験

2.1.1 期待される実験結果

- (1) 伝送網に入力される BER と受信機から出力される UDP の BER が相関している
- (2) 伝送路の品質が劣化することで BER が悪化する相関がある

2.1.2 実験手順

FTTH の物理層実験

No.	実施内容	期待する動作
a-1	事前設定 ・ GE-PON で、マルチキャスト (IP 放送)用と通常トラフィック用の LLID を個々に割り当てる。 ・ 当該 LLID に ToS (優先制御) を設定する。 マルチキャスト ToS=5 通常トラフィック ToS=0 ・ 各 LLID に最低保証帯域及び最大保証帯域を設定する。 (1)最低保証帯域マルチキャスト : 100Mbps 通常トラフィック : 0Mbps (2)最大保証帯域 マルチキャスト : 200Mbps 通常トラフィック : 1Gbps ・ OLT~ONU 間の Aggregate Shaper 値を 500Mbps*1 に設	*1 : Aggregate Shaper 値は暫定値

	定する。 ・ 信号発生器のマルチキャストストリームのビットレートを 5.3.1 の表の No.1 の値に、通常トラフィックのビットレートを 5.3.3 の表の値に設定する。 ・ マルチキャストと通常トラフィックを同一 VLAN (tag) に信号発生器を設定する	
a-2	信号発生器と PON のシステムが接続され、測定器からの IGMP JOIN によって UDP のストリームを受信でき、環境構築に問題がないことを確認する。	測定器で UDP ストリームが受信可能になること
a-3	ONU の受光レベルが規格上の最低受光レベル (-25.5dBm) になるように光アッテネータを調整する。	測定器で UDP ストリームが受信可能になること
a-4	マルチキャストのビットレートに対応した 5.3.2 の表の時間、信号発生器でパケットを送出し、測定器で、パケット損失、パケット遅延、揺らぎ、UDP BER を測定する	パケット損失 : 0
a-5	信号発生器でデータの PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)誤り（又は UDP チェックサム誤り）を発生させ、受信側の測定器で誤りを観測する	受信誤りレートが挿入された誤りレートと同一
a-6	光アッテネータにより ONU の受光電力をさらに減衰させ、パケット損失が発生させる。	パケット損失の発生
a-7	このときのパケット損失、パケット遅延、揺らぎ、UDP BER を測定する	

a-8	マルチキャストのビットレートを 5.3.1 の表の No.2～No.4 に設定して、上記同様の実験を実施する	
-----	--	--

HFC の物理層実験

No.	実施内容	期待する動作
b-1	事前設定 ・ CMTS 信号発生器と DOCSIS の設定を使用するケーブルモデム(CM)システムが接続され、測定器からの仕様 (DS8CHxUS2CH) IGMP JOIN に併せて DS(Down Stream) : 8 CH ボンディング、US(Up Stream) : 4CH よって UDP のボンディング 2 CH ボンディング設定とする。 ・ 使用する変調方式は DS : 256QAM、US:16QAM ストリームを受信でき、環境構築に設定する。 ・ CMTS に優先制御を行ううで、マルチキャストグループ(IP 放送)用のレンジを以下のとおり設定する。 12Mbps : 239.1.1.1~239.1.1.255 30Mbps: 239.2.1.1~239.2.1.255 60Mbps: 239.3.1.1.1~239.3.1.255 80Mbps:	・ CM が CMTS で設定したパラメータとコンフグファイルの設定パラメータに従って正しく起動 (w-online) すること受信機から UDP ストリームが出力され、測定器で測定可能になること

	239.4.1.1~239.4.1.255 - 表 5.3.1 に従って、マルチキャストグループレンジ毎に適用する Max-Rate 及び Min-Rate 最大保証帯域を設定する。 (1) ビットレート 80Mbps : Max-Rate:100Mbps/Min-Rate:1Mbps (2) ビットレート 60Mbps : Max-Rate:72Mbps/Min-Rate:1Mbps (3) ビットレート 30Mbps : Max-Rate:36Mbps/Min-Rate:1Mbps (4) ビットレート 12Mbps : Max-Rate:14.4Mbps/Min-Rate:1Mbps - CM コンフィグファイルを DS/US の物理層速度の最大値である DS : 32 Mbps、US : 20 Mbps とし CM を起動させ、CMTS で w-online となる問題がないことを確認する。 - 信号発生器のマルチキャストストリームのビットレートを 5.3.1 の表の No.1 の値に、通常トラフィックのビットレート	
--	---	--

	を 5.3.3 の表の値に設定する。 マルチキャストと通常トラフィックの信号発生器の出力信号を同一の CMTS アップリンクポート (10GE) に入力する。	
b-2	信号発生器と CMTS/CM が接続され、測定器からの IGMP JOIN によって UDP のストリームを受信でき、環境構築に問題がないことを確認する。	測定器でUDPストリームが受信可能になること
b-3	CM の DS(Down Stream)受信レベルが規格上の最低レベル (-15dBm) になるように CMTS の設定又はアッテネータを調整する。	測定器でUDPストリームが受信可能になること
b-4	マルチキャストのビットレートに対応した 5.3.2 の表の時間、信号発生器でパケットを送出し、測定器で、パケット損失、パケット遅延、揺らぎ、UDP BER を測定する	パケット損失 : 0
b-5	信号発生器でデータの PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)誤り (又は UDP チェックサム誤り) を発生させ、受信側の測定器で誤りを観測する	受信誤りレートが挿入された誤りレートと同一
b-6	CMTS 出力レベル設定、アッテネータにより CM の受信電力をさらに低下させ、パケット損失が発生するポイントまで低下させる。	パケット損失の発生
b-7	このときのパケット損失、パケット遅延、揺らぎ、UDP BER を測定する	
b-8	マルチキャストのビットレート	

	を 5.3.1 の表の No.2～No.4 に設定して、上記同様の実験を実施する	
b-9	ノイズ発生器の白色雑音出力レベルを調整し、CM の受信 CN 比を DOCSIS 仕様の伝送路に求められる DS(Down Stream)の C/N 比である 25 dB に設定する。	測定器で UDP ストリームが受信可能になること
b-10	マルチキャストのビットレートに対応した 5.3.2 の表の時間、信号発生器でパケットを送出し、測定器で、パケット損失、パケット遅延、揺らぎ、UDP BER を測定する	パケット損失 : 0
b-11	ノイズ発生器の白色雑音出力レベルを調整し、CM の受信 C/N 値を更に低下させ、パケット損失が発生するポイントまで低下させ、CN 比を測定する。	パケット損失の発生
b-12	このときのパケット損失、パケット遅延、揺らぎ、UDP BER を測定する	
b-13	マルチキャストのビットレートを 5.3.1 の表の No.2～No.4 に設定して、上記同様の実験を実施する	

2.2 IP 層実験手順

2.2.1 期待される実験結果

- (1) IP パケットの品質状況と映像品質に相関がある
- (2) 伝送網の優先制御（もしくは QoS）と映像品質に相関がある

2.2.2 実験手順

FTTH の IP 層実験

No.	実施内容	期待する動作
c1-1	【受信確認】 配信サーバ信号発生器と PON のシステムが接続され、TS アナライザ測定器からの IGMP/MLD JOIN によって RTP/UDP のストリームを受信でき、環境構築に問題がないことを確認する。	TS アナライザ測定器で RTP/UDP ストリームが受信可能になること
c1-2	【視聴確認】 上記実験の TS アナライザの代わりに IP-STB を使用し、IGMP/MLD JOIN によって RTP ストリームを受信して再生できることを確認する。	IP-STB で TS ストリームを再生できること
c2-1	【パケット損失動作確認】 トラフィックエミュレータでフレーム損失を発生させ、TS アナライザでパケット損失として検知できること。また、損失発生を停止すると、パケット損失も検知しなくなることを確認する。	TS アナライザによるパケット損失検知が確認できること 計測区間でのパケット損失の有無が確認できること
c2-2	【パケット損失率】 トラフィックエミュレータで損失率を変化させ、TS アナライザで相応のパケット損失が検知できること。また、IP-STB で再生した映像品質の劣化度	パケット損失率と映像品質への影響が確認できること

	合いを確認する。	
c2-3	【FEC による回復】 上記実験で FEC を送信し、受信側での損失の修復度合いを確認する。	損失率がある程度低くなると FEC によるパケット損失修復が可能となること
c2-4	【PON 区間での損失】 OLT-ONU 間のアッテネータを調整して発生した損失が、トラフィックエミュレータの損失と同等の特性を示すことを確認する。	損失の要因に関わらず、パケット損失を検知した際の映像品質の劣化が同等であること
c2-5	【損失の検出】 RTP のシーケンス番号を確認する簡単なツールにより、TS アナライザと同じパケット損失を検出できることを確認する。	簡単なツールにより、実フィールドで容易に伝送品質(パケット損失)を測定できること
c3-1	【パケット遅延】 リアルタイムエンコーダから送出したストリームにトラフィックエミュレータで遅延量を変化させ、IP-STB での再生遅延を確認する。	適切に遅延を付加できていること
c3-2	【遅延の影響】 上記実験で遅延量を変化させても、TS アナライザでパケット損失が検出されないことを確認する。 また IP-STB での映像品質に劣化がないことを確認する。	IP パケットの遅延がパケット損失と映像品質の劣化に影響がないこと
c3-3	【ジッタ】 リアルタイムエンコーダから送出したストリームにトラフィックエミュレータでジッタ量を変化させ、TS アナライザでジッタ量を確認する。	適切にジッタを付加できていること

c3-4	【ジッタの影響】 最大のジッタ量を吸収できる受信バッファを有する IP-STB で再生した場合に、映像品質に影響がないことを確認する。	IP-STB のジッタ吸収機能が正しく動作していること ※バッファ量を把握できる IP-STB が実験に必要
c3-5	【ジッタの影響】 最大のジッタ量を吸収できない受信バッファを有する IP-STB で再生した場合に、映像品質に影響がでることを確認する。	IP-STB でジッタを吸収できない場合の動作と映像品質が確認できること ※バッファ量を把握・設定できる IP-STB が実験に必要
c3-6	【バッファ量】 IP-STB のバッファ量を変化させた場合の再生開始から表示されるまでの時間を確認する。	IP-STB のバッファリングによる表示開始まで時間が確認できること ※バッファ量を設定できる IP-STB が実験に必要
c4-1	【宅内ルータ】 IPTV に対応した複数の宅内ルータを比較し、ビットレートや揺らぎを変化させた場合の伝送品質を確認する。	宅内ルータの伝送品質を把握し、伝送区間以外での品質劣化を考慮したサービス提供、端末設計に活用する
c4-2	【Wi-Fi 伝送品質】 Wi-Fi 区間でのユニキャスト変換の有無を設定し、TS アナライザで伝送品質の差異を確認する。 また、IP-STB による再生品質の差異を確認する	IP マルチキャストを Wi-Fi 経由で受信する場合の品質を確認し、ユニキャスト変換機能で大幅に伝送品質が改善すること

HFC の IP 層実験

No.	実施内容	期待する動作
d1-1	【受信確認】 配信サーバ信号発生器と CMTS DOCSIS のシステムが接続され、CM に接続された TS	TS アナライザで RTP 受信機から UDP ストリームが受信出力され、測定器で測定可能になること

	アナライザ測定器からの IGMP/MLD JOIN によって RTPUDP のストリームを受信でき、環境構築に問題がないことを確認する。	
d1-2	【視聴確認】 上記実験の TS アナライザの代わりに IP-STB を使用し、IGMP/MLD JOIN によって RTP ストリームを受信して再生できることを確認する。	IP-STB で TS ストリームを再生できること
d2-1	【パケット損失動作確認】 トラフィックエミュレータでフレーム損失を発生させ、TS アナライザでパケット損失として検知できること。また、損失発生を停止すると、パケット損失も検知しなくなることを確認する。	TS アナライザによるパケット損失検知が確認できること 計測区間でのパケット損失の有無が確認できること
d2-2	【パケット損失率】 トラフィックエミュレータで損失率を変化させ、TS アナライザで相応のパケット損失が検知できること。また、IP-STB で再生した映像品質の劣化度合いを確認する。	パケット損失率と映像品質への影響が確認できること
d2-3	【FEC による回復】 上記実験で FEC を送信し、受信側での損失の修復度合いを確認する。	損失率がある程度低くなると FEC によるパケット損失修復が可能となること
d2-4	【DOCSIS 区間での損失 1】 b-6 で設定した CM の受信レベルで発生したパケット損失が、トラフィックエミュレータの損失と同等の特性を示すことを確認する。	損失の要因に関わらず、パケット損失を検知した際の映像品質の劣化が同等であること

d2-5	【損失の検出】 RTP のシーケンス番号を確認する簡単なツールにより、TS アナライザと同じパケット損失を検出できることを確認する。	簡単なツールにより、実フィールドで容易に伝送品質(パケット損失)を測定できること
d2-6	【DOCSIS 区間での損失 2】 b-11 で設定した CM の受信点における CN 比で発生したパケット損失が、トラフィックエミュレータの損失と同等の特性を示すことを確認する。	損失の要因に関わらず、パケット損失を検知した際の映像品質の劣化が同等であること
d2-7	【損失の検出】 RTP のシーケンス番号を確認する簡単なツールにより、TS アナライザと同じパケット損失を検出できることを確認する。	簡単なツールにより、実フィールドで容易に伝送品質(パケット損失)を測定できること
d3-1	【パケット遅延】 リアルタイムエンコーダから送出したストリームにトラフィックエミュレータで遅延量を変化させ、IP-STB での再生遅延を確認する。	適切に遅延を付加できていること
d3-2	【遅延の影響】 上記実験で遅延量を変化させても、TS アナライザでパケット損失が検出されないことを確認する。 また IP-STB での映像品質に劣化がないことを確認する。	IP パケットの遅延がパケット損失と映像品質の劣化に影響がないこと
d3-3	【ジッタ】 リアルタイムエンコーダから送出したストリームにトラフィックエミュレータでジッタ量を変化させ、TS アナライザ	適切にジッタを付加できていること

	でジッタ量を確認する。	
d3-4	【ジッタの影響】 最大のジッタ量を吸収できる受信バッファを有する IP-STB で再生した場合に、映像品質に影響がないことを確認する。	IP-STB のジッタ吸収機能が正しく動作していること ※バッファ量を把握できる IP-STB が実験に必要
d3-5	【ジッタの影響】 最大のジッタ量を吸収できない受信バッファを有する IP-STB で再生した場合に、映像品質に影響がでることを確認する。	IP-STB でジッタを吸収できない場合の動作と映像品質が確認できること ※バッファ量を把握・設定できる IP-STB が実験に必要
d3-6	【バッファ量】 IP-STB のバッファ量を変化させた場合の再生開始から表示されるまでの時間を確認する。	IP-STB のバッファリングによる表示開始まで時間が確認できること ※バッファ量を設定できる IP-STB が実験に必要
d3-7	【宅内ルータ】 IPTV に対応した複数の宅内ルータを比較し、ビットレートや揺らぎを変化させた場合の伝送品質を確認する。	宅内ルータの伝送品質を把握し、伝送区間以外での品質劣化を考慮したサービス提供、端末設計に活用する
d3-8	【Wi-Fi 伝送品質】 Wi-Fi 区間でのユニキャスト変換の有無を設定し、TS アナライザで伝送品質の差異を確認する。 また、IP-STB による再生品質の差異を確認する	IP マルチキャストを Wi-Fi 経由で受信する場合の品質を確認し、ユニキャスト変換機能で大幅に伝送品質が改善すること

3 実験結果データ

FTTH での物理層実験結果データ (80Mbps)

dB	受信パケット	ロスト	総パケット数	ロス率
32.50	1,018,561	206,685	1,225,246	1.7E-01
32.00	1,243,859	29,988	1,273,847	2.4E-02
31.50	1,272,727	1,946	1,274,673	1.5E-03
31.00	1,271,226	162	1,271,388	1.3E-04
30.70	1,280,501	6	1,280,507	4.7E-06
30.50	2,158,886	5	2,158,891	2.3E-06
30.30	2,158,073	1	2,158,074	4.6E-07
30.00	14,002,192	0	14,002,192	0.0E+00
25.50	1,285,671	0	1,285,671	0.0E+00

FTTH での物理層実験結果データ (12Mbps)

dB	受信パケット	ロスト	総パケット数	ロス率
32.50	157,606	28,516	186,122	1.5E-01
32.00	184,943	5,730	190,673	3.0E-02
31.50	193,193	291	193,484	1.5E-03
31.00	192,044	21	192,065	1.1E-04
30.70	192,025	1	192,026	5.2E-06
30.50	193,444	0	193,444	0.0E+00
25.50	192,506	0	192,506	0.0E+00

HFC での物理層実験結果データ (80Mbps) レベル +6dB

dB	受信パケット	ロスト	総パケット数	ロス率
35.00	1,286,271	0	1,286,271	0.0E+00
33.00	1,286,271	0	1,286,271	0.0E+00
28.70	13,011,071	1	13,011,072	7.7E-08
28.60	9,833,000	2	9,833,002	2.0E-07
28.50	5,381,163	5	5,381,168	9.3E-07
28.40	2,578,029	3	2,578,032	1.2E-06
28.30	1,283,020	7	1,283,027	5.5E-06
28.20	1,389,295	3	1,389,298	2.2E-06

28.10	1,283,917	3	1,283,920	2.3E-06
28.00	1,288,765	131	1,288,896	1.0E-04
27.90	1,279,098	277	1,279,375	2.2E-04
27.50	1,339,943	1728	1,341,671	1.3E-03
27.00	1,189,853	89044	1,278,897	7.0E-02

HFC での物理層実験結果データ (12Mbps) レベル +6dB

dB	受信パケット	ロスト	総パケット数	ロス率
28.60	820993	0	820,993	0.0E+00
28.30	827935	3	827,938	3.6E-06
28.00	159,993	1	159,994	6.3E-06
27.80	164,488	1	164,489	6.1E-06
27.70	160,803	7	160,810	4.4E-05
27.60	162071	57	162,128	3.5E-04
27.30	159,600	873	160,473	5.4E-03
27.00	158,959	7,436	166,395	4.5E-02

パケット損失 IP 層実験結果データ (80Mbps) 10⁻¹

EventID	State	Time	Packet	Message
37121	4096	2018/06/21 11:11:36.479 JST	14749775	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTag:0x0 TS Continuity Count エラー end
12594	12288	2018/06/21 11:11:34.618 JST	14650772	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
12594	12288	2018/06/21 11:11:34.387 JST	14638487	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
12594	12288	2018/06/21 11:11:34.274 JST	14632523	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
12594	12288	2018/06/21 11:11:34.160 JST	14626433	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]

パケット損失 IP 層実験結果データ (80Mbps) 10⁻²

EventID	State	Time	Packet	Message
37121	4096	2018/06/21 11:03:14.567 JST	37625051	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー end
12594	12288	2018/06/21 11:03:12.281 JST	37503462	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	12288	2018/06/21 11:03:12.099 JST	37493741	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー start
37121	4096	2018/06/21 11:03:11.321 JST	37452380	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー end
12594	12288	2018/06/21 11:03:10.987 JST	37434631	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]

パケット損失 IP 層実験結果データ (80Mbps) 10⁻³

EventID	State	Time	Packet	Message
37121	4096	2018/06/21 11:17:32.135 JST	14900765	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー end
37121	12288	2018/06/21 11:17:31.320 JST	14857432	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー start
12594	12288	2018/06/21 11:17:31.003 JST	14840542	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	4096	2018/06/21 11:17:24.821 JST	14511725	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー end
37121	12288	2018/06/21 11:17:23.793 JST	14457076	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー start

パケット損失 IP 層実験結果データ (80Mbps) 10^{-4}

EventID	State	Time	Packet	Message
37121	4096	2018/06/22 16:29:35.696 JST	21783972	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTAg:0x0 TS Continuity Count エラー end
12594	12288	2018/06/22 16:29:35.305 JST	21763197	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
12594	12288	2018/06/22 16:29:33.951 JST	21691174	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	12288	2018/06/22 16:29:33.224 JST	21652517	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTAg:0x0 TS Continuity Count エラー start
12594	12288	2018/06/22 16:29:32.669 JST	21622973	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	4096	2018/06/22 16:29:32.410 JST	21609237	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTAg:0x0 TS Continuity Count エラー end
12594	12288	2018/06/22 16:29:31.121 JST	21540674	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	12288	2018/06/22 16:29:29.973 JST	21479605	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTAg:0x0 TS Continuity Count エラー start

パケット損失 IP 層実験結果データ (80Mbps) 10^{-5}

EventID	State	Time	Packet	Message
37121	4096	2018/06/22 16:36:12.771 JST	42904876	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTAg:0x0 TS Continuity Count エラー end
37121	12288	2018/06/22 16:36:11.972 JST	42862380	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTAg:0x0 TS Continuity Count エラー start

12594	12288	2018/06/22 16:36:10.570 JST	42787774	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	4096	2018/06/22 16:35:59.762 JST	42212896	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー end
37121	12288	2018/06/22 16:35:58.977 JST	42171129	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー start
12594	12288	2018/06/22 16:35:58.067 JST	42122753	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	4096	2018/06/22 16:35:50.817 JST	41737114	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー end
37121	12288	2018/06/22 16:35:49.990 JST	41693102	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー start

パケット損失 IP 層実験結果データ (80Mbps) 10⁻⁶

EventID	State	Time	Packet	Message
37121	4096	2018/06/22 16:42:06.757 JST	61733947	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー end
12594	12288	2018/06/22 16:42:04.708 JST	61624991	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]
37121	12288	2018/06/22 16:38:41.236 JST	50801964	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSID:0x0 TS Continuity Count エラー start
12594	12288	2018/06/22 16:38:40.327 JST	50753578	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー) : pid 512 [0x200]

パケット損失 IP 層実験結果データ (80Mbps) 10^{-7}

EventID	State	Time	Packet	Message
37121	4096	2018/06/29 15:09:48.392 JST	6.07E+08	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSeg:0x0 TS Continuity Count エラー end
37121	12288	2018/06/29 15:09:47.546 JST	6.07E+08	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSeg:0x0 TS Continuity Count エラー start
12594	12288	2018/06/29 15:09:47.154 JST	6.07E+08	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー): pid 4112 [0x1010]
12594	12288	2018/06/29 15:09:47.149 JST	6.07E+08	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー): pid 512 [0x200]
12356	12288	2018/06/29 15:09:37.744 JST	6.07E+08	PCR 周波数オフセットエラー: pid 512 [0x200](オフセット: -811Hz) start
37121	4096	2018/06/29 15:08:55.353 JST	6.04E+08	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSeg:0x0 TS Continuity Count エラー end
37121	12288	2018/06/29 15:08:54.543 JST	6.04E+08	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLSeg:0x0 TS Continuity Count エラー start
12594	12288	2018/06/29 15:08:53.596 JST	6.04E+08	TR 101 290 エラー1.4 (Continuity_Count エラー): pid 512 [0x200]

遅延挿入 IP 層実験結果データ (100msec)

EventID	State	Time	Packet	Message
12357	8192	2018/06/27 18:44:51.738 JST	36163800	PCR 周波数ドリフトエラー: pid 512 [0x200](ドリフト: 1771146mHz/s) end, duration 108866ms
12357	12288	2018/06/27 18:43:02.872 JST	30372980	PCR 周波数ドリフトエラー: pid 512 [0x200](ドリフト: 16631mHz/s) start
12357	8192	2018/06/27 18:43:02.589 JST	30358084	PCR 周波数ドリフトエラー: pid 512 [0x200](ドリフト: -9268224mHz/s) end, duration 67809ms
12357	12288	2018/06/27 18:41:54.779 JST	26751390	PCR 周波数ドリフトエラー: pid 512 [0x200](ドリフト: -9268224mHz/s) start
12356	12288	2018/06/27 18:41:53.944 JST	26706702	PCR 周波数オフセットエラー: pid 512 [0x200](オフセット: - 1114841Hz) start
12355	8192	2018/06/27 18:41:43.164 JST	26133206	PCR オーバーオールジッタ エラ ー: pid 512 [0x200](ジッタ: - 40679us) end, duration 29ms
12355	12288	2018/06/27 18:41:43.135 JST	26131344	PCR オーバーオールジッタ エラ ー: pid 512 [0x200](ジッタ: - 40679us) start
12355	8192	2018/06/27 18:41:42.952 JST	26122034	PCR オーバーオールジッタ エラ ー: pid 512 [0x200](ジッタ: - 43334us) end, duration 25ms
12355	12288	2018/06/27 18:41:42.927 JST	26120172	PCR オーバーオールジッタ エラ ー: pid 512 [0x200](ジッタ: - 43334us) start
12355	8192	2018/06/27 18:41:42.737 JST	26110862	PCR オーバーオールジッタ エラ ー: pid 512 [0x200](ジッタ: - 40705us) end, duration 24ms
12355	12288	2018/06/27 18:41:42.713 JST	26109000	PCR オーバーオールジッタ エラ ー: pid 512 [0x200](ジッタ: - 40705us) start

遅延挿入 IP 層実験結果データ (150msec)

EventID	State	Time	Packet	Message
12355	8192	2018/06/27 18:36:01.388 JST	8470676	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -44419us) end, duration 24ms
12355	12288	2018/06/27 18:36:01.363 JST	8468814	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -44419us) start
12355	8192	2018/06/27 18:36:01.323 JST	8466952	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -45379us) end, duration 30ms
12355	12288	2018/06/27 18:36:01.294 JST	8465090	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -45379us) start
12355	8192	2018/06/27 18:36:01.067 JST	8453918	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -45936us) end, duration 125ms
12355	12288	2018/06/27 18:36:00.942 JST	8446470	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -44587us) start
12355	8192	2018/06/27 18:36:00.723 JST	8435298	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -47381us) end, duration 98ms
12355	12288	2018/06/27 18:36:00.625 JST	8429712	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -43821us) start
12355	8192	2018/06/27 18:36:00.402 JST	8418540	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -46388us) end, duration 128ms
12355	12288	2018/06/27 18:36:00.274 JST	8411092	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -44378us) start
12355	8192	2018/06/27 18:36:00.226 JST	8409230	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -41356us) end, duration 25ms
12355	12288	2018/06/27 18:36:00.201 JST	8407368	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -41356us) start
12355	8192	2018/06/27 18:36:00.084 JST	8401782	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -48657us) end, duration 124ms

遅延挿入 IP 層実験結果データ (200msec)

EventID	State	Time	Packet	Message
12357	12288	2018/06/27 18:29:33.639 JST	1.45E+08	PCR 周波数ドリフトエラー: pid 512 [0x200](ドリフト: 33740mHz/s) start
12357	8192	2018/06/27 18:29:33.615 JST	1.45E+08	PCR 周波数ドリフトエラー: pid 512 [0x200](ドリフト: -115120264mHz/s) end, duration 768490ms
12355	8192	2018/06/27 18:28:58.433 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -41278us) end, duration 28ms
12355	12288	2018/06/27 18:28:58.405 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -41278us) start
12355	8192	2018/06/27 18:28:58.086 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -44341us) end, duration 30ms
12355	12288	2018/06/27 18:28:58.056 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -44341us) start
12355	8192	2018/06/27 18:28:58.016 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -42535us) end, duration 68ms
12355	12288	2018/06/27 18:28:57.948 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -42535us) start
12355	8192	2018/06/27 18:28:57.904 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -41985us) end, duration 28ms
12355	12288	2018/06/27 18:28:57.876 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -41985us) start
12355	8192	2018/06/27 18:28:57.658 JST	1.43E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -48736us) end, duration 57ms

遅延挿入 IP 層実験結果データ (300msec)

EventID	State	Time	Packet	Message
12355	8192	2018/06/27 18:25:24.505 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 40962us) end, duration 36ms
12355	12288	2018/06/27 18:25:24.469 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 40962us) start
12355	8192	2018/06/27 18:25:23.882 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 42224us) end, duration 76ms
12355	12288	2018/06/27 18:25:23.806 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 40580us) start
12355	8192	2018/06/27 18:25:23.215 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 43919us) end, duration 43ms
12355	12288	2018/06/27 18:25:23.172 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 43919us) start
12355	8192	2018/06/27 18:25:22.546 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 42380us) end, duration 70ms
12355	12288	2018/06/27 18:25:22.476 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 40481us) start
12355	8192	2018/06/27 18:25:21.882 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 42790us) end, duration 40ms
12355	12288	2018/06/27 18:25:21.842 JST	1.32E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 42790us) start
12355	8192	2018/06/27 18:25:02.002 JST	1.31E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 40921us) end, duration 70ms
12355	12288	2018/06/27 18:25:01.932 JST	1.31E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 40309us) start
12355	8192	2018/06/27 18:25:01.338 JST	1.31E+08	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: 40629us) end, duration 36ms

遅延挿入 IP 層実験結果データ (500msec)

EventID	State	Time	Packet	Message
12355	12288	2018/06/27 17:47:37.995 JST	13296984	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -42610us) start
14420	12288	2018/06/27 17:47:37.500 JST	N/A	IF IP pkt interarrival time リミット エラ ー 10135463 (threshold 10000000) start
36871	12288	2018/06/27 17:47:37.444 JST	13271094	セッション 172.10.10.5 から 239.1.1.1:6000 VLTAg:0x0 IP PIT オー バーリミット (10135us) start
12355	8192	2018/06/27 17:47:36.974 JST	13242986	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -46615us) end, duration 103ms
12355	12288	2018/06/27 17:47:36.871 JST	13237400	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -40512us) start
14420	8192	2018/06/27 17:47:36.000 JST	N/A	IF IP pkt interarrival time リミット エラ ー 5227472 (threshold 10000000) end, duration 500ms
12355	8192	2018/06/27 17:47:35.854 JST	13183402	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -49428us) end, duration 102ms
12355	12288	2018/06/27 17:47:35.752 JST	13177816	PCR オーバーオールジッタ エラー: pid 512 [0x200](ジッタ: -43323us) start
12640	8192	2018/06/27 17:47:35.671 JST	13173757	TR 101 290 エラー 1.5.a (PMT 周期 エラー2): PMT 周期が設定値を超え た プログラム program 1 [0x1] pid 256 [0x100] end, duration 133ms
12640	12288	2018/06/27 17:47:35.668 JST	N/A	TR 101 290 エラー 1.5.a (PMT 周期 エラー2): PMT 周期が設定値を超え た プログラム program 1 [0x1] pid 256 [0x100] start