高速学術IPネットワークによるSHVの国際伝送

(正会員) 藤井 竜也^{†1}, 小河原成哲^{†1}, 下村 道夫^{†2}, 魚瀬 尚郎^{†2}, 増田 暁生^{†3}

スーパーハイビジョンのような次世代の大容量映像メディアを、安定かつ経済的に伝送するための高信頼IP伝送システムを開発し伝送実験に成功した。日米欧の各国の学術ネットワークと共同して、共用網の多段接続によるロンドンから東京までの高信頼IP伝送系を構築し、SHV映像の安定した中継伝送を実現した。

キーワード：LDGM-FEC, Super Hi-Vision, Shared Network, IP streaming, 誤り訂正

1. ま え が き

映像メディアは、HDTVの本格的な普及を迎えてさらに高解像度なものと移行しようとしている。HDTVの約4倍角の画素数を有し、デジタルシネマに由来する4K映像についてもすでに映画館での普及が進み、現在は液晶モニタやプロジェクタ、ビデオカメラでコンシューマ向け4K機器が商用化されるまでになってきた。研究開発レベルでは、さらにその4倍（HDTVに対して縦横共に2倍）の解像度を持つスーパーハイビジョン（Super Hi-Vision：SHV）映像¹⁾が実用化に向けて研究されており、入出力デバイスや映像編集装置、映像符号化装置等が開発されてきた²⁾。筆者らは、このSHV映像を用いたスポーツイベントのパブリックビューイング（PV）のイベント実施に際して、このSHV映像をIPネットワークで安定的に伝送するシステムを開発して伝送実験を行った。日米欧の各国の学術ネットワークを利用して、他のユーザとネットワーク資源を共用しながら、360MbpsのIPストリームを長期間にわたって安定伝送することに成功したのでその内容を報告する。

2. SHV映像の国際伝送に向けたNWの構築

SHV伝送に際して高効率なH.264ベースの圧縮技術を用いてもIPで300Mbps以上の帯域が必要になる。帯域確保された専用線を用いれば問題はないが、PV（Public View）イベントのように短期的にネットワークを利用したい場合、長期契約が前提となる専用線は利用が難しい。イベント内容に応じて世界中の何処とでも接続ができるネットワーク環境を手に入

れようとするには、他のユーザと帯域を共用する共用網を使う方法が有望となる。本実験では各国の学術ネットワークを利用し、これらを多段にマルチドメイン接続することで、ロンドン・東京間でSHV伝送に必要なIP接続を完成させた。

2.1 ベストエフォート網による国際間IP接続の構築

学術ネットワークを利用して構築した最初のIP接続は、英国内をJANET³⁾、欧州域内と大西洋横断のためにGÉANT⁴⁾、米国内のInternet2⁵⁾、太平洋を超える部分にNTTの実験網であるGEMnet2⁶⁾をそれぞれ利用したものである。米国における欧州側、日本側の接続拠点はそれぞれ、ワシントンD.C.とシアトルである（図1）。このIP接続によりSHV映像の共用網による最初の伝送実験を開始した。次に、Internet2/GEMnet2国際区間の代わりにSINET4⁷⁾を利用して、米国内と太平洋の横断を行うネットワークパスを構築し、その特性の比較を行った。このIP接続は、全米のユーザが利用しているInternet2をバイパスすることができる。

2.2 高品質仮想ネットワークの利用

上述した二つのネットワーク接続は、ベストエフォート網であり、たとえ多数の10GbEをベースとして構築されたネットワークであるとしても、相当数のユーザが利用しているために、後述する誤り訂正技術を併用しても完全な伝送を保障することは難しい。この問題を解決するため、一部の学術ネットワークで最近に提供が始まったDynamic Circuit Network（DCN）と呼ばれるオンデマンド回線提供サービスを用いて、より高信頼なIP接続を用意し利用することにした。DCNでは、共通プロトコルを用いて自動的に帯域が確保された仮想回線を設定して、そのリソースを占有することができる。NTTが開発したユーザIFシステム⁸⁾によりInternet2が提供するDCNであるIoNサービス、および、GÉANTが提供するBoDサービスに対して同時に回線設定を行い、これらを広域な仮想ネットワークとして活用した。この接続により、米国内と大西洋経由ロンドン上陸点までの経路で500Mbpsの帯域を占有可能となった（図2）。

^{†1} NTT未来ネットワーク研究所

^{†2} NTTサービスエボリューション研究所

^{†3} NTTネットワークサービスシステム研究所

"IP Transmission of Super Hi-Vision Video Using Global Research and Education Networks" by Tatsuya Fujii, Masanori Ogawara (NTT Network Innovation Laboratories, Where?), Michio Shimomura, Hisao Uose (NTT Service Evolution Laboratories, Where?) and Akeo Masuda (NTT Network Service Systems Laboratories, Where?)

図1 国際学術網を使ったSHV伝送ネットワーク

図2 DCNIによる帯域確保型ネットワーク接続

3. セキュア終端システム

最も問題となるのは、ネットワークの輻輳により生じるIPパケットの損失である。さらに、ルータの多段接続によって生じるIPパケット到達間隔のジッタを抑制することも、トランスポートストリーム中のPCRジッタを抑圧して映像コーデックを安定動作させるために重要である。また、共用網を利用するために、コンテンツのセキュリティも保護する必要がある。そこで、この3要素を保証するシステムをネットワークの終端装置として開発した。

3.1 IPパケット消失訂正機能：LDGM-FEC

一般的にストリーミング伝送で用いられる2次元パリティ方式のPro-MPEG FECでは、ブロック長が100パケット程度と小さいため、学術ネットワークで見られる1,000パケットを超える長いバースト長のIPパケットロスに対しては無力である。そこで、ブロック長を大きく取ることが可能で、かつ計算量が少ないLDGM (Low Density Generator

Matrix) -FEC (Forward Error Correction)^{9) 10)}を用いた。図3の1ビットに対応するのが一つのIPパケットで、たとえブロック長を数千～数万に設定しても、疎行列による部分的なパリティ計算を行うことで全体の計算量を抑制することができる。また、IP伝送では、パケットの誤り検出は不要で、誤り訂正に機能特化することで計算量を少なく抑えることができるため、ソフトウェア処理でも1Gbps以上の処理速度を出すことが可能である。

3.2 IPパケット到達間隔制御機能

マルチドメイン接続環境では、ルータの多段接続による遅延、あるいは輻輳によってパケットロスまで至らなくても生じる遅延によって、IPパケット到着間隔のジッタが増大して、IPからトランスポートストリーム (TS) に変換する際にPCRジッタが過大となる危険が高い。この問題を解消するために、受信側のセキュア終端システムでは、受信したIPパケットから消失訂正を行った後、ストリーム流量に応じて一定間隔でパケットを再送信し、IP接続した2台

図3 LDGM-FECによるIPパケット単位の消失訂正処理

図4 セキュアIP終端装置によるNW伝送の高信頼化

のIP/TS変換装置 (NTTエレクトロニクス社製NA5000) に与え、安定したTS再生を可能にした。また、SHVコーデックでは、二つのTSを並行伝送するので、この二つのTS間の伝送遅延がフレーム周期の半分である8ms以内に収まるためのタイミング調整の制御も同時に行っている。

3.3 暗号化セキュリティ

共用網で高精細高付加価値なコンテンツを伝送する場合、暗号化によるセキュリティを担保することは、コンテンツ提供者の最小限の要求条件になる。本システムは、AES128による暗号化用、CPUのAESアクセラレーション機能を利用して、SHV伝送に必要なスループットを実現している。

3.4 システム実装

上述の3機能は、二つのIP接続端を持つPCシステム上で稼働するソフトウェアで実現している。図4のように、TSからIPに変換されたRTP/IPストリームを受信して、FECのパリティ計算とペイロード暗号化を行った後にネットワークに送信する。受信側では消失したパケットを補完後、暗号を復号しIP発出間隔を調整しながらIP/TS変換器へ再

図5 受信側セキュアIP終端装置 (右) とIP/TS変換装置 (左)

びIPパケットを送出する。これらの機能をi7-2600 (3.4GHz clock, 4core) をCPUとする汎用のLINUX-PCサーバ上のソフトウェアとして実装し、所望の360Mbpsのストリーミングを可能にした (図5)。

図6 学術網によるSHV伝送実験の全体ネットワーク構成

4. SHV映像伝送実験

2012年7月から8月にかけて、学術ネットワークとセキュア終端装置を用いてSHV映像を対象とした伝送実験を行った。本実験は、SHV映像によるPVの実施を目的として、SHVコンテンツをロンドンから東京に伝送する国際伝送系と、東京からPV3会場にIPマルチキャストを行う国内配信系のIP接続から構成されている。国内系は商用の帯域確保型ネットワークとその上でのIPマルチキャストを用いた。

4.1 国際伝送実験システムとネットワークの構成

本実験のネットワーク構成を図6に示す。国際伝送系は、上述の3系統のIP接続を用いて並行伝送を行いバックアップとした。また、各学術ネットワークで障害があった場合の切り分けのために、ロンドン、米国の東西海岸の上陸点、東京の要所にPRESTA¹¹⁾と呼ぶ10GbEのリアルタイムパケットキャプチャ測定装置を配置して分析に備えた。ライブ中継の際は、図6の受信側のTSレコーダをスキップして、TSレベルで国内・国際系を直結した。また、英国内の3拠点と米国へのSHV伝送は、BBC/JANETが主導した別種のSHV伝送実験に属するものである。これらの伝送も同時に行われたため、JANETの負荷は平常時よりも高くなっている。

4.2 伝送実験結果

今回の伝送実験は片方向の伝送であり、低遅延性をさほど考慮する必要がないため、バーストパケット損失耐性を高めるために、FECの処理ブロック長を約5秒分のストリームに相当する150,000パケット、冗長度を20%と設定した。したがって、TSで280Mbpsの映像ストリームが360MbpsのIPストリームとなっている。この設定では25,000パケット程度、つまり、約0.8秒のバーストロスに対してほぼ失敗なく補償できる。表1は、今回用いた3種類のIP接続に長時間のSHVストリームを流した時のパケットロスの発生頻度を示している。PVに利用したコンテンツの伝送時間は延べ15時間程度であるが、空き時間も利用してSHVストリームを連続伝送し、長時間のネットワーク特性を測定した。米国内ユーザの負荷の大きいInternet2経由のベストエフォート網が最も状態が悪く、SINET4利用が次、DCNを利用することで、損失の確率は大きく低減している。しかしこの場合でもJANET区間はベストエフォート網なのでエラーフリーとはならない。実験期間中、FECで補償できなかったバーストロス、各IP接続で合計10回あった。ただし、これらの大きなバーストロスのうち、JANET内のネットワーク機器の偶発故障と特定できたものを除くと、FECで補償できなかったのは1件のみであった。DCNの場合も、

表1 各ネットワーク接続におけるIPパケット損失状況

	Internet2ベストエフォート網	SINET4ベストエフォート網	DCN (IoN/BoD)
総伝送時間(時間)	252	367	385
IPパケットロス発生回数	1095	513	336
時間あたりパケットロス発生率(回/時間)	4.3	1.4	0.87
最大バースト長(パケット) ()内はFEC回復の失敗数	91664(4)	65971(2)	83297(4) (非DCN区間で発生)
特定済のNW故障時を除いた最大バースト長(パケット) ()内は同上	44467(1)	12056(0)	1591(0)

JANET区間の機器故障に因るものでDCN区間は安定に機能した。

5. む す び

将来の映像メディアであるSHV映像を世界中に自在に伝送することを目指して、学術ネットワークによる共用網を用いたSHV伝送の実験を行い、LDGM-FECを主な機能とするネットワーク終端装置によって長時間の安定した伝送が可能であることを示した。将来、DCNのような仮想網が共用網の中で利用できるようになると、本実験のような長大なブロックサイズのFECを設定する必要は緩和されるが、それでも不要とはならない。共用網においては輻輳状況に応じて途中の経路が運用により動的に変わることは稀ではなく、そのパス切替時の無瞬断性をネットワークに求めることはコスト高になる。本実験のようにアプリケーションに近い部分でのパケット保護機能を併用することで、経済的なIPネットワークによる国際的なSHV伝送が可能となり、PVのように低圧縮・広帯域を必要とする大画面アプリケーションが加速するものと期待される。

(2012年10月15日受付)

〔文 献〕

- 1) Y. Shishikui, Y. Fujita and K. Kubota: "Super Hi-Vision", EBU Technical Review (Jan. 2009)
- 2) T. Yamashita, et al: "Progress report on the development of Super-HiVision", Motion Imaging Journal, 119, pp.77-84 (2010)
- 3) <http://www.ja.net/>
- 4) <http://www.geant.net/>
- 5) <http://www.internet2.edu/>
- 6) K. Noguchi: "GEMnet2: Overview and Activity. NTT Technical Review", 7 (2009)
- 7) <http://www.sinet.ad.jp/>
- 8) A. Isogai, A. Fukuda, A. Masuda, A. Hiramatsu: "Global-scale Experiment on Multi-domain Software Defined Transport Network", COIN2012, Yokohama (May 2012)
- 9) D.J.C. Mackay: "Good error-correcting codes based on very sparse matrices", IEEE Trans. Info. Theory, 45, 2, pp.399-431 (Mar. 1999)

10) Y. Tonomura, et al: "Layered Low-Density Generator Matrix Codes for Super High Definition Scalable Video Coding System", IEICE Trans, Fundamentals, E92-A, pp.798-807

11) 清水, 桑原, 瀬林, 丸山: "10Gbps高精度ネットワーク測定プラットフォームによる広域網測定統合環境の高度化", 信学技報, NS2010-57 (Sep. 2010)

藤井 竜也 1986年、東京大学工学部卒業、同大学大学院工学系研究科修了。1991年、NTT入社。以後、並列DSPと超高精細映像伝送システムの研究に従事。1996年、Washington University in St. Louis客員研究員。現在、NTT未来ねっと研究所主幹研究員グループリーダー。工学博士。正会員。

小河原 成哲 1992年、慶應義塾大学理工学部卒業。1994年、同大学理工学研究科修了。NTTネットワークサービスシステム研究所に入所し、現在、未来ねっと研究所在籍。入所以降、光交換システム、ホームネットワークサービスシステム、映像伝送技術等の研究開発に従事。

下村 道夫 1988年、早稲田大学理工学部卒業。1993年、同大学大学院電気工学専攻博士後期課程修了。同年、NTT入社。以来、高度インテリジェントネットワーク、認証連携システム等の研究開発に従事。2010年より、新サービス創出、GEMnet2の運営に従事。現在、同社サービスエボリューション研究所主幹研究員。博士(工学)。

魚瀬 尚郎 1978年、熊本大学電子工学科卒業。1980年、同大学大学院電気工学専攻修了。日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所入社。以来、ネットワーク制御技術等に従事。1994年～2000年、文部省学術情報センター客員助教授、教授。現在、NTTアドバンステクノロジー(株)所属。NTT研究所研究開発テストベッドGEMnet2の企画、運用業務に従事。

増田 暁生 1997年、東京大学理学部卒業。以来、NTTネットワークサービスシステム研究所にて、ネットワークシステムの研究開発に従事。2006年、早稲田大学国際情報通信学修士課程修了。2009年、同大学博士課程修了。2009年より、同大学客員研究員。博士(国際情報通信学)。