

バースト対応利得クランプ型光ファイバ増幅器による 映像信号(SD-SDI/HD-SDI)の伝送距離長延化の検討

深田 陽一[†] 中西 隆[†] 鈴木 謙一[†] 吉本 直人[†]

[†]日本電信電話株式会社 NTTアクセスサービスシステム研究所
〒261-0023 千葉県千葉市美浜区中瀬 1-6

E-mail: [†]{fukada.youichi, nakanishi.takashi, kenyichi, yosimoto}@ansl.ntt.co.jp

あらまし SD-SDI/HD-SDI は、業務用ビデオ機材に多用される非圧縮デジタル映像の信号規格である。光ファイバによる SD-SDI/HD-SDI の伝送機器では 10dB 以上のロスバジェットが提供されているが、素材映像伝送・ライブ中継の広域化に伴い更なるロスバジェット拡大(伝送距離長延化)が求められる。ところで、SD-SDI/HD-SDI は最大 53 μ s/26 μ s のバーストを有する信号である。一方、通常の光ファイバ増幅器はバースト信号(100kHz 近傍以下)入力時に、波形等に特性劣化を発生させる。従って、SD-SDI/HD-SDI 信号をこのような光増幅器により増幅しロスバジェット拡大することは、これまで困難であった。これに対し我々は、バースト増幅技術の適用により光増幅器のバースト耐性(波形劣化抑圧)を向上させ、SD-SDI/HD-SDI 信号の光増幅・ロスバジェット拡大を確認した。

キーワード デジタル映像信号, SD-SDI/HD-SDI, バースト信号, 利得クランプ, 光増幅器

Optical Amplified Transmission of Uncompressed Digital Video Signal (SD-SDI/HD-SDI) with Gain-Clamped Optical Fiber Amplifier

Youichi FUKADA[†] Takashi NAKANISHI[†] Ken-Ichi SUZUKI[†] and Naoto YOSHIMOTO[†]

[†]NTT Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation

[†]1-6 Nakase Mihama-ku, Chiba-shi, Chiba, 261-0023 Japan

E-mail: [†]{fukada.youichi, nakanishi.takashi, kenyichi, yosimoto}@ansl.ntt.co.jp

Abstract SD-SDI/HD-SDI are serial interface standards of the uncompressed digital video signal, and well adopted in TV broadcasting equipments. There are optical SD-SDI/HD-SDI transmitting and receiving systems with loss budget of 10dB, however the loss budget increase will be requested to realize long distance live relays. SD-SDI/HD-SDI are signals containing the burst of 53 μ s/26 μ s at most. On the other hand, the waveform of a burst containing signal (below about 10kHz) is distorted when the signal is amplified by a conventional optical fiber amplifier. Therefore, it has been difficult to amplify the SD-SDI/HD-SDI signal by a conventional optical amplifier and to increase the loss budget. Therefore, we propose to apply the "Gain-Clamped Optical Fiber Amplifier" (GC-Amp.) for amplifying bursty SD-SDI/HD-SDI signals. Experiments show that our GC-Amp. lineally amplifies bursty SD-SDI/HD-SDI signals without waveform distortion and the loss budget is enhanced.

Keyword SD-SDI/HD-SDI, Burst signal, Gain clamp, Optical amplifier

1. はじめに

SD-SDI/HD-SDI¹は、非圧縮デジタルビデオ信号インタフェース規格で、主に放送業務に使用されている。光ファイバによる SD-SDI/HD-SDI の伝送機器では 10dB 以上のロスバジェット²が提供されているが、素材映像伝送・ライブ中継の広域化に伴い更なるロスバジェット拡大(伝送距離長延化)が求められる。一方、

光ファイバ増幅器は、信号光をそのまま増幅できる事から、経済的なロスバジェット拡大法として、光通信において用いられてきた。そこで、SD-SDI/HD-SDI 信号伝送においても、光ファイバ増幅器により光信号を直接増幅しロスバジェットを拡大する事が、経済的な観点から期待される。

ところで、SD-SDI/HD-SDI 信号はバースト性³を有した規格である為、ケーブル等の透過特性(特に低周波領

¹ Standard Definition Serial Digital Interface / High Definition Serial Digital Interface の略。

² 送信光電力と受信光感度の比。伝送可能距離を決める主要因。

³ 本報告では、長い同符号連続(1111..., または 0000...)を、“バースト”と称する。

域での伝送特性)によっては、伝送品質劣化が発生する。この為、SD-SDI/HD-SDIには、バースト性を強調した試験信号である“チェックフィールド(Checkfield)信号”(いわゆるパソロジカル信号)が規定されている。端末・ケーブル接続時に本信号がエラー無く伝送されることにより、送信側端末～伝送路～受信側端末の伝送特性(低周波領域での伝送特性)が正常であることを確認する。

ところで、従来型光ファイバ増幅器では低周波領域において利得特性が劣化する特性を持つ。すなわち、バースト信号(長い同符号連続を含む信号)の増幅時に利得が不安定化する為、信号波形が劣化する⁴。つまりバースト性の高いSD-SDI/HD-SDI信号の増幅は、従来型光増幅器では困難であった⁵。

これに対し我々は、バースト対応光増幅器を用いることにより、SD-SDI/HD-SDI信号の光増幅を行い、伝送システムのロスバジェットを拡大したので報告する。第2章では、SD-SDI/HD-SDI信号のフォーマットおよびそのバースト特性について説明する。第3章では、バースト光増幅における光ファイバ増幅器の問題点を挙げると共に、我々の研究開発してきたバースト対応光増幅器について説明する。第4章では、バースト対応光増幅器を適用したSD-SDI/HD-SDI信号増幅実験結果について示す。

2. デジタル映像信号規格(SD-SDI/HD-SDI)

本章では、SD-SDI/HD-SDI信号の規格について概説する。また、SD-SDI/HD-SDIの試験信号の1つで、強いバースト性を有する“Checkfield信号”について説明する。

2.1. フォーマットとスクランブル方式

SD-SDI, HD-SDIはそれぞれ Standard definition, High Definition方式のデジタル映像を非圧縮で伝送する為のインタフェース規格である。各国の放送方式の違いに対応して、詳細規定は細分化されている。伝送速度は、SD-SDI方式で143Mbps・177Mbps・270Mbps・360Mbpsが、またHD-SDI方式で1.4835Gbps・1.485Gbpsが存在する。

以下、フレームフォーマットとスクランブル方式に関し、SD-SDIの525/60方式[1]をベースに説明する(図

⁴ 一方、光通信の信号規格であるSTM(専用線等の信号規格)や1000BASE-LX(1Gbps光LAN規格)は、スクランブルや8B/10B符号変換により、同符号連続性を抑圧してある為、従来型光ファイバ増幅器による増幅が可能である。

⁵ コスト面を問題にしなれば、メディアコンバータにてSD-SDI/HD-SDI信号をSTMにカプセル化/デカプセル化し、従来型光ファイバ増幅器による増幅を行う事は可能である。

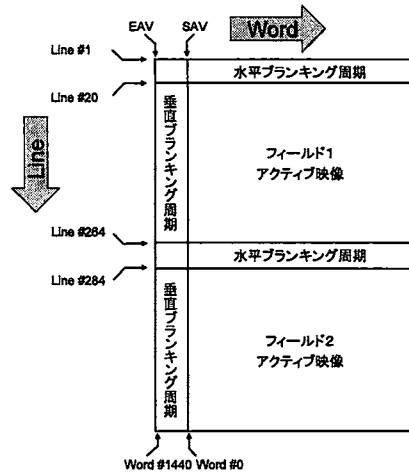


図1 SD-SDI 525/60のフレーム構成

1. なお、他方式との差異は、line数・word数・フィールドの位置等である)。525/60方式のフォーマットは、525本のlineと1,716のwordから構成される。各wordは10bitで構成されている。映像データは、輝度Y・色差C_B,C_Rで表され、アクティブ映像領域に(Y,C_B,Y,C_R)の順でマッピングされる。アクティブ映像領域は、“line #20-263, word #0-1439”にフィールド1が、“line #283-525, word #0-1439”にフィールド2が割り当てられている。データは、line #1から525の順に、順次伝送される。

ここで、1lineを伝送するのに要する時間を以下に示す。この値は、次節で説明するCheckfield信号によるバースト継続時間と関係する。1lineは17,160bit(1,716word)から構成されるので、1lineを伝送する時間は、

$$17,160\text{bit} \div 270\text{Mbps} = 63.5\mu\text{s} \quad (1)$$

である。また、1lineの内、アクティブ映像領域を伝送する時間は、

$$14,400\text{bit} \div 270\text{Mbps} = 53.3\mu\text{s} \quad (2)$$

である。

なお、HD-SDIの1125/60方式についても、各伝送時間を以下に示す。1lineを伝送する時間は、

$$44,000\text{bit} \div 1.4835\text{Gbps} = 29.7\mu\text{s} \quad (3)$$

である。1lineの内、アクティブ映像領域を伝送する時間は、

$$38,600\text{bit} \div 1.4835\text{Gbps} = 26.0\mu\text{s} \quad (4)$$

である。

SD-SDI/HD-SDIでは、送信側端末および受信側端末において自己同期型のスクランブラ、デスクランブラを採用している(図2(a))。送信側端末では

$$G_1(x) = x^2 + x^d + 1 \quad (5)$$

$$G_2(x) = x + 1 \quad (6)$$

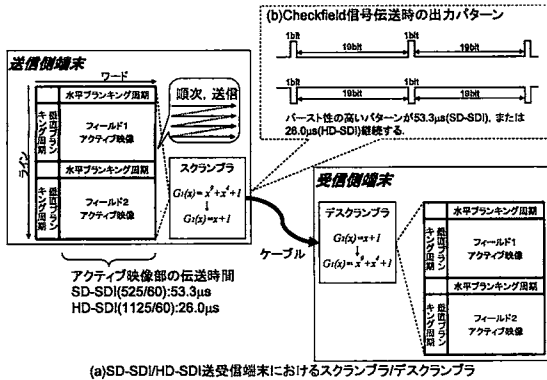


図2 スクランブラ構成と、そこから出力されるチェックフィールド信号

の2段階のスクランプリングが行われ、NRZI 符号化が行われる。受信側端末では逆の変換により、元信号が再生される。ただし、アクティブフィールドに配される色調によっては、スクランブル後の信号にも長い同符号連続(バースト信号)が発生し得る。そこで、機器・ケーブルのバースト耐性を確認する為に、恣意的に長い同符号連続を持たせた信号が、Checkfield 信号である。

2.2. Checkfield 信号

Checkfield 信号[2][3][4]は、同符号連続(バースト性)が強調された試験信号であり、本信号が送信側端末～伝送路～受信側端末をエラー無く伝送される事により、伝送特性(低周波領域での伝送特性)が正常であることを確認できるものである。本信号は、送信側のアクティブ映像の内、 C_B と C_R に 300h(11 0000 0000), Y に 198h(01 1001 1000)を割り当てる事で得られる⁶。この時、送信器端末のスクランブラからは、

$$10000\ 00000\ 00000\ 00000\ 10000\ 00000\ 00000\ 00000\ \dots\ (7)$$

または

$$01111\ 11111\ 11111\ 11111\ 01111\ 11111\ 11111\ 11111\ \dots\ (8)$$

の同符号連続の繰り返しパターンが出力される(図2(b))。なお、以下に注意が必要である。

- (7)または(8)のパターンは、アクティブ映像伝送中に、512line に 1line の確率で発生する(水平ブランキング周期伝送中には発生しない)⁷。
- 本パターンの継続時間は、1line の内アクティブ映像領域を伝送する時間に一致する。即ち、SD-SDI の 525/60 方式で 53.3μs(2)式、HD-SDI

⁶ Checkfield 信号(Y=198h, $C_B/C_R=300h$)は紫色に相当する為、チェックフィールド信号を伝送すると、映像は紫色となる。

⁷ バーストパターン(7),(8)の発生が確率的になるのは、発生条件が各 line 送信時のスクランブラ内部の

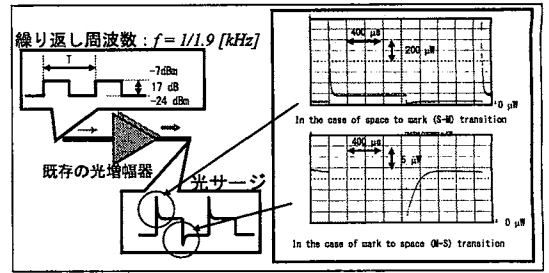


図3 従来型光ファイバ増幅器による光サージの観測

の 1125/60 方式で 26.0μs(4)式)となる。

なお、伝送信号のエラーの有無は、CRC により判別することができる。

3. バースト対応利得クランプ型ファイバ増幅器

我々は、光ファイバ増幅器のバースト耐性を向上させるため、これまでに利得クランプ(GC; Gain Clamp)を用いたバースト対応光ファイバ増幅器を提案し検討してきた[5][6]。本章では、バースト光信号増幅時における従来の光ファイバ増幅器の問題点を述べると共に、我々の検討してきたバースト対応増幅器について紹介する。

3.1. 従来型光ファイバ増幅器;バースト信号増幅時に光サージが発生

Pr-doped fiber amplifier (PDFA)や Er-doped fiber amplifier (EDFA)⁸などの光ファイバ増幅器は、ミリ秒オーダーの利得緩和時間を持つため、利得緩和時間に相当する低周波信号に対して利得が不安定となる。即ち、100kHz 程度以下のバースト信号に対し利得変動による光サージが発生する。図3に、PDFA で実測した光サージ波形を示す。PDFA 入力信号はバーストを模した低周波信号(1.9ms 周期、デューティー比 0.5 の矩形波)で、平均パワー-10dBm、波長は 1300nm である。出力信号には、立上がり時・立下り時とも光サージの発生が観測された。この光サージは光波形劣化だけではなく、場合によっては、部品劣化の原因となる。

3.2. 利得クランプ型光ファイバ増幅器;光サージを抑制

本バースト対応光増幅器は、利得クランプ光(GC 光; 光信号波長と近い波長で高パワーな連続光)を PDF や EDF などの利得媒体に常時入力しておく事により、

D-FF の初期値に依存性するからである。

⁸ PDFA は O 帯(波長 1260-1360nm)、EDFA は C 帯(波長 1530-1565nm)や L 帯(波長 1565-1625nm)内に利得帯域を有する。

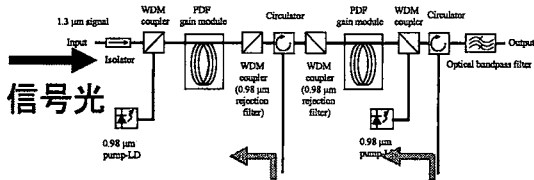
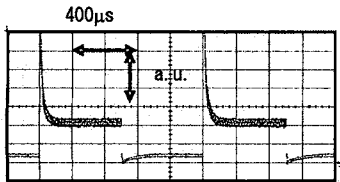
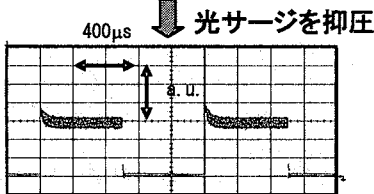


図4 バースト対応光ファイバ増幅器

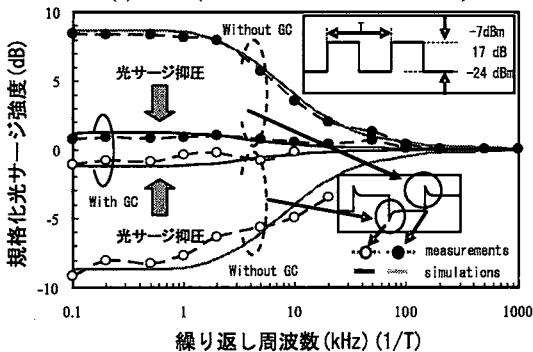
光ファイバ増幅器の反転分布状態を固定し、バースト



(a)光波形(繰り返し周波数1kHz, GC無し)



(b)光波形(繰り返し周波数1kHz, GC有り)



(c)バースト繰り返し周波数と規格化光サージ強度の数値及び実験結果の関係。

図5 バースト対応光ファイバ増幅器による光サージ抑圧の評価結果

耐性を向上(バースト信号入力時の利得変動を抑圧・光サージの発生を抑圧)させている。我々が試作した、PDFA ベースのバースト対応光ファイバ増幅器の構成を図4に示す。波長 1.3μm 帯の信号光のため、2 段の PDF を用いた。励起光源には波長 0.98μm の pump-LD を用いた。出力端には 20nm の光バンドパスフィルタを廃止した。本構成では、更に、PDF に対しサーキュレータを用いて GC 光を供給する構成とした。

バースト対応光増幅器による光サージ抑圧の評価

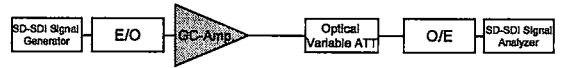


図6 SD-SDI 信号光増幅実験系

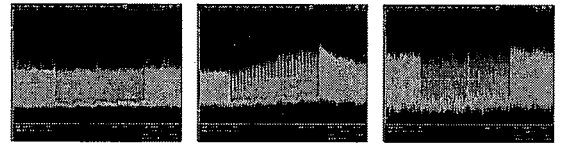


図7 光波形測定結果

結果を図5(a)-(c)に示す。図5は GC 無しの際の光波形, 図5(b)は GC 有りのときの光波形を示している。

光増幅器にはバーストを模した低周波信号(繰り返し周波数 1kHz, デューティー比 0.5 の矩形波, 平均パワー -10dBm, 波長 1300nm)を入力した。また、各 pump-LD は 500mA で駆動させた。GC 無しでは光サージが発生しているが(図5(a)), GC 光(波長 1510nm, 1520nm, 電力はそれぞれ +5dBm)を入力する事により光サージが抑圧されている(図5(b))。

図5(c)はバースト繰り返し周波数と規格化光サージ強度の関係である。バースト光信号の繰り返し周波数を変化させ、光サージ強度の周波数依存性を評価した。ここで横軸が繰り返し周波数, 縦軸が規格化サージ強度(=10log₁₀(ピーク光電力/平坦部光電力)[dB])である。GC 無しでは、繰り返し周波数が低いほど光サージが大きくなり、50kHz で規格化サージ強度が 1dB 程度となる。一方、GC 有りでは、全領域に渡り光サージが抑圧されており、繰り返し周波数 0.1kHz においても規格化サージ強度は 1dB 程度である。

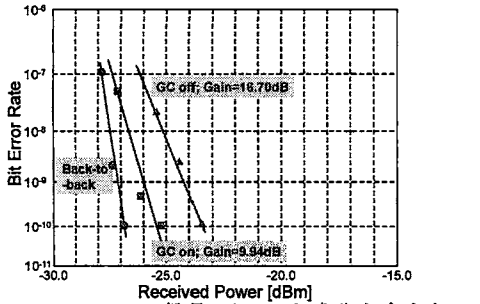
なお、第2章で説明した Checkfield 信号のバースト継続時間は、SD-SDI の 525/60 方式で 53.3μs (=18.76kHz), HD-SDI の 1125/60 方式で 26.0μs (=38.46kHz)である事から、GC 無しでは光サージ・波形劣化が発生する事が、図5(c)の結果から示唆される。

4. 実験

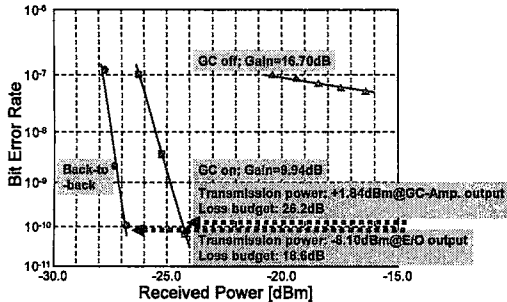
4.1. SD-SDI(525/60)信号光増幅

SD-SDI の 525/60 方式(270Mbps)を光増幅し、BER 特性評価の評価を行った。バースト対応光増幅器は、図4に示したものを採用している。E/O は、中心波長 1310nm のファブリペローLD で出力光電力は -8.10dBm である。励起 LD の駆動電流は 500mA, GC 光波長は 1320nm および 1330nm とした。信号光の利得は、GC 無しの際に 16.70dB, GC 光入力時に 9.94dB であった。

初めに、光波形測定結果を図7に示す。図7(a)は光増幅器入力前の SD-SDI 信号で、53μs の長さのバースト信号成分が観測されている。図7(b)は GC 光無し、図7(c)は GC 有りの時の光増幅波形である。GC 無し



(a) Color Bar 信号(バースト成分を含まない)



(b) Checkfield 信号(バースト成分を含む)

図 8 SD-SDI 信号光増幅時の BER 特性

の時には、波形劣化が観測されたのに対し、GC 光有りの時には、光増幅波形に劣化は見られなかった。

次に、HD-SDI 信号光増幅時の BER 特性を図 8 に示す。図 8 (a)は SD-SDI 信号の内、バースト性の低い Color Bar 信号を光増幅した際の BER 特性である。GC の有無により、BER=10⁻¹⁰ の受信感度劣化はそれぞれ 3.4dB/1.6dB であった。また、ロスバジエットの改善は、それぞれ、13.3dB/8.34dB であった。受信感度劣化の原因は、光増幅器から出力される ASE が原因で、狭帯域光バンドパスフィルタの挿入により改善できると思われる。

一方、図 8 (b)は、SD-SDI 信号の内、バースト性の高い Checkfield 信号を光増幅した際の BER 特性である。GC 無しの時には、BER=10⁻⁷ 付近でフロアが生じている。一方 GC 有りの時にはフロアは発生していないことから、本バースト対応光増幅器の有効性が分かる。この時 9.94dB の利得に対し 2.34dB(@BER=10⁻¹⁰)の感度劣化であることから、本実験ではロスバジエットの改善量は 7.6dB であった。

4.2. HD-SDI(1125/60)信号光増幅実験

HD-SDI の 1125/60 方式(1.4835Gbps)を光増幅し、BER 特性評価によりロスバジエット拡大の検証を行った(図 9)。光増幅器は、従来型の EDFA であり、外部から CWDM フィルタを介して GC 光(波長 1551nm)を入力する事により、バースト対応光増幅器とした。E/O

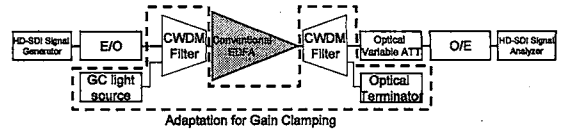
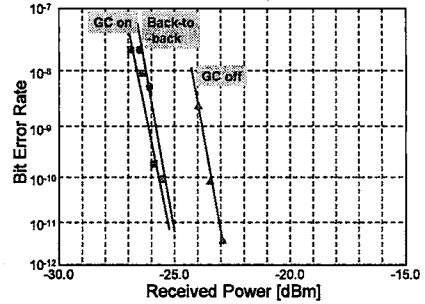
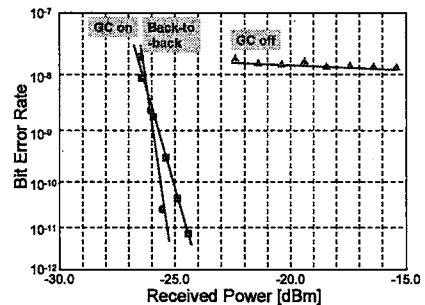


図 9 HD-SDI 信号光増幅実験系



(a) Color Bar 信号(バースト成分を含まない)



(b) Checkfield 信号(バースト成分を含む)

図 10 HD-SDI 信号光増幅時の BER 特性

は、中心波長 1531nm の DFB-LD で出力光電力は -2.9dBm である。EDFA 励起光電流を一定(308mA, 293mA)とし、GC 光入力時/非入力時の BER 特性を評価した。なお、GC 光電力は、EDFA 入力端で+0.1dBm である。

HD-SDI 信号光増幅時の BER 特性を図 10 に示す。図 10 (a)は HD-SDI 信号の内、バースト性の低い Color Bar 信号を光増幅した際の BER 特性である。BER=10⁻¹¹ での受信感度劣化は最大でも 2.0dB である。

一方、図 10 (b)は、HD-SDI 信号の内、バースト性の高い Checkfield 信号を光増幅した際の BER 特性である。GC 無しの時には、BER=10⁻⁷ 付近でフロアが生じている。一方、GC 有りの時にはフロアは発生していない。この時 10.1dB の利得に対し 0.9dB(@BER=10⁻¹¹)の感度劣化であることから、本実験ではロスバジエットの改善量は 9.2dB であった。

5. 結論

非圧縮映像規格(SD-SDI/HD-SDI)はバースト信号(53.3μs/26.0μs の同符号連続性の高いパターン)を含む

事から、低周波信号に対して利得が不安定となる従来型光ファイバ増幅器では増幅が困難であった。即ち従来型光ファイバ増幅器では、増幅時に光サージ・波形劣化が発生し、BER特性が劣化する問題があった。

我々が提案してきたバースト対応利得クランプ型光ファイバ増幅器(GC-Amp.)は、利得クランプ技術により、バースト信号の良好な光増幅特性を有する。このGC-Amp.により、SD-SDI/HD-SDIの直接光増幅が可能となった。

従来型光増幅器に比べGC-Amp.では、光サージ特性・波形特性とも改善効果が観測された。特にBER特性では 10^{-7} 付近のエラーフロアの解消という著しい改善効果が見られた。

今回、GC-Amp.により、SD-SDIで7.6dB、HD-SDIで9.2dBのロスバジェット拡大を実験的に確認した。バースト対応利得クランプ型光増幅器を用いる事により、バースト性の高いSD-SDI/HD-SDI信号の増幅を行い、ロスバジェットを拡大する事が示された。

文 献

- [1] SMPTE standards, SMPTE125M-1995, "Television-Component Video Signal 4:2:2-Bit-Parallel Digital Interface."
- [2] T. Eguchi, "Pathological Check Codes for Digital Serial Interface Systems," SMPTE Journal, pp.553-558, August, 1992.
- [3] SMPTE standards, SMPTE RP178-1996, "Serial Digital Interface Checkfield for 10-Bit 4:2:2-Component and 4 fsc Composite Digital Signals."
- [4] SMPTE standards, SMPTE RP198-1998, "Bit-Serial Digital Checkfield for Use in High-Definition Interfaces."
- [5] Ken-Ichi Suzuki, Yoichi Fukada, Koichi Saito, Takashi Nakanishi, and Yoichi Maeda "Burst-mode Optical Fiber Amplifier for PON Application," ECOC 2005, paper Th2.3.4, Glasgow, Scotland, September 2005.
- [6] Ken-Ichi Suzuki, Yoichi Fukada, Derek Nasset, Russell Davey, "Amplified gigabit PON systems", JON 6, 422-433 (2007).