Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique



五十嵐 浩司 (Koji IGARASHI, Ph. D.) 大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻 准教授 (Associate Professor, Division of Electrical, Electronic and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University) IEEE OSA 電子情報通信学会 研究専門分野:光変復調 誤り訂正符号 光信号多重

研究概要 光ファイバ伝送において、光増幅器で制限 される帯域を有効活用するために、周波数利用効率を 向上させる技術が必要不可欠である。光信号スペクト ルを信号符号速度の帯域で矩形化するナイキスト矩形 フィルタを用いて、符号速度の周波数間隔で波長多重 することで周波数利用効率の上限が得らえる。本研究 では、符号速度以下の周波数間隔で波長多重すること で、ナイキスト波長多重を超えた周波数利用効率を達 成するスーパーナイキスト波長多重に注目する。そこ では、隣接チャネルからのクロストークは不可避であ る。クロストーク抑圧にはスペクトル狭帯域化が有効 であるが、符号速度以下に信号帯域を狭窄化すると前 後の符号との干渉(符号間干渉)が生じる。つまり、 スーパーナイキスト波長多重技術は、隣接チャネルか らのクロストークと符号間干渉のトレードオフ関係を 最適化する技術と言えよう。

本研究では、ポリバイナリ整形を用いたスーパーナ イキスト波長多重技術の有効性を吟味する。スーパー ナイキスト波長多重システムにおける、ポリバイナリ 整形偏波多重直交振幅光信号のビット誤り率を測定し、 ナイキスト波長多重技術と比較検討した。その結果、 スーパーナイキスト波長多重技術は、ターゲット伝送 距離に対応する要求信号対雑音比に対して周波数利用 効率を高精度に調整するのに極めて有効であることが 示された。ポリバイナリ整形のように光受信器側で最 尤復号を用いる際、エラー伝搬が問題となる。このエ ラー伝搬を抑圧するために、ターボ等化を適用させた 際のスーパーナイキスト波長多重光信号のビット誤り 率も評価した。その結果、ナイキスト波長多重に比べ て、誤り訂正前ビット誤り率が劣化してもターボ等化 後にはエラーフリーが達成可能であることが示された。

1. 背景

波長多重(wavelength-division multiplexed:WDM) 伝送システムにおける周波数利用効率向上には、光周 波数領域において複数の光信号を可能な限り高密度に 多重することが有効である。近年、光 *IQ* 変調器とデ ィジタル・アナログ(digital-to-analog:DA)変換器 を用いることで、高精度なスペクトル整形が可能とな り、スペクトルパワー密度が高い光信号生成が容易と なった。特に、図1(a)に示すような、符号速度帯域の 矩形スペクトル波形に整形した光信号(ナイキスト整 形光信号と呼ぶ)を、符号速度の周波数間隔で波長多 重するナイキスト WDM が提案・デモンストレーショ ンされている[1]-[3]。



さらなる WDM 高密度化の方法として、符号速度以 下の周波数間隔で波長多重する faster-than ナイキス ト WDM 技術やスーパーナイキスト WDM 技術 (本稿 ではスーパーナイキスト WDM に統一する) が提案さ れている[4]。このスーパーナイキスト WDM システム では、WDM クロストークを可能な限り抑圧するため に、ナイキスト整形よりも狭帯域にスペクトル整形す

Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

ることが必須となる(図 1(b))。そのようなスペクト ル狭窄化は著しい符号間干渉 (inter-symbol interference : ISI)を生じさせるが、最尤系列推定

(maximum likelihood sequence estimation: MLSE) によって補償可能である[5]。この MLSE の計算量を 削減するのに最適な有限インパルス応答 (finite impulse response: FIR) フィルタがポリバイナリ整 形である。近年、最も簡易なポリバイナリ整形である デュオバイナリ整形を用いたスーパーナイキスト WDM 伝送の大規模実験が報告されている[6]-[8]。

本研究では、スーパーナイキストWDM 直交振幅変 調(quadrature amplitude modulation: QAM) 信号 に対するポリバイナリ整形の性能を実験的に評価する。 四相位相シフトキーイング(quadrature phase shift keying: QPSK) および 16QAM 信号に対して、ポリ バイナリ整形で最も簡易なデュオバイナリ整形と、そ れを二回行うカスケードデュオバイナリ整形を適用さ せて、スーパーナイキスト波長多重した場合のビット 誤り率(bit-error rate: BER)を測定する。その結果 から、周波数利用効率と要求光信号対雑音比(optical signal-to-noise ratio: OSNR)の関係を明らかにする。

2. 最尤系列推定とポリバイナリ整形

MLSE とは、複数の受信サンプルに基づき、最も可能 性の高い送信符号を推定することである。受信サンプル すべての受信確率が等しい場合、sample-by-sample で の判定と同様となるが、受信サンプルが前後受信サン プルと相関を有する場合は推定が可能となる。例えば、 畳み込み符号のような相関符号で符号化された信号を 受信する場合や、前後符号と干渉がある場合、言い換 えると ISI がある伝送路の場合において、この MLSE は効果的である。後者に関して、帯域狭窄化(すなわ ちフィルタリング)によって生じた ISI を MLSE で補 償することを考えるのが本研究である。

MLSE では、前後受信サンプルとの相関性が状態遷 移図で記述される。この状態数が小さいほど MLSE の 計算量が削減される。ここで、ISI を生じさせる符号 間隔離散 FIR フィルタの中でも、タップ係数が対称で、 最大のユークリッド距離となる出力符号を与えるもの が、ポリバイナリ整形である。最も状態数が少ないも のは、図 2(a)で示される構成のデュオバイナリ整形で ある。前符号との和をとる FIR フィルタの後に矩形ナ イキスト整形を行う構成である。例えば、2 値符号(-1, +1)を入力した場合、前符号との和が出力され、3 値信 号(-2, 0, +2)が生成される。デュオバイナリ整形のイン パルス応答を図 3(a)の実線で示す。破線で示す遅延し た矩形ナイキスト整形のインパルス応答の和となる。





このパワースペクトル波形が図 4(a)であり、半値全幅 (full-width half-maximum : FWHM)が符号速度 Bの 半分となる。したがって、高密度に波長多重しても、隣 接チャネルからのクロストークを十分に抑圧可能となる。

Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

ュオバイナリ整形を2回行うのがカスケードデュオ バイナリ整形である。このFIRフィルタ構成を図2(b) に示し、インパルス応答を図3(b)に示す。3つの矩形 ナイキスト整形インパルス応答の和となる。このとき のパワースペクトル波形を図4(b)に示す。デュオバイ ナリよりもスペクトル狭窄化され、FWHMが0.36×*B* まで減少する。

次に、上記ポリバイナリ整形によって生じる ISI を考 える。QPSK 信号をデュオバイナリ整形したもののコ ンステレーションを図 5(b)に示す。参考のために、ナ イキスト整形 QPSK 信号の場合を図 5(a)に示す。デュ オバイナリ整形の ISI によって符号点は 9 つに増大す る。一見、9QAM 信号と同様に見えるものの、外側の 符号ほど発生確率が小さい。参考のために、実部に関 するヒストグラムも図 5 下部に示している。カスケー ドデュオバイナリ整形後のコンステレーションを図 5(c)に示す。この場合、25 種類の符号点を有する。ま た、16QAM 信号に対して、デュオバイナリ整形およ びカスケードデュオバイナリ整形を行った場合のコン ステレーションをそれぞれ図 6(b)と(c)に示す。







Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

デュオバイナリ整形 16QAM では 49 符号を有し、カ スケードデュオバイナリ整形では 169 符号まで増大す る。ここで注目されたいのが、ポリバイナリ整形では ISI が生じるものの、各符号間隔は一様化される点で ある。その結果、全符号間のユークリッド距離が最大 化されるため、他の帯域狭窄化フィルタに比べると雑 音特性に優れることになる。また、ポリバイナリ整形 のタップ係数は対称配置となり、この ISI 補償のため の MLSE の計算量は大幅に削減されることになる。

ここで、伝送路と送受信器を含めた伝送系全体の伝達 関数がポリバイナリ整形となるだけでなく、白色ガウス 雑音に最適化なマッチドフィルタ構成となるように、送 信器および受信器において平方根ポリバイナリ整形を行 うのが一般的である。受信器では、適応等化によって等 化符号がポリバイナリ整形信号となるように適応等化す ることで、伝送路と受信器を含めた全体としての伝達特 性がポリバイナリ整形となるように制御される。

スーパーナイキスト WDM 偏波多重 QPSK 光信号のビット誤り率測定

次に、送受信器対向構成において、ポリバイナリ整 形 QAM 信号の BER 測定を行った。その測定系を図 7(a)に示す。波長可変光源からの出力を 2 分岐し、一 つを中心チャネル、もう一つを隣接チャネルに使用した。 分岐光の一方は、サンプリング周波数 50 GSample/sec の任意電気波形生成器 (AWG)から得られたポリバイ ナリ整形電気信号で駆動された光 *IQ*変調器を用いて、 中央チャネルポリバイナリ整形 QAM 光信号を生成し た。本実験では、符号速度を 25 Gbaud とした。AWG における信号処理を図 7(b)に示す。15 段疑似ランダム ビット系列 (pseudo random bit sequence: PRBS)を QAM マッピングし、平方根ポリバイナリ整形を行っ た後のサンプルを DA 変換器に送り、電気信号波形を 生成した。もう一方の分岐光は、初めに周波数Δfの電 気クロックを用いてキャリア抑圧変調し、その変調側



Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

波帯を波長選択スイッチで取り出し、それらを中心チャネルから Δf だけ離れた隣接チャネルのキャリアとした。それらを中央チャネルと同様に光 *IQ* 変調器を用いて変調した。中央チャネルと隣接チャネルを合波し、偏波多重することで、3 チャネルスーパーナイキストWDM 偏波多重(dual-polarization:DP) QAM 信号を生成した。この実験では、WDM 周波数間隔はキャリア抑圧変調の周波数 Δf で決定されるために、正確に調整することが可能となる。 Δf が 25 GHz 以下であるスーパーナイキストWDM 条件でも、隣接WDM チャネルからのクロストークを正確に評価可能である。

受信器側において、生成した3 チャネルスーパーナ イキスト WDM DP-QAM 信号の中央チャネルをホモ ダイン検波した。ここでは、局所光には線幅5 kHz 以 下の波長可変光源を用いた。得られた受信電気信号を サンプリング周波数50 GSample/sec のオシロスコー プで測定した。そのストアデータをオフラインで信号 処理することで BER を求めた。その信号処理を図7(c) に示す。はじめにアンプ雑音を除去した後、適応等化 フィルタを用いることで偏波分離・クロック再生・キ ャリア再生、そして信号等化を行った。タップ数は80、 タップ係数は LMS アルゴリズムを用いて適応的に制 御した[10]。なお、ここでは等化符号がポリバイナリ 整形符号になるように適応制御している。その後、サ ンプルの / および Q 成分に対して MLSE を用いて復 号化し、BER を求めた。

WDM 周波数間隔∆f を 25 GHz から 20 GHz に減少 させたときの、ナイキスト整形 DP-QPSK 信号の BER 測定結果を図 8(a)に示す。WDM 周波数間隔が 25 GHz、 24 GHz、23 GHz、22 GHz、21 GHz、そして 20 GHz の結果を●、○、▲、△、■、そして□でプロットした。 Δf = 23 GHz において、BER = 2×10⁻²における OSNR ペナルティは3 dB 程度である。Δf が減少するにした がって、BER劣化が顕著となる。これは、WDM クロ ストークが大きくなるためである。図 8(b)には、デュ オバイナリ整形 QPSK 信号の BER 測定結果を示す。 図 8(a)と同様のプロットに加え、 $\diamond \diamond \diamond \diamond t \Lambda f = 19 \text{ GHz}$ と18 GHzの結果を示す。ナイキスト整形に比較して、 Δf を減少させた際のクロストークによるペナルティ が抑圧されていることが分かる。 $\Delta f = 20$ GHz におい ても OSNR ペナルティは 3 dB 以下に抑圧されている。 その一方で、ナイキスト WDM 条件の∆f = 25 GHz において、ナイキスト整形と比べると 2 dB 程度の OSNR ペナルティが生じている。これはデュオバイ ナリ整形によって生じる ISI に依るものである。図 8(c)には、カスケードデュオバイナリ整形 QPSK 信号 の BER 測定結果を示す。図 8(b)と同様のプロットに 加え、▼でΔ*f* = 17 GHz の結果を示している。Δ*f*を減 少させても、隣接チャネルからのクロストークによる 劣化が十分に抑圧されている。周波数間隔を 18 GHz まで減少させても2 dB 程度の SNR ペナルティに抑 圧された。



Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

その一方で、ナイキスト WDM 条件においても、ISI による著しい SNR ペナルティが生じている。ナイキ スト整形の結果と比べると 5 dB 程度のペナルティが 生じた。

次に、測定した DP-16QAM 信号の BER 特性を議論 する。図 9(a)に、ナイキスト整形における測定結果を 示す。WDM 周波数間隔 Δf が 25 GHz、24.5 GHz、24 GHz、23.8 GHz、そして 23.7 GHz における結果を●、 O、▲、 Δ 、そして■でプロットした。隣接チャネルか らのクロストークに極めて敏感であり、 Δf を 24 GHz に減少しただけで、BER = 2×10⁻²が達成される OSNR でのペナルティが 3 dB に達する。このことは、 DP-16QAM 信号をナイキスト WDM する場合、1 GHz

以下の周波数安定性が求められることを意味する。一 方、デュオバイナリ整形の結果を図 9(b)に示す。この 図では、WDM 周波数間隔∆*f* が 25 GHz、24 GHz、23 GHz、22.7 GHz、そして 22.5 GHz における結果を●、

O、▲、△、そして■でプロットした。デュオバイナリ 整形によって WDM クロストークによる OSNR 劣化 は多少抑圧され、 Δf が 23 GHz まで減少しても、OSNR ペナルティは 3 dB 程度であった。しかしながら、ナ イキスト整形時に比べると、 $\Delta f = 25$ GHz のナイキス ト WDM 条件においても大きな ISI 劣化が見られる。 カスケードデュオバイナリ整形 16QAM 信号の BER に関しては、AWG から得られる電気信号における非 線形な歪みが著しく、2×10-2以下の BER を得ること ができなかった。

以上の実験結果から、BER = 2×10⁻²に対する要求 OSNR の Δ ffB 依存性を図 10 にまとめた。DP-QPSK 信号および DP-16QAM 信号の結果をそれぞれ図 10(a)および(b)に示す。O、●、▲がナイキスト整形、 デュオバイナリ整形、そしてカスケードデュオバイナ リ整形の結果である。まず、DP-QPSK 信号の結果に 注目する。ナイキスト整形に比べると、デュオバイナ リ整形によって WDM クロストークが抑圧されるた めに、 Δ ffB が減少したときの OSNR ペナルティが抑 圧される。ただし、 Δ ffB = 1 のナイキスト WDM 条 件においても、ISI によるペナルティが 1 dB 強生じ ている。

比較のために、シミュレーション結果を図 11(a)に 示す。実験とシミュレーションで同様な傾向となって いることがわかる。DP-16QAM 信号に関しては、ナ イキスト整形に比べると、ディオバイナリ整形適用に よってΔ*flB*の減少に伴う WDM クロストークが抑圧 される。このときのナイキスト WDM 条件における ISI 劣化はおよそ 2.5 dB であった。16QAM 信号に対 する計算結果を図 11(b)に示す。実験とシミュレーシ ョンで同様な傾向であるものの、実験結果における WDM クロストークによるペナルティが著しい。これ は実験における電気・光部品の不完全性による波形歪 みが原因と考えられる。



Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique



以上の BER 測定結果から、BER = 2×10-2 に対する 要求 SNR と周波数利用効率の関係を図 12 にまとめた。 なお、雑音帯域を 0.1 nm として、OSNR から SNR へ変換してプロットした。Oがナイキスト整形、●が デュオバイナリ整形、そして▲がカスケードデュオバ イナリ整形である。上段がシミュレーション結果で、 下段が実験結果を示す。シミュレーション結果および 実験結果は、同様な傾向を示している。なお、シミュ レーション結果にはナイキスト整形 8QAM の結果を 追加した。QPSK から 8QAM や 16QAM を用いて周 波数利用効率を向上させようと考えると、ナイキスト 整形のみの場合、大きな要求 SNR 劣化が生じる。デ ュオバイナリ整形やカスケードデュオバイナリ整形を 適用させることにより、ターゲットとなる要求 SNR に対して高精度に周波数利用効率を最適化可能となる。 伝送路が光雑音で制限される一般的な伝送システムで は、要求 SNR と伝送距離が対応する。したがって、 ポリバイナリ整形は、ターゲット伝送距離に対して周 波数利用効率を高精度に最適化するのに効果的である ことが示された。





スーパーナイキスト波長多重システムにおける 誤り訂正符号

前章のように、スーパーナイキスト WDM 伝送実験 では、実際に誤り訂正 (forward error correction: FEC) を適用した BER での性能評価ではなく、FEC を使用 する前の BER が閾値以下となっているかで評価して

Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

いるのにとどまっている。スーパーナイキスト WDM システムにおいて、デュオバイナリ整形に対する最尤

(maximum likelihood: ML) 復号器においてエラーが 伝搬し、相関性を有する過剰連続エラーが生じる。この ような過剰連続エラーは、FEC 性能を著しく劣化させる ことが予想される。従来は、インターリーブ技術を用い ることでエラー連続性を抑圧し、エラーを時間軸上で無 相関化することで FEC 性能劣化を抑圧しているが、過 剰エラーは抑圧できない。ただし、相関性のある過剰連 続エラーは、原理的には補償できるはずである。

本研究では、スーパーナイキスト WDM システムに おける FEC 性能劣化の抑圧のために、ターボ等化技 術の適用を提案する。ターボ等化は、デュオバイナリ 整形用 ML 復号器と FEC 復号器のフィードバック構 成であり、FEC の復号器の軟出力である対数尤度比

(logarithm of likelihood ratio: LLR) がデュオバイ ナリ整形復号器の事前確率として使われる。このター ボ等化によって、初段デュオバイナリ整形用 ML 復号 器で生じる過剰連続エラーが抑圧される。ここでは、 はじめにスーパーナイキスト WDM QPSK 信号のエ ラー分布を計算し、デュオバイナリ整形用 ML 復号器 において過剰連続エラーが生じることを指摘する。こ の過剰連続エラーを抑圧するためターボ等化を適用し、 20%オーバーヘッドのターボ符号を用いたスーパーナ イキスト WDM QPSK 光信号に対する BER 特性をシ ミュレーションと実験によって評価する。ナイキスト WDM 信号に比較して、スーパーナイキスト WDM 信 号の FEC 使用前 (pre-FEC) BER 特性は、原理的に 1 dB 程度のペナルティが生じる。ターボ等化の適用に よって、スーパーナイキスト WDM 信号の FEC 使用 後 (post-FEC) BER 特性のペナルティは 0.5 dB に改 善される。実験でもその効果を確認する。このペナル ティ改善効果によって、ナイキスト WDM 信号に比べ て、スーパーナイキスト WDM 信号の方が大きな pre-FEC BER 閾値が得られることが示された。

5. スーパーナイキスト WDM 信号の復号後の エラー分布

まず、デュオバイナリ整形信号を ML 復号した後に おけるエラーは伝搬する傾向にあり、過剰連続エラー が生じる点に注目する。その様子を図 13 に示す。伝 送路において付加された雑音によって、符号が独立に 誤ったと考える(図 13(a))。受信後の線形等化では、 この雑音による符号誤りは保存される(図 13(b))が、 デュオバイナリ整形用 ML 復号によってエラーが伝 搬し、連続符号エラーが生じる(図 13(c))。これは、 前後符号の干渉によるデュオバイナリ整形を復号す ると、エラーが一度生じると連続するためである。そ の結果、過剰なエラーが生じるために、BER 特性が 劣化する。



実際に、デュオバイナリ整形 QPSK 信号を MLSE によって復号した後のエラー分布を計算した結果を図 14 に示す。横軸は連続するエラーの長さを示す。BER = 10⁻² におけるデュオバイナリ整形信号の結果を■で 示す。比較のために、ナイキスト整形信号の結果を● で表す。ナイキスト整形信号に比べると、デュオバイ ナリ整形信号では、より多くの連続エラーが発生する ことがわかる。次段の FEC 復号器には、この ML 復

Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

号器出力の軟情報が入力され、結果として FEC 性能 が劣化することになる。従来は、インターリーブ技術 によってエラーを時間的に離散化させることで FEC 性能劣化を抑圧している。しかしながら、デュオバイ ナリ整形用 ML 復号器で生じた過剰なエラーを抑圧す ることはできない。



スーパーナイキスト WDM システムに対する ターボ等化の性能評価

スーパーナイキスト WDM 信号の受信器において、 デュオバイナリ整形用 ML 復号による過剰連続エラー による FEC の性能劣化を補償するため、ターボ等化 の適用を提案する[11][12]。その構成を図 15 に示す。



ターボ等化は、初段のデュオバイナリ整形用 ML 復号 器と次段 FEC 復号器のフィードバック構成である。 次段 FEC 復号器出力の LLR を初段デュオバイナリ整 形用 ML 復号器の事前確率として使用する。この LLR を基本としたエラー確率のフィードバックによって、 初段 ML 復号器で生じた連続エラーが補償される。こ のフィードバックの繰り返し計算によって、エラーの 連続性および相関性が抑圧され、FEC 性能劣化の抑圧 だけでなく、初段 ML 復号器で生じる過剰連続エラー の抑圧も可能となる。ここでは、ターボ等化を用いた スーパーナイキスト WDM QPSK 光信号の BER 特性 をシミュレーションした。

シミュレーションモデルを図 16(a)に示す。送信器 において、2¹⁵-1 周期の擬似ランダムビット列 (pseudo random bit sequence: PRBS) から生成した信号ビッ ト列をオーバーヘッド 20%のターボ符号で符号化す る。この符号化器の構成を図 16(b)に示す。畳み込み 符号2つの並列構成であり、符号化器の間にビットイ ンターリーバが配置されている。この符号化器では、 一つの情報ビットに対して2つのパリティビットが生 成される (図 16(c))。このパリティビットの 10 ビッ トから1ビットのみをパンクチャリングすることで、 オーバーヘッドが 20%となるように符号化した(図 16(d))。符号化されたビット列をランダムインタリ ーブした後、QPSK 符号にマッピングする。その後、 周波数領域で平方根デュオバイナリ整形して、デュ オバイナリ整形 QPSK 信号を得る。このシミュレー ションでは光変調は線形とした。信号生成と同様に、 隣接 WDM チャネル用信号を生成し、それらをシン ボルレート以下の周波数間隔で波長多重することで、 3 チャネルスーパーナイキスト WDM QPSK 信号を 得る。本シミュレーションでは、シンボルレートと 周波数間隔の比は 5/6 とした。3 チャネルスーパー ナイキスト WDM 信号に白色ガウス雑音を付加した 後、中央チャンネル信号をコヒーレント検波する。 ここでは、コヒーレント検波における位相雑音は無 視している。受信信号を平方根デュオバイナリ整形 によって信号等化を行い、実数・虚数成分信号に対 して独立にターボ等化を行う。その後、復号符号か ら BER を計算する。

Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique



スーパーナイキスト WDM QPSK 信号の BER 特性 の計算結果を図 17 に示す。FEC を使用する前の pre-FEC BER を◆でプロットする。ターボ等化を用い ずに FEC のみを行った場合の結果を●で示し、ターボ 等化を用いた場合の結果が●で表す。比較のために、ナ イキスト WDM QPSK 信号の BER の計算結果も図 17 に示す。この場合、ターボ等化は使用せず FEC のみを 使用している。FEC を使用する前の pre-FEC BER を ◇で示し、FEC 復号した後の post-FEC BER をOで示 す。スーパーナイキスト WDM の場合、FEC のみを使 用した●では、post-FEC BER < 10⁻⁵の達成には 7.3 dB 以上の SNR が要求される。ターボ等化を用いることで 要求 SNR が 6.5 dB に低減される。したがって、ター ボ等化によって SNR 特性が 0.8 dB 改善された。

次に、pre-FEC BER と post-FEC BER の関係を図 18 に示す。Oがナイキスト WDM 信号の結果、●がス ーパーナイキスト WDW 信号の結果である。ナイキス ト WDM 信号では、post-FEC BER < 10⁻⁵ となる pre-FEC BER 閾値は 2.2×10⁻²である。ターボ等化を 用いたスーパーナイキスト WDM 信号の場合では、 pre-FEC BER 閾値は 4.4×10⁻² となる。すなわち、ナ イキスト WDM 信号に比較して、スーパーナイキスト WDM 信号では大きな pre-FEC BER 閾値が得られる。



Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique



次に、ターボ等化の性能を実験的に評価するために、送 受信対向構成においてスーパーナイキスト WDM QPSK 信号の BER を測定した。その実験系を図 19 に示す。

サンプリングレート 50 Gsample/s の任意電気信号 生成器 (arbitrary waveform generators : AWGs) 2



台から生成したデュオバイナリ整形電気信号で駆動し た光 *IQ*変調器を用いて、中心波長 1550 nm の光源と 隣接チャネルの光源からの連続光を独立に信号変調し、 合波するとともに偏波多重を行って、3 チャネルスー パーナイキスト WDM DP-QPSK 信号を得た。ここで、 シンボルレートは 12.5 Gbaud である。また、WDM 周波数間隔をシンボルレートの 5/6 である 10.4 GHz と設定した。また、AWG での信号処理は、シミュレ ーヨンで説明したものと同様である。前置増幅した後、 中央チャネルをホモダイン検波した。この実験では、 前置増幅前の可変減衰器を用いて信号パワーを変化さ せることで、OSNR を調整した。その受信電気信号を 50 Gsample/s のオシロスコープでストアし、ストアサ ンプルをシミュレーションと同様の信号処理によって オフラインで復調を行った。

図 20 に、測定した BER 結果を示す。FEC を使用 しないスーパーナイキスト WDM 信号とナイキスト WDM 信号の pre-FEC BER を◆と◇で示す。FEC を



Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

用いない場合、ナイキスト WDM 信号に比較すると、 スーパーナイキスト WDM 信号の BER の 10-2 が達成 されるときの OSNR ペナルティは 1.5 dB であった。 FEC を使用した場合のスーパーナイキスト WDM 信 号の post-FEC BER に対して、ターボ等化フィードバ ックを行わない場合とターボ等化を用いた場合の結果 をそれぞれ●と●で示す。ターボ等化によって、BER < 10-5 が達成される OSNR が 0.8 dB 向上した。また、 比較のために、FEC 使用時のナイキスト WDM 信号 の post-FEC BER をOで示す。 ナイキスト WDM 信号 と比較すると、ターボ等化使用時のスーパーナイキス トWDM信号のOSNRペナルティは1.2dBとなった。 FEC を使用する前の pre-FEC BER のペナルティは 1.5 dB であったが、ターボ等化によって、そのペナル ティが 1.2 dB に抑圧することが可能となることが示 された。

最後に、pre-FEC BER と post-FEC BER の関係を 図 21 にまとめる。ナイキスト WDM 信号の結果をO、 スーパーナイキスト WDM 信号の結果が●である。ナ イキスト WDM 信号に対して、post-FEC BER < 10⁻⁵ が達成される pre-FEC BER 閾値は 2.2×10⁻² である。



また、ターボ等化を適用したスーパーナイキスト WDM 信号の場合では、pre-FEC BER 閾値は 3.1×10⁻² である。BER 閾値で比較すると、ナイキスト WDM 信号に比べて、スーパーナイキスト WDM 信号の方が より大きな BER 閾値となることが示された。これは、 OSNR ペナルティがターボ等化によって抑圧された ことによる効果である。

7. まとめ

ナイキストWDMシステムを超える周波数利用効率 が達成されるスーパーナイキストWDMシステムに対 するポリバイナリ整形の性能を検討した。スーパーナ イキストWDMシステムでは信号帯域の狭窄化が必須 となり、ISI 補償が必要不可欠となる。ISI は最尤復号 によって補償可能であるが、最尤復号の計算量を削減 するのにポリバイナリ整形が適している。本研究では、 デュオバイナリ整形およびカスケードデュオバイナリ 整形を DP-QPSK および 16QAM 光信号に適用させた 際のビット誤り率特性を実験的に評価した。その結果、 ポリバイナリ整形はターゲット伝送距離に対応した要 求 SNR に対して、高精度に周波数利用効率を最適化 するのに有効であることが示された。

ポリバイナリ整形のように、受信器側で最尤復号器 を用いる場合、そこでのエラー伝搬が問題となる。そ れを抑圧するために、ターボ等化の適用を検討した。 本研究では、スーパーナイキスト WDM デュオバイナ リ整形 DP-QPSK 光信号に対するターボ等化の性能を シミュレーションおよび実験で評価した。その結果、 ナイキスト WDM 信号に比べて、ターボ等化を適応す ることで高い pre-FEC BER 閾値でも、post-FEC BER < 10⁻⁵が得られることが明らかとなった。スーパ ーナイキスト WDM システムにおけるターボ等化の有 効性が明らかになった。

謝 辞

本研究は、KDDI総合研究所との共同研究の結果が 含まれている。KDDI総合研究所の森田逸郎氏と釣谷 剛宏氏に感謝する。

Super-Nyquist wavelength division multiplexed transmission technique

参考文献

- [1] G. Bosco, A. Carena, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "Performance limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in high-speed PM-QPSK systems," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, no. 15, pp. 1129–1131, Aug. 2010.
- [2] M. Mazurczyk, "Spectral shaping in long haul optical coherent systems with high spectral efficiency," J. Lightw. Technol. vol. 32, no. 16, pp. 2915–2961, Aug. 2014.
- [3] J. X. Cai, H. G. Batshon, M. Mazurczyk, H. Zhang, Y. Sun, O. V. Sinkin, D. G. Foursa, and A. Pilipetskii, "64QAM based code modulation transmission over transoceanic distance with >60 Tb/s capacity," presented at the Optical Fiber Communication Conf., Los Angeles, CA, USA, 2015, Paper Th5C.8.
- [4] J. Li, E. Tipsuwannakul, T. Eriksson, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, "Approaching Nyquist limit in WDM systems by low-complexity receiver-side duobinary shaping," J. Lightw. Technol. vol. 30, no. 11, pp. 1664–1676, Jun. 2012.
- [5] G. D. Forney, Jr., "Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences and the presence of intersymbol interference," IEEE Trans. Inf. Theory., vol. IT-15, no. 3, pp. 363–378, May 1972.
- [6] J. Zhang, J. Yu, Z. Dong, Z. Jia, H. C. Chien, Y. Cai, C. Ge, S. Shi, Y. Chen, H. Wang, and Y. Xia, "Transmission of 20×440-Gb/s Super-Nyquistfiltered signals over 3600 km based on single-carrier 110-GBaud PDM QPSK with 100-GHz grid," presented at the Optical Fiber Communication Conf., Los Angeles, CA, USA, 2014, Paper Th5B.3.
- [7] K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, Y. Tsuchida, K.Maeda, M. Tadakuma, T. Saito, K. Watanabe, K. Imamura, R. Sugizaki, and M. Suzuki, "1.03-Exabit/s×km super-Nyquist-WDM transmission over 7,326-km sevencore fiber," presented at the European Conf. Optical Communication, London, U.K., 2013, Paper PD3.E.3.
- [8] D. Soma, K. Igarashi, Y. Wakayama, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, N. Yoshikane, T. Tsuritani, I. Morita, and M. Suzuki, "2.05 Peta-bit/s Super-Nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band," presented at European Conference on Optical Communication (ECOC 2015), paper PDP3.2.

- [9] D. Chang, F. Yu, Z. Xiao, N. Stojanovic, F. N. Hauske, Y. Cai, C. Xie, L. Li, X. Xu, and Q. Xiong, "LDPC convolutional codes using layered decoding algorithm for high-speed coherent optical transmission," presented at Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, 2012), paper OW1H.4.
- [10] Y. Mori, C. Zhang, and K. Kikuchi, "Novel configuration of finite-impulse response filters tolerant to carrier-phase fluctuations in digital coherent optical receivers for higher-order quadrature amplitude modulation signals," Opt. Express, vol. 20, no. 24, pp. 26236–26251, Nov. 2012.
- [11] R. Koetter, A. C. Singer, M. Tuchler, "Turbo Equalization," IEEE Signal Processing Magazine, pp. 67-80, 2004.
- [12] T. V. Souvignier, Mats Oberg, P. H. Siegel, R. E. Swanson, J. K. Wolf, "Turbo Decoding for Partial Response Channels," IEEE Trans. on Comm., vol. 48, no. 8, pp. 1297-1308, Aug. 2000.

この研究は、平成26年度SCAT研究助成の対象と して採用され、平成27~28年度に実施されたもの です。