

## ■ 光学工房

## 光スペクトル信号処理技術

HD (high definition) 画質で2時間の映像を記録することが可能な記録媒体として注目されている Blu-ray Disc は、記録密度向上のため短波長化、対物レンズの高 NA 化が進んでいます。こうした中で良好な信号品質を得るためには、ディスクの光学パラメーターのばらつきに対して、高度な光学制御技術が必要となります。今回の光学工房では、Blu-ray Disc (以降 BD と記述します) のカバー層厚み誤差により発生する球面収差の検出と補正方法について紹介します。

光は高速で周波数が高く、情報を処理する媒体として優れた物理的特徴を有しています。特徴である光の空間、時間、周波数の自由度を活用することで、任意の光信号や波面を生み出す、あるいは情報を抽出する光学的処理を実現することができます。時間と空間、または時間と周波数、の変換の原理は、80 GHz/s を超す超精密高速走査が確認されている光計測分野、世界最大容量 25.6 Tbps ファイバー通信が実現された光通信分野などにおいて、大いに活用されていることはいうまでもありません。さらに、スペクトルを介して信号処理を行う光機能デバイスとそれを組み込んだシステムを実現することにより、光速度および 200 THz におよぶ光の周波数スペクトル資源の利用と時間・空間・周波数、すべての自由度を生かした光スペクトル信号処理が可能になります。個別の原理自体はそれほど新しいわけではないのですが、近年の光源の多種化・性能向上、光変調器・撮像素子の技術の進展により、実用的なレベルにまで高められてきました。

時間と空間における光スペクトル信号処理は 1980 年代に時空間変換技術が提唱され、ピコ秒・フェムト秒領域の光パルス発生用任意波形制御技術としても使われています。任意の波形制御は光パルスを回折格子とレンズを用いて、空間的にフーリエ成分を分離し、フーリエ変換面にフィルターを置くことで実現できます。このフィルターとして初期には振幅マスクなどが使用されていましたが、表示素

子としての液晶デバイスや動画ホログラムの技術の進展により、実時間かつ全光学的にフィルター関数を変化させることができるようになりました。この原理はフォトニックネットワークにおいて全光ラベル処理にも応用されています。例えば図 1 に示すように、光パルスの時間情報のラベルを空間情報へ変換する部分と、ホログラフィックに光ラベルを多重記録/再生する認識部分から構成されている自由空間型全光ラベルプロセッサが提案されています<sup>1)</sup>。このプロセッサでは、時系列で入力されてくる光ラベルは回折格子により分散され、時間情報と空間情報が混ざり合った状態となり、分散された光ラベルはフーリエ変換を投影した空間パターンが角度多重スペクトルホログラムに入射します。角度多重スペクトルホログラムにあらかじめ記録されているラベルが入射すると、角度に応じて平行光が発生し、レンズを介して自己相関ピークが検出される仕組みです。この手法により、複数のラベルを一括で認識でき、フォトニックネットワークにおけるラベルの数分のプロセッサを並べなければならないという問題を解決することができます。ラベルプロセッサの超高速化・小型化・省電力化にも非常に有効な技術といえます。計算機ホログラムを用いた角度多重の設計とシミュレーションによる評価により、64 pixel サイズ、量子化数 8、位相変調量  $2\pi$  の 5 多重の角度ホログラムで自己相関ピークと相互

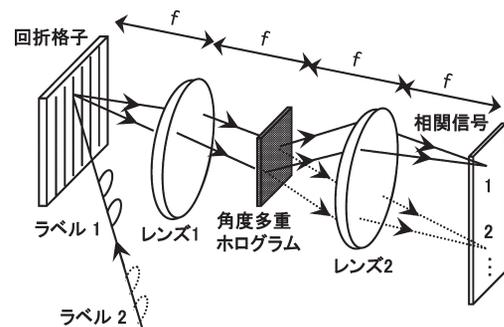


図1 全光ラベルプロセッサの例<sup>1)</sup>。

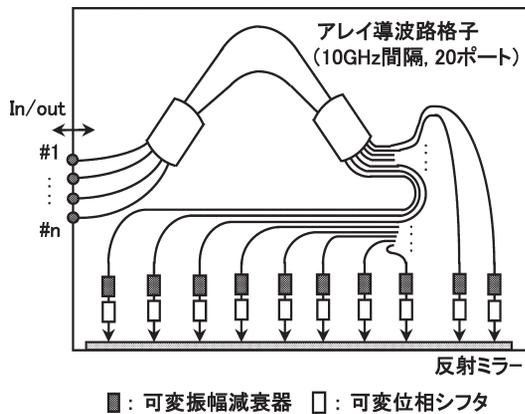


図2 導波路型 OSS の構成<sup>2)</sup>。

相関ピークの識別ができることが確認されています<sup>1)</sup>。

一方、時間と周波数における光スペクトル信号処理は、フーリエ変換に基づいています。例えばモード同期レーザーによって生成されるパルス時間幅 2 ps, 繰り返し周波数 10 GHz の光パルスは、光周波数を横軸に取った場合、光周波数間隔は 10 GHz (0.08 nm) になるという 1 対 1 の関係が成り立ちます。フェムト秒パルスともなるとテラヘルツの広帯域をもつ光周波数コムを出していることになり、この原理を応用した光シンセサイザの開発も進んでいます。フォトニックネットワーク用光機能デバイスの例では図2のようにアレイ導波路格子 (AWG: arrayed waveguide grating) の出力面各チャンネル上に可変振幅減衰器と可変位相シフター、その延長上にミラーを設置した導波路型光波シンセサイザ (OSS: optical spectrum synthesizer) が提案されています<sup>2)</sup>。この導波路型 OSS に入力された光パルスは、AWG でフーリエ変換されます。スペクトル成分は、可変振幅減衰器と可変位相シフターにより、それぞれ変調され生成したい時間信号に変換されます。これにより、直接変調が困難な数 GHz~THz オーダーの任意の超高速光信号を生成・操作できるのです。また、光パルス列の繰り返しレート変換、分散補償および光符号・復号化に導

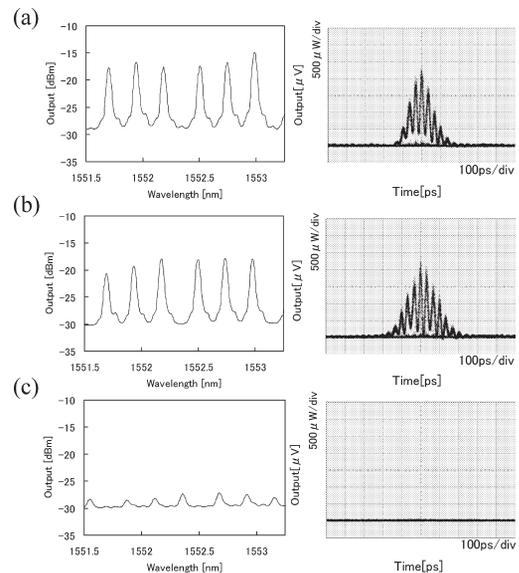


図3 OSS を用いた光符号・復号化の実験結果例。(a) ポート #1 で符号化されたスペクトルとパルス波形, (b) ポート #11 で復号化されたスペクトルとパルス波形 (一致の場合), (c) ポート #3 で復号化されたスペクトルとパルス波形 (不一致の場合)。

波路型 OSS が有効であることも実証されています<sup>2)</sup>。さらに、OSS に周回性 AWG を用いると、AWG のスペクトルシフトの効果で入力ポートを変化させることで符号化されたパターンがシフトし、1 台の OSS でポート数分の光符号ラベルを生成することができるのです。図3は光符号・復号化の実証実験例であり、マルチポート導波路型 OSS のポート #1 を使用して符号化を行い、復号化を行った結果、ポート #11 で符号化されたラベルと一致するスペクトルが取り出され、それ以外のポート (例 #3) ではほぼ出力が得られなかったことを示しています。導波路型 OSS にフーリエ変換素子として AWG を使用する場合、スペクトル帯域の変調有効帯域が free spectrum range に制約されるため、最近では入力光信号のフーリエ変換素子としてグレーティングを使用した variable beam splitter (VBS) も提案されています<sup>3)</sup>。

加えて、空間領域では自由空間内や導波路中の空

間伝搬の理論が確立されており、数値計算を用いて正確な波面制御デバイスを設計できるようになってきました。また、波面制御デバイスやフィルタリング技術を駆使し、複合的な光スペクトル信号処理を行うシステムも実用レベルに近づいています。フィルター等の設計では計算機プログラムも活用されています。近年では、前述のフォトニックネットワーク用全光ラベルプロセッサなどに活用されているように、高精度な計算機プログラムの理論が提案され、それにより設計された波面制御パターンはナノオーダーの加工技術で作製され、より自在に光信号を制御できるデバイスが実現しています。AWGを用いた処理系ではAWGの平面光波回路の外側の自由空間上に入射信号光のスペクトルが結像されるように構成され、結像面に反射型の空間フィルターが配置された構成が提案されています<sup>4)</sup>。これにより、空間フィルターから反射した光は再びAWGを戻り、PLC入力部に取り付けられたファイバーに出力される反射型の構成であり、連続的なスペクトル分布を取り出し、制御することができます。空間フィルターが曲面ではなく、平面であるため、信号光に対して分散をもつこととなりますが、これは空間フィルター設計時にその分散を補償するように設計することで解決できます。このような自由空間型デバイスと導波路型デバイスの利点を組み合わせることでサブピコ秒の光パルスを扱うために必要な時間窓の確保と装置のコンパクト化の両方を満たすことができるようになります。

これまでに具現化されている光スペクトル処理技術だけではなく、複合的処理技術を駆使し、光速・

位相・量子状態などの制御に基づく新たな光スペクトル信号処理を実現することにより、時間や空間の間の壁を大幅に低くする柔軟で信頼性の高い光ネットワークや光セキュリティーが実現できると考えられます。また、これらの技術は音楽や、映像などの大容量コンテンツの流通増大などによる情報トラフィックの急増や時間変動の拡大、ノードでのボトルネック顕在化などのマルチメディア技術における課題の解決を促すことになるでしょう。総合的かつ革新的な光スペクトル処理技術の成果が豊かな未来社会を構築していくことが期待されており、関連分野の研究開発の進展も大いに期待されています。

(日本女子大・駒井友紀)

## 文 献

- 1) N. Kawakami, K. Shimizu, N. Wada, F. Kubota and K. Kodate: "All-optical holographic label processing for photonic packet switching," *Opt. Rev.*, **11** (2004) 126-131.
- 2) F. Moritsuka, N. Wada, T. Sakamoto, T. Kawanishi, Y. Komai, S. Anzai, M. Izutsu and K. Kodate: "Multiple optical code-label processing using multi-wavelength frequency comb generator and multiport optical spectrum synthesizer," *Opt. Express*, **15** (2007) 7515-7521.
- 3) S. Anzai, Y. Komai, M. Mieno, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki and K. Kodate: "Repetition rate and central wavelength tunable terahertz optical clock generation using variable bandwidth spectrum shaper," *OECC/IOOC 2007* (Yokohama, Japan), 11D2-2 (2007) 180-181.
- 4) H. Tsuda, K. Okamoto, T. Ishii, K. Naganuma, Y. Inoue, G. Takenouchi and T. Kurokawa: "Second- and third-order dispersion compensator using a high-resolution arrayed-waveguide grating," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11** (1999) 569-571.