

SEMINAR REPORT

高速光信号波形の合成とその応用



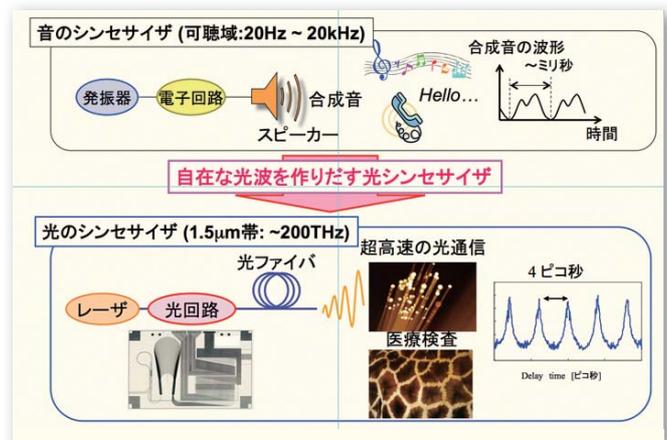
本日は、高速光信号波形の合成の背景を説明し、次に、高速光信号波形の合成について紹介します。まず波形合成の原理と、我々が光パルスシンセサイザと呼んでいる、光波形を合成するためのデバイスを紹介し、続いて、光波形の合成の例を紹介します。最後に、合成波形の応用に関して、光ファイバ中に伝搬させた短パルス伝搬の解析と、合成したパルスを用いたスーパーコンティニューム生成について紹介します。

背景

電気信号の合成は広く行われています。図1の「光のシンセサイザを目指して」にあるように、音のシンセサイザは発振器から電子回路を通してスピーカーで合成音を鳴らします。CDにデジタル保存された音楽を鳴らしたり、電話のように一度デジタル化した音声信号を通信した後に再生したりしています。ある周波数までの電気的な信号を合成する技術は現在では成熟しています。

我々は、電気信号と同様に、光領域でも自在な光波を生成したいと、光のシンセサイザを研究しています。使用する波長帯は通信波長帯の $1.5\mu\text{m}$ 帯で、 200THz 程の中心周波数の光を使用しています。光の場合は発振器に対応するのはレーザーで、電子回路に対応するのは光回路です。さらに光ファイバを組み合わせることによって自在な光波の合成を目指しています。

応用例としては、超高速の光通信のための信号光パルスや、医療用の光計測に使う光源などを考えています。



〈図1〉光のシンセサイザを目指して

高速光信号波形の合成

(1) 光信号合成の原理

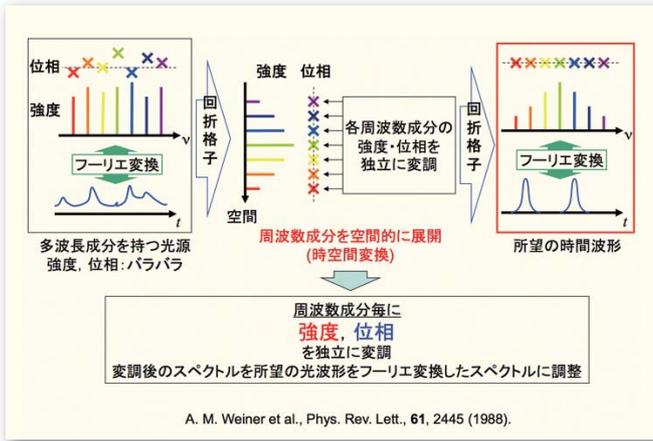
通常、光信号の波形は変調器を使って生成します。PSKやQAMなど高度な多値変調を行うためには、強度だけでなく位相も利用する必要があります。強度変調器の場合は、電圧に対して透過率が変化する特性を使って変調します。また、位相変調器の場合は、電圧に対して位相が線形的に変化する特性を使って変調します。PSKやQAMなどの信号の生成では、強度変調器と位相変調器を同期して駆動します。

10Gbps 程度までは問題ないのですが、 100Gbps 以上の高速になると、原理的には可能ですが、変調器駆動用の電気信号の生成に問題が生じ、時間的に変化する光波形を電気信号の時間変化で駆動することは難しくなります。

そこで、光信号の見方を変えてみます。

一定の繰り返し周波数のパルスの場合、光信号の周波数成分を考えると、パルス幅で決まるスペクトル幅を持ち、位相は揃っています。この時間波形と周波数スペクトルは1対1で対応していますので、光の周波数スペクトルを任意に生成することができれば、逆に任意の時間波形を生成することができます。

これは重ね合わせの原理と同じ考え方で、多くの周波数の異なる信号を干渉させると、位相が揃っていなければ乱れた波形になりますが、位相を揃えれば、揃った時間のタイミングでパル



〈図2〉時空間変換信号処理の概要

スになります。それぞれの周波数成分の強度も調整すれば、パルスの形を所望の形状に制御することができます。

そのために時空間変換に基づく信号処理をします。その概要を図2に示します。

光の周波数の強度と位相のスペクトルは、時間波形とフーリエ変換の関係がありますから、まず回折格子を用いて各色の光を空間的に異なる位置に展開し、それぞれの強度と位相を強度変調器と位相変調器を使って独立に制御します。空間的に展開した全ての成分を再度回折格子で同じ空間に合わせると干渉して、そのスペクトルの逆フーリエ変換である時間波形を合成することができます。周波数成分毎に強度と位相を独立に変調するために、時間軸の波形を空間軸のスペクトルに変換するので時空間変換と呼んでいます。

表1は「時間軸変調と周波数軸変調」の比較です。

光波形を生成するためには、時間軸と周波数軸の変調を用いることができます。それらは表1の様な違いがありますが、どちらが良いということではなく、一長一短があり、適切な場面で選択する必要があります。

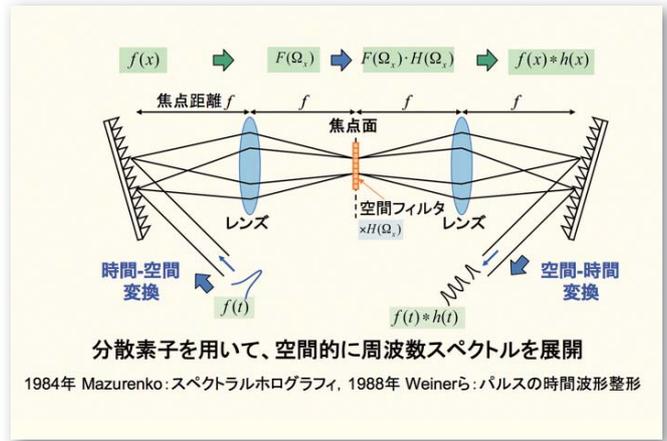
図3に「回折格子を用いた時空間変換信号処理」の模式図を示します。

回折格子によって光パルスの周波数スペクトルを空間軸に展開します。レンズを透過した光は焦点位置でフーリエ変換されるという原理がありますので、ここに強度変調と位相変調をするためのフィルタを置きます。フィルタ透過光をもう一度、レンズと回折格子に通して時間軸に戻すと、時空間変換信号処理によるパルスの合成ができます。このフィルタを多数の空間変調器に変更すれば、生成波形を可変にすることもできます。

回折格子2つとレンズ2枚を使うというこの空間系の方法が

〈表1〉時間軸・周波数変調の比較

	時間軸変調	周波数軸変調 (時空間変換)
変調信号の速度	光信号波形と同等	固定 or 低速
変調器の数	強度変調器:1台 位相変調器:1台	数10個以上
生成信号の柔軟さ	低い	高い
使用光源	単一周波数	広いスペクトル



〈図3〉回折格子を用いた時空間変換信号処理の模式図

最初に提案されましたが、空間系の場合は軸ずれを起こしやすく、安定性に欠けるので、我々はこれらの素子を1チップに集積した素子を開発しました。この素子を我々は光パルスシンセサイザと呼んでいます。

(2) 光パルスシンセサイザ

光パルスシンセサイザの構造は、アレイ導波路格子(AWG)とその出力の導波路が複数並んでおり、各導波路に強度変調器が1つ、位相変調器が1つずつ付いた構造をしています。

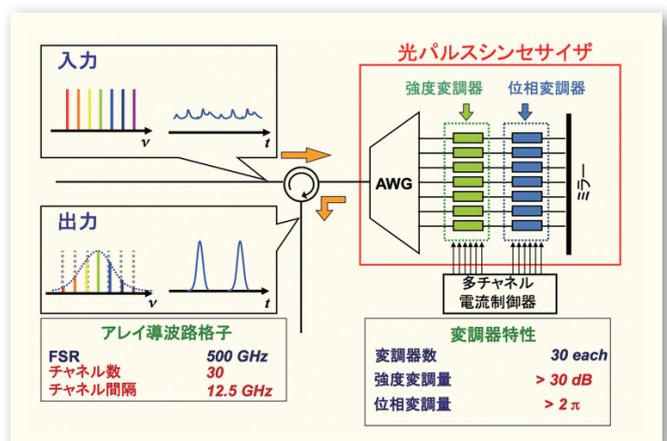
図4に「光パルスシンセサイザの動作模式図」を示します。

AWGは平面導波路型の回折格子です。スラブ導波路から多くの長さの違う導波路に同位相で光を入射し、導波路の長さの差によって光が伝搬したときの位相の変化量が異なることを利用して、波長によって出射される角度を変えることができます。

回折格子を使用する場合はレンズなどを組み合わせるため全体のサイズが大きくなり、また、光信号のファイバへの入出力にレンズを使用するためファイバとの親和性が良くないことから、空間光学系は集積化には適していません。

AWGの場合は、光ファイバと同様にガラス材料で作りますので、光ファイバとの親和性は大変良くなります。構造的に光ファイバと似た構造になりますので繋ぎやすくなります。また、1枚の平面導波路上に作り込むことができるので、軸ずれなどがなく集積化も容易です。

AWGに光周波数コムと呼ばれている、周波数が等間隔に並んでいる光の櫛状スペクトルを持つ光を入れると、各周波数の光が別々の導波路に出射されます。各周波数成分の光を強度変



〈図4〉光パルスシンセサイザの動作模式図

調器と位相変調器を使って独立に制御することができるようになってきました。

我々が用いているのは、周波数間隔が12.5GHzのコムを異なる導波路に分岐できるAWGです。

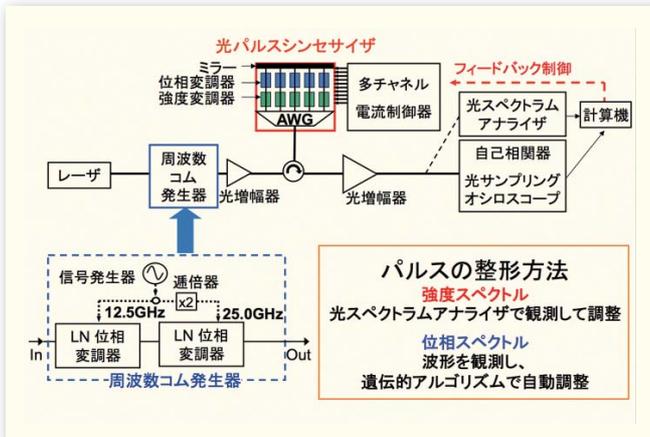
光パルスシンセサイザに光を入射すると、AWGにより12.5GHzの間隔で光が別々の導波路に出てきます。各導波路には平面導波路型の強度変調器、位相変調器がそれぞれ1つずつ備えられていて、これらを独立に変調します。変調された光は端面に蒸着したミラーで反射して、同じ経路を通り、光が同じ導波路から入出力される構成になっています。石英ですので高速に変調することはできませんが、熱による屈折率変化を用いて強度変調と位相変調を行っています。

強度変調器は30dB以上の消光比を持ち、位相変調器は 2π (1回転)以上の位相変化を与えることができます。これら強度変調器と位相変調器を使えば、任意の強度と位相のスペクトルを生成することができます。

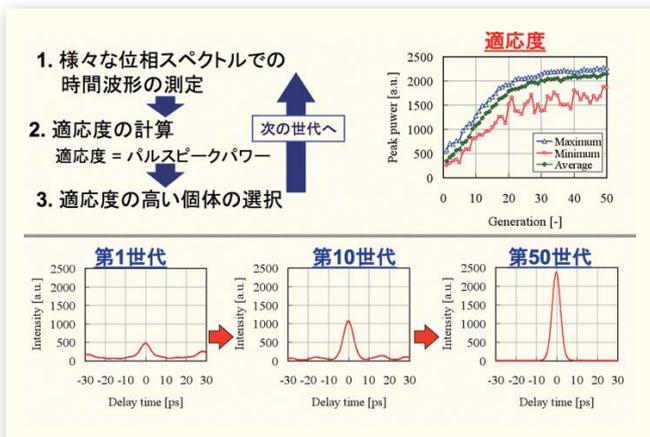
我々は単一周波数の光源を市販のニオブ酸リチウム(LN)の位相変調器2台で変調して光周波数コムを生成しています。レーザからの光は単一周波数ですが、位相変調器から出てくる信号は、30本以上の変調サイドバンドを持っており、こうして生成した光周波数コムを種として光の信号波形を合成します。

図5に「光波形合成の基本実験系」を示します。

まず、単一周波数のレーザから光周波数コムを発生し、増幅器で損失を補償します。強度スペクトルは光スペクトラムアナライザで直接観測できるため、所望の光信号の波形をフーリエ変換した強度スペクトルに合致するように、それぞれの強度変調器を駆動します。それに対して、位相スペクトルは直接的に観測



〈図5〉光波形合成の基本実験系



〈図6〉遺伝的アルゴリズムによる位相スペクトルの制御

するのが難しいので、出力波形を観測し、フィードバック制御によって目標の波形に近づくように位相変調器を制御しています。

(3) 光波形合成例の紹介

我々は図6に示す遺伝的アルゴリズムという方式で位相スペクトルの制御を行っています。色々な位相スペクトルでの時間波形を測定して、測定した波形の適応度を計算します。適応度とはどれだけ目標の波形に一致しているかの指標で、適応度の高い個体を選択して、また次の世代の個体を生成・測定・評価を繰り返して最適化する方法です。

図6のように最初の世代は、位相が揃っていないので、あまりきれいなパルスになっていませんが、第10世代では少しパルスに近くなり、第50世代になればきれいなパルスになります。このようなフィードバック制御をして位相スペクトルを調整しています。

パルスのピークパワーを適応度とする他に、目標波形との差分が小さくなるようなフィードバック制御も行っています。

ガウシアンパルスや sech^2 (ハイパボリックセカンド) 型パルスも合成することができます。 sech^2 型パルスとは、光通信でソリトンのパルスと呼ばれているものです。

変調の仕方を変えると、同じ光源、同じデバイスを使って、パルス形状を選択したり、幅を変更することもできます。

目標波形のフーリエ変換のスペクトルになるように制御すればよいので、矩形波、三角波、のこぎり状の波形、光バケットなども生成することができます。

合成光信号波形の応用例

(1) 光ファイバ中の短パルス伝搬の実験的解析

我々は最近、合成したパルスファイバに伝搬させて出力されたパルスを解析することで、伝送路の特性を解析できるのではないかと検討しています。

伝送路のファイバには波長分散、光学非線形性という2つの光波形伝搬に関わる重要なパラメータがあります。

波長分散とは光の波長毎に進む速度が異なるということです。最初は位相が揃ったきれいなパルスでも、波長によって進む速度が違うので、光ファイバを伝搬するにつれてパルスの波形が崩れていきます。波長分散の影響は、ファイバの分散パラメータDと伝搬距離の積で決まります。

非線形性光学効果の代表的なものが、高強度の光によりファイバ材料の石英ガラス自体の屈折率が変化する光カー効果です。

屈折率には線形屈折率と非線形屈折率があります。光強度が強くなると、非線形感受率 n_2 の係数で決まる屈折率変化が起きます。パルスのような場合は、時間によって光の強度が弱い部分と強い部分がありますので、強度が弱い部分は屈折率が低く、強度が強ければ屈折率が高くなり、その結果時間的に位相変調が掛かることと等価になります。

位相変調が掛かるということは、周波数変調が掛かって、最終的にはスペクトルの拡大が起こります。非線形光学効果を使えばスペクトルの拡大ができるということです。この場合は、パルスが持っている強度の時間波形に従って自分自身の位相を変

調するので、自己位相変調と呼ばれています。

波長分散と光カー効果の2つが釣り合うパワーで光ファイバの中に入れると、パルスの波形が入射側と出射側で変化せずに伝搬するというパワーの平衡点があります。この時のパルスがソリトンです。

ソリトンには、ブライトソリトンとダークソリトンの2種類があります。通常、ソリトンという場合はブライトソリトンです。時間的に背景強度がなく強度が存在するパルス状の部分がブライトソリトンと呼ばれており、それに対してある一定背景強度の一部が時間的に窪んだ部分をダークソリトンと呼んでいます。

これらのソリトンは光ファイバの分散パラメータ D が正か負か、どちらの場合で波形を維持するかの違いです。正の場合は異常分散と呼ばれている光ファイバで、負の場合は正常分散と呼ばれている光ファイバです。正の場合にはブライトソリトンのみが、負の場合にはダークソリトンのみが波形歪みのないソリトン伝搬をします。

ブライトソリトンと大きく異なるダークソリトンの特徴は、パルスの窪みの部分で π の位相シフトをすることです。別の見方をすれば、電界振幅がパルスの中心でプラスからマイナスに変化しているという表し方もできます。通常の方法ではこのような特殊な形状を持つダークソリトンの生成が困難なので、実験的な研究はあまりされませんでした。我々は光パルスシンセサイザでダークソリトンを生成し、実験的にファイバ中のソリトン伝搬について解析しました。

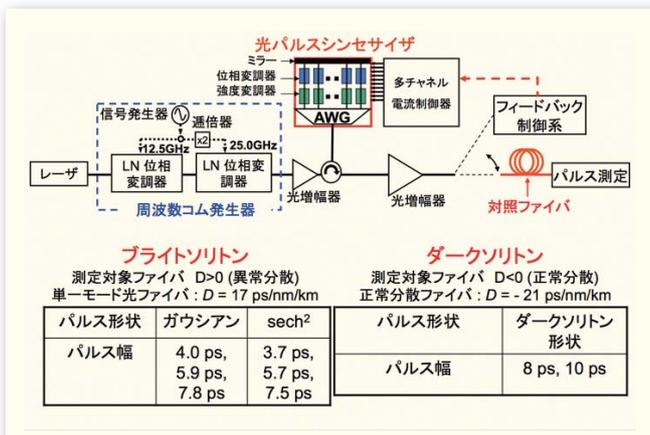
図7に「短パルスのファイバ伝搬特性測定の実験系」を示します。

ブライトソリトンの場合は、通常、光通信でよく用いられるシングルモードファイバを使い、ガウシアンとソリトン型のパルスを色々なパルス幅で伝搬させました。

ダークソリトンの場合は正常分散ファイバと呼ばれる特殊なファイバを使い、パルス幅が8psと10psのもので実験しました。

ブライトソリトンの場合は、ピーク強度が弱いとパルスが広がってしまいますが、ソリトン条件に合うようにピーク強度を選ぶと、入射と出射のパルスの形が変わらずに出力されました。

ダークソリトンの場合も、ピーク強度が弱いとパルスが広がり、ピーク強度が強くなるとパルスが細くなります。ブライトソリトンと同様に非線形現象と分散がつり合うようなピーク強度で入力すると、入力と出力の波形が一致します。ソリトン伝搬に必要なピーク強度は理論的にパルス幅の2乗に反比例する形になり、我々の実験結果は理論と良く一致しています。



〈図7〉短パルスのファイバ伝搬特性測定の実験系

伝搬シミュレーションの結果も我々の実験結果とよく一致しました。ピーク強度が弱い場合もピーク強度が強い場合も、よく一致する結果が得られました。その結果、ファイバの特性が正確にシミュレーションパラメータに反映されていることも判りました。逆の見方では、ファイバの持っている特性が測定結果から解析できるということになります。

(2) スーパーコンティニューム生成(広帯域光周波数コム生成)

2つ目の応用例としてスーパーコンティニューム生成について紹介します。スーパーコンティニュームとは非線形効果を用いて拡大したスペクトルを持つ光を指します。通常は、ピーク強度の高いフェムト秒のパルスレーザを高非線形ファイバに伝搬させる方法で生成します。

通常はフェムト秒のパルスレーザは、パルスの繰り返し周波数が100MHz程です。繰り返し周波数がスペクトルの周波数間隔になりますので、繰り返し周波数100 MHzの場合は100 MHz間隔でスペクトルを持つ広帯域な光源(スーパーコンティニューム)が得られます。

この方式は作製したパルスレーザの繰り返し間隔で周波数間隔が決まってしまうので、周波数間隔の変更は困難です。

我々は、繰り返し間隔が広く、かつ、周波数の間隔が変更できることを目的に、光パルスシンセサイザで発生したパルスによるスーパーコンティニューム生成の研究を進めています。

光パルスシンセサイザを用いる場合は、光周波数コム発生器を電気信号で駆動して光波形の種となる光周波数コムを生成しますが、この信号の周波数を変更すると周波数間隔が変わるので、周波数間隔可変で、かつ12.5GHzという周波数間隔の広いスーパーコンティニュームが実現できます。

10GHz以上の間隔を持つ周波数コムの良い点は、波長分割多重通信の多波長光源、分光用光源、天文学用分光器の校正用光源などに使えることです。

スーパーコンティニュームは、光パルスシンセサイザで生成した繰り返し周波数12.5GHzのパルスを高非線形ファイバに伝搬させることで生成しました。我々の使用したファイバの場合には、同じファイバにガウシアン型とsech²型パルスとでは、スペクトルが異なるスーパーコンティニュームが生成されます。sech²の方がフラットな形で、ガウシアンの場合は反ったような形が得られます。光ファイバの特性を変えるのは難しいのですが、入力パルスの特性を変えることで、同じファイバでも出てくるスペクトルをコントロールすることができます。

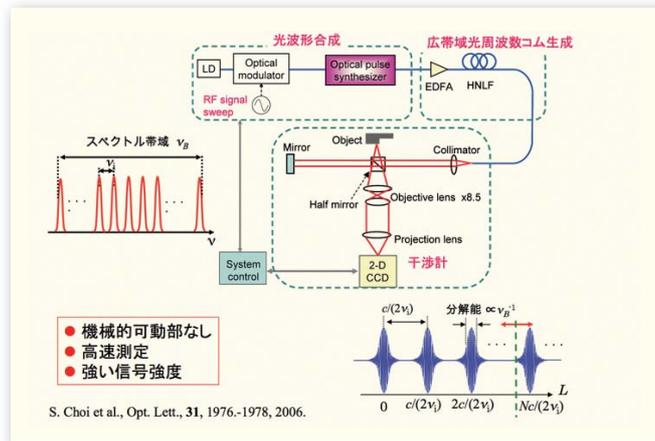
最後にスーパーコンティニューム光を表面形状計測の光源として利用した応用例を紹介します。

図8は「光周波数コムを用いた表面形状計測の原理模式図」です。(次頁)

光周波数コムの発生まではスーパーコンティニューム生成の系と同じですが、生成したスーパーコンティニュームをマイケルソン干渉計に導入して干渉計測を行います。

通常はミラーを動かして干渉波形を取るのですが、我々の場合は、周波数コムの間隔を変えることによって干渉波形を取得しています。

光周波数コムを干渉計測用の光源として使用すると、参照側とサンプル側の光路差に対して等間隔で干渉可能な位置が現れ、その間隔が周波数の間隔に反比例するので、周波数間隔



〈図8〉光周波数コムを用いた表面形状計測の原理模式図

を伸び縮みさせることで干渉波形を取ることができます。我々の手法は、機械的な可動部のなく、高速測定が可能という非常に大きな利点があります。この手法を用いて、3次元の表面形状計測に成功しています。

まとめ

本日は、時空間変換に基づく光波形の合成の原理を説明しました。我々が合成に用いている光パルスシンセサイザの紹介をし、生成した光パルスの例を示しました。合成パルスの応用例として、ファイバ中のパルスの伝搬特性の実験的な解析を挙げ、それに関連してブライトソリトンとダークソリトンの2つのソリトン伝搬の例を紹介しました。最後に、スーパーコンティニュームの生成では同じファイバであっても使用する光波形によって生成スペクトルが異なること、我々の合成技術を使えばスペクトルの調整ができることを示し、このようなスーパーコンティニューム光による可動部のない形状計測の例を紹介しました。

このような光波形合成の技術とスーパーコンティニューム生成技術は、計測・通信を含め応用範囲が広く、今後重要となる光技術と考えています。