

## 量子研究における SpectrumDDS の使用

任意波形発生器(AWG)は、量子研究に利用できる最も強力な柔軟な信号源の1つです。AWG は、発生器の帯域幅と波形メモリの長さの範囲内で、ほぼ無限の数の波形を生成できます。AWG を入手したら、有用な波形で埋める必要があります。従来、波形はデジタイザで記録するか、アプリケーション・ソフトウェアで生成して AWG に送信していましたが、新しい DDS オプションはこのパラダイムを変えます。

2024 年、スペクトラム・インスツルメンテーションは、16 ビット AWG の範囲に新しいダイレクト・デジタル・シンセサイザ(DDS)オプションを導入しました。DDS は、単一の固定周波数基準クロックから周期波形を生成する方法です。スペクトラム・インスツルメンテーションの AWG 用 DDS オプションは、複数の「DDS コア」を使用して、各キャリアが明確に定義された周波数、振幅、位相を持つマルチキャリア(マルチトーン)信号を生成します。

DDS オプションは、1 つの出力チャンネルで 1 つまたは複数の正弦波を生成するために必要な複雑さとデータポイントの数を大幅に削減します。DDS オプションは、多くの量子研究者、特に Rymax One コンソーシアム(<https://rymax.one/>)のチームと直接協力して、現代の量子研究のニーズに合わせて開発されました。このアプリケーションノートでは、量子研究プロジェクトにおける新しいオプションの使用に焦点を当てます。

## 音響光学ディフレクタ/変調器(AOD/AOM)の駆動

音響光学変調器(AOM)または偏向器(AOD)は、レーザー光の周波数(波長)、振幅、角度(位置)を動的に制御するために広く使用されています。それらは通常、圧電トランスデューサ(アクチュエータ)および吸収体と接触する結晶で構成されています。ピエゾトランスデューサは、通常 10MHz~1GHz の範囲の増幅された無線周波数信号(RF)によって駆動されます。アクチュエータは、結晶の局所屈折率を周期的に変化させる圧力波を結晶に誘導します[1]。

## 回折

光源(通常はレーザー)から来る光は、ブラッグ回折により結晶格子上で回折します。これにより、多数の回折次数、ひいては光線が生じます。これらのビームのそれぞれは、ブラッグ条件を満たす角度  $\theta_B$  で回折されます。

$$\sin(\theta_B) = m \frac{\lambda}{2\Lambda}$$

ここで、 $m=\dots,-2,-1,0,+1,+2,\dots$ は回折次数、 $\lambda$  は真空中の光の波長、 $\Lambda$  は音波の波長です。 $m=0$  の次数は回折されず、同じ方向に続いていることに注意してください。

## 周波数

水晶振動子内の音波はアクチュエータから吸収体に移動するため、波から回折された光はドップラーシフトを経験し(または、必要に応じて1つ以上のフォノンを吸収します)、その最終的な周波数( $f_m$ )は次式で与えられます。

$$f_m = f_0 + mF$$

ここで、 $f_0$ は入射光の周波数(通常は数百 THz)、 $F$  は結合された RF 信号の周波数に対応する音波の周波数です。

## 強度

回折の効率、入射光量( $I_0$ )に対する第1回折次数( $I_1$ )の光の割合によって特徴付けられ、次式で与えられます。

$$\frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_0}} \right)$$

ここで、 $P$  は RF 信号の電力、 $P_0$  は RF 信号からの電力が水晶振動子、そして最後に光にどれだけうまく結合されるかに依存する効率パラメータです。

## レーザー光のフルコントロール

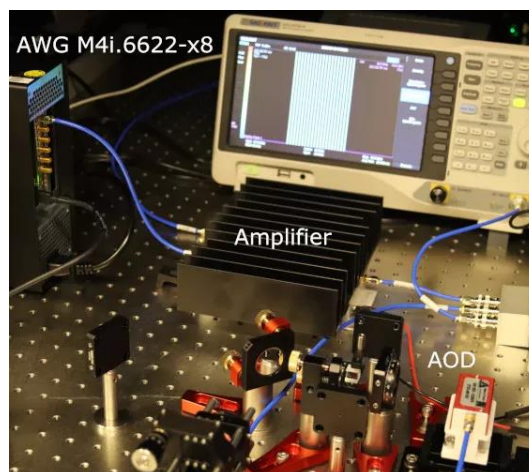
例えば、1次回折ビームを例にとると、RF 信号がレーザービームの角度(レンズの次は位置に相当)と、光の周波数と強度を制御していることは明らかです。これらの機能により、RF 光源の制御はレーザー光の制御の重要な部分になります。ここで、スペクトラム・インスツルメンテーションの AWG(M4i.66xx-x8 シリーズなど)の出番です。特

に、新しい DDS オプションと組み合わせることで、AOM/AOD を制御するために必要な RF 信号を生成するための理想的なツールとなります。

### AOD の光学セットアップ

図 1 は、AOD でスペクトラム計測器 AWG を使用するための可能なセットアップを示しています。AWG からの RF 信号(100MHz 程度)は、Mini Circuits(ZHL-5W-1)の 5W アンプを介して RF カプラ(ZDC-20-1+)に送られ、信号の一部(約 20dB 抑制)がスペクトラムアナライザ(Siglent SSA 3075X-R)に送られ、メイン出力が AOD に送られます。光ファイバーから出たクリーンアップされた低出力レーザービームは、偏光ビームスプリッターキューブ

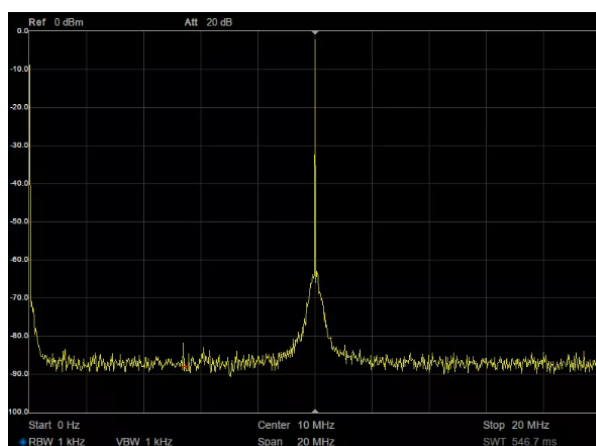
(PBS)を通過し、AOD に送られます。AOD から来る回折+1 次のビームは、カメラまたはイメージング用のホワイトスクリーンに送られます。



AOD を制御するための光学ベンチのセットアップ。左上隅には、PCIe ドッキングステーション内に AWG M4i.6622-x8 があります。真ん中には RF アンプ (MiniCircuits ZHL-5W-1) があります。右下隅には、AOD(AA Opto Electronic DTSX-400)があります。

### AWG のプログラミング - DDS オプション

Spectrum Instrumentation の Web サイトまたは [GitHub リポジトリ](#) (Python のみ) には、さまざまなプログラミング言語で使用できる多数のサンプルがあります。以下では、新しい Python パッケージに限定しません。Python パッケージを使用するには、まず GitHub のチュートリアル (インストールと基本的な使い方) を読んでください。ここでは、DDS-firmware オプションを使用しますが、DDS 専用の例については、GitHub の dds-examples フォルダを参照してください。



AWG の DDS ファームウェアで生成された 10MHz、-2dBm の単一の搬送波信号のスペクトル。

Card オブジェクトが初期化されて変数カードに格納され、必要なチャンネルが有効になり、Channels オブジェクトが変数チャンネルで初期化されると仮定します。この場合、1つのキャリアを生成するためのコードは次のとおりです。

```
# Setup DDS functionality
dds = spcm.DDS(card, channels=channels)
dds.reset()

# Start the test
dds[0].amp(50 * units.percent)
dds[0].freq(10 * units.MHz)

dds.exec_at_trg()
dds.write_to_card()
```

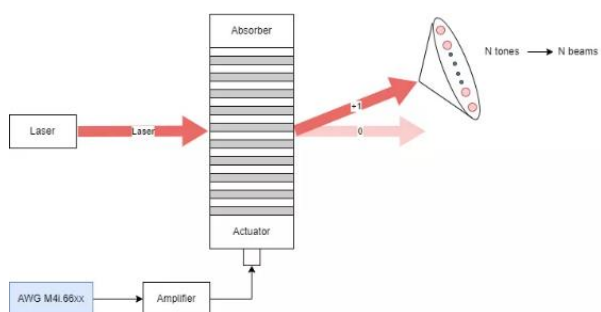
コード 1.フルレンジ振幅の 50%、周波数 10MHz のシングルキャリア。

カードトリガが到着すると、このコード スニペットは、周波数 10 MHz で、振幅が全振幅範囲の 50% の正弦波を生成します。得られた信号は、図 2 のスペクトラム・アナライザ(出力範囲を±1000mV に設定)に示されています。

### マルチキャリア信号

AOD で特に便利なのは、DDS ファームウェアのマルチキャリア機能です。現在のファームウェアでは、1つのチャンネルで最大 20 のキャリアを定義できます。これらの正弦波のそれぞれは、結晶内に特定の波長の連続密度波を生成します。走行波はそれぞれ光の回折格子として機能し、複数の回折パターンを作成します。1 次回折パターンに着目すると、AOD は角度と強度の異なる 20 個のビームを生成し、それぞれが上記の式で定義されます。したがって、個々の搬送波信号の周波数と振幅を制御すると、これらの各レーザービームの位置(角度)と強度を完全に制御できます。

図 3 に、このシステムの概略図を示します。スペクトラム計装 AWG(M4i.66xx シリーズ)は、周波数と振幅の両方を完全に制御して 20 トーンの信号を生成し、RF アンプ(MiniCircuits ZHL-5W-1 など)で増幅され、AOD(AA オプトエレクトロニクス DTSX-400 シリーズなど)に送られます。AOD を透過する



N 周波数の AOM/AOD を駆動する AWG の標準的なセットアップレーザービーム

ームは AOM によって回折され、N ビームが生成されます

レーザーは回折され、1次では、角度と強度を完全に制御できるNビームがあります。

20 キャリアのプログラミングは、Python パッケージ `spcm` を使用すると簡単です。以下のコードスニペットでは、これらのトーンがどのようにプログラムされるかを示しています。前と同様に、DDS オブジェクトを `card` オブジェクトと `channels` オブジェクトで初期化します。その後、DDS ファームウェアがリセットされます。NumPy と Pint units パッケージを使用して、90 MHz から 109 MHz までの値を持つ配列を 1 MHz 刻みで作成します。次に、すべての DDS コア(1つのアクティブ出力チャンネルの場合は20)を循環させ、各チャンネルの振幅と周波数を設定します。

```
dds = spcm.DDS(card, channels=channels)
dds.reset()

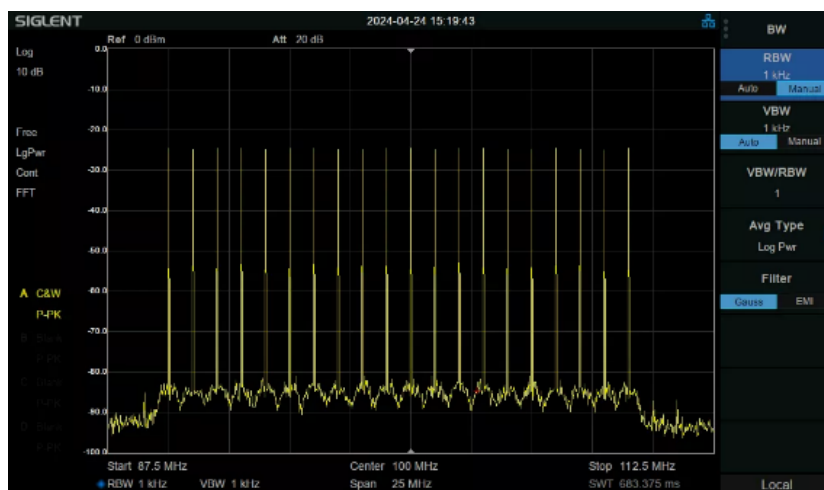
init_freq = np.array([90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109])

for core in dds:
    core.amp(45 * units.percent / len(init_freq))
    core.freq(init_freq[core])

dds.exec_at_trg()
dds.write_to_card()
```

コード 2.90MHz から 109MHz までの周波数を持つ 20 のキャリア(1MHz 刻み)。

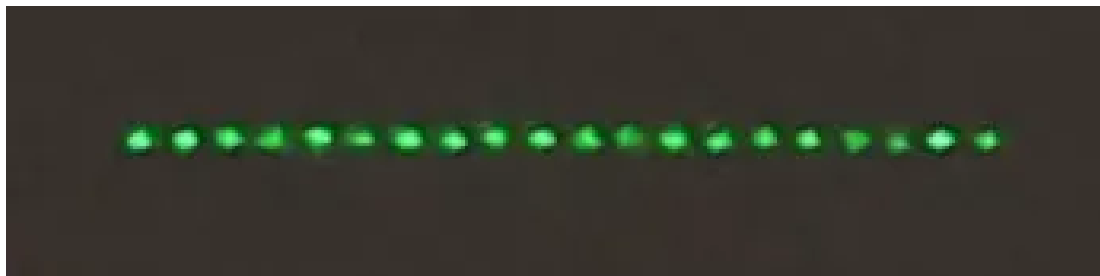
結果として得られる電気信号を図 4 に示します。この図は、スペクトラムアナライザが



90MHz から 109MHz までの 20 トーンのマルチキャリア信号のエネルギースペクトル(1MHz 刻み)。

らのプロットを示しています。横軸には 87.5MHz から 112.5MHz までの周波数軸があり、1kHz の分解能帯域幅(RBW)で録音を行います。縦軸には、50 Ω の負荷に対する信号のパワースペクトルが示されています。ご覧のとおり、20 のキャリアがあります。

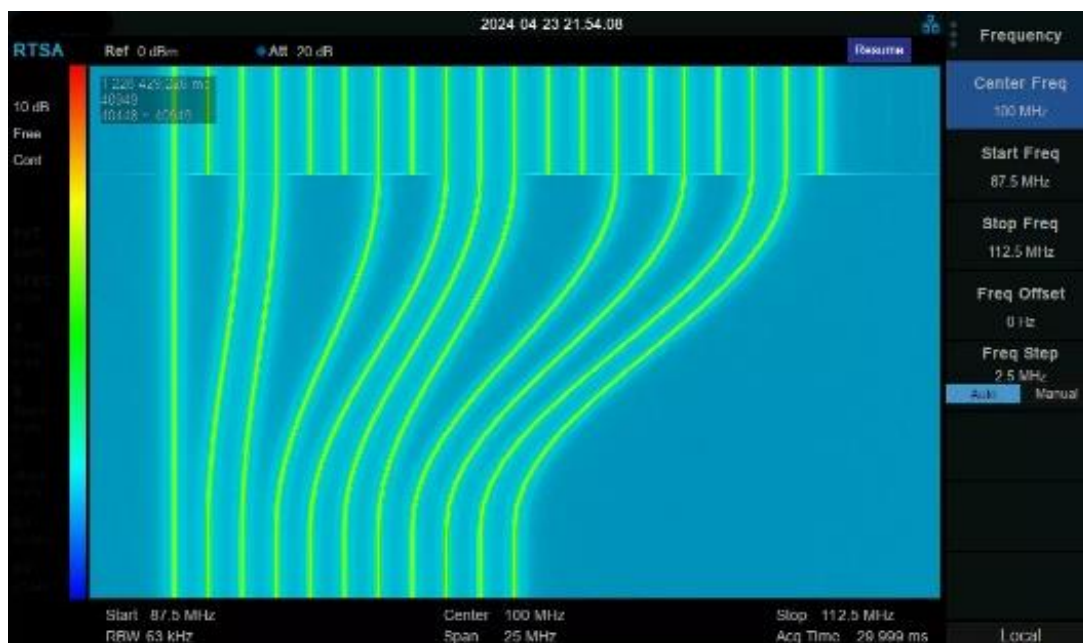
この信号を AOD に送ると(結晶を壊さないように、常に非常に低い電力で開始してく



レーザーの 1 次回折パターンを持つスクリーン上のカメラ画像。レーザーは、20 のキャリアを持つマルチトーン信号が供給される AOD を通過します。

ださい)、結晶を通過するレーザービームが回折され、レンズの後に得られる 1 次の回折パターンが図 5 に示されています。これらの各ビームは、移動(搬送周波数の変更)および/または軽量化、または明るく(搬送波振幅の変更)できます。例えば、原子がこれらのビームの中心に閉じ込められている場合、1 つのキャリアの周波数を変えると、原子は動き回ります。

RF 信号の搬送波の周波数を変更する例を図 6 に示します。この図は、時間の経過



リアルタイム・スペクトラム・アナライザ(RTSA)上のマルチキャリア信号のパワー密度スペクトル横軸は 87.5~112.5MHz の周波数に対応し、縦軸は 0(上)から 15 秒(下)までの時間に対応します。カラースケールは周波数における電力密度に対応し、青は低電力、黄色は高電力に対応した。したがって、黄色の線はキャリアに対応します。

に伴う電力密度プロットを示しています(リアルタイムスペクトル解析)。プロットの上

は time = 0 s の信号に対応し、下部は 15 秒後の信号に対応します。20 個のキャリアから開始し、約 3 秒後に 9 個のキャリアがオフになり、結果として得られるキャリアが元の周波数グリッド上に一緒に移動されます。この手順は、各キャリアがピンセットに対応するため、中性原子量子コンピューターにとって非常に便利です。原子ローディング後、ピンセット 2、5、6、8、12、13、15、17、20 が空になっていると想像する。これらのキャリアをオフにし(ラインストップ)、原子を含むピンセット(1、3、4、7、9、10、11、14、16、18、19)を S 字型のランプを使用して一緒に移動させ、原子の移動による加熱を最小限に抑えることができます。

対応するコードスニペット「キャリア周波数の s 字型ランプのコード 3 動的変化」は、ご要望に応じてご利用いただけます。

## 概要

DDS ファームウェアオプションは、量子研究分野に限定されることなく、量子研究分野での一般的な用途に合わせて調整されています(アプリケーションノート「Using Spectrum in various Applications」を参照)。このアプリケーションノートでは、DDS ファームウェアの具体的な用途の 1 つである AOM/AOD の制御について検討しました。DDS オプションは、RF 信号キャリアと回折レーザービームを直接接続することで、レーザービームの数(キャリア数)、その位置(キャリア周波数)、強度(キャリア振幅)を直接制御することができます。さらに、DDS オプションにはリニア・ダイナミック・ビヘイビアが組み込まれているため、周波数と振幅の非常に正確な変化をプログラムすることができます。

全体として、新しい DDS オプションは、現代の量子研究者のツールボックスにとって理想的なツールです。

- **リンクス**  
記事の PDF 版 [をダウンロード](#)
- リファレンス AA オプトエレクトロニクス、2013  
年: <http://www.aaoptoelectronic.com/wp-content/uploads/documents/AAOPTO-Theory2013-4.pdf>
- アプリケーションノート: [さまざまなアプリケーションでのスペクトラム DDS の使用\(英語\)](#)
- 製品ノート: [DDS モードの使用](#) の詳細をご覧ください。
- 1.25GS/s、400MHz の信号帯域幅を持つ 66xx AWG シリーズ: [66xx](#)
- [DDS モード](#) の詳細はこちら