

## 量子研究のためのダイレクトデジタルシンセサイザ

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、それを有用な波形で埋める必要があります。従来、その波形はデジタルで記録するか、アプリケーションソフトウェアで生成してAWGに送信されていましたが、新しいDDSオプションはこの概念を変えます。

Spectrum Instrumentationは、16ビットAWGのシリーズ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リファレンスクロックから周期的な波形を生成する方法です。Spectrum Instrumentation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の周波数、振幅、位相が明確に定義されたマルチキャリア(マルチトーン)信号を生成します。DDSオプションにより、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生成データが大幅に削減されます。DDSオプションは、現代の量子研究のニーズに合わせて多数の量子研究者特にRymax Oneコンソーシアム(<https://rymax.one/>)のチームと直接協力して開発されました。ここでは、量子研究プロジェクトでの新しいオプションの使用について説明します。

### 音響光学偏向器/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。これらは通常、圧電トランスデューサ(アクチュエータ)と吸収体と接触している結晶で構成されています。圧電トランスデューサは、通常10MHzから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内に圧力波を誘導し結晶の局所屈折率を定期的に変化させます。

### 偏向

光源(通常はレーザー)から発せられる光は、ブラッグ偏向により結晶格子上で偏向します。これにより多数の偏向次数つまり光線が生じます。

これらの光線はそれぞれ、ブラッグ条件を満たす角度 $\theta_B$ で偏向します:

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

ここで、 $m = \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots$ は偏向次数、 $\lambda$ は真空中の光の波長、 $\Lambda$ は音波の波長です。 $m = 0$ 次数は偏向されず同じ方向に続くことに注意してください。

### 周波数

結晶内の音波はアクチュエータから吸収体へと移動するため、音波から偏向された光はドップラーシフトを経験し(または1つ以上のフォノンを吸収し)、その最終周波数( $f_m$ )は次のように表されます:

$$f_m = f_0 + mF$$

ここで、 $f_0$ は入射光の周波数(通常は数百THz)で、 $F$ 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

偏向の効率は、入射光量( $I_0$ )に対する1次偏向次数( $I_1$ )の光の割合によって特徴付けられ、次のように表されます:

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

ここで、 $P$  は RF 信号の電力、 $P_0$  は RF 信号からの電力が結晶にどの程度結合され（最終的に光る）るかによって決まる効率パラメータです。

## レーザー光の完全な制御

たとえば1次偏向ビームについて考えると、上記からRF信号がレーザービームの角度（レンズの後は位置に対応）と光の周波数および強度を制御することは明らかです。これらの機能により、RF信号の制御はレーザー光を制御する上で重要な部分になります。ここで、Spectrum Instrumentation製のAWG(M4i.66xx-x8シリーズ)が役立ちます。特に、新しいDDSオプションと組み合わせると、AWGは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になります。

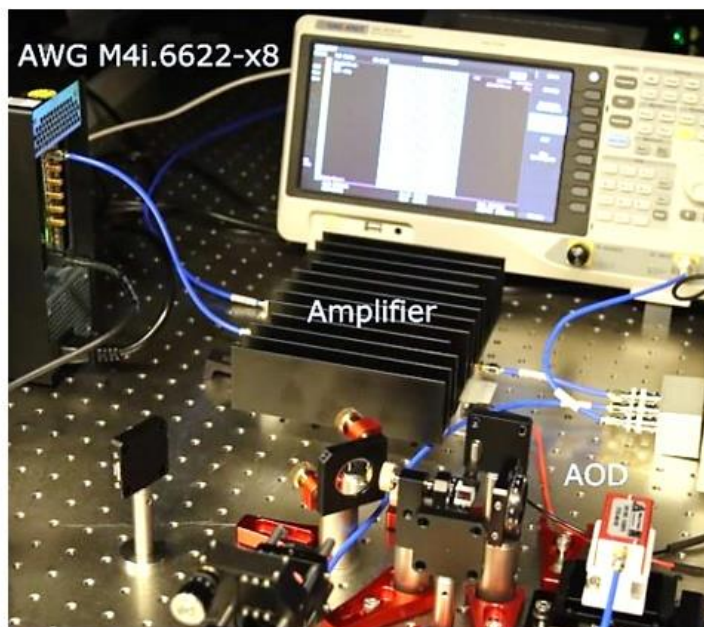


Figure 1. AODを制御するための光学ベンチ セットアップ  
左上隅にはPCIeドッキングステーション内にAWG M4i.6622-x8があります。中央にはRFアンプ (MiniCircuits ZHL-5W-1) があります。右下隅にはAOD (AA Opto Electronic DTSX-400) があります

## AODの光学セットアップ

Figure1 に、Spectrum

Instrumentation製AWGをAODと併用する場合のセットアップ例を示します。

AWGから送られるRF信号

(100MHz程度)は、MiniCircuit製の5Wアンプ(ZHL-5W-1)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。光ファイバーから送られる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から送

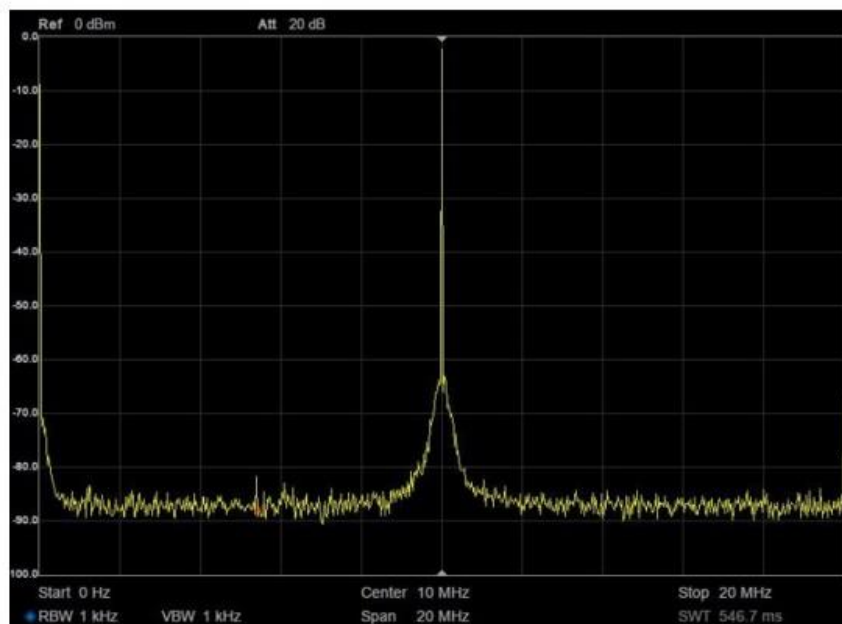


Figure 2. AWGのDDSファームウェアで生成された単一の10MHz、-2dBm キャリア信号のスペクトル

られる偏向された+1 次ビームは、カメラまたは画像用のホワイトスクリーンに送られます。

## AWG-DDS オプションのプログラミング

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の例が多数用意されています。以下では、新しい Python パッケージに限定して説明します。Python パッケージを使用するにはまず GitHub のチュートリアルを読んでください。このチュートリアルでは、インストールと基本的な使用方法が説明されています。ここでは、DDS ファームウェアオプションを使用します。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。

Card オブジェクトが初期化されて変数 card に格納され、必要なチャンネルが有効になっている、Channels オブジェクトが変数 channels で初期化されていると仮定します。

次に、単一のキャリアを生成するコードを示します：

```
# 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()
```

Code 1. フルレンジの振幅の50%と10MHzの周波数を持つ単一の搬送波

カードがトリガーを受け取ると、このコードスニペットは 10MHz の周波数と全振幅範囲の 50% の振幅を持つ正弦波を生成します。結果として得られる信号は、Figure 2 のスペクトラムアナライザ (出力範囲は±1000mV に設定) に表示されます。

## マルチキャリア信号

AOD に特に役立つのは、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、ユーザーは 1 つのチャンネルで最大 20 個のキャリアを定義できます。これらの正弦波はそれぞれ結晶内で特定の波長の連続密度波を作成します。連続波はそれぞれ光の偏向格子として機能し、複数の偏向パ

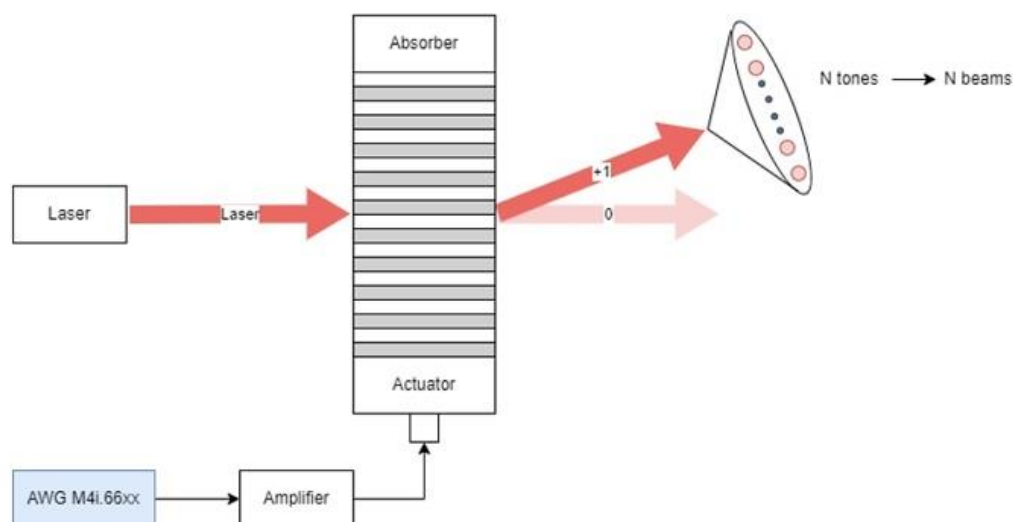


Figure 3. N周波数でAOM/AODを駆動するAWGの一般的なセットアップレーザービームはAOMによって偏向され、N本のビームが生成されます

ターンを作成します。1次偏向パターンに焦点を合わせると、AODは角度と強度が異なる20本のビームを作成します。それぞれのビームは上記の式で定義されます。したがって、それぞれのキャリア信号の周波数と振幅を制御するとそれらの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。

Figure 3にこのシステムの概略図を示します。Spectrum Instrumentation 製 AWG(M4i.66xx シリーズ)は周波数と振幅の両方を完全に制御できる20トーンの信号を作成し、RFアンプ(MiniCircuits ZHL-5W-1 など)で増幅してからAOD(AA Opto Electronic DTSX-400 シリーズなど)に送ります。AODを通過したレーザーは偏向され、1次では角度と強度を完全に制御できるN本のビームになります。

Pythonパッケージ `spcm` を使用すると、20個のキャリアを簡単にプログラミングできます。以下のコードスニペットで、これらのトーンのプログラミング方法を示しています。前の例と同様に、カードオブジェクトとチャンネルオブジェクトを使用してDDSオブジェクトを初期化します。次に、DDSファームウェアをリセットします。NumPyとPintユニットパッケージを使用して、1MHz刻みで90MHzから109MHzまでの値を持つ配列を作成します。次にすべてのDDSコア（アクティブな出力チャンネルが1つの場合は20）を一巡し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]) * units.MHz

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()
```

Code 2. 周波数が90MHzから109MHzまで1MHz刻みの20個のキャリア

結果として得られる電気信号を Figure 4 に示します。1MHz刻みで90MHzから109MHzまでの20個のトーンを持つマルチキャリア信号のエネルギースペクトルです。Figure 4は、スペクトラムアナライザから取得した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)で記録が行われます。縦軸には、50オームの負荷への信号のパワースペクトルが表示されます。図のとおりキャリアは20個あります。



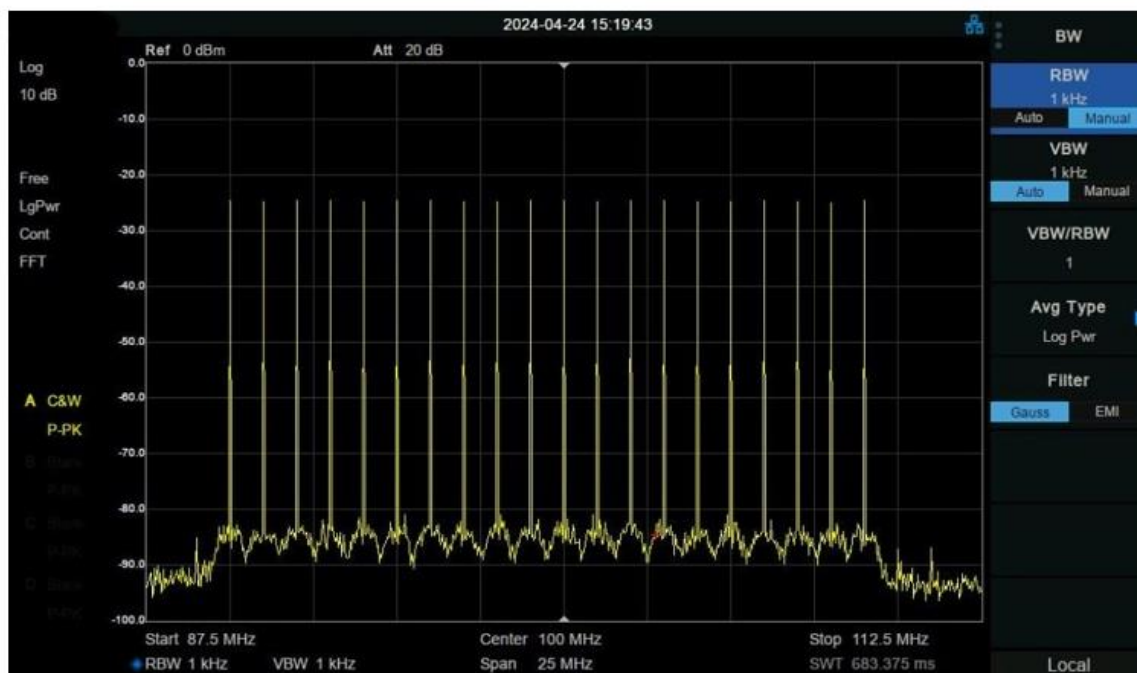


Figure 4. 90MHzから109MHzまで1MHz刻みで20トーンのマルチキャリア信号のエネルギー スペクトル

この信号（結晶を壊さないように常に非常に低いパワーから始めてください）を AOD に送信すると、結晶を通過するレーザービームが偏向されレンズ後の 1 次偏向パターンが Figure 5 に示されています。これらのビームは向きを変えたり（周波数の変更）、より明るくしたり（振幅の変更）することができます。たとえば、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、単一のキャリアの周波数を変更すると原子が動き回ります。



Figure 5. レーザーの1次偏向パターンを示すスクリーンのカメラ画像。レーザーは、20個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

RF 信号のキャリアの周波数を変更する例を Figure 6 に示します。この画像は時間の経過に伴う電力密度のプロット（リアルタイムスペクトル分析）を示しています。プロットの上部は、時間 = 0 秒の信号に対応し、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、結果として得られたキャリアが元の周波数グリッド上で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非常に役立ちます。原子のロード後、ピンセット 2、5、6、8、12、13、15、17、20 が空であると想像してください。これらのキャリアをオフにすると（ラインが停止します）、原子（1、3、4、7、9、10、11、14、16、18、19）を含むピンセットが S 字型の傾斜を使用して一緒に移動され、原子の移動による加熱が最小限に抑えられます。

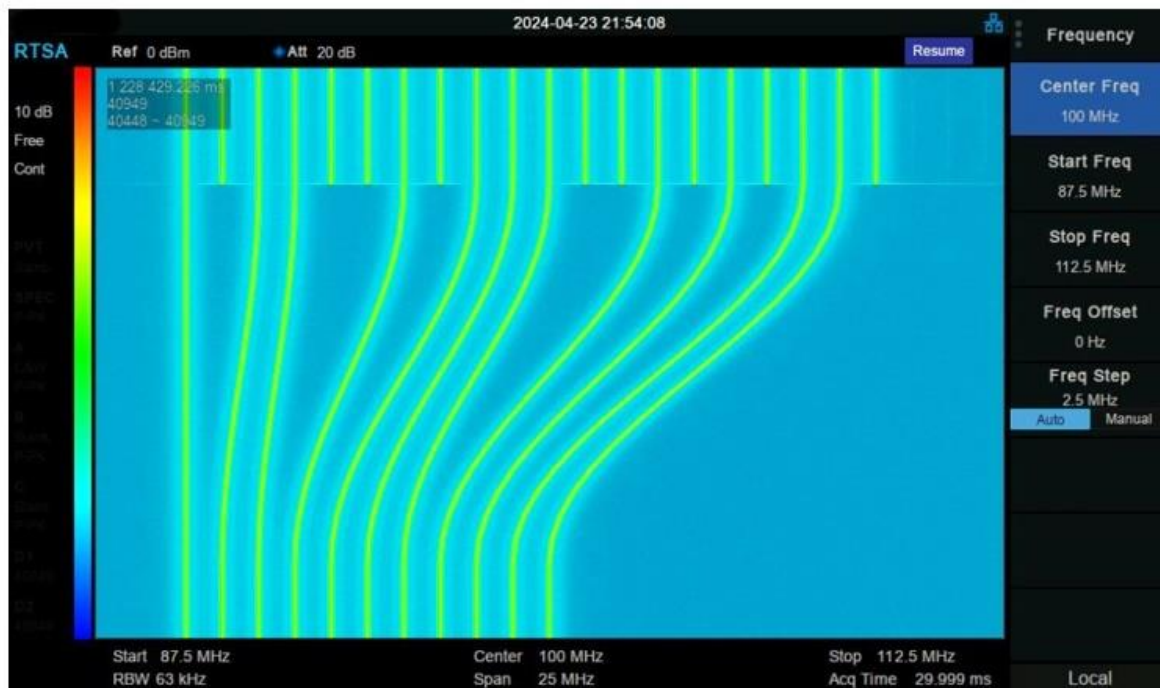


Figure 6.リアルタイムスペクトラムアナライザ (RTSA) 上のマルチキャリア信号の電力密度スペクトル。水平軸は87.5～112.5MHzの周波数に対応し、垂直軸は0 (上)～15秒 (下)の時間に対応します。カラスケールは周波数における電力密度に対応し、青は低電力、黄色は高電力に対応します。したがって、黄色の線はキャリアに対応します。

上記の画像に必要なコードを示す完全なコードスニペットは、別のドキュメントとして入手できます。

## まとめ

新しい DDS ファームウェアオプションは、量子研究の分野に限定されることなく量子研究の分野における一般的な用途に合わせて調整されています。このアプリケーションノートでは、DDS ファームウェアの1つの特定の用途である AOM/AOD の制御について調査しました。DDS オプションを使用すると、RF 信号キャリアと偏向レーザービームを直接接続してレーザービームの数（キャリアの数）、位置（キャリア周波数）、強度（キャリア振幅）を直接制御できます。さらに、DDS オプションには線形動的動作が組み込まれているため、ユーザーは周波数と振幅の非常に正確な変更をプログラムできます。新しい DDS オプションは現代の量子研究者に最適なツールです。



## Spectrum Instrumentation 社について

Spectrum 社は、Spectrum Systementwicklung Microelectronic GmbH として 1989 年に設立され、2017 年に Spectrum Instrumentation GmbH に改名されました。最も一般的な業界標準（PCIe、LXI、PXIe）で 500 を超える デジタイザおよびジェネレータ製品を作成するモジュール設計のパイオニアです。これら高性能の PC ベースのテスト&メジャーメントデザインは、電子信号の取得・生成および解析に使用されます。同社はドイツの Grosshansdorf に本社を置き、幅広い販売ネットワークを通じて世界中に製品を販売し、設計エンジニアによる優れたサポートを提供しています。Spectrum 社の詳細については、[www.spectrum-instrumentation.com](http://www.spectrum-instrumentation.com) を参照してください。