

レーダの原理とそのアプリケーション

レーダの基本原理：

レーダは、電波を使用して、航空機、船舶、宇宙船、誘導ミサイル、自動車、天候、地形などの移動および固定ターゲットの範囲、高度、方向、速度を識別するターゲット検出システムです。レーダディッシュ（またはアンテナ）は、マイクロ波レンジの電波のパルスを送信し、そのパス内のオブジェクトを反射させます。物体は、電波エネルギーのごく一部を、通常は送信機と同じ場所にあるディッシュまたはアンテナに返します。レーダ



が提供する情報には、ターゲットの方位と範囲、つまり位置が含まれます。したがって、このような位置決め的重要性が重要な分野で広く利用されています。

レーダアプリケーション：

レーダの最初の使用は、軍事目的で、空、地上、海のターゲットを見つけることでした。これは民間の分野で航空機、船舶、道路の用途に進化しました。航空機の場合、航空機にはレーダ装置が装備されており、経路内または障害物に近づいていることを警告し、正確な高度を読み取ります。彼らはレーダ支援システムを装備した空港に霧の中で着陸できます。そこでは、飛行機がレーダ画面で観測され、管制塔のオペレータがパイロットに方向を指示し誘導します。船舶レーダは、船舶の方位と距離を測定して他の船舶との衝突を防ぎ、海岸の範囲内にあるときは海上での位置固定に使用したり、島、ブイ、灯台などの他の固定基準に使用されたりします。車を運転する多くの人が、道路上の車両速度超過を監視するために警察が使用するレーダ銃を知っていると思います。レーダは軍事以外の多くの分野に利用されています。気象学者はレーダを使用して降水量を監視します。これは、天気予報の主要なツールとなり、雷雨、竜巻、ハリケーンなどを監視するために使用されています。地質学者は、特殊な地中探知レーダを使用して地殻の組成をマッピングします。

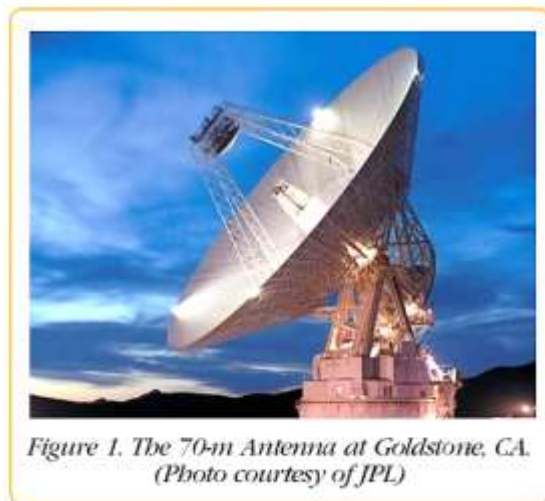


Figure 1. The 70-m Antenna at Goldstone, CA.
(Photo courtesy of JPL)

Figure 1 カリフォルニア州ゴールドストーンにある 70m アンテナ

コニカルスキャンレーダ :

コニカルスキャンシステムは、アンテナのボアサイトの片側にわずかに信号を送り、フィードホーンを回転させて、ローブをボアサイト線の周りに回転させます。ボアサイトを中心とするターゲットは、常にローブによってわずかに照らされ、強力なリターンを提供します。ターゲットが片側にずれている場合、ローブがその方向に向けられている場合にのみ点灯し、その結果、リターンが弱くなります。この信号は、アンテナがターゲットの方向に揃うように回転すると最大になります。この最大値を探してアンテナをその方向に動かすことでターゲットを自動的に追跡できます。

カリフォルニア州ゴールドストーンの直径 70m のアンテナを

Figure 1 に示します。円錐走査レーダの妨害は比較的簡単です。

ジャマーがしなければならないことは、レーダの周波数で、それが

最も強いリターンであると思わせるのに十分な強度で信号を送信することです。この種の妨害は、信号のタイミングをフィードの回転速度と同じにすることで、より効果的にすることができます。

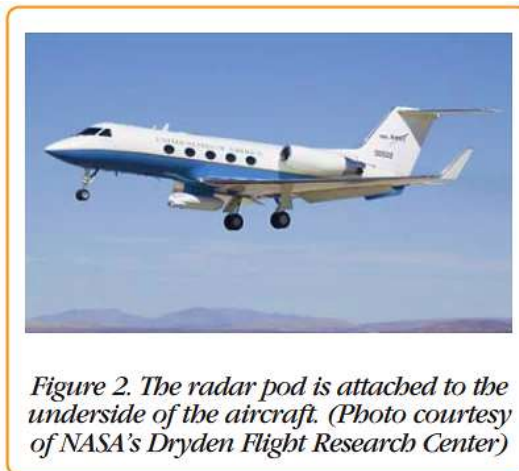


Figure 2. The radar pod is attached to the underside of the aircraft. (Photo courtesy of NASA's Dryden Flight Research Center)

Figure 2 UAVに取り付けた合成開口レーダポッド

フェーズドアレイレーダ :

Figure 2 は、合成開口レーダレーダーポッドが航空機の下側に取り付けられた UAV（無人航空機）です。このフェーズドアレイレーダは、適切に間隔を空けたアンテナエレメントの線形または 2 次元アレイのいずれかを使用することにより、それぞれ制御可能な位相シフトを持つ異なるステアリング方法を利用します。これにより、特定の方向で最大の強度を得るために、受信信号または送信信号が積極的に強化されます。フェーズドアレイレーダは物理的な動きを必要としないため、ビームは毎秒数千度でスキャンできます。多くの個別ターゲットを追跡するのに十分に速く、また広範囲の検索を実行することができます。

モノパルスレーダ :

モノパルスレーダは、構造的にコニカルスキャンシステムに似ていますが、固有の機能があります。信号をそのままアンテナから送信する代わりに、信号を分割しわずかに異なる方向にパルス信号を送信します。反射信号を受信すると、それらを別々に増幅し互いに比較します。これは、どの方向がより強いリターンを持っているかがわかります。これにより、照準に対するターゲットの一般的な方向を示します。この比較は 1 パルス中に実行されるため、ターゲット位置またはヘディングの変更は比較に影響しません。この比較を行うには、ビームの異なる部分を互いに区別する必要があります。これは、パルスを分割しそれぞれを別々に分極してから、わずかに軸から外れたフィードホーンのセットに送信することで実現されます。これにより、ボアサイト上でローブのセットが重なります。これらのローブは、通常の円錐スキャナーのように回転します。2 つの受信信号は再び分離され、1 つはパワーを反転して差を取得し、2 つが加算

されます。ターゲットが照準器の片側にある場合、結果の合計は正になります。反対側にある場合は負となります。ローブの間隔が狭い場合、このシステムは高い精度を実現できます。コニカルスキャンシステムは0.1度のポインティング精度を生成しますが、モノパルスレーダはこれを1桁以上改善します。これは、100kmの距離で10mの精度になります。耐妨害性は、コニカルスキャンシステムよりも向上しています。フィルタを挿入して、偏光されていない信号または一方向に偏光された信号を除去できます。このようなシステムと混同させるために、妨害信号はモノパルスレーダの偏光とタイミングを複製する必要があります。

モノパルスレーダ信号処理：

これは、典型的なモノパルスレーダーアプリケーションに関連する信号処理の実例です。Figure 3に示すように、システムは、受信信号が方位角、仰角、およびこれら2つの合計の3つのタイプで構成されるマルチエレメントアンテナを使用します。デジタル化および処理される信号は次のとおりです。

- A1 - A2 に等しい方位差または ΔA
- E1 - E2 に等しい標高差または ΔE
- A1 + A2 + E1 + E2 の合計に等しい合計チャンネル Σ
- Σ と ΔE 間の位相シフトにより、ターゲットの標高が決まる
- Σ と ΔA 間の位相シフトにより、ターゲットの方位角が決まる
- 信号のIF中心周波数は140 MHz、IF帯域幅は40 MHz
- 信号処理には、3チャンネルのA/Dコンバーターが必要

レーダの位置から15 km - 45 kmの距離にある航空機のターゲットを追跡すると仮定します。レーダ信号は、300,000 km/secに等しい光の速度で移動します。15 kmのターゲットの場合、レーダパルスの往復には $2 \times 15 \text{ km} \div 300,000 \text{ km/sec} = 100 \mu\text{sec}$ かかります。45 kmのターゲットの場合、往復には $2 \times 45 \div 300,000 \text{ km/sec} = 300 \mu\text{sec}$ かかります。Figure 4は、データの収集に必要なタイミングを示しています。 T_0 で50 μsec パルスを生成します。

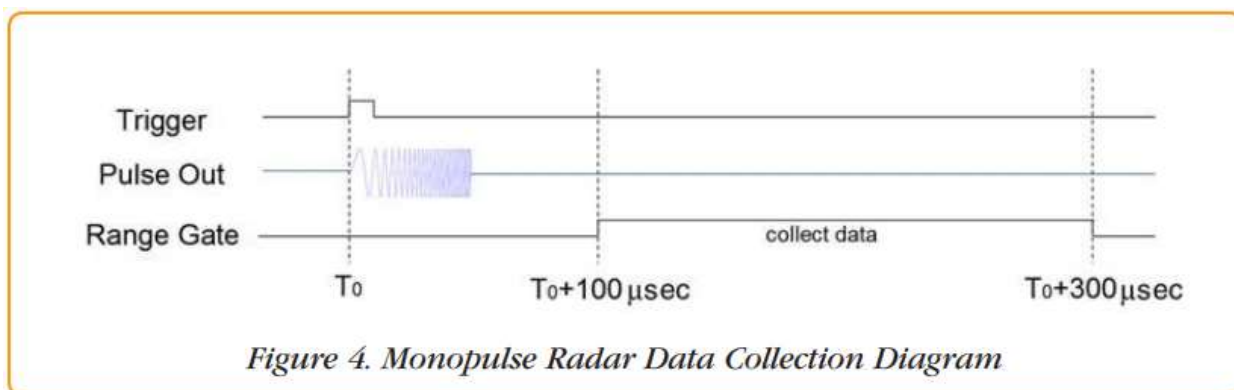


Figure 4 モノパルスレーダのデータ収集タイミング

$T = T_0 + 100 \mu\text{sec}$ でデータの収集を開始します。 $T = T_0 + 300 \mu\text{sec}$ でデータ収集を停止します。

Figure 5 および Figure 6 に示す Pentek 社 Model71621 XMC モジュールを使用してデータを処理します。このモジュールには 3ch の 200 MHz、16 ビット A/D が装備されています。ブロック図に示すように、Virtex-6 FPGA、クロックシンセサイザ、インターポレータと 2ch の 800 MHz、16 ビット D/A を備えたデジタルアップコンバータ、2 つのメモリバンクを備え、PCIe インタフェース経由で 2.0 GB/s のデータ転送をサポートします。

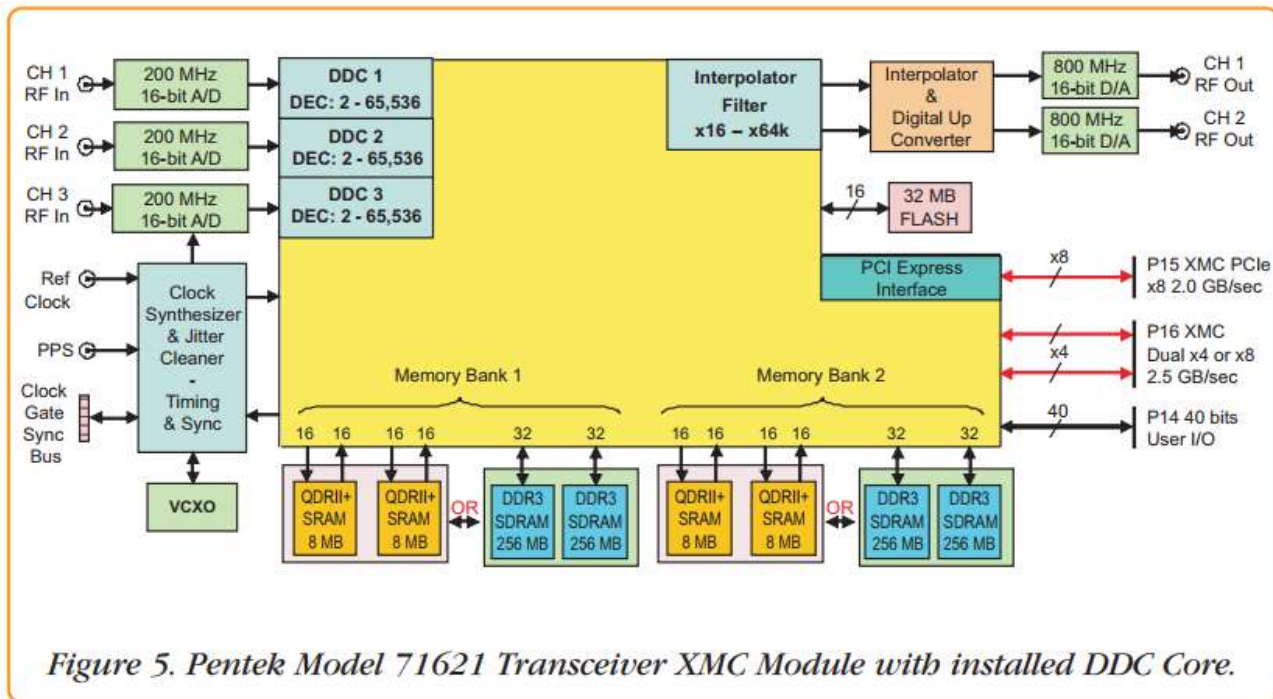


Figure 5. Pentek Model 71621 Transceiver XMC Module with installed DDC Core.

Figure 5 Pentek 製 Model71621 DDC コア内蔵 XMC トランシーバモジュール



Figure 6. Pentek Cobalt Model 71621

Figure 6 Pentek Model 71621

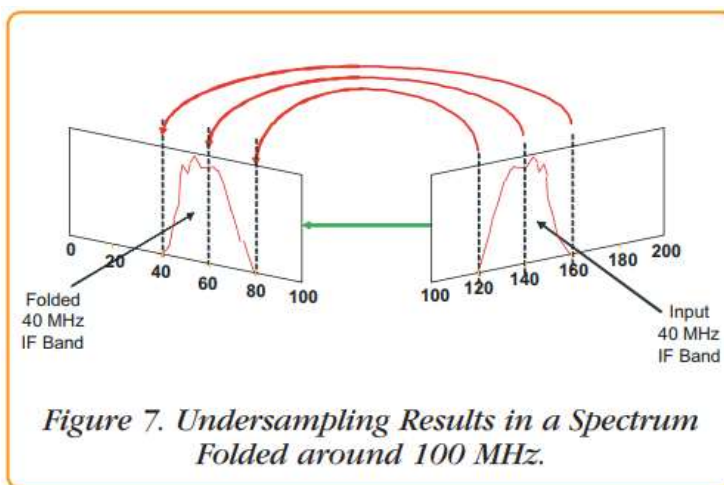


Figure 7. Undersampling Results in a Spectrum Folded around 100 MHz.

Figure 7 100MHz で折り返されたアンダーサンプリング結果

モノパルスレーダシステムの信号処理を容易にするために、Model71621 には Virtex-6 FPGA に予めインストールされた 3 つのワイドバンド DDC (デジタルダウンコンバータ) コアが実装されています。この IP コアは、2~65,536 の間引きを提

供し、中心周波数の個別チューニングを提供します。

リソースを節約するために、入力信号をデジタル化するためのアンダーサンプリングソリューションを試みます。200 MHz でサンプリングすると、対象の信号は Figure 7 に示すように折りたたまれます。120MHz 信号帯域下端は 80 MHz に変換されます。140MHz の中心周波数は 60MHz に変換されます。信号帯域の上端は 40MHz に変換されます。Model71621 にインストールされた DDC コアのデシメーション設定と中心周波数を計算する必要があります。デシメーション設定 $DEC = 0.8 \times fs \div \text{帯域幅}$ 。200 MHz のサンプリング周波数と 40 MHz の帯域幅の場合、 $DEC = 0.8 \times 200 \div 40 = 4$ 。デシメーションの範囲は 2~65,536 です。アンダーサンプリングは 140 MHz IF を 60 MHz にフォールドするため、必要な DDC 中心周波数の調整は 60 MHz です。IP コアは DC から $fs/2$ (または DC から 100 MHz) に調整されるため、ローカル発振器は 60MHz に設定されます。このコアは、必要なチューニングと帯域幅をうまく処理します。

波形信号発生器：

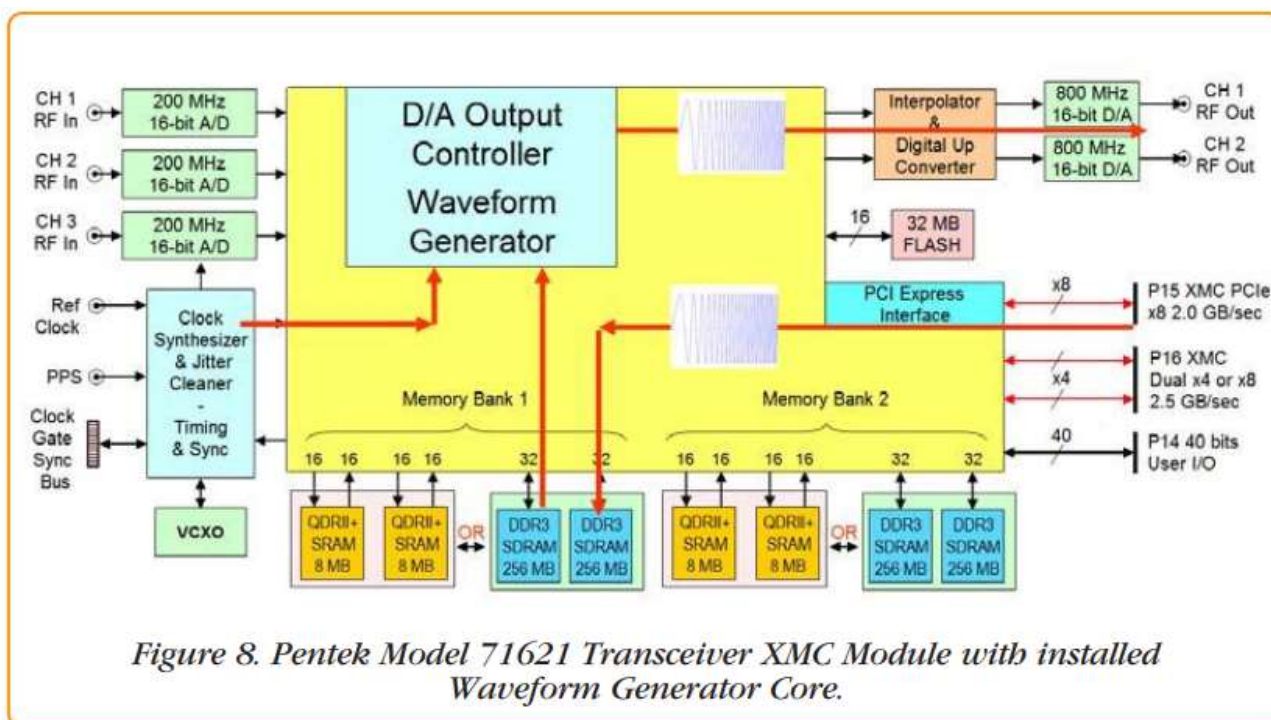


Figure 8. Pentek Model 71621 Transceiver XMC Module with installed Waveform Generator Core.

Figure 8 波形ジェネレータを内蔵した Pentek Model71621 トランシーバモジュール

次に、Model 71621 モジュールを使用してレーダ信号を作成します。Figure 8 に示すように、信号波形はデジタル振幅サンプルのブロックとしてユーザーによって作成され、PCIe インタフェースを介してモジュールの QDR または SDRAM メモリにロードされます。次に、Virtex-6 FPGA にインストールされている波形エンジン IP コアに転送されます。エンジンは、波形サンプルを DUC および D/A に出力します。トリガー、ゲート、連続ループ、遅延などの複数のモードを作成できます。

Figure 9 に示すように、40MHz の帯域幅を持つように複素ベースバンド信号を選択しました。140MHz IF に変換すると、40MHz の信号は 120 MHz から 160MHz に変換されます。出力サンプリング周波数は、160MHz の最高周波数の少なくとも 2 倍（最低 320 MHz）でなければなりません。安全のために 400 MHz を選択し、補間フィルタと DUC を使用してベースバンドを IF 周波数に変換します。

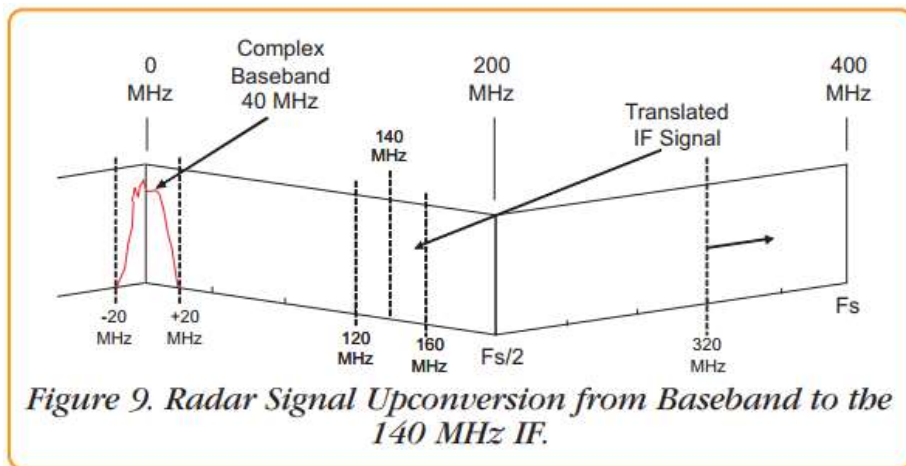


Figure 9 ベースバンドから 140MHz にアップコンバートしたレーダ信号

デジタル波形ベースバンドサンプリング周波数 (fb) の補間係数を計算するには、 $fb = 1.25 \times \text{帯域幅}$ 、つまり $1.25 \times 40 \text{ MHz} = 50 \text{ MHz}$ となり、補間係数は $\text{INT} = \text{D/A 出力レート} (fs) \div \text{ベースバンド入力レート} (fb) = 400 \text{ MHz} \div 50 \text{ MHz} = 8$ となります。DAC5688 で利用可能な補間係数は 2、4、8 で

D/A Output Controller Table						
Table Entry	Wait for Trigger	Memory Location	Pre-Delay	Waveform Length	Play Cycles	Next Entry
1	N	0000x	0	2k	1	1
2	Y	0000x	250	2k	1	2
3	N	0000x	2k	1K	3	3
4	Y	0000x	250	2k	4	5
5	N	4000x	0	3k	1	6
6	N	6000x	100	2k	4	3

Table 1 D/A 出力コントローラテーブル

したがって、INT を 8 に設定します。DUC 局部発振器の範囲は $DC \sim fs/2$ または $DC \sim 200 \text{ MHz}$ であるため、局部発振器を 140MHz に設定します。D/A 出力コントローラテーブルの一般的なパラメータを Table 1 に示します。このテーブルは、D/A 波形発生器を制御し、これらのパラメータを異なるメモリ位置に保存するために使用されます。テーブルエントリは、生成されるさまざまな波形の開始アドレスと波形の長さ、トリガー、ループ、遅延などを指定します。各テーブルエントリは、異なる波形シナリオを表します。

Figure 10 は、3 つの典型的な波形を示しています。波形 A は、ジェネレータが連続して動作し、無限ループで繰り返す連続波形を示しています。波形 B はトリガーにより、入力トリガーごとに 1 つのレコードを生成します。最後に、波形 C は、ジェネレータが指定された遅延を待機した後、波形を 1 回出力するプリディレイシングルです。

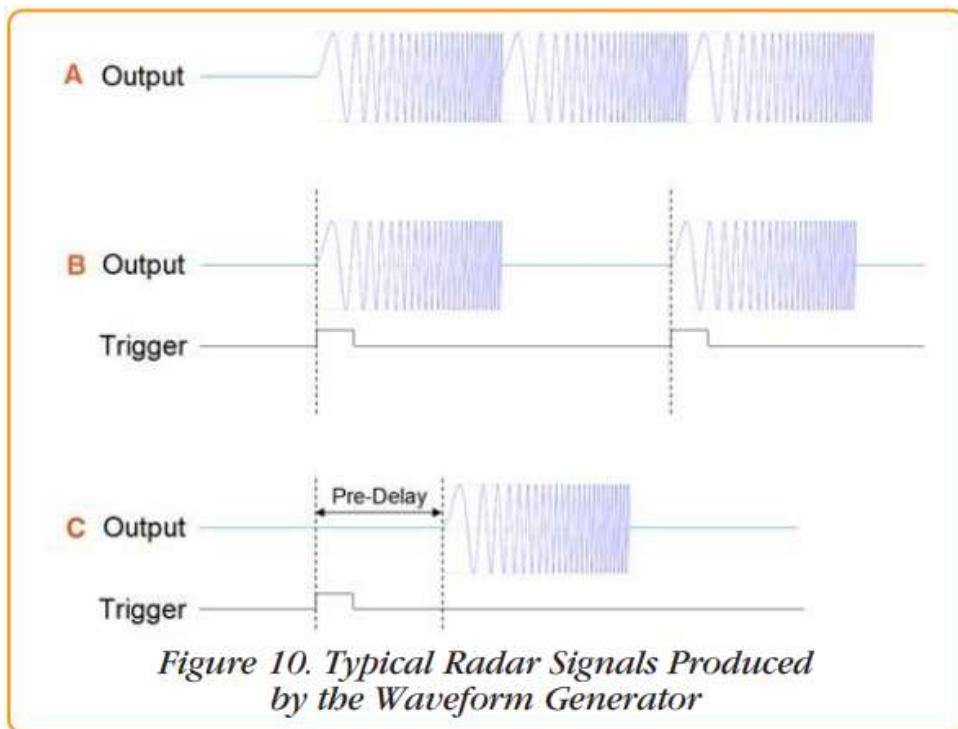


Figure 10 波形ジェネレータで生成した典型的なレーダ信号

レーダパルス信号取得：

受信したレーダデータを処理するために、3チャンネルすべてで A/D サンプルを同時に収集する同期サンプリングを利用します。データ収集は、発信トリガーパルスに正確にタイミングを合わせる必要があります。レンジゲートの仕様は事前に計算されており、高速アクセスのために事前にロードする必要があります。D/A 出力コントローラテーブルの場合と同様に、ユーザーは Table 2 に示すような A/D 入力コントローラテーブルに入力するだけです。

テーブルパラメータは、レンジゲートのタイミングを制御し、A/D データを保存するためのメモリ位置、保存するサンプルの数、トリガ、遅延、チェーンなどを制御するパラメータを指定します。

Figure 11 は Figure 4 と似ていますが、発信レーダパルスの生成とターゲットから返された信号の

A/D Input Controller Table					
Table Entry	Wait for Trigger	Memory Location	Pre-Delay	Capture Length	Next Entry
1	N	0000x	0	2k	1
2	Y	0000x	250	2k	2
3	Y	0000x	250	2k	5
4	N	4000x	0	3k	6
5	N	6000x	100	2k	3

Table 2. A/D Input Controller Table

Table 2 A/D 入力コントローラテーブル

取得に関連するため、ここでは D/A 出力コントローラーと A/D 入力コントローラーテーブルのエントリを重ね合わせています。範囲は Figure 4 の場合と同じです。つまり、レーダの位置から 15 km~45 km の範囲のターゲットです。

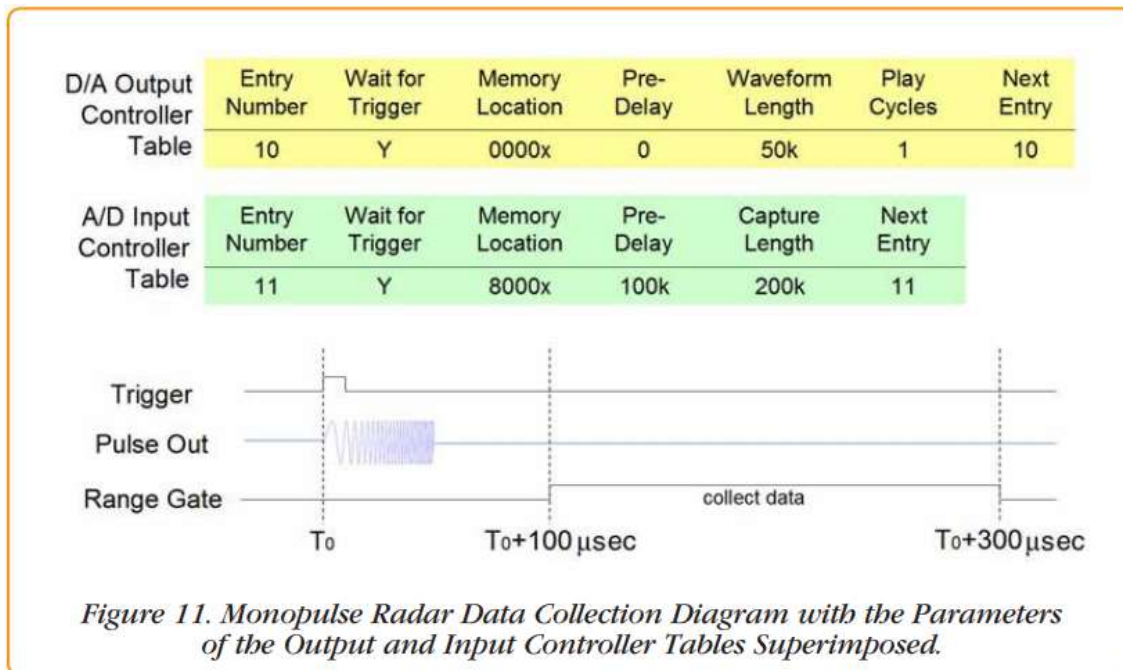


Figure 11 モノパルスレーダーデータ収集図と出力および入力コントローラーテーブルのパラメータの表

まとめ：

Pentek 製 Model71621 トランシーバ XMC モジュールは、完全なレーダ信号生成、タイミング、および取得サブシステムです。モノパルスレーダに必要な 3ch の A/D と、信号生成および取得タイミングの標準オンボードサポートを備えています。レーダデータの取得は、40MHz 帯域幅で 140MHz IF 信号をキャプチャする 200 MHz、16 ビット A/D によって促進されます。ワイドバンド DDC IP コアは、IF 信号をベースバンドに変換します。A/D 入力コントローラーエンジンは、プログラム可能な遅延、取得レコード長、複雑な取得シナリオを作成する単純なパラメーターテーブルを使用します。

レーダ波形生成では、単純なパラメーターテーブルを備えた D/A コントローラーエンジンを使用します。プログラム可能な遅延と長さを持つ複数の波形を作成します。ワイドバンド DUC はデジタルベースバンド波形を 140 MHz IF にアップコンバートし、400 MHz、16 ビット D/A は 40MHz 帯域幅の 140MHz IF 信号を提供します。

PENTEK

Now Part of Mercury

Pentek 社について

Pentek 社は、ISO 9001 : 2015 認定企業として、デジタル信号処理・ソフトウェア無線・データ収集用の組込みコンピュータボードおよびレコーディングシステムを設計・製造しています。製品には、商用環境と耐環境の両方に対応した AMC、XMC、FMC、PMC、cPCI、PCIe、VPX のフォームファクタで準備されており、レーダ、無線通信、SIGINT、ビームフォーミング等の用途に幅広く利用されています。Pentek 社の詳細については、www.pentek.com をご参照ください。