

NeXtRAD マルチスタティックレーダシステムに Pentek 製 SDR インタフェースを提供

背景：

NeXtRAD は、ロンドン大学（UCL）とケープタウン大学（UCT）が共同開発したデュアルバンド、デュアル偏波のマルチスタティックレーダシステムです。

このシステムの主な目的は、シークラッタに埋め込まれた小型レーダで海上のターゲットを検出する為のマルチスタティックデータを収集することです。NeXtRAD は、数百メートル離れた 3 つのステーション

（または Node）から構成されるマルチセンサーネットワークで、Figure 1 に示すように共通のターゲットエリアに焦点を合わせています。Node 0 のみがレーダ信号を送信および受信し、Node 1 および 2 は受信専用です。システムは、3メートルの距離分解能を達成するために 50 MHz の帯域幅を必要とします。各 Node は、10度のビーム幅を持つ二重偏波 L および X バンドアンテナ（IEEE 定義）を持っています。この配置は、モノスタティックレー

ダと組み合わせて一対のバイスタティックレーダを効果的に形成し、これは、3つの視点からターゲットデータを同時に取得することができることを意味します。このトポロジは、シングルセンサーレーダよりも優れています。NeXtRAD は、UCT と UCL によって開発された単一周波数マルチスタティックレーダである NetRAD の高性能バージョンです。NeXtRAD プロジェクトの初期段階で、Pentek 社の Model 71621 トランシーバシステムがシステムに適したソフトウェア無線インタフェースとして認識されていました。この記事は、Pentek の Model 71621 モジュールをシステムのデジタルトランシーバとしてモノスタティック構成で使用する NeXtRAD の開発の初期段階について説明します。

NeXtRAD システムの概要：

NeXtRAD マルチスタティックシステムのアクティブノードは、次のユニットで構成されています（Figure 2 を参照）。

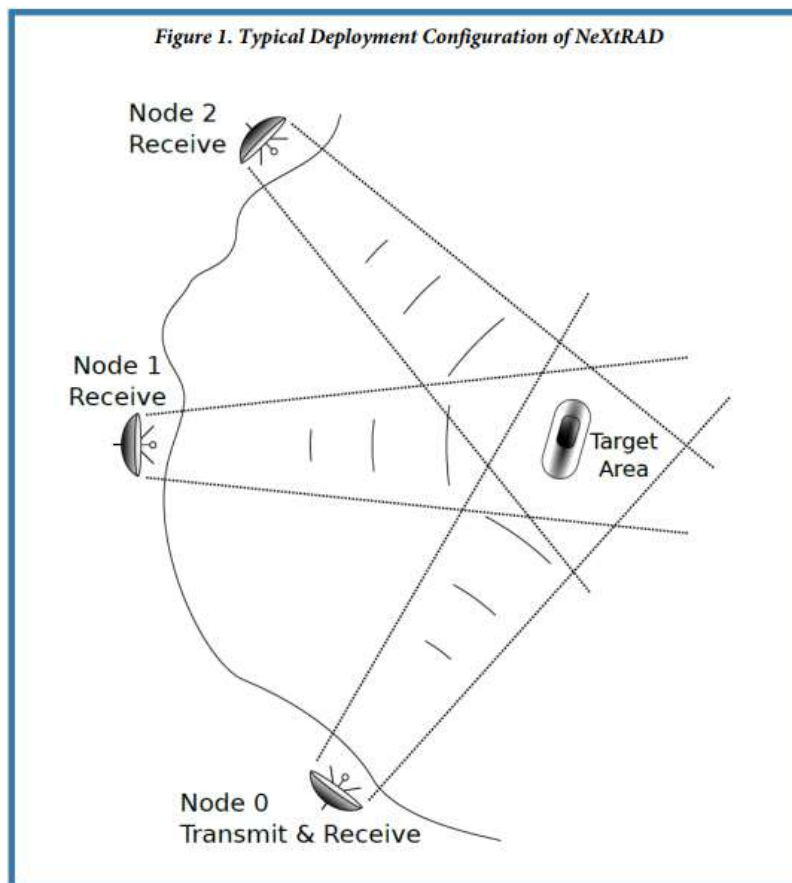


Figure 1 NeXtRAD の標準的な構成

- ソフトウェア無線 (SDR) インタフェース
- 無線周波数 (RF) 受信機と送信機
- FPGA ベースの タイミングコントロールユニット (TCU)
- ハイパワーアンプ

SDR インタフェースとしては、Pentek の Model 71621 (Figure3) が選択されて

おり、3ch の A/D コンバータと 2ch の 800 MHz D/A コンバータを備えています。

NeXtRAD はパルスドップラーレーダで、波形の生成とデジタル化は各 Node で完全にコヒーレントである必要があります。コヒーレンスを達成するために、各 Node には、周波数分配ユニット (FDU) を介して Model71621 および受信機励振器 (REX) に分配されます。ローカル GPS 統制発振器 (GPSDO) からは非常に安定した 10MHz 基準信号が供給されます。これは、与えられた Node 内の発振器間に位相ドリフトがないこと、そして任意の 2 つの Node 間の発振器の相対位相が一定であることを保証します。

Model71621 は、フロントパネルの SSMC クロック入力から 10 MHz の信号を受け取るように設定できます。GPSDO は、レーダ測定の開始を正確に同期させるトリガパルスも供給します。GPSDO からの最初のトリガイベントの後、TCU が引き継ぎ、パルス繰り返し周波数 (PRF) で Model71621 にトリガパルスを送ります。

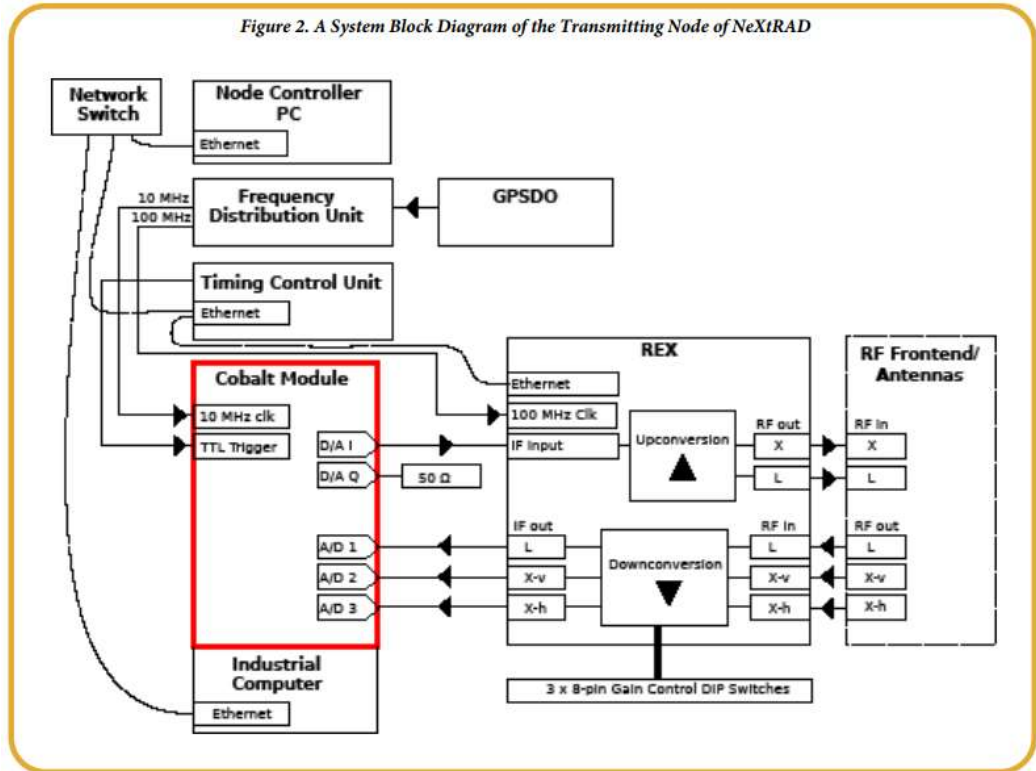


Figure 2 NeXtRAD の送信 Node システムブロック図



Figure 3 PENTEK 製 Model71621

システムセットアップ :

送信パルスは、センサネットワークのアクティブノード内の Model71621 によって生成されます。このシステムは、1~2kHz の PRF で、50MHz の帯域幅および 1~10 マイクロ秒の持続時間を有する線形周波数変調パルスを使用します。Model71621 は、2ch の 16 ビット D/A 出力チャンネルの 1 つから、720 MHz の出力周波数により 125 MHz の中間周波数 (IF) で 50 MHz 帯域幅の信号を供給することができます。REX は

IF 波形を L バンドまたは X バンドにアップコンバートします。増幅後、波形は適切なアンテナを介して送信され、垂直または水平のいずれかの偏光で目標領域を照射します。

送信エネルギーは、ターゲットシーンによってさまざまな方向に散乱されます。各ノード位置のアンテナは、そのエネルギーのごく一部だけを遮断します。L バンド信号は垂直または水平偏光でキャプチャされ、2 つの X バンドチャンネルが両方の偏光を同時に記録します。各ノードの受信機は、受信した信号を増幅し 125 MHz の IF アナログ信号にダウンコンバートします。

Model71621 の A/D チャンネルは、単一の L バンドと 2 つの X バンド波形を記録します。

NeXtRAD では、Model71621 の波形生成エンジンがオンボード DDR3 SDRAM にさまざまな波形を保存します。波形生成は、Model71621 のフロントパネルのトリガ入力に供給される LVTTTL 立ち上がりエッジによってトリガされます。DAC5688 D/A コンバータへのデータ入力レートは 180 MSPS です。D/A のデジタルアップコンバータ (DUC) は、スペクトラムを 0Hz から IF に変換します。インターポレーション係数が 4 の場合、D/A の出力サンプルレートは 720 MSPS に増加します。その後 IF 信号は、増幅のため REX によって RF アップコンバートされます。

受信チェーンでは、アンテナで受信された RF 信号は、Model71621 の A/D コンバータでデジタル化するために IF にダウンコンバートされます。各パルスでデジタル化を開始するために同じトリガ信号が使用されます。ADC は、 $F_s = 180 \text{ MHz}$ でサンプリングするように調整されています。これにより、入力信号が第 2 ナイキストゾーンに配置され、結果としてスペクトルは第 1 ナイキストゾーン $0 \sim F_s/2$ に、すなわち $30 \sim 80 \text{ MHz}$ に変換されます。

Model71621 のデジタルダウンコンバータ IP コアを 55 MHz に調整し、間引き係数を 2 に設定すると、入力信号は DC に変換され、 $F_s/2 = 90 \text{ MHz}$ で IQ サンプルが生成されます。ダウンコンバートされた 16 ビット IQ サンプルは、後処理のために PCIe 8x インタフェースを介してホストコンピュータのメモリに転送されます。

レーダのコヒーレンシに関する重要な検討事項は、D/A のデジタルアップコンバータおよび FPGA のデジタルダウンコンバータ IP コアの数値制御発振器を、外部トリガの各立ち上がりエッジで既知の値にリセットする必要があります。これが行われていないと、D/A からの IF 信号、およびデジタルダウンコンバータ (DDC) によって生成されたベースバンド信号に予測不可能な位相ずれが起きます。

DAC5688 および DDC IP コアの制御レジスタを適切に設定することにより、DUC および DDC で生成されるデジタル Sine および Cosine の位相を外部トリガの立ち上がりエッジでゼロにリセットできます。これは、生成またはデジタル

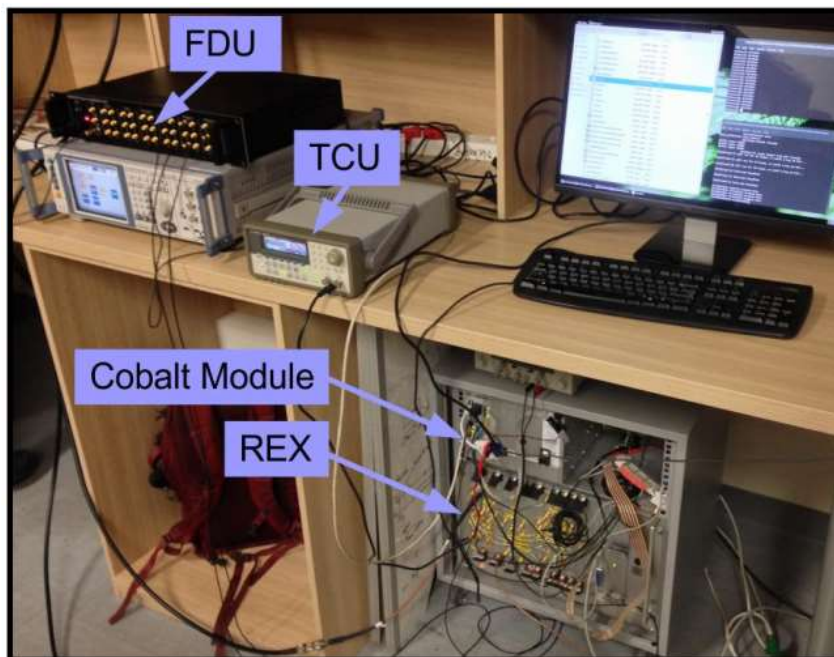


Figure 4 低電力プロトタイプの実験セットアップ

FDU: 周波数分配ユニット、TCU: タイミング制御ユニット、Cobalt Module: Model 71621、REX: レーザエキサイタ

化の際にレーダ信号に導入された位相オフセットがパルス繰り返し間隔の間で変化しないので後処理において無視できることを保証します。

初期テストと結果：

Model71621 用のコントローラソフトウェアは、Pentek 社の ReadyFlow ソフトウェアライブラリと任意波形発生器、スペクトラムアナライザ、オシロスコープを組み合わせで開発されました。デジタル化および波形生成チェーンは、これらのプログラムを実用的な情報源に融合する前に、別々のコントローラプログラムで開発およびテストされました。REX やその他のサブシステムを導入する前に、D/A 出力チャンネルの 1 つと信号スプリッタを使った簡単な IF ループバックテストで十分でした。

Figure 4 に示すハードウェア構成は、AWG を使用して Model71621 に立ち上がりエッジトリガを供給し、REX と Model71621 へのリファレンス信号同期のため

に信号発生器を使用して、アクティブノードの低電力 (<24dBm 送信電力) ベンチトッププロトタイプテストに使用されました。このシステムを使用して、Figure 5 に示すように、近距離でのドップラーシフトによって移動ターゲットを検出することができました。このデータは、50 MHz の帯域幅を持つ 0.5 マイクロ秒の持続時間のパルスを使用して、送信機から約 75m の所で移動する人間ターゲットのドップラーシフトを示しています。半径方向目標速度 v およびドップラーシフトは、式

$$v = c/2 (Fd/Fc)$$

によって与えられ、ここで、 c は光速、 Fd はドップラーシフト、 Fc はキャリア周波数である。Figure 5 のグラフの $t = 5$ 秒で $Fc = 8.5\text{GHz}$ (X バンド) および $Fd = 100\text{Hz}$ の場合、ターゲットは約 1.7m/s で向かっています。

およそ 10 秒~22 秒、そして 30 秒~32 秒の間に動いている大きな物体は、駐車場から後退して車が走り去ったことを示しています。パッシブノードは、送信機が不要であることを除いて、本質的にアクティブノードと同一です。アクティブノードの Model71621 用の同じ制御ソフトウェアを使用して、パッシブノードはアクティブノードとまったく同じ瞬間に波形を記録することができます。

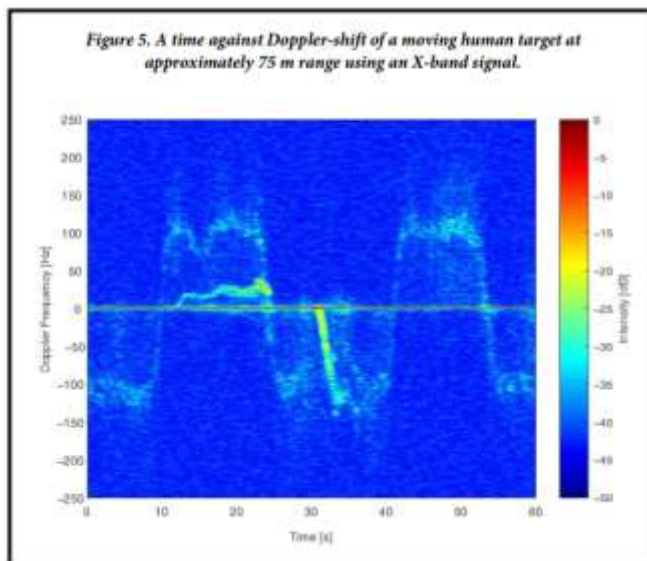


Figure 5 X バンド信号を使用した、約 75 m の範囲で移動する人間のターゲットのドップラーシフトに対する時間軸スペクトラム

まとめ：

システムのアクティブノードでのコバルトモジュールの初期テストは、Pentek 製 Model71621 がパルスドップラーレーダーアプリケーションに非常に適していることを実証しました。必要な追加のハードウェアを用いて、アクティブノードのデジタル送受信機用のコードをわずかに変更するだけでパッシブノードをネットワークに導入することができます。全体として、Model71621 は位相安定性と帯域幅に関する要件を満たしており、アクティブノード用の既存のレシーバエキサイタと容易に統合することができました。



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・データ収集用の組み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。