

衛星監視記録システム

はじめに：

衛星監視とは、衛星を用いて宇宙から地球とその環境を継続的に観測することです。これらの衛星にはセンサーが搭載されており、画像、気温、大気の状態などのデータを収集し地上局に送信して分析を行います。

この技術は、気象予報、環境モニタリング、災害管理、交通管制といったアプリケーションにおいて、リアルタイムまたはほぼリアルタイムの洞察を可能にします。その主な利点は、地上システムでは実現できない地球規模の一貫した視界を提供できることです。



衛星監視フレームワーク：

衛星監視の目的は、アップリンク/ダウンリンクの品質、干渉検出、およびスペクトル規制への準拠を確保することです。システムは主に3つのコンポーネントで構成されます。

1. 宇宙：特定の周波数帯で動作するトランスポンダーとアンテナを搭載した衛星
2. 地上：アップリンクおよびダウンリンク信号を捕捉するための大型パラボラアンテナ、デジタイザー、RFフロントエンドシステムを備えた監視局
3. ユーザー：受信データを処理および分析するエンドユーザー端末または専用の監視機器

衛星監視における周波数帯域：

衛星通信では、それぞれ固有の特性を持つ指定されたRF帯域が使用されます。下の図は、選択された帯域を示しています。

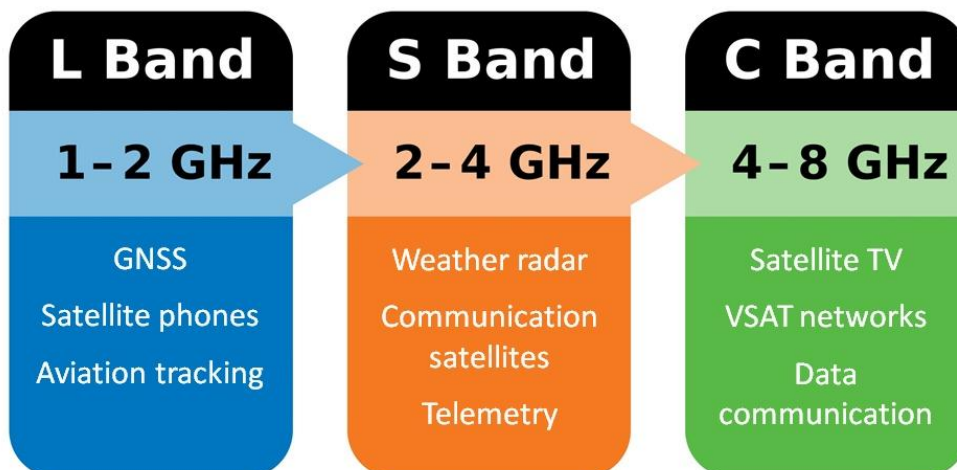


Figure1：衛星帯域とその使用例

各周波数帯域はサブバンドに分割されており、事業者は特定のサービスに周波数帯域を割り当てるためにサブバンドを使用します。双方向システムでは、干渉を防ぐためこれらのサブバンドはアップリンク（地球から衛星）とダウンリンク（衛星から地球）に分割されます。

通常、帯域の低い部分は大気減衰が少なく受信しやすいため、ダウンリンク用に予約されています。帯域の高い部分はアップリンクに使用され、より高いデータレートをサポートしダウンリンク信号との干渉を回避します。

サブバンドの名称、中心周波数、瞬時帯域幅は、全球測位衛星システム（GNSS）などのシステムによって異なります。例えば、欧州ガリレオシステムでは、Lバンド内で「L」ではなく「E」の表記が用いられており、これは同システム独自の周波数計画を反映しています。上の図は、ガリレオのダウンリンクサブバンドの例を示しています。

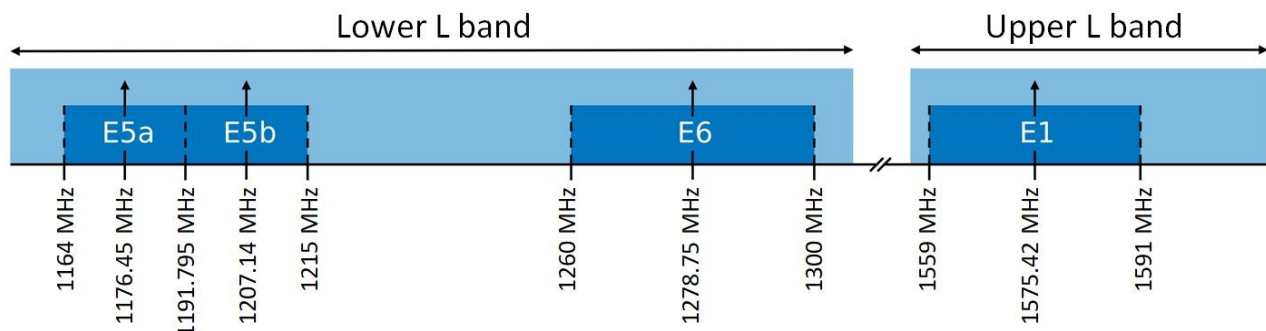


Figure2 : Lバンドのガリレオサブバンド

衛星監視記録システム：

地上局は、衛星から送信される無線周波数（RF）信号を高速データ収集ボード（デジタイザー）を使用して捕捉します。これらのボードは、アナログ RF 信号をデジタルデータに変換して処理します。これらのデジタイザーは、多くの場合ミキサーなしで L バンドおよび S バンド信号を直接サンプリングできるため、システムの複雑さとコストが削減されます。さらに、デジタルダウンコンバージョンや復調などのフィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）によるリアルタイム処理を利用して、データを保存または送信しさらなる分析を行う準備を行うこともできます。

データ収集：

デジタイザーの入力帯域幅は、対象帯域内の信号周波数成分を減衰させないために十分に高くする必要があります。さらに、帯域外成分を除去し、エイリアシング（アナログ-デジタル変換時に高周波成分が対象帯域に折り込まれることで発生する歪みの一種）を防止する必須のアンチエイリアスフィルタと組み合わせて、外部信号増幅が必要となる場合があります。SMA コネクタ付きのアンプとフィルタは、L バンドなどの特定の帯域向けに市販されています。

デジタイザーを選択する際には、周波数計画と適切なサンプリングレートの選択が重要です。対象信号が特定のナイキスト帯域内に収まるようにし、帯域外信号成分がフィルタリングによって抑制されるようにすることが重要です。第 1 ナイキスト帯域での信号のサンプリングはベースバンドサンプリングと呼ばれ、第 2 ナイキスト帯域での信号のサンプリングはバンドパスサンプリングまたはアンダーサンプリングと呼ばれます。適切なバンドパスフィルタリングを適用する場合、最小サンプリングレートは信号帯域幅の 2 倍以上である必要があります。これは、L バンド、S バンド、C バンドでそれぞれ 2、4、8 ギガサンプル/秒（GSPS）に相当します。

Teledyne SP Devices 社の ADQ35-WB デジタイザーは、12 ビット分解能、9GHz の入力帯域幅、そしてデュアルチャンネルモードで 3G、4G、または 5GSPS（ギガサンプル/秒）、シングルチャンネルモードで 6G、8G、または 10GSPS のサンプリングレートを提供します。これにより、LバンドとSバンド全体を直接サンプリングできます。Cバンドのサンプリングにはデジタルイコライゼーションを利用することで、アナログ帯域幅のロールオフを補正できます。



Figure3: Teledyne SP Devices 社の ADQ35-WB デジタイザーは、衛星周波数帯域のダイレクトサンプリングを可能にし、カスタムデジタル信号前処理用の FPGA を提供します

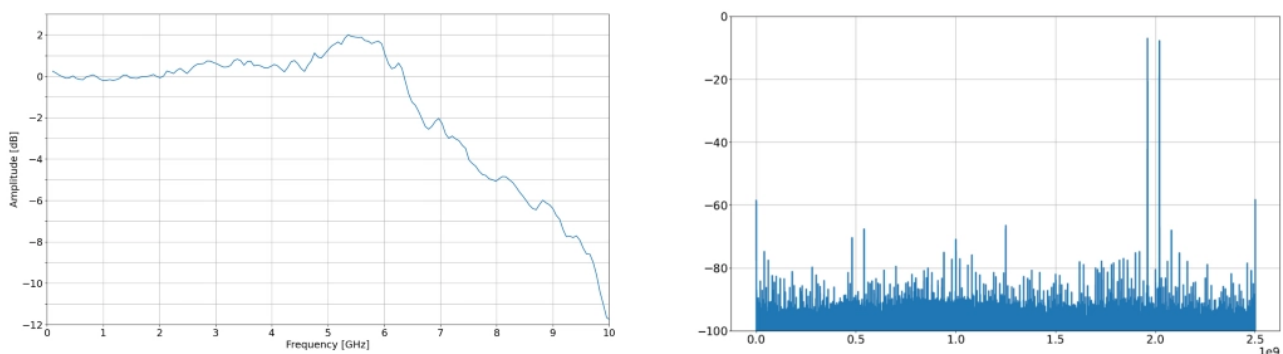


Figure4 : ADQ35-WB の一般的な周波数応答 (左) と 2 トーンテスト (右)

サンプリングレートオプションは、周波数プランニングの最適化において優れた柔軟性を提供します。例えば、Lバンドは 5GSPS でサンプリングするのが最適で、デジタイザーの第 1 ナイキスト帯域に収まります。Sバンドのアンダーサンプリングは、フィルタ通過帯域に十分なマージンを確保するため、4GSPS サンプリングが最適です（Sバンドは第 2 ナイキスト帯域全体をカバーするため）。ただし、5GSPS サンプリングオプションは、対象信号（2GHz～4GHz）が第 1 ナイキスト帯域と第 2 ナイキスト帯域（2.5GHz で分割）の両方にまたがるため、エイリアシングが発生するため適切な選択ではありません。同じ理由から、Cバンドのアンダーサンプリングは 8GSPS が最適です。

十分に高いサンプリングレートを選択する利点は、出力データレートが制限され後処理が簡素化されることです。あるいは、対象信号がナイキストゾーンの境界を超えない場合、意図的に高いサンプリングレートを選択しデシメーションなどのデジタル後処理と組み合わせることで、信号対雑音比（SNR）を向上させつつ、後処理のデータレートを低減することも可能です。この点については以降のセクションで詳しく説明します。

FPGA による前処理とデータ転送 :

高速デジタイザーからのデータ量が膨大になる可能性がある衛星モニタリングでは、FPGA による前処理が不可欠です。ADQ35-WB は 1 秒あたり 100 億回の測定を実行し、各サンプルを 2 バイトで表現するため驚異的な 20GB/秒のデータ転送速度を実現します。この速度であれば、1TB（テラバイト）の SSD はわずか 50 秒でフルになります。

衛星監視のような高スループットアプリケーションには、PCIe インターフェースを備えたデジタイザーが適しています。ADQ35-WB はホスト PC への最大 14GB/秒の転送速度をサポートしますが、PCIe リンクの飽和を避けるため 20GB/秒の出力データを削減する必要があります。この前処理により、帯域幅のボトルネックを回避できるだけでなく下流の後処理も簡素化されます。

FPGA データ削減の例：

オンボード FPGA には無数のリアルタイムデータ削減手法を実装できますが、衛星監視に適した候補として特に次の 2 つのタイプが挙げられます。

1. **ビット圧縮**：ADQ35-WB はビット圧縮機能を内蔵しており、各測定値を例えば 10 ビットで転送できます。これは 1 サンプルあたり 1.25 バイトに相当し、各デジタイザーからの合計データレートは 12.5GB/秒となります。これは 14GB/秒の PCIe リンク容量を下回るため連続ストリーミングが可能です。この方式の利点は、L バンドまたは S バンドのフルデータ取得データを追加の後処理やディスクへの記録のためにデータ損失なく転送できることです。
2. **デジタルダウンコンバージョン**：FW2DDC ファームウェアオプションは、オンボード FPGA 内に 2 つのリアルタイムデジタルダウンコンバータ（DDC）をデジタイザーに搭載します。DDC は周波数変換を可能にし、数値制御発振器（NCO）を使用して RF 信号をベースバンドまたはより低い中間周波数にミックスダウンします。また、対象周波数帯域を分離するフィルタと、後続の処理を簡素化するためにデータレートを低減するデシメーション技術も備えています。さらに、フィルタとデシメーションを組み合わせることで、信号対雑音比（SNR）の向上にも役立ちます。FW2DDC は、同相信号や直交信号（IQ 信号）など、実数値または複素入力を持つ幅広い無線アーキテクチャをサポートします。

ガリレオ信号のダイレクトサンプリング：

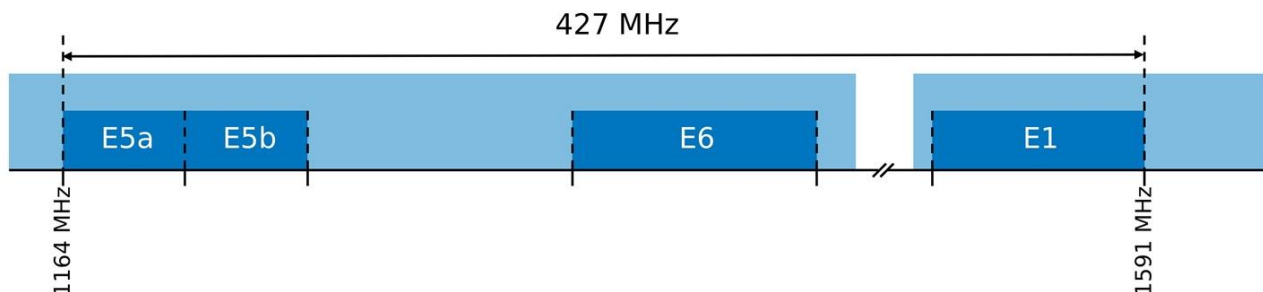


Figure5：427MHz にわたるガリレオのサブバンド

デュアルチャンネルモードを使用することで、2 つの偏波の取得が可能になりデジタルダウンコンバージョンと組み合わせる場合、5GSPS というサンプリングレートは最適な選択肢となります。427MHz の信号全体が、最大 2.5GHz まで第 1 ナイキストゾーンに収まることに注意してください。

FW2DDC の NCO（ミキサー）周波数を -1377.5MHz に調整すると、バンドは 0 にダウンコンバートされ、-213.5MHz から 213.5MHz の範囲にわたる I および Q として表されます。

デシメーションとフィルタリングを組み合わせることでデータレートを低減し、SNR を向上させることができます。8 分の 1 デシメーションによりサンプリングレートは 625MSPS となり、後続の FIR フィルタはナイキスト周波数（ $0.8 \times 312.5\text{MHz} = 250\text{MHz}$ ）の 80% 通過帯域を提供します。これにより実効ノイズ帯域幅が減少するため、SNR

は約 9dB 向上し、結果としてデータレートは $625\text{MSPS} \times 2 \text{ バイト} \times 2 \text{ チャンネル} = 2.5\text{GB/s}$ となります。このデータレートは GPU にストリーミングされ、ダウンコンバートと復調処理が可能です。

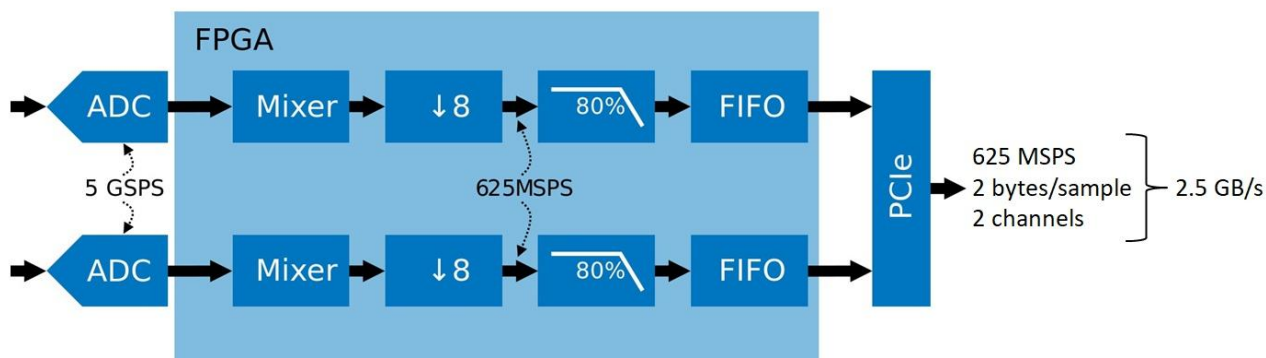


Figure6 : デシメーションとフィルタリングを組み合わせると、データレートが低減し SNR が向上します

ピアツーピアデータ転送 :

従来のデータ転送では、デジタイザの出力データはホスト PC の CPU とシステムメモリを経由して、グラフィックス・プロセッシング・ユニット (GPU) などのエンドポイントに到達します。この間接的なパスはレイテンシを引き起こし、貴重な CPU リソースを消費し、メモリ帯域幅の制限によりスループットを制限します。

一方、ピアツーピア (P2P) ストリーミングは、PCIe ダイレクトメモリアクセス (DMA) を使用して、デジタイザから GPU に直接データを転送します。CPU と RAM を完全にバイパスすることで、P2P はこれらのボトルネックを解消し真の高速パフォーマンスを実現します。複数のデジタイザが単一のエンドポイントに同時にストリーミングできるため、PCIe Gen5 x16 で最大 56GB/秒のデータレートを実現し、リアルタイム処理や大規模データキャプチャに最適です。

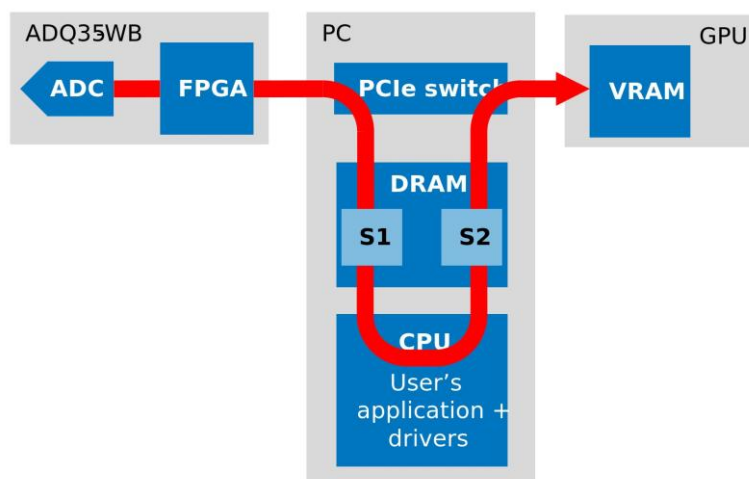


Figure7 : 従来のストリーミングでは、複数のメモリセグメントに対する広範な読み取り/書き込み操作が行われます

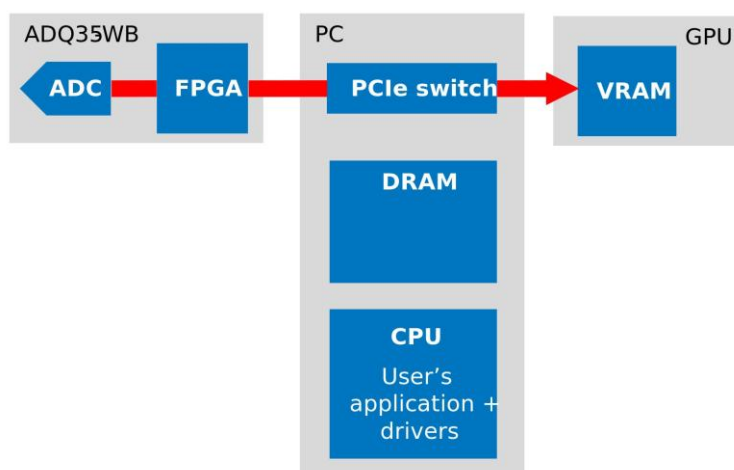


Figure8 : ピアツーピアストリーミングでは、1 つまたは複数のデジタイザがデータを GPU メモリに直接転送できます

オンボード FPGA 処理 :

オンボード FPGA は、PCIe リンク容量に合わせてデータレートを低減するために不可欠です。ユーザーは、アプリケーション固有のアドオンファームウェアを利用したり、オープン FPGA を介してカスタムリアルタイム信号処理を追加したりできます。ただし、リソースには限りがあるため後処理が必要となる場合があります。

GPU 処理 :

GPU は、幅広い信号処理タスクに対して費用対効果の高い後処理を提供します。FPGA 開発と比較して、GPU 向けソフトウェアの開発と保守は一般的に迅速かつ容易です。GPU ベースの後処理により、保存前のデータレートがさらに低減され転送帯域幅の要件と全体的なストレージ容量の両方が緩和されます。

例えば、GPU ベースのチャネライザは上記の例に示すように直接サンプリングで取得した 427MHz の合成信号からガリレオサブバンドを抽出できます。デシメーション後、データレートは約 2.5GB/秒に低下しますが、これは PCIe Gen5 インターフェースが最大約 56GB/秒を処理できる最新の GPU の能力に十分対応できる範囲です。

ADQ35-WB は、コンシューマグレードの GPU だけでなく、NVIDIA RTX 4500 などの高性能プロフェッショナルモデルもサポートし、要求の厳しいアプリケーションに極めて高い処理能力を提供します。

高速ディスク記録 :

高速ストレージを必要とする PCIe システムでは、複数の NVMe SSD をホストする PCIe-NVMe アダプタボードで構築された RAID アレイがよく使用されます。これらのボードは、1 つの x16 PCIe スロットを複数の独立したセット（例えば、4 つの NVMe ドライブの場合は x4/x4/x4/x4）に分割する分岐機能を採用しており、別々の PCIe レーンにまたがる並列書き込み操作を可能にします。あるいは、オンボード PCIe スイッチを備えたキャリアボードを利用することもできます。どちらの方法であっても、総スループットはドライブ数に比例して増加します。



Figure9 : デジタイザ、NVIDIA RTX4500 GPU、および SSD モジュールを備えたデータ収集システム



Figure10 : ドライブあたり 15 テラバイトをサポートする 4 つの Kioxia CD8 NVMe エンタープライズクラス SSD モジュールを搭載した PCIe-NVMe アダプタボード

持続的な書き込み速度は使用する NVMe モジュールに依存し、OS ファイルシステムをバイパスして生データブロックをディスクセクターに直接書き込むことで効率が最大化されます。

これは、Teledyne SP Devices 社独自の NVMe ストリーミングライブラリである libads によってサポートされています。コンシューマーグレードとエンタープライズグ

レードの両方の SSD を利用でき、PCIe Gen4 では通常、ディスクあたり最大 7GB/秒、PCIe Gen5 では最大 14GB/秒をサポートします。ただし、コンシューマーグレードのドライブは、SLC（シングルレベルセル）キャッシュの制限により、長時間の記録中にパフォーマンスが低下します。それでも、数百ギガバイトまでの短時間のバースト書き込みであれば、キャッシュが枯渇して書き込み速度が大幅に低下する前であればコスト効率は良好です。

対照的に、エンタープライズクラスのドライブは、高い持続スループットを無期限に維持します。これらのドライブを使用した構成では、合計書き込み速度は 56GB/秒、総ストレージ容量はスロットあたり 1PB（ペタバイト）に達します。

まとめ：

PCIe ベースのマルチチャンネルデータ収集システムは、衛星監視のためのコスト効率に優れた高性能ソリューションを提供します。搭載 FPGA により、ユーザーは生データストリームに対してリアルタイムで計算負荷の高い信号処理を直接実行でき、高速 PCIe リンクは出力を複数のエンドポイントに転送します。

GPU によるコスト効率の高い後処理により、複数のデジタイザーからのデータを並列処理できるようになり、ワークフローが簡素化され開発期間が短縮されます。ストレージに関しては、市販のエンタープライズグレード SSD は、スロットあたり 1PB の総容量で最大 56GB/秒のディスクストリーミングをサポートします。また、短時間のフルスピード記録には、より経済的なオプションも利用可能です。



Figure11：書き込み速度 25GB/秒、合計ストレージ容量 75TB の 2 つの ADQ35-WB デジタイザーを使用した PCIe ベースの衛星監視システム



Teledyne SP Devices 社の ADQ35-WB デジタイザーボード

リファレンスドキュメント：

Teledyne SP Devices 社

Application Note：Interleaving 2 pieces of ADQ35 to get 20 GSPS and stream data to GPU



Teledyne SP Devices 社について

Teledyne SP Devices は、世界をリードするモジュール式データ集録および信号生成機器を設計および製造しています。当社の製品は、特許取得済みのキャリブレーションロジック、最新のデータコンバータ、および FPGA テクノロジを利用して、高いサンプリングレートと分解能の比類のない組み合わせを実現しています。製品には、さまざまなアプリケーション固有の機能と組み込みのリアルタイム信号処理があります。これにより、お客様はパフォーマンスのボトルネックを克服し、製品化までの時間を短縮し、幅広いアプリケーション分野でシステムレベルの利点を得ることができます。SP Devices の製品は、分析機器、リモートセンシング、科学機器、医療用画像など、さまざまな業界で採用されています。Teledyne SP Devices 社の詳細については、<https://spdevices.com/>を参照してください。