



概要

無線周波数 (RF) エネルギーを制御する技術がますます重要になっています。その理由は、ミリメートル波の周波数が高くなると自由空間における RF 減衰が大きくなるためです。これらの周波数帯はデータスループットを向上させるために広帯域で使用されることが多いですが、何らかの能動的な方向制御を行わないとチャンネル間干渉が増大し、リンクが失われる可能性が高まります。

フランスの Teledyne e2v とドイツの Fraunhofer IIS の技術協力によって、4 チャンネルのデジタル方向制御式 2.4 GHz 平面アンテナシステムの性能が評価されました。このシステムには、ギガヘルツ対応の最新型デジタル-アナログコンバーター (EV12DD700) が 2 台搭載され、多数の斬新なオンチップ制御技術を採用することによって、デジタルビームフォーミングが可能となっています。その目的は、マイクロ波 RF ソフトウェア化を目指す Teledyne e2v の進歩を詳細に検証することでした。

検証結果は、最初の設計仮説と高い相関を示しました。さらに、DAC が特定のビームフォーミング機能に対して非常に高い応用性を持つことが証明されました。DAC のオンチップおよびデバイス間の同期機能は注目すべき成功要因であり、今後数年間でスマートアンテナの進化を加速させるものです。

はじめに

無線の広帯域化に対する市場の需要が高まり続けていることで、無線の新しい手法と技術が求められています。ミリメートル領域の波長でより高い周波数を使用すること、干渉を減らすことに注力すること、放射電力とスペクトルを効率的に使用することは、現代の無線システムを改善するために重要な技術的検討事項です。

このため、Massive MIMO、5G、衛星通信アプリケーションに関する議論のほとんどでデジタルビームフォーミングが登場するのは驚くことではありません。ビームフォーミングとは、固定アンテナアレイから放射される RF 電力の方向を電子的に制御することで、チャンネル間干渉の低減を可能にすると同時に、全体的な伝送品質、データスループット、接続の堅牢性を向上させるものです。

より高度な無線制御への需要の高まりに応えるため、最新のデジタル-アナログコンバーター (EV12DD700) のペアを使用したマルチチャンネルのデジタルビームフォーマー実証機の製作について紹介します。使用されている新しいデジタル変換 IC は、主にビーム方向制御システムの設計を簡素化することに焦点を当てた、複数の革新的な機能を備えています。

等方性放射体と基本的なビームフォーミング

理論上の等方性放射体は、アンテナ設計の計算を簡素化するのに役立ち、実際のアンテナの放射パターンを測定する際の基準点となります。図 1 の極線図の青い線は、理想化された放射体を示しています。等方性放射体は実際には存在しませんが、この概念は一般的なアンテナの挙動を理解するのに役立ちます。

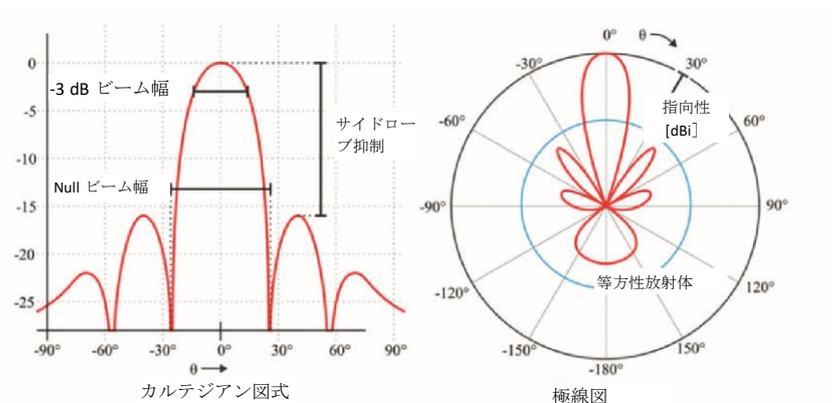


図 1 等方性放射体 (青線) と比較したアンテナ性能係数



等方性放射体は、三次元空間内で均一に電磁エネルギーを放射する理想化された RF 点放射源です。特定の方向にピークとヌルがある放射パターンを持つ実用的なアンテナとは異なり、等方性放射体には指向性の偏りはありません。

電磁ビームフォーミングと方向制御では、干渉理論の物理特性から得られる重要な結果が利用されます。複数のエネルギー源が一連の波面を作り出すと、建設的干渉または破壊的干渉を示す波パターンが現れます。複雑なパターンは、振幅と位相が変動します。この「重ね合わせ」を数学的に処理すると、点放射源間の間隔が刺激信号周波数の波長の整数倍であるときに、波面が最も増強されることがわかります（信号源間の干渉性を想定した場合）。波面干渉が RF 電力の方向を制御する方法を提供するという認識からビームフォーミングシステムが生まれたことは直感でわかります。

しかしながら、重ね合わせの原理は、放射体素子間の電磁結合を無視しており、近似でしかありません。しかし、より正確なアンテナ放射特性は数学的に割り出すことができます。

配列素子の配置は多くのパターンが考えられ、放射特性に影響を与える配置もあります。幾何分布、素子の数、素子間の距離は、すべて設計上の重要要素です。また、励起信号の大きさと位相も重要な役割を果たします。

アンテナの定義

絶対利得は、理想化された等方性放射体によって放射される電力に対する、特定方向に放射される電力の比と定義されています。デシベル (dBi) 単位で表される絶対利得は、特定のアンテナが放射エネルギーをどれだけ特定方向に集中させることができるかを示す尺度です。

EIRP (実効等方放射電力)とは、等方性放射体の仮想的放射電力で、実際のソースアンテナと同等の信号強度をメインビームの方向に与えます。

ビーム幅は、放射パターンのメインローブの角度幅です。ここから、アンテナの指向性に関する情報がわかります。出力が 3 dB 低下した時点で測定されます。

入力インピーダンスを伝送路の特性インピーダンスと一致させることで、効率的な電力伝送を確保し、信号の反射を最小限に抑える必要があります。

ポイントツーポイントの無線リンクでは、同じ入力に対するレンジが広がるため、高い指向性が望まれます。これは物理的なアンテナ形状を大きくすることで実現できますが、複数の素子を組み合わせることで、アンテナの有効放射面積を広げることができます。

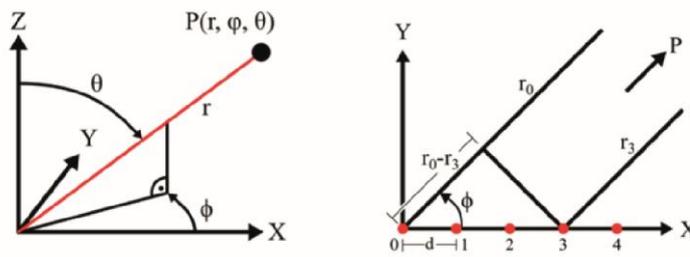


図 2 点 P の球面座標系 (左)
と P の遠距離場波面行路差 (右)

図 2 では、重ね合わせを明示しています。点 P は、放射体から離れた距離 r で表現できます。図 2 (左) では、極座標により、P が 3D 空間に配置されています。図 2 (右) では、5 つの素子からなる平面アレイから十分離れた位置に P が配置されています。重ね合わせの原理に従って複数の放射体からの電界を重ね合わせると、結果として得られる遠距離場放射信号の強度は、電磁波が構造的に重なること、つまり位相が合うところで最大になることがわかります。この所望の動作は、個々のアンテナ素子の巧みな組み合わせ、またはアンテナ励振信号の電気的特性 (位相と振幅) の制御によって部分的に実現できます。この研究では、主にデジタルシステム (高度な広帯域 DAC を使用) におけるビームフォーミングの制御能力を評価したため、素子を等間隔に配置した単純な平面放射体配置を採用しました。このようなアレイ配置から得られる群因子 (利得乗数) が簡単に導き出されました。

結果として得られたアレイ設計と、CST Microwave Studio CMS から出力された放射パターンのシミュレーション結果を図 3 に示します。

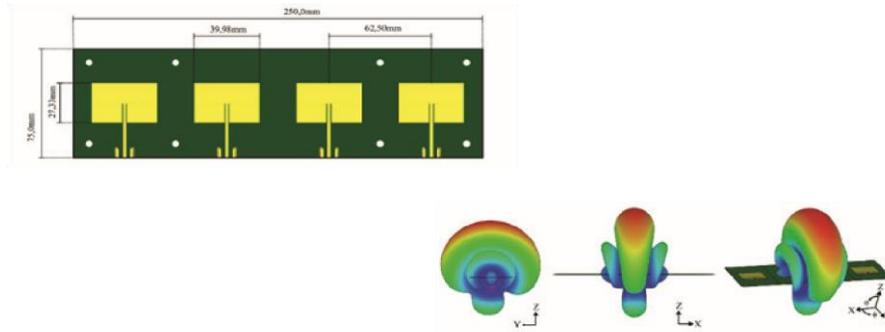


図3 実験用の 4x1 マイクロストリップアンテナと CMS によるシミュレーション RF 電界パターン

単純なマイクロストリップパッチアレイの実験結果

n 個の単一マイクロストリップ素子を持つ平面アレイの放射特性は、群因子と単一放射体の放射特性の積で表されます。個々の素子の指向性が高くない場合、図 5 に示すように、このグループ特性が支配的となります。メインローブの電力は、図示した 3 つのサイドローブよりもかなり高くなっています。

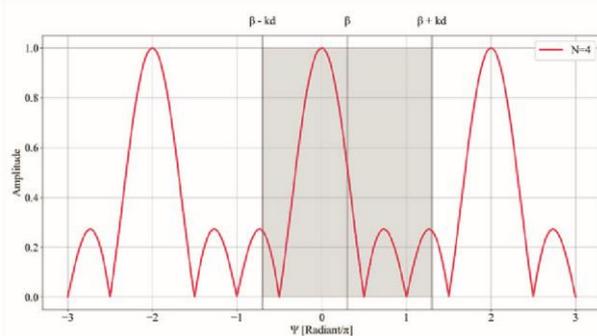


図4 4x1 パッチアンテナのメインビームとサイドローブ特性

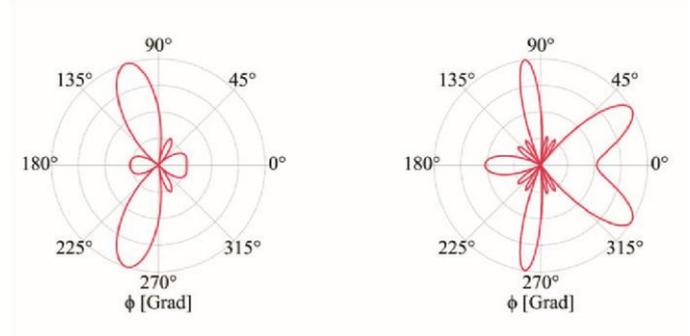


図5 素子の間隔が $\lambda/2$ (左)と λ (右)のアンテナのビームとサイドローブの極線図

図 5 の 2 つの極座標プロットは、素子間隔の違いがメインビームとサイドローブの構成にどのような影響を与えるかを示しています。図 5 は、左側に半波長間隔の結果、右側に整数の波長間隔の結果を示しています。この例では、半波長間隔の方がサイドローブの発生が少なく、減衰も大きいので、より好ましい選択しといえます。

テーパリング

方向制御は、サイドローブの発生が大きく減衰しているときに最もよく機能します。これにより、他の搬送波と干渉する可能性が低くなります。不要なサイドローブを抑制する簡単な方法として、テーパリングという方法が挙げられます。線形アレイへの入力信号の振幅分布を調整することで、所望の高減衰サイドローブを形成できます。よく知られている 2 つのローブ分布特性として、すべてのサイドローブを同じ振幅にする Dolph-Chebyshev 法と、大規模アレイによる展開時に特に有用で調整可能なサイドローブ減衰を生じる Taylor 法が挙げられます。

システムレベルの検討事項

従来のビームフォーミング手法は、多くの場合アナログ信号制御に頼っていました。アナログビームフォーミングでは、信号が個々の信号位相調整器によって位相調整が行われます。アナログ位相調整器では、バラクターダイオードまたはマイクロストリップラインが使用されています。さらに、信号はハイブリッド結合器で適切に結合され、選択可能な一連のビームが生成されます。



デジタル信号処理の進歩により今日では、ギガヘルツ・レベルの信号を完全にデジタル領域で処理できるようになりました。そのため、各アンテナを駆動する信号のパラメーターはシステム計算による異なる重み付けを行うことが可能になりました。この手法は、設計面と性能面に以下のような大きな利点をもたらします。

- 周波数に関係なく、信号をタイムシフトできる。
- 広帯域信号のビームフォーミングが可能。
- デジタルビームフォーマーは、多重伝搬を利用して動的に直接チャンネル測定の結果に基づいたチャンネルパラメーターの重み付けができる。

デジタルビームフォーミングがもたらすもうひとつの柔軟性として、ハードウェアを変更せずにデジタル処理だけを変更すればよいため、無線の再構成が簡単にできることが挙げられます。これは、RF ソフトウェア化から得られる主な利点の一つです。

マルチチャンネル同期について

超高速クロックレート(すなわち GHz)で動作する場合、システムは、どのようにしてすべての信号が正確に同じ瞬間にサンプリングされるようにできるのでしょうか？「SYNC チェーン」は、EV12DD700 が採用している巧妙でシンプルな方法です。

Teledyne e2v の斬新な SYNC チェーンにより、膨大な数のチャンネルを簡単にデジタイズチェーン接続できる同期ソリューションが生まれます。SYNC 信号源は、信号処理バックボーン(多くの場合 FPGA)から供給されます。SYNC 信号は精密なクロックではなくワンショットパルスのため、プリント回路に定着させるのは簡単です。デバイスから送信される各 SYNC 信号は、個々のデバイスのレイテンシーに基づいて再同期されます。この方法では初期設定時のキャリブレーションが必要ですが、一度実施すれば、チェーン内のデバイスの数に関係なく、すべてのデバイスが保証された位相の揃ったトリガーを持つようになります。

25 GHz ブロードバンド DAC がミリ波ビームフォーミングに新たな選択肢を生み出す

デジタル-アナログコンバーター (DAC) は、欧州の INTERSTELLAR¹ プロジェクトから生まれました。EV12DD700 と呼ばれるこのコンバーターは、Ka バンド対応のデュアルコアコンバーターです。3 dB 帯域幅は 25 GHz です。このコンバーターは 8 ビットまたは 12 ビットの分解能に切り替え可能で、変換レートは毎秒 12 ギガサンプルです。図 6 の特性曲線に示されているとおり、3 つの出力モード (NRZ、RF、2RF) により、特定のナイキストゾーンへの出力信号電力の最適化が可能です。RF モードと 2RF モードを使い分けることによって、6~26 GHz の範囲で有効な信号の出力範囲を拡張できます。また、低オーバーヘッドでライセンス料無料の ESStream プロトコルを使用した高速シリアルレーンインターフェース (HSSL) が実装されています。ESStream により、低リンクレイテンシー、最適な DC バランス、確実なリンク同期が保証されます。

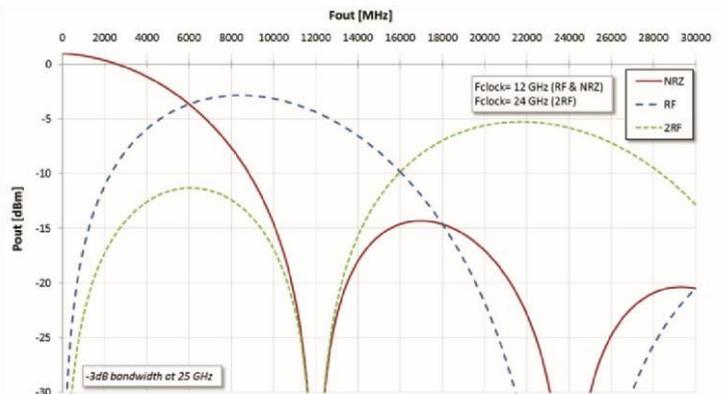


図 6 4 つのナイキストゾーンにわたる DAC 出力特性

さらに、これらの DAC は、以下の複数の強力なデジタル信号処理機能を備えているため、ビームフォーミングには非常に大きな力を発揮することが証明されています。

- デジタルアップコンバージョン (DUC)
- 周波数ホッピング
- 直接デジタル合成 (DDS)

¹ INTERSTELLAR プロジェクトは、2016 年に発足したプロジェクトです。欧州連合の資金援助プログラム「ホライズン 2020」の一部です。このプロジェクトの目的は、宇宙用デジタルデータコンバーターの分野における欧州の競争力と能力を強化することでした。



さらにこの DAC は、デジタルバトラーマトリックス(個々の信号経路に対してデジタル領域で信号の大きさと位相を調整できる機能ブロック)を備えています。この機能ブロックは、デジタルビームフォーミングの中心的な役割を担います。もう一つの重要な機能は、図 7 で赤く示されている同期(または SYNC)チェーンです。この信号により、大規模なマルチチャンネルシステム(サイドバーを参照)全体でチャンネル位相同期が確実に維持されます。これは、ビーム方向制御で相対的な位相整合許容差が求められる場合に明らかな利点となります。

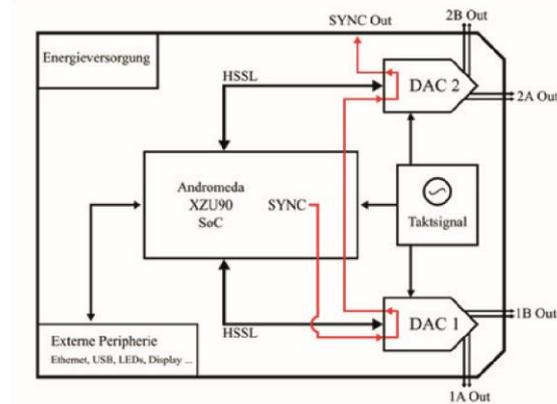
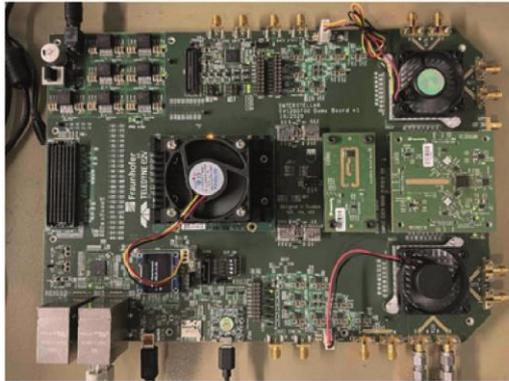


図 7 デジタルビームフォーマーの評価システムとブロック図

実験用ビームフォーミングシステム - 通信とインターフェース

Andromeda システムオンチップ (SoC) ソフトウェアは、シリアルペリフェラルインターフェース (SPI) を介して、一対の広帯域 DAC と通信します。バックエンドソフトウェアは、HSSL リンク経由で汎用入出力 (GPIO) ピンにもアクセスできます。これらは、FPGA および他の周辺機器との間で直接データ通信を行います。マスタークロックは、DAC のサンプルクロックと DSP クロックの両方を供給します。SoC は、極めて重要な SYNC 信号も供給します。ボードとの通信は、固有のアプリケーションインターフェースを備えたバックエンドソフトウェアを介して行われます。

DAC の特殊なビームフォーミング機能

EV12DD700 デュアル DAC は、複雑なデジタルアップコンバーター (DUC) と直接デジタルサンプリング (DDS) 機能を兼ね備えています。DUC は、以下の信号処理機能が実装されています。

- 4 つの補間ステージ (x1, x4, x8, x16)
- 1 つのビームフォーミング用利得・遅延ステージ
- 1 つの SYNC 補償ブロック
- 周波数ホッピングテーブル

周波数ホッピング、利得ステージ、位相ステージ、補間フィルタリング、SYNC 補償ブロックはすべて、SPI 経由で制御されます。

数値制御発振器 (NCO) の周波数分解能は、32 ビットです。このブロックは、連続波またはチャープパターン(いずれもユーザーが選択可能)を生成する直接デジタル合成 (DDS) モードも備えています。ビームフォーミング制御は、 $-8.5 \sim 7.5$ サンプル、7 ビットの分数遅延分解能のプログラム可能遅延ステージと、 $\pm 12.5\%$ 、10 ビット分解能のプログラム可能利得ステージで構成されます。結果として生じる出力パルス形状を補償するために、非同期フィルターが 2 つのプログラム可能な係数を提供します。

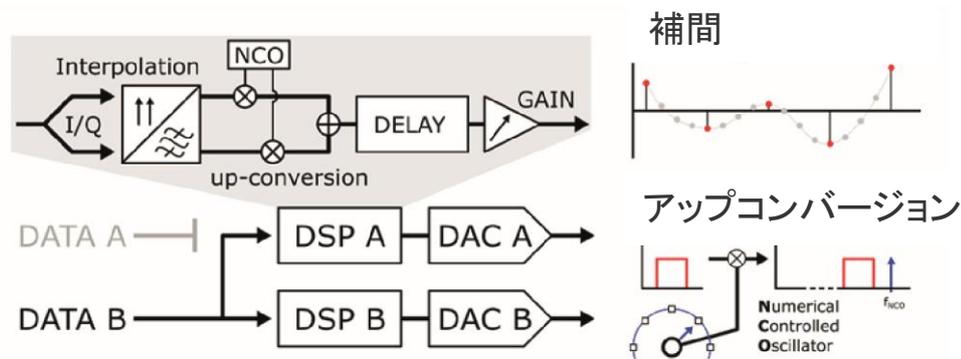


図 8 DAC 補間機能とアップコンバージョン機能

25 GHz の DAC 帯域幅に対応するには、高いデータスループットレートが求められます。DAC は、この潜在的なデータのボトルネックを緩和するために、アップコンバージョンと調整可能な補間機能を備えており、3 段階の補間を行えます。データサンプルレートは、アップサンプリングとその後のデジタルフィルタリングによって、各ステージで 2 倍になります。フィルタ遅延が各アップコンバージョンステージの補間係数と一致するように、4 ステージのファローフィルターが実装されています。補間器の複合伝達関数を図 9 に示します。下図は、通過帯域特性の拡大図です。

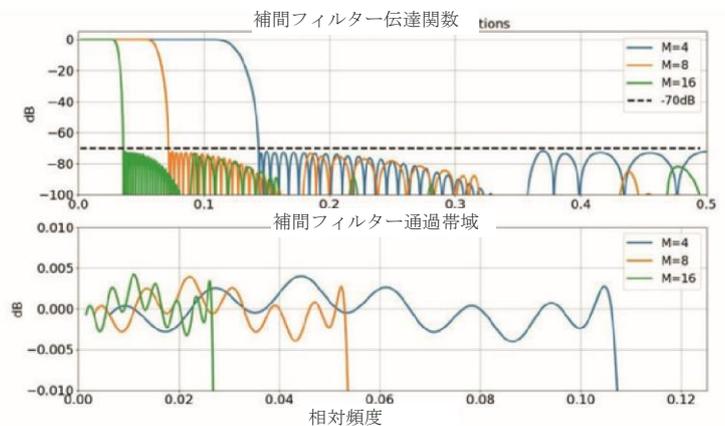


図 9 70 dB 補間フィルタリング (x4, x8, x16) と通過帯域の拡大図

出力信号は、デジタルパターンファイルとして DAC に供給されます。これには、サンプルごとの信号振幅データが含まれます。波形パターンが両チャンネルで同じであるため、データは 1 つのコアに転送すればよく、送信データのスループットは半分になります。また、単純なテスト波形 (正弦波、方形波、三角波) は、周波数、振幅、その他の信号パラメータを指定した DDS ブロックを介して、DAC 上で直接生成できます。

実際のビームフォーミング動作

システムの起動と同期が完了すると、各 DAC はシリアルデータレーン (HSSL) を介してデジタルデータを受信できる状態になります。ビームフォーミングモードでは、コア B のデータが両方のコアに供給されます。ビームフォーミングを使用するために必要なのが、補間レベルの選択です。これにより、シリアルレーンの一部を無効化できます。データレーンの無効化によりシステムのエネルギー消費量が削減されるため、これは役に立ちます。

DAC の構成は、SPI レジスターを介して行います。信号振幅と遅延設定用のレジスターは、各 DAC コアに対して 4 個用意されており、4 つの個別の信号プロファイルを保存できます。あらかじめ組み込まれているこれらの「ゾーン」は、有効化するとトリガーイベントにより DAC を介して迅速に切り替えることができ、高速ビームホッピングが可能になります。ゾーンの切り替えは、位相連続的または不連続的に行えます。

数値制御発振器 (NCO) はデジタルアップコンバージョンに使用できます。NCO は、正弦波関数を生成します。この際、NCO はルックアップテーブルと CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer) アルゴリズムを組み合わせで使用します。設定位相値は各クロック信号のオンチップ位相算出器に追加されます。上位ビットはルックアップテーブルから直接、下位ビットは CORDIC から取得されます。このように、DAC は RF 領域でビーム方向を制御するための中核となるデジタル機能を備えています。



実験結果

下図は、最初のシミュレーションと試験の結果を比較して示しています。メインビーム幅は 26 度で、サイドローブの減衰は-13dB でした。測定されたサイドローブの位置と信号のヌルは、シミュレーション結果と十分一致しました。反射によって高角度で確認された SN 比の測定値は、特に注目値に値します。

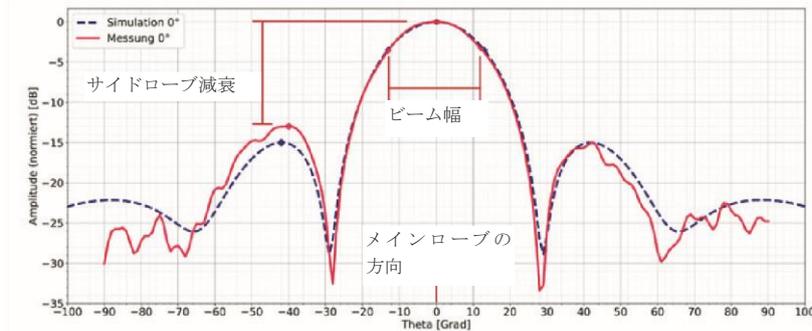


図 10 初期試験データ(赤)とシミュレーション(青線)の比較

振幅のテーパリングも評価しました。実験結果から、さらに-3 dB のサイドローブ減衰を実現できるとわかりました(図 11 を参照)。

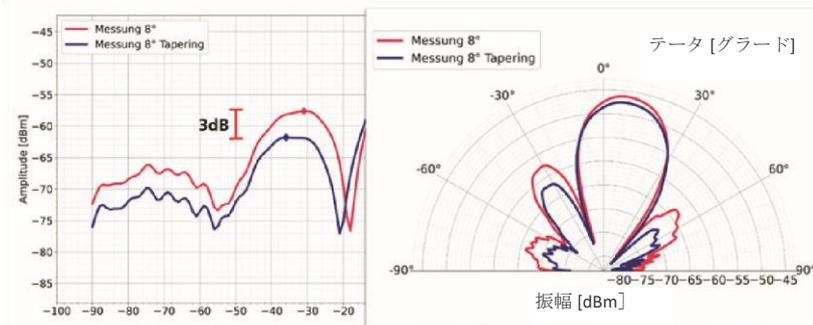


図 11 テーパリングによる 3 dB のサイドローブ抑制

結論

このプロジェクトでは、EV12DD700 がシンプルな平面マイクロストリップアンテナの RF ビーム方向制御を実現するために必要な、すべての制御機能を備えていることが証明されました。このプロジェクトでは、簡素な 4 素子マイクロストリップアレイの予測性能のシミュレーションを行い、アンテナを調達して、デジタル制御システムを構築することに注力しました。実際には Teledyne e2v の EV12DD700 デュアル 25 GHz DAC を利用しました。この装置には、プログラム可能なビームフォーミング機能一式が備わっています。

RF チャンバー測定により、モデル化された性能と測定された性能の不一致を特定でき、複数の改善点が浮かび上がりました。全体的に、理論的な成果と実践的な成果の間には十分な一致が見られました。テーパリングによるサイドローブの減衰が十分に確認できました。さらに、DAC の位相と信号振幅のきめ細かい制御が必要不可欠なことがわかりました。試験サイクルでは、チャンネル間の重要な信号位相整合を保証するためにケーブルの長さを慎重に合わせることに重視されました。DAC に内蔵された位相制御器がここでも役立ちました。

特筆すべきシステム上の利点は、DAC の SYNC チェーンです。同期されたのは 2 台の装置だけでしたが、デジチェーン接続が可能であることが明白な利点として確認されました。間違いなく、これは将来の大規模アレイ展開においてさらに説得力を発揮します。

最後に、25 GHz 帯域幅 12 Gsps サンプリングの DAC が 2RF モードで Ka バンドに有用な RF 電力を容易に出力できることは注目値に値します。オンチップデジタルビームフォーミング機能は、このような周波数でも同じように利用できます。これらの機能は、マイクロ波 RF ソフトウェア化の新時代と、スマートな広帯域マイクロ波アンテナの到来を告げるものです。



TELEDYNE e2v | Semiconductors
Everywhereyoulook™



Fraunhofer

参考文献

- Performanz von integratedriertem und kombiniertem Beamforming mittels Digital-Analog-Umsetzern by Jan Raab (デジタル-アナログコンバーターを用いた統合ビームフォーミングと複合ビームフォーミングの性能)、2022 年 9 月 22 日、Jan Raab とドイツ・エルランゲンの Fraunhofer IIS との共著。
- EV12DD700 デュアルチャンネル Ka バンド対応 12 GSps DAC データシート



TELEDYNE e2v | Semiconductors
Everywhereyoulook™

詳細については、以下宛てにご連絡ください:

ニコラ・シャンティエ

Teledyne e2v Semiconductors

マーケティング・ディレクター

信号およびデータ処理ソリューション

nicolas.chantier@teledyne.com



Fraunhofer

詳細については、以下宛てにご連絡ください:

クリストフ・シュルント

Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS

RF 回路グループマネージャー、

通信システム事業部

christof.schlund@iis.fraunhofer.de

