

# フェーズド・アレイ・アンテナの パターン——【Part 2】グレーティング・ ローブとビーム・スクイント

著者：Peter Delos、テクニカル・リード  
Bob Broughton、エンジニアリング担当ディレクタ  
Jon Kraft、シニア・スタッフ・フィールド・アプリケーション・エンジニア

## はじめに

本稿は、フェーズド・アレイ・アンテナのパターンについて解説するシリーズのPart 2です。Part 1では、フェーズド・アレイ・アンテナにおけるステアリングの概念について説明しました。その上で、アレイの利得に影響を与える要素について解説を加えました。それに続く今回は、グレーティング・ローブとビーム・スクイントの話題を取り上げます。前者のグレーティング・ローブについては、イメージしにくい部分があります。そこで、本稿では、グレーティング・ローブをA/Dコンバータ（ADC）における信号のエイリアシング（折り返し）に例えて説明することにします。言い換えると、グレーティング・ローブを空間エイリアスだと捉えて解説を進めることにします。一方のビーム・スクイントとは、実時間遅延ではなく位相シフトを使用してビーム・ステアリングを行う場合に、周波数に応じてアンテナの焦点が変化する現象のことです。本稿では、ビーム・スクイントが一般的なシステムに及ぼす影響について説明します。その上で、時間遅延を使用する方法と位相シフトを使用する方法の間で生じるトレードオフについて解説を加えます。

## グレーティング・ローブの概要

Part 1では、素子の間隔 $d$ が $\lambda/2$ （ $\lambda$ は波長）である場合を対象として考察を進めました。図1のグラフは、フェーズド・アレイにおいては素子の間隔を $\lambda/2$ に設定するのが非常に一般的である理由を表しています。この図には、2つの条件下におけるアレイ・ファクタを示しています。青色のグラフは、Part 1の図11で示したビーム角が $30^\circ$ の場合の例と同じものです。一方の緑色のグラフは、 $d/\lambda$ の値が0.7の場合の例です。両者を比較すると、アンテナ・パターンの違いにより、どのような差が生まれるのか把握することができます。まず、素子の間隔を広げると、ビームの幅が狭くなります。これ自体は好ましいことです。ヌル（null）の間隔も狭くなり、隣り合うヌル同士もより近くなっています。この特性も許容できます。もう1つの違いとしては、アレイの利得が最大になる2つ目の角度（この例では $-70^\circ$ ）が存在している

ことが挙げられます。問題なのはこの部分です。これは、あたかもアンテナの利得が複製されているかのように見えます。これがグレーティング・ローブです。グレーティング・ローブは、空間エイリアスだと見なすことができます。

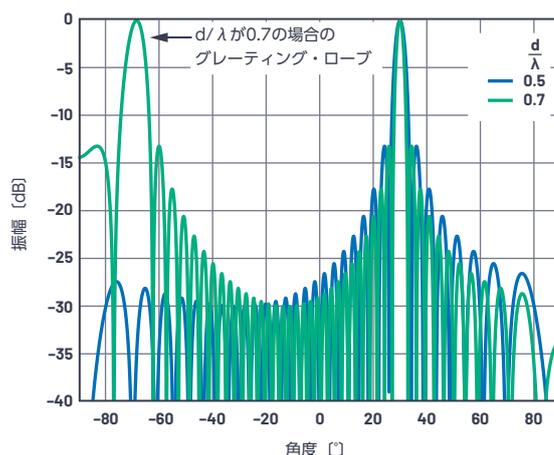


図1. 32素子のリニア・アレイにおける正規化済みのアレイ・ファクタ。 $d/\lambda$ の値が異なる2つの例を示しました。

## サンプリング・システムとの類似性

グレーティング・ローブは、サンプリング・システムにおけるエイリアスに似ています。それと同じように考えると、イメージしやすくなるでしょう。レシーバーのアーキテクチャにおける周波数計画では、ADCによるアンダーサンプリングが用いられることがよくあります。アンダーサンプリングは、サンプリング・レート $f_s$ として意図的に低い周波数を使用することで実現します。そのような周波数でサンプリング処理を実行すると、 $f_s/2$ よりも高い周波数（第1ナイキスト・ゾーンよりも上）成分が第1ナイキスト・ゾーンにエイリアスとして現れます。それらの高い周波数成分は、ADCの出力においては実際よりも低い周波数成分と等価になります。



実際、この場合のアレイ・ファクタは、図3のようになります。

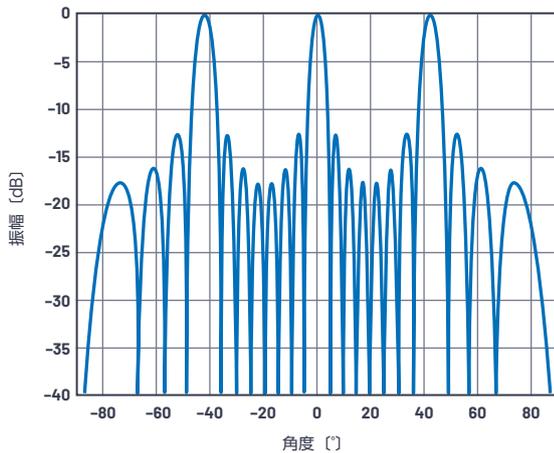


図3. ボアサイトにおけるアレイ・ファクタ。  
 $d/\lambda = 1.5$ 、 $N = 8$ の場合の例です。

### グレーティング・ローブの例 (その2)

先ほどの例では、グレーティング・ローブの式を簡素化するために、機械的なボアサイト ( $\Delta\Phi = 0$ ) に着目しました。そして、機械的なボアサイトにおいて、 $d < \lambda$  の場合にはグレーティング・ローブは現れないことを確認しました。しかし、サンプリング定理から、間隔が  $\lambda/2$  よりも広くなると何らかのグレーティング・ローブが現れるはずで、 $\lambda/2 < d < \lambda$  の場合、グレーティング・ローブはどこに現れるのでしょうか。

Part 1 の図4で示しましたが、位相はステアリング角に応じて変化します。メイン・ローブが機械的なボアサイトから離れるにつれて、 $\Delta\Phi$  は  $0 \sim \pm\pi$  の範囲で変化しました。ここでは、以下の式が成り立ちます。

$$\frac{m \times 2\pi + \Delta\Phi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{d} \quad (6)$$

その範囲は次のようになります。

$$0 \sim \left( \pm 0.5 \times \frac{\lambda}{d} \right) \quad (m = 0 \text{ の場合}) \quad (7)$$

また、 $|m| \geq 1$  の場合には、必ず以下の値の範囲外になります。

$$\pm 0.5 \times \frac{\lambda}{d} \quad (8)$$

これにより、 $|m| \geq 1$  の場合に  $\arcsin$  関数の引数が必ず 1 よりも大きくなるようにするための  $\lambda/d$  の最小許容値を求めることができます。ここで、以下の2つの場合について考えます。

- ▶  $\lambda/d \geq 2$  (すなわち  $d \leq \lambda/2$ ) である場合、 $m$  の値にかかわらず、複数の解が得られることはありません。 $m > 0$  の場合のすべての解は、 $\arcsin$  関数の引数が 1 よりも大きいケースで得られます。この場合だけ、水平方向までグレーティング・ローブが発生しないようにすることができます。
- ▶  $\Delta\Phi$  の値を意図的に  $\pm\pi$  よりも狭い範囲に制限すると、 $\lambda/d$  をそれより小さくしてもグレーティング・ローブは発生しません。 $\Delta\Phi$  の範囲を狭めると、アレイのステアリング角の最大値が小さくなります。このトレードオフについては、次のセクションで詳しく説明します。

### 素子の間隔に関する考察

素子の間隔は必ず  $\lambda/2$  未満でなければならないのでしょうか。必ずしもそういうわけではありません。これについては、アンテナ設計者が考察すべきトレードオフ事項になります。ビームを完全に水平方向 ( $\theta = \pm 90^\circ$ ) までステアリングするのであれば、(グレーティング・ローブが可視半球に現れないようにするには) 素子の間隔は  $\lambda/2$  でなければなりません。しかし、実際に達成可能な最大ステアリング角は必ず  $90^\circ$  よりも小さくなります。ステアリング角が大きくなると、エレメント・ファクタやその他の劣化に依存することになるからです。

図2を見ると、 $y$  軸 ( $\theta$ ) の範囲を制限すれば、グレーティング・ローブは使われることのない走査角度にしか現れないことがわかります。では、所定の素子の間隔  $d_{\max}$  に対し、この制限範囲の上限値  $\theta_{\max}$  はどのように設定すればよいのでしょうか。これについては、先述したように以下の条件を満たすことが目標になります。

$$\left| \frac{m \times 2\pi + \Delta\Phi}{2\pi} \times \frac{\lambda}{d} \right| > (m \geq 1 \text{ のすべての } m \text{ について}) \quad (9)$$

これを用いて、最初のグレーティング・ローブ ( $m = \pm 1$ ) が現れる位置を求めることができます。上述した変更を加え、 $\Delta\Phi$  に Part 1 で示した式 (1) を代入すると、次のようになります。

$$\pm 1 \times 2\pi + \frac{2\pi d_{\max} \sin\theta_{\max}}{\lambda} \times \frac{\lambda}{d_{\max}} = 1 \quad (10)$$

この式は、次のように簡素化できます。

$$\pm \lambda + d_{\max} \sin\theta_{\max} = d_{\max} \quad (11)$$

この式から、 $d_{max}$ は次のように表されます。

$$d_{max} = \frac{\lambda}{1 + |\sin\theta_{max}|} \quad (\theta_{max} \text{ は } 0 \sim \pm\pi/2) \quad (12)$$

この $d_{max}$ が、狭められた走査角の範囲内 ( $\theta_{max}$ ) にグレーティング・ローブが現れない条件となります。ここで、 $\theta_{max}$ は $\pi/2$  (90°) 未満です。例えば、信号の周波数が10GHzで、グレーティング・ローブを発生させることなく $\pm 50^\circ$ の範囲内でステアリングを実施する必要がある場合、素子の間隔の最大値は以下のように求められます。

$$d_{max} = \frac{(3 \times 10^8)/(10 \times 10^9)}{1 + \sin(50^\circ)} = 17 \text{ mm} \quad (13)$$

最大走査角を制限すると、素子の間隔を広げてチャンネルあたりの物理的なサイズを大きくしたり、素子数に対してアパーチャを広げたりするための自由度が得られます。この性質を利用できるアプリケーションの例としては、事前に定義された方向 (比較的狭い範囲) を対象とするアンテナが挙げられます。その場合、素子の利得を高めて定義済みの範囲における指向性を向上したり、素子の間隔を広げてアパーチャを大きくしたりすることが可能です。どちらも、狭められたビーム角の範囲内におけるアンテナ全体の利得の増加につながります。

式 (3) は、ステアリング角が $0^\circ$ であったとしても、最大間隔は1波長分であることを示しています。この点に注意してください。これは、可視半球にグレーティング・ローブが存在することを許容しない場合です。例えば、GEO (対地同期軌道) 衛星は、機械的なボアサイトから $9^\circ$ のステアリング角によって地球全体をカバーしています。これは、地球の表面に対応する位置に現れないのであれば、グレーティング・ローブの存在を許容できることを示す1つの例だと言えます。このような場合には、素子の間隔を数波長分にすることが可能です。そうすると、ビーム幅は更に狭くなります。

ここで、少し変わったアーキテクチャについても触れておきましょう。それは、素子の間隔を不均一にすることによって、グレー

ティング・ローブの問題の解決を試みるというものです。この種のアンテナ・アレイは、非周期アレイに分類されます。スパイラル・アレイはその一例です。機械的なアンテナ構造の観点からは、より大きなアレイにスケーリングすることが可能な共通のビルディング・ブロックを採用していることが望ましいかもしれません。しかし、そうすると、先述したグレーティング・ローブの条件に当てはまる均一なアレイしか構成できません。

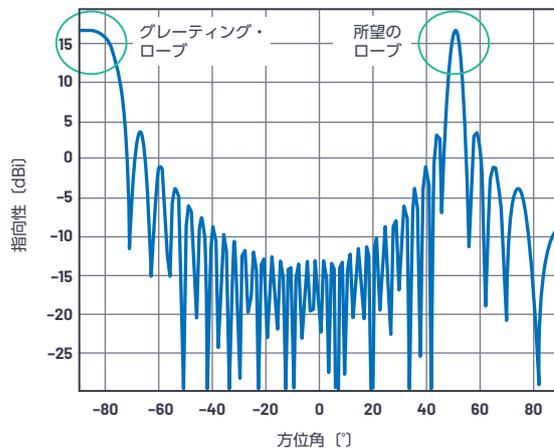


図4. 水平方向にグレーティング・ローブが現れ始める様子。  
 $\theta = 50^\circ$ 、 $N = 32$ 、 $d = 17\text{mm}$ 、 $\Phi = 10\text{GHz}$ の場合の例です。

## ビーム・スワイト

Part 1の冒頭では、波面が素子のアレイに近づくとき、ボアサイトに対する波面の角度 $\theta$ に基づく時間遅延が素子間に生じると説明しました。単一周波数の信号を扱う場合、その時間遅延を位相シフトに置き換えることによって、ビーム・ステアリングを実施することができます。この方法は、狭帯域の信号に対しては有効です。しかし、広帯域の信号については、周波数に応じてビームの向きがシフトしてしまう可能性があります。これについては、時間遅延は周波数に応じた線形の位相シフトであることから直感的に理解できるでしょう。位相シフトは、与えられたビームの向きの条件下で周波数に応じて変化させる必要があります。逆に、位相シフトを一定にすると、ビームの向きは周波数に応じて変化します。

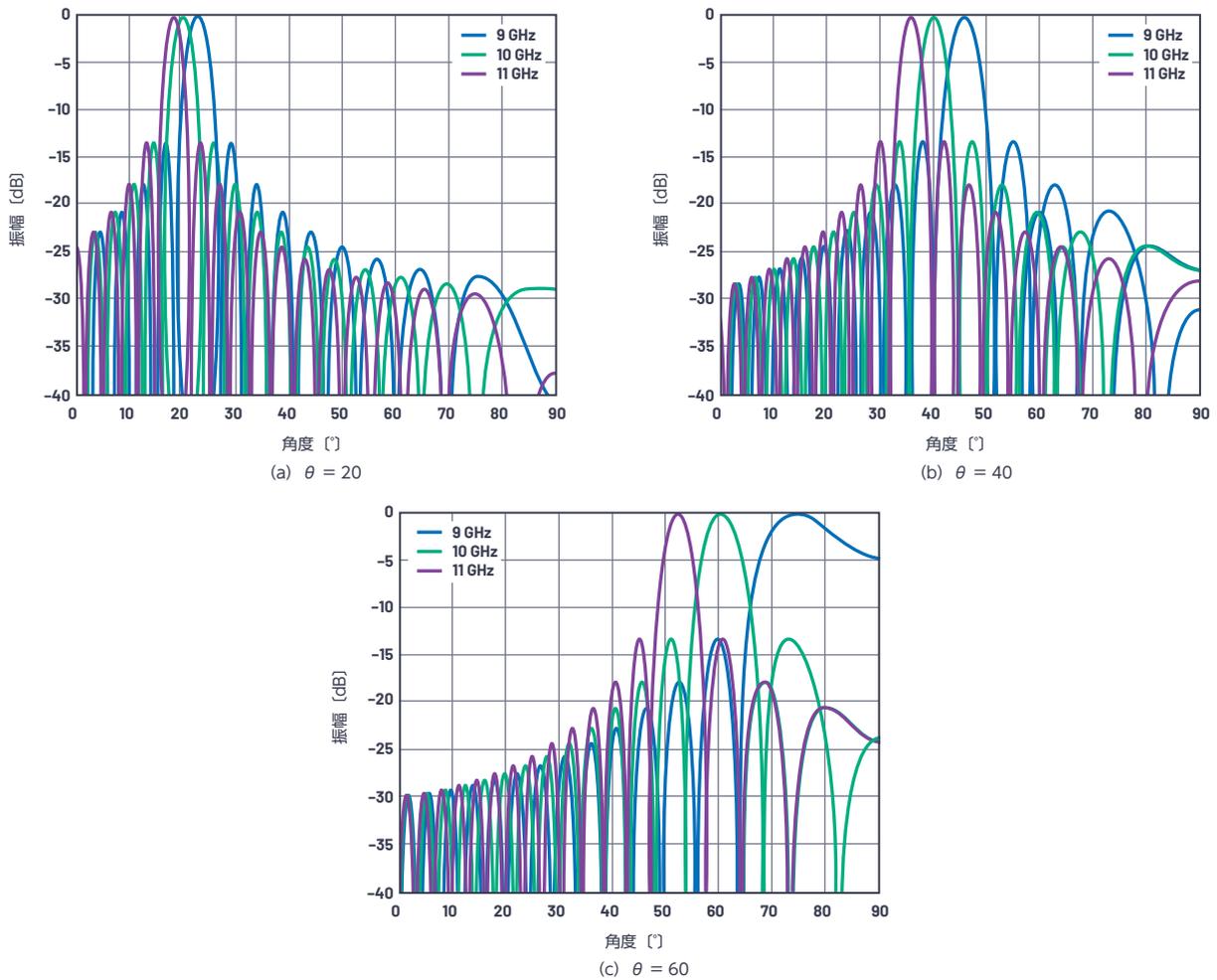


図5. Xバンドにおけるビーム・スクイント。  
32素子のリニア・アレイにおいて素子の間隔が $\lambda/2$ である場合の例です。

ビーム角が周波数の関数として変化する事象を、ビーム・スクイントと呼びます (図5)。

ボアサイト ( $\theta$ は  $0^\circ$ ) では、素子間に位相シフトは存在しません。そのため、ビーム・スクイントが生じることはありません。ビーム・スクイントの大きさは、角度 $\theta$ と周波数の変化量の関数となります。図5に示したのはXバンドにおける例です。中心周波数が10GHz、変調帯域幅が2GHzという条件下でビーム・スクイントが生じる様子を表しています。ビームの向きは周波数と初期ビーム角の関数として変化することがわかります。

ビーム・スクイントは、直接計算することができます。式 (1) と式 (2) から、ビームの向きのずれであるビーム・スクイントは次のように求められます。

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{f_0}{f} \sin\theta_0\right) - \theta_0 \quad (14)$$

図6は、この式を基にして描いたグラフです。この図には $f/f_0$ の値を示していますが、これは上の式 (14) の $f_0/f$ の逆数を示した方が中心周波数からの変化量を把握しやすいからです。

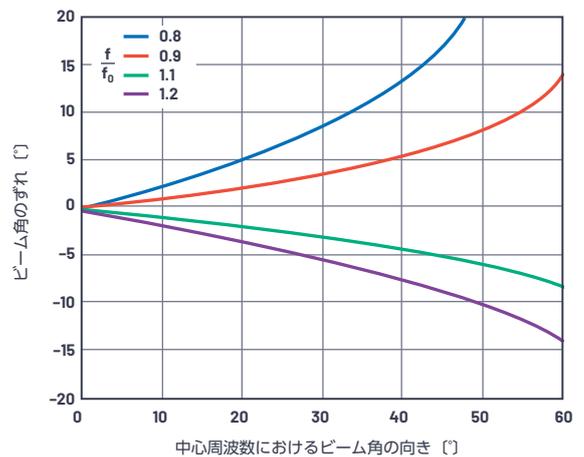


図6. ビーム・スクイントとビーム角の関係。  
異なる $f/f_0$  (周波数の変化量) に対応するグラフを示しました。

ビーム・スクイントについて、グラフからは以下のようなことがわかります。

- ▶ 周波数に応じたビーム角のずれは、ビーム角がボアサイトから離れるほど大きくなります。
- ▶ 周波数が中心周波数より高い場合よりも、低い場合の方がずれは大きくなります。
- ▶ 中心周波数より低い周波数では、ビームはボアサイトから大きく離れていきます。

## ビーム・スクイントに関する考察

ビーム・スクイントは、周波数に依存するステアリング角のずれです。これが生じるのは、時間遅延を位相シフトで代替（近似）しているからです。実時間遅延をベースとしてビーム・ステアリングの機能を実装すれば、この問題は発生しません。

ビーム・スクイントは非常に明白な問題です。それにもかかわらず、なぜ時間遅延の代わりに位相シフトを使おうとするのでしょうか。その理由は、時間遅延よりも位相シフトの方が容易に扱えるからです。実際、位相シフトを利用の方が設計が容易であることに加え、必要なICも入手しやすいと言えます。時間遅延は何らかの伝送路の形で実装され、必要な総遅延はアパーチャ・サイズの関数になります。従来、アナログ・ビームフォーミング用のICのほとんどは、位相シフトをベースとしていました。しかし、最近では、実時間遅延に基づくIC製品が登場しつつあります。今後は、その種のICがフェーズド・アレイ・アンテナの実装により一般的に使われるようになる可能性があります。

デジタル・ビームフォーミングでは、DSP回路とデジタル・ビームフォーミング用のアルゴリズムを使うことで、実時間遅延を使用した機能を実装することができます。したがって、あらゆる素子がデジタル化されたフェーズド・アレイのアーキテクチャは、ビーム・スクイントの問題を自然に克服しつつ、プログラマブルな柔軟性を最大限に備えるものだと言えます。但し、そうしたソリューションでは、消費電力、サイズ、コストが問題になる可能性があります。

サブアレイに対してアナログ・ビームフォーミングを実施した後に、アレイ全体に対するデジタル・ビームフォーミングを行うハイブリッド型のビームフォーミングも存在します。これであれば、ビーム・スクイントを自然にいくらか緩和できます。そのため、これは検討に値する手法だと言えます。この場合、ビーム・スクイントはサブアレイにしか影響を与えません。サブアレイはビーム幅がかなり広いので、ビーム角のずれに対する許容レベルは大

きくなります。したがって、サブアレイのビーム・スクイントが許容範囲内であれば、サブアレイには位相シフトを適用し、続くデジタル・ビームフォーミングには実時間遅延に対応する機能を適用する方法で、ハイブリッド型のビームフォーミング・アーキテクチャを実装することができます。

## まとめ

本稿のPart 1では、ビーム・ステアリングとアレイ・ファクタについて説明しました。それに続く今回は、グレーティング・ローブとビーム・スクイントの問題を取り上げました。Part 3では、サイドローブを抑える手段としてテーパリングを利用する方法を説明します。その上で、位相シフトの量子化誤差が及ぼす影響について考察します。

## 参考資料

Constantine A. Balanis [Antenna Theory: Analysis and Design, third edition (アンテナの理論：分析と設計 第3版)] Wiley-Interscience, 2005年

Matthew Longbrake [True Time Delay Beamsteering for Radar (実時間遅延によるレーダー向けビーム・ステアリング)] 2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)、IEEE、2012年

Robert J. Mailloux [Phased Array Antenna Handbook, second edition (フェーズド・アレイ・アンテナ・ハンドブック 第2版)] Artech House, 2005年

Robert M. O' Donnell [Radar Systems Engineering: Introduction (レーダー・システム・エンジニアリング：概要)] IEEE、2012年6月

Merrill Skolnik [Radar Handbook, third edition (レーダー・ハンドブック 第3版)] McGraw Hill, 2008年



### 著者について

Peter Delos ([peter.delos@analog.com](mailto:peter.delos@analog.com)) は、アナログ・デバイセズ（米国ノースカロライナ州グリーンズボロ）の航空宇宙／防衛グループに所属するテクニカル・リードです。1990年にバージニア工科大学で電気工学の学士号を、2004年にニュージャージー工科大学で電気工学の修士号を取得。エレクトロニクス業界で25年以上にわたって経験を積み上げてきました。そのうちのほとんどの期間は、アーキテクチャのレベル、プリント基板のレベル、ICのレベルで先進的なRF／アナログ・システムの設計に携わっていました。現在は、フェーズド・アレイ・アプリケーション用の高性能レシーバー、波形発生器、シンセサイザの小型化を図るための設計に注力しています。



### 著者について

Bob Broughton ([bob.broughton@analog.com](mailto:bob.broughton@analog.com)) は、アナログ・デバイセズの航空宇宙／防衛事業部門に所属するエンジニアリング担当ディレクターです。1993年に入社し、プロダクト・エンジニアとIC設計エンジニアの業務を経験しました。アナログ・デバイセズに入社する前は、RaytheonにRF設計エンジニアとして、Peregrine SemiconductorにRF IC設計者として勤務していました。1984年にウェスト・バージニア大学で電気工学の学士号を取得しています。



### 著者について

Jon Kraft ([jon.kraft@analog.com](mailto:jon.kraft@analog.com)) は、アナログ・デバイセズのシニア・スタッフ・フィールド・アプリケーション・エンジニアです。コロラド州を拠点とし、ソフトウェア無線と航空宇宙用フェーズド・アレイ・レーダーを担当しています。勤続年数は13年です。ローズ・ハルマン工科大学で電気工学の学士号、アリゾナ州立大学で電気工学の修士号を取得。9件の特許を保有しており（それらのうち6件はアナログ・デバイセズで取得）、現在も1件を申請中です。



想像を超える可能性を  
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

## アナログ・デバイセズ株式会社

お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、[analog.com/jp/contact](http://analog.com/jp/contact) をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧ができます。

©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved.  
本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。  
Ahead of What's Possibleはアナログ・デバイセズの商標です。

AD5406-0-6/20

VISIT [ANALOG.COM/JP](http://ANALOG.COM/JP)