

ADASから自動運転へ—— レーダーの性能は 十分なのか？

著者：Chris Jacobs、自律輸送／車両安全担当バイスプレジデント

進化を続けるレーダー技術

レーダーは100年以上も前に誕生した技術です。その歴史は、1904年にChristian Huelsmeyer氏が船舶の検出に使用したことから始まりました。広く知られたアプリケーションの例としては、防衛用のレーダー・システムや民間の航空管制システムが挙げられます。また、自動車の分野で言えば、スピード違反の取り締まりに使用されるシステムなどが代表的な例でした。このような背景から、レーダー技術は既に成熟したものであり、新たな技術開発などほとんど行われていないと誤解している方もいるかもしれません。しかしながら、実際には、イメージング・レーダーや協調型レーダー（cooperative radar）の分野で、今まさに革新的な技術が生み出されています。

アナログ・デバイセズは、車載アプリケーション向けに新たなレーダー技術を提供すべく、当社ならではの特徴を備えたハードウェア、ソフトウェア、アルゴリズムに関する取り組みを行っています。25年以上にわたり車載分野で積極的に活動しており、安全性を確保するためのアプリケーション開発に携わってきました。ここ15年間は、DSPやデータ・コンバータ（A/Dコンバータ、D/Aコンバータ）を提供することで、この分野に貢献しています。そして、最近では、24GHzと77GHz/79GHzに対応するレーダー用のチップセットなどを製品化し、車載レーダーのサプライ・チェーンに加わっています。

現在は、先進運転支援システム（ADAS：Advanced Driver Assistance Systems）が導入され、車両の自動走行を実現すべく取り組みが進められている状況にあります。つまり、自動車の世界では、安全性が最も重視すべき事柄になっていると言えます。筆者はアナログ・デバイセズで自律輸送／車両安全事業部門を担当するバイスプレジデントを務めています。筆者の仕事の原動力、そして当社の技術者の原動力となっているのは、自動車の性能を向上し、より高いレベルの自律化を実現するために利用される最も先進的な技術に取り組んでいるという事実です。筆者らの試算によれば、当社の製品をベースとする車載センサーによって、毎日8人の命を救うことができているのです。

運転者、同乗者、歩行者を確実に保護するためには、ハードウェアとソフトウェアの両方で多くの革新を果たす必要があります。効率がよく最適化されたレーダー技術を開発し、航空宇宙／防衛向けのものと同じレベルの機能、性能、信頼性を備えるシステムを提供しなければなりません。しかも、それを自家用車に適したフォーム・ファクタとコストで実現しなければならないのです。

筆者と同じ部門で技術ディレクタを務めているMike Keaveneyは、次のように述べています。

「現在、軍用で使われるような、分解能の高いイメージング・レーダー・システムの価格は、25万米ドル（約2700万円）ほどになります。これは、価格が数百万米ドルにもなる戦車に適用するのであれば許容できるレベルでしょう。しかし、平均3万米ドルほどの自家用車向けのものとしては全くふさわしくありません。当社は、世界中のあらゆる自動車にイメージング・レーダーを搭載できるようにしたいと考えています。それに向けて小型化を進め、耐久性を高め、コスト、サイズ、重量、消費電力を低減するための検討を進めています。」

レーダーが抱える課題

性能は優れているもののコストの高い航空宇宙／防衛用のレーダー技術を自動車に適用できるようにするには、どうすればよいでしょうか。そのためには、技術、美学的思想（aesthetic）、コストといった様々な課題を解消する必要があります。SWaP（サイズ、重量、消費電力）を低減することだけが重要なわけではありません。コストダウンを図りながら、性能を向上させる必要があります。しかも、必要なのは物体を検知だけでなく、その物体が何であるか識別できるレーダーです。そのためには、現在のクラス最高レベルのシステムを使用する場合と比べて、はるかに高い分解能で画像を生成できるレーダーを実現しなければなりません。

アナログ・デバイセズは、技術を進化させることにより、安全性を確保するために威力を発揮し、高効率でコスト効率に優れる車載レーダーを消費者に提供しようと考えています。そのために当社が設定した目標を以下にまとめました。

性能

- ▶ サイズ、コスト、消費電力を増やすことなく、高度な自動運転に必要なレベルまで角度分解能を高めます。
- ▶ 反射率の低い目標物からの反射点の数を増やします。
- ▶ 特に、水平方向に移動する物体を検知する際に生じる遅延を劇的に低減します。それにより応答時間が改善され、緊急時の車両の回避行動を実現できるようになります。

SWaP

- ▶ 高い性能を維持しつつ、フォーム・ファクタ（サイズ、重量、消費電力）を最適化します。
- ▶ 車両の工業デザインに影響を及ぼさないようにし、システムの美学的思想を維持します。

コスト／経済性

- ▶ 大量生産される自動車に許される価格とフォーム・ファクタを実現しつつ、分解能の高いレーダーを実装します。
- ▶ 自動車の購入者が納得できる価格に収まるようにシステムを実現します。すべての代金を支払ってくれるのは購入者だからです。

規制

- ▶ 例えば、2022 年までに自動緊急ブレーキ機能を標準装備にするという米国の指令など、ADAS の安全機能に関する政府の規制を継続して順守していく必要があります。レーダーはオプションではなく、標準装備になるのです。難易度の高い規制を遵守しつつ高い性能を実現し、自動車メーカーと消費者が受け入れられるレベルまでシステム・コストを継続的に引き下げることが重要です。

現在使用されている車載レーダー機器は、携帯電話よりも小さな形状で実現可能になっており、車両の前後や、側面の死角に存在する大きな物体であれば検知することができます。しかし、それだけでは十分ではないということです。

イメージング・レーダー

イメージング・レーダーのコンセプトを具現化し、角度分解能をより高めることで、物体を検知するだけでなく、物体を識別することが可能になります。つまり、前方に何か物体が存在することだけでなく、それが自動車、バイク、人、子供のうちいずれなのかを識別できるということです。特にロボタクシーのようなアプリケーションには、この機能によって大きな効果がもたらされます。

イメージング・レーダーでは、高い分解能を実現するために、デジタル・ビームフォーミング、フェーズド・アレイ技術と共に、広帯域に対応する信号処理を利用します。所望の角度分解能を実現するために、チャンネル数を大きく増やし、それに適したアンテナサイズを調整するアプローチは、結果としてハードウェアの複雑化、過大な信号処理能力が必要となります。このことは、力づくによって実現された高価なハードウェアを高分解能ソリューションとして提供することを意味しており、スマートなアプローチとは言えません。

アナログ・デバイスでは、業界をリードする自動車メーカーやティア1サプライヤとの密な連携を図っています。それにより、レーダーを改良し、現在の課題に対応するための画期的な新手法の開発に取り組んでいます。現在の自動車に搭載されているレーダーは、非常に分解能が粗いものだと言えます。そのようなレーダーを使用した場合、あらゆるものがぼやけた状態で視認されます。自動車の周りにバイク、人、大型トラックなどが存在すれば、そのことを検知することは可能です。しかし、その物体が何であるかを特定することはできません。ハードウェアによる検出技術とソフトウェアによるアルゴリズムを進化させてレーダーの分解能を向上させれば、検知した物体に関する様々な特性を識別することが可能になります。それにより、安全性が確保された完全な自動運転車の実現に一歩近づくことになります。

分解能の問題、物体の分離という課題

既存の車載レーダーの場合、水平方向の角度分解能は視野が広い場合で $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 程度です。この角度分解能では、3 人の歩行者が 1 つの物体として検知されます（図 1）。一方、イメージング・レーダーでは、 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ の角度分解能が実現されます。これは、非イメージング・レーダーの分解能の 10 倍に相当します。 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ の分解能で取得したデータ・ビンの情報に基づけば、3 人の歩行者を分離し、それぞれの位置を特定することができます（図 2）。

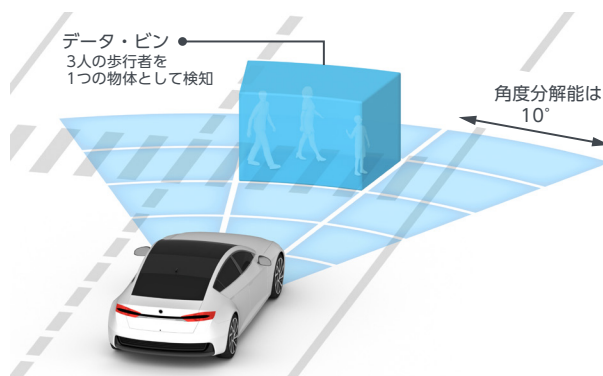


図 1. 分解能が低いレーダーを使用した場合の例。
現在の非イメージング・レーダーの角度分解能は一般に $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 程度です。この角度分解能では、3 人の歩行者が 1 つの物体として検知されます。



図 2. 分解能が高いイメージング・レーダーを使用した場合の例。
3 人の歩行者を分離して、それぞれの位置を特定することができます。

データの処理

分解能を高めると、データ量の増大という代償が生じます。その結果、演算能力の増強が必要になります。消費電力を抑えつつ大量のデータを管理するには、全データを効率的に処理するための高度な手法が非常に重要になります。将来のレーダーでは、中央での処理またはエッジでの処理の効率を高めることが不可欠です。

次のステップ——協調型レーダーと通信の必要性

当社のKeaveneyは「自動車で既存のレーダー・センサーのハードウェアをそのまま利用し、高い分解能を得る協調型レーダーというものが存在します。これは、車載分野における未来の手法です」と述べています。その上でKeaveneyは「協調型レーダーを実現するためには、高い分解能のコヒーレント画像を協調的に生成するために、コヒーレンス性とそれを実現する上で必要なもの（この場合、検知レーダー）について深く理解することが重要です。コストを抑えて協調型レーダーを実現できれば、大きなメリットを得ることができます」と説明しています。

協調型レーダーを使用すれば、車内に配備された個々のレーダー・システムのサイズをあまり大きくすることなく、イメージング・レーダーに求められる性能を達成することができます。なぜなら、その場合の実効開口長は、1つのレーダー・センサーの物理的な大きさによって決まるのではなく（図3）、視野が重なり合った2台（あるいはそれ以上）のレーダー・センサー間の設置距離によって決まるからです（図4）。

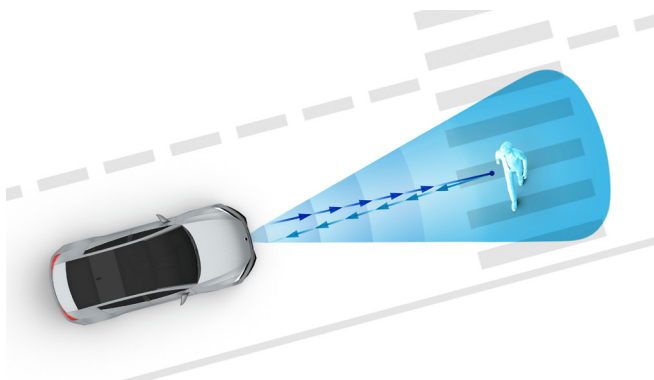


図3. 1次レーダーの狭い開口長

現在の自動車では、（単一設置された）1次レーダーが一般的に使われています。ここで、レーダー・センサーから発せられた送信波は、物体で反射した後、送信地点（＝レーダー・センサー）に戻ってきます。このとき、1次レーダーの開口長（角度分解能性能に相当）は、レーダーの送信機の幅そのもので、数インチのレベルの値になります。

大きな開口長を実現する SuperRADAR

アナログ・デバイセズは、より高性能の協調レーダーを実現するために、SuperRADARという手法に取り組んでいます。これは、視野の重なり合った複数のレーダー・ビームを使用しつつ、アルゴリズムによって高いコヒーレンス性を実現するというものです。

SuperRADARをベースとする協調型レーダーでは、各レーダーの発信源の間でタイミングを粗調整するために、低速の通信リン

クを使用します。各センサーからデータを中央の処理装置に送信する方法と、あるレーダーから他のレーダーにデータを送信してエッジのセンサーで処理を実行する方法がありますが、後者の方がコストを抑えられます。

従来の協調型レーダー・システムでは、レーダー間の通信リンクにおいて、高い周波数を使用しなければなりません。それでは、自動車に簡単に導入することはできません。ハードウェアに依存し、コヒーレンス性の実現に関連する非常に大きなオーバーヘッドとかなりのコストが発生するからです。

車載向けに協調型レーダーの価格対性能比を改善するためには、非常に大きな課題を解決する必要があります。単に自動車にハードウェアを追加するという旧来の方法では、解決策にはなりません。この問題については、新しい考え方を適用しなければならないのです。システム内のハードウェアとしては既存のものと同じ種類のものを使いつつ、各技術をアルゴリズムによって統合することで、統合後のシステムの性能を高めるという考え方です。実際、アナログ・デバイセズのSuperRADARを適用すれば、レーダー・システムにおいて、複数の非コヒーレントな像を重ね合わせてコヒーレントな像を生成することができます。

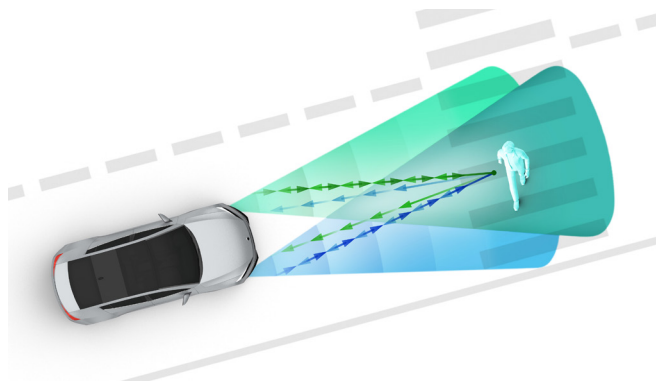


図4. 協調型レーダーの概念図。より大きな開口長が得られます。

協調型レーダー

協調型レーダーは次のように機能します。まず、各レーダーの発信源からの送信波は物体で反射し、両方のレーダーの受信機で捕捉されます。通常の1次レーダーであれば、1つの像と1つの時間という結果が得られるわけですが、協調型レーダーでは、同一の目標物に対して2つの像（すなわち、2つの異なる像データ）と2つの時間という結果が得られます。また、両方のレーダーは協調的に動作しているので、レーダーの開口長（性能は開口長に比例）は、1次レーダーの数インチに対し、自動車の角に取り付けられた2個のレーダー間の設置距離になります。つまり、自動車の前面の幅に相当する約4フィート（約1.2m）という開口長が得られます。

この手法を用いることによって、車両の周囲の複数個所にレーダーを設置し、高い性能で物体の検知と識別が行えるようになります。つまり、よりコスト効率の高い、高分解能センサー・システムを設計できるということです。

「1+1>2」なメリットを実現するSuperRADAR

SuperRADARを採用すれば、SWaPを低減することができます。それだけでなく、システムに多くの機能をもたらしつつ、高い分解能を実現することが可能です。しかも、使用するハードウェアを少なく抑え、妥当なコストの範囲内でアプリケーションの性能を高められます。

反射点の増加：目標物に対する時間情報が倍に

SuperRADARを適用すれば、同じ量のハードウェアによって2倍の性能を実現できます。あるいは、レーダーのチャンネル数を半分に減らしても、削減前と同等の性能を維持できると言えます。SuperRADARを適用したレーダー・システムでは、個々のレーダーの分解能と比べて2倍の分解能が得られます。データ量が多くなる分だけ処理能力を増強する必要はありますが、車載グレートのDSP/マイクロコントローラがロードマップどおりに進化すれば、その要件には適切に対応できます。

SuperRADARは、レーダー・フュージョンを実現する手法だと言えます。2つの独立したレーダーの表示を融合し、その結果として、1つのレーダーを使う場合よりも高い分解能を実現します。将来、レーダー・フュージョンはADASを実装する上で標準的な手法になるでしょう。

遅延の低減：水平方向の速度を高速に計算することで人命を救う

車載イメージング・システムで最も重要なのは、水平方向の速度を高速に計算する能力です。水平方向の速度というのは、車両の進行方向に対して直角に進む物体の速度のことです。しかし、カメラをベースとして最高レベルの機械学習アルゴリズムを活用するシステムでさえ、十分に低い誤報率で水平方向の動きを検出するためには、約300ミリ秒の時間を要します（図5）。時速60マイル（約97km/時）で走行する車両の前に歩行者がいたとします。その歩行者にとっては、わずかに数ミリ秒の差によって、無傷で済むのか、それとも命にかかわる怪我をするのかという差が生まれる可能性があります。そのため、応答速度は非常に重要です。

300ミリ秒の遅延は、連続する10フレームの映像からデルタ・ベクトルを計算するために必要な時間が主原因となって発生します。低い誤報率で信頼性の高い検知を行うためにはフレーム数を減らすわけにはいきません。それに対し、SuperRADARによって、広い実効開口長を得ると共に、2個以上のセンサーからの画像をコヒーレントに結合するという方法を採用すれば、30ミリ秒という1回の測定サイクルにより、速度の接線成分（自己に対して横切る方向）と動径成分（自己に対して接近/離反方向）を正確に計算することができます（図6）。つまり、現在のクラス最高レベルのシステムに比べて10倍の高速化が図れるということです。この遅延はF1ドライバーの反応時間である100ミリ秒よりもはるかに短く、一般的な運転者の反応時間を大きく下回っています。

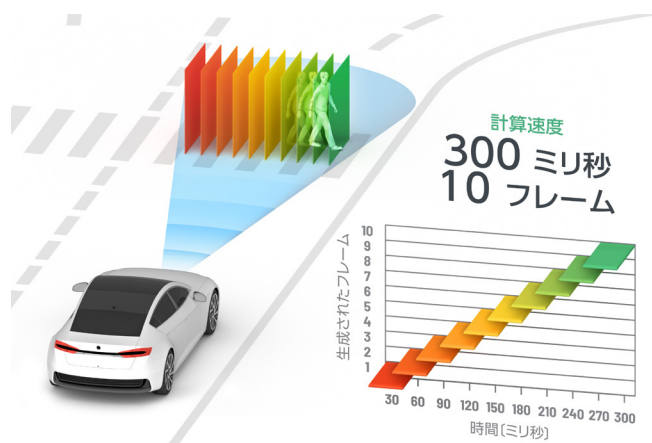


図5. 現在のイメージ・システムで生じる遅延。
直角方向の動きの検出には10フレームが必要であり、
300ミリ秒の遅延が発生します。

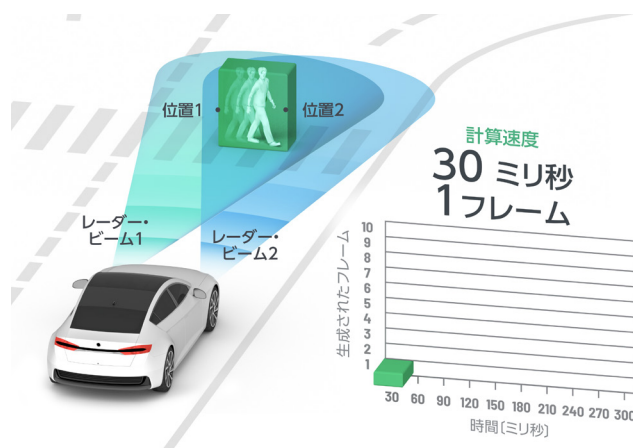


図6. SuperRADARを適用したシステムで生じる遅延。
直角方向の動きの検出にかかる遅延は30ミリ秒に抑えられます。

現在の一般的なイメージング・レーダー技術を使用した場合、人が道路を横切っているとき、何かが動いていることを示すためにはカメラで取得した複数の画像が必要になります。カメラで画像を1枚撮影するためには30ミリ秒を要します。10枚の画像では300ミリ秒です。その間に、自動車は数フィート進みます。

2台のレーダーを協調的に動作させる場合、2個のレーダー信号発信源は離れた場所に設置されていることになります。そのため、三角測量の原理で移動する物体を捕捉することができます。必要なのは、まずレーダー・ビーム1で位置1の人をマッピングし、30ミリ秒後にレーダー・ビーム2で位置2の人をマッピングすることだけです。それにより、自動車は人がどこでどのように動いているか把握することができます。

SuperRADARを使用すれば、従来のイメージング・レーダーの1/10の時間で、進行経路を横切る物体を認識することができるのです。

SuperRADARの経済性

SuperRADARは、システム全体のコストを削減する効率的な手法です。それだけでなく、性能の要件を満たし、最終的なアプリケーションに対してより多くの価値をもたらすことができます。

お客様が求めているのは、現時点では高価なロボタクシにしか使用できないようなイメージング・レーダー性能を、高価なハードウェアをすべて排除して、一般的な自家用車のレベルまで価格を下げることでありと考えています。こうしたニーズに応えるための手法がSuperRADARです。最小限のハードウェアしか使用することなく、ソフトウェアによって2倍の性能を得ることができます。

自動車の未来

自動車の未来に目を向けると、現行のシステムは根本的に再構築しなければならないはずです。将来、車両のプラットフォームは、現在と大きく異なるものになるでしょう。

アナログ・デバイセズは、積み重ねてきた経験と広範な専門知識を基盤として独自の地位を確立しています。ハードウェアとソフトウェアを組み合わせることで、将来の自動車に必要なレーダーの処理を最適化し、最終的なアプリケーションに対してより多くの価値をもたらします。アルゴリズムをベースとする手法を採用することにより、自動車メーカーが現在または未来に直面する総所有コスト（TCO）の課題に正面から取り組むことが可能になります。

SuperRADARは大きな可能性を秘めています。その検討はまだ始まったばかりです。この手法は、ADASの進化を支える高い性能と高いコスト効率を提供します。そして、最終的には人命を救うという極めて重要な役割を果たします。

著者について

Chris Jacobs (chris.jacobs@analog.com) は、アナログ・デバイセズで自律輸送／車両安全事業部門を担当するバイスプレジデントです。1995年に入社後、民生、通信、産業、車載チームにおいて、設計エンジニアリング、設計管理、ビジネス関連の業務を担当。車両安全部門のゼネラル・マネージャ、高精度コンバータ部門の製品／技術ディレクタ、高速コンバータおよび絶縁製品部門の製品ライン・ディレクタなど、指導的職位を歴任しました。クラークソン大学でコンピュータ工学の学士号、ノースイースタン大学で電気工学の修士号、ボストン・カレッジで経営学の修士号を取得しています。

EngineerZone®
オンライン・

サポート・コミュニティ

ADI EngineerZone™
SUPPORT COMMUNITY

アナログ・デバイセズのオンライン・サポート・コミュニティに参加すれば、各種の分野を専門とする技術者との連携を図ることができます。難易度の高い設計上の問題について問い合わせを行ったり、FAQを参照したり、ディスカッションに参加したりすることが可能です。

ez.analog.com にアクセス

*英語版ソート・リーダーシップ記事は[こちら](#)よりご覧いただけます。