

# 洗練された、 ミリ波センサ使用の 交通と交差点監視



**Keegan Garcia**

*Marketing Manager  
Radar & Analytics Processors*

**Mingjian Yan**

*Senior System Engineer  
Radar & Analytics Processors*

**Alek Purkovic**

*Senior System Engineer  
Radar & Analytics Processors*

*Texas Instruments*

## 要約

多数のセンシング・テクノロジーが、交差点の制御、スピードの追跡、車両数の計測、および衝突の防止といった交通監視インフラ分野で課題となる問題に取り組んでいます。TIの77GHzミリ波RF CMOSテクノロジー、およびその成果であるミリ波センサには、環境への不感受性や堅牢性、距離と速度に関する精度、システム統合など、いくつかの固有の長所があります。TIは、評価モジュール (EVM) のリファレンス、TI Designs リファレンス・デザイン・ライブラリに属するリファレンス・ライブラリ、ソフトウェア・ライブラリ、サンプル・コードといった非常に簡潔なハードウェア製品とソフトウェア製品を提供しています。これらを活用することで、ミリ波センシング・テクノロジーに非常に容易にアクセスでき、実際のアプリケーションに即した状況でこれらのセンサの評価と実証を迅速に実施することができます。

## 概要

交通システムは、旅客や貨物を迅速、効率的、かつ安全に移動するうえで必要とされるインフラの重要な要素です。このような要素は、地域の交通状況を理解し、インフラが原価に対応するのに役立つデータを収集することを重視しています。交通工学はこれらのデータを使用して統計を構築し、将来のインフラ投資のターゲットを設定するとともに、ドライバーがルート選定時にこれらのデータを活用できるようにします。

この情報の価値は明白であり、[インテリジェント交通システム市場は、2022年までに636億ドル以上に成長すると予測されています。](#)

ミリ波センシング・テクノロジーは、拡張された距離にわたって、自動車、二輪車、自転車の各種車両を検出し、環境条件である雨、霧、ほこりの影響も受けません。TIのミリ波センシング・デバイスは、76～81GHzのミリ波レーダ・フロント・エンドに、ARM<sup>®</sup> マイコン (MCU) とTIのデジタル・シグナル・プロセッサ (DSP) コアを統合し、シングルチップ・システムを実現します。これらの統合型デバイスにより、システムが物体の距離、速度、角度を測定できるほか、物体追跡、

分類、アプリケーション固有の機能に寄与する先進的なアルゴリズムも内蔵されています。

### 交通監視アプリケーション

交通渋滞は一般的に、急に道幅が狭まる区間か、交通量の多い地域で集中的に発生します。また、交通監視システムの大半は、交差点と高速道路周辺における車両の挙動や交通の流れの監視に特化しています。

交差点の周辺で、交通エンジニアは交差点の状況に対応することや、交通の統計を収集することを目的として、特定の情報と遠隔測定データを理解しようとしています。車両情報に該当するのは、交差点の停止線と車両との距離、車両の速度、走行中の車線、および種類 (サイズ) です。この車両情報を活用できるのは、以下のような各種アプリケーションです。

- **動的な青信号期間制御** — 青信号のタイミングをリアルタイムで調整し、交通密度に応じて、交差点を横切る特定の方向の道路でより多くの交通を流すことが可能。
- **統計収集** — 交通の流量と交通の種類を長期間にわたって一定の方法で監視。たとえば、多くの交差点で収集した統計は、インフラの改良や変更を行う必要が生じているかどうかを明らかにするのに役立つ。

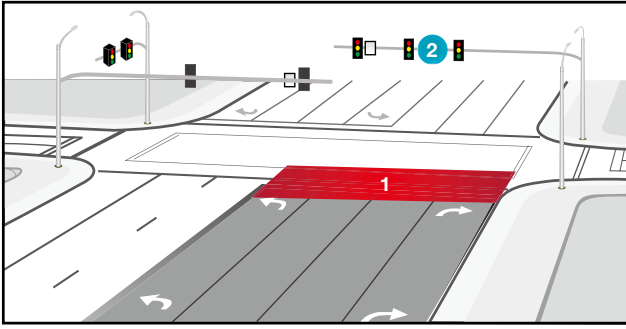


図 1: 交通センサを (1) 停止線、または (2) 信号柱に設置することができる交差点の例。センサを信号柱に取り付ける場合、路面に敷設する必要がないことが長所になります。

- **黄色信号のタイミング** — 交通の速度と種類に応じて、黄色のタイミングをリアルタイムで調整。

図 1 に、交差点センシング・システムの代表的な設置方法を示します。この方法で、交差点に近付いてくる交通を最大限可視化できます。誘導性ループのような近接距離センサを使用する場合、通常は路面にセンサを埋め込む形で設置します。ビジョン・センサやミリ波センサのような非接触型センサの場合、通常はセンサを信号柱か交差点の中央付近で路面から数メートル頭上に設置し、明確な見通し視野を確保します。センサを柱に設置する場合、路面に埋め込む必要がなく、保守目的の道路工事の際にセンサに影響を及ぼさないことが長所になります。

高速道路周辺では、交通エンジニアはさまざまな現象を識別する目的で、交通の平均速度を理解しようとします。車両追跡機能と歩行者検出機能は、渋滞地点や、運転者にとって懸念となる可能性のある領域を認識します。

交通監視システムは、さまざまな環境下で輸送の効率と安全性を向上させるものと予測されていますが、設計者は以下のような多数の設計上の課題に直面することになります。

- **位置と速度の測定**

役に立つ交通データを生成するには、交通の位置と流れの両方を把握することが必要です。交差点周辺で重要な要因は、停止線との距離や、交差点に進入してくる車両の速度を測定することです。役に立つデータの収集量を最大限に増やすために、センシング・システムは路上にある交通の位置と速度を両方とも測定できる能力を実現する必要があります。

- **あらゆる気象条件下における動作**

交通インフラ・センサは、性質上、屋外に設置され、あらゆる環境の変動下で動作することが求められます。このような変動として、昼間と夜間の光量や、雨、雪、霧、ほこりのような悪天候を挙げることができます。

- **拡張された距離にわたる、高速な物体の検出**

交通の挙動を予測する目的で、センサの能力を最大限に高めると、システムの効率が向上します。センサには、高速で移動している交通を長距離にわたって検出および測定できる能力が求められます。交差点の距離が離れているうちに車両を検知できる場合、青と黄色の持続時間をよりの確に制御して、交通が交差点に進入しないうちに事前に対処することができます。

- **測定の精度と性能**

車両の位置と速度に関する測定の精度が不十分な場合、交通データは役に立ちません。車両が車線のどこにいるか、車両とセンサの距離がどれくらいあるか、また車両の速度がどれほどであるかを高精度で理解することは、交通監視インフラが効果的に動作する上で不可欠な要素です。

## 現在の交通監視テクノロジー

交通監視アプリケーションで現在使用されているセンシング・テクノロジーのいくつかを確認します。市場におけるこれらのテクノロジーの役割から始めて、実装に当たっての長所と短所を説明します。次のページの表 1 で、この種のセンシング・テクノロジーに関する情報を要約します。




| Type        | Inductive loop sensors  | Cameras and vision-based sensors   | 24-GHz radar  |
|-------------|---|--|---|
|             |    |   |    |
| Description | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Use of insulated wire inside cuts in roadway</li> <li>• Changes in wire induction measured when vehicle passes over</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Video image processor takes in camera sensor data and analyzes imagery to determine traffic behavior</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Discrete components assembled to create a 24-GHz radar for traffic positioning and speed</li> </ul>  |
| Pros        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Well understood use and application</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Powerful algorithms for a variety of applications</li> <li>• Video for recording and monitoring</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Insensitive to weather, changing environments</li> <li>• Radar has extended range over camera (60 m+)</li> <li>• Inherent ability to measure speed</li> </ul>            |
| Cons        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Disruption of traffic for installation/repair</li> <li>• Short maintenance cycles</li> <li>• Detection only around intersection</li> <li>• No measurement of velocity/speed</li> <li>• Poor detection of two-wheel vehicles</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Complex signal processing needed to disregard shadows, occlusion, day/night cycles</li> <li>• No measurement of velocity/speed</li> <li>• Vulnerability to changing environments</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lower angular resolution than camera</li> <li>• Limited integration—design complexity</li> <li>• Lower range/velocity performance vs. higher frequency ranges</li> </ul> |

表 1:交通監視分野における既存のテクノロジーにおける、それぞれの長所と短所。

## 誘導性ループ・センサ

誘導性ループ・センサは、導電性のワイヤーを絶縁して道路に埋めたものです。ワイヤの中に電気パルスを通し、金属製の車両がループの上を通過すると、車体が渦電流を発生させ、ループのインダクタンスに変化が生じます。電子センシング・システムは、このインダクタンスの変化を測定し、車両が該当のスペースを占有しているとき、またはその上を通過したときにそのことを通知できます。

誘導性ループ・センシングは簡潔なテクノロジーであり、交通インフラの分野では長年にわたって使用されてきました。これは広く理解されていますが、いくつかの短所もあります。検出できるのは、ループ設置場所周辺の「存在」のみで、システムのスケールに限度があるため、交差点でゾーンごとおよび車線ごとに独自のループを設置する必要があります。おそらく最大の短所となっているのは、これらのシステムを設置または補修する際に、道路の表面を掘り返す必要があるという事実です。この補修を行う場合、専任の担当者と機器が必要となり、道路を閉鎖する必要が生じることもあります。

ます。誘導性ループ・システムの補修サイクルが短いこともあり（1年～2年）、誘導性ループ・システムの全体的なコストは急激に増加します。

## カメラとビジョン・ベースのセンサ

カメラとビジョン・ベースのセンサは、動画 / 画像処理プロセッサを使用して CMOS カメラ・センサから画像データをキャプチャし、画像を分析して交通の挙動を判定します。これらのシステムは、交差点における交通の挙動の測定に加えて、実況の動画を管制官に送信できるという意味で、強力なツールとして活用できます。

ビジョン・ベースのシステムは、能力とフレキシビリティが優れていますが、このテクノロジーを使用する場合は課題が発生する可能性があります。ビジョン・システムは誤検出を起こしやすく、特に環境条件が変化する場合にこの傾向があります。昼と夜のサイクル、影、天候は、これらのシステムの「認識」能力に直接的な影響を及ぼします。このようなビジョンにかかわる課題に取り組むには、高度な信号処理とアルゴリズムが必要です。

## 24GHz レーダ

交通監視市場を牽引しはじめているテクノロジーの 1 つは、24GHz レーダです。交通監視アプリケーションで適切な役割を演じるセンシングの分野で、レーダーには独自の長所があります。レーダーには、自らの視野に入る物体の位置と速度を測定できる固有の能力があり、その結果、交通監視の分野で速度検知や車両の位置特定のような新しいアプリケーションの可能性が開かれます。非接触テクノロジーの分野で、レーダーはビジョン・ベースのシステムより拡張された距離に対応しており、50m 以上に達する距離を網羅します。また、レーダーには照明や気象の変化に対する不感受性があり、屋外のセンシングや検出に適しています。

ただし、レーダ・ソリューションを実装するには、特定の課題もあります。現在のレーダ・ソリューションでは、ソリューション全体を製作するために、複数のディスクリート・コンポーネントが必要です。統合性に欠けるこの特性が原因で、設計の複雑度は増し、システムのサイズ、コスト、消費電力に対する支出も増加します。

## 76GHz ~ 81GHz のミリ波レーダ

テキサス・インスツルメンツは、76GHz ~ 81GHz の周波数帯で動作するミリ波レーダをベースとする革新的なセンサ製品ラインアップを製作しました。これらのセンサは、無線周波数 (RF) レーダ・テクノロジーを、単一のモノリシック

CMOS ダイ上で、強力な ARM マイコンや TI 製 DSP に統合し、10.4mm × 10.4mm のパッケージに封止しています。この結果、小型フォーム・ファクタのアプリケーションで、視野に入る物体の距離、速度、角度を高精度で測定するとともに、物体の検出、追跡、分類が可能な高度なアルゴリズムを通じてリアルタイム・インテリジェンスを統合することができます。これらの機能は、**図 2** に示すようにミリ波センサ製品ラインアップ全体でスケール化されており、さまざまなシステム・アーキテクチャと使用事例に適用できます。

TI のミリ波センサは、独自の特長と機能により、交通監視アプリケーションに非常によく適合します。

## 位置と速度の測定

TI のミリ波センサは、視野に入る物体の距離、速度、角度を高精度で測定できます。次のページの**図 3** に示すように、これら 3 つのデータ・セットが入手できる場合、センシング・システムは自らの周囲にある世界に関する新しいインテリジェンスを得ることができます。交差点監視の目的では、車両と歩行者の距離、速度、車線内の位置を含めることができます。

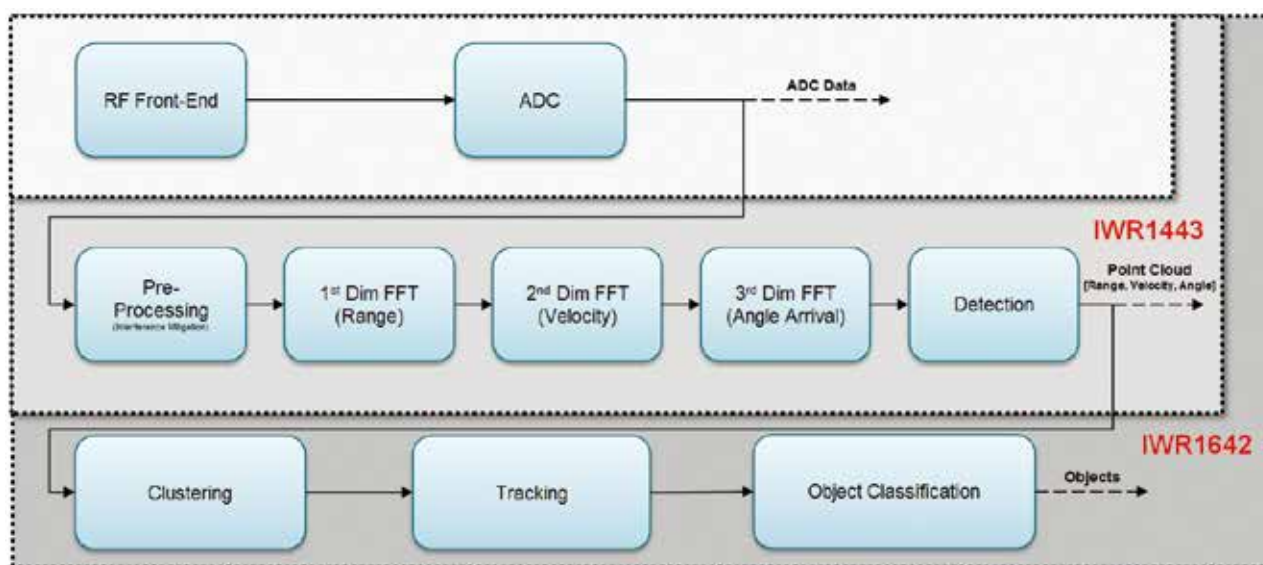


図 2: ミリ波の信号処理チェーン。

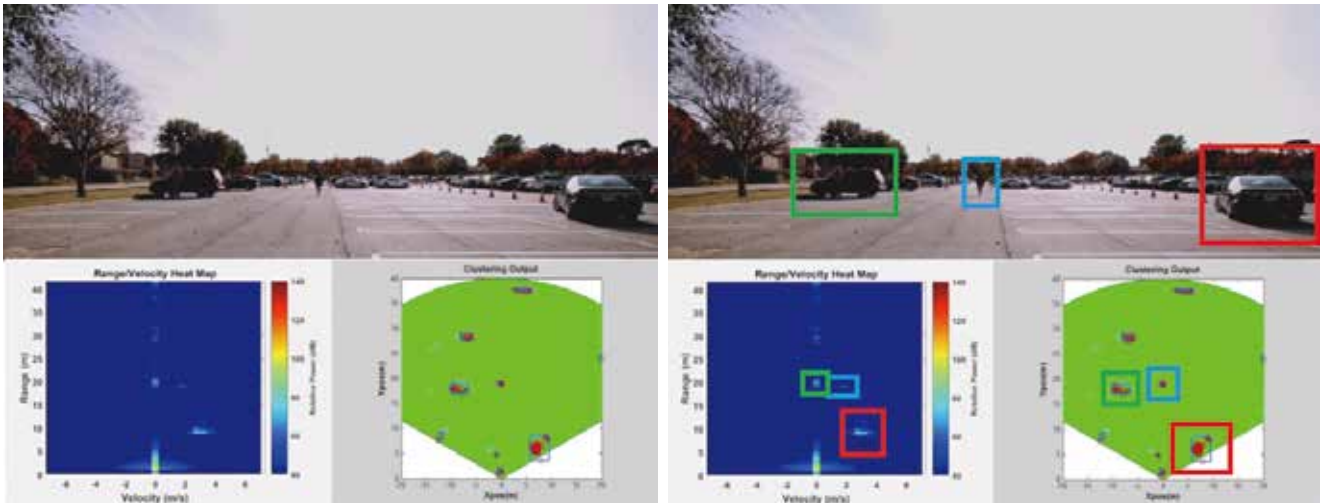


図 3: 例示する駐車場の場面でミリ波センサから得られた距離、速度、角度の情報。青の背景で表示されているグラフは、距離 / 速度のヒート・マップで、移動している物体と動かない物体、およびそれぞれの速度が識別可能。緑の背景で表示されているグラフは、距離 / 角度を可視化した表現。色の付いた各ボックスは、移動している、または移動していない車両と歩行者を場面内で強調している。

### あらゆる種類の気象における動作

レーダ・アプリケーションと RF 信号処理に慣れているユーザの多くがすでにご存じのように、[ミリ波は物質を貫通するほか、煙、霧、雨のような悪い気象条件下でも検知することができます。](#)この機能により、制御できず変化する各種の環境下で、ミリ波センサは堅牢で一貫性のある屋外センシングを実施するための有力なソリューションとなります。

### 拡張された距離にわたる、高速な物体の検出

TI のミリ波センサは、高速 FMCW(周波数変調連続波) レーダを 77GHz レンジで使用します。この組み合わせは、従来のレーダ・システムに比べていくつかの長所があります。

高速 FMCW レーダは、チャープを送信する設計に関係しており、この場合はチャープごとにレーダ信号が開始周波数から停止周波数まで掃引を行います。図 4 に示す例のように、掃引は低い周波数から高い周波数へと進みます。

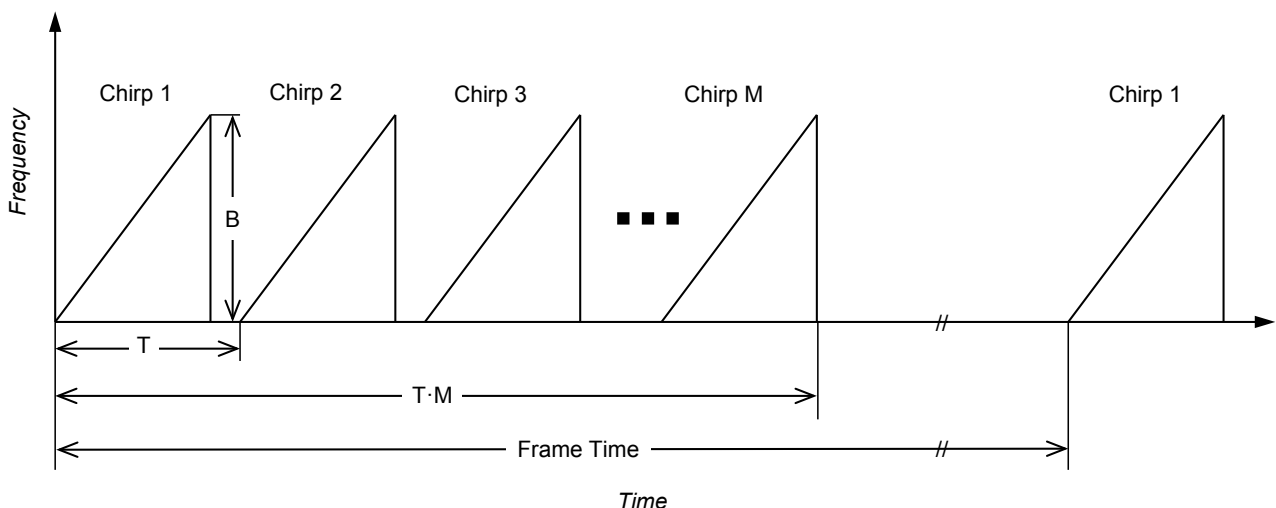


図 4: 周波数と時間を図示したグラフは、高速 FMCW のフレームを表現している。ここで、 $B$  はチャープの帯域幅、 $T$  はチャープの反復時間(数十マイクロ秒にわたることもある)、 $T \cdot M$  は 1 つのフレーム内にあるアクティブ・チャープ時間である。フレーム時間には、アイドル時間が含まれており、後者は数十マイクロ秒にわたる可能性がある。

最も簡潔な設計では、1つのフレームは、複数のチャープと、それに続く次のフレームを繰り返すまでのアイドル期間で構成されています。各チャープは同じプロファイルを使用し、複数回にわたって反復されます。

送信される信号は、送信アンテナから放射され、さまざまな物体に当たって反射されます。受信信号は、受信アンテナ・アレイで収集され、送信信号と混合されてデチャープ信号を形成します。その信号に対するフィルタリングとサンプリングを行い、さらに処理を進めて、場面内にある物体を検出します。

IWR1642 センサは高速なランプ・スロープを実現しており、高速なチャープ反復を実現できるので、測定可能な最高速度は高い水準に達します。代表的なランプ・スロープ構成である  $11\text{MHz}/\mu\text{s}$  を使用する場合、チャープ反復時間は数十マイクロ秒になります。この結果、直接的なターゲットが時速  $100\text{km}$  を上回っている場合でも、速度を測定できます。追加の DSP 信号処理により、最大速度をさらに 3 倍または 4 倍に拡張できるので、時速  $300\text{km}$  以上に達する最大のターゲット速度を目指すことも可能です。したがって、IWR1642 センサは、高速道路や入口ランプの周辺などで交通が高速で移動する場面で最適なセンサとして活用できます。

アンテナ設計と RF チャープ構成の組み合わせを通じて、 $77\text{GHz}$  のレーダ・システムは  $150\text{m}$  以上の距離にある車両などをターゲットとして容易に検出できます。処理ゲインを高めるために、多くのチャープ反復を組み合わせさせた結果、 $120$  度の視野角を確保している IWR1642 評価モジュール (EVM) であっても、アンテナ・ゲインが最も高い視野角の中央では、最大  $135\text{m}$  の距離にある車両を検出できます。したがって、この距離だけ離れている場合、複数の車線にまたがっている複数の車両の角度の違いは非常に小さいため、この製品は中央マウントの交通センサとして実用的な水準に達しています。アンテナ・アレイの指向性を高めることを意図した他の特化型アンテナ設計は、距離が長い場合に視野角が狭まるというトレードオフを招く可能性があります。

交通監視の使用事例では、最大で  $100$  度という視野角の広いアンテナ設計と、最小で  $20 \sim 40$  度という視野角の狭い設計のどちらも役に立つ可能性があり、交差点や道路の具体的な地形と、アプリケーションの性質にも依存します。

### 測定の精度と性能

処理機能を統合した高速 FMCW レーダは、場面内に存在する多くのターゲット反射物質に関して、距離、放射方向の速度、角度を 1 秒間に多数回測定することができます。この結果、多くの車両の識別や追跡も含め、場面の解釈に役立つ高い水準の処理を実施できます。

交通監視アプリケーションでは、 $77\text{GHz}$  の周波数バンドを使用する場合は最大  $1\text{GHz}$  の掃引帯域幅を実現できますが、それに対し、 $24\text{GHz}$  バンドを使用する場合はわずか  $200\text{MHz}$  にとどまります。この結果、距離分解能が向上し、最小  $15\text{cm}$  に達し、これは、 $24\text{GHz}$  で実現できる値に比べて 5 倍良好な距離分解能です。速度分解能は、アクティブ・チャープ時間とキャリア周波数の関数で表現できます。したがって、 $77\text{GHz}$  を使用する場合、同じアクティブ・チャープ時間を採用する  $24\text{GHz}$  に比べて速度分解能が 3 倍の微細さに達します。

時速  $1\text{km}$  またはそれより微細な速度分解能を実現するために、IWR1642 センサの処理能力とメモリ・リソースの境界を活用できます。

### IWR1642 センサを使用した使用事例とアーキテクチャ

IWR1642 センサは、レーダー・ベースのセンサであり、高速 FMCW レーダのフロント・エンドに、統合型の ARM® R4F マイコンと TI 製 C674x DSP の両方を組み合わせ、高度な信号処理を実施できます。

IWR1642 レーダ・フロント・エンドの構成は、送信信号の構成や、RF トランシーバの構成と性能、アンテナ・アレイの設計、および使用可能メモリと処理能力によって異なります。この構成は、距離と速度の分解能、最大距離と最大速度、角度分解能といったシステムの主要な性能パラメータに影響を及ぼします。

交通監視の使用事例に合わせてチャープ構成を設計する場合、場面の地形、水平と高度の両方に関する視野角、関心のある距離を最初に考慮します。レーダ・センサを頭上に設置した、右左折帯を含めて4車線ある交差点の例を使用してみます。車線のサイズと位置、中央線、横断歩道、停止線のサイズと位置に関していくつかの想定を行います。また、センサの頭上設置も同様です。水平の視野角は少なくとも25度あれば、停止線と、60m以上の距離から路上を交差点に向かってくる交通を網羅できます。交通監視のこの例に関する地形を、**図5**に示します。

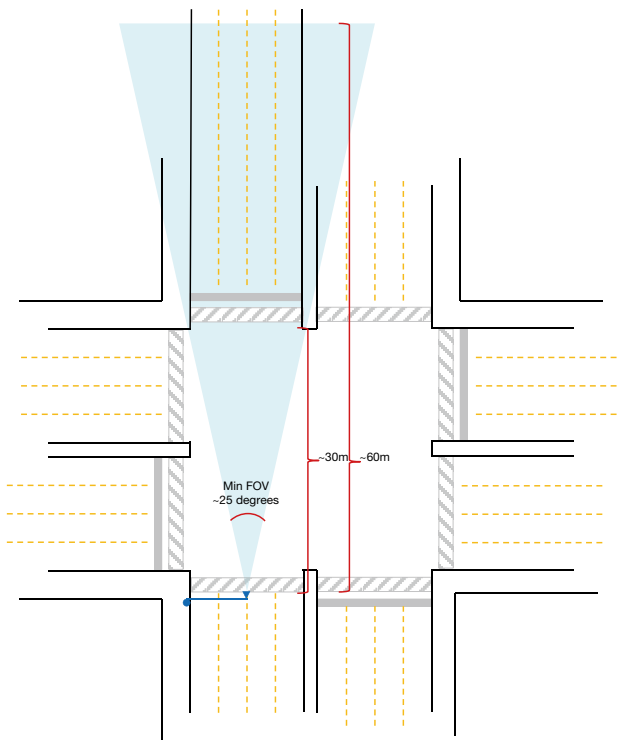


図5: 例示する交差点は、レーダ・センサを頭上に設置し、水平の視野角は25度で4車線の停止線を約30mの距離で網羅し、交差点に向かってくる交通は約60mの距離で網羅しています。

この例では、水平角度を推定する目的で、2本の送信アンテナと4本の受信アンテナを使用してこの水平視野角を実現するアンテナ・パターンを想定します。また、高度軸の視野角は狭い15度とし、高度角の処理を行いません。高度地形の例を**図6**に示します。

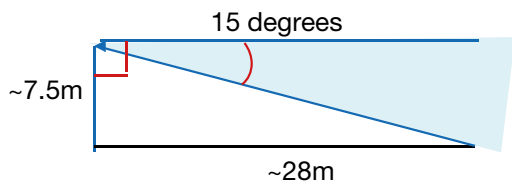


図6: 例示する交通監視センサは、高さ7.5mに設置し、15度の高度視野角を割り当て、7.5度下を向いている。

IWR1642 EVMは、120度というかなり広い水平視野角、および22度というある程度広い高度視野角を達成していますが、車両検出に関しては60m以上の距離を実現する十分なアンテナ・ゲインが得られます。例示する中距離のチャープ構成に関して、これらの数値を基礎として使用します。

IWR1642 センサの構成能力により、交通監視分野のさまざまな使用事例に対応させる設計のフレキシビリティを実現できます。交差点に関する基本的な地形とアンテナ・パターンを確定した後、チャープ設計を実施して、目標とするいくつかの性能パラメータを考慮し、IWR1642 センサ・デバイスのトランシーバ能力に即して、これらのパラメータ間でトレードオフのバランスを設定します。特に、出発点として最大距離を考慮します。2つの例の概略を示します。1つは70mの中距離に対応し、送信に関するMIMO（複数入力、複数出力）処理を採用して、角度分解能を高めます。もう1つは、135mというより長距離の設計で、MIMO処理を採用していません。どちらの事例でも、最大距離を設定した後、トレードオフの中で最大分解能と最大速度のバランスを設定し、最善の距離分解能を達成するとともに、最大速度に関する要件も満たします。内部のレーダ・キューブ・メモリの実用的な上限まで速度分解能を高めると、トランシーバの実効的な距離も長くなります。



| Key input parameters                            |                             |                             |
|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Performance parameters                          | Medium-range MIMO example   | Long-range non-MIMO example |
| Antenna pattern                                 | 2 Tx, 4 Rx in azimuth plane | 1 Tx, 4 Rx in azimuth plane |
| Maximum range                                   | 70 m                        | 135 m                       |
| Range resolution                                | 0.4 m                       | 1.5 m                       |
| Maximum velocity*                               | 35 kph*                     | 60 kph*                     |
| Velocity resolution                             | 2 kph                       | 0.95 kph                    |
| Frame duration                                  | 40 ms                       | 40 ms                       |
| Analog-to-digital converter (ADC) sampling rate | 5 MSPS                      | 5 MSPS                      |
| Derived chirp design parameters                 |                             |                             |
| Chirp valid sweep bandwidth                     | 375 MHz                     | 100 MHz                     |
| Chirp time                                      | 38.95 $\mu$ s               | 48.17 $\mu$ s               |
| Chirp repetition time                           | 100 $\mu$ s                 | 59 $\mu$ s                  |
| Number of samples per chirp                     | 195                         | 241                         |
| Nfft_range                                      | 256                         | 256                         |
| Number of chirps per frame                      | 36                          | 127                         |
| Nfft_doppler                                    | 64                          | 128                         |
| Radar cube size                                 | 288 KB                      | 508 KB                      |

\*Additional processing can extend the maximum trackable velocity by  $3 \times$  the chirp maximum velocity.  
 表 2: IWR1642 センサを使用したチャープ設計の 2 つの例に関する性能パラメータ。

例示したチャープ設計で、表 2 に示す入力パラメータを最初に取り扱います。

中距離の例に対応する IWR1642 EVM のアンテナ・パターンを使用すると、チャープの上限より遠い 70m の距離にある小型自動車サイズの車両を認識することが予期できます。長距離の例では、135m の距離にある自動車サイズの車両を認識することが予期できます。

中距離の例で、チャープとフレームの設計には、時分割多重の MIMO を使用することが含まれます。この事例では、2 倍のキャリア波長を使用して 2 個の送信アンテナを分割します。その結果、チャープ送信はフレームの期間内に 2 個のアンテナを交互に使用します。したがって、各アンテナから送信される信号は、2 倍のチャープ反復期間を使用し、MIMO を使用しない事例に比べてチャープの数は半分になります。この結果、直接測定可能な最大速度が半分になるというコストと引き換えに、検出器の角度分解能は 2 倍に高まっています。すでに説明したように、追加の信号処理を行うと、対応可能な最大速度を高めることができます。

図 7 に、中距離の例の構成に対応するデータ・スナップショットを示します。ここでは、2 台の車両が交差点に向かってきており、1 台は 40m をわずかに超えた距離、もう 1 台は 60m をわずかに超えた距離にあります。これら 2 台の車両は容易に検出されます。

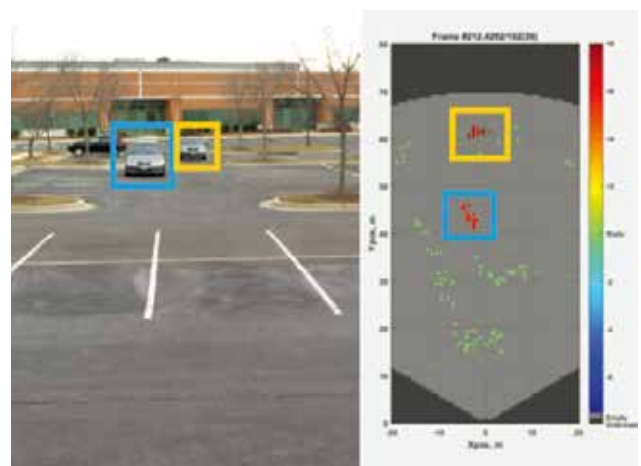


図 7: 例示した中距離の MIMO 構成によって検出された、移動している 2 台の車両。右側の棒グラフは、2 台の車両の検出が約 40m と 60m であることを示しており、車線検出の目的で角度による分離が行われている。これらの地点に相当する色は、複数のドップラー測定の結果、車両の移動速度がそれぞれおよび秒速 6m (時速 22km) と秒速 8m (時速 29km) であることを表している。

IWR1642 EVM は、チャープとフレームに関するこの設計を使用して、例示する処理チェーンを実装しています。

図 8 で示しているように、交通監視に関する実装例で使用している信号処理チェーンは、IWR1642 センサ内の C674x DSP コアによって実行される DSP コードの形で、以下のブロックによって構成されています。

- **距離の処理**：アンテナごとに、1 次ウィンドウ処理と 1 次 FFT (高速フーリエ変換) を実施します。距離の処理は、フレームのアクティブ・チャープ時間によってインターリーブされます。
- **ドップラー処理**：アンテナごとに、2 次ウィンドウ処理と 2 次 FFT を実施した後、複数のアンテナを通じて受信した電力を、浮動小数点精度により非干渉型で組み合わせます。
- **距離ドップラー検出アルゴリズム**：距離ドップラー電力マッピングに対して、CASO-CFAR (Constant False Alarm Rate-Cell Averaging Smallest Of、一定の誤警報レート・セル平均化最小値) と CA-CFAR (CFAR-cell averaging、セル平均化) の各検出アルゴリズムを実行し、距離とドップラーの空間で検出ポイントを見つけます。
- **角度推定**：距離とドップラー空間の中で検出された各ポイントに対して、ビーム・フォーミングとマルチピーク検索を組み合わせたアルゴリズムは 1 つまたは複数のターゲット角度を返すので、各ターゲットの (X、Y) 座標を計算できます。
- **クラスタ化**：4 フレームごとに、DBSCAN、つまりポイント密度ベースのクラスタ化アルゴリズムが、ターゲット・ポイントを、車両のような単一オブジェクトに所属させる関連付けを行います。

- **トラッキング**：クラスタ化出力が、追跡アルゴリズムに対して供給されます。このアルゴリズムは、クラスタ関連付け、追跡管理、カルマン・フィルタ・ベースの物体追跡で構成されており、平滑化した車両の速度を求め、複雑な場面で複数の車両を分離します。

DSP がフレーム処理を終えた後、結果は書式を割り当てられ、共有メモリ(HSRAM)に書き込まれます。R4F マイコンは、可視化の目的で、UART (ユニバーサル非同期トランシーバ) 経由でそのデータをホストに送信します。

表 3 に、処理チェーンの全体的な MIPS とメモリ使用量を測定するベンチマーク・データの結果を示します。これは、トラッキングが完了するまでの測定値です。

|                   | Available time | Used time  | Loading |
|-------------------|----------------|------------|---------|
| Active chirp time | 46 $\mu$ s     | 20 $\mu$ s | 45%     |
| Frame time        | 33 ms          | 22.73 ms   | 69%     |

表 3: MIPS 使用状況の要約。

40ms のフレーム内でアクティブ・チャープを実施した後、33ms が残っています。4 個のフレームごとに、クラスタ化とトラッキングが実施され、その結果、最小のデッドタイム・マージンを確保したフレームが登場します。250 個のポイント、10 個のクラスタ、7 個のアクティブ・トラックが存在する代表的なフレームで消費される時間は、22.73ms です。したがって、使用可能な MIPS のうち 69% が使用されています。この結果、使用可能な DSP MIPS のうち残りの 31% を、DSP 上で他の処理を行う目的で使用できます。処理チェーンは、DSP 上でのみ実装されています。

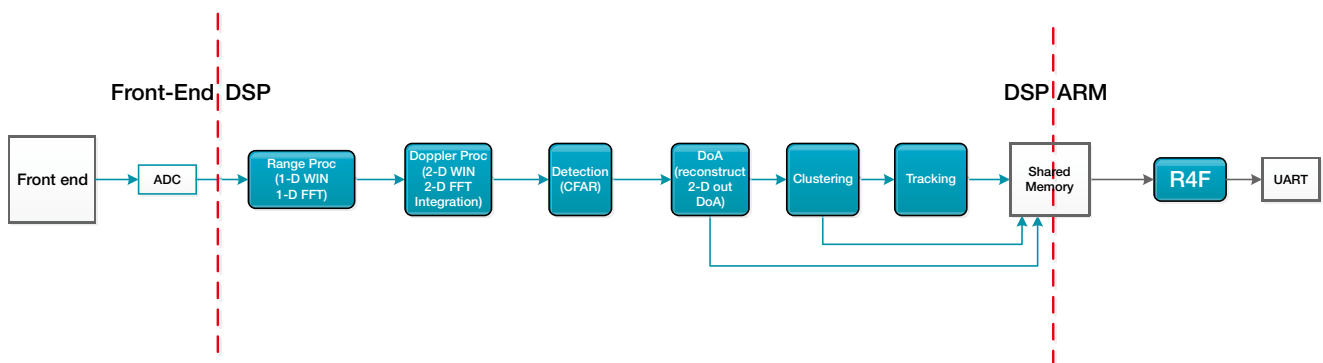


図 8: 交通監視の例に関して、物体の検出、追跡、可視化を行う処理チェーンの流れ。

mmWave ソフトウェア開発キット (SDK) プラットフォーム・ソフトウェアとサンプル・アプリケーション・コードをロードした後、DSP で使用可能な具体的な物理メモリの量と、残っている予備のメモリの量の概要を示します。

要約すると、TI はアプリケーション・コードの高速処理とキャッシュを目的として、プログラム (P) とデータ (D) を格納する L1 メモリを活用します。2KB の高速ローカル L2 メモリ、および 416KB の L3 メモリが使用可能な状態で残っています。また、共有メモリのうち 29KB は DSP と ARM のどちらからも認識できます。

|       | Available size (KB) | Used size (KB) | Spare (KB)         |
|-------|---------------------|----------------|--------------------|
| L1D   | 32                  | 16             | 16 (for L1D cache) |
| L1P   | 32                  | 24             | 8 (for L1P cache)  |
| LL2   | 256                 | 254            | 2                  |
| L3    | 768                 | 352            | 416                |
| HSRAM | 32                  | 3              | 29                 |

表 4: メモリ使用状況の要約。

ARM プロセッサでは何も処理を実施しないので、ARM プロセッサのローカル・メモリ全体と、処理能力全体を、追加の追跡ロジック、物体の分類、交通の統計報告、入出力 (I/O) 機能、センサ管理など、追加の高水準処理や、管理機能に使用できます。

## まとめ

システム設計者は TI の革新的なミリ波センサを採用すると、他のセンシング・テクノロジーでは従来は使用できなかった新しい水準のデータや性能を利用できるようになります。ミリ波センサは、悪天候の条件下でも動作する優れた性能を発揮し、速い速度で移動していて、センサから大きな距離を隔てている車両を検出します。強力な処理コアを複数組み合わせた TI のミリ波センサを採用すると、交通監視インフラは、堅牢で高品質かつ高効率の動作を実現するために必要とされる情報とインテリジェンスを入手できます。TI は、産業用ミリ波センサ製品の開発に携わるエンジニアに、以下のような包括的な開発環境をすでに公開しています。

- [リファレンス・デザイン](#) : 交通監視物体検知とモニタリングのリファレンス・デザインで、交通監視アプリケーションの堅牢で長距離センシングを実現するための方法を表示。
- 評価モジュール: [IWR1443](#) と [IWR1642](#) ミリ波デバイス。
- [mmWave SDK](#) : リアルタイム・オペレーティング・システム (RTOS)、ドライバ、信号処理ライブラリ、mmWave アプリケーション・プログラミング・インターフェイス (API)、mmWaveLink、およびセキュリティ機能 (別途入手可能) で構成。
- [mmWave Studio](#) : オフライン・ツールで、アルゴリズムの開発と分析を目的としており、データ・キャプチャ、ビジュアライザ、システム推定機能で構成。

ミリ波センサの製品、ツール、およびソフトウェアの詳細については、[www.tij.co.jp/mmwave](http://www.tij.co.jp/mmwave) をご覧ください。

S-0107

### ご注意:

本資料に記載された製品・サービスにつきましては予告なしにご提供の中止または仕様の変更をする場合がありますので、本資料に記載された情報が最新のものであることをご確認の上ご注文下さいようお願い致します。

TI は製品の使用用途に関する援助、お客様の製品もしくはその設計、ソフトウェアの性能、または特許侵害に対して責任を負うものではありません。また、他社の製品・サービスに関する情報を記載していても、TI がその他社製品を承認あるいは保証することにはなりません。



## TIの設計情報およびリソースに関する重要な注意事項

Texas Instruments Incorporated ("TI")の技術、アプリケーションその他設計に関する助言、サービスまたは情報は、TI製品を組み込んだアプリケーションを開発する設計者に役立つことを目的として提供するものです。これにはリファレンス設計や、評価モジュールに関する資料が含まれますが、これらに限られません。以下、これらを総称して「TIリソース」と呼びます。いかなる方法であっても、TIリソースのいずれかをダウンロード、アクセス、または使用した場合、お客様(個人、または会社を代表している場合にはお客様の会社)は、これらのリソースをここに記載された目的にのみ使用し、この注意事項の条項に従うことに合意したものとします。

TIによるTIリソースの提供は、TI製品に対する該当の発行済み保証事項または免責事項を拡張またはいかなる形でも変更するものではなく、これらのTIリソースを提供することによって、TIにはいかなる追加義務も責任も発生しないものとします。TIは、自社のTIリソースに訂正、拡張、改良、およびその他の変更を加える権利を留保します。

お客様は、自らのアプリケーションの設計において、ご自身が独自に分析、評価、判断を行う責任がお客様にあり、お客様のアプリケーション(および、お客様のアプリケーションに使用されるすべてのTI製品)の安全性、および該当するすべての規制、法、その他適用される要件への遵守を保証するすべての責任をお客様のみが負うことを理解し、合意するものとします。お客様は、自身のアプリケーションに関して、(1) 故障による危険な結果を予測し、(2) 障害とその結果を監視し、および、(3) 損害を引き起こす障害の可能性を減らし、適切な対策を行う目的で、安全策を開発し実装するために必要な、すべての技術を保持していることを表明するものとします。お客様は、TI製品を含むアプリケーションを使用または配布する前に、それらのアプリケーション、およびアプリケーションに使用されているTI製品の機能性を完全にテストすることに合意するものとします。TIは、特定のTIリソース用に発行されたドキュメントで明示的に記載されているもの以外のテストを実行していません。

お客様は、個別のTIリソースにつき、当該TIリソースに記載されているTI製品を含むアプリケーションの開発に関連する目的でのみ、使用、コピー、変更することが許可されています。明示的または黙示的を問わず、禁反言の法理その他どのような理由でも、他のTIの知的所有権に対するその他のライセンスは付与されません。また、TIまたは他のいかなる第三者のテクノロジーまたは知的所有権についても、いかなるライセンスも付与されるものではありません。付与されないものには、TI製品またはサービスが使用される組み合わせ、機械、プロセスに関連する特許権、著作権、回路配置利用権、その他の知的所有権が含まれますが、これらに限られません。第三者の製品やサービスに関する、またはそれらを参照する情報は、そのような製品またはサービスを利用するライセンスを構成するものではなく、それらに対する保証または推奨を意味するものでもありません。TIリソースを使用するため、第三者の特許または他の知的所有権に基づく第三者からのライセンス、あるいはTIの特許または他の知的所有権に基づくTIからのライセンスが必要な場合があります。

TIのリソースは、それに含まれるあらゆる欠陥も含めて、「現状のまま」提供されます。TIは、TIリソースまたはその仕様に関して、明示的か暗黙的にかかわらず、他のいかなる保証または表明も行いません。これには、正確性または完全性、権原、続発性の障害に関する保証、および商品性、特定目的への適合性、第三者の知的所有権の非侵害に対する黙示的保証が含まれますが、これらに限られません。

TIは、いかなる苦情に対しても、お客様への弁済または補償を行う義務はなく、行わないものとします。これには、任意の製品の組み合わせに関連する、またはそれらに基づく侵害の請求も含まれますが、これらに限られず、またその事実についてTIリソースまたは他の場所に記載されているか否かを問わないものとします。いかなる場合も、TIリソースまたはその使用に関連して、またはそれらにより発生した、実際の、直接的、特別、付随的、間接的、懲罰的、偶発的、または、結果的な損害について、そのような損害の可能性についてTIが知らされていたかどうかにかかわらず、TIは責任を負わないものとします。

お客様は、この注意事項の条件および条項に従わなかったために発生した、いかなる損害、コスト、損失、責任からも、TIおよびその代表者を完全に免責するものとします。

この注意事項はTIリソースに適用されます。特定の種類の資料、TI製品、およびサービスの使用および購入については、追加条項が適用されます。これには、半導体製品(<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、評価モジュール、およびサンプル(<http://www.ti.com/sc/docs/sampterm.htm>)についてのTIの標準条項が含まれますが、これらに限られません。