

77 GHz 單晶片雷達感測器 打造車身與底盤創新應用



Sandeep Rao
雷達系統工程師

Adeel Ahmad
系統工程師

Dr. June Chul Roh
系統工程師

Sachin Bharadwaj
系統工程師

概述

車用領域的頻率調變連續波 (FMCW) 雷達應用眾多，涵蓋多項人身安全與舒適功能，例如盲點偵測、車道切換輔助、自動車距控制巡航系統、停車輔助等，這些功能均仰賴雷達能夠在各種天候與任何週遭照明環境下，準確可靠地偵測與定位障礙物。

另外在車用領域內，透過雷達感測器獨特的優勢，也能幫助以下幾項應用：

- 自由空間感測
- 駕駛生命跡象監控
- 手勢辨識
- 使用狀態偵測

FMCW雷達可判斷物體的距離與速度，效能不受週遭照明環境影響，也不需額外增設訊號源，高運作頻率 (77 GHz) 可直接轉譯為較小型的整體方案尺寸。FMCW雷達訊號可穿過塑膠材質，故感測器可安裝在設備背面，如保險桿、儀表板或車身包覆層內，不會影響車體外觀。

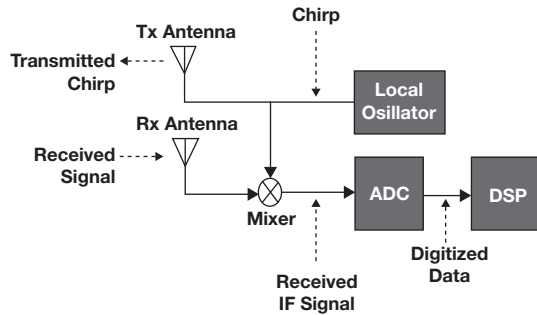
德州儀器的單晶片毫米波 (mmWave) 感測器系列保有FMCW雷達優點，兼具小封裝、低功耗、同級最佳頻寬 (4 GHz頻寬轉譯為4公分解析度)，以及晶片上運算及記憶體資源，能符合上述應用需求。AWR1443擁有射頻前端，可支援三個收

發器 (TX) 與四個接發器 (RX) 天線 [1]，內建可編程 200MHz的Arm® Cortex®-R4F、0.5MB晶片記憶體、硬體加速器，可執行較低階雷達訊號處理。AWR1642的射頻前端可支援二個TX與四個RX天線，內建可編程 Arm Cortex-R4F (200 MHz)、C6748數位訊號處理器 (DSP) 核心 (600 MHz)、1.5MB晶片記憶體 [2]，可充分執行訊號處理演算法。

FMCW簡介

圖一為FMCW雷達原理圖，包含TX鏈與RX鏈各一做為代表 (不過實際上共有多鏈支援多件TX與RX天線)，本地振盪器 (LO) 產生線性頻率斜坡 (又稱為Chirp)，傳輸至TX天線，自雷達前場景所反射的訊號進入RX天線後，混合傳送訊號，產生中頻 (IF) 訊號，再由類比數位轉換器 (ADC) 將接收到的IF訊號數位化，供後續處理。

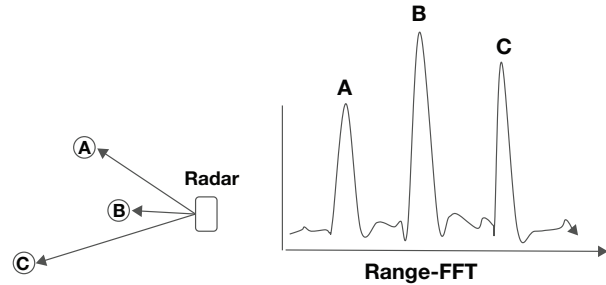
快速傅立葉轉換 (FFT) 處理數位化樣本後，可判斷物體距離，距離 FFT的峰值頻率直接對應於場景中各物體的距離，如圖一右側所示。



圖一：FMCW 雷達原理圖

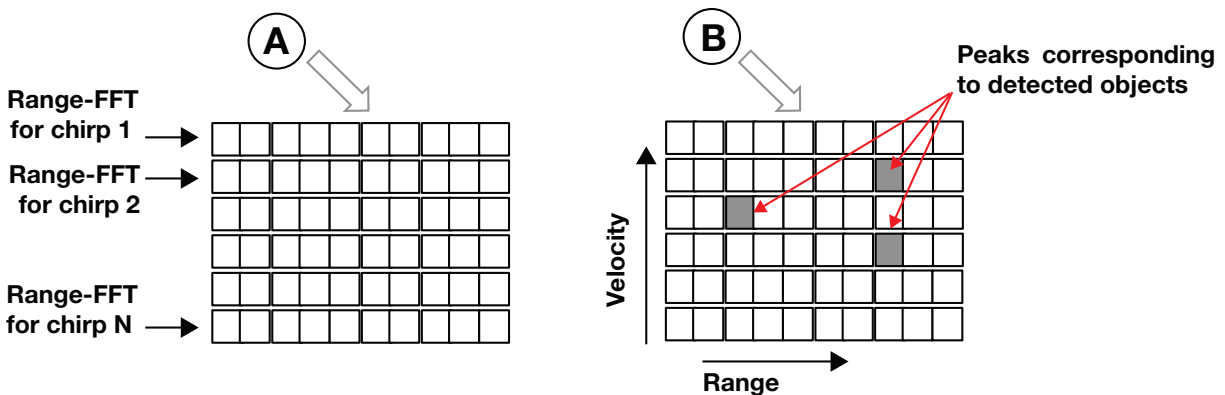
當距離FFT峰值頻率直接對應至物體距離時，峰值相位對於物體距離的微小變化極為敏感，例如物體位置若改變四分之一個波長（以77 GHz 情況 ≈ 1 公釐），相位會完全翻轉180度。相位敏感度讓雷達能夠估算振動物體的頻率，也成為估算速度的基礎。

為了判斷現場物體的速度，雷達通常會傳送一系列的線性調頻序列，時間間隔相同，稱為「訊框」（圖二），藉由線性調頻之間的相位差異，判斷與衡量現場場景中物體的速度。



圖二：訊框內包括多項間隔相同的線性調頻

在一般典型訊號處理鏈之中，裝置以距離FFT 執行數位化樣本，對應至每項線性調頻，輸出並儲存在矩陣裡的連續列（圖三矩陣A）。裝置一接收與處理訊框裡的所有線性調頻後，在矩陣A各行的線性調頻產生第二FFT系列（都卜勒FFT）。在執行距離FFT（列）與都卜勒FFT（行）後，可視為對應訊框的數位化樣本平面FFT，判斷物體距離及速度。平面FFT峰值位置將直接對應至雷達前方物體的距離和速度（圖三矩陣B）。



圖三：FMCW雷達的範圍距離與都卜勒處理

若要判斷斜前方的物體，需要多項RX天線，裝置先處理每項天線接收到的訊號，形成平面FFT，如前述圖示所示。在處理多項天線獲得的平面FFT矩陣後，可得知前方物體的角度。

因此雷達能判斷物體的距離、速度和角度，雷達效能取決於傳輸訊號 [3]，例如擴大線性調頻的頻寬後，可改善距離解析度；增加訊框長度後，能提高速度解析度，測量速度上限與線性調頻間隔大小成反比；TX/RX天線數量限制角度解析度。FMCW 雷達操作深入討論內容請見 [4] 與 [5]。

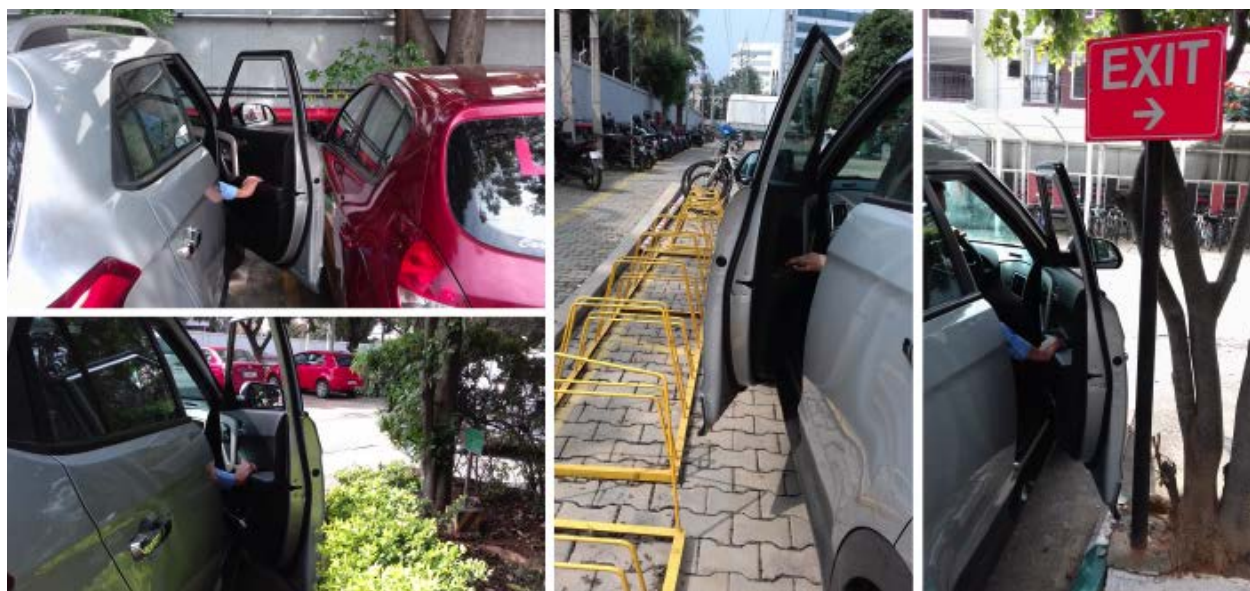
自由空間感測

自由空間感測器可延伸雷達原有能力，偵測障礙物，例如在打開車門或後車廂時防止撞擊，此種應用仰賴雷達的距離高解析度，以及能夠在

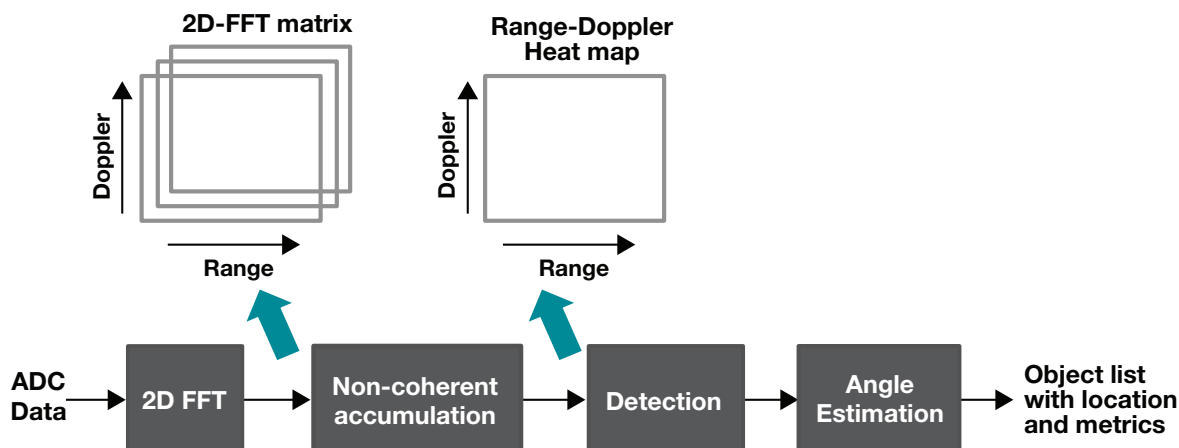
近距離偵測障礙物（燈柱、停車擋桿、牆面、鄰近車輛），見圖四。自由空間感測器亦可做為停車輔助感測器。

圖五說明自由空間感測器應用的一般處理鏈，本裝置執行平面FFT，處理訊框內的類比數位轉換器 (ADC) 資料，判斷物體距離及都卜勒，並區別移動物體與靜止物體。雷達若安裝於車門等活動設備上，都卜勒解析度也能判斷靜止物體與雷達的相對速度，而各天線平面FFT矩陣的非同調資料，會形成偵測演算法能夠處理的距離／都卜勒熱點圖。

偵測演算法可做為基本的平均恆虛警率 (CFAR-CA) 偵測器 [6]，有序統計量恆虛警率 (CFAR-OS) 等版本更加精密，可改善地面雜波存在時的偵測能力。



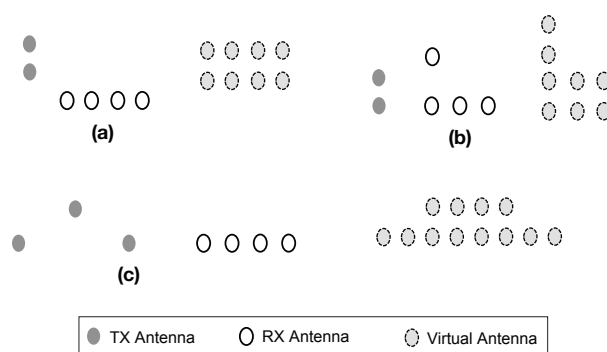
圖四：自由空間感測器應用



圖五：自由空間感測器應用的處理鏈示意圖

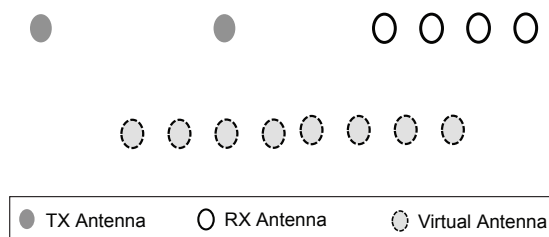
處理平面 FFT 矩陣的對應分類後，可估算物體接近的角度，為善用既有 TX/RX天線，我建議以多重輸入／輸出 (MIMO) 模式操作系統 [7]。在MIMO模式下，角度估算區塊在虛擬天線使用平面FFT處理後的訊號；角度估算演算法能以FFT或波束成形技術演算法為基礎，若使用多訊號分類 (MUSIC) 等更精密的演算法，角度解析會更精密 [8]。

在自由空間感測器應用中，天線配置與天線元件視野 (FOV) 都是重要考量，一般必須在仰角視野與抑制地面雜波之間取捨，或是在仰角估算能力與方位解析度之間抉擇。在眾多可能設計之中，以下介紹兩種策略。一是以方位及仰角廣視野設計天線，而天線擺放位置讓MIMO模式能形成平面虛擬陣列，因此可同時估算仰角及方位的角度。圖六提供幾項範例，雖然方位及仰角廣視野可提供真正的立體感測，但雷達擺放位置必須謹慎思考，才可將地面雜波降至最低。



圖六：平面2-D天線配置 (a和b：TI AWR1642，c：TI AWR1443)

另一選項是以仰角窄視野與方位廣視野設計天線，利用天線擺放位置確保方位估算達到最高解析度 (圖七)。



圖七：1-D天線配置

表一為自由空間感測應用的線性調頻配置範例。

Parameter	Value
Chirp bandwidth	4 GHz
Chirp periodicity	100 μ s
Number of chirps per frame	32 (interleaved between TX1 and TX2)
Maximum velocity	17 kmph
Range resolution	~4 cm
Maximum range	4 m
Velocity resolution	1 kmph
Memory requirement	~100 KB

表一：自由空間感測應用的線性調頻配置

駕駛生命跡象監控

FMCW雷達技術是促進道路安全的重要應用，可準確監控駕駛心跳和呼吸速率，持續監控生命跡象。這項感測器尺寸小，可達到非侵入式監控，例如嵌入在駕駛座椅背內。

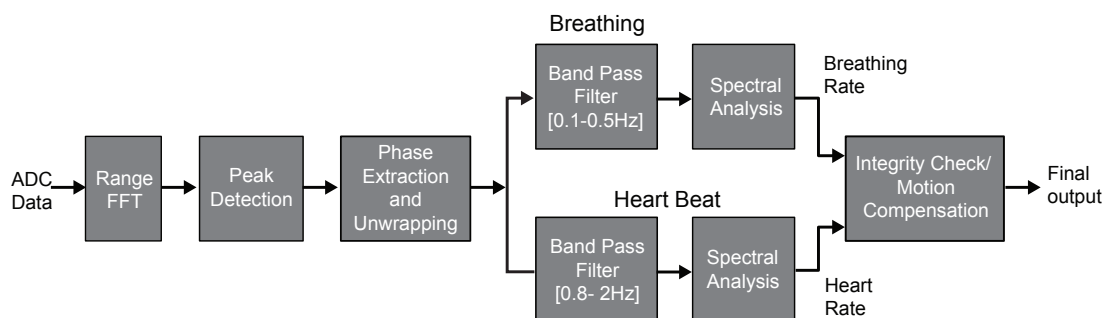
FMCW雷達對於物體位置微小變化的接收訊號相位極為敏感。先前提到，物體每移動1公釐，距離FFT處理資料的相位改變180度，只要善用這項特性，就能估算物體振動頻率，例如心跳及呼吸氣息所產生的振動。這項裝置傳送一系列的線性調頻，距離FFT峰值代表駕駛胸部的強烈反射，

裝置內的演算法追蹤線性調頻內的峰值相位，對相位序列進行頻譜分析，以計算駕駛的心跳及呼吸速率。

圖八是以單一處理鏈代表的原理圖，裝置首先使用距離FFT，處理對應至每項傳輸線性調頻的ADC資料，找到相關峰值後，記錄線性調頻內的峰值相位。呼吸所造成的胸部移動約12公釐，是雷達操作波長的數倍（以77 GHz情況~4公釐），因此必須適當分析相位，才能正確解讀結果。

裝置內的演算法以帶通過濾相位序列，取得相關頻譜（呼吸為0.1–0.5 Hz，心跳為0.8–2 Hz），以FFT分析產出頻譜後，可找到心跳及呼吸速率；若希望資訊更加完整，可偵測駕駛體內動作，以彌補缺漏數據或可捨棄讀數。此應用內無訊框，而是以持續傳送線性調頻的方式，並在運作中同時處理。

表二是這項應用的線性調頻配置範例，為求最佳效能，選擇距離解析度能達到最高的線性調頻，有助於區分胸部反應及其他鄰近雜波。



圖八：駕駛生命跡象監控應用的處理鏈範例

若使用多項RX天線衡量角度，可進一步區別駕駛及週遭雜波，甚至可同時測量多人生命跡象。由於心跳和呼吸均為低頻率，可擴大線性調頻間隔，每秒20次的線性調頻就足以確保採樣時，不會出現相位連接；若提高每秒的線性調頻，更可測量心率變化（心跳間隔的瞬間變化），研究顯示這項數據和睡意有關。

Parameter	Value
Chirp bandwidth	4 GHz
Chirp periodicity	50ms (20 chirps per second)
Number of chirps per frame	—
Maximum velocity	—
Velocity resolution	—
Memory requirement	~16 KB

表二：駕駛生命跡象監控應用的線性調頻配置

手勢辨識

FMCW雷達造就距離與速度（或都卜勒）高解析度的特性，很適合手勢無觸控介面，車用用途包括手勢開啟車門／車廂（圖九），以及手勢控制車載資訊娛樂系統（例如揮手切換螢幕，或扭動手指控制音量）。



表二：駕駛生命跡象監控應用的線性調頻配置

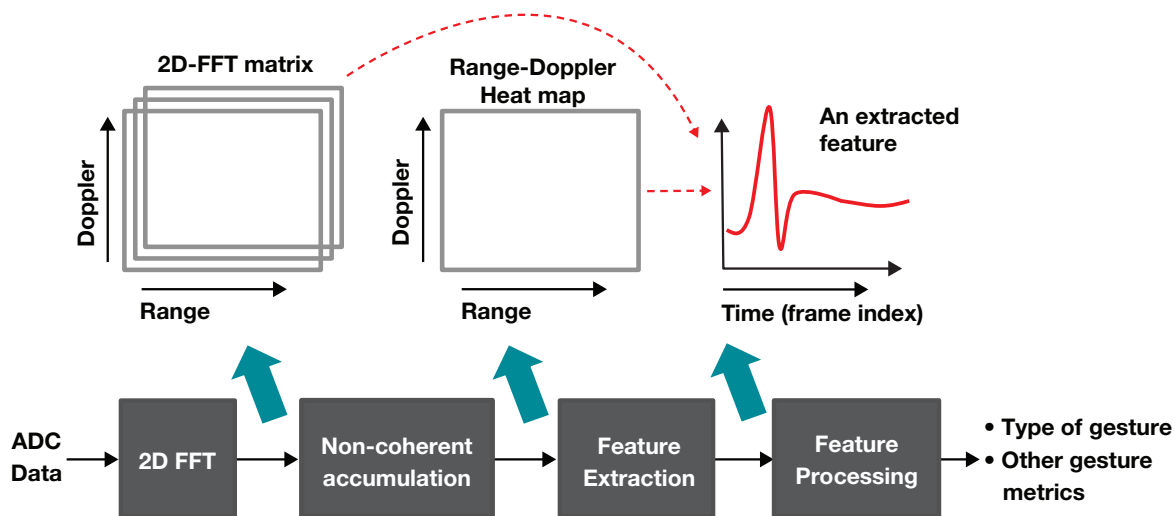
圖十是建議的手勢辨識應用處理鏈。首先，對於訊框內線性調頻蒐集的ADC資料，進行平面FFT，判斷現場的距離及都卜勒，再為每項RX天線（若雷達為MIMO模式則為虛擬天線）運算平面FFT矩陣，而各天線平面FFT矩陣的非同調資料，會形成距離／都卜勒熱點圖。

下一步為從距離／都卜勒熱點圖擷取多項特徵，每項特徵（如平均都卜勒或平均距離）就像從熱點圖內計算一個數字，數值反映出特定參數的加權均值，通常是在預估手勢會出現的熱點圖區域內擷取特徵，例如距離50公分內、都卜勒每秒正負2公尺，這個區域可預先固定或動態調整。

雷達的單一訊框為各個特徵擷取單一數值，而一系列的訊框為各個特徵產生時間系列，分析對應各擷取特徵的時間系列可辨別與分類各種手勢，圖十說明處理區塊中特徵的操作步驟。

特徵處理的策略非常多樣，其中一項是在特定時間範圍內擷取特徵後，傳送至機器學習演算法，例如人工神經網絡、決策樹、支援向量機，再進行分類；另一種策略是由人工設定邏輯，辨別特徵內的各種標誌；亦可運用混合方案。

特徵處理的產出為被偵測的手勢類型，特徵處理亦可產出與手勢相關的額外數據（如手勢速度），進而改善使用者體驗。



圖十：手勢辨識應用的處理鏈範例

距離與速度解析度高低是手勢辨識優勢的關鍵，故需選擇高頻寬線性調頻，訊框時間也應夠長，才能改善速度解析度。由於最大速度需求不高，可擴大線性調頻間隔，將線性調頻數量（及記憶體需求）降至最低，並維持長訊框時間。表三為線性調頻配置範例。

Parameter	Value
Chirp bandwidth	4 GHz
Chirp periodicity	800 μ s
Number of chirps per frame	256
Range resolution	4 cm
Maximum range	40 cm
Maximum velocity	4 kmph
Velocity resolution	0.034 kmph
Memory requirement	40 KB

表三：手勢辨識應用的線性調頻配置

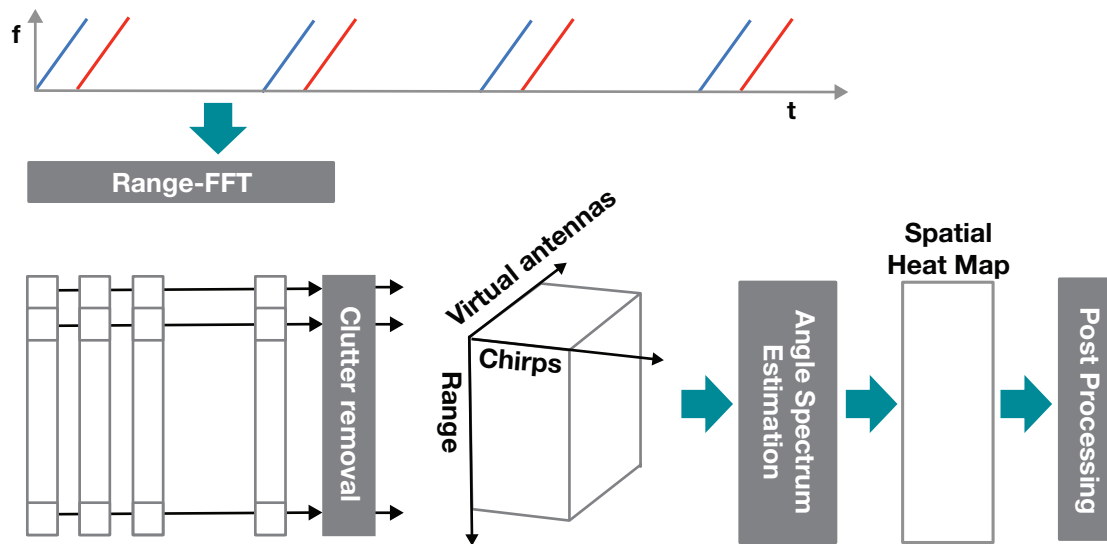
使用AWR單晶片雷達系列的手勢辨識解決方案符合成本效益，對於開啟車門／車廂的單種手勢應用，AWR1443或許適合；當應用內需分類多種手勢時（如資訊娛樂介面），內建 C674x DSP 的 AWR1642就比較適合。

使用狀態偵測

若孩童和動物困在上鎖的車輛內，很快就會因高溫喪命，車內若安裝FMCW雷達，可在車輛無人看管時偵測到他們，進而及時介入拯救生命。

這項應用主要取決於雷達的速度解析度高低，雷達必須從車內靜止雜波區分出就算只有些微動靜的物體（如睡著的孩童）。

圖十一為處理鏈範例，訊框包括MIMO模式內，一系列間隔相同的線性調頻。在TX1（藍）與TX2（紅）之間切換，每一對線性調頻之間的巨大間隙，是為延長訊框時間，並改善速度解析度。首先，裝置計算訊框內所有線性調頻的距離FFT。產出的距離FFT傳送至雜波移除區塊，可排除對應至靜止雜波的訊號，確保後續區塊能針對有關訊號操作（即對應至緩慢／間歇移動的物體）。



圖十一：使用狀態偵測應用的處理鏈範例

這個區塊可估算每個距離分類內的DC元件（線性調頻內的距離分類均值），再從對應的距離分類中移除（涵蓋訊框內所有距離FFT）。

所有天線的距離FFT進入角度頻譜估算區塊，計算每個距離分類中的角度頻譜。經過多項線性調頻所計算出的距離FFT峰值相位，能以相關物體的微小動作排除關聯，藉以提高角度解析度。

當距離FFT判斷訊號距離、角度頻譜估算判斷角度後，空間熱點圖可在平面x-y 軸或距離方位軸內，繪出訊號密度，接續的後處理能依據偵測演算法（如CFAR），或更精密的特徵擷取及分析技巧，在熱點圖內偵測物體，再標示出有關物體是否存在。

此外，後處理區塊也能說明有關物體的空間位置。

Parameter	Value
Chirp bandwidth	4 GHz
Chirp periodicity	340 μ s
Number of chirps	512 (256 each of TX1 and TX2)
Range resolution	~4 cm
Maximum range	3 m
Maximum velocity	2.28 m per second (10 kmph)
Velocity resolution	0.02 m per second (0.08 kmph)
Memory requirement	600 KB

表四：使用狀態偵測應用的線性調頻配置

高度整合的AWR雷達裝置系列可開發出小體積的「雷達單晶片」解決方案，提升ADAS以外的駕駛體驗，包括自由空間感測、駕駛生命跡象監控、手勢辨識與使用狀態偵測。

參考資料

1. [AWR1443 產品頁面](#)
2. [AWR1642 產品頁面](#)
3. TI SWRA553應用報告：[TI雷達設備中的可編程線性調頻參數](#)，Dham, Vivek，2017年五月。
4. TI 白皮書：[TI毫米波基本原理](#)，Iovescu, Cesar 與 Rao, Sandeep
5. [TI毫米波 \(mmWave\) 培訓影片](#)
6. [在雜質與多目標情況下的雷達CFAR](#)，Rohling, Hermann，IEEE 航太與電子商務交易系統，1983七月，608-621。
7. TI SWRA554應用報告：[MIMO雷達](#)，Rao, Sandeep，2017年五月。
8. 課堂筆記：[抵達方向估計](#)，多倫多大學。
9. TI SWRA552應用報告：[AWR16xx中DSP子系統簡介](#)，Rao, Sandeep, Jasbir Nayyar, Mingjian Yan and Brian Johnson，2017年五月。

Important Notice: The products and services of Texas Instruments Incorporated and its subsidiaries described herein are sold subject to TI's standard terms and conditions of sale. Customers are advised to obtain the most current and complete information about TI products and services before placing orders. TI assumes no liability for applications assistance, customer's applications or product designs, software performance, or infringement of patents. The publication of information regarding any other company's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

The platform bar is a trademark of Texas Instruments. All other trademarks are the property of their respective owners.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, or other requirements. These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to TI's Terms of Sale (www.ti.com/legal/termsofsale.html) or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2019, Texas Instruments Incorporated