

可穿戴設計攻略：

用高精度 MEMS 大氣壓力感測器提高健身追蹤器精度

隨著可穿戴式健身追蹤器的普及，設備健康資料的測量精度逐漸成為產品差異化要素，添加依據壓力的氣壓高度計，可以提高可穿戴式健身設備在卡路里消耗的測算精度。本文探討了 MEMS 大氣壓力感測器的工作原理及其在健身追蹤器中的作用，並以 TE Connectivity 推出的 MS5840-02BA 大氣壓感測器為例，詳細說明了大氣壓力感測器設計考慮因素和具體的應用方法。

■作者：Richard A. Quinnell

具有健康和健身追蹤功能的可穿戴設備日漸流行。這類應用往往以加速度計作為主要運動感測器，但是加速度計無法提供垂直運動的準確估算，而這種估算對於準確計算爬坡消耗的卡路里等參數至關重要。透過添加精密大氣壓力感測器，可顯著提高垂直運動測量精度，同時也有助於其他感測器的資訊驗證。

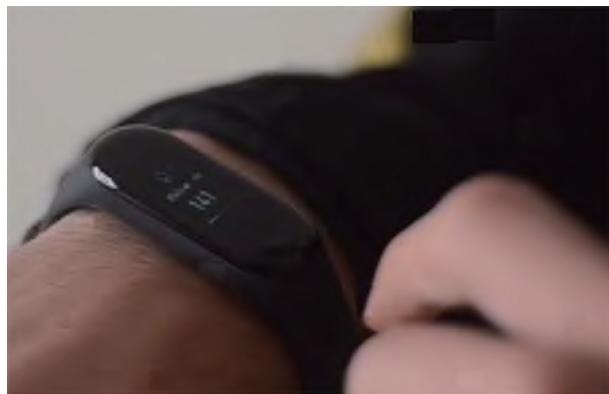
目前市面上的大氣壓力感測器靈敏度足以檢測低至 13cm 的高度變化，並且體積小巧、堅固耐用且功率消耗低，適用於可穿戴式設計。

本文探討了這類元件在健身追蹤器中的作用，並介紹 TE Connectivity Measurement Specialties 推出的一款適用於此應用的氣壓感測器，並具體說明了應用方法。

高度計在健身追蹤器中的作用

健身追蹤產品的核心元件是用於慣性運動檢測的加速度計等元件，藉此計算步數、行走距離和消耗的卡路里等參數（圖 1）。不過，垂直運動測量對於這類感測器是一項挑戰。就加速度曲線而言，爬樓梯等活動與普通行走截然不同，因而很容易實現可靠檢測，但是沿斜坡行走與在水平地面行走的差異較小，因此僅憑加速度很難區分。然而，這兩種情況下所做的功（和所消耗的卡路里）卻大相徑庭。

圖 1：具有健身追蹤功能的可穿戴式設備日漸受到消費者青睞。



圖片來源：Digi-Key Electronics，原始資料來源於 TE Connectivity

對於健身追蹤精度的一些消費者研究表明，某些早期設備可能低估了 30%。為了更準確地確定健身參數，健身追蹤器需要一種簡單可靠的方法來精確測量垂直運動。

大氣壓力感測器（即氣壓計）可以提供解決方案。在所有其他因素均相同的情況下，大氣壓取決於海拔高度，兩者的變化關係稱為“垂直氣壓梯度”，即大氣壓隨高度變化而變化的數值。因此使用氣壓公式來求解高度，即可將大氣壓力（或氣壓）感測器用作氣壓高度計：

$$h = 44300(1 - (P/P_0)^{0.19}) \quad \text{公式 1}$$

其中：

■ P 是當前壓力

■ P₀ 是海平面的壓力 (h=0)

■ 高度 (h) 以 m 為單位

該公式包含大氣成分和 15°C 的環境溫度等多個假定，因此如需準確計算絕對高度，就需要更多資訊。但即便壓力條件不同，該公式仍然適用，並且受溫度條件影響很小。因此，透過比較兩次連續測量的壓力值，即可由公式 1 輕鬆求得精確的高度變化。

海平面的標準大氣壓約為 1013mbar，即 1mbar 壓差對應約 8m 垂直變化。因此使用公式 1 時，壓力測量精度必須相當高才能檢測人體的垂直運動。所幸，目前市面上已有緊湊型壓力感測器足以滿足該精度要求。

TE Connectivity Measurement Specialties 的 MS5840-02BA 微機電系統 (MEMS) 壓力感測器正是這類大氣壓力感測器之一（圖 2）。該元件可對大氣壓和環境溫度進行 24 位元測量，進而在高度計應用中實現 13cm 的有效高度解析度——該解析度足以檢測一級臺階的高度變化。

MS5840 整合了 MEMS 壓力感測器與訂製 ASIC，後者可將類比感測器訊號數位化，並透過 I²C 匯流排實現主機與設備的連接，因此無需其他零組件即可將該元件添加至健身追蹤器設計。該模組採用緊湊型表面黏著，基底面為 3.3 x 3.3mm，高度為 1.7mm，小巧的體積適用於可穿戴設備。堅固耐用的蓋子透過接地來加強 ESD 保護，以防止人為產生的靜電。

這類高精度模組允許設計人員對感測器原始讀數進行一階和二階補償，進而消除元件和溫度變化產生的誤差。所有元件都分別在兩個溫度和兩個壓力下進行工廠校準，以產生

校準參數用於一階計算：

圖 2：MS5840-02BA 緊湊型氣壓感測器模組具有高性能和高精度特性，基底面為 3.3 x 3.3mm，高度為 1.7mm。



圖片來源：TE Connectivity

■ 參考溫度 – TREF

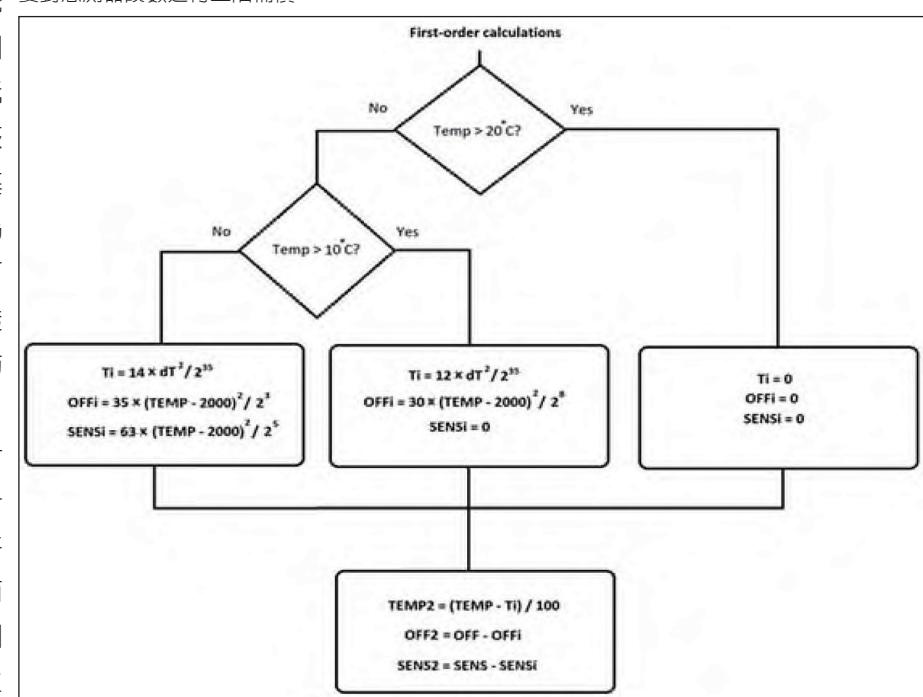
■ 參考溫度下的壓力靈敏度 – SENST1

■ 壓力靈敏度的溫度係數 – TCS

■ 參考溫度下的壓力補償 – OFFT1

■ 壓力補償的溫度係數 – TCO

圖 3：環境溫度較高時可使用一階計算，但是當溫度降至 20°C 以下，甚至 10°C 以下時，就可能需要對感測器讀數進行二階補償。



圖片來源：R. Quinnell，原始資料來源於 TE Connectivity

■溫度的溫度係數 – TEMPSENS

進行一階補償時，設計人員必須檢索元件的校準參數，獲取感測器未經補償的 24 位元數位壓力 (D1) 值和溫度 (D2) 值讀數。然後，計算實際溫度與參考溫度的差值 ($dT = D2 - T_{REF}$)，並將其用於修正數位溫度讀數 ($TEMP = 2000 + dT \times TEMPSENS$)，以獲得精度為 0.01°C 的攝氏度 ($^{\circ}\text{C}$) ($2000 = 20.00^{\circ}\text{C}$)。

接下來，設計人員必須使用經修正的溫度來修正壓力讀數，方法是先計算當前溫度下的壓力補償 ($OFF = OFF_{T_1} + TCO \times dT$) 和壓力靈敏度 ($SENS = SENS_{T_1} + TCS \times dT$)。然後計算經溫度補償的壓力 $P = ((D1 \times SENS/2^{21}) - OFF)/2^{15}$ ，以 mbar 為單位，精度為 0.01mbar ($110002 = 1100.02\text{mbar}$)。

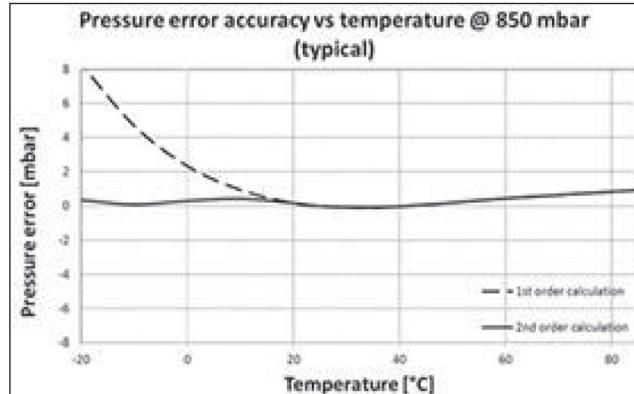
經一階修正的讀數在環境溫度較高時有效。但是在較低的溫度下，感測器需要進行二階修正，如圖 3 所示。對於低溫 (中間方框， $> 10^{\circ}\text{C}$) 和超低溫 (左方框， $\leq 10^{\circ}\text{C}$)，使用一階修正的結果計算溫度和壓力的方法有所不同。

結果表明，在較寬溫度範圍內，經過一階和二階修正的壓力和溫度讀數精度都很高，如圖 4 所示。

除了體積小、精度高以外，MS5840 還具有一些其他特性使其特別適合可穿戴式應用。該元件的工作電壓為 1.5V 至 3.6V ，因而可相容 1.8V 和 3.3V 的邏輯設計。此外，這款低功率消耗元件的待機電流不足 $0.1\mu\text{A}$ 。

工作電流將取決於感測器讀數的頻率和解析

圖 4：透過一階和二階補償，設計人員可以實現 MS5840 壓力感測器在較寬溫度範圍內的高精度。



圖片來源：TE Connectivity

度。內置類比數位轉換器 (ADC) 採用三角積分轉換方法，過取樣速率 (OSR) 可選。因此，開發人員能夠實現轉換速度與功率消耗之間的最佳平衡。轉換過程中峰值電流典型值為 1.25mA ，但 OSR 設置為最大值 (8192) 時，若每秒讀取一個樣本，則轉換時間僅為 17ms ，平均電流為 $20\mu\text{A}$ 。OSR 設置為最小值 (256) 時，轉換時間僅為 0.54ms ，平均電流為 $0.63\mu\text{A}$ 。

此外，感測器解析度也受 OSR 設置影響，因而也應納入權衡範圍。在最大 OSR 下，模組解析度為 0.016mbar ，對應高度差不足 13cm 。在最小 OSR(25) 下，解析度為 0.11mbar ，對應高度差約為 90cm 。

壓力感測器設計考慮因素

使用壓力感測器做為氣壓高度計時，開發人員需要注意以下系統設計考慮因素。本質上，MEMS 壓力感測器是將一塊矽薄片蓋在填充參考壓力氣體 (或真空) 的腔室上。薄片上表面透過感測器封裝的開口或埠連通大氣壓。腔室和環境之間的氣壓差使薄片彎曲變形而產生機械應力，進而產生成正比的電訊號。MS5840 的內置 ASIC 可檢測該訊號並將其數位化。

由於感測器需連通環境氣壓，因此可穿戴設備設計必須為感測器埠提供連通外部空氣的暢通路徑。不過，這一路徑不僅允許空氣進入元件，同時也會讓水和灰塵由此進入。因此，在可穿戴式設備

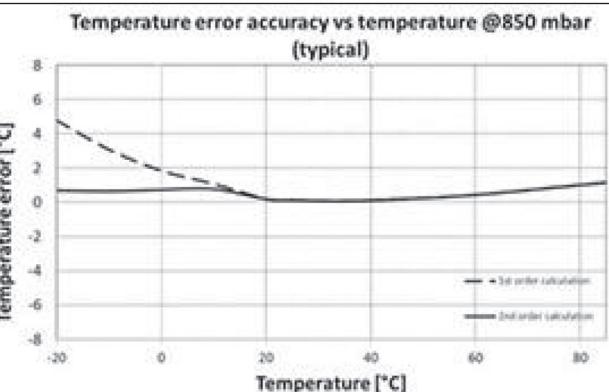
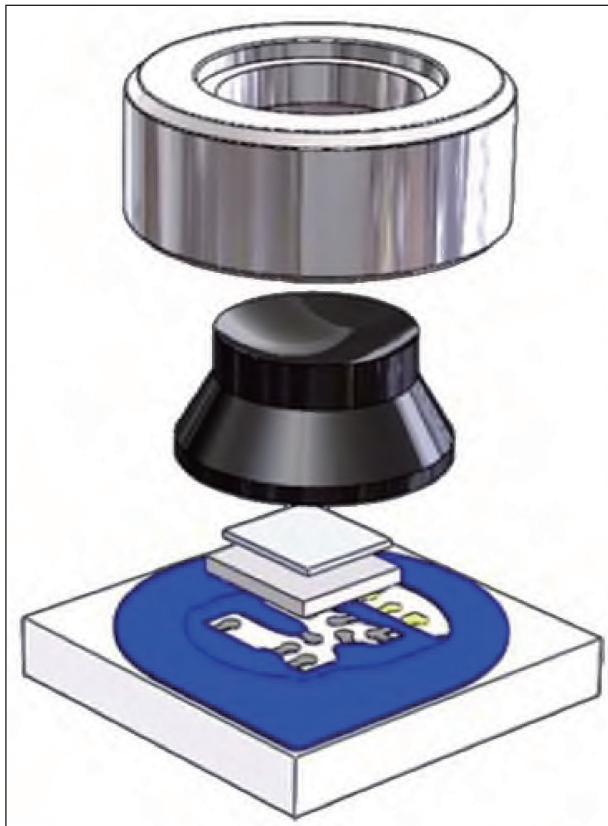


圖 5：MS5840 壓力感測器模組包含不透明凝膠層，即圖中埠（上部）與感測器元件（下部）之間的黑色物質，以保護電子元件免受光線、灰塵和濕氣影響。



圖片來源：Digi-Key Electronics，原始資料來源於 TE

設計中，開發人員既要注意感測器放置的位置以免阻塞空氣路徑，還須考慮設備外殼設計以實現最佳防水性能。

MS5840 的設計可有效解決這一問題。該模組採用分層結構來保護感測器（圖 5）。最底層是氧化鋁基板，SMT 焊盤可為元件提供機械穩定性。MEMS 感測器堆疊在 ASIC 上並裝於基板之上，ASIC 可提供訊號調節、數位化轉換和 I²C 介面。電子元件與不銹鋼蓋之間使用不透明凝膠填充，不銹鋼蓋用做元件連通大氣的埠。

凝膠的用途有多種，主要功能是將大氣壓傳遞到感測器表面。凝膠既可做為感測器與空氣的機械耦合，又能防止灰塵和濕氣進入電子元件。由於凝膠不透明，因此還可提供額外的光保護，以避免由光子引起的電子雜訊。蓋中包含凝膠可增強模組剛

性，搭配接地選項即可提高模組的 ESD 抗擾度。

開發人員可以利用這種分層結構，在感測器蓋上粘附 O 形圈，將感測器置於可穿戴式設備外殼內並使不銹鋼埠與外殼的空氣開口齊平，以提高可穿戴式設備的防水性能。完成組裝後，設備外殼和感測器蓋之間的 O 形圈可密封外殼，防止灰塵和水侵入設備，而凝膠則可保護感測器。

將氣壓高度計整合至健身應用時，需要注意的另一個考慮因素是潛在的測量誤差來源：風。流動空氣比靜止空氣的壓力小，因此如果測量過程中突然刮起一陣大風，則會導致感測器檢測的氣壓瞬間下降。氣壓訊號中的這種“雜訊”可能會造成高度陡變的假像。然而，健身監測設備開發人員只需對照加速度計讀數來驗證高度變化的表徵，即可消除這類誤差。如果沒有相應的加速度，則高度“陡升”現象完全可以忽略。

對照消除法對於加速度同樣適用。在崎嶇路面騎行產生的加速度曲線可能與爬樓梯類似。但是，如果爬樓梯的加速度表徵沒有引起相應的高度變化，則系統也可考慮將加速度計讀數忽略為環境雜訊。

總結

隨著可穿戴式健身追蹤器的普及，設備健康資料的測量精度逐漸成為產品差異化要素。添加依據壓力的氣壓高度計，可從多方面提高可穿戴式健身設備的精度，尤其是消耗的卡路里方面。此外，這類感測器還有助於其他感測器的資訊驗證。不過，如需適用於可穿戴式健身監測設備，壓力感測器既要具有高精度，還須採用超小型封裝並能以低功率消耗運行。如上所述，TE Connectivity 的 MS5840-02BA 具有高精度、小尺寸和低功率消耗的特性，完全滿足下一代可穿戴式健身追蹤器的需求。

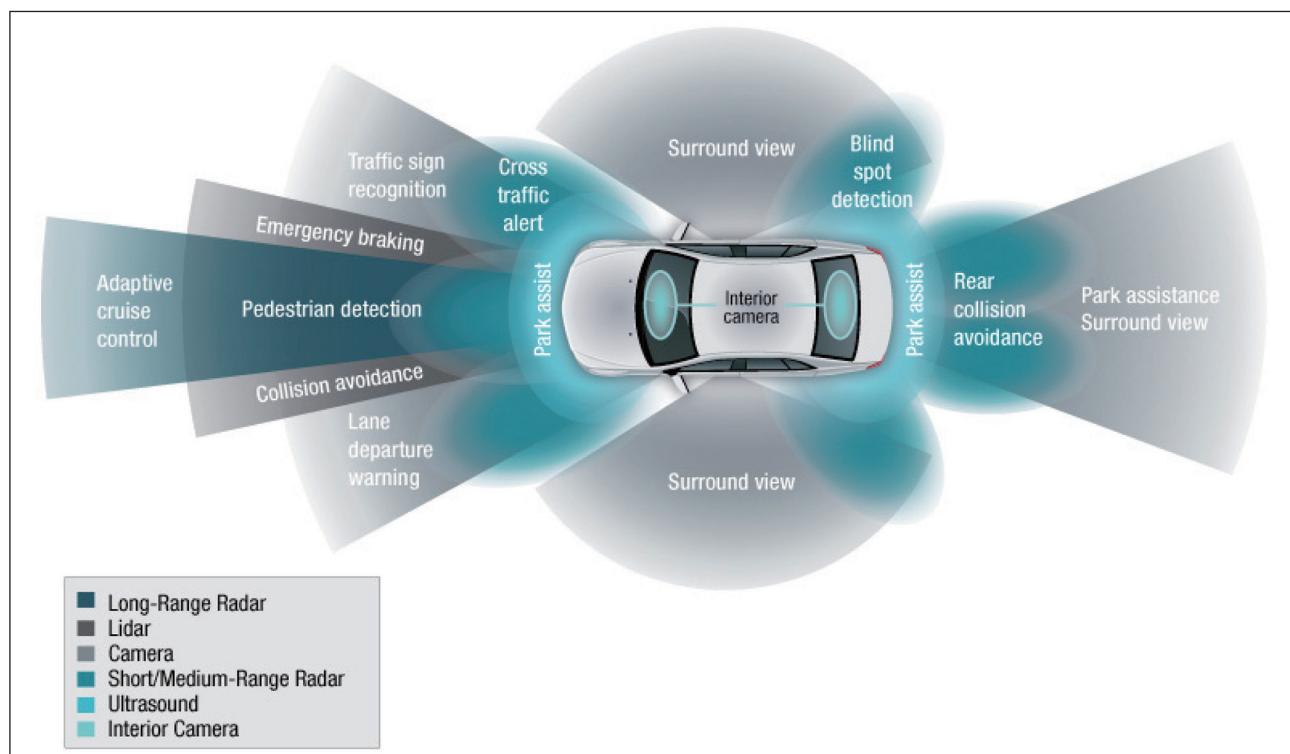
在 ADAS 感測器模組中實現精確的溫度和濕度感測

■文：德州儀器 (TI)

您的第一輛汽車也許就像我的一樣，缺少攝像頭、雷達和雷射雷達等感測器模組，而正是這些模組使得現代高級駕駛輔助系統 (ADAS) 的安全特性（如盲點檢測、泊車輔助和防撞）成為可能。由於這些感測器模組收集的資料與乘客安全直接相關，因此確保它們始終正常工作非常重要。遺憾的是，一個常見的損壞原因就是長時間過熱運行或暴露在潮濕環境中。

攝像頭、雷達和雷射雷達中的精確溫度感測器有助於延長其壽命並增強安全性和可靠性。首先，我們來看看溫度對汽車攝像頭模組的影響。

圖 1：現代汽車中的 ADAS 感測器概覽



攝像頭

圖 1 顯示每輛汽車可能有多達六個攝像頭。這些攝像頭需要高動態範圍和快速回應時間以及出色的弱光靈敏度。為了滿足這些要求，設計人員必須避免圖像感測器在高溫下長時間運行。

如圖 2 所示，汽車攝像頭通常是小型 (1.4in^3) 封閉立方體，沒有主動冷卻功能，因而非常容易積累熱量和快速升溫。圖像感測器的額定工作溫度通常為 -40°C 至 125°C (結溫) 和 -40°C 至 105°C (環境溫度)。如果達到這些範圍的上限或下限，電子控

圖 2：小型汽車的攝像頭模組

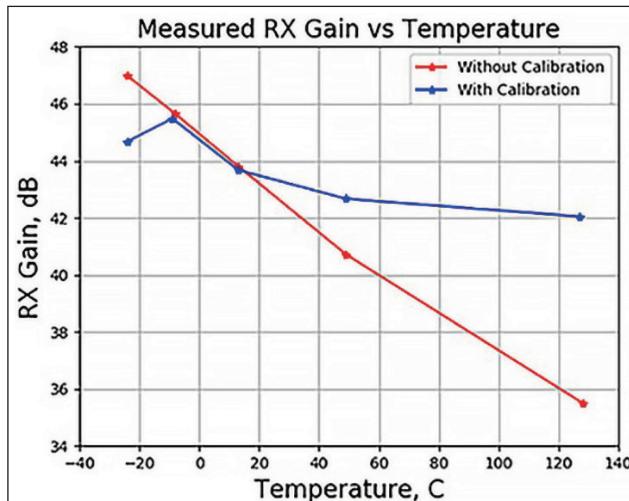


制單元 (ECU) 將不得不降低進入圖像感測器的功率或將感測器完全關閉，直到溫度恢復到正常工作條件為止。因此，準確獲取攝像頭的溫度非常重要。

圖像感測器通常採用嵌入式溫度感測器，其誤差範圍為 $\pm 6^{\circ}\text{C}$ 。這麼大的誤差意味著 ECU 可能會通過提前或延後關閉來限制攝像頭的使用。這些錯誤計算可能會對圖像感測器造成損壞，暫時限制 ADAS 功能，直到它得到維護為止。

解決方案是添加一個獨立的溫度感測器，該感測器可提供誤差小於 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 的準確溫度測量值。德州儀器應用手冊“通過精確溫度傳感提高汽車和工業攝像頭的系統可靠性”¹對於為特定攝像頭拓撲選擇溫度感測器有所說明。

圖 3：RX 增益 (a) 和 TX 功率 (b) 隨溫度的變化



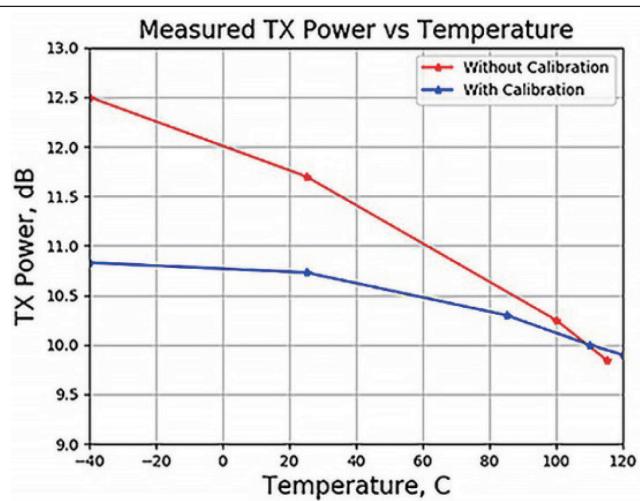
雷達

毫米波 (mmWave) 感測器的接收器 (RX) 瞬敏度、增益、輸入雜訊甚至輸出發射器 (TX) 功率都可能隨溫度而變化。在圖 3 中，主機處理器嘗試通過在運行期間定期調整電路配置，來減輕溫度變化帶來的影響，以使 RX 增益和 TX 功率儘量接近所配置的設置水準。

之所以需要高精度溫度測量，是因為要盡可能在更大限度地提高雷達性能和防止因高溫而產生熱損壞之間取得平衡。為了達到這種平衡，雷達感測器必須在溫度限值附近工作，同時能夠在盡可能接近限值時可靠地關閉。實現這一點可能很難，因為：

1. OEM 開始要求更高的環境溫度。
2. 為了降低成本，製造商開始使用塑膠模組外殼而不是金屬外殼。金屬是更好的導熱體，通常用作散熱器以散發模組內部產生的熱量。
3. 雷達晶片功耗高，會造成自發熱。
4. 雷達晶片上的嵌入式溫度感測器誤差範圍最高可達到 $\pm 7^{\circ}\text{C}$ ，這限制了雷達晶片的性能。由於此誤差，穩妥起見，您必須在距離工作限值 $\pm 7^{\circ}\text{C}$ 時關斷以防止損壞。

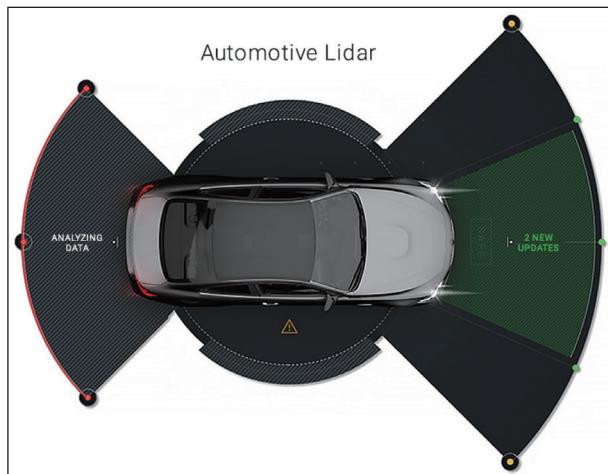
如今，設計人員的目標是讓雷達晶片內部裸片溫度的溫度精度達到 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。為此，您可以使用兩個獨立的溫度感測器測量溫差，或者使用雷達晶片下方的超薄溫度感測器，例如 TMP114。



雷射雷達

如圖 4 所示，雷射雷達感測器可以捕獲短距離、中距離和遠距離資料，提供深入的點雲，作為實現 ADAS 功能安全性的關鍵元件。雷射雷達包含鐳射陣列、飛行時間 (ToF) 感測器和控制器，所有這些都需要進行溫度補償以保持其性能。溫度變化會影響雷射雷達距離測量，並且在 70°C 以上時，鐳射陣列的性能可能會下降。ToF 傳感器具有高功耗，這會導致自發熱，並且在 105°C 左右控制器往往需要降低其時鐘頻率或完全關閉以防止熱失控。

圖 4：汽車雷射雷達範圍



雷射雷達系統的一個重要設計考慮因素是目標汽車安全完整性等級 (ASIL)。應用手冊“使用遠端溫度感測器滿足雷射雷達系統的 ASIL 要求”² 提供了一些快速實現冗餘和多樣化溫度感測器的想法。

雷射雷達和攝像頭模組都有可能會破裂的透鏡，因此可能會因潮濕而損壞內部的光學元件。汽車級濕度感測器（如 HDC3020-Q1）可測量相對濕度和溫度。它可以檢測水分（這可能表示發生洩漏）並計算何時超過露點（這會導致透鏡上出現冷凝），從而允許系統通知使用者採取糾正措施。

如何選擇溫度感測器

在評估您的下一個溫度感測器時，請考慮其最大精度、是否需要警報或其他功能以及您的通信管道。例如，如果沒有任何可用的 ADC 通道（通常存

在於環視和低端駕駛員監控攝像頭中），那麼您可以將數位溫度感測器連接到 FPD-Link 串列器的 I²C 或 SPI 通道。如果您只是想要具有遲滯功能的閾值警報，則可以使用連接到通用輸入 / 輸出的溫度開關。當您確實有可用的 ADC 通道時，類比溫度感測器的輸出電壓與溫度成正比，而不會像分立熱敏電阻解決方案那樣受外部元件容差的影響。如果您確實需要熱敏電阻，可以考慮矽基線性熱敏電阻，它可以解決負溫度係數 (NTC) 热敏電阻存在的精度和可靠性問題，同時保持其低成本和小尺寸的優勢。

結語

高度敏感的光學需要準確診斷以便長時間保持卓越性能，這一點和射頻 ADAS 模組非常類似。這樣便需要採用精確的外部溫度感測器，這是 ADAS 模組的必要構建塊，正在迅速成為未來的安全關鍵型系統。

參考資料：

- ¹ 應用手冊“通過精確溫度傳感提高汽車和工業攝像頭的系統可靠性”：<https://www.ti.com/cn/lit/an/snja046/snja046.pdf?ts=1649255343973>
- ² 應用手冊“使用遠端溫度感測器滿足雷射雷達系統的 ASIL 要求”：<https://www.ti.com/cn/lit/an/sloa318/sloa318.pdf?ts=1649255850117>
- 要瞭解更多有關實施溫差測量的資訊，請閱讀應用手冊“使用溫差測量進行元件溫度監測”：<https://www.ti.com/cn/lit/an/snja044/snja044.pdf?ts=1649255705157>
- 有關元件下溫度監測的更多詳細資訊，請閱讀應用手冊“使用超小型溫度感測器進行元件下監測”：<https://www.ti.com/cn/lit/an/snja043/snja043.pdf?ts=1649255729897>