

使用反射計晶片 進行非接觸式液位測量

■作者：Bruce Hemp / ADI 資深應用工程師

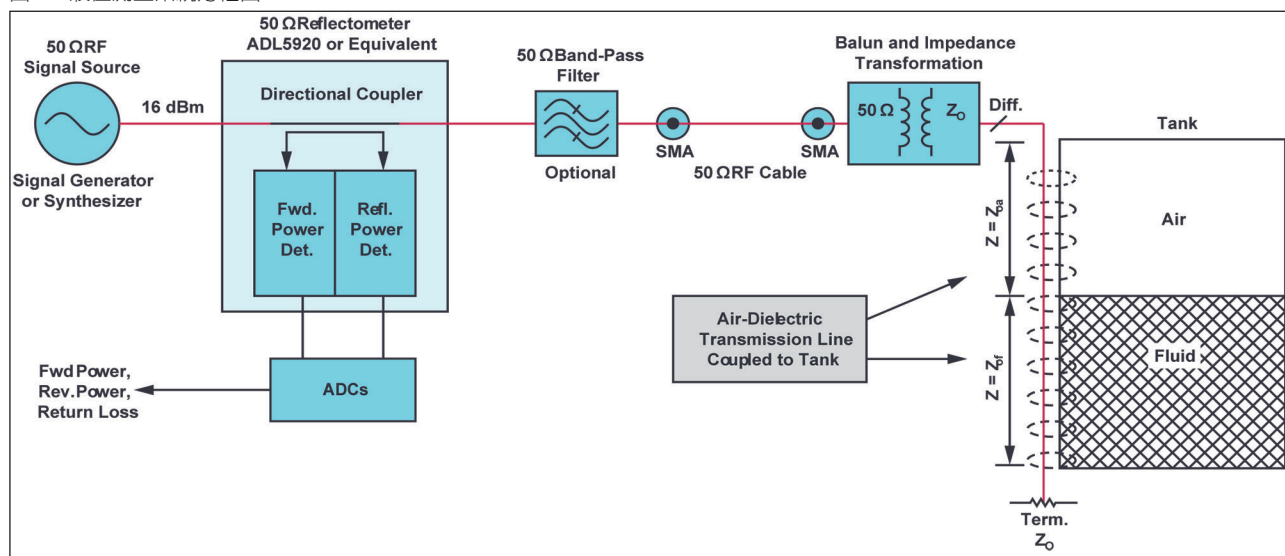
簡介

可以透過將空氣介質傳輸線貼在非金屬水箱外壁來檢測 RF 阻抗，以準確測量其液位。本文提供一個經驗設計示例來說明反射計元件 (例如 ADI 的 ADL5920) 如何協助簡化設計。

與傳統式機械浮子液位檢測方法相比，基於反射計的解決方案具備多種優勢，包括：

- 能夠快速、即時測量液位
- 支援實施廣泛的電子後處理
- 非接觸式設計 (不會污染液體)
- 無活動零件
- 最小的 RF 輻射場 (遠場抵消)
- 無需在水箱上開孔，用於安裝外部感測器 (降低洩漏風險)
- 由於水箱上沒有電線或零件，可以更加安全

圖 1：液位測量系統方框圖。



液位測量概述

圖 1 所示為整個系統的方框圖，包括用於驅動平衡式和端接式空氣介質傳輸線的 RF 訊號源，線路中包含反射計。

工作原理

懸浮在空氣中的傳輸線可用於準確測量阻抗特性和降低 RF 損耗，這是因為它使用低損耗導體，且不使用固體介質材料。經典的 E 和 H 向量圖表明，電場和磁場集中在導體周圍，它們的大小隨距離增加而迅速減小，距離則相對於傳輸線結構本身的大小和間距來測量。附近的介電材料 (例如水箱壁和水箱內的液體) 會改變傳輸線的電氣特性，可由反射計 (例如 ADL5920) 簡略測量。

詳細說明

考慮設計用於確定空氣中的特定特性阻抗 Z_0 的空氣介質低損耗傳輸線。增加的任何介電物質，例如傳輸線近場中的液體，都會：

- 降低傳輸線的特性阻抗；
- 降低傳播速度，從而增加線路的有效電長度；以及
- 增加線路衰減。

這三種效應結合在一起，可以降低回波損耗，回波損耗可使用反射計元件或儀器直接測量。透過仔細設計和校準，可以將回波損耗與液位相關聯。

為了簡化分析，在將傳輸線連接至水箱之前，考慮將圖 1 中的空氣介質傳輸線的阻抗設置為等於 Z_0 。因為線路與 Z_0 端接，所以從理論來說，線路中沒有反射能，所以回波損耗是無限的。

將傳輸線貼裝到水箱側面之後，以前的一條傳輸線現在會變成兩條獨立的傳輸線，以串聯形式級聯：

- 在液位以上，傳輸線以空氣為介質，水箱壁材料除外。傳輸線的阻抗 Z_{0A} 與空氣介電值 Z_0 相比，變化不大。傳輸線的傳播速度也是如此。
- 在液位以下，傳輸線阻抗 Z_{0F} 比 Z_{0A} 低。因為傳輸線的近場中存在額外的介電材料，所以電長度有效增加，衰減也是一樣。

由傳輸線源端的反射計測量時，傳輸線遠端的

端接 Z_0 的阻抗會發生轉變。轉變以圖形化的方式描述，大約如圖 2 所示。由於 Z_{0F} 低於 Z_0 ，所以史密斯圖按順時針方向旋轉，方向如箭頭所示。

當傳輸線阻抗與線路末端的電阻端部精確匹配時，傳輸線不會導致阻抗轉變。這種情況與圖 2 所示的史密斯圖的中心對應，該圖顯示標準化阻抗為 $1 + j0 \Omega$ 。在將傳輸線連接至水箱之前，回波損耗應至少為 26 dB。

將傳輸線連接到空水箱之後，水箱壁的材料會使傳輸線的介電材料增加，令線路的阻抗降低到 Z_{0A} ，並稍微增長傳輸線 Trace 1 的有效電長度，具體如圖 2 所示。回波損耗的測量值幾乎保持不變，約為 20 dB。

隨著水箱中的水位上漲，傳輸線的阻抗下降，這是因為液體佔據了原先用作傳輸介質的部分空氣。傳輸線的阻抗原先為 Z_{0A} ，現在變成 Z_{0F} 。所以，史密斯圖轉動的中心點降低。與此同時，因為傳輸線的有效電長度增加，史密斯圖轉動的量增加。具體由圖 2 中的 Trace 2 和 Trace 3 表示。所以，反射計測量到，射頻發生器端的回波損耗降低。

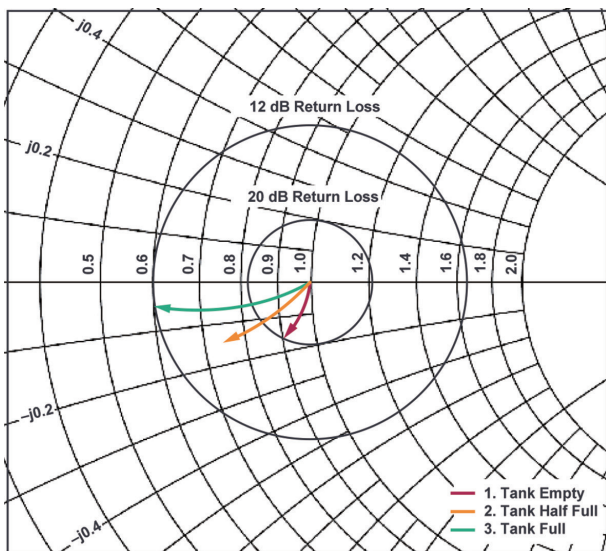
因為 ADL5920 測量的是反射幅度大小，而不是相位，所以阻抗轉變應該限制在史密斯圖的下半部分，在這個位置，無功分量为負。否則，阻抗被傳回史密斯圖的中心，導致測量值不準確。這表示連接到整個水箱的傳輸線的電長度應為 90° 或小於 90° 。如果電長度超過 90° ，測量的回波損耗會出現折返。

雙向 RF 檢波器 (例如 ADL5920) 可以測量入射功率和反射功率 (單位: dBm)，且傳輸線的特性阻抗 $Z_0 = 50 \Omega$ 。ADL5920 也可以減去這兩個讀數，直接測量回波損耗 (dB)。

何為回波損耗？

簡單來說，就是當 RF 源連接至負載時，一些功率會轉化為負載，剩下的功率則反射回源。兩種功率位準之間的差值就是回波損耗。這一般用於衡量負載與源之間的匹配程度。

圖 2：擴展的標準史密斯圖，表示傳輸線的輸入阻抗。線路端點表述液位如何轉化成回波損耗測量值。



巴倫的用途

巴倫 (Balun) 用於驅動電壓相等，但極性相反的導體，所以主要具有兩大作用：

- 降低傳輸線輸入 / 輸出的雜散 RF。這對控制合規的 EMI 非常重要。各個方向的遠場 EMI 也因為抵消而降低。
- 轉變阻抗。更高的阻抗表示傳輸線元件之間的間隔更大，這也表示電場會更深入地穿透容器。其結果是，回波損耗和液位之間呈現更大變化，這表示液位測量更加敏感。

巴倫應該在帶通濾波器的整個帶通頻段內提供出色的共模抑制比 (CMRR)。

有必要採用帶通濾波器嗎？

在雜散 RF 可能耦合至傳輸線的位置，推薦使用圖 1 所示的可選帶通濾波器。帶通濾波器有助於降低或消除 Wi-Fi、蜂巢式、PCS 服務、地面行動無線電和所有其他與所需源不處於同一頻段的外部訊號帶來的干擾。

為了實現最佳效果，建議帶通濾波器設計採用低插入損耗，且回波損耗與回波損耗的測量值相當；即，約為 30 dB 或更優化。

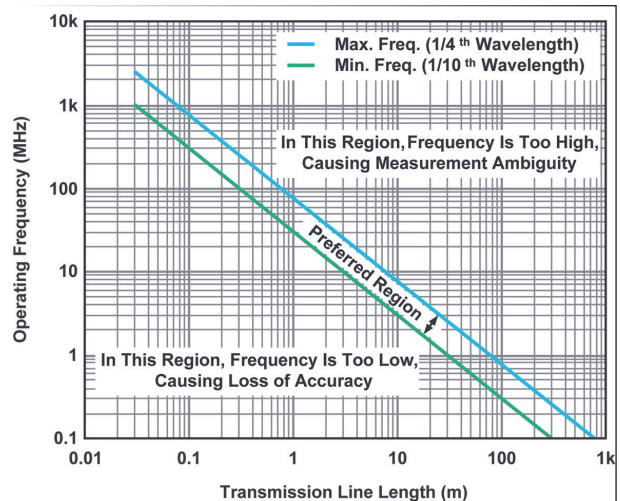
基本的設計步驟

設計步驟大致如下：

- 根據傳輸線的長度選擇工作頻率。一般來說，傳輸線的長度約與水箱高度相當，或稍長一點。在選擇工作頻率時，應確保傳輸線的長度一般為空氣中的 RF 波長的 1/10 至 1/4。圖 3 所示為大致的頻率範圍。在更低頻率下，會實現更卓越的回波損耗線性度和液位，在更高頻率下，會實現更大的回波損耗訊號範圍，但是線性度可能不佳，且會出現測量折返 (圖 2)。如果需要電磁輻射合規，可以從適用 ISM 頻率清單中選擇頻率。
- 根據所選的頻率或頻段設計或選擇巴倫。巴倫可以以集中元件 LC 或變壓器為基礎。巴倫在與平衡端 L 連接時，應具備卓越的回波損耗。

- 計算導體寬度，以及傳輸線的間隔尺寸。計算時，可以使用傳輸線阻抗計算器，例如任意傳輸線計算器 (ATLC)。

圖 3: 推薦的工作頻率與傳輸線長度。



簡單的設計示例

為了進行展示，這裡設計了一種適用於汽車擋風玻璃清洗水箱的液位監測器。該測試設置讓水在兩個完全相同的水箱之間流動，一個水箱連接傳輸線，用於測量液位。

根據之前的計畫：

- 因為水箱高度約為 6 英寸 (0.15 米)，那麼約 300 MHz 目標 RF 激勵是合理的 (參見圖 3)。
- 接下來，根據這個頻率範圍設計和建構 LC 巴倫。需要對 Z_0 進行輕微的升壓阻抗轉變，以提高對液位變化⁴的靈敏度 (參見圖 4)。採用網路分析儀或反射計來驗證單端埠上的回波損耗是否約為 30 dB 或更出色，其中固定電阻終端在連接至傳輸線之前，先直接連接至巴倫。
- 我們設計和建構平行傳輸線，其中 Z_0 等於之前使用的電阻值。傳輸線在電路中連接，電阻終端則移動至線路末端。參見圖 4 和圖 5。再次使用網路分析儀或反射計來驗證回波損耗是否保持卓越的水準——約為 25 dB 或更出色。

現在，傳輸線可能連接至水箱側面，如圖 6 所示。連接到空水箱時，回波損耗稍微降低是正常現象，這是因為作為傳輸線附加介電層的水箱壁材料

圖 4：液位檢測示例中使用的巴倫和傳輸線。

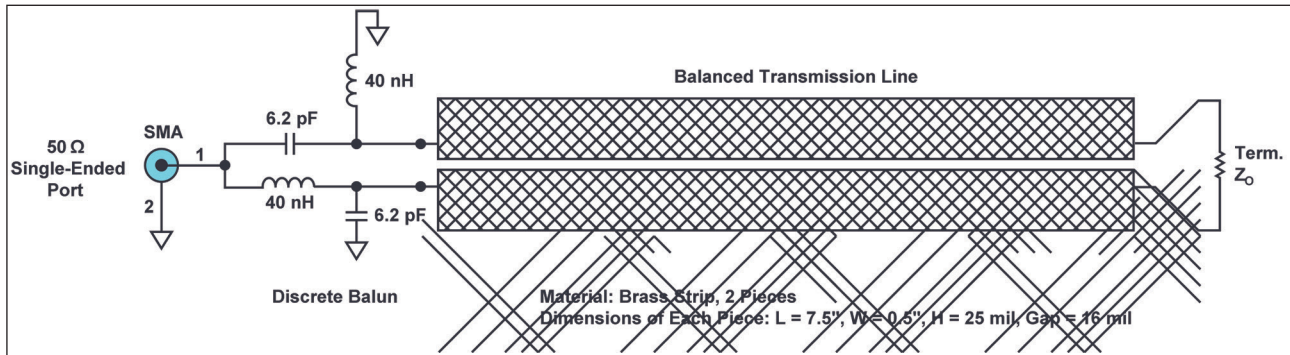


圖 5：分立式巴倫和端接傳輸線，連接到水箱之前。

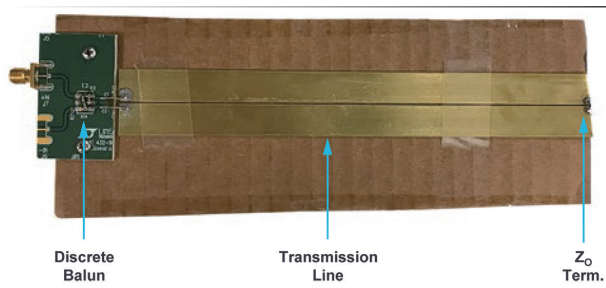
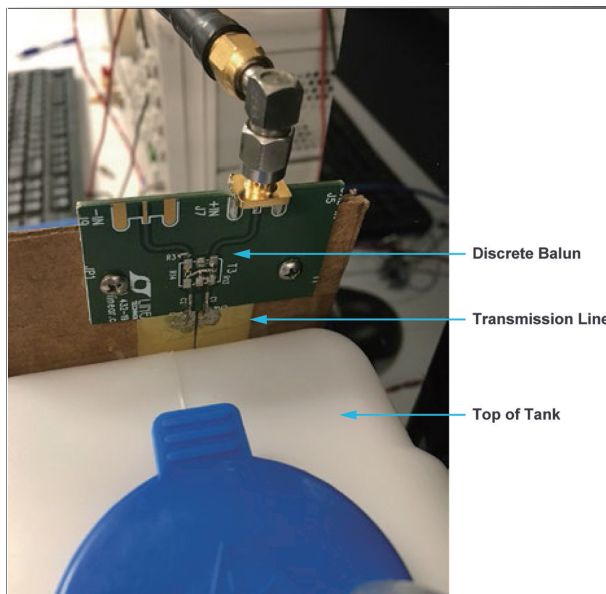


圖 6：示例設計顯示連接到水箱側面的傳輸線。

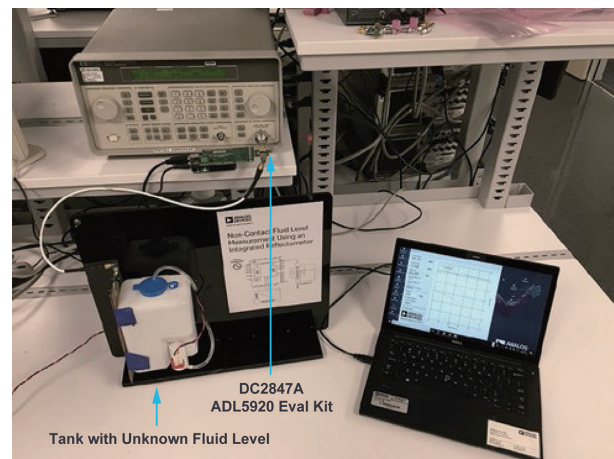


具有失諧效應。

示例測試結果

圖 7 顯示完整的測試設置。傳輸線連接至水箱側面，且水箱具備相關配置，可以管控注入和排出的水量。

圖 7：設計示例的整個測試設置。



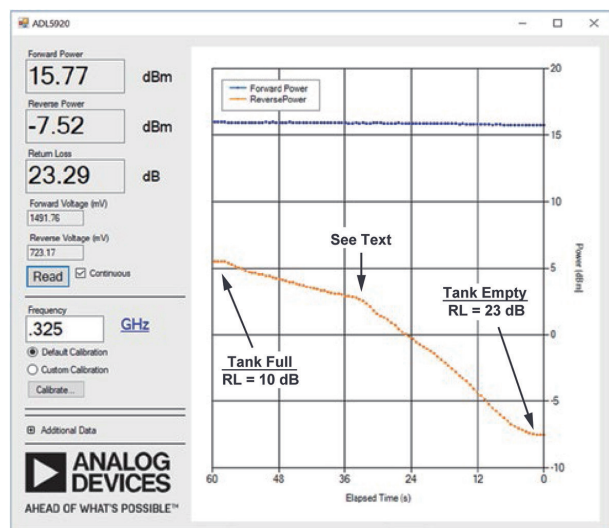
ADI 的評估套件 DC2847A 用於輕鬆讀取 ADL5920 反射計的測量結果。這個評估套件包含一個混合訊號處理器 MCU，用於讀取正向和反射檢波器的類比電壓。PC 軟體會自動載入和顯示結果（以圖表和時間形式）。回波損耗的計算非常簡單：正向和反向功率測量值的差值。圖 7 顯示設計示例的整個測試設定。

在這個設計示例中，透過啟動兩個水箱其中一個的泵來確定液位水準。當泵運行時，品質流量是相對恆定的，所以，理想的情況是水箱中的水位相對於時間線性上升。實際上，水箱從頂部到底部的橫截面並不完全相同。

圖 8 所示為液位從滿到空時的測試結果。從水箱中抽出液體時，正向功率保持恆定，反射功率呈線性降低。

$t = 33$ 秒時，坡度發生明顯變化。究其原因，應該是水箱設計造成的。水箱底部的橫截面面積會

圖 8：示例測試結果與液位。液位測量呈線性且無變化，但本文中所述的水箱設計導致的意外情況除外。



減小，如圖 7 所示，以為泵電機留出空間。這導致測量結果呈現非線性，必要時，可在系統軟體中輕鬆糾正。

校準

為了實現最高精度，必須對反射計實施校準。校準可以校正反射計內部的 RF 檢波器的製造差異性——即斜率和截距。DC2847A 評估套件支援單獨校準，如圖 8 所示。

在更高水準下，也需要對液位和回波損耗實施校準。這可能是因為下列不確定性來源造成：

- 傳輸線和水箱壁之間的製造距離差異。
- 水箱壁的厚薄差異。
- 液體和 / 或水箱壁的介電性能會隨溫度而變化。

可能存在系統非線性問題，例如，圖 8 中所示的斜率變化。如果使用線性插值，那麼在這種情況下，需要使用三點及以上的點校準。

所有校準係數通常儲存在系統的非揮發性記憶體中，這可能是嵌入式處理器應用未使用的代碼空間，或者是專用的非揮發性記憶體設備。

液位測量限制

任何反射計的指向性都是一個關鍵指標。在不

考慮巴倫損耗的情況下，當傳輸線與其自身的 Z_0 準確端接時，反射功率降低至零，反射計會測量其自身的指向性指標。指向性指標越高，反射計就越能夠準確地區分入射波和反射波的大小。

對於 ADL5920，指向性在 1 GHz 時一般為 20 dB，在 100 MHz 或更低時達到會增加為約 43 dB。這使得 ADL5920 非常適合用於在水箱高度約 30 mm 或更高時，測量液位水準（參見圖 3）。

應用擴展

在有些應用中，可以按幾種方式擴展基本的非接觸式液位測量原則。例如：

- 測量可能按低工作週期執行，以節省功率。
- 如果液位保持恆定，回波損耗測量可與另一個相關的流體特性關聯；例如，速度或 pH 值。
- 每種應用都是唯一的。例如，相對於最底部，有些技術在範圍的最頂部能提供更卓越的精度，反之亦然，具體由應用決定。
- 如果水箱採用金屬材質，傳輸線需要透過水箱內部。根據具體應用，傳輸線可能需要浸入水中。
- 可以使用多個 RF 功率位準的測量值來確定外部 RF 干擾是否會導致誤差。許多單晶片 PLL 元件都支援此功能，使其成為測試系統可靠性，或自我測試可靠性的測試。
- 水箱兩面或四面上的傳輸線感測器可以分別補償箱體沿一軸或兩軸的傾斜度。
- 如果是用於測量液位閾值，則使用一根或多根較短的傳輸線在較高頻率下運行會是不錯的解決方案

結論

開發 ADL5920 之類的單晶片反射計元件促成了新的應用類型，例如液位儀器儀錶。取消活動零件（例如使用多年的機械浮子）可以大幅提高可靠性。油位監測也成為可能，進而推動產生了許多新工業和汽車應用。 CTA