

# 解決物聯網無線設備的 EMI 問題

技術應用文章

## 產品：

R&S®RTP 系列

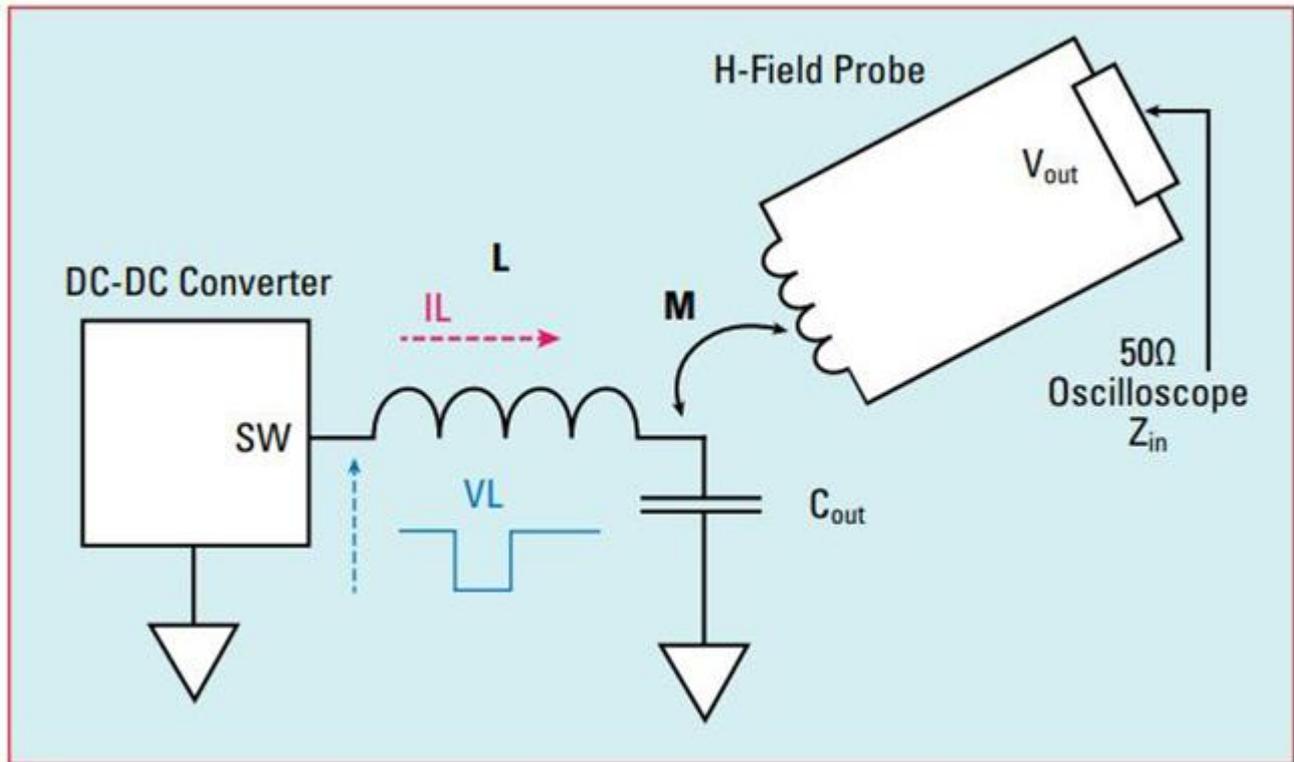
R&S®RTO2000 系列

R&S®RTE 系列



本技術論文描述無線物聯網設備的 EMI 所造成的問題，  
解釋如何用 R&S 數位示波器的 FFT 功能與探棒找到來源。

## 關鍵字:除蟲 EMC/ EMI 無線物聯網裝置



越來越多的製造商正在將無線技術添加或改造到新產品或現有產品中。這些產品通常包括移動，家用，工業，科學和醫療（ISM）設備。這種向“一切無線”過渡的過程正在緊鑼密鼓地進行，隨之而來的是產品本身的電磁干擾（EMI）問題，干擾了板載移動話機，GPS / GNSS 和 Wi-Fi / 藍牙接收器的靈敏度。這被稱為“平台”或自我干擾，已經成為製造商的大問題。

### 1. 無線自我干擾

當今大多數的數位產品都會產生大量的板載 RF 諧波“噪聲”或 EMI。雖然這種數位開關通常不會打擾數位電路本身，但是來自數位時鐘，高速數據總線，尤其是板載 DC-DC 開關模式電源的相同諧波能量很容易在 700 至 950 MHz（及更高）範圍內產生干擾。移動電話頻段，導致接收器“失靈”（降低接收器靈敏度）。為了使用各種移動電話服務（Verizon, ATT, Sprint, T-Mobile 等），製造商必須通過 CTIA（移動電話行業協會）非常嚴格的接收器靈敏度和發射器功率一致性測試的標準。要解決這種板載數位 EMI 以及伴隨而來造成不好的接收器靈敏度降低的問題，往往會使產品推出時間延遲數週或數月之久。

移動無線提供商要求以 dBm 為單位的某種接收器靈敏度，即總全向靈敏度（TIS）。例如，這通常可能是至少 -108 dBm 的靈敏度，並且必須包括移動設備中使用的天線效率的影響。

由於移動設備天線通常在人的手或頭部附近操作，因此往往會進一步降低靈敏度（取決於天線，典型值為-99 dBm）。有關此內容以及測試方法的更多信息，請參見 CTIA 的“空中移動台性能測試計劃：輻射射頻功率和接收器性能的測量方法”。移動無線電製造商 Broadcom 在他們的白皮書“符合 TIS 和 TRP 要求”中也提供了一些訊息。。

平台特徵（或自生）EMI

現在讓我們看一下如何表徵這種自生的 EMI，然後描述一些可能的緩解措施。電路板能源通常有兩個主要的關注領域，它們可以耦合到接收器天線或無線模塊，並導致接收器靈敏度下降（見圖 1）：

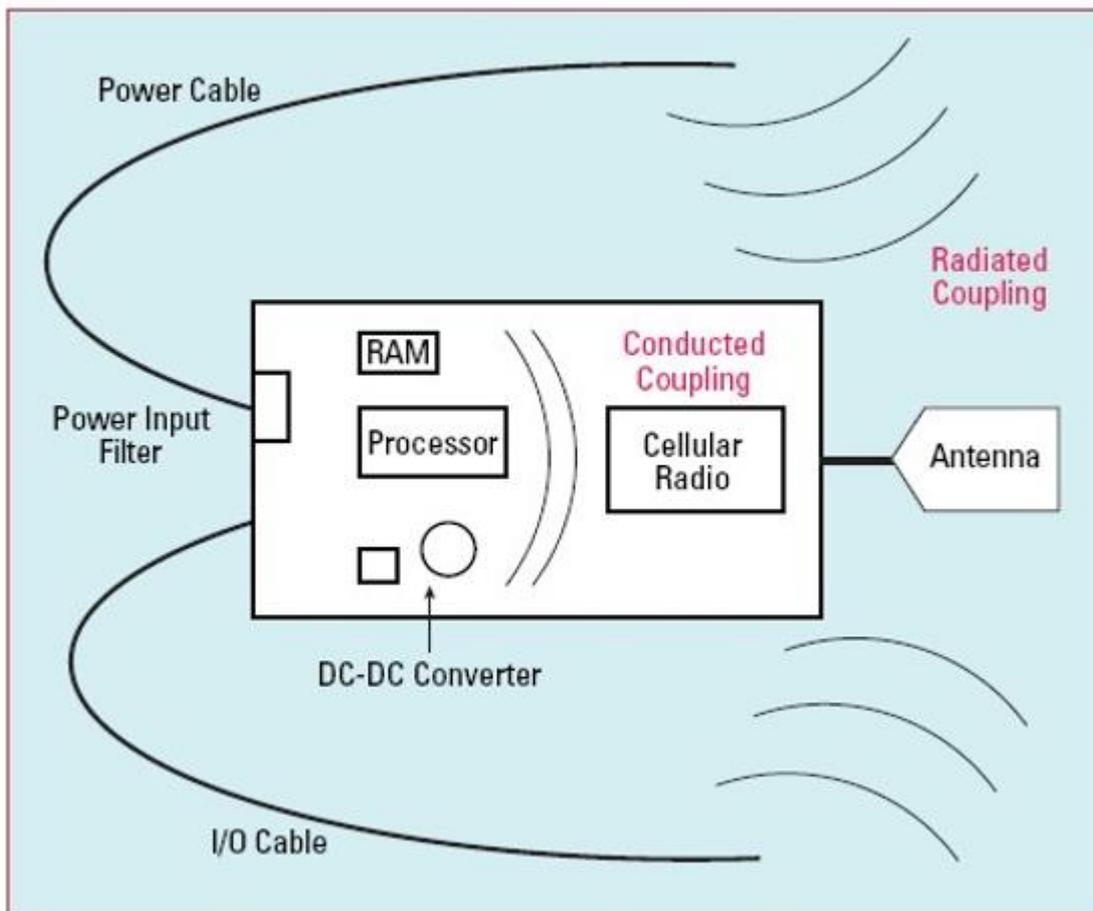


圖 1

**A typical IoT product showing the two major coupling paths: radiated and conducted.**

1. **電路板**上能源，例如 DC-DC 轉換器，位址和數據總線以及其他可以將 EMI 直接傳導或耦合到無線模塊或其天線的快速信號。
2. 充當“輻射結構”（天線）的附加 I/O 或電源電纜，將這種自生的 RF 能量直接耦合到**電路板**上或附加的無線天線中。

您可以使用三種測量技術來表徵平台干擾：

1. 近場磁場或電場探棒用於定位主能量（EMI）來源。
2. 高頻電流探棒可用於測量 I/O 和電源電纜上的小 RF 電流。
3. 近場天線或 TEM 單元，用於直接測量 PC 板，或連接電纜的實際近場輻射。

有了這些技術特徵，通常可確定耦合到板上無線接收器可能的電磁能量來源。一旦識別並表徵了來源，那麼再來面臨的挑戰就是要確定其能量是如何耦合到接收器中，並採用緩解技術來減少這種耦合。

由於積層不良，電路隔離不良（RF，數位，電源轉換）或信號/電源佈線不良，經常將 EM 場直接耦合在板上，雜散電磁場也很可能直接耦合到天線中。另外也可能以上兩者一齊發生。

## 干擾類型

會干擾敏感接收器的兩種常見的高頻諧波信號是窄帶和寬帶。通常，DC-DC 轉換器或數據/位址總線數據將顯示為非常寬的信號，並帶有多個諧振峰值，而晶體振盪器或高速時鐘將顯示為一系列窄尖峰。除非產品設計符合 EMI 要求，否則這兩種類型的信號都可以很好地輻射或傳導高頻能量到手機或其他無線頻段。



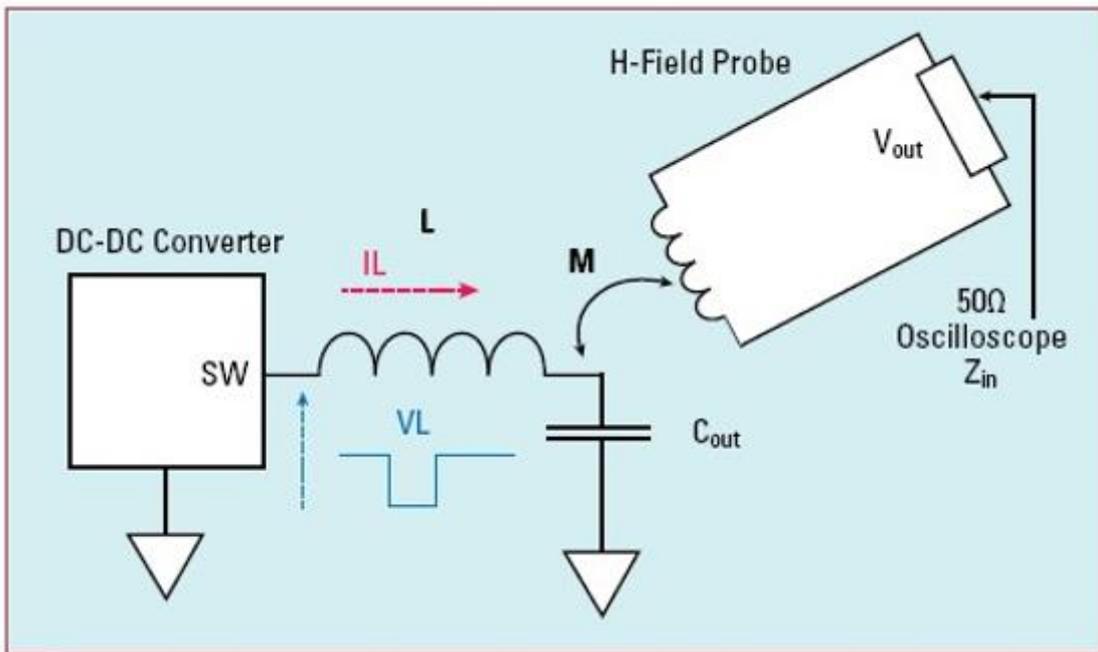
圖 2

**Characterizing the harmonic EMI from one of the three DC-DC power converters located on an example IoT board. The best spot is to couple to the output inductor as shown. These are readily identified by their relatively large round package. The probe should be held flat, as shown, for maximum coupling.**

這兩個 EMI 來源均可能對美國 700 至 900 MHz 行動和 GPS 頻段造成干擾，峰值在移動頻段內的環境噪聲電平之上超過 40 dB。

## 1 測量類型

一些方法來診斷 IoT 的設備的自干擾：使用近場探棒來幫助表徵電路板或系統上的諧波能量來源；用一電流探頭來表徵諧波電纜電流；或用一近場天線來監測實際的幅射，同時進行故障排除。（選擇）您或許也可以使用 TEM 單元代替天線。



Modelling the switched waveform between the output inductor of a DC-DC converter and H-field probe.

## 2 步驟 1：近場探頭

可以三種有用的測量來表徵**電路板級的 EMI**，特別是：寬頻率範圍內的常規檢查；僅在接收機下行鏈路頻段進行較窄的檢查；示波器測量 DC-DC 轉換器的開關波形。

對於近場測量，直徑約為 1 cm 的 H 場環路的尺寸大概合適，可以作**電路板等級**識別和表徵 EMI（請參見圖 2）。

## 3 從寬頻率範圍入手

較寬的測量範圍有助於表徵 EMI 源的總體概況，例如 DC-DC 轉換器，時鐘總線，處理器，存儲器以及任何其他潛在的高頻設備（例如以乙太網時鐘）。此測量的頻率至少為 1 到 1000 MHz，將覆蓋美國移動 LTE 頻段。對於其他手機和/或 GPS / GNSS，您將需要看起來高達 2 GHz。對於 Wi-Fi，您將需要看起來高達 2.5 或 5.4 GHz，但是這些移動輻射很少會超過 2 GHz。將頻譜分析儀置於“最大保持”模式對於建構最大頻譜幅度很有用。

例如，使用 H 場探頭測量典型的 IoT 設備（參見圖 2）中的乙太網和 DC-DC 轉換器，可以發現從 1 到 1500 MHz 範圍內非常高的寬帶和窄帶 EMI。從大約 700 到 900 MHz 美國通用的移動段邊界，以及 1575.42 MHz 的 GPS 頻率（一般 GNSS 在附近使用其他頻率）。在環境噪聲本底上測得的 EMI 為 20 至 40 dB。如果此 EMI 耦合到接收器輸入，則可能導致嚴重影響接收器的靈敏度。

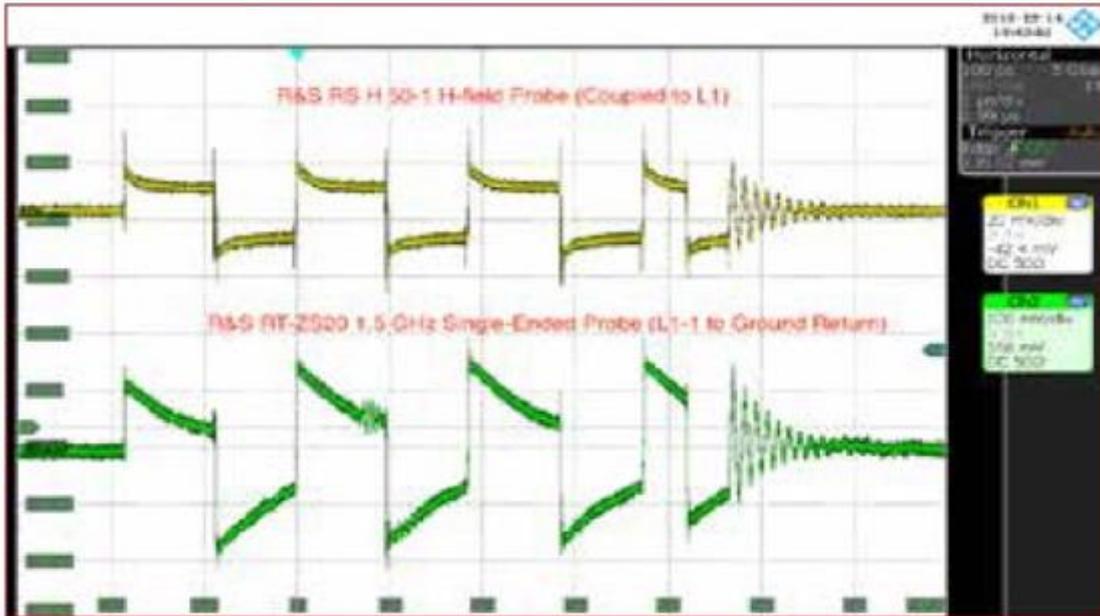


圖 3

**Probing the DC-DC converter output inductor of an example IoT device. The coupled H-field probe and direct-connected single-ended probe show similar waveforms. By using the H-field probe, measurements like rise-time, period, and ringing may be observed quickly and without risk of shorting circuits with oscilloscope probe tips.**

### 3 將寬度縮小到下行鏈路頻段

一旦確定並確定了板上的各種噪聲源，第二種有用的測量方法就是縮小寬度，並在各個位置使用相同的近場探棒僅查看接收器（下行鏈路）頻帶。例如，在美國，Verizon LTE 的下行鏈路頻段將是從 746 到 756 MHz 的 FCC 分配的“頻段 13”。通過探測所有其他的電路，您可能能夠確定其潛在的干擾源。



圖 4

**An extreme example of ringing on a DC-DC converter output inductor. By using the H-field probe, measurements like rise-time, period, and ringing may be observed quickly and without risk of shorting circuits with oscilloscope probe tips. In this case, the ring frequency is about 217 MHz.**

DC-DC 轉換器通常具有來自轉換器開關節點(SW)的近方波信號 VL 和輸入至地迴路的輸出電感 L，這就是我們使用示波器探棒進行測量的結果。流經電感的電流與該電壓有關，如下所示：

$$IL = \frac{1}{L} \int VL * dt \tag{1}$$

假設將磁場探棒保持在靠近電感的位置，我們將得到一些互耦 M（未知），並且探棒的輸出為：

$$V_{out} = \frac{Md(IL)}{dt}$$

Combining Equations 1 and 2, we get:

$$V_{out} = m \frac{d}{dt} \frac{1}{L} \int VL * dt = \frac{M}{L} VL \tag{2}$$

Therefore, factoring out the constant, M/L, we see V<sub>out</sub> ∝ VL.

由於 V<sub>out</sub> 與 VL 成正比，因此現在可以輕鬆，快速地測量 EMI 的最重要特性，**避免** 電路運作時與示波器探棒尖端短路。通過使用靠近每個 DC-DC 轉換器電感器的 H 場探頭，我們可以測量上升時間（指示諧波頻率的上限），脈衝寬度和周期（還包括諧波頻率）和振鈴頻率（可在寬帶頻譜中引起寬共振峰）。有關使用示波器探棒和磁場探頭進行測量的比較，請參見圖 3。



圖 5

在圖 4 中，我們看到一個來自 DC-DC 轉換器的振鈴的極端例子。振鈴頻率為 217 MHz，在此振鈴頻率以及更高的諧波下，產生的 EMI 達到峰值。

## 5 步驟 2：使用電流探棒

圖 5 顯示如何使用電流探頭測量沿著電源線流向野生攝像頭的共模諧波電流。這些電流的形成方式以及它們為何趨於耦合到電纜的方式在參考文獻 3 和 4 中有更完整的解釋。我們假設在 PC 板上產生的較小的 RF 共模電流（通常在  $\mu\text{A}$  範圍內）可以很容易地耦合至連接 I/O 和電源線，然後可以重新輻射到無線電模塊中，如圖 1 所示。

具有 FFT 功能的示波器（例如 Rohde & Schwarz RTE 系列或 RTO 系列示波器；圖 5 中使用的頻譜功能）是進行這些測量的最佳工具，因為可以觀察到整個頻譜。

電流探棒可以測量電源線或 I/O 電纜中的 RF 共模電流。兩者都可以直接輻射到物聯網天線。

所有的商用電流探棒，例如 Fisher F-33-1，都包含一張校準圖，該圖顯示了傳輸阻抗（通常為 dB Ω）與頻率的關係（見圖 6）。幾乎平坦的水平線性區域是該圖中最有用的部分，因為您可以使用恆定的傳輸阻抗來計算被測電線或電纜中的共模電流。

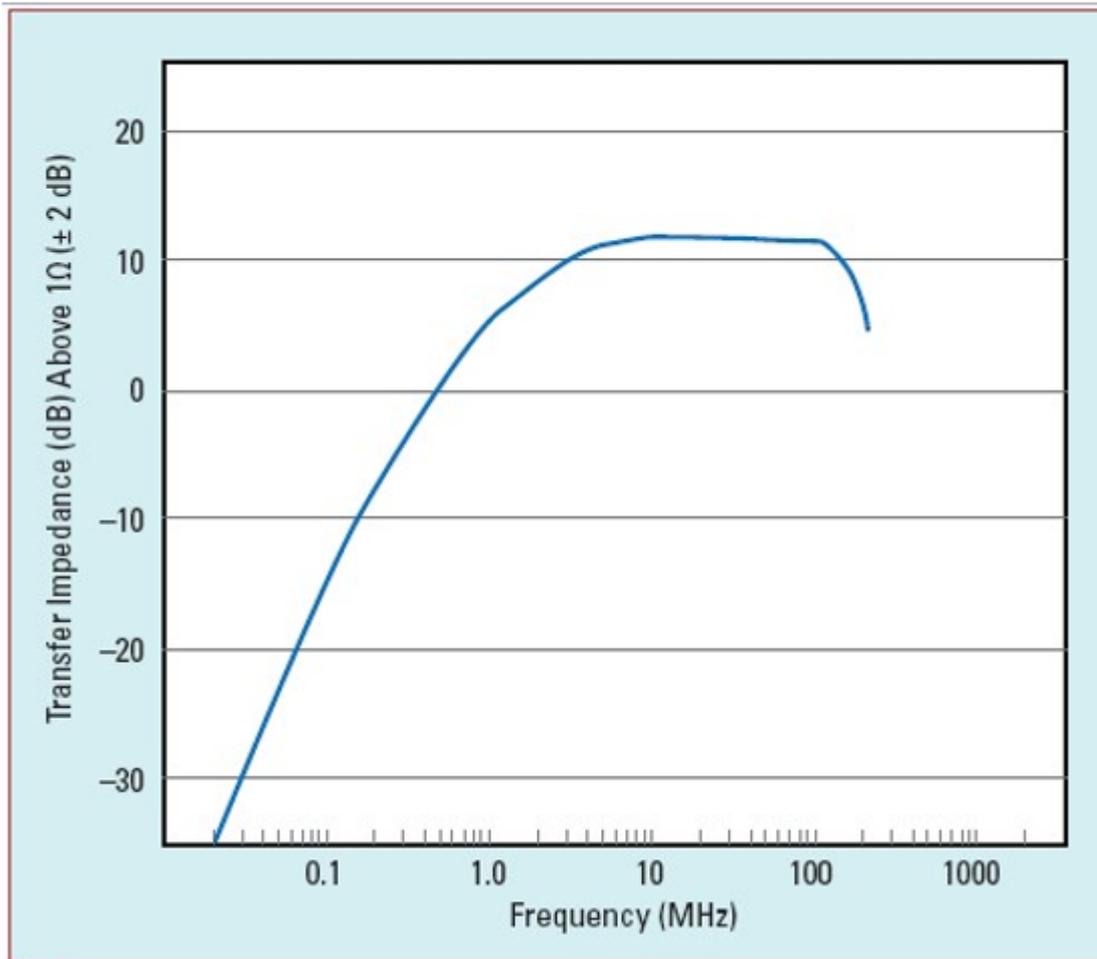


圖 6

**The transfer impedance vs. frequency for the Fischer Custom Communication F-33-1 current probe.**

為了計算通過探棒的電流，我們使用歐姆定律：

$$Z_T = \frac{V_{out}}{I} \quad (3)$$

其中，Vout 是在 50 Ω 端口上測得的電壓，I 是電線或電纜中的共模電流。

我們可以用 dB 表示此等式：

$$|Z_T|_{dB\Omega} = |V_{out}|_{dB\mu V} - |I|_{dB\mu A} \quad (4)$$

解決 I（通過電線或電纜的共模電流）：

$$|I|_{dB\mu A} = \frac{|V_{out}|_{dB\mu V}}{|Z_T|_{dB\Omega}} \quad (5)$$

一個非常有趣的結果是，知道電線中的共模電流（假設長度與波長相比在電氣上短），我們可以根據以下等式計算該電線或電纜的預期電場：<sup>3,4</sup>

$$|E_{c,max}| = 1.257 * 10^{-6} \frac{|I| f L}{d} \quad (6)$$

w 其中  $E_{c,max}$  計算出的電場（V/m），Ic 是測得的共模電流（A），f 是諧波頻率（Hz），L 是電線或電纜的長度（m），以及 d 是到電線或電纜的測量距離（m）。為了與商業 EMC 標準中的測試極限進行比較，通常將 3 或 10 m 用於輻射發射。

鑑於電線或電纜的諧波電流測量結果，計算近似通過或失敗的能力是處理產品輻射發射時的有力工具。

儘管在直接處理敏感的 IoT 接收器中的近場輻射時，此功能並不重要，但相對而言，還是可知道給定的電源或 I/O 電纜是否可能導致整體噪聲耦合問題。



圖 7

A typical test setup to characterize the actual radiated emissions from an IoT product (or any product for that matter).

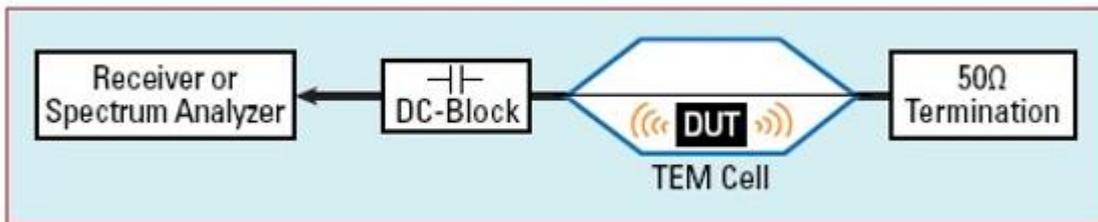


圖 8

### 9 步驟 3: 近距離天線

要測量帶或不帶有電纜的 PC 板的直接輻射，您可以使用小間距天線來吸收輻射。天線無需在整個頻率範圍內進行校準甚至諧振，只需將其放置在足夠近的距離處即可觀察到諧波發射。可能需要將天線放置在小於 1m 的位置，以觀察自干擾產生的輻射（見圖 7）。

要監視的最重要的諧波頻率將包括**移動** LTE 頻段（大約 700 至 900 MHz，商業 GPS L2 頻率 1575.42 MHz，更高的頻段大約 1.8 至 1.9 GHz 以及 Wi-Fi ISM 頻段 2.4 至 2.5 GHz）。**電路**板上載的諧波含量很少高於此值。

## 10 步驟 3: TEM 單元 (選項)

設置天線的另一種方法是使用 TEM 單元表徵來自物聯網裸板或物聯網產品的輻射，前提是它適合隔板區域。

為了測量帶有或不帶有電纜的 PC 板的直接發射，可以將其放置在小型 TEM 單元中，TEM 單元只是一個擴展 50  $\Omega$  傳輸線。將運行測試板（用絕緣子保護）放置在隔板區域內可以捕獲總體的發射曲線。

在使用中，將 50  $\Omega$  終端連接到 TEM 單元的一個端口，將一個 DC 模塊連接到另一個，以保護示波器或頻譜分析儀，以防 DC 電壓終止在隔板上。然後，將一根同軸電纜從 DC 模塊連接到示波器或分析儀輸入，並調節到所需的頻率極限（見圖 8）。

由於採用開放式 TEM 單元設計，該測試可能還必須在屏蔽室中進行，以排除來自廣播電台，電視或移動發射機 RF 信號的干擾。

任何連接的電纜都可能會拾取來自收音機，電視，2 路收音機或手機的環境信號。如果是這種情況，請嘗試沿每條電纜連接幾個等距的鐵氧體扼流圈。無論如何，最好記錄被測頻率範圍內的環境圖，以幫助識別和區分環境信號和電路板生成的信號。如果物聯網產品可以由電池供電，那就更好了，因為這就無電纜影響考量。

## 11 補救清單

所有無線或物聯網產品設計都必須考慮 EMC / EMI，任何偏差都可能增加接收器靈敏度下降的風險。重要注意事項包括：

- 接近完美的 PC 板佈局（堆疊，佈線，牢固的返回平面）
- 可能用線性穩壓器代替開關穩壓器
- 使用更新的“低 EMI”開關穩壓器
- DC-DC 轉換器的濾波
- 過濾任何其他高頻設備
- 在無線電模塊上過濾
- 高 EMI 區域周圍的局部屏蔽，例如處理器/存儲器或 DC-DC 轉換器
- 可能屏蔽整個產品（天線除外）
- 正確的天線放置和設計

PC 板的佈局至關重要，這是您應花費大部分精力的地方。8 層或 10 層的堆疊將在隔離電源，模擬，數位和無線電部分時提供最大的靈活性，並提供多個接地迴路，這些迴路可以在板邊緣周圍縫合在一起以形成法拉第籠。必須注意避免通過公共阻抗耦合（即共享公共信號返回路徑）而在各部分之間產生回流電流污染。這就是為什麼劃分電路功能（RF，數位，模擬，功率轉換）如此重要的原因。

電源和接地迴路必須位於相鄰的層上，並且最大間隔為 3 到 4 密耳，這一點至關重要。這將提供最佳的高頻去耦。時鐘或其他高速走線必須與實心返回平面相鄰，應避免穿過過多的過孔，並且在沒有相鄰的返回過孔或耦合電容器的情況下，不得更改參考平面。

板上 DC-DC 電源部分應與敏感的模擬或無線電電路（包括天線）**需要**良好隔離。注意初級和次級電流環路區域及其返回電流。這些返回電流不應與數位電路，模擬電路或無線電電路共享相同的返回平面路徑。通常，最好將輸入和輸出電容器以及輸出電感器放置在非常靠近 DC-DC 轉換器 IC 的位置。請記住，高於約 50 kHz 的返回電流要直接在**來源走線**下方返回。最後，將所有相關的轉換器電路放在 PC 板的頂部或底部。將它們放在兩側都將導致高頻電流污染電介質空間，並可能導致 EMI 耦合到其他電路。

對於一般產品設計指南，參考文獻 3 和 4 描述了幾種基本的設計概念，以減少 EMI。參考文獻 6 包括一系列有關為低 EMI 設計 PC 板的文章。參考文獻 7 可用於提供有關測量無線 EMI 和補救措施的想法。

## 12 小結

對於製造物聯網產品的製造商來說，無線自干擾已迅速成為最具挑戰性的問題之一。成功取決於精心設計整個產品以確保最小的自生 EMI。正確的電路板佈局和堆疊是成功的關鍵因素。

文章發表在 2019 年 7 月的《SIJ》上, *Technical Feature: 34 頁*.

## 13 參考書目

1. CTIA, “Test Plan for Mobile Station Over the Air Performance: Method of Measurement for Radiated RF Power and Receiver Performance,” [http://files.ctia.org/pdf/CTIA\\_OTATestPlan\\_Rev\\_3.1.pdf](http://files.ctia.org/pdf/CTIA_OTATestPlan_Rev_3.1.pdf).
2. Broadcom, “Compliance with TIS and TRP Requirements,” [www.broadcom.com/collateral/wp/21XX-WP100-R.pdf](http://www.broadcom.com/collateral/wp/21XX-WP100-R.pdf).
3. H. W. Ott, “Electromagnetic Compatibility Engineering,” Wiley, August 2009.
4. P. G. André and K. Wyatt, “EMI Troubleshooting Cookbook for Product Designers,” *SciTech*, July 2014.
5. Tekbox Digital Solutions, [www.tekbox.com/product/open-tem-cells-emc-compliance-testing/](http://www.tekbox.com/product/open-tem-cells-emc-compliance-testing/).
6. K. Wyatt, “The EMC Blog,” *EDN*, [www.edn.com/electronics-bCopylogs/4376432/The-EMC-Blog](http://www.edn.com/electronics-bCopylogs/4376432/The-EMC-Blog).
7. K. Slattery and H. Skinner, “Platform Interference in Wireless Systems— Models, Measurement, and Mitigation,” *Newness Press*, 2008.