

## 如何使用先進的信號分析技術來 確定 WLAN 發射器降級的原因

Dr. Christian Olgaard, LitePoint Corporation  
筑波科技 提供

當今的 802.11a/b/g WLAN 產品市場競爭日益加劇，面臨降價壓力與加快產品推出速度的雙重壓力。在這種環境下，提高質量無疑會使產品與眾不同並提高其銷售量，與此同時，即使很小的生產效益改進也會對收益率帶來顯著影響。

本文舉例說明了設計和質量保證工程師如何利用誤差向量幅度 (EVM)、頻率誤差、相位雜訊及發射功率包絡來辯識 WLAN 發射器性能降級的根源。特別講述了發現並化解幅度、相位、 $|$  與  $0$  通道之間的群延遲失衡、相位雜訊、寄生信號、瞬態效應、信號壓縮對發射機性能等的影響時所採用的一些技術。

802.11a/b/g WLAN 發射器的性能會直接影響產品質量。在當今 WLAN 產品市場空間擁擠、利潤微薄的情況下，提高質量無疑會使產品與眾不同並增加其銷售量，還能減少退貨並提高生產效益以及收益率。但是，發射器的性能很容易受到 RF 部分的設計選擇、電路板佈局及其實現方式、元件的變化及更替等因素的影響，並且會由於 802.11a/b/g 標準所要求的調製類型和頻帶的不同而變得更加複雜。

具有頻譜分析儀、向量信號分析儀 (VSA) 及功率表(帶信號分析軟體，如 LitePoint 的 IQview™ 802.11a/b/g WLAN 測量方法及其相關的 IQsignal™ 套裝軟體)能力的測試儀是分析大多數 WLAN 發射機問題的必備工具。利用頻譜分析儀與功率表能力可以測量頻率偏差、瞬態信號、相位雜訊、同帶信號傳輸功率、相鄰通道功率及其他參數，而 VSA 能力則可以將特定的信號解調成正交分量，因此可將複雜的信號顯示為具有幅度和相位特性的向量或者顯示其完整的信號星座圖。信號分析軟體可隨之簡化測量過程並同時提供性能測試的統計評估結果。

利用這些工具，可以在調製域、時域及頻域進行測量，在設計過程與生產期間評估發射器性能並查找其故障。此外，由於允許測量一個簡單方便的品質因數——誤差向量幅度 (EVM)，將表徵發射 RF 信號的許多參數簡化為單一參數，因此這些工具簡化了 802.11a/b/g 所用的複雜波形的分析。在生產線測試中，EVM 可用作合格——不合格的尺規以簡化發射器的質量保證並提高測試吞吐量，而在設計過程中，EVM 則是一個很有價值的總體信號質量指標。

## 誤差向量幅度 (EVM)

誤差向量幅度是測量調製精度與發射器性能的一個直接測量指標。從質量上講，EVM 反映了誤差向量，它定義為信號星座圖中測量信號與理想無差錯點之間的差別，如圖 1 的複平面所示。

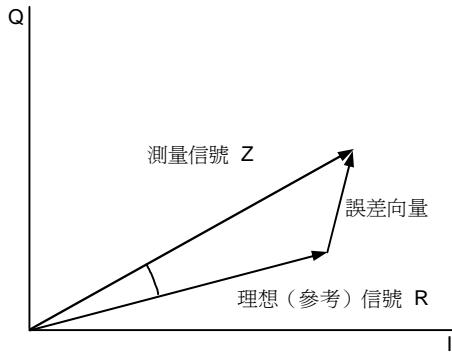


圖 1 調制精度

可以看出，測量信號在幅度和相位方面均不同於理想信號。完全確定不變的信號惡化只是使信號偏離了其理想點。但在存在碼間串擾和雜訊的情況下，重複測量結果明顯地顯示出測量信號圍繞理想信號進行隨機變化，我們將這種隨機變化現象定義為圍繞理想信號星座圖點的“誤差雲”。

從數量上講，EVM 是經理想信號幅度歸一化的誤差向量幅度的統計估算值。對於一個特定 symbol，EVM 在數學上定義為：

$$EVM = \sqrt{\left[ \frac{\sum_{k=1}^M \|Z(k) - R(k)\|^2}{\sum_{k=1}^M \|R(k)\|^2} \right]}$$

其中，Z 是可能需要時差和頻差校準的測試信號；R 為理想或參考信號，是要測量信號的理想形式；M 為測量樣本數；k 為樣本序號。

通過對大量的抽樣 symbol 進行平均計算，EVM 適用於所有特定調製模式的 symbol。這樣，單一的 EVM 值就可以反映出總體信號質量。根據定義，EVM 始終為小於等於 1 的正數。分別用分貝與百分比表達 EVM，則如下式所示：

$$EVM_{dB} = 20 * \log_{10}(EVM)$$

與

$$EVM\% = 100 * EVM .$$

比如， $-25\text{dB}$  的  $EVM_{\text{dB}}$  值等同於約  $5.6\%$  的  $EVM\%$ 。信號品質越好， $EVM$  值越低：相比不良信號，用分貝表達一個高品質發射信號的  $EVM$  將是一個絕對值大的負數；而用百分比表達的一個好的發射信號的  $EVM$  將是一個小於不良信號的  $EVM$  的百分數。

802.11/a/b/g 標準採用  $EVM$  來描述發射器的總調製精度，並給出如何測量 802.11b 和 802.11g 的直接序列擴頻信號以及 802.11a/g 的 OFDM 信號  $EVM$  的綜合方法。比如，802.11a/g 標準採用 BPSK、QPSK、16-QAM 及 64-QAM OFDM 信號。該標準通過在構成  $symbol$  的所有 OFDM 資料副載波(sub-carrier)中以及構成  $frame$  的所有 OFDM  $symbols$  (每個  $frame$  最少有 16 個  $symbols$ ) 中進行信號抽樣，然後用信號星座圖點的平均功率進行歸一化，並求出至少 20  $frames$  的平均值來定義這些信號的  $EVM$ 。這樣，就可以確定各特定 802.11a/b/g 模式的單一  $EVM$  值。

作為總調製精度的測量指標， $EVM$  反映了許多不同的信號失真。對於多數調製模式而言，接收具有特定  $EVM$  的失真信號就等於在有效雜信比 (SNR) 與  $EVM$  值的平方成反比的加成性高斯白雜訊中接收無失真信號：

$$SNR_{\text{AWGN}} \propto 1/[EVM]^2 .$$

這一比例取決於特定的調製模式，影響來自於，如峰值功率與平均功率的比值或處理增益。對於特定的調製模式而言， $SNR_{\text{AWGN}}$  亦即測量的  $EVM$  可與誤碼率或錯包率 (BER 或 PER) 以及總的系統通信性能聯繫起來。相反，實際雜信功率比的測量值沒有捕獲信號失真效應，則測量的  $SNR_{\text{power}}$  值也就不必用作 BER 或 PER 性能的指標。

對於採用低階調製類型的 802.11b 來說，標準允許相對較高的  $EVM$  值，而對於採用高階調製類型的 802.11a/g 來說，則規定了更嚴格的 (較低的)  $EVM$  值。標準也對不同的調製技術規定了不同的  $EVM$  計算方法——對於 802.11b/g 的相對低資料速率直接序列擴頻信號，按峰值計算  $EVM$ ，而對於 802.11a/g 的高資料速率 OFDM 信號，則計算多載波與多  $symbol$  的  $EVM$  平均值。從直觀上講，發射的  $EVM$  必須足夠小，以使失真信號不能靠近星座圖的判定邊界，特別是在存在加性雜訊以及有其他通道和接收機影響的情況下。最高資料速率的 802.11a/g 採用高階調製技術，因此更容易受到發射信號減損的影響——給定的  $EVM$  值對 16-或 64-QAM 信號的影響程度將超過 QPSK 或 CCK 信號，因為它們的判決區域更小。

## 典型的發射器減損(*Impairments*)

在大多數 802.11a/b/g 的應用中，WLAN 基帶處理器都會對信號進行調製，在片內或片外的數模轉換之後，提供 I(同相)與 Q (正交) 的類比輸出信號，由隨後的 RF 部分進行上變頻。WLAN 基帶處理器的操作通常不是造成發射信號減損的根源；相反，減損主要是由於經由 PCB 設備和 RF 電路的信號通道的類比變化造成的。元件變化、PCB 印刷線路佈局缺陷、晶體振盪器與頻率合成器的不穩定性、功率放大器的失真以及寄生信號的存在都會促使發射信號的惡化。

按以上闡述，EVM 能表達多數不同的信號失真效應。較差的 EVM 測量結果本身就說明了問題，特別是在與其他參數的測量結果組合使用時，可有助於確定下述發射信號減損：

- I/Q 失衡（幅度、相位、群延遲）
- 相位雜訊
- 寄生信號與瞬態效應
- 信號壓縮效應

### I/Q 失衡 (*I/Q Mismatch*)

I 與 Q 之間的失衡或失配會直接影響調變精度。沿 PCB 印刷線路上的 I 與 Q 信號通道產生的寄生電容與寄生電感的差異會導致這種 I/Q 失衡，就像元件變化甚至基帶與 RF IC 設計變更造成的 I/Q 失衡那樣。

圖 2 所示為在 I 與 Q 通道之間存在 2% 幅度與 2° 相位混合失配條件下 802.11a/g 的 64-QAM OFDM 星座圖。在圖中，64-QAM 信號群組的每個點都顯示得像紅色的雲，測量值來自 48 個中每一個 OFDM 資料副載波(sub-carrier)和眾多 symbol。由於幅度與相位失衡，星座圖看起來有些失真與模糊不清，而不是一些清晰定義的點。在本例中，I/Q 失衡的影響導致了大約 -30dB 的 EVM 值，而該值正好與單獨測量的每個副載波(sub-carrier)的 EVM 值基本相同。

請注意圖中的兩個綠色星座點，這兩個綠色星座點表示 802.11a/g 標準規定的由 BPSK 調製的四個導頻信號。由於調制導頻信號的資料之間存在固定的關係，因此其星座點看起來比資料星座點更清晰，並且提供一種定性評估 I/Q 失衡影響的簡單方法。I/Q 幅度失配使導頻信號大都散佈在 I 軸，而 I/Q 相位失配則使導頻信號大都散佈在 Q 軸。在圖 2 中，導頻信號散佈在相對於 I 與 Q 軸傾斜的直線上，這表明同時存在幅度與相位失衡。

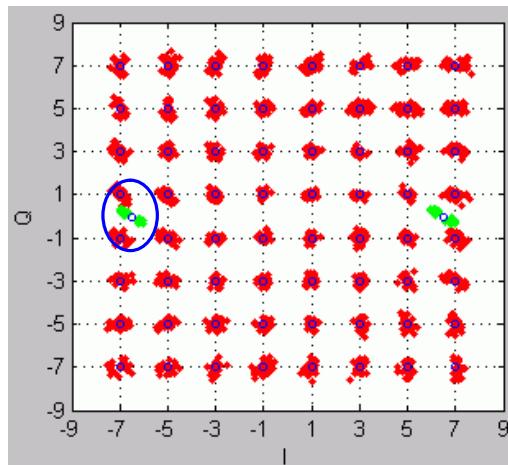


圖 2 帶有 2% 幅度與 2° 相位失衡的 802.11a/g 64-QAM OFDM 星座圖

除了幅度與相位失衡之外，I 與 0 信號之間的不同的群延遲會對調製精度帶來不良影響。這種失衡通常與基帶 I 與 0 信號的 PCB 佈局以及不同的印刷線路長度有關。星座圖點將再次顯示出失真，但群延遲差異的影響取決於頻率，對每個 OFDM 副載波(sub-carrier)的影響也不同。比如 IQview 提供的信號分析軟體可計算每個不同副載波(sub-carrier)的 EVM。圖 3 中的綠線表明 EVM 值與副載波(sub-carrier)序數的關係，曲線清晰地顯示出 EVM 值與頻率的關係，這表明一個約 1ns 的群延遲差異對信號的影響。

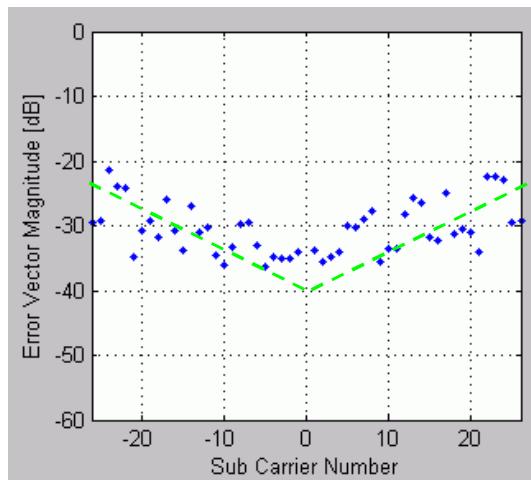


圖 3 64-QPSK OFDM 信號的群延遲失衡為 ~1 ns 時的 EVM 與副載波(sub-carrier)關係曲線

### 相位雜訊 (Phase Noise)

當信號與本振 (LO) 信號混合從基帶頻率轉換為 RF 頻率時，相位雜訊會進入到信號中。LO 相位雜訊分配反映了頻率合成器使用的參考晶體振盪器的頻率穩定性、合成器鎖相環 (PLL) 使用的壓控振盪器 (VCO) 的頻率穩定性以及頻率合成器使用的 PLL 的環路帶寬。PLL 的作用對於晶體振盪器來說是低通濾波器，對於自激 VCO 來說是高通濾波器。

根據 PLL 的環路帶寬，理想的合成器輸出相位雜訊頻譜密度由以下因素決定：低頻偏移下較好的晶體振盪器長期穩定性；高頻偏移下較好的 VCO 短期穩定性；以及帶內 PLL 自身鑑相器與分頻器所產生的帶內雜訊為基底。

相位雜訊影響調製精度，與其他減損一樣，也會影響到 EVM。如圖 4 所示，在信號星座圖中，相位雜訊的影響是明顯的，比如星座點周圍的圓形信號點失真。在本例中，最終的 EVM 約為  $-25\text{dB}$ 。資料速率較低時，symbol 時間內的積分消除了短期頻率不穩定性的最壞影響，剩下的只有晶體振盪器的長期穩定性的影響。對於 802.11a/g 在最高資料速率下使用的 OFDM 信號，通過在接收機上使用導頻信號跟蹤信號的相位變化，可以稍微減輕相位雜訊的影響。只要相位變化相對於 symbol 速率來說比較慢，就可以對信號的相位變化進行跟蹤與補償。

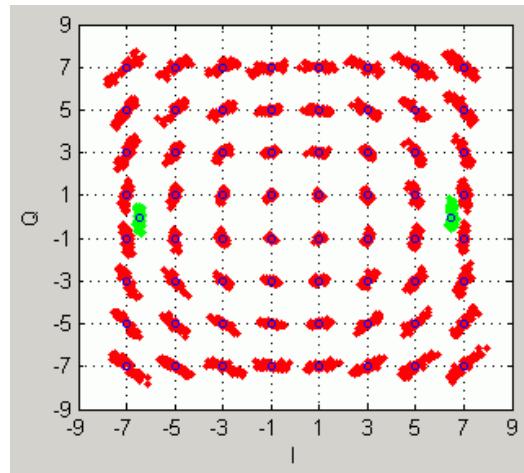


圖 4 帶有  $3^\circ \text{ rms}$  相位雜訊的 802.11a/g 64-QAM OFDM 群組

應該去處過多的相位雜訊，過多的相位雜訊可能是出現各種設備問題的徵兆，比如晶體振盪器的雜訊、電源雜訊產生的寄生信號或者電路板遮罩不充分、送入頻率合成器或混頻器中的參考晶體振盪器信號電平不正確或者其他設計或生產問題。

將過多的相位雜訊確定為不良 EVM 成因的最佳途徑就是檢查相位雜訊的能譜密度 (PSD)。某些具有 VSA 能力的單機測試器如 LitePoint's IQview 可以對 WLAN 調製信號進行相位雜訊分析。比如，圖 5 所示為因低頻雜訊洩漏到合成器參考信號中而遭到破壞的信號的相位雜訊能譜密度，紅線表示正常的預期能譜密度。

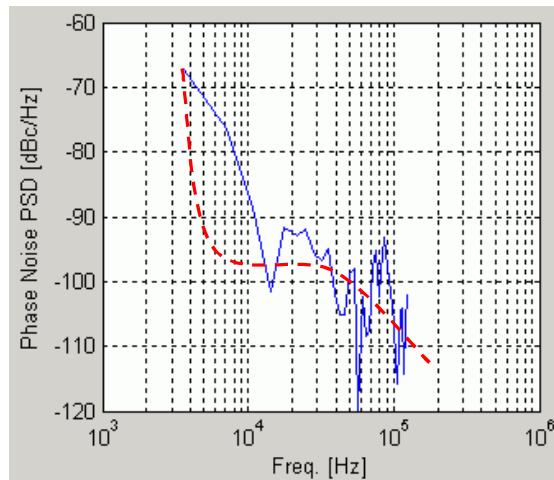


圖 5 已混入惡化 LO 信號的 64-QAM OFDM 信號的相位雜訊 PSD

### 寄生信號與瞬態效應

在 802.11a/b/g 設計適合於大量生產之前，實現過程不允許存在會對發射器性能產生不良影響的寄生信號與瞬態效應。如前所述，參考晶體振盪器與頻率合成器 VCO 對電源雜訊、DC-DC 轉換器開關雜訊或未遮罩信號特別敏感。這種寄生信號與晶體振盪器或 VCO 之間的耦合會引入相位雜訊，從而降低發射信號的質量。

要隔離或確定會降低發射機性能的瞬態效應是非常困難的。比如，RF 功率放大器在有 WLAN 脈衝通信時打開，而沒有通信時關閉以最大限度降低功耗。當功率放大器在脈衝來臨之前啟動時，功率放大器將產生較大的電流並可能導致電源產生電壓降或引起接地電流。除非電路板的其他部分完全消除這些影響，否則它們會影響晶體振盪器或頻率合成器，引入瞬態頻率誤差與相位雜訊而暫態降低發射信號的質量。

功率放大器通電所產生的這種頻率推移以及振盪器對電源電壓的敏感性會因其持續時間而帶來不同的影響。如圖 6 所示，合成器的 VCO 的頻率推移通常可以很快地穩定下來，幾微秒內就能恢復，而晶體振盪器的頻率推移則穩定緩慢，要幾十微秒才能恢復。

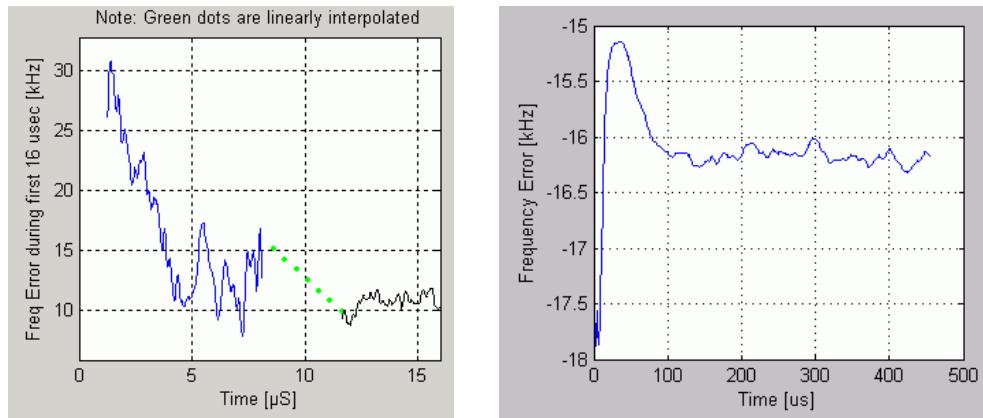


圖 6 (L) 快速穩定 VCO 頻率推移導致的頻率誤差；  
(R) 緩慢穩定晶體振盪器頻率推移導致的頻率誤差

802.11b/g 標準需要首先發射短或長同步碼(preamble)，短同步碼(short preamble)的持續時間為  $72\mu\text{s}$ ，長同步碼(long preamble)的持續時間為  $144\mu\text{s}$ 。與此相對，802.11a/g 標準則首先需要先發射 10 個重複的總計  $8\mu\text{s}$  的短訓練序列(short training sequence)，後跟 2 個重複的總計另外  $8\mu\text{s}$  的長訓練序列(long training sequence)。緩慢穩定的瞬態頻率誤差會破壞 802.11a/g 信號，甚至對 802.11b/g 支援的低資料速率產生不良影響。如果一個特殊的接收機設計對發射頻率的估算是建立在前幾微秒同步碼(preamble)的基礎上的話，快速穩定的發射頻率誤差也會影響性能。

但要瞭解是否發生這種瞬態回應是很困難的，在設計過程的所有階段檢查信號的頻率誤差與時間關係的曲線時也許並未發生瞬態回應。某些測試儀器如 IQview 允許根據短訓練序列、長訓練序列或全數據包的頻率估算量計算 OFDM 信號的 EVM (如果最終的 EVM 值變化較大)，因而這也是發射頻率可能受到瞬態誤差影響的線索。

### 信號飽和的影響

要將功耗降至最低並以最高的效率進行操作，RF 功率放大器應在接近其飽和點的理想狀態下進行操作。但除非功率放大器的平均輸出功率減小（“偏離滿功率”），否則不同的調製類型仍會將放大器推入其飽和區域並使信號飽和。與放大器飽和相關的非線性隨後會導致諧波失真、互調失真與頻譜再生、交叉調製、SNR 變差以及調製不準確。信號會飽和的程度反映了功耗與信號質量之間的折衷，也直接影響了產品成本與質量。如果飽和程度過大，則會降低發射信號質量，如果飽和程度過小，則可能需要更昂貴的 RF 功率放大器以達到所需的平均輸出功率。

802.11b/g 採用的單載波 M 維移相鍵控 (M-ary PSK) 信號通常可在壓縮的狀態下進行操作，直到頻譜再生引入鄰通道干擾或超出了要求的頻譜範本。利用頻譜分析儀測量 RF 輸出頻譜可以快速地揭示這種效應。對於這種信號，壓縮通常不會影響 EVM 到超過標準規定值或顯著影響 BER 性能的程度。

但 802.11a/g 採用的多載波 OFDM 信號通常需要放大器更大程度地偏離滿功率，因為它們之間的峰值-平均功率比 (PAPR) 很高。功率放大器的操作點必須減少以確保 OFDM

信號的輸入電壓漂移不會使放大器進入飽和區域引起互調與頻譜再生效應，以免對 OFDM 信號的 52 個副載波(sub-carrier)帶來不良影響。

圖 7 所示為 802.11a/g 64-QAM OFDM 信號失真的情況下單獨壓縮的影響，最終的 EVM 值約為  $-24.8\text{dB}$ 。注意，802.11a/g 標準規定：低於  $25\text{dB}$  的發射器 EVM 支援  $54\text{Mbps}$ ，低於  $-22\text{dB}$  的發射器 EVM 支援  $48\text{Mbps}$ 。從圖中可以看出，群組點已蔓延到可能產生判決誤差的區域，特別是存在加性通道雜訊以及任何發射機或接收機性能惡化的情況下。

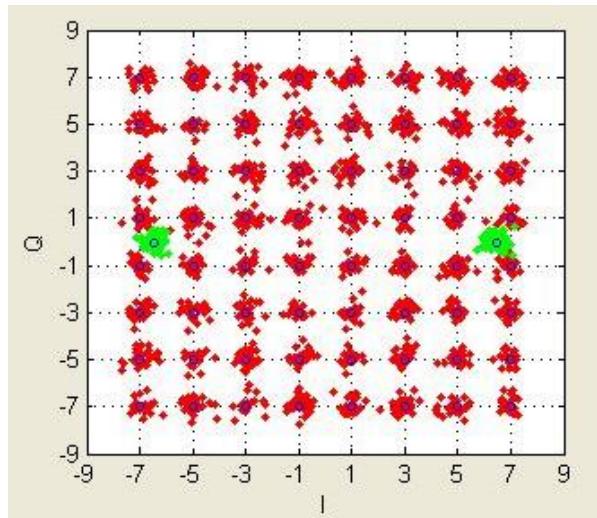


圖 7 經過功率放大器壓縮後的 802.11a/g 64-QAM OFDM 群組

利用 IQview 提供的信號分析軟體計算發射輸出功率的互補累積分佈函數 (CCDF) 可以很容易地評估壓縮程度。在對測量信號進行統計處理之後，CCDF 曲線提供信號處於或高於指定功率電平 (用相對於平均功率的  $\text{dB}$  表示) 的概率估算值。圖 8 所示為圖 7 信號的 CCDF 曲線，紅線表示未壓縮信號的理想 CCDF。從圖中可以看出，未壓縮信號在 1% 的時間內至少超過 64-QAM OFDM 平均功率電平  $\sim 7\text{dB}$ ，而測量的壓縮信號則在 1% 的時間內至少超過 64-QAM OFDM 平均功率電平  $\sim -5.5\text{dB}$ 。換句話說，由於壓縮信號反映了放大器正在飽和區域進行操作，因此壓縮信號不能達到與未壓縮信號相同的峰值與平均偏差比。

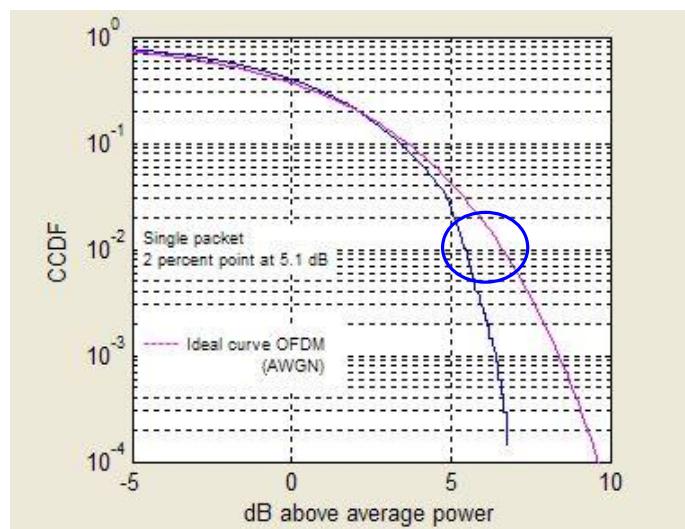


圖 8 圖 5 所示 64-QAM OFDM 信號的功率 CCDF

但為了提升功耗，還需要進行某種程度的壓縮。假設調製不準確度的所有其他原因已得到緩和，則可以校準發射功率電平以使測量的 EVM 值處在允許的容值範圍內。這基本上是要執行的最後一個生產線校準步驟。因此，可快速測量所有 802.11a/b/g 信號 EVM 的單儀器測試設備如 IQview 就變得非常有用，特別是當將其用作 PC 控制的生產測試套件的組成部分時，可在基帶晶片組和 RF 部分自動設定合適的控制和電平以將其輸出功率校準為最佳值。

## 結論

VSA、頻譜分析儀、功率表的能力與先進的信號分析軟體組合可以簡化 802.11a/b/g WLAN 發射器的最佳化過程。無論是用作設計過程的組成部分，還是在生產線使用，在時域、頻域以及調製域中快速評估 EVM 與其他測量指標的能力可縮短設計週期，提高生產效益，並直接改善總體產品品質與高產出率。本文討論了幾個常見的發射器性能偏差因素並彙總在表 1 中，說明如何利用當今的複雜測試儀器識別並解決它們。

發射器減損	主要原因	測量性能
I/Q 增益失衡	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB 印刷線路上的寄生電容與電感的差異</li> <li>元件差異</li> <li>基帶或 RF IC 設計變更</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>失真的星座圖點與惡化（增大的）EVM</li> <li>802.11a/g OFDM 導頻信號星座圖點基本沿 I 軸離散</li> </ul>
I/Q 相位失衡	<ul style="list-style-type: none"> <li>PCB 印刷線路上的寄生電容與電感的差異</li> <li>元件差異</li> <li>基帶或 RF IC 設計變更</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>失真的星座圖點與惡化的（增大的）EVM</li> <li>802.11a/g OFDM 導頻信號星座圖點基本上沿 Q 軸離散</li> </ul>
I/Q 群延遲失衡	I 與 Q 信號的 PCB 印刷線路長度不同	<ul style="list-style-type: none"> <li>失真的星座圖點與惡化的（增大的）EVM</li> <li>EVM 作為 802.11a/g OFDM 副載波 (subcarrier) 的函數，顯示出對頻率的依賴性（相對於副載波 (subcarrier) 序數為 V 形）</li> </ul>
相位雜訊	<ul style="list-style-type: none"> <li>晶體振盪器雜訊</li> <li>信號電頻不正確 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 晶體振盪器輸入到頻率合成器</li> <li>- 輸入到混頻器</li> </ul> </li> <li>寄生信號與晶體振盪器或 VCO 之間耦合 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 電源雜訊</li> <li>- DC-DC 轉換器開關雜訊</li> <li>- PCB 遮罩不充分</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>旋轉的星座圖點與惡化的（增大的）EVM</li> <li>相位雜訊頻譜密度偏離標稱值</li> </ul>
瞬態效應	例如，功率放大器通電產生的頻率推移	<ul style="list-style-type: none"> <li>失真的星座圖點與惡化的（增大的）EVM</li> <li>如果頻率估算量以短訓練序列、長訓練序列或全數據包為基礎，EVM 將會發生變化</li> <li>頻率或相位誤差將隨時間變化</li> </ul>
壓縮效應	有意或無意地使功率放大器在過高的平均輸出功率下操作	<ul style="list-style-type: none"> <li>失真的星座圖點與惡化的（增大的）EVM</li> <li>RF 輸出頻譜可以顯示出是否頻譜再生超出頻譜範本 CCDF 將揭示壓縮度</li> <li>排除 EVM 惡化的所有其他原因後，使用 EVM 目標值將輸出功率校準為最佳壓縮電平</li> </ul>

表 1 發射器性能惡化及其原因和相關的測量性能

*Christian Olgaard* 是工程部副總裁和 *LitePoint* 公司 (San Jose, CA) 的共同創立者，先進的無線測試解決方案的創建者。*Dr. Olgaard* 在 CMOS 與 BiCMOS 技術應用於 RF IC 及混合模式系統方面具有豐富的經驗。*Dr. Olgaard* 具有丹麥技術大學的電子工程博士學位，擁有 6 項有關無線系統和電路的專利，並有其他 9 項無線系統專利正在申請。

**有關 IQview 量測與應用 請來電 筑波科技 03-6561377, [www.acesolution.com.tw](http://www.acesolution.com.tw)**

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训推荐课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/tuijian/>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材；旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习，能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### 手机天线设计培训视频课程

该套课程全面讲授了当前手机天线相关设计技术，内容涵盖了早期的外置螺旋手机天线设计，最常用的几种手机内置天线类型——如 monopole 天线、PIFA 天线、Loop 天线和 FICA 天线的设计，以及当前高端智能手机中较常用的金属边框和全金属外壳手机天线的设计，通过该套课程的学习，可以帮助您快速、全面、系统地学习、了解和掌握各种类型的手机天线设计，以及天线及其匹配电路的设计和调试…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/antenna/133.html>



### WiFi 和蓝牙天线设计培训课程

该套课程是李明洋老师应邀给惠普 (HP) 公司工程师讲授的 3 天员工内训课程录像，课程内容是李明洋老师十多年工作经验积累和总结，主要讲解了 WiFi 天线设计、HFSS 天线设计软件的使用，匹配电路设计调试、矢量网络分析仪的使用操作、WiFi 射频电路和 PCB Layout 知识，以及 EMC 问题的分析解决思路等内容。对于正在从事射频设计和天线设计领域工作的您，绝对值得拥有和学习！…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/antenna/134.html>



## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出, 是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装, 所有课程都由经验丰富的专家授课, 视频教学, 可以帮助您从零开始, 全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装, 还可超值赠送 3 个月免费学习答疑…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程, 是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装, 可以帮助您从零开始, 全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装, 更可超值赠送 3 个月免费学习答疑, 随时解答您学习过程中遇到的棘手问题, 让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程, 共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解, 并多结合设计实例, 由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS, 迅速提升个人技术能力, 把 ADS 真正应用到实际研发工作中去, 成为 ADS 设计专家…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>