



系統設計必須提升超越「C層級」以上

作者：Ken Karnofsky, MathWorks 訊號處理應用資深策略師

簡介

每當研發時程和成本縮減時，電子系統研發人員往往必須面臨研發新產品的壓力；這雖然看似是一場艱難的戰役，尤其是計畫延宕及驗證成本持續的增加已變成慣例，但仍有一些研發工程團隊不僅能讓他們計畫時程和成本在掌控中，並且能為他們的設計創造新的元素，這祕訣是什麼呢？

研發人員已充份認知電子系統設計的複雜度不再僅是規模上的問題。相反地，此複雜性是源自於對規格的需求，並能即時與現實市場上的需求連結在一起。電子系統設計已成為跨學門領域，橫跨各項應用及領域，同時整合軟體、數位和類比設計。這些團隊認知到他們需要額外的工具和方法，才能讓工程師整合自己專業領域外的知識，以解決新的複雜設計。

解決逐漸增加複雜度的方法之一，就是將特定的設計任務提升至抽象層級，例如硬體驗證與整合。此由下而上的解決方法進而發展出以C語言為基礎的電子系統層級(ESL)工具，不過由於今日的電子系統層級(ESL)工具並未能有效彌補其與基本工作流程的缺口，以至於工程師仍舊飽受複雜的系統設計之困擾煎熬。

追根究底，這些缺口來自於一個簡單的統計資料：計畫延宕且高額驗證成本的產生之最大主因是太晚才發現研發過程中的規格錯誤。典型的規格無法滿足系統的需求，以致於工程師無法有效評估設計方案並有系統地來測試設計。結果，過多的成本和工程師的時間都耗費在錯誤的規格上，而不是用於創新和創造 IP。

所以，目前已經有愈來愈多的公司逐漸地傾向使用模型化基礎設計(Model-Based Design)來解決上述問題。透過模型化基礎設計，他們可以將現有使用之演算法開發和系統模擬的工具以及後端實現設計的工具連結起來，進而創造一個工作流程，橋接不同的開發設計領域，使工作流程上的設計缺陷能提早被修正，因而降低驗證時間，最後提高創新比率。

一體化之工作流程

抽象化的系統模型通常以圖型化表示，並以高階 textual 語法呈現，諸如 MATLAB，已被廣泛使用來進行快速概念探討及演算法開發。透過模型化基礎設計，該系統模型可在真正投入硬體原型化或軟體實現之前，用來驗證設計概念的可行性。隨後，此模型在整個開發過程中扮演多重角色，包括做為可執行規格之參考(reference)、

最專業的MATLAB技術支援及服務團隊—鈦思科技

 鈦思科技
www.terasoft.com.tw

 MathWorks
Accelerating the pace of engineering and science

■ 台北總公司 Head Office

115 台北市忠孝東路六段21號8樓之3
8F-3, No.21, Sec. 6, Jhongsiao E. Rd.,
Taipei 115 Taiwan, R.O.C
Tel : (02)2788-9300
Fax : (02)2788-9308

■ 新竹 Hsinchu Office

302 竹北市復興一街 251 號 13 樓之 6
13F-6, No.251, Fuxing 1st St., Jhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan, R.O.C
Tel : (03) 550-5590
Fax : (03) 550-5591

■ 高雄 Kaohsiung Office

807 高雄市三民區民族一路80號6樓之一830室
6F-1, No.80, Minzu 1st Rd., Sanmin Dist.,
Kaohsiung City 807, Taiwan, R.O.C
Tel : (07) 3986040
Fax : (07) 3980752

產品資訊網址：www.terasoft.com.tw

產品資訊信箱：Info@terasoft.com.tw

技術支援信箱：support@terasoft.com.tw

做為整合與驗證之虛擬環境、可產生嵌入式 C 程式碼(Embedded C code)並與 RTL 整合。

在以 C 為基礎的設計方法中，模型化基礎設計有兩種不同應用可展現其優勢。首先，從 MATLAB 程式自動產生程式碼，可取代傳統定點設計和手寫 C 程式碼的工作。其次，其多領域(multi-domain)之模型能讓系統架構進行高速模擬，如混合訊號設計，及訊號交互作用演算法分析、數位硬體和類比電路。在上述兩個範例中，演算法開發者和系統架構者可以描述設計決策對系統行為之影響、進行更快速之反覆設計(iterate design)、並進而在早期階段找出整合問題及確認設計流程。

圖一表示模型化基礎設計，如何利用系統模型，同時支援實現及驗證之工作流程。這項方法讓設計、測試、演算法模擬和多領域系統等流程，在進行硬體或軟體實現之前，均整合在完整的單一環境中。

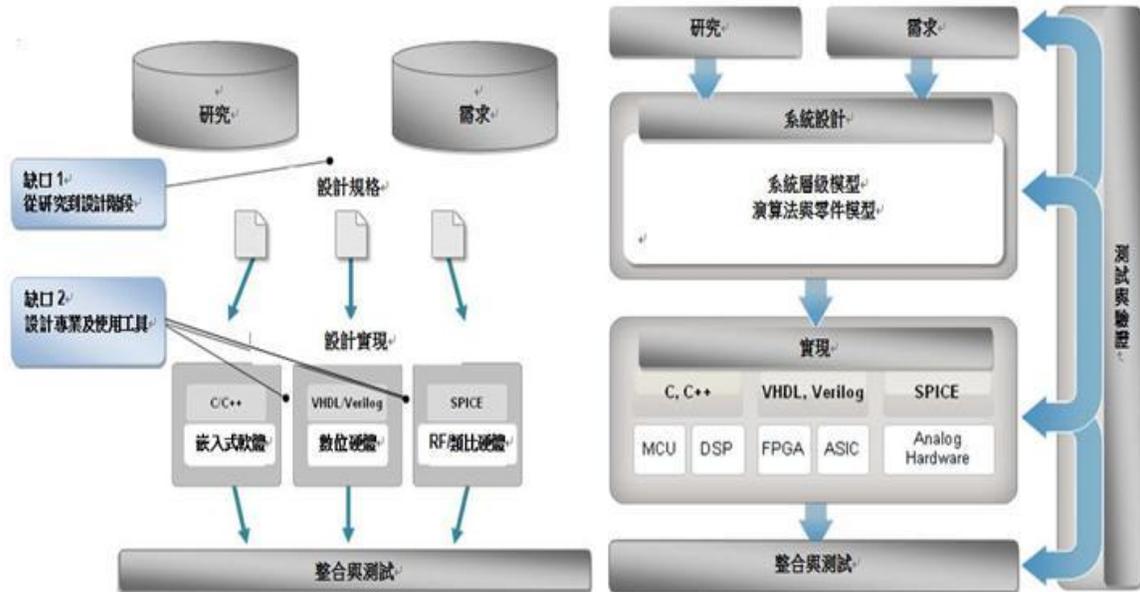


圖 1，傳統設計流程(左)與模型化基礎設計比較圖(右)，在傳統設計流程中，電子系統開發，動輒受制於工程領域專長及使用工具箱不同而出現設計缺口；模型化基礎設計則提供一整合系統設計流程，能連結各個工程領域及團隊，加速設計週期並降低驗證成本。

自動轉換 MATLAB 到 C 程式碼

對於 DSP 數位訊號處理和其他以演算法為中心的設計，MATLAB 已成為開發者最受歡迎的工具，諸多優點不勝枚舉；究其主因，是其提供了高階程式語言、易於使用與探索及彈性的環境。同樣地，多數軟體工程師則普遍使用 C 程式語言，應



用於嵌入式處理器及 DSP 上；然而，將 MATLAB 浮點程式碼轉換為定點 C 程式碼付諸實現，通常是採取人工編撰 C 程式碼的作業方式，因而增添了實現驗證的難度。

將 MATLAB 程式碼編譯為 C 程式碼僅涉及低階的資訊，例如，資料類型分配 (data-type assignments)、記憶體配置，及運算量 (computational load) 與記憶體的最佳化。但其中必須確保 MATLAB 和 C 所產生的程式碼是一致相符的。通常大部份時間都花在程式碼產生過程以及手寫 C 程式碼的驗證上，而這也將會為系統帶來額外的設計誤差 (errors)；此外，在比較兩種程式碼是否相符前，還包含如測試、驗證、及嘗試錯誤法間相互循環等流程工作。

使用 MATLAB 的優勢，在於能從 MATLAB 程式碼直接產生 C 程式碼且與設計反覆 (iteration) 一致，該環境並具備強大之互動性及視覺化功能。許多 MATLAB 程式碼中的重要特色都可以自動轉為 C 程式碼，包括：矩陣基礎式 (matrix-based) 之運算、物件導向的多型、多種規模的資料設定和定點數值表示法等，開發者將能更專注於改善其設計，而非僅僅維護不同的來源程式碼及撰寫各式語言程式碼而已。

例如，以 Kalman 濾波器演算法為例，它被廣泛使用在追蹤應用上如 GPS 和瀏覽器等定位服務。圖二表示以 MATLAB 程式碼撰寫的 Kalman 濾波器演算法。利用 MATLAB 語法 "emlc"，這 17 行之演算法均可自動轉換為 C 程式碼。

若利用 C 程式碼撰寫，以 for-loops 迴圈執行矩陣之標量運算 (scalar computations)，則需要 144 行程式碼。轉碼過程中，由於涵蓋了所有演算法變數的資料型態，設計人員因而保有彈性以進行開發，並針對不同的處理器，發展多種版本之演算法；所生成的 C 程式碼不僅可讀，且保留如原始 MATLAB 程式碼相同的命令，並可安置於所有演算法相對應的程式行列中。

最專業的 MATLAB 技術支援及服務團隊—鈦思科技

 鈦思科技
www.terasoft.com.tw

 MathWorks
Accelerating the pace of engineering and science

■ 台北總公司 Head Office

115 台北市忠孝東路六段 21 號 8 樓之 3
8F-3, No.21, Sec. 6, Jhongsiao E. Rd.,
Taipei 115 Taiwan, R.O.C
Tel : (02)2788-9300
Fax : (02)2788-9308

■ 新竹 Hsinchu Office

302 竹北市復興一街 251 號 13 樓之 6
13F-6, No.251, Fuxing 1st St., Jhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan, R.O.C
Tel : (03) 550-5590
Fax : (03) 550-5591

■ 高雄 Kaohsiung Office

807 高雄市三民區民族一路 80 號 6 樓之一 830 室
6F-1, No.80, Minzu 1st Rd., Sanmin Dist.,
Kaohsiung City 807, Taiwan, R.O.C
Tel : (07) 3986040
Fax : (07) 3980752

產品資訊網址 : www.terasoft.com.tw

產品資訊信箱 : Info@terasoft.com.tw

技術支援信箱 : support@terasoft.com.tw

```

1  function ye = kalmanf(A,B,C,Q,R,u,t,yv) %#eml
2  -   P = B*Q*B';           % Initial error covariance
3  -   x = zeros(size(B));   % State initial condition
4  -   ye = zeros(length(t),1);
5  -   errcov = zeros(length(t),1);
6  -   for i=1:length(t)
7  -       % Measurement update
8  -       Mn = P*C'/(C*P*C'+R);
9  -       x = x + Mn*(yv(i)-C*x); % x[n|n]
10 -       P = (eye(size(A))-Mn*C)*P; % P[n|n]
11 -       % Compute output
12 -       ye(i) = C*x;
13 -       errcov(i) = C*P*C';
14 -       % Time update
15 -       x = A*x + B*u(i); % x[n+1|n]
16 -       P = A*P*A' + B*Q*B'; % P[n+1|n]
17 -   end

```

圖2，利用17行MATLAB程式碼呈現Kalman 濾波器演算法

圖三 藍線表示以 Kalman 濾波器演算法之輸出，紅線代表被觀察訊號的追蹤效果相當不錯，然而其追蹤的成效是否顯著呢?不同於手寫 C 程式碼，從 MATLAB 自動產生的程式碼，能讓開發者在單一完整的環境中分析結果，進行反覆設計以符合系統需求。由於所產生的 C 程式碼與 MATLAB 程式碼完全相同，因此能夠避免因為來源演算法不同所導致的實現差異。

■ 台北總公司 Head Office

115 台北市忠孝東路六段21號8樓之3
8F-3, No.21, Sec. 6, Jhongsiao E. Rd.,
Taipei 115 Taiwan, R.O.C
Tel : (02)2788-9300
Fax : (02)2788-9308

■ 新竹 Hsinchu Office

302 竹北市復興一街 251 號 13 樓之 6
13F-6, No.251, Fuxing 1st St., Jhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan, R.O.C
Tel : (03) 550-5590
Fax : (03) 550-5591

■ 高雄 Kaohsiung Office

807 高雄市三民區民族一路80號6樓之一830室
6F-1, No.80, Minzu 1st Rd., Sanmin Dist.,
Kaohsiung City 807, Taiwan, R.O.C
Tel : (07) 3986040
Fax : (07) 3980752

產品資訊網址 : www.terasoft.com.tw

產品資訊信箱 : Info@terasoft.com.tw

技術支援信箱 : support@terasoft.com.tw

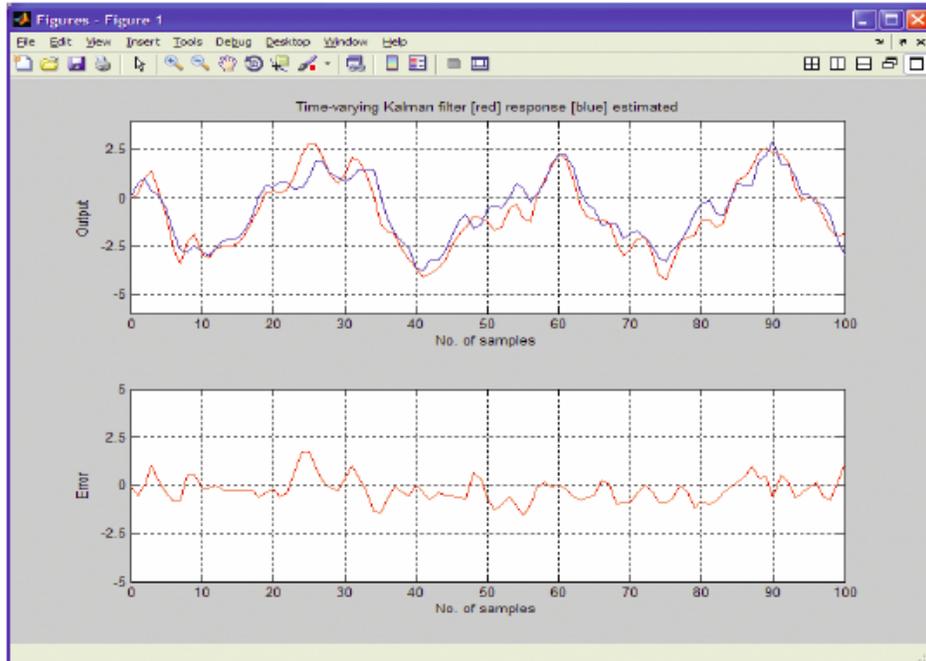


圖3. 將Kalman濾波器演算法的追蹤結果在MATLAB中進行視覺化。保留MATLAB設計內容，取代C程式碼，以維持快速分析和反覆設計之便利性。

下一個例子描述了模型化基礎設計，運用於複雜系統如以正交頻分複用技術 (OFDM) 基礎和多輸入多輸出(MIMO)基礎的長期演進技術(LTE)或 WiMAX 的無線裝置等設計，也具有類似的優勢，這類使用傳統方法設計之混合訊號任務，相當具有挑戰性。電路層級(Circuit-level)射頻的類比與數位訊號，無法於更高之行為抽象層級互相溝通良好，且難以檢視如位於系統行為情境下之射頻功率放大器(RF amplifier)等元件的動態行為。該議題之所以重要，原因是射頻/類比部份的電路性能(performance)與數位部份的性能彼此緊密耦合，這正是難以預測之處。

因為無法觀察到系統層級間的互動，再加上電路層級工具的限制，導至模擬次數降低，且在設計專案有限的時間制軸下，所能夠探索出來的設計變數也變得很有限。其結果使得工程師只能取捨(tradeoffs) 次佳的成效(performance)、領域(area)和效能(power)，而這樣可能會導致較差的設計品質、延長了研發時間並支出更高的成本。反觀，模型化基礎設計則能在單一旦多領域的環境中，提供支援類比和數位元件系統層級的整合，且具備更快速、成本效益的優點，如圖四所示。

■ 台北總公司 Head Office

115 台北市忠孝東路六段21號8樓之3
8F-3, No.21, Sec. 6, Jhongsiao E. Rd.,
Taipei 115 Taiwan, R.O.C
Tel : (02)2788-9300
Fax : (02)2788-9308

■ 新竹 Hsinchu Office

302 竹北市復興一街 251 號 13 樓之 6
13F-6, No.251, Fuxing 1st St., Jhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan, R.O.C
Tel : (03) 550-5590
Fax : (03) 550-5591

■ 高雄 Kaohsiung Office

807 高雄市三民區民族一路80號6樓之一-830室
6F-1, No.80, Minzu 1st Rd., Sanmin Dist.,
Kaohsiung City 807, Taiwan, R.O.C
Tel : (07) 3986040
Fax : (07) 3980752

產品資訊網址 : www.terasoft.com.tw

產品資訊信箱 : Info@terasoft.com.tw

技術支援信箱 : support@terasoft.com.tw

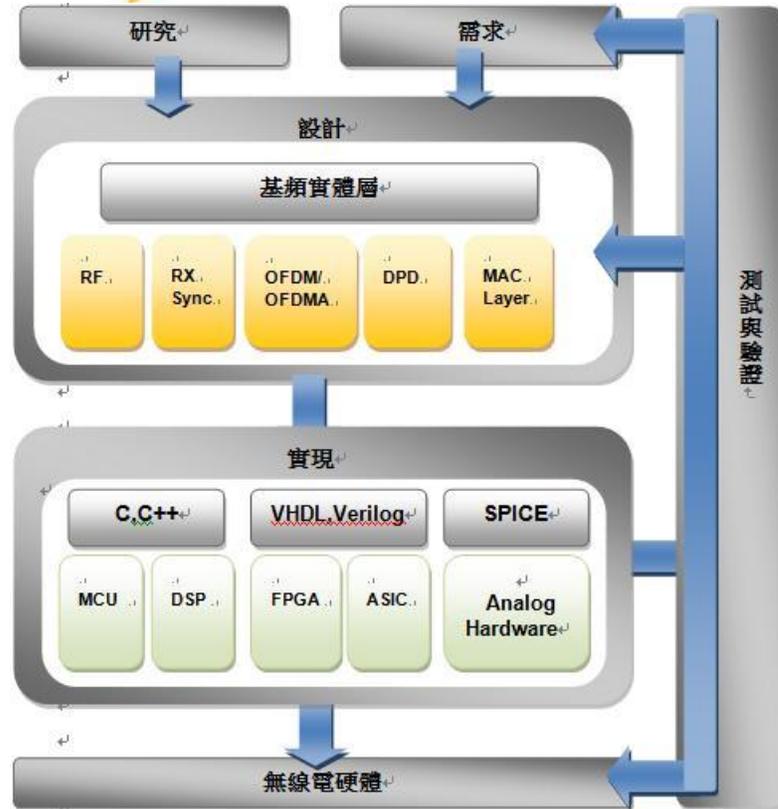


圖 4，模型化基礎設計的工作流程，便於進行多領域、高階無線裝置的設計建模，包含類比、數位和軟體元件。

圖五利用 MATLAB & Simulink 建立基於 IEEE 802.16-2004 OFDM 物理連結 (physical link) 之無線通訊系統模型，該模型包含基頻(baseband)、射頻傳輸器，以及基頻及射頻接受器，該發送器為一高功率的放大器，使用 Simulink 模型，則可設計為 DPD 放大器之高階行為模型。

由於這些系統使用複雜高資料速率和高效率頻譜(spectral efficiency)的數位波形，並要求高的峰值因數(PAPR)。一般而言，在傳送端設計的功率放大器必須在相對線性的模式中執行，以符合頻譜放射規格的標準；而因為高的峰值因數，傳送端的功率放大器必須回退到峰值效率的執行點。為能回復原有的效率，且符合頻譜放射規格標準，於是在傳送端嵌入了數位無線電波功率放大器(DPD, digital predistortion)。

由於 DPD 演算法能補償放大器的非線性效果，模型因而有能力來衡量系統層級上關鍵的矩陣，包含量測錯誤向量(error vector magnitude, EVM)、相鄰通道洩漏比

最專業的MATLAB技術支援及服務團隊—鈦思科技

TeraSoft 鈦思科技
www.terasoft.com.tw

MathWorks
Accelerating the pace of engineering and science

■ 台北總公司 Head Office

115 台北市忠孝東路六段21號8樓之3
8F-3, No.21, Sec. 6, Jhongsiao E. Rd.,
Taipei 115 Taiwan, R.O.C
Tel : (02)2788-9300
Fax : (02)2788-9308

■ 新竹 Hsinchu Office

302 竹北市復興一街 251 號 13 樓之 6
13F-6, No.251, Fuxing 1st St., Jhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan, R.O.C
Tel : (03) 550-5590
Fax : (03) 550-5591

■ 高雄 Kaohsiung Office

807 高雄市三民區民族一路80號6樓之一830室
6F-1, No.80, Minzu 1st Rd., Sanmin Dist.,
Kaohsiung City 807, Taiwan, R.O.C
Tel : (07) 3986040
Fax : (07) 3980752

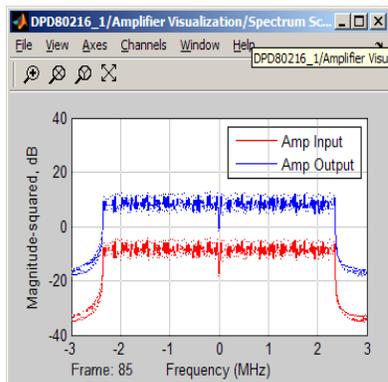
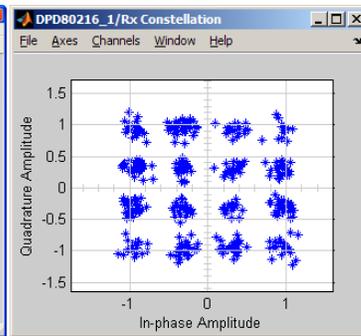
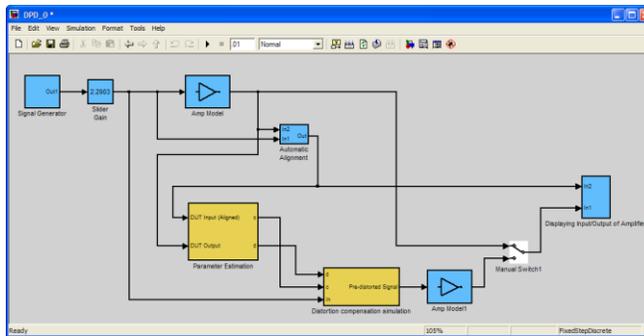
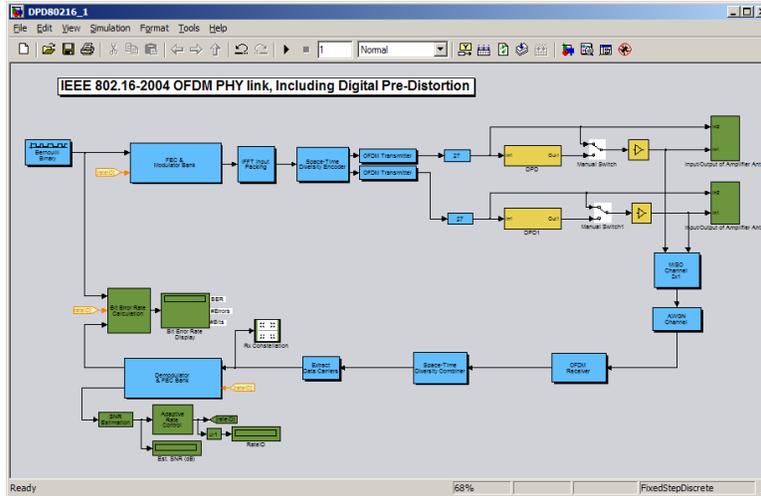
產品資訊網址 : www.terasoft.com.tw

產品資訊信箱 : Info@terasoft.com.tw

技術支援信箱 : support@terasoft.com.tw



(adjacent channel leakage ratio, ACLR)、位元錯誤率(bit-error rate, BER)及它們對整體系統實現的影響。這能讓設計者在整個無線通訊系統中，於原型和實現階段之前，最佳化射頻功率器的性能；同樣的模型，也可以接在於測試實驗室中的測量設備，藉由真正的功率放大器實際量測到的量測資料，去進一步去驗證 DPD 演算法。



最專業的MATLAB技術支援及服務團隊—鈦思科技

TeraSoft 鈦思科技
www.terasoft.com.tw

MathWorks
Accelerating the pace of engineering and science

■ 台北總公司 Head Office

115 台北市忠孝東路六段21號8樓之3
8F-3, No.21, Sec. 6, Jhongsiao E. Rd.,
Taipei 115 Taiwan, R.O.C
Tel : (02)2788-9300
Fax : (02)2788-9308

■ 新竹 Hsinchu Office

302 竹北市復興一街 251 號 13 樓之 6
13F-6, No.251, Fuxing 1st St, Jhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan, R.O.C
Tel : (03) 550-5590
Fax : (03) 550-5591

■ 高雄 Kaohsiung Office

807 高雄市三民區民族一路80號6樓之一830室
6F-1, No.80, Minzu 1st Rd., Sanmin Dist.,
Kaohsiung City 807, Taiwan, R.O.C
Tel : (07) 3986040
Fax : (07) 3980752

產品資訊網址 : www.terasoft.com.tw
產品資訊信箱 : info@terasoft.com.tw
技術支援信箱 : support@terasoft.com.tw



圖 5，射頻功率放大器的行為模型和 DPD 演算法。本模型允許系統設計者在建構硬體原型前，於一個全域的操作情境下去開發、優化和測試設計演算法。

硬體與軟體開發工具之連接

為了維持驗證工作流程之連續性，目前在模型化基礎設計環境中，MATLAB 和 Simulink 系統層級模型與演算法，已可和許多 EDA 供應商之數位與類比硬體模擬器，以及一些市面常見之嵌入式軟體 IDEs 與即時操作系統(real-time operating systems)可互相連結。這些介面亦均支援協同模擬(co-simulation)及程式碼自動產生流程之自動化。

總結

現今有一些迫切的系統層級問題難以用傳統的軟體和 EDA 來處理。不同於 C 基礎的電子系統層級(ESL)工具，模型化基礎設計(Model-Based Design)解決的方式，是提供一系列連接從概念產生到實現過程，以及自動產生程式碼之工具，讓工程師能解決複雜的設計問題，高速混合訊號設計的最佳化即是一個例子。MATLAB 及 Simulink 因能與許多 EDA 與嵌入式開發工具連結，其所提供的模型化基礎設計(Model-Based Design)，優勢在於創造了一個統一的工作流程，有助於緩和不同工具與工作流程間的差距。

最專業的MATLAB技術支援及服務團隊—鈦思科技

 鈦思科技
www.terasoft.com.tw

 MathWorks
Accelerating the pace of engineering and science

■ 台北總公司 Head Office

115 台北市忠孝東路六段21號8樓之3
8F-3, No.21, Sec. 6, Jhongsiao E. Rd.,
Taipei 115 Taiwan, R.O.C
Tel : (02)2788-9300
Fax : (02)2788-9308

■ 新竹 Hsinchu Office

302 竹北市復興一街 251 號 13 樓之 6
13F-6, No.251, Fuxing 1st St., Jhubei City,
Hsinchu County 302, Taiwan, R.O.C
Tel : (03) 550-5590
Fax : (03) 550-5591

■ 高雄 Kaohsiung Office

807 高雄市三民區民族一路80號6樓之一830室
6F-1, No.80, Minzu 1st Rd., Sanmin Dist.,
Kaohsiung City 807, Taiwan, R.O.C
Tel : (07) 3986040
Fax : (07) 3980752

產品資訊網址 : www.terasoft.com.tw

產品資訊信箱 : Info@terasoft.com.tw

技術支援信箱 : support@terasoft.com.tw