

運用基於AI的驗證空間優化加速覆蓋收斂

作者

Taruna Reddy

產品行銷經理

Will Chen

主任應用工程師

Badri Gopalan

新思科技科學家

簡介

覆蓋率是所有現代半導體驗證的核心。對於這個程序而言，最重要的格言是：「如果從來沒有實行過測試，就表示未曾真正完成驗證。」儘管覆蓋晶片設計的特定層面無法保證可以發現所有錯誤，另一方面，錯誤效應傳播(bug effect propagation)與檢查器也是關鍵因素；毫無疑問的在尚未執行的邏輯中不可能觸發錯誤。覆蓋率通常被視為發現錯誤的參考指標，也是使用基於模擬的測試進行驗證的關鍵焦點。

時至今日，即使有時手寫測試可以發揮的作用有限，大多數模擬測試仍運用隨機限制stimulus。這些測試與已驗證的設計部份之間沒有明顯的關聯性，因此覆蓋率對建立這種連結至關重要。儘管驗證永遠無法真正地完成，但覆蓋指標在判定已執行足夠測試次數的時機以及認定設計已經過充分驗證足以進行投片等方面，可提供關鍵指引。

即使具有隨機限制測試的自動化優勢，覆蓋目標收斂的速度仍然很慢，而且隨著模擬持續進行，回應會減少。這仍然是一項需要大量投入手動的工作。顯然地半導體業非常需要更佳、甚至更自動化的方法來「提早進行」覆蓋收斂並改善最終覆蓋結果。

新思科技VCS 模擬器包括運用人工智慧與機器學習(AI/ML)的智慧覆蓋優化(Intelligent Coverage Optimization, ICO)，透過強化 stimuli 多樣性、公開測試工作台(testbench)錯誤以及改善覆蓋率來因應這些挑戰。為了完善 ICO，新思科技 VCS 最近推出新思科技驗證空間優化(VSO.ai)，同時也利用AI/ML，更直接地鎖定細粒層級與粗粒層級(fine and coarse-grained level)的覆蓋率。本篇技術白皮書聚焦在新思科技 VSO.ai的介紹。

覆蓋收斂的挑戰

在執行模擬時，覆蓋率背後的基本概念似乎相當簡單。驗證團隊選擇感興趣的結構程式碼覆蓋指標(行、運算式、區塊等)，並將這些指標自動新增至模擬測試執行。一般而言，工程師會定義其他功能覆蓋點與群組，這些覆蓋點與群組代表他們要確保執行的設計部份。他們還可以定義交叉覆蓋(cross-coverage)，以監控覆蓋點的特定組合。

接著，團隊會定義限制條件，確保自動生成的stimulus保持在適當的範圍內，接著開始執行模擬。當每次測試迭代生成符合規則的隨機限制 stimulus，模擬器就會收集所有形式的覆蓋指標。團隊會監控結果，進而決定執行更多測試或調整限制，嘗試改善覆蓋結果。到某個時機點，他們會認為已在晶片專案排程與資源限制範圍之內盡了最大努力完成測試，然後就會投片(tape-out)。

這聽起來相當簡單，但圖 1 顯示了在實際晶片設計中運用此程序時所發生的挑戰。

第一項主要挑戰是定義覆蓋率，因為任何大型尺寸或繁複設計要實現全面覆蓋率是不可能的。

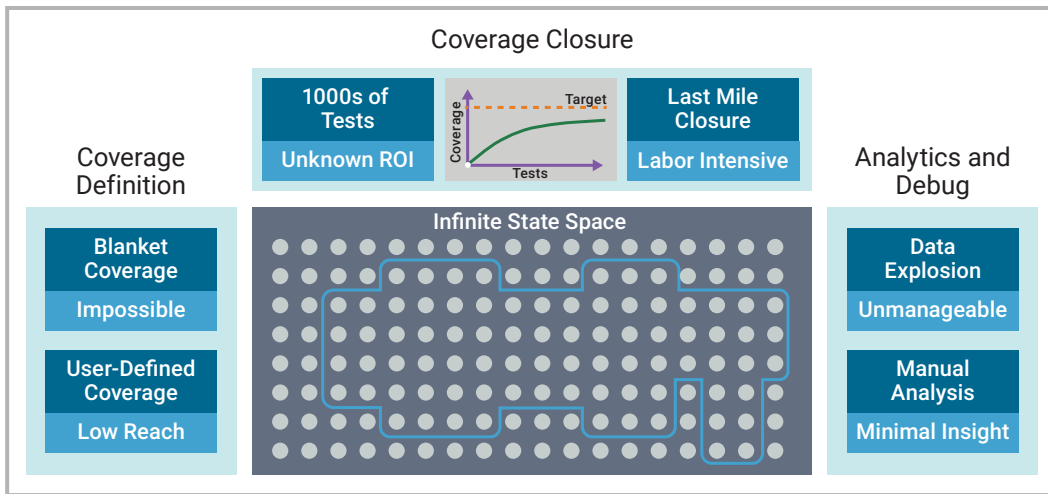


圖 1：在模擬中運用覆蓋率的挑戰

由於程式碼覆蓋無法反映預期的設計功能，因此使用者定義的覆蓋率也扮演重要角色。然而，這是一項手動工作，且在一般設計行為的佔比有限。模擬測試中無論包括了哪些結構覆蓋率與功能覆蓋率的組合，嘗試收斂覆蓋並達成與驗證目標相符的指標是一項更大的挑戰。

圖 1 上方中間的圖顯示幾乎在每個專案會發生的情況。初期測試運行會在許多設計部份執行，隨著時間推移，重複進行隨機限制測試往往會提高覆蓋率。一般晶片專案會執行數千次隨機限制模擬測試，而設計中也存在大量重複的活動。因此，新覆蓋率的速度急遽下降，而每次額外的模擬運行的投資報酬率 (return on investment, ROI) 也隨著時間推移而降低。投資報酬率放緩是覆蓋收斂面臨的第二項主要挑戰。

在某個時刻，曲線會變平，無限期地進行模擬幾乎不會產生任何改善。驗證團隊必須決定達到足夠覆蓋的時機以進行投片。當產生漸近收斂時，將永遠無法達到 100% 的覆蓋指標。這也是設定低專案目標的原因之一。不幸的是，往往在實現目標之前，曲線就變平了。驗證團隊必須嘗試琢磨正在發生的情況，並在可用的時間範圍與資源範圍內，盡可能地提高覆蓋率。僅只執行更多自動化測試仍嫌不足，因此需要進行大量手動工作。

第三項主要挑戰也是模擬收斂程序的「關鍵最後一哩路」，且受到兩個因素影響。首先，從模擬運行收集的資料量相當龐大；第二個問題是嘗試分析此資料並判定覆蓋漏洞的根本原因：這個測試設定到底是 illegal bin，還是確實是覆蓋漏洞？手動分析大量資料只能產生少量的見解。改善這種狀況的唯一方法就是定義更好的覆蓋率、執行更少測試、以更快的收斂速度得到更高結果，並自動化分析階段。

新思科技 VSO.ai 簡介

人工智慧(AI)與機器學習(ML)技術正廣泛被應用以解決產業面臨到的諸多挑戰，其中也包括晶片開發所遇到的難題。許多電子設計自動化 (EDA) 工具開始成功地運用 AI/ML 來自動化工作、改善排程與優化結果。新思科技在將 AI/ML 應用至晶片設計、驗證、實施等方面無疑是 EDA 產業領導者。尤其是在以模擬為基礎的覆蓋收斂領域，新思科技 VSO.ai 是唯一且強大的解決方案。

新思科技 VSO.ai 可以透過多種方法提供協助，而圖 2 顯示了因應圖 1 所示挑戰的方法。針對覆蓋率定義挑戰，新思科技 VSO.ai 可以推斷出傳統程式碼覆蓋以外的某些覆蓋類型，以補充使用者定義的覆蓋率。ML 可以從經驗中學習，並在適當的情況下以智慧的方式重覆使用覆蓋率。即使在單一專案期間，從早期覆蓋結果中學習也有助於改善覆蓋模型。

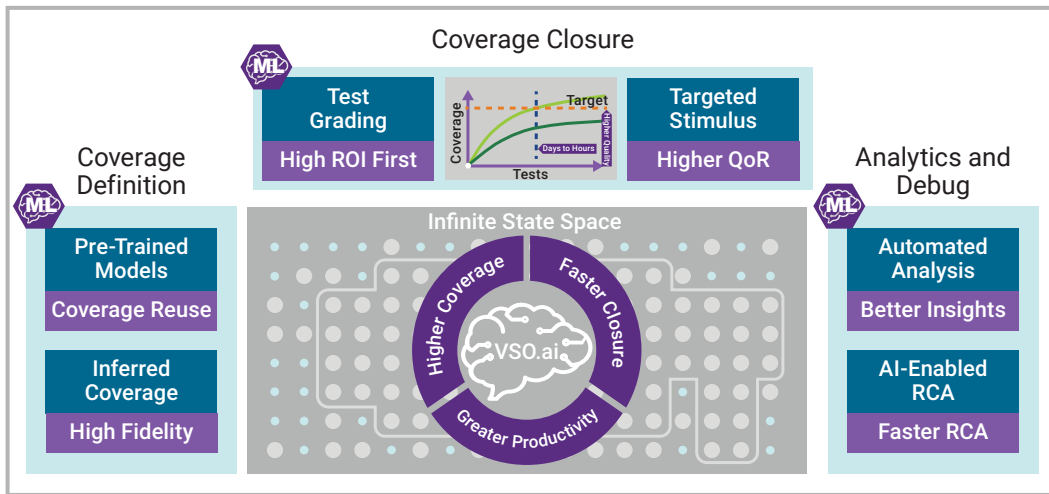


圖 2：用 AI/ML 在模擬中改善覆蓋率

執行更好的測試模擬以因應投資報酬率下降的挑戰，這個過程或許是機器學習可以稀鬆平常地提供協助的地方。如前所述，大量測試具有重複性，但針對覆蓋指標的改善有限或幾乎沒有改善。在專案過程中，針對設計、覆蓋率以及限制條件的演變可能會多次變更排序，因此手動迴歸優化顯得不太保險；嘗試用手動方式將這些變更包含到測試模擬更是不切實際。但新思科技 VSO.ai 可以在粗略測試階段 (coarse-grained test level) 運作，並提供隨著測試結果的變化反覆學習而來的自動且適應性 (adaptive) 測試優化。在消除冗餘測試 (redundant test) 的同時，VSO.ai 將優先執行投資報酬率 (ROI) 最高的測試，從而加速覆蓋率收斂並節省運算資源。

新思科技 VSO.ai 也能在精密階段 (fine-grained level) 的模擬器中執行測試，透過限制隨機 stimulus 的調整，更精準地鎖定尚未實行的覆蓋點，進而提高測試結果品質 (quality of results, QoR)。此方式不僅加速了覆蓋率收斂，也促使收斂水準達到更高的百分比。

自動化、AI 驅動分析覆蓋結果因應最終關鍵的收斂挑戰。新思科技 VSO.ai 執行根本原因分析 (RCA) 來判定無法達到特定覆蓋點的原因，例如：由於限制衝突。如果此問題能夠由 VSO.ai 自行解決，那麼此工具就會自動進行問題排除。否則，VSO.ai 會向團隊提供可操作的結果，像是識別相互衝突的限制條件。

整合新思科技 VCS

在 EDA 解決方案中有效部署 AI/ML 技術需要與傳統工具密切整合。新思科技 VSO.ai 也不例外，透過與新思科技 VCS 密切整合實現獨特優勢。圖 3 顯示了使用新思科技 VCS 執行測試和收集覆蓋率的傳統手動流程。

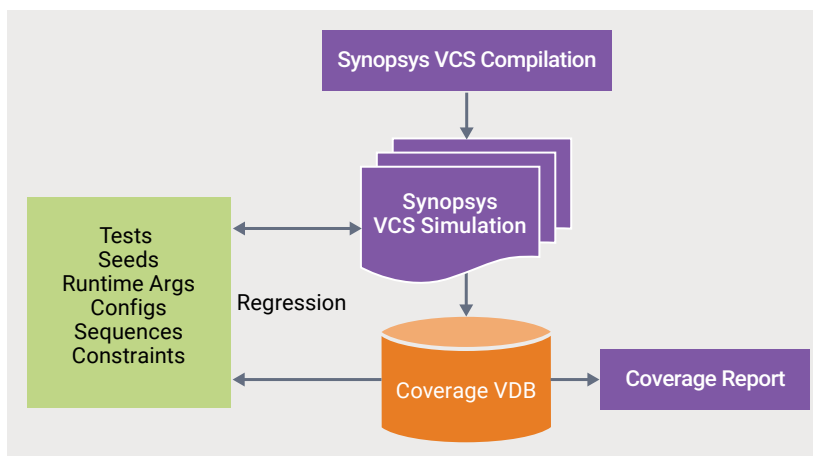


圖 3：手動模擬測試流程

完成設計與驗證環境(測試工作台)編譯後，接著執行模擬。除了限制以外，驗證團隊還可以指定其他幾種類型的資訊，像是各種設定開關與執行時間參數。在執行測試時，覆蓋指標會儲存在驗證資料庫 (VDB) 中。測試結果可以用覆蓋報告的形式進行查看，而且可以合併多次測試的資料庫以產生摘要報告。

相較之下，圖 4 顯示如何運用新思科技 VSO.ai 自動化幾個關鍵步驟，以增強測試流程。覆蓋推斷步驟會在編譯期間發生，透過自動產生的覆蓋率讓結構與使用者指定的覆蓋率更完善。在精密階段中，覆蓋率主導新思科技 VCS 中的限制求解器(constraint solver)，因此可以更精準地生成新測試，實現未達成的覆蓋點。求解器存在於模擬器的這個事實，顯示縝密整合是一個關鍵要素。

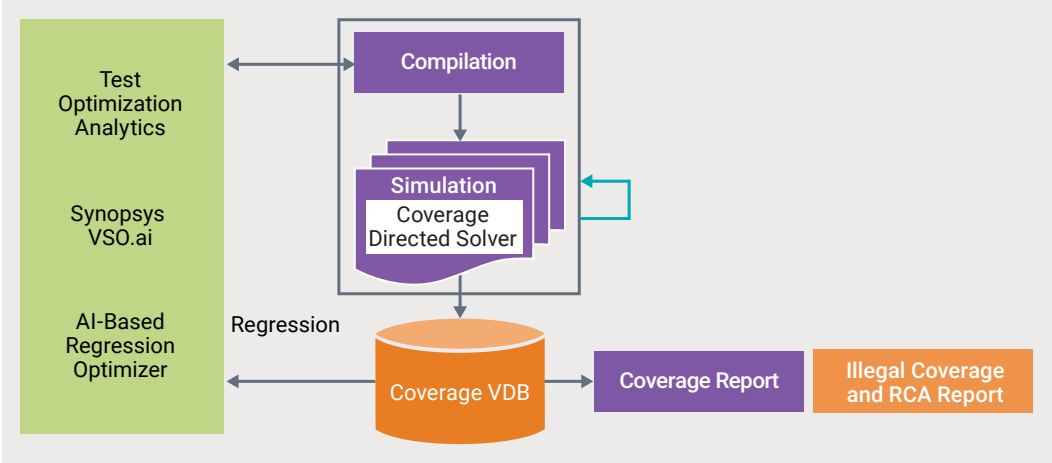


圖 4：運用新思科技 VSO.ai 的模擬測試流程

基於測試排序的手動測試順序和招數會被完全自動化的流程取代。在粗略測試階段，新思科技 VSO.ai 會安排迴歸，利用最少測試集來節省執行時間與運算資源，以獲得最高 ROI。同時也控制新思科技 VCS 設定和轉換，來優化每一次執行的測試。同樣地，用根本原因分析來完善手動分析覆蓋結果，以確定可能無法達成地覆蓋率並回報根本原因，解決這些情況。

如果不需要更高的覆蓋率，那麼 VSO.ai 會在更短的時間內產生同等覆蓋率結果。在許多情況下，新思科技 VSO.ai 會隨著時間推移運用 ML 技術來提高覆蓋率，如圖 5 所示。每次運行都提供新資訊，改善限制方法並優化迴歸測試。有別於手動方法，隨著晶片專案程序結果有所變化，這個流程能完全因應調整。ML 可以使用的歷史記錄包括當下執行的迴歸、設計專案前次執行的迴歸，甚至是之前類似的專案執行過的模擬。

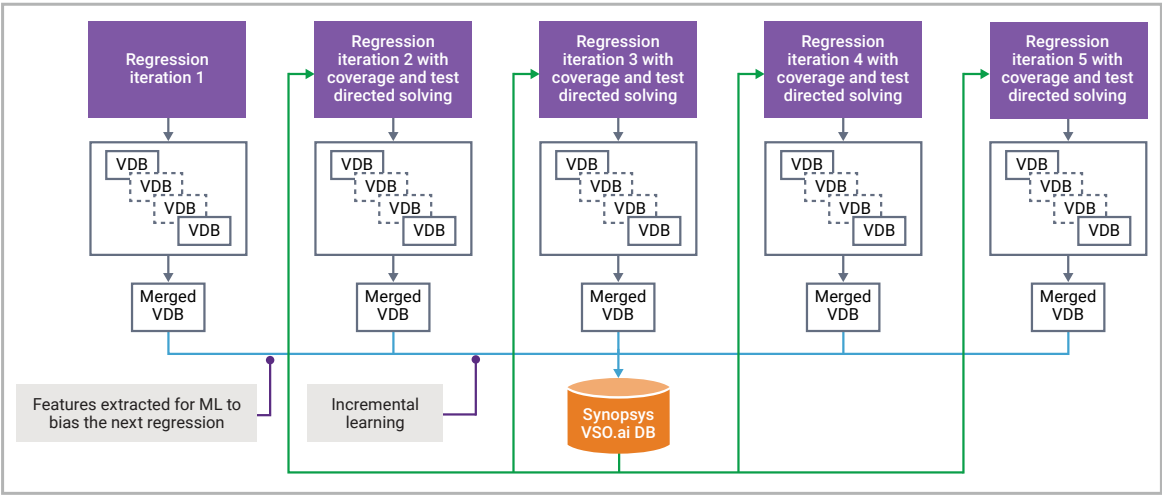


圖 5：新思科技 VSO.ai 如何運用 ML 改善迴歸

無論是否有產生新的變化，新思科技 VSO.ai 在開發階段中執行完整迴歸的子集合也具有價值，可以確保使用者或工具定義的指標衡量的驗證品質。這種情況的優勢是加快 TTR (Time to Result) 的速度，可以快速取得相同層級或相似層級的測試覆蓋率。

新思科技 VSO.ai 戰績

新思科技VSO.ai優化模擬迴歸，可以在更短的時間內實現相同覆蓋率，或是根據需求提高覆蓋率。例如：一位客戶在新思科技最新的矽谷使用者大會 (SNUG) 活動中所發表，在四個 IP 區塊中降低至少 2 倍的迴歸測試次數；另一個範例，如圖 6 所示，VSO.ai 在 OpenTitan HMAC IP 能夠降低 3 倍的測試次數，實現 100% 功能覆蓋。

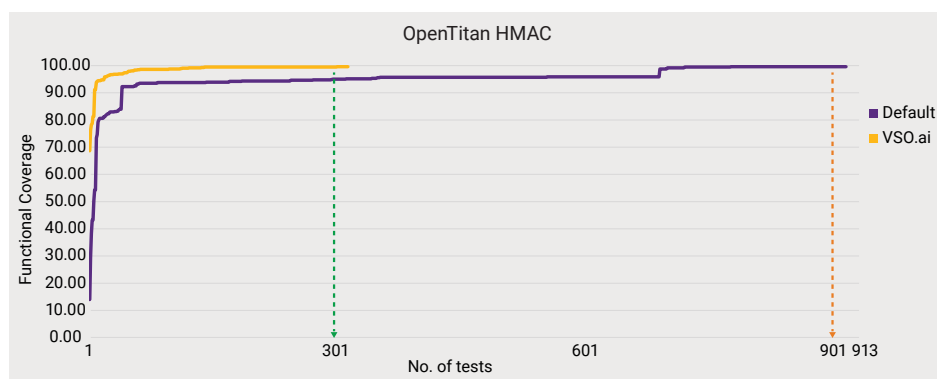


圖 6：新思科技 VSO.ai 在 OpenTitan HMAC 達到的成果

各種 IP 模組與完整系統單晶片 (SoC) 設計都體現出令人印象深刻的成果。由於迴歸覆蓋率優化以及由覆蓋率主導的解決方案，將實現覆蓋率目標所耗費的時間縮短了 1.5 倍到 10 倍，同時將覆蓋率結果提高 10% 之多。通常，5-20% 的覆蓋範圍會因為 RCA 而被判定為可能無法達成。新思科技 VCO.ai 的價值顯而易見且無可否認。

結論

覆蓋率在偵錯方面仍然是不完整的參考值，且沒有可因應覆蓋收斂挑戰的靈丹妙藥。如同在 EDA 的許多其他領域一樣，AI/ML 技術為驗證帶來解方。新思科技 VCS 與 VSO.ai 的結合成為業界最創新且最完整的解決方案，可加速迴歸與覆蓋收斂的速度。