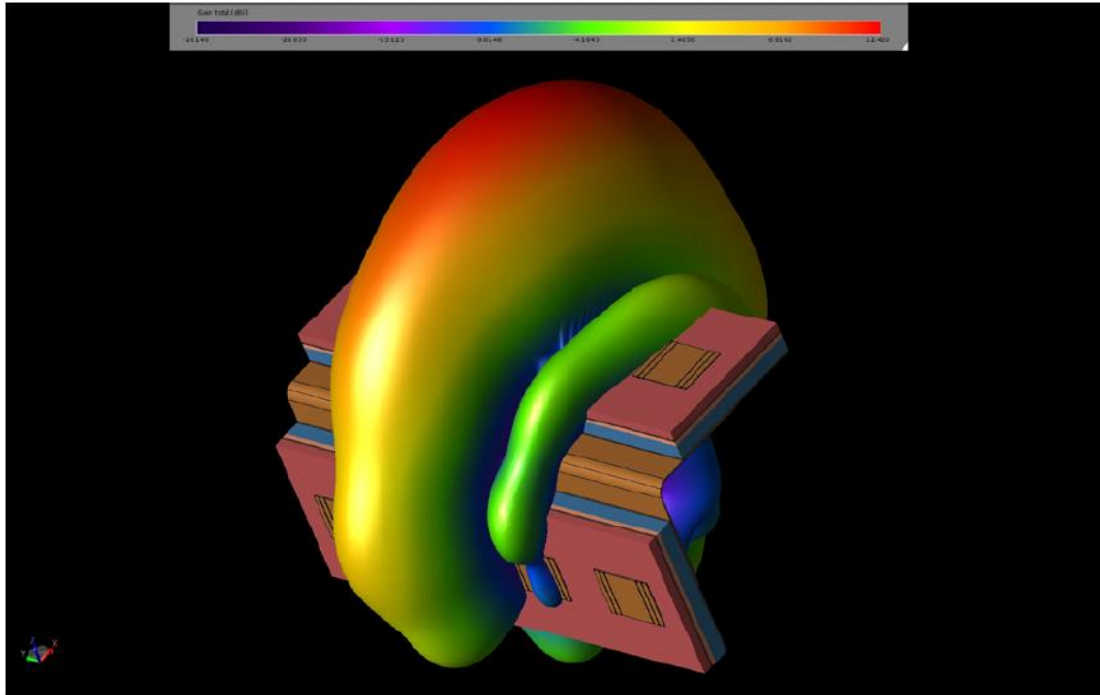


60 GHz 相位陣列天線設計與波束成形分析——使用 XFDTD



XFDTD 計算的 60.48 GHz 三維遠場增益場型，顯示 1×4 孔徑耦合陣列的正前方波束。

引言

設計用於 60 GHz WiGig 頻段的高增益相位陣列，需要精確捕捉多層孔徑耦合結構的完整電磁行為——包括單元間的 S 參數耦合、遠場輻射場型以及波束掃描 EIRP 覆蓋。XFDTD 的全波 FDTD 解算器，結合其疊加與陣列最佳化後處理能力，能有效處理此工作流程的每個階段。

本範例對一款雙陣列、8 單元 (2×4) 孔徑耦合貼片天線進行建模，工作於 WiGig 通道 2 頻帶，中心頻率 60.48 GHz (目標頻率範圍：55–65 GHz)。兩個正交定向的 1×4 陣列安裝在共用的 L 形框架結構上。模擬表徵了各單元場型、互耦 (S 參數)、疊加波束成形狀態以及波束掃描 EIRP——最終給出每個陣列的 EIRP 累積分佈函數 (CDF)，以及顯示總空間覆蓋的合成最大值保持圖。

多層毫米波結構的全波 FDTD 模擬

此天線採用三層介質堆疊結構，包含銅製輻射貼片與帶狀線饋電網路，如圖 1 所示。XFDTD 從 .stp 檔案匯入完整 CAD 幾何模型，並為每個元件指派使用者定義材料。

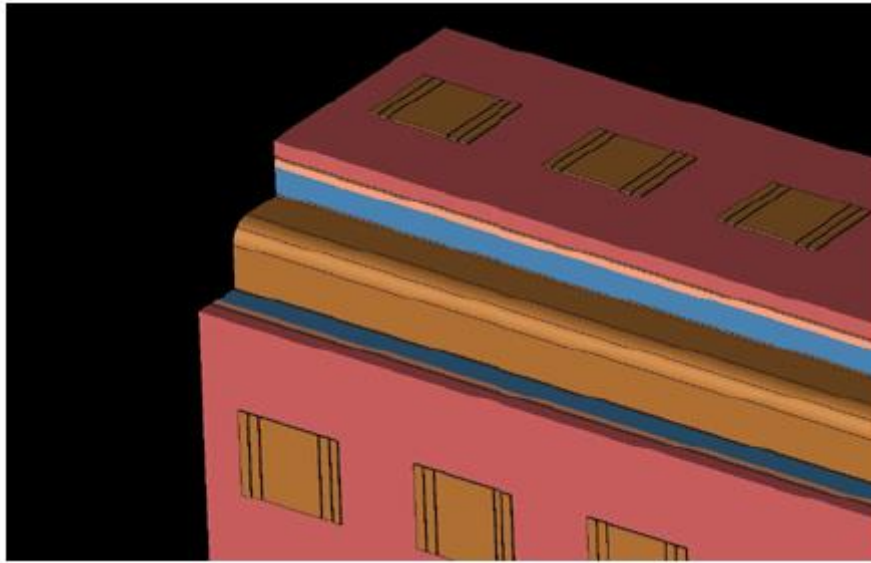


圖 1：60 GHz WiGig 相位陣列天線幾何結構的三維 CAD 模型，顯示兩個 1×4 陣列。

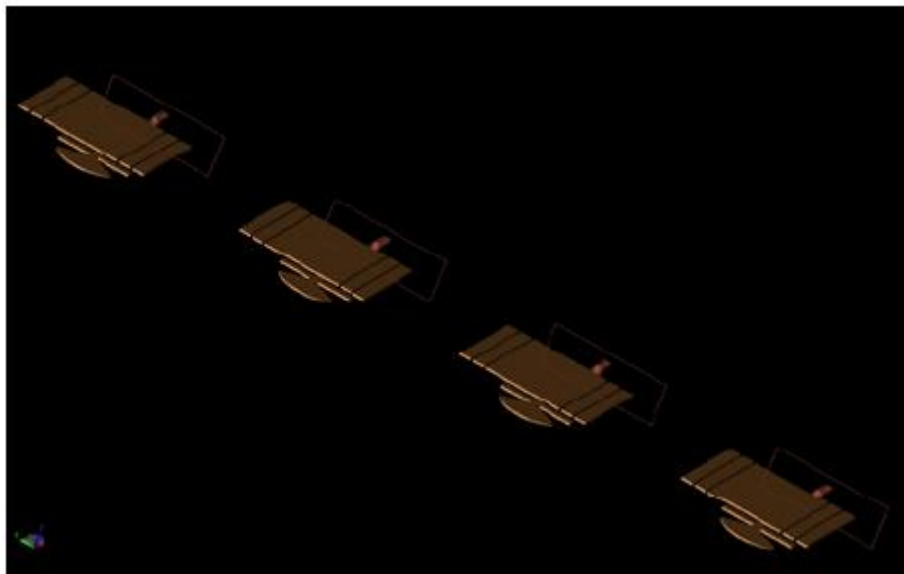


圖 2：陣列的每個單元都有一個波導埠饋電至貼片下方的帶狀線結構。帶狀線透過接地層中的孔徑與貼片耦合（圖中未顯示）。

八個饋電點各由一個模態波導介面激勵，如圖 2 所示（以頂部陣列的貼片為例）。對八個埠分別進行 XFDTD 模擬（每次一個埠主動），以計算完整的 S 參數矩陣。埠 1 的 S 參數資料如圖 3 所示，各貼片的三維增益場型如圖 4 所示。此模擬資料提供了疊加與陣列最佳化後處理所需的完整單元間耦合資料。

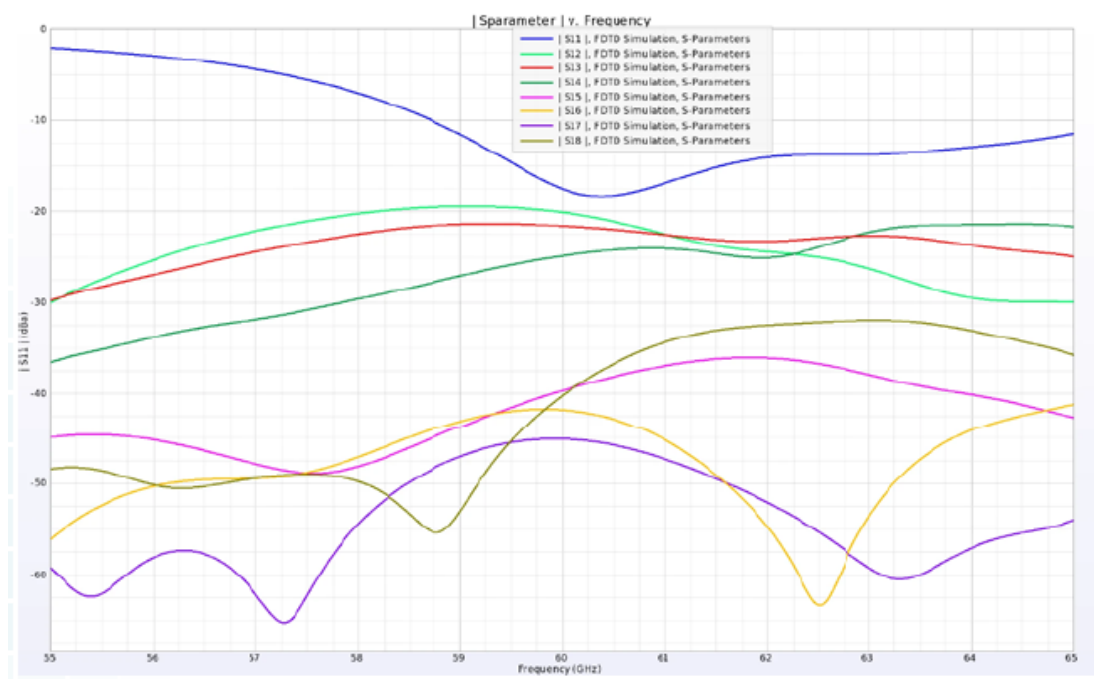


圖 3：頂部 (+Z) 1×4 陣列一端貼片的完整 S 參數結果。60 GHz 處返回損耗 (S11) 約為 -18 dB，而所有其他貼片之間的耦合均低於 -20 dB。

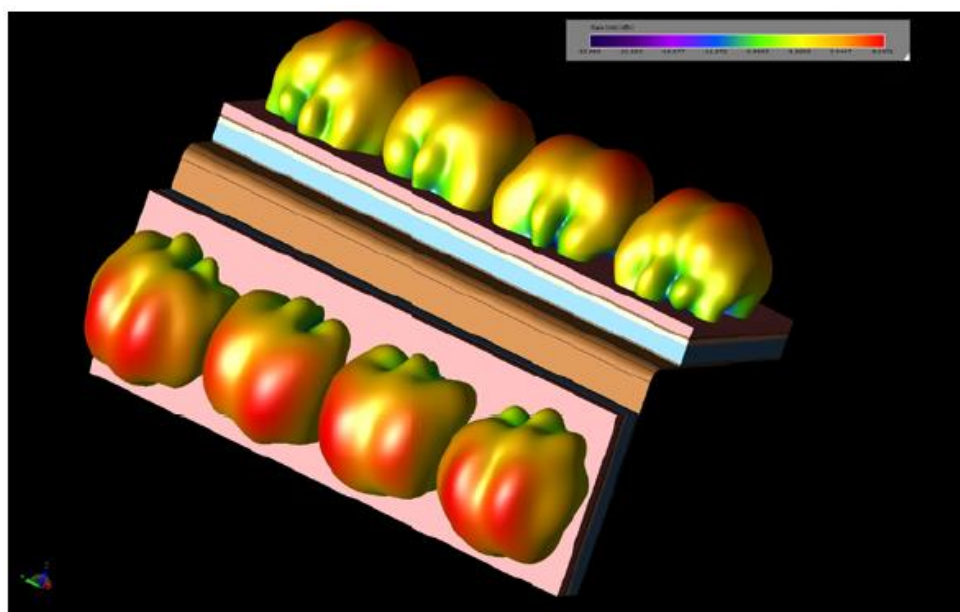


圖 4：XFDTD 模擬對每個貼片個別激勵，產生該貼片的增益場型，隨後與 S 參數資料一起供疊加工具使用。

疊加模擬：各陣列波束成形

XFtd 的疊加模擬利用指定的每埠振幅與相位權重，將穩態 FDTD 結果進行組合，而無需重新執行 FDTD 解算器。對此結構定義了兩個疊加——每個四單元陣列一個——每個埠可用功率為 23 dBmW。每個貼片均為 0 度相位的疊加定義如圖 5 所示，生成的場型如圖 6 所示。相位權重可在疊加定義編輯器中調整，並可在多種設定下掃描。此相位調整工作流程讓工程師能在後處理中快速評估波束成形狀態，而無需額外的解算器時間。

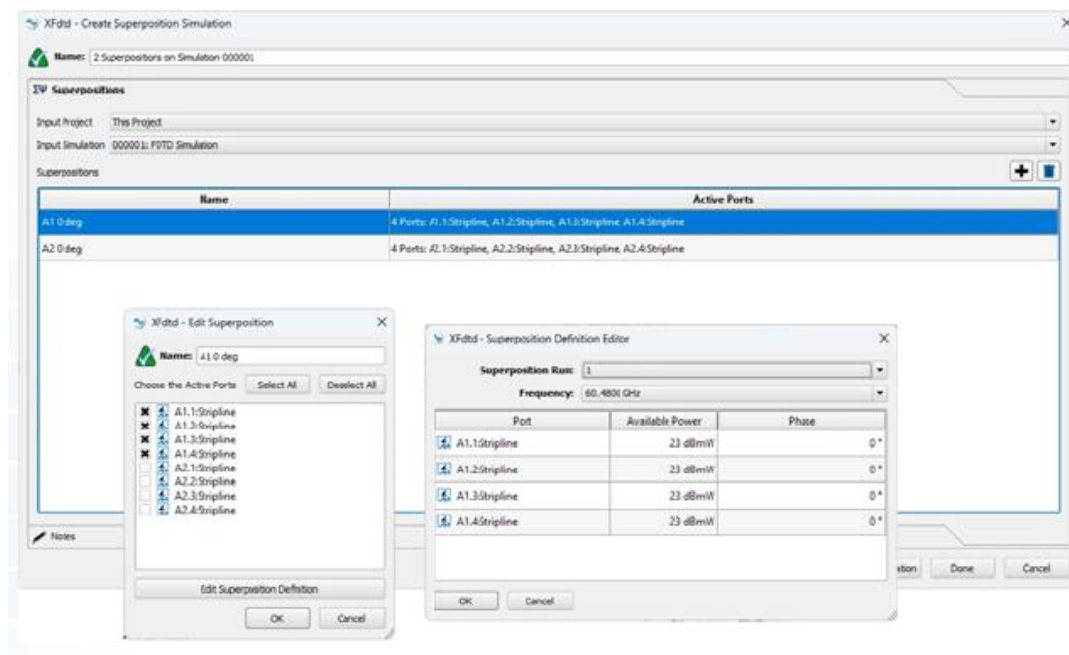


圖 5：疊加模擬選單，用於計算結構 +Z 面上四個貼片在 60.48 GHz 處的狀態，每個貼片給定 23 dBmW 可用功率與固定相位。

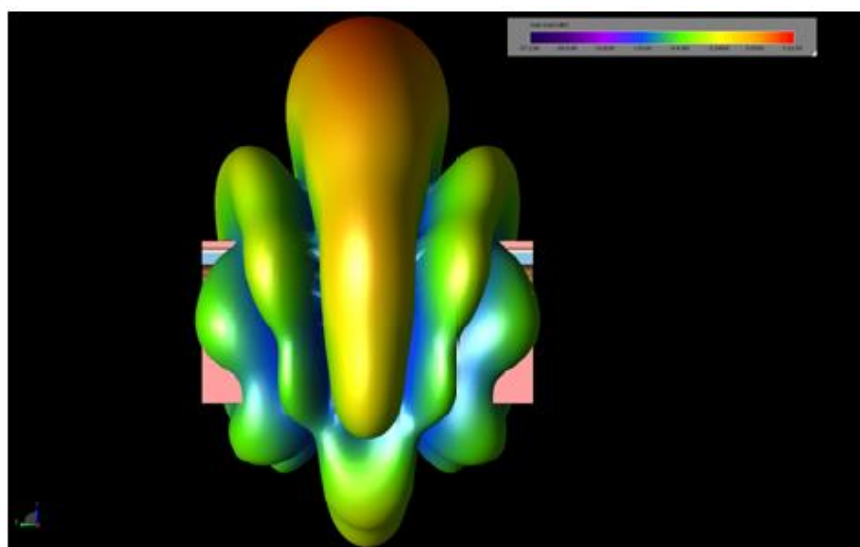


圖 6: +Z 陣列中每個貼片以固定相位饋電時，生成正前方場型，峰值增益為 12.4 dBi。

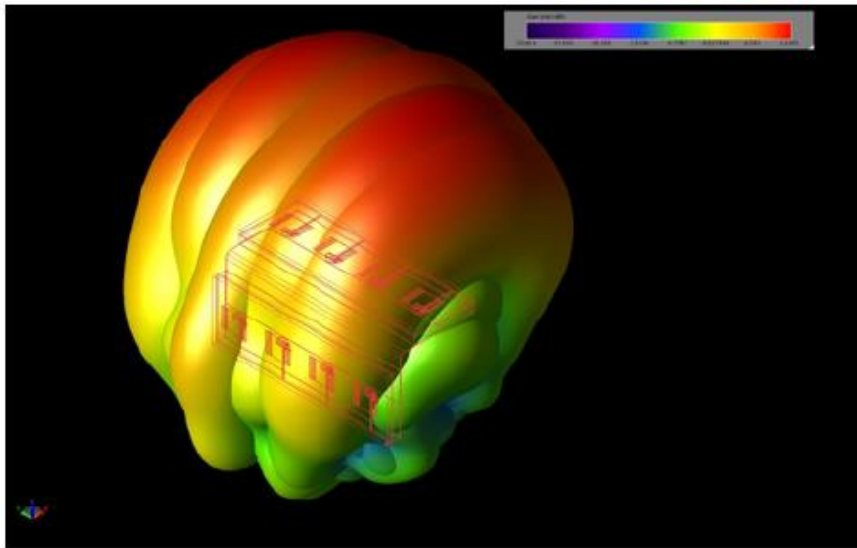


图 7: 使用阵列优化，在 $\Phi=90^\circ$ 度平面内为 +Z 阵列生成五个波束，仰角范围 -30° 至 $+30^\circ$ 。

陣列最佳化：最大 EIRP 波束合成

XFDTD 的陣列最佳化功能應用疊加原理，確定使指定方向 EIRP 最大化的各單元激勵權重——振幅與相位。與手動疊加不同，最佳化求解的是產生目標波束所需的激勵狀態，而非要求使用者指定。

在圖 7 中，陣列 1 針對仰角 (Θ , $\Phi=90^\circ$) 從 -30° 到 $+30^\circ$ 的五個波束方向進行最佳化；在圖 8 中，陣列 2 針對方位角切面範圍 ($\Phi=150^\circ$ 至 210° , $\Theta=90^\circ$) 進行最佳化。兩個陣列配置為相互偏移 90° ，從而實現組合空間覆蓋分析。

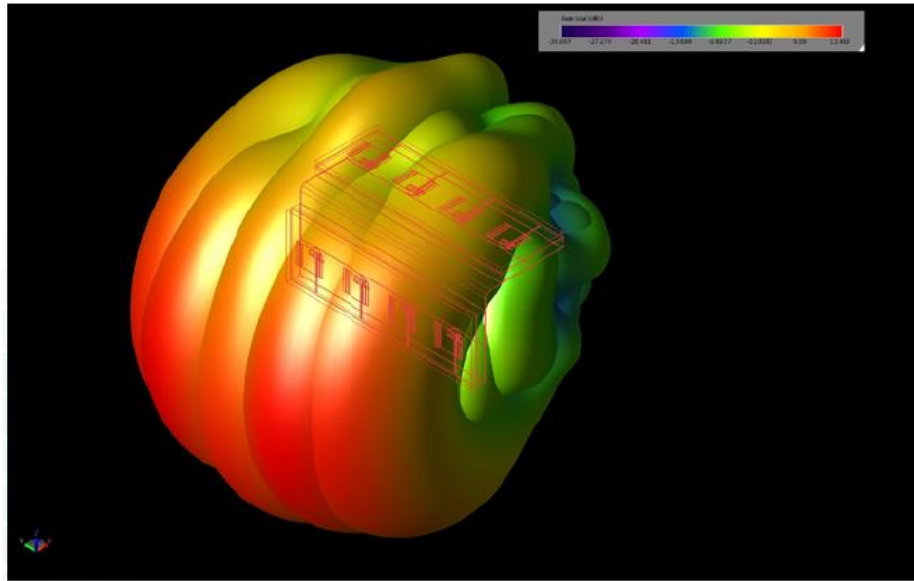


圖 8：在 $\text{Theta}=90^\circ$ 平面內，沿 150° 至 210° 方位角範圍生成五個波束。

EIRP 的 CDF 與最大值保持覆蓋分析

陣列最佳化結果以 EIRP 的累積分佈函數 (CDF) 圖形式視覺化，表徵超過給定輻射功率水平的方向比例。這是 WiGig 與 5G 毫米波系統設計中空間覆蓋的標準品質因數。

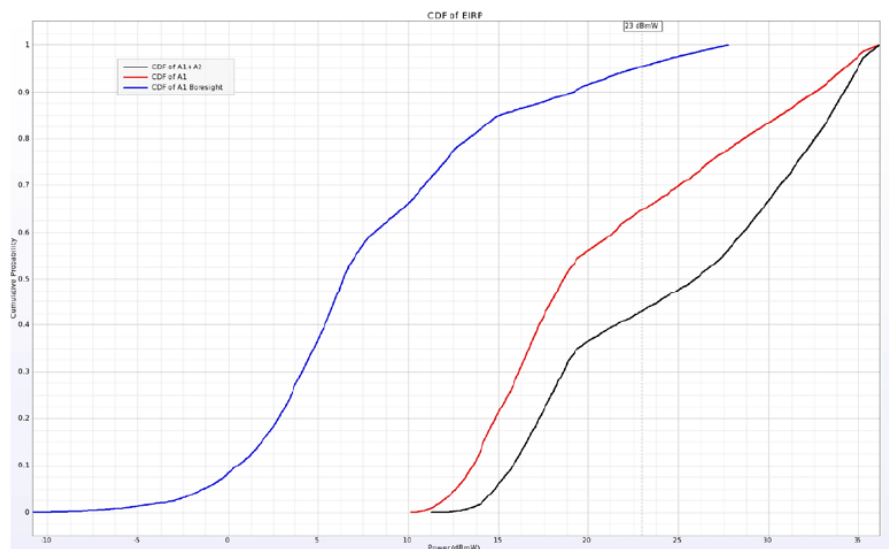


圖 9：EIRP 的 CDF 圖顯示陣列在給定輸入功率下的效能。此處將 +Z 陣列所有單元同相 (A1 正前方) 與同一陣列的最大值保持 (包含該陣列所有可能的相位組合) 進行比較。兩個陣列的組合 (A1+A2 曲線) 在 23 dBmW 下表現出最佳效能。

XFDTD 為每個分析方向生成各波束 CDF 圖、聚合所有波束可達最佳 EIRP 的最大值保

持場型，以及合併兩個陣列的合成 CDF。圖 9 顯示陣列 1 正前方（所有單元同相）與陣列 1 最大值保持的 CDF 對比，以及陣列 1 和陣列 2 組合最大值保持的 CDF。合成圖直接展示兩個陣列同時工作帶來的總空間覆蓋效益，支援系統級 EIRP 預算與鏈路餘裕分析。

結論

工作於 60 GHz WiGig 頻段（IEEE 802.11ad/ay，通道 1–4；通道 2 中心頻率：60.48 GHz）的相位陣列天線用於多 Gbps 短距離無線鏈路，包括筆記型電腦到擴充基座連接、無線擴充基座、AR/VR 頭戴式裝置以及固定無線接取點。相對於 6 GHz 以下頻段，毫米波頻率的自由空間路徑損耗更高，因此需要高增益陣列來克服。

系統設計人員不僅需要驗證每個單元是否達到目標輻射場型，還需要驗證陣列在波束成形時是否在預期覆蓋區域內達到足夠的 EIRP——包括最差與最佳方向。XFDTD 中的 EIRP 的 CDF 分析直接映射了這種覆蓋。

天線幾何結構與介質堆疊的精確建模——包括頻率相關損耗正切——以及單元間真實的 S 參數耦合，對於預測波束成形保真度至關重要。XFDTD 的全波 FDTD 方法無需簡化近似即可捕捉這兩者，使其適用於原型製造前的最終設計驗證。

致波有限公司

臺北市大安區光復南路 420 巷 1 弄 11 號 6 樓

(02)89315800