

學校區域環境內手機訊號量測與模擬分析

Measurement and Simulation Analysis of Cellular Signal Propagation in a Campus Environment

王柏仁 王毅峰

明志科技大學電機工程系

摘要

本文通過分析射線追蹤模擬軟體（Wireless Insite）與實地量測結果，以驗證其在 FR1 頻段學校場景下的準確性。並基於此驗證結論，未來可用來進一步將該方法應用於未來 FR3 頻段研究其實用性與潛在挑戰。為達成此目的，本研究首先於學校場景中，以目前真實通道數據，對四個基地台進行實地訊號強度量測。接著，建立對應之 1:1 三維模型於 Wireless Insite 中進行模擬，然後將模擬結果與實測數據進行直接比對分析，結果顯示兩者誤差相當有限，從而嚴謹地驗證了該模擬工具在複雜校園環境下的可靠性。本研究之價值在於通過實證，明確指出射線追蹤模擬可作為高成本實地量測之有效比較與預測方案，其方法與結論對未來 FR3 等更高頻段之網路規劃與研究具重要參考價值。

關鍵詞：FR1、光線追蹤、Wireless Insite、通道量測。

Abstract

This study validates the accuracy of a ray-tracing simulation tool (Wireless InSite) in an FR1-band campus scenario through a comparative analysis of simulation results and field measurements. Based on the validation outcomes, the proposed methodology is further discussed in terms of its applicability to future FR3-band studies, including potential challenges and practical feasibility. To achieve this objective, field measurements of received signal strength were first conducted across four base stations within a campus environment to obtain realistic channel data. Subsequently, a corresponding 1:1 three-dimensional model was constructed in Wireless InSite to perform ray-tracing simulations. The simulated results were then directly compared with the measured data. The results indicate that the discrepancy between simulation and measurement is limited, thereby rigorously validating the reliability of the simulation tool in complex campus environments. The significance of this work lies in providing empirical evidence that ray-tracing simulations can serve as an effective alternative and predictive approach to costly field measurements. The methodology and findings offer valuable insights for future network planning and research in higher-frequency bands such as FR3.

Keywords: FR1, Ray tracing, Wireless InSite, Channel measurement.

1. 前言

第五代行動通訊技術廣泛使用 FR1/FR2 等高頻段，其訊號傳播特性與傳統低頻段迥異，因此準確分析特定場域之通道特性至關重要。然而，射線

追蹤模擬在不同環境下的準確性需逐一驗證。考量學校場景之複雜性，本研究旨在通過實地量測，針對實地驗證 Wireless Insite 於此特定場域之適用性。其方法為結合實地量測與電腦模擬，在此背景下，

基於射線追蹤的模擬軟體（如 Wireless Insite）提供了一種潛在的低成本解決方案。

研究之主要特色在於結合實地量測與電腦模擬，對校園環境中的 FR1 訊號進行綜合分析。具體而言，本研究首先使用手機應用程式實地量測學校內目前四個基地台的訊號強度，獲取真實數據。其後，利用 Wireless Insite 軟體建立精確的 1:1 三維環境模型進行模擬，並將模擬結果與前述實測數據進行詳細比對，以量化評估其誤差。

透過此一驗證流程，本研究不僅能評估 Wireless Insite 於複雜校園場景之準確度，更旨在確立一種低成本、高效益之通道研究方法。

2. 模擬軟體介紹

Wireless Insite 是一套基於光線追蹤理論所開發的電磁波傳播與無線通道路徑模擬軟體。它能夠模擬多樣化的場景環境，包括地形起伏、複雜的戶外大尺度場景、都市區域、建築物，甚至延伸至小尺度的室內空間，用以分析電磁波傳輸效應以及各通訊頻段下的系統特性。

隨著軟體的持續更新，功能逐步擴展，從早期僅能在地形、戶外或市區環境中，針對發射端與接收端天線配置模擬多重路徑訊號強度，逐漸增加至支援室內小場景模擬，並引入 MIMO 無線通訊系統功能，能夠利用波束成形、空間分集及空間多工等技術，分析高頻段下不同場景中的訊號衰減情形。[1, 2]

在使用 Wireless Insite 進行模擬時，首要步驟是建立模擬場景，場景大小需依據實驗需求加以劃分，無論是室外場景（如地形、植被或液態水），或是室內場景（如建築物、室內配置與家具）。接著須為場景中各物件指定材質，使用者可以直接選擇內建材料庫，或自行定義新材質，並根據物件特性調整材料參數。由於不同材質在不同頻段下的導電率與相對介電常數差異，其對訊號衰減的影響也有所不同。[3]

3. FR1 校園量測

使用手機 App(Network Cell info Lite)進行實地量測，此 App 會即時記錄當前所在位置的經緯度以及當前的訊號強度量測狀況以及基地台的分布情況，如圖 1 與圖 2 所示，圖 1 為當前位置與區域內基地台分布以及數量，如圖 2 所示，系統會在地圖上標記當前位置，並即時顯示該點的訊號強度，同時所有數據均會被自動記錄與儲存。

根據量測結果儲存於 excel，而後使用 python 進行轉檔與程式撰寫，最終用 Google Earth Pro 畫出學校的訊號強度分佈，如圖 3 到圖 5 所示，為方便觀察圖 3 為總圖，圖 4 與圖 5 為局部放大。



圖 1. 基地台分布

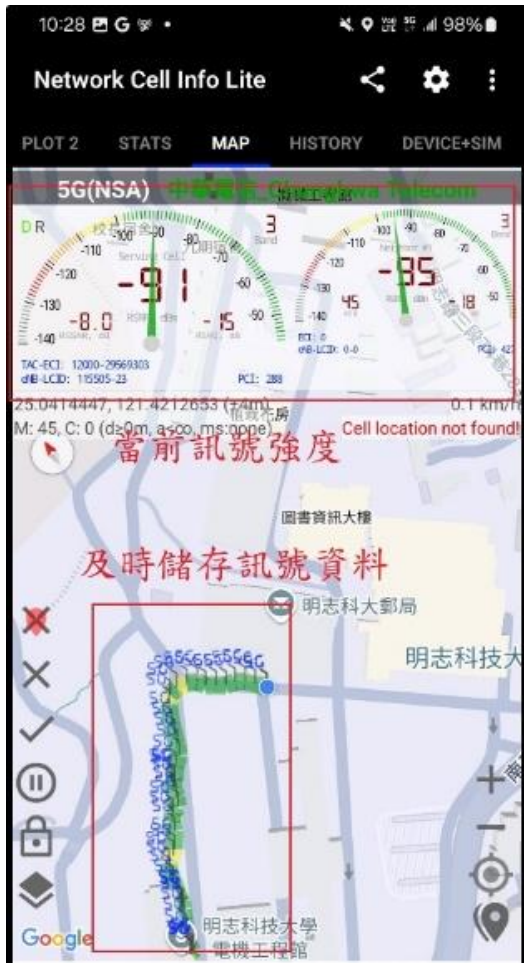


圖 2. 校園訊號量測示意圖

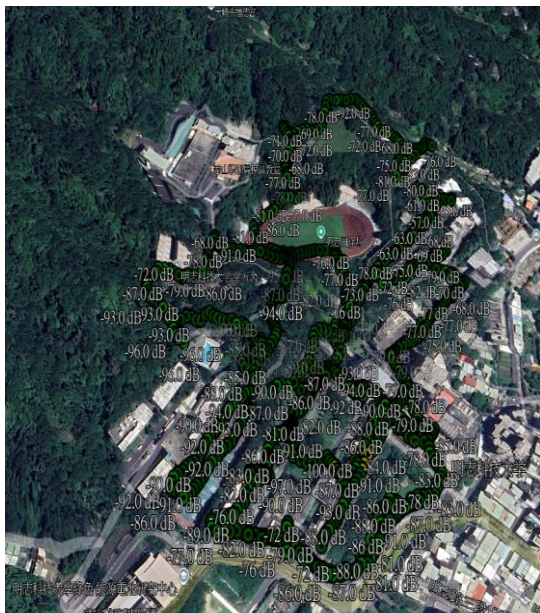


圖 3. 校園訊號強度量測總圖

在圖 4 中，A 區為左側有高大建築物，右側有高大樹木，為典型的狹長型地形，此地形訊號遮蔽較為明顯，訊號強度有顯著的下降趨勢。圖 4 中，A 區的訊號約為 -85 dB 至 -100 dB，B 區為空曠的停車場區域，可以觀察到訊號約為 -75 dB 至 -90 dB 可以明顯觀察到與 B 區的訊號相比，A 區訊號明顯降低 5-10 dB。

而圖 5 為校園中山坡地區域，由於高低落差明顯，基地台布置得當，所以此區域戶外訊號較為良好，訊號值約為 -65 dB 至 -90 dB。

4. FR1 校園模擬

4.1 戶外建模

使用軟體 blender 透過外掛功能將 Google Map 上學校區域地表下載至 blender 上，再產生地表上的地形以及建築物，如圖 6 所示。

而後再將已經產生好地形與建築物的戶外模型匯入至軟體 Wireless Insite 之中如圖 7 所示，圖中可以看到學校區域範圍內的建築物以及地形。

4.2 Wireless Insite 戶外模擬

在 Wireless Insite 中設置模擬所需使用之天線 Tx 與 Rx，本文為方便觀察模擬情況將 5G 基地台所設置增益為 24 dBi，如圖 8 所示，理論上 8*8 陣列增益為 18.06 dB 如公式 1 所示。

$$10\log_{10}(64) = 18.06 \text{ dB} \quad (1)$$

假設每個單元天線增益 $\approx 5-7$ dBi(常見 patch 元件)，則

$$G_{total} = G_{element} + G_{array} \quad (2)$$

$$\approx 6 + 18 = 24 \text{ dBi}$$

在 3GPP TR 38.901[4]指出，基站天線增益常取 24 dBi。故本文將 5G 中 Tx 端設為 24 dBi。

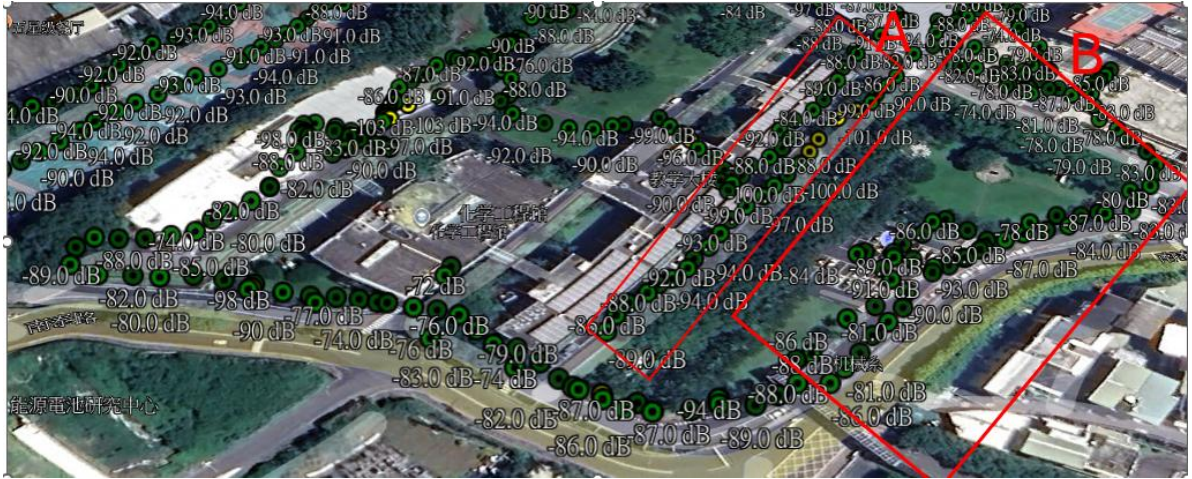


圖 4. 校園訊號強度量測局部放大圖 1



圖 5. 校園訊號強度量測局部放大圖 2

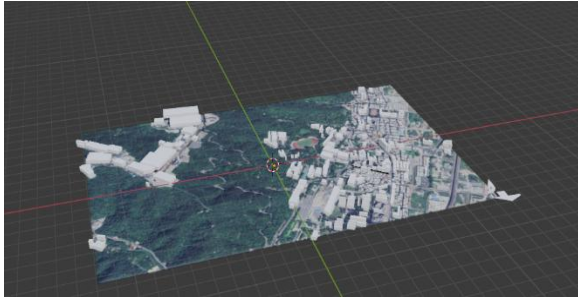


圖 6. blender 學校區域示意圖

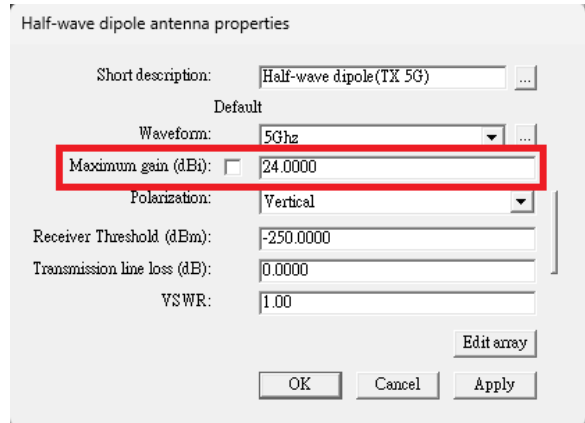


圖 8. TX 端天線設置

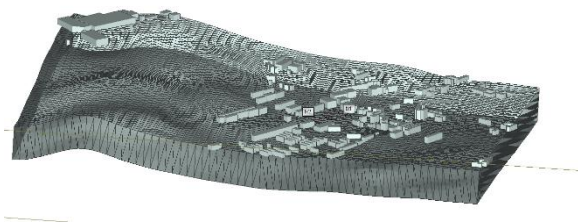


圖 7. Wireless Insite 校園區域戶外建模

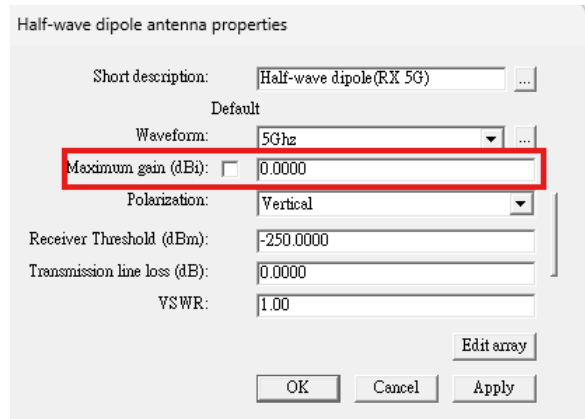


圖 9. RX 端天線設置

本文所用之手機端(UE)Rx 天線增益設置為 0 dBi 如圖 9 所示，另外在 3GPP TR 38.901[4]中，指出 UE 天線增益為 0 dBi。

使用 Wireless Insite 建模完成後，設定完相關參數，開始模擬，如圖 10 所示，Wireless Insite 可以看到每個訊號經的路徑與折射反射狀況。

模擬結束後再將模擬結果儲存於 excel。而後使用 python 進行轉檔與程式撰寫，最終用 Google Earth Pro 畫出學校的訊號強度分佈，如圖 11 到 13 所示，圖 11 為總圖，圖 12 與 13 為局部放大圖。

在實地量測時每個地方的訊號強度都會在一個誤差範圍內來回搖擺不定，這個誤差值大約為正負 5 dBm 左右，而模擬出來的數據除了極個別區域因地形以及樹木等環境影響，大部分區域與量測數據對比都在誤差值以內。

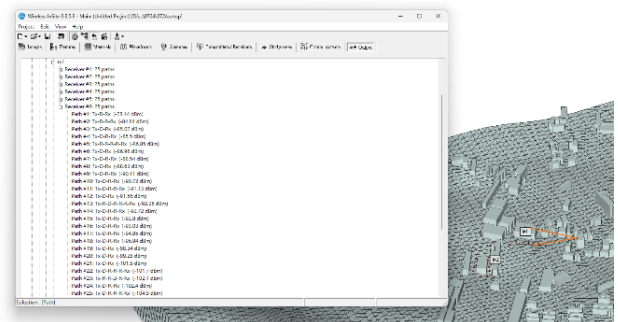


圖 10. Wireless Insite 模擬示意



圖 11. 校園訊號強度模擬總圖



圖 12. 校園訊號強度模擬局部放大圖 1

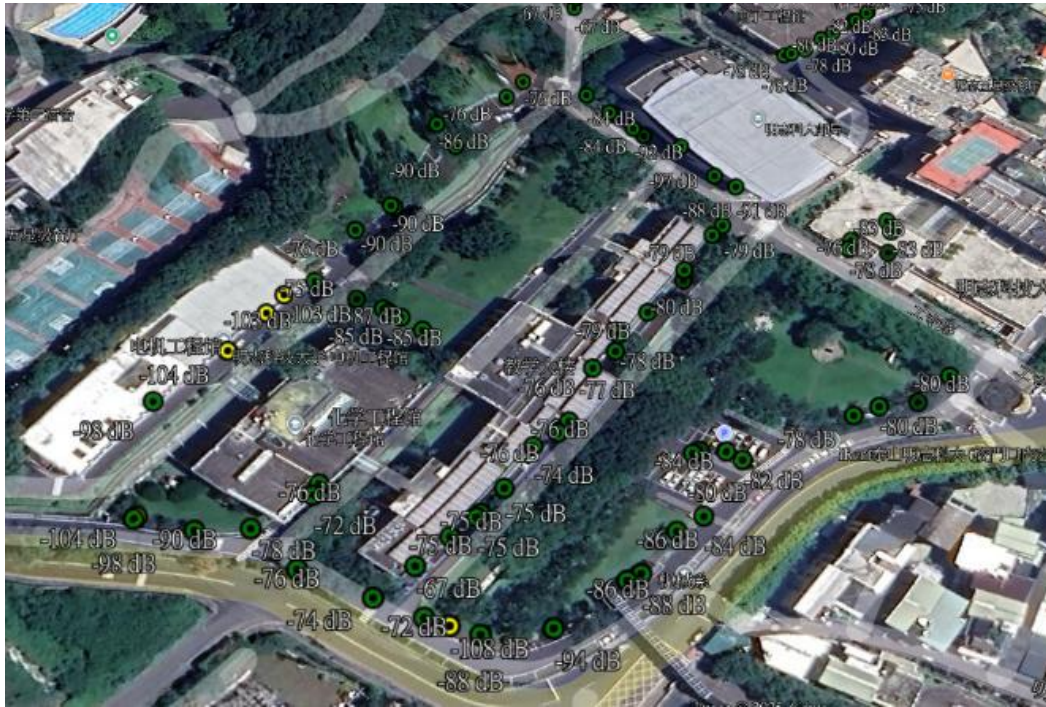


圖 13. 校園訊號強度模擬局部放大圖 2

5. 模擬與量測結果分析

為方便比較，本文將模擬結果畫成熱力圖，圖 14 為校園訊號強度量測熱力圖，圖 15 為校園訊號強度模擬之熱力圖。

圖 16 由經度 $121.419957^{\circ}\text{E}$ 至 $121.422706^{\circ}\text{E}$ 、緯度 $25.039818^{\circ}\text{N}$ 至 $25.043531^{\circ}\text{N}$ 之研究區域內量測值與模擬值差異之空間分布。該區域總面積約為 113,312 平方公尺。本文將其均勻劃分為 50×50 之規則網格，共 2,500 個子區塊，每一網格面積約為 45.3 平方公尺。

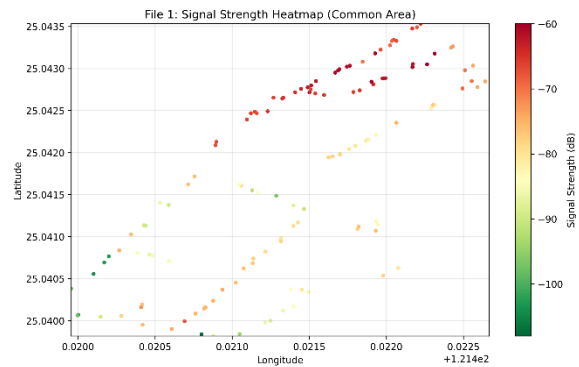


圖 15. 校園訊號強度模擬熱力圖

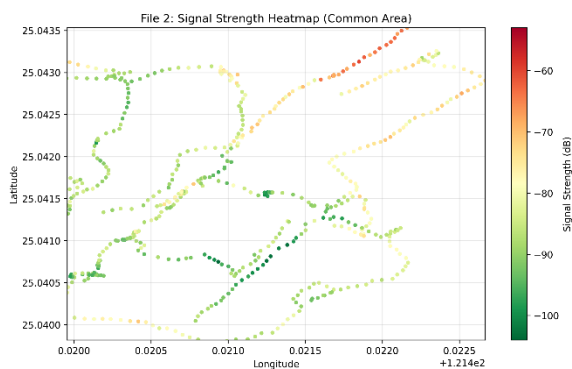


圖 14. 校園訊號強度量測熱力圖

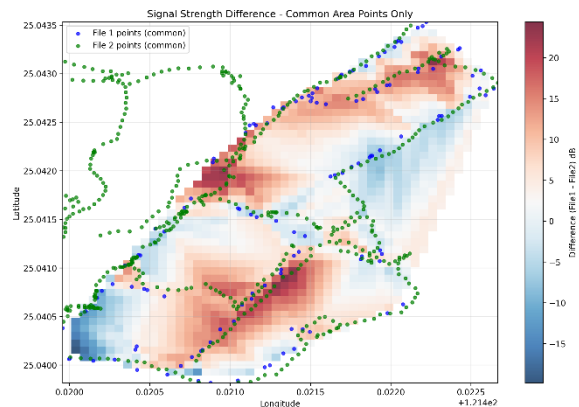


圖 16. 校園訊號強度差異熱力圖

由於實際量測點為不規則分布之離散資料，為建立連續之空間差異分布，本研究首先對所有量測點座標進行 Delaunay 三角剖分。Delaunay 三角剖分之特性為：任一三角形之外接圓內不包含其他量測點，可有效避免產生狹長三角形，進而提升數值穩定對於研究區域內任一欲估算之網格節點，首先判定其所屬之 Delaunay 三角形。設該三角形三頂點分別為 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3)$ ，其對應之量測與模擬差異值為 V_1 、 V_2 、 V_3 。

任一位於該三角形內之點 $P(x, y)$ ，可表示為三頂點之重心座標（Barycentric Coordinates）線性組合

$$P = \lambda_1 P_1 + \lambda_2 P_2 + \lambda_3 P_3 \quad (3)$$

其中： $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ ， $\lambda_i \geq 0$ 。因此，該網格節點之差異估計值可表示為：

$$V_{(x,y)} = \lambda_1 V_1 + \lambda_2 V_2 + \lambda_3 V_3 \quad (4)$$

上述方法本質上是一種分段線性插值。可以把它想像成把整個區域拆成許多小三角形，然後在每個三角形內以三個頂點的數值做線性加權，來估算三角形內其他點的值。使其在各三角形內維持空間連續性，此種方法適合不規則量測點。

由圖 16 可觀察到，顏色較深之區域代表量測與模擬差異較大。此現象主要源於實際環境中存在特殊地區。例如，高大且茂密之樹木會造成額外吸收損耗與多重散射；此外，狹窄道路旁停放之車輛亦可能形成暫時性遮蔽物，改變電波傳播路徑與多徑特性。上述因素皆可能導致局部區域產生較顯著之偏差。

圖 17 為 2500 個網格內，模擬與量測差異分布的直方圖，X 軸為 dBm 值，Y 軸為出現的個數，可以觀察到模擬與量測的單位訊號的差，也就是用單一區域範圍內來觀察，每個網格內的平均差值為 6.85 dBm，很符合實際量測情況，首先實際量測時數據本就會有波動，波動值約為正負 5 dBm，而且學校有的區域內的樹木高大且茂密，本就會有些許差值，可以參考圖 15 之熱力圖。

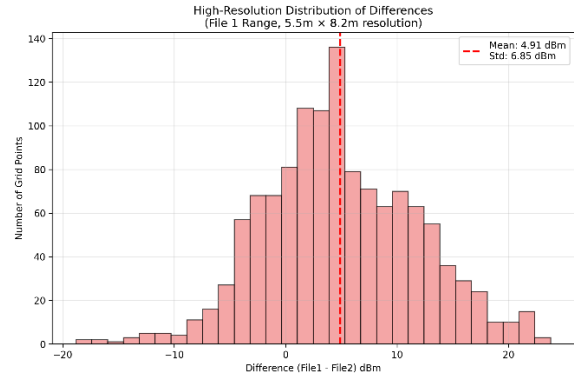


圖 17. 校園訊號強度差異分布直方圖

6. 結論與未來展望

本研究成功利用射線追蹤模擬軟體 Wireless Insite，於複雜校園環境中實現了 FR1 頻段的訊號強度與覆蓋範圍模擬。為驗證其準確性，我們進行了實地量測，結果顯示模擬與量測數據之趨勢高度一致，部分區域觀察到約 20 dBm 之誤差。此誤差源自於動態環境因素等，如：校園中狹小的通道且旁邊停了車，以及狹小通道旁有著高大的樹木，此為本研究之重點也為以後 FR3 模擬中提供了修正誤差值的樣本。

儘管存在局部誤差，本研究的重要性在於建立並驗證了一種可經由實測數據檢驗的模擬方法，使模擬結果能更可靠地反映實際環境下的訊號分布特性。進行高頻段通道分析之可行性。據此，對於尚未佈建之未來頻段（如 FR3），本研究提供了一種有效之預評估手段，可藉由建立精確模型進行模擬，並納入本研究發現之誤差範圍作為修正預估，從而對基地台佈局與訊號覆蓋進行可靠之前期分析與規劃。

本研究所採用之模擬驗證方法，具備良好的可擴展性，不僅適用於 FR1 頻段，更為分析未來 FR3 頻段及低軌道衛星通訊等複雜場景提供了堅實基礎。後續研究將聚焦於提升模型精度，並將此框架應用於上述新興領域。

7 參考文獻

- [1] T. S. Rappaport *et al.*, "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 78729–78757, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2921522.
- [2] A. Sacchetti and M. Oscity, "An Innovative Method to Treat Very Small Apertures in Ray-Tracing Simulations," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 4, pp. 46–50, 2023, doi: 10.1109/OJAP.2022.3229306.
- [3] M. M. Taygur and T. F. Eibert, "A Ray-Tracing Algorithm Based on the Computation of (Exact) Ray Paths With Bidirectional Ray-Tracing," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 8, pp. 6277–6286, 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2983775.
- [4] (3GPP), "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16)," 3GPP, Sophia Antipolis, France, 3GPP TR 38.901 V16.1.0, Dec. 2020 2020. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm>