

偏遠山區的防火新藍圖

TVWS 通訊網絡的建構與實踐

文、圖／邱大福（總泰技術整合有限公司總經理）

彭奕嘉（通訊作者 | 林業及自然保育署保育企劃組設計師）

星星之火，足以燎原，林火一直是威脅山林資源安全的主要禍患，在偏遠山區，即便是微小的火源也可能迅速蔓延，演變成難以控制的大火。一旦延誤最佳的撲滅時機，林火將無情吞噬一切，造成難以彌補的生態浩劫和財產損失。

造成林火難以遏制的重要原因之一，就是偏遠山區的寬頻通訊基礎設施不足。雖然現有的無線電系統在緊急通訊中發揮著重要作用，但在支持大規模數據傳輸和遠程監控等方面仍有局限。一旦發生火情，救援人員和監控系統可能無法及時獲知詳細資訊，也難以進行高效的資源調度。即便當地發現火情，傳遞詳細警報的途徑也可能受限。救援人員在趕赴現場的過程中，火勢可能就已經失控，形成不可逆的火災浩劫。

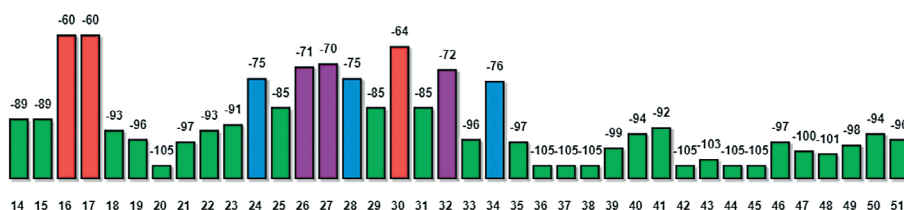
此外，山區複雜的地形也為救援隊伍之間的通訊帶來挑戰，影響指揮調度的效率。長期以來，如何在偏遠山區建立全面而高效的通訊網絡一直

是山區防火工作面臨的難題。隨著科技的發展，一些新興技術為解決這一困境帶來新的可能性，其中TVWS（無線電視空白頻譜）無線通訊技術引起我們的關注。

本文介紹利用TVWS這一新興技術，在林火高風險區域建置專用骨幹通訊網絡的初步研究過程。此外，也分享4年來的測試數據和初步成果，探討TVWS技術在補充現有通訊系統、增強山區防災能力方面的潛在價值。同時，也將客觀分析這項技術在實際應用中可能面臨的挑戰，為未來更深入的研究和實踐提供參考。

TVWS 技術背景簡介

TVWS（Television White Space）中文全稱為「無線電視空白頻譜」。顧名思義，它是指在無線電視廣播傳輸使用的頻譜中，某些特定頻道處於閒置或未被其他用戶占用的「空白」狀態。這些被閒置的頻譜資源，正是TVWS技術的核心所在。



■ TVWS 設備掃描結果範例圖

傳統電視無線廣播採用的是在 470—806MHz 的頻段，用於傳輸視訊和音訊數據。但實際上，這一頻段內仍有部分頻率會被閒置或空置，未被電視臺有效利用，成為所謂的「White Space/ 空白頻譜空間」。

TVWS 技術的關鍵在於，通過智慧終端設備，動態地感知這些閒置頻譜，並將它們二次使用於數據傳輸。也就是說，在不干擾電視播放訊號的前提下，我們可以在這些「空白頻譜」上疊加建設新的無線數據通路。

傳統 Wi-Fi 與 TVWS 無線網路比較

相較於傳統 Wi-Fi 無線網路，TVWS 擁有顯著的技术優勢：

- 距離遠：TVWS 所使用的 470 — 698MHz 頻段，較 2.4G / 5G WiFi 和 4G / 5G 頻段低很多，波長較長，傳輸距離更遠，覆蓋範圍也更廣，實測可達 20 公里以上。
- 穿透力強：低頻長波訊號穿透建築物、樹木的能力更強，不易被地形地物阻隔。
- 抗干擾能力佳：低頻段訊號對多徑效應和障礙物遮蔽的抗干擾能力更好，傳輸更加可靠。

- 部署迅速彈性大：無需龐大的基礎工程且低功耗，在有電源的情況下就能快速架設基地臺通訊節點，設備成本及維運成本都較微波低。
- 智能調頻共享：TVWS 設備可利用外部擴展掃描裝置自動在數位部核發的頻率下尋找最佳可用頻道，實現頻率有效共享，避免干擾。

TVWS 與手持式無線電中繼站系統的比較

在討論 TVWS 技術的應用前，有必要將其與目前廣泛使用的手持式無線電中繼站系統進行比較。這 2 種技術在山區通訊中各有特點，理解它們的差異和互補性對於全面提升山區通訊能力至關重要。



■ TVWS 技術利用為山區防火工作帶來新的可能性（豐年社提供）

■ 手持式無線電＋中繼站系統

優勢

- 可靠的語音通訊：在中繼站架構下可增加覆蓋面積，緊急情況時提供即時、清晰的語音通訊。
- 便攜性強：設備輕便，易於攜帶和快速部署。
- 低功耗：電池續航時間長，適合長時間野外作業。
- 成熟技術：操作簡單，維護成本相對較低。

局限性

- 帶寬有限：主要用於語音通訊，不適合大量數據傳輸。
- 覆蓋範圍受限：在複雜地形中，訊號可能受到嚴重衰減。
- 擴展性有限：難以支持複雜的網絡拓撲和多媒體應用。

■ TVWS 技術

優勢

- 長距離傳輸：訊號覆蓋範圍廣，適合大面積山區。
- 高帶寬：能夠支持影片監控、數據傳輸等高帶寬應用。
- 穿透能力強：訊號能夠穿透少數樹木和部分地形障礙。
- 靈活的網絡拓撲：可以建立複雜的網絡結構與介接不同系統（如 LoRa^{註1}），支持多種網路化的系統應用。

局限性

- 技術相對新穎：實際應用經驗較少，可能需要更多的測試和驗證。
- 初始部署成本較高：需要專業的設備和技術支持。
- 受頻譜管理影響：使用需要符合相關法規和獲得許可。

■ TVWS 和無線電系統的互補關係

TVWS 技術並非旨在完全取代現有的無線電系統，而是作為補充技術，以彌補現有系統的不足。2 種技術的結合可能為山區通訊帶來更全面的解決方案：

- 應急通訊與日常監控：無線電系統可繼續作為主要的緊急語音通訊工具，而 TVWS 可用於支持日常的數據傳輸和遠程監控。
- 近距離與遠距離通訊：在近距離通訊中，手持式無線電可能更為便捷；而在需要覆蓋大面積區域時，TVWS 的長距離傳輸優勢則可得到充分發揮。
- 網絡冗餘：2 種系統可以相互備份，提高整體通訊網絡的可靠性和韌性。
- 資源優化：在不同的應用場景中，可以根據實際需求選擇最適合的通訊方式，實現資源的最優配置。

TVWS 技術的特性使其在山區和偏遠地區的通訊應用中展現出潛力，特別是在提供高速寬頻通訊方面。相較於某些傳統方式，TVWS 有可能以相對較低的成本建立覆蓋範圍更廣的無線

註 1：LoRa（Long Range）是低功耗、遠距離的無線通訊技術，適用於物聯網應用。

接入網路。這種技術可能為山區防火工作提供新的通訊解決方案，有助於加強監控、預警和救援行動的通訊基礎。

然而，重要的是要認識到 TVWS 技術在實際應用中仍處於探索階段。它並非旨在完全取代現有系統，而是作為一種補充技術。將 TVWS 與現有的無線電系統結合使用，有望創造出一個更加全面、可靠的山區通訊網絡。這種結合可能為林火預防和控制提供更多樣化的技術支持，但仍需要通過更多的實踐和研究來驗證其實際效果和可行性。

未來的研究和實踐將進一步明確 TVWS 技術在山區通訊中的具體應用方式和效果，以及如何最佳地與現有系統協同工作，從而為山區通訊帶來實質性的改善。

山區 TVWS 網路建置實務與測試驗證

為探索解決山區寬頻通訊難題的可能方案，我們圍繞 TVWS 這一新興技術開展為期 4 年的初步研究。這些研究旨在評估 TVWS 技術在山區環境下的應用可行性，為未來可能的大規模部署提供初步參考。

在這 4 年中，我們進行一系列探索性實驗，主要目的是初步驗證 TVWS 技術在山區特殊環境下的性能表現。這些實驗涵蓋多個面向，包括：

- 基站選址可行性評估
- 頻譜管理策略研究

- 網絡性能初步測試
- 物聯網應用潛力探索
- 與其他通訊技術的互補性研究

這些實驗的設計著重於收集初步數據和實際操作經驗，而非提供成熟的解決方案。我們謹慎地解讀實驗結果，避免過度推論。

值得注意的是，低軌道衛星網路作為一個潛在的互補技術也在我們的研究範圍內，但由於服務至今尚未在臺灣正式開通，我們僅進行了理論分析，尚未進行實機測試。

通過這些初步研究，我們希望能夠為 TVWS 技術在山區應用的可行性提供一些初步見解，同時也認識到還需要更多深入的研究和長期的實地測試，才能全面評估這項技術在實際應用中的效果和可能面臨的挑戰。

山區無線寬頻網路及物聯網技術整合可行性評估計畫

本計畫擇定於明池、塔曼山、四陵及拉拉山地區建立了一個小規模的 TVWS 網絡傳輸架構，旨在初步驗證 TVWS 技術在山區環境下的適用性和性能表現。該專案測試關鍵指標如訊號強度、可用頻道掃描、傳輸速率和覆蓋範圍，同時評估了直視（LOS^{註2}）和非直視（NLOS^{註3}）傳輸情況下的通訊品質。

經實測顯示，如果連線品質達到 MCS7^{註4} 時，節點間的網路速度可達該設備使用 6MHz 帶寬的最高值

throughput^{註5}=21.7Mbps，且 SNR^{註6} = 66 左右，是非常穩定的連線。

以攝影機監控應用來說，前揭頻寬可順利同時傳送 2 支攝影機最高影像均為 1920×1080 H.264 / 30fps 經 VPN 傳到中心端，並可遠端操作 PTZ 攝影機^{註7} 做轉向等操控，滿足物聯網大數據影像高速傳輸需求。

本專案項目的主要成果包括：

- 初步驗證 TVWS 技術在山區環境下的可行性
- 獲得寶貴的網絡參數測試數據
- 識別影響 NLOS 傳輸的主要因素，為後續優化奠定基礎

山區無線寬頻網路頻譜動態接取技術與布建區位研析

基於前一階段的成果，我們進一步研究頻譜資源的動態管理和高效利用方式。並於拉拉山生態教育館、李棟山及塔曼山地區部署頻譜動態掃描設備，透過實時監測頻譜使用情況並進行大數據分析，優化頻段分配策略，顯著提高頻譜利用率。此外，我們也研究制定高



■ 測試點分布（含 NLOS）

效可行的 TVWS 網路規劃藍圖和基站部署方案，為後續大規模建網做好準備。

本專案項目的主要成果包括：

- 提出動態頻譜接取和管理方案
- 顯著提升頻譜資源利用效率
- 研究出高效的網絡拓撲和基站部署策略

山區無線寬頻網路建置及低軌衛星技術研析案

基於前期成果，本案規劃在林業及自然保育署新竹分署轄下山區建立一個實測規模的 TVWS 無線通訊網絡，用以驗證 TVWS 超遠距離傳輸的能力（實測通訊距離 > 40 公里）及實測物聯網應用，作為往後設計 TVWS 骨幹網路的參考。

此外，我們還研析低軌道衛星通訊技術在偏遠山區通訊中的應用可行性，探索低軌衛星和 TVWS 網絡相互互補的可行性。

本專案項目的主要成果包括：

- 建成實測規模的 TVWS 無線通訊網絡
- 驗證物聯網數據在 TVWS 網絡上的高速傳輸能力
- 評估低軌道衛星技術在山區的應用潛力

山區無線寬頻網路應用於霞喀羅步道通訊研析案

除技術驗證外，我們高度重視 TVWS 在實際應用場景的表現。本案

註 2：LOS（Line of Sight）：視線可及，指發射器和接收器之間沒有障礙物的直接通訊路徑。

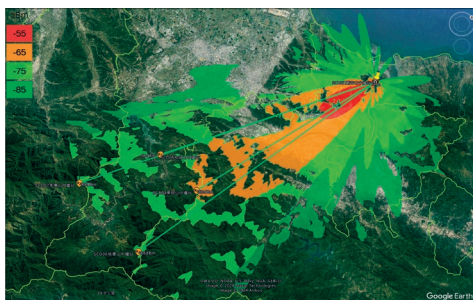
註 3：NLOS（Non-Line of Sight）：非視線可及，指發射器和接收器之間存在障礙物的通訊情況。

註 4：MCS7（Modulation and Coding Scheme 7）：一種特定的調製和編碼方案等級，用於無線通訊中以平衡數據速率和可靠性。

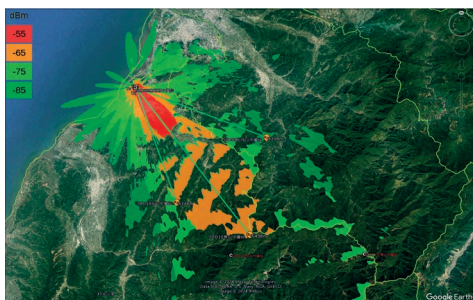
註 5：Throughput：吞吐量，指在給定時間內成功傳輸的數據量。

註 6：SNR（Signal-to-Noise Ratio）：訊雜比，表示有用信號強度與背景雜訊強度的比值。

註 7：PTZ 攝影機（Pan-Tilt-Zoom Camera）：能夠進行平移、傾斜和縮放的攝影機，用於靈活的遠程監控。



■ 觀音山中繼臺 BTS1 網絡各鏈路餘量及訊號涵蓋範圍圖



■ 東崎頂中繼臺 BTS2 網絡各鏈路餘量及訊號涵蓋範圍圖

開展相關探究，在霞喀羅步道沿線部署 TVWS 語音通訊和監控系統，為登山者提供高品質語音通話及安全監控保障。將可提供清晰流暢的語音通話和實時影片傳輸無虞，充分滿足山區多樣化通訊需求。

本專案項目的主要成果包括：

- 在霞喀羅步道區域部署 TVWS 網絡
- 建立語音通訊和設備監控系統
- 顯著提升登山安全和應急通訊水準

4 年 4 個研析案項目實踐過程中，分別從不同角度驗證和探索 TVWS 技術在山區環境下的應用潛能，全面驗證 TVWS 技術在山區建設寬帶通訊骨幹網絡的穩定性和可靠性，同時也積累寶貴的規模建網經驗和大量技術數據，為開始在林火高風險地區大規模部署奠定扎實基礎。不僅如此，我們

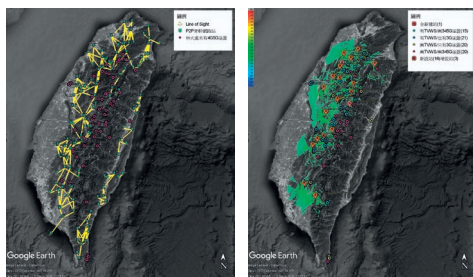
也汲取寶貴的經驗和技術數據，將為 TVWS 網絡的大規模部署提供重要借鑒。相信隨著技術的不斷演進和經驗的持續積累，TVWS 必將成為山區應急通訊的重要支撐力量。

我們將在前期工作基礎上，持續完善山區智慧防火體系各項應用，充分發揮 TVWS 防災減災領域的作用。我們有理由相信，TVWS 將成為推動山區防火現代化的核心動力，有望從根本上改變人類與大火對抗的被動局面，並助力山區物聯網應用系統無障礙地接入 TVWS 骨幹寬頻網路，共享數位紅利。

TVWS 林火高風險網路建置及應用

為全面強化林火高風險山區通訊韌性，並基於前期執行成果，林業及自然保育署於 2023—2025 年辦理林火高風險山區無線寬頻建置案，以建置完成後可涵蓋過往 10 年間無 3G 及 4G / 5G 網路訊號之林火發生點 70% 為目標，建置 TVWS 無線網路。目前挑選骨幹網路站及其覆蓋範圍大小對照林火發生處（無 4G / 5G）相關位置，如下圖所示：

2011 年 1 月—2022 年 9 月期間，林火統計資料，林火發生共 455 件（處），其中 8 筆未有 GPS 座標，發生林火處的 GPS 座標有效資料共計 447 處，其中沒有 4G + 5G 訊號涵蓋林火處共 76 處，依照電腦模式模擬結果本



■ 林火發生處與 TVWS 骨幹
鏈路分布圖

■ 林火發生處與 TVWS 訊號
覆蓋站訊號涵蓋圖

案規劃 26 個 TVWS 覆蓋站即可把林火發生處涵蓋率提升為 71.0—78.9%，達到專案目標覆蓋率 70% 以上。

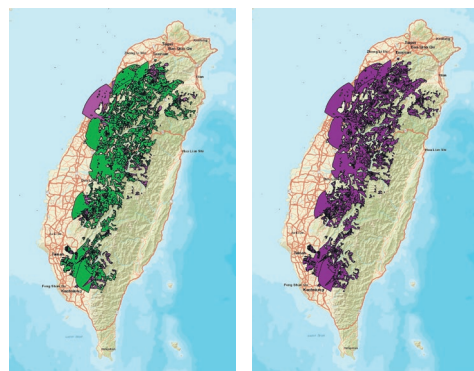
可利用 GIS 地理資訊系統計算骨幹網節點 BTS^{註9} 及覆蓋站 BTS 訊號涵蓋面積，本案建置 TVWS BTS 訊號涵蓋總面積：

$$\begin{aligned} & \text{訊號涵蓋面積 @-80dBm} \\ &= 8,508,862,225.99 \text{ 平方公尺} \\ &= 8,508.86 \text{ 平方公里} \end{aligned}$$

TVWS 骨幹寬頻通訊網絡的建立可能為林火防控提供新的技術支持。以下是一些可能的應用場景，但需要注意，這些都是基於 TVWS 技術潛力的初步設想，實際效果還需要進一步的研究和驗證。

林火預警監控系統概念

由多種監測設備組成，包括林火視訊監控、煙霧氣體監測、山區氣象站等，全部透過 TVWS 網絡聯通。一旦監控到可疑火點或異常煙霧，系統就會自動拉近鏡頭追蹤，同時向指揮中心推送畫面。指揮官可遠程查看火場環境



■ 骨幹網節點 BTS 及覆蓋
站 BTS 各別涵蓋面積圖

■ 骨幹網節點 BTS 及覆蓋站
BTS 涵蓋圖面積 Union 圖

並研判林火行為，判斷事態嚴重性，必要時立即發出警報，調度救援力量。

救火通訊輔助系統

TVWS 網路可為救火人員提供額外的通訊選擇，增強現有系統的能力。這些選擇可能包括數據傳輸、位置共享等功能，有助於補充現有的無線電通話系統。然而，在緊急情況下，依然需要依賴經過驗證的可靠通訊方式。

透過 TVWS 網路，指揮中心能夠接收救火隊員傳回的火場環境數據，並據此指揮滅火行動。救火隊員也可實時回報火勢變化，並上傳現場圖像和影像，以請求增派支援。更重要的是，前進指揮中心能通過 TVWS 網路的 SIP 電話^{註8} 與總指揮中心保持連線，隨時獲取最新情況，確保救援行動中不會出現通訊盲區。

未來智慧防火體系的可能發展方向

基於 TVWS 網路，未來可能會整合更多技術，構建更全面的防火系統。

註9：BTS（Base Transceiver Station）：基站收發信臺，是移動通訊網絡中負責與移動設備進行無線通訊的固定站點。

註8：SIP 電話（Session Initiation Protocol Phone）：使用 SIP 協議的網絡電話，支持基於 IP 的語音通訊。

這可能包括以下幾個方面：

1. 環境監測：部署更多類型的監測設備。
2. 數據分析：利用大數據和機器學習技術進行風險評估。
3. 協調指揮：提高救援行動的協調效率。
4. 智能設備：探索無人機、無人車等設備在救火中的應用。

這些想法代表了山區防火技術可能的發展方向。TVWS 通訊網絡可能在其中扮演重要角色，但實現這一願景還需要長期的研究、測試和跨領域合作。我們期待通過持續的努力和創新，逐步提升山區防火能力，但同時也要認識到，這是一個漸進的過程，需要謹慎評估每一步的實際效果。

看見山區防火系統的可能性

經過多年的試點研究，TVWS 技術在山區通訊網絡建設方面展現了一定的潛力。未來，將進一步探索 TVWS 網絡在山區的應用可能性，逐步擴大試點範圍，為可能的林火智慧防控系統奠定基礎。我們的長期目標是在重點山區部署 TVWS 通訊網絡，但這一過程需要謹慎推進，並根據實際效果不斷調整。

在推進 TVWS 技術應用的過程中，預計會面臨諸多挑戰，這些挑戰需要在實際部署過程中認真面對並尋求解決方案。包括但不限於：

- 頻譜資源管理：需要與現有的無線電服務協調使用有限的頻譜資源。

- 電源供應：在偏遠山區提供穩定電源是一個重要問題。
- 網絡安全：確保通訊網絡的安全性和可靠性。
- 山區施工難度：氣候因素和地形條件給施工帶來挑戰。
- 人才培養：需要培養具備相關技能和體能的專業人才。

TVWS 技術除了在山區防火方面有潛在應用外，也可能在其他防災領域和偏遠地區通訊覆蓋方面發揮作用。然而，需要通過更多的研究和實踐來驗證其實際效果。這項新興技術可能為改善山區通訊環境提供新的思路，但我們也應該認識到，它是對現有通訊系統的補充，而不是完全的替代。

山區智慧防火只是 TVWS 技術眾多潛在應用中的一個方向。期待這項技術能在更多領域中得到探索和應用，為解決各種通訊難題提供新的可能性。然而，也應該保持審慎態度，認識到從理論到實際應用之間可能存在的差距，需要持續研究、測試和改進。

TVWS 技術為我們提供了一個新的視角來思考和解決山區通訊問題。通過持續的創新和務實的態度，希望能逐步改善偏遠地區的通訊條件，為建設更智能、更安全的山區防火系統做出貢獻。這是一個長期的過程，需要各方面的努力和合作。我們將繼續關注這項技術的發展，並在實踐中不斷總結經驗，推動其在適當領域的應用。🌱