

全球太赫茲革命：推動 6G 通訊的技術突破與未來挑戰

The Global Terahertz Revolution: Driving Technological Breakthroughs and Future Challenges in 6G Communications

September 17,



IEK Consulting

朱財生 Tsai-Sheng Chu



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute

全球太赫茲革命：推動 6G 通訊的技術突破與未來挑戰

The Global Terahertz Revolution: Driving Technological Breakthroughs and Future Challenges in 6G Communications

朱財生 Tsai-Sheng Chu



太赫茲射頻技術作為未來 6G 通訊的關鍵組成部分，擁有超大頻寬和極低延遲的特點，將推動數據傳輸速率達到每秒數千 Gbits(Giga Bits)，並大幅提升無線通訊系統的性能。太赫茲射頻技術的商業化面臨諸多挑戰，包括高成本、技術難題以及頻譜管理等問題。隨著材料科學、半導體技術和積體電路的進步，太赫茲射頻技術逐漸走向商業化。隨著 6G 的發展，太赫茲波將在無線通訊、醫療成像、安全等多領域發揮作用，帶來數萬億美元的市場機會。全球各國和企業積極進行太赫茲射頻技術的研究與開發，並展開跨領域合作，促進技術突破與創新，產業鏈的協同發展，從基礎材料到通訊設備的協作，將加速太赫茲射頻技術的實現。隨著政策支持和標準化工作的推進，未來太赫茲射頻技術將在 6G 通訊網路中占據重要地位。

一、概論：太赫茲技術與未來通訊需求

6G (第六代行動通訊技術) 是未來通訊領域的核心技術，預計將在 2030 年左右開始實現商用，相比 5G，6G 的願景不僅是提升數據傳輸速率和網路容量，還包括實現更高的可靠性、超低延遲、無處不在的連接和智慧化的服務。隨著物聯網 (IoT)、人工智慧 (AI)、虛擬現實 (VR)、增強現實 (AR) 等技術的快速發展，對通訊技術的需求不斷提升，尤其是在高速、大容量和低延遲等方面，6G 的目標是支持萬物互聯、智慧化運作和全球範圍的高效連接，成為未來智慧城市、智慧交通、智慧醫療等領域的基礎設施。

(一) 6G 概述與發展背景

6G 的演進是建立在 5G 基礎上的，5G 主要解決的是大範圍覆蓋、超高速率 and 低延遲的需求，而 6G 則進一步追求極致的性能提升，特別是 6G 將致力於打破目前通訊系統的瓶頸，如數據傳輸的極限和頻譜資源的不足等問題，隨著通訊需求的日益增長，太赫茲頻段被視為實現 6G 目標的重要技術之一。太赫茲射頻技術能夠提供更寬的頻譜和更高的數據傳輸速率，是實現 6G 超高頻寬和超低延遲的重要依靠，在這樣的背景下，6G 的研究和發展成為全球通訊領域的重大戰略性課題，世界各國的科研機構、企業和政府部門都在積極投入資源，力求在 6G 技術上取得領先地位，6G 技術的成功實現，將為全球經濟和社會發展帶來深遠影響，尤其是在推動智慧化、數位化和可持續發展等方面，隨著科技的進步，我們也看到了對太赫茲射頻技術日益重視的趨勢，太赫茲射頻技術由於其極高的頻率和頻寬，能夠支持更高效的數據傳輸，並解決當前通訊技術中存在的瓶頸問題，通過太赫茲射頻技術，因能實現更低的通訊延遲，從而滿足未來社會對極致網路體驗的需求。

(二) 核心需求與挑戰

6G 的核心需求可以概括為五大方向：極高速率、大容量、低延遲、高連接適應性和高度智慧化，這些需求直接驅動著 6G 技術的發展方向，也提出了前所未有的挑戰，首先極高速率是 6G 的一個基本要求，相比 5G 的最高峰值速率達 20Gbps，6G 預計將達到 1000Gbps 甚至更高，這一目標的實現需要通訊頻譜資源的極大擴展，並且需要依賴太赫茲頻段的引入，太赫茲頻段的頻寬遠遠超過毫米波，可以為 6G 提供所需的超高速率，但這也意味著對相應的頻譜規劃、技術標準以及設備的需求極為苛刻。

其次，大容量是 6G 的一項關鍵需求，隨著連接設備數量的激增，尤其是在物聯網和智慧 3C 設備日益普及的情況下，6G 必須支持大規模設備的高效能連接，這不僅要求更高的數據傳輸速率，還需要更精確的頻譜管理和資源分配技術，以確保不同設備間的無縫協作和數據串流的高效能傳輸，太赫茲射頻技術能夠提供極大的頻寬，對於大容量的需求來說非常重要，但如何在保持訊號穩定的同時，解決太赫

茲頻段易受大氣衰減影響的問題，特別是水蒸氣會顯著吸收太赫茲訊號，這限制了其有效傳輸距離，因此，如何克服這一挑戰並實現太赫茲射頻技術的長距離穩定通訊，將是未來研究的重要方向。

低延遲是 6G 通訊中的又一關鍵需求，6G 將被應用於如自駕車、遠端醫療、智慧製造等領域，這些應用都要求極低的延遲和即時回應，5G 的延遲已經降至毫秒級，但 6G 的目標是實現次毫秒級的延遲，這需要在網路架構、數據傳輸協議以及硬體設施等方面進行創新與變革，太赫茲射頻技術由於其高頻特性，能夠大幅提升傳輸速率，從而有助於降低延遲，但這也意味著需要在太赫茲射頻技術的網路部署和基站設計上做出新的突破。

(三) 太赫茲頻段

太赫茲頻段，通常指的是 0.1 到 10 THz 的頻率範圍，位於微波和紅外線之間，由於其頻譜廣泛，此頻段具有比毫米波更大的頻譜資源，能夠提供更高的數據傳輸速率，是實現超高速通訊、低延遲和高容量的理想選擇，與現有的 5G 頻段相比，太赫茲頻段的傳輸速率可以提高幾十倍，數據傳輸速率理論上可以達到每秒數十 Gbps，遠超 5G 的上傳速率，因此能夠支持大量高頻的應用場景，如超高清視訊、全息通話、大規模數據傳輸等。

二、太赫茲射頻技術基礎

與毫米波 (24 GHz 至 100 GHz) 相比，太赫茲波能提供更大的頻寬，這使得它在實現超高速數據傳輸方面具備了優勢，太赫茲頻段具有獨特的物理特性，比如能夠穿透非金屬物體 (如衣物、紙張等) 以及某些塑膠材料，因此在無線通訊、安檢掃描等領域具有潛在應用。

(一) 太赫茲射頻技術的基本原理

太赫茲射頻技術的基本原理基於對超高頻訊號的生成、傳輸和接收，這一技術通常依賴於半導體材料、超導材料或量子技術來實現高效的太赫茲波產生和控制，太赫茲波的頻率範圍非常高，要生成這些訊號，傳統的電子設備往往無法滿足太赫茲波段的要求，因此需要專門設計的高頻元件，例如訊號源和太赫茲天線，這些元件通常利用高頻半導體材料或特殊的超導結構來工作，以產生所需的高頻訊號並確保其穩定傳輸。

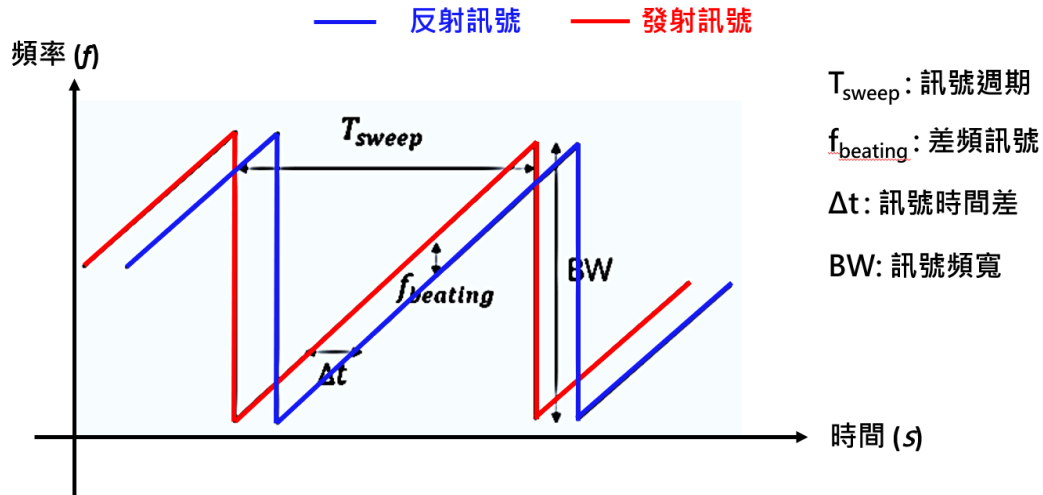
在太赫茲射頻技術中由於波的傳播損失，這限制了其在長距離通訊中的應用，因此，太赫茲通訊系統需要精心設計的傳輸路徑和頻譜管理策略來減少衰減影響，

此外太赫茲訊號在傳輸過程中對抗干擾的能力也相對較弱，這要求在設計太赫茲通訊系統時，需要特別考慮干擾抑制技術以及多徑效應的影響，儘管存在這些挑戰，但隨著技術進步，越來越多的突破使得太赫茲射頻技術在實際應用中變得可行。太赫茲波的生成通常依賴於兩種主要技術：非線性光學效應和半導體源。

1. 非線性光學效應：一種利用光波相互作用生成太赫茲波的技術，在此過程中，兩個不同頻率的光波相遇並相互作用，通過差頻產生太赫茲波，這種差頻生成 (Difference Frequency Generation, DFG) 方法通常使用高功率光源來提供兩個光波，並使它們在非線性晶體中交互作用，產生太赫茲波。
2. 半導體源：在高頻半導體材料 (如砷化鎵 GaAs 或氮化鎵 GaN) 中，當電子被加速到非常高的速度時，會輻射出太赫茲波，這一過程通常使用高速電子元件，如太赫茲光檢測器或高頻釋放源 (THz emitters)，這些半導體元件通常具有超高的頻率反應能力(指一個系統或設備能夠快速反應並處理高頻率的訊號或變化)，並且能夠在短時間內實現太赫茲波的產生。

頻率調變連續波 (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 太赫茲雷達的技術核心涵蓋訊號處理、天線設計與模擬技術，適用於高解析度近距離測距與成像應用。於訊號處理方面，發射訊號的頻率範圍通常在 100 GHz 至 1 THz，採用線性調頻 (Chirp) 技術，典型斜率可達 10 GHz/ μ s，確保高解析度測距能力。以雷達工作於 300 GHz 頻率為例，頻寬為 50 GHz 時，對應的距離解析度可達 3 mm，適用於精密檢測與成像應用，接收到的回波訊號與發射訊號進行混頻，產生差頻訊號 (beat frequency)，其頻率與目標距離成正比，為了提升距離與速度解析度，通常採用 128 或 256 點快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT) 進行頻譜分析，使目標物的分辨能力達毫米級；天線設計方面，為確保高增益與方向性，常用矽基片上集合天線 (Si-based on-Chip Antenna) 或 PCB 微帶天線，熱門類型包括 Vivaldi 天線、貼片陣列天線，可提供 10 至 15 dBi 的增益，滿足高頻傳輸需求，此外，多通道多輸入多輸出陣列設計 可提升角度解析度與成像品質，使空間分辨率達毫米級；模擬技術方面，FMCW 太赫茲雷達通常利用高頻架構模擬軟體(High Frequency Structure Simulator, HFSS) 或 3D 全波電磁分析的模擬軟體(Computer Simulation Technology, CST) 進行電磁場模擬，分析天線的輻射場型、增益與阻抗匹配，在 300 GHz 頻率模擬結果中，-10 dB 回波頻寬約 40 GHz，波束寬度約為 5°，適用於高精度近距離感測，此外利用全波模擬工具，如時域有限差分法，可分析雷達波束在不同材質中的穿透與散射特性，以優化系統性能。探測時依據外差原理運作，採用一套混頻設備，持續發射的太赫茲電磁波，經由線性、鋸齒形或三角波形頻率調制後投射於待測物表面，其反射回來的波訊被系統捕捉，隨後原始訊號與回波進行混合，生成一組中間頻率數據，其中蘊含著目標物的距離與深度訊息，

這些技術的結合使 FMCW 太赫茲雷達在高解析度成像、安全檢測、自動駕駛等領域發揮關鍵作用。



資料來源：工研院產科國際所

圖一、線性 FMCW 太赫茲雷達原理

另外，頻率梳是一種產生等間隔光學頻率脈衝序列的技術，其排列猶如梳子的齒，提供一組精確且均勻分布的頻率標準，這些頻率線可作為高精度光譜測量和頻率合成的參考，在光通訊、精密計量和無線通訊等領域具有重要應用，在 6G 及太赫茲系統中，頻率梳技術可透過光學混頻等方法產生穩定、低相位雜訊的 THz 信號，進一步實現高速數據傳輸與精密感測，隨著矽光子和射頻電子技術的融合，頻率梳正成為連接光學與電子頻譜、突破傳統射頻極限的關鍵技術，為未來超大頻寬、高速率的無線通訊提供了新的技術支撐。德國的特奧多爾·亨施 (Theodor W. Hänsch) 因在光學頻率梳技術上的貢獻，與約翰·霍爾 (John L. Hall) 共同獲得諾貝爾物理學獎，亨施教授隨後與同事創立了 Menlo Systems 公司，致力於將光學頻率梳技術商業化，該公司現已成為該領域的主要供應商之一，在天文學領域，歐洲南方天文台 (ESO) 與德國馬克斯·普朗克量子光學研究所合作，將基於光纖的光學頻率梳應用於高分辨率光譜儀的波長定標，顯著提高了天體視向速度的測量精度，這對於系外行星的探測具有重要意義。

(二) 太赫茲波的檢測方式

太赫茲波的檢測通常依賴於超導材料、半導體感測器或基於光學效應的檢測方法，傳統的檢測方法，如雷射光的光電效應，對太赫茲波的頻率並不敏感，因此需要專門設計的設備來實現對太赫茲訊號的高效檢測。當太赫茲波穿過物體時，它的吸收和反射可以用來實現無損檢測，可廣泛應用在安檢、醫療成像等領域。基於太赫茲時間域光譜 (THz-TDS) 技術，可以實現對太赫茲波的高精度測量，這種技術使用超短脈衝生成並檢測太赫茲波，通過測量太赫茲波的相位和振幅變化，可以獲得高解析度的物體訊息，並且對太赫茲波的頻率範圍進行詳細的分析。太赫茲射頻

技術的基本原理結合了電磁波的傳播特性、非線性光學效應和半導體技術的應用，使其在 6G 通訊、醫療成像和安檢等領域展現出極大的潛力。

太赫茲波的檢測技術其中包括幾種主要的方法，首先是光電導檢測，這種方法利用激發半導體材料產生電子電洞對(Electron-hole Pairs)，當這些載子在外部電場作用下加速時，會產生與太赫茲波強度成正比的電流，從而實現太赫茲波的感測。其次是光學調製，利用雷射光束來調製太赫茲波訊號，提高了檢測的靈敏度和準確性。

另一種重要的技術是電光檢測，這種方法利用材料的電光效應，通過分析相位變化來獲取太赫茲波的訊號；脈衝光譜技術則利用雷射脈衝發射並結合時域光譜分析技術，可以直接測量太赫茲波的時域訊號，實現即時且精確的波形感測；接收天線與波導技術使用專門設計的天線和波導來接收和引導太赫茲波的傳播，太赫茲成像技術結合了檢測和成像功能，可用於分析物體內部結構，在影像和無損檢測等領域有著廣泛應用。

(三) 現有太赫茲射頻技術的應用

儘管太赫茲射頻技術面臨許多挑戰，但它在許多領域的應用已經顯示出巨大的潛力，在醫療領域，太赫茲射頻技術被用於非侵入成像和早期疾病檢測，由於太赫茲波能夠穿透多數非金屬材料並對生物組織進行成像，因此它可以用來檢測皮膚癌、乳腺癌等疾病，並且比傳統的 X 射線檢查方法更加安全，此外太赫茲波對生物細胞的影響較小，使其在診斷和研究中具有優勢。

在無線通訊領域，太赫茲射頻技術也被認為是未來高頻寬通訊的核心技術之一，隨著數據流量的爆炸性增長，在 6G 通訊系統中研究者已經開始測試基於太赫茲波的短距離高速數據傳輸系統，並且在特定環境下，這些系統已經顯示出非常高的傳輸速率。此外在安檢與醫療領域中由於太赫茲波能夠穿透衣物和包裝，並且不會像 X 射線那樣對人體造成危害，因此它被應用於機場和公共場所的安全檢查中，這使得太赫茲射頻技術成為一種非侵入、無害的高效安檢工具，隨著技術的進步和成本的降低，太赫茲射頻技術在商業和日常生活中的應用將越來越有潛能。

太赫茲技術在智慧城市的發展中發揮著重要作用，憑藉其超高速數據傳輸、高精度感測與定位能力，為未來城市提供技術支撐。首先，在無線通訊領域，太赫茲頻段擁有豐富的頻譜資源，可實現每秒數 Tb 級的數據傳輸速率，滿足智慧城市中大規模數據交換的需求；其次，因太赫茲技術能夠提供毫米級甚至亞毫米級的高精度定位，可應用於智慧交通、環境監測與自動駕駛，提高城市運行效率。此外，太赫茲波具備穿透非金屬材料的能力，可用於安檢、公共安全監控等場景，提升城市安全管理水平；在能源領域，智慧電網可利用太赫茲技術進行精準的能耗監測，提

高能源使用效率，實現節能減碳排，推動城市往更智慧、更高效、更安全的方向發展。

三、太赫茲射頻技術挑戰與突破

頻譜資源的稀缺加劇了不同領域（如衛星通訊、無線網路、雷達感測等）之間的競爭，造成了頻譜使用的混亂和重疊。對於太赫茲射頻技術而言，如何有效地分配和管理太赫茲頻段，避免與其他通訊技術（如 5G 或衛星通訊）產生干擾，是當前研究的重要課題。目前，全球通訊協議組織正在積極開展太赫茲波段的標準化工作，並探索適合各種應用場景的頻段。在這方面，國際電信聯盟（ITU）和各國的頻譜管理機構需要進一步合作，確保太赫茲通訊技術的高效應用不會與現有技術產生衝突。對於太赫茲通訊的頻譜規劃，還需要考慮到大氣吸收、頻率範圍的限制以及不同環境對訊號的影響，因此頻譜規劃的精確度將直接影響太赫茲通訊技術的商業化進程。

(一) 太赫茲通訊中的材料與元件

太赫茲通訊技術的發展需要突破多方面的材料與元件創新，特別是在材料科學和微電子領域。為了有效生成、傳輸和接收太赫茲波，研究者必須開發具有高頻反應能力的材料，這些材料需要具備低損耗、高靈敏度和穩定性。當前，半導體材料（如 GaN、GaAs）在高頻下表現良好，但它們的頻段和整合度仍存在限制。新型的量子材料、超材料和二维材料（如石墨烯、黑磷等）提供了突破性的方向，這些材料的導電性和光學特性使它們在太赫茲領域具有極大的應用潛力。

石墨烯作為一種具有極高的載子遷移率的二维材料，在太赫茲範圍內具有較強的光學效應，能夠在低功耗下實現高效的訊號處理和太赫茲波檢測。此外，超材料技術的應用為太赫茲通訊帶來了更大的靈活性，這些人工結構能夠操控電磁波的傳播，實現波長縮放、波束控制等功能，從而提高系統的性能和容量。除了材料本身的創新，太赫茲元件的設計和製造工藝也是一個重點，例如太赫茲波的高頻傳輸需要精密的微波電路與天線設計，這對元件的微小化提出了更高的要求。如何將各種創新的材料與微電子元件有效結合，實現低功耗、高性能的太赫茲通訊設備，將是未來太赫茲射頻技術商業化的重要課題。

(二) 整合太赫茲射頻技術與現有通訊架構

隨著 5G 技術的普及和 6G 的到來，如何將太赫茲射頻技術有效整合到現有的通訊架構中，成為推動其實用化的另一大挑戰，因太赫茲波在通訊系統中具有非常

高的頻寬潛力，能夠實現數據速率的巨大提升，但要將其與現有的微波、毫米波系統無縫對接，還需要在多方面進行技術突破。首先，太赫茲射頻技術的傳輸距離相對較短，因此需要在現有的通訊架構中設計合適的基站布局與小區覆蓋，與 5G 的毫米波技術類似，太赫茲通訊系統也可能需要依賴大規模的基站和小型化的接入點來保證訊號的穩定性和覆蓋範圍，確保太赫茲波段在高密度區域中得到合理利用。

太赫茲射頻技術的高頻特性和對環境的敏感性，使其在戶外或大範圍的移動場景中面臨較大的挑戰，因此，如何將太赫茲通訊與傳統的毫米波、光纖等技術相結合，形成一個多層次、多技術互補的通訊系統，是實現 6G 等高效能通訊網路的關鍵，可以將太赫茲射頻技術應用於短距離高速數據傳輸，而將光纖技術應用於長距離或大範圍覆蓋的場景，太赫茲射頻技術的成功商業化不僅依賴於其自身的技術突破，還需要與現有的通訊技術和網路深度融合，從而在整體通訊系統中發揮其最大效能。

(三) 太赫茲技術應用瓶頸

太赫茲技術雖具超寬頻譜與超高速傳輸潛力，但實際應用仍遭遇多重瓶頸，首先，因太赫茲波長極短，在大氣中易被水氣和氧分子吸收，導致路徑損耗顯著，95GHz 至 3THz 頻段每米損耗約 0.5 ~ 1dB，使有效傳輸距離通常不足 10 米；其次，高頻元件製造要求嚴苛，目前採用 CMOS 或 SiGe 製程的太赫茲射頻晶片，其功率放大轉換效率僅約 20% ~ 30%，且毫米級封裝與散熱難題嚴重，成本居高，再者天線設計受微型化限制，訊號雜訊比低，實驗室條件下數十 Gbps 傳輸速率在實際環境中常降低逾 50%。綜上，材料性能、製程水準及系統整合等關鍵技術仍亟待突破，方能更能推動太赫茲技術邁向商業化。

四、全球太赫茲射頻技術研究與發展趨勢

(一) 產學合作與跨領域

太赫茲射頻技術的快速發展離不開產學合作和跨領域的創新，眾多學術界的突破性研究與企業的技術應用密切合作，促使太赫茲射頻技術從基礎研究向實際應用轉化，以美國為例，麻省理工學院與波士頓的多家初創公司合作，致力於開發基於太赫茲波的高速通訊系統，MIT 的研究團隊曾經在 2020 年成功展示了一種基於太赫茲波的無線數據傳輸技術，實現了每秒超過 100Gbps 的數據速率。

在歐洲，德國的弗勞恩霍夫應用研究所與多家通訊企業合作，致力於實現太赫茲波在無線通訊和醫療成像中的應用，在 THz Systems 項目中專注於開發太赫茲波源、放大器和高頻檢測設備，並且在積體化和低功耗設計方面取得了顯著進展，這

些研究成果對推動太赫茲射頻技術的商業化起到了重要作用。跨領域合作的成功案例中包括物理學家、材料學家、電子工程師和計算機科學家的共同努力，例如，量子物理學與材料科學的融合為太赫茲波的產生提供了新思路，像石墨烯、超材料和量子點等新型材料的發現，對太赫茲射頻技術的發展起到了推動作用。

(二) 全球主要企業和研究機構的技術突破

在太赫茲射頻技術的商業化過程中，一些企業和研究機構的技術突破具有重要意義，美國的高科技企業如羅德史瓦茲、高通等，已經在太赫茲通訊技術上進行了許多研發；羅德史瓦茲 (Rohde & Schwarz) 在 2024 年歐洲微波周展示了基於光子太赫茲通訊鏈路的 6G 無線資料傳輸系統概念驗證系統，該系統基於頻率梳技術，能夠支援超過 500 GHz 的載波頻率；中國科學院長春光學精密機械與物理研究所的研究團隊，成功在青海省海西州進行了一次遠距離的太赫茲無線通訊實驗，該實驗使用一種基於超導通道結合外差混頻技術的接收器。

日本的 NEC 和三菱電機等企業在太赫茲雷達和通訊領域也取得了顯著的進展，NEC 的太赫茲雷達技術已經在自動駕駛和安全監控中取得應用，並且其無線太赫茲通訊技術被預計將成為 6G 通訊的重要組成部分。2021 年 8 月，韓國 LG 電子宣布與歐洲應用科學研究機構 Fraunhofer 合作，成功開發了工作於 155 至 175 GHz 頻段的功率放大器，並在室外介紹演示了 100 米以上的 6G 太赫茲數據無線傳輸；2023 年，NEC 與日本的 NTT 公司合作，成功展示了一個基於太赫茲波的無線通訊原型系統，實現了每秒 2Gbps 的數據速率。

歐洲的研究機構，如德國的弗勞恩霍夫應用研究所、法國的 CEA-Leti 以及瑞士的蘇黎世聯邦理工學院 (ETH Zurich)，也在太赫茲波的產生與放大技術方面取得了相關進展，這些機構的合作，促使了太赫茲射頻技術在光纖通訊、醫療成像、無線數據傳輸等領域的技術推廣和應用，德國的 T-KOS 計畫 (Terahertz Technologies for Communication and Sensor Technology) 由德國微電子研究機構 (FMD) 主導，旨在推動太赫茲頻率技術在通訊和感測領域的應用與發展，該計畫聯合了 Fraunhofer IAF、Fraunhofer ENAS、Fraunhofer HHI 等多家頂尖研究機構，致力於開發具有工業應用價值的系統解決方案，如 6G 移動通訊中的 THz 無線傳輸和高精度非接觸檢測技術，T-KOS 計畫的主要目標包括建立德國 THz 技術的價值鏈、開發用於工業生產線監控的人工智慧即時成像處理技術，以及通過結合可擴展的電子和光子概念實現工業級解決方案，該計畫預計持續到 2024 年，並由德國聯邦教育及研究部 (BMBF) 提供資金支持，加強德國在全球 THz 技術領域的競爭力。

在 2024 年世界行動通訊大會 (MWC 2024) 上，多家企業展示了與太赫茲技術相關的最新進展，高通展示了利用 140GHz 影響的新價值，實現點對多點通訊和資料中心可動態重配點對點無線運輸的實際應用，邁向亞太赫茲 (Sub-THz) 通訊

的道路；羅德史瓦茨 (Rohde & Schwarz) 與聯發科 (MediaTek) 展示了基於 FR1 三載波聚合的通訊能力測試，並重點關注通感一體化、太赫茲、人工智慧、可重構智慧表面、非地面通訊網路、新波形等方向，積極助力 5G 下半場的發展。

表一、各國太赫茲技術發展動態與應用領域

國家/地區	研究機構/公司	發展重點	近期進展
美國	MIT、UC Berkeley、University of Texas 等	高功率太赫茲源、檢測器、成像與通訊技術；頻率梳生成技術	頻率梳和光譜儀技術，成像分辨率達亞毫米級
德國	Fraunhofer Institute、TU Darmstadt、UEN	太赫茲檢測器與成像；光譜分析及通訊模組	太赫茲成像系統用於材料與結構分析
日本	Sony、RIKEN、東京大學	太赫茲光源與成像技術；傳感器模組整合與系統小型化	高解析度太赫茲成像技術專利，進行工業化試驗
韓國	Samsung、KAIST	太赫茲通訊技術與成像檢測系統模組化	實驗展示高數據傳輸率原型，系統進入測試階段
中國	清華大學、中國科學院、浙江大學等	太赫茲源、檢測器及成像雷達系統整合；創新應用技術	多項原型機展示，含太赫茲雷達與成像系統，部分進入試點商用化

資料來源：工研院產科國際所

(三) 全球政策與規範對太赫茲射頻技術發展的影響

全球政策和規範在太赫茲射頻技術的發展中起著相當重要的作用，由於太赫茲波的頻譜涉及微波和光學領域，頻譜的分配和管理需要各國政府和國際組織的協作，國際電信聯盟已經開始積極研究並討論太赫茲波段的標準化，並將其納入未來 6G 通訊的技術規範中，根據國際電信聯盟的年度報告，全球對太赫茲波頻譜的需求預計將在 2025 年達到峰值，並提出應加快太赫茲頻譜的全球協調。

在美國，聯邦通訊委員會 (FCC) 已經開始為太赫茲波段的商業化應用進行頻譜拍賣，並對相關技術的標準化提供政策支持，這些政策有助於促進太赫茲射頻技

術的商業化，並降低企業進行太赫茲射頻技術開發的障礙。在歐洲，歐盟在《Digital Europe Programme》中也強調了太赫茲射頻技術的研究和應用，並計劃通過公共資金和政策支持加速太赫茲射頻技術在無線通訊和醫療領域的推廣。各國的專利和技術規範也對太赫茲射頻技術的發展方向產生了影響，例如，美國、日本和歐洲的專利局已經開始對太赫茲射頻技術進行專利審查，並且對涉及太赫茲波的創新技術進行保護，這不僅保障了創新者的知識產權，也促進了技術的快速發展。

表二、 全球太赫茲硬體技術發展

類型	發展重點	應用領域	研究機構/公司
太赫茲源	高功率、寬頻、穩定性技術	無線通訊、光譜分析、成像	Menlo Systems、Toptica 等各大學實驗室
太赫茲檢測器	高靈敏度、快速響應與低噪聲檢測	安全檢測、醫學診斷、材料無損測試	Thorlabs、Newport 等部分大學實驗室
太赫茲成像	高解析度、多模態整合與系統小型化設計	安全掃描、無損檢測、醫學影像	索尼、TeraView、Fraunhofer 等
太赫茲光譜	寬帶光譜、高精度測量，著重多通道與快速掃描能力	化學分析、環境監測、生物檢測	UC Berkeley、MIT、歐洲多家研究機構
太赫茲通訊	高數據傳輸率、超寬頻帶與訊號處理技術	6G 通訊、無線網路	Samsung、Nokia 等國際通訊機構

資料來源：工研院產科國際所

五、太赫茲射頻技術的商業化與市場

隨著太赫茲射頻技術的發展進入商業化階段，面臨著諸多挑戰與機遇，太赫茲波的高頻特性要求專用的硬體設備，如太赫茲源、檢測器和放大器，其高成本和高複雜度仍然是商業化的主要障礙，市場需求的增長也為太赫茲射頻技術的商業化創造了機會。

根據國際電信聯盟 (ITU) 預測，全球 6G 通訊市場將在 2030 年達到兆美元等級的規模，為太赫茲射頻技術提供了巨大的市場空間，6G 通訊將主要依賴於太赫茲射頻技術，以滿足未來無線通訊系統對極大數據頻寬和低延遲的需求；根據

MarketsandMarkets 的預測，6G 市場的總規模將在 2030 年達到約 5 兆美元，其中將包含太赫茲通訊技術的應用；另外根據 BCC Research 報告指出，全球兆赫輻射系統的市場規模，預測將從 2023 年的 7 億 9570 萬美元，在 2023 年至 2028 年的預測期間預計將以 18.9% 的年複合成長率推移，2028 年達到 19 億美元的規模，北美地區預測將從 2023 年的 2 億 8,520 萬美元，以 19.8% 的年複合成長率推移，2028 年達到 7 億 480 萬美元的規模，亞太地區預測將從 2023 年的 2 億 370 萬美元，以 21.1% 的年複合成長率推移，2028 年達到 5 億 3,110 萬美元的規模。

6G 的逐步推進，太赫茲射頻技術的未來發展前景廣闊，預計將在多個領域展現巨大的商業價值，從通訊角度看，太赫茲射頻技術將是 6G 網路不可或缺的核心組件，實現更快的數據傳輸、更低的延遲和更多的設備連接，未來幾年，太赫茲射頻技術將不僅限於無線通訊領域，還將進一步拓展至醫療、安全等領域，並成為推動智慧社會和智慧城市發展的重要推手。

IEKView

太赫茲射頻技術作為未來 6G 通訊的重要支柱，為台灣在全球科技競爭中提供了重要的發展契機。首先，台灣在半導體製造領域擁有全球領先的優勢，特別是在高頻半導體材料（如砷化鎵 GaAs 和氮化鎵 GaN）與製程技術方面已具備深厚的基礎，這為太赫茲射頻元件的開發和量產提供了可靠保障。此外，台灣的積體電路設計產業在全球佔據重要地位，可為太赫茲射頻系統的設計與整合提供創新的解決方案，特別是在低功耗與高性能的需求下，具有技術突破的潛力，同時，台灣的 ICT 產業鏈完整，涵蓋晶片設計、製造、封測、系統整合及應用場景開發，能夠支撐太赫茲射頻技術的全產業鏈發展。

在應用層面，台灣可聚焦於智慧城市、智慧醫療和安全檢測等領域，結合太赫茲技術的 6G 通訊，可為智慧交通提供更高速度且低延遲的數據傳輸能力，提升城市運行效率；在智慧醫療領域，太赫茲之非侵入式成像技術可用於疾病的早期診斷，滿足高齡化社會對醫療服務日益增長的需求；在安全方面，太赫茲技術可用於安檢與偵測，提供更精確且安全的監控能力。再者，台灣政府近年來積極推動 6G 相關技術的研發與標準化，配合太赫茲頻段的全球頻譜規劃與政策推動，將有助於台灣企業在國際市場中占據先發優勢。透過強化技術開發如太赫茲波源與探測器、光譜儀（TDS）、連續波掃描與面陣成像系統等鞏固實力，並深化產學合作如結合自身強大的產業鏈與優秀的學術研究資源，與國內大學及工研院、國家實驗室等單位共同建立跨領域研發平台，也可成立類似亞洲太赫茲產業發展協會（ATIDA）以加強國際聯盟合作，台灣有望在太赫茲射頻技術商業化的浪潮中掌握核心地位，開創新的經濟成長動能。

以上報告所提供之資訊，在尖端科技發展與產業變動中，無法保證資訊的時效性及完整性，使用者應自行承擔因使用本報告資料可能產生之任何損害。著作權歸工研院所有，非經書面允許，不得以任何形式進行局部或全部之重製、公開傳輸、改作、散布或其他利用本報告資料之行為。



會員服務專屬：<http://www.iek.org.tw>

☎ 服務專線：03-5912340

☎ 傳真電話：03-5820302

✉ 客服信箱：iekconsult@itri.org.tw



工業技術研究院
Industrial Technology
Research Institute