

1 Beyond 5G to 6G：對未來的想像

「預測並非易事，尤其這關乎未來。」諾貝爾物理學獎得主 Niels Bohr

「當預言家最有力的條件，就是記憶力要好。」Halifax 侯爵

如果 LTE 代表長期演進技術，5G 代表的就是進階長期演進技術。不過，探討一下有著 6G 的未來會是甚麼模樣，未嘗不是一件好事。

1. 預測 6G 未來

預測未來或許只是白忙一場，但人們還是會這麼做 – 我們非做不可，因為要為未來做準備。預測新一代無線技術是無線工程師最愛的消遣。無線技術領域相關人士預測這方面的事，或許比其他大多數領域的人士容易，因為他們可以探究標準組織的活動，深入瞭解廠商和服務供應商想達成的目標（以及舊有標準需要更改之處）。早在各標準組織開始爭論這項技術之前，研究人員就已經在構思能讓現行系統效能明顯提升的新點子。

在運用前五代無線技術標準的過程中，我們已經汲取了不少經驗。例如，

1. 無線技術標準的特定版本公佈後，其中詳細說明的所有功能未必會即刻或同時實施；相反，有些功能可能還需要過一段時間才會變得實用。就 5G 而言，這樣的說法或許更加貼切，因為 5G 技術範圍之廣，可以說是前所未有的。
2. 現行標準的弱點將成為新一代標準的技術驅策因素。隱私和安全方面的弱點更是如此。
3. 我們或許能夠預測技術趨勢，但通常難以預測運用這類技術發展成果的商業模式。
4. 有時候，在用於建立標準的模擬或原型中，新技術可能會發揮很大的作用。但是，從實驗室模型擴充到商業生產與部署後，就未必能如此奏效，所需時間也可能長得超乎預期。陣列天線就是最好的例子。
5. 每一代無線行動標準問世的時間大約相隔 10 年。例如，開始部署 LTE 技術的時間點大約在 2008 年，而 5G 技術實現標準化的時間點則是 2018 年。
6. 就每一代無線技術所能解決的問題而言，範圍都大於前一代。舉例來說，第一代始於語音傳輸技術，第二代使得與機器（如販賣機）的基本連線成為可能，第三代開始出現高速網際網路接取功能（包括增強型網頁瀏覽功能），而第四代則讓無線成為視訊娛樂能夠廣泛運用的技術。人們普遍認定第五代標準的應用範圍將顯著擴大。諸多協同技術的發展，共同發揮了更強大的作用，因此，各種標準所採行的新技術可能會造成超乎預期的影響。高速資料傳輸技術的發展，再加上顯示技術的進步，將資料方面的需求推得更高，因為資料是

行動視訊娛樂不可或缺的元素。

7. 一般來說，推出一項標準的所有功能所需的時間，要比根據初期大肆宣傳所預估的時間還長，不過，該標準最終會超越整體預期。

這是 5G 標準共同呈現的趨勢。第六代標準與前代不同之處在於，現在各國已經普遍認同無線標準對於國家經濟健全發展與國家安全的重要性。因此，要打造 6G 必備的各項基礎技術，就得具備更高的競爭力。

2. **推動 6G 發展的關鍵技術**

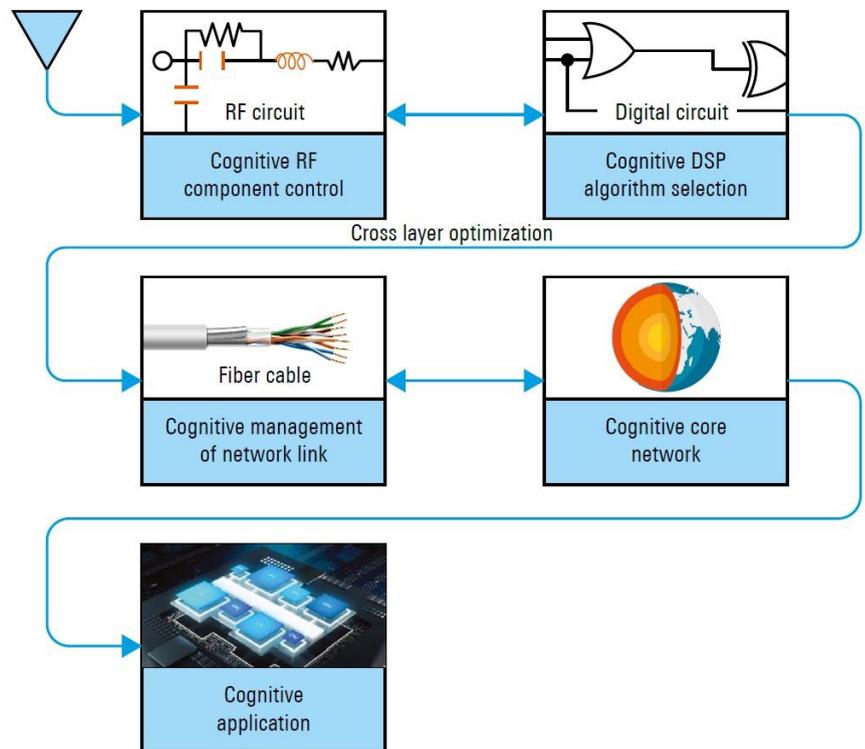
若要預測 6G 可能帶來的影響，其中一種方法是審視現行基礎與應用研究的走向。目前，若要推動 6G 發展，就必須具備三項關鍵技術：人工智慧 (AI)、先進射頻和光學技術，以及網路技術。

2-1 人工智慧

AI 已經成為許多工程學科最熱門的研究領域之一，這是不爭的事實。5G 最大的特色是大幅提升彈性，至於 6G 的主要特色，或許就是運用 AI 技術進一步發揮這樣的彈性。過去，無線研究活動使 AI 技術在許多領域得到應用，例如，利用神經網路和模糊邏輯、設計換手演算法。不過，基於 AI 技術的演算法實際應用於無線網路的情形則十分罕見。現在情況正在有所改變。不論是學習技術 (如深度學習)，或是能讓這類複雜演算法更加符合實務需求的新式運算架構，近期都有長足的進步，已經成為推動這股趨勢的主力。無線通訊也沒有錯過這股趨勢。圖 1 顯示 6G 網路可能呈現的概況，其中，在無線接取網路、核心網路和應用程式中，AI/認知技術廣泛應用於每一層，也在各層聯合發揮出最好的作用。這種適應性有助於提高網路的韌性，也有助於降低運作成本與維護成本。

圖 1 :

Fig. 6.1: AI-driven 6G network



針對環境損害 (如干擾) 或電路老化/失準影響，透過認知調整使元件最佳化，對射頻是有益處的。透過靈活調整數據機和通訊協定，可以加強頻譜管理與解調，尤其是在有異質性干擾的情況下。隨著頻譜共用技術的產生，這是一件可以期待的事情。聯合學習技術可以將每一台行動裝置當成感測器，以利全面但深入地探究大範圍區域內的干擾與覆蓋範圍問題。運用 AI 找出適合的資訊路由機制，包括運用衛星或地面無線中繼技術，能夠發展出更完善的前傳及回傳網路支援機制。目前有研究探討如何在核心網路中運用 AI 進行系統最佳化、協調以及維護。對抗式學習是指 AI 網路攻擊者和 AI 網路防禦者爭相尋找漏洞與解決方案。運用對抗式學習能夠持續提高整體 AI-RAN 的安全性。在應用程式層級，AI 能夠預測背景脈絡以及應用程式資訊需求，也能因應預估資訊流程而預設網路參數。這是一種「預知能力」(precognition)，這個詞是科幻電影「關鍵報告」(Minority Report) 中的用語。

2-2 射頻與光學技術

5G 技術有一項關鍵的驅策因素，就是近年來低成本生產的 mmWave 裝置 (以及 mmWave 頻段中大量可用的頻譜)。這股趨勢預計將持續下去，頻率更高、更節能的

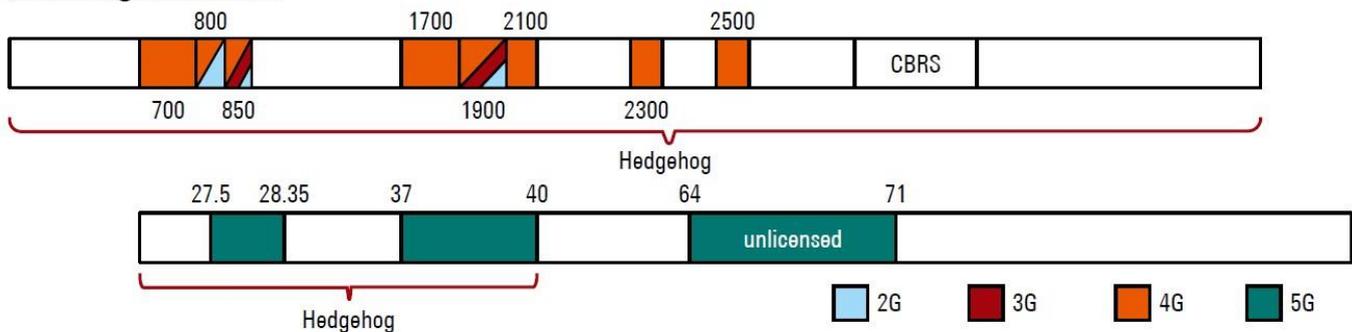
裝置也會不斷湧現。最終，這股技術趨勢或許能夠提高兆赫 (THz) 通訊在經濟層面的可行性(1)。一個晶片就能容納一整個相位陣列。若使用無線電力傳輸，這類相位陣列晶片不需要外接電源接腳就能通訊。

另一項驅策因素是射頻元件所能發揮的彈性。這類技術的一個例子就是 DARPA HEDGEHOG (美國國防高等研究計劃署刺蝟計畫)。此類技術以射頻場域可程式化邏輯陣列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 為基礎，製造非常小的無線電系統，這類系統的設定彈性相當高，能夠涵蓋從 10 MHz 到 40 GHz 的各種頻帶 – 請見圖 2。

1.1 圖 2：可靈活設定的射頻：Hedgehog (試驗性 DARPA 無線電系統) 的規格

參數	規格
頻率範圍	DC 到 40 GHz
IBW	10 MHz 到 2 GHz
頻道	8 TX、8 RX
積體電路處理	<ul style="list-style-type: none"> ▶ GPP 和 FPGA ▶ 280 Gbps 以上的 I/O
轉換器	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 16 × 14 位元 DAC ▶ 16 × 12 位元 DAC ▶ 整合於處理器

Covering all the Gs



這種彈性與 AI 技術協同作用，因應使用者的服務需求與射頻環境而調整無線電系統。若要充分運用這類技術，就必須開發新的通訊協定。

目前，單頻全雙工 (single-frequency full-duplex) 系統已問世，也證明了射頻技術日益完善。在這類系統中，發射機和接收機以相同的頻率同步運作，從而消除了頻率與時間方面的雙工需要，從概念上講，可以讓頻譜發揮雙倍效率。這類系統的運作方式是，在射頻級執行干擾消除，以去除高功率傳輸訊號。這類技術將為第六代無線通訊提供一種更靈活的頻譜管理方法。

6G 勢必會突破 95 GHz 頻段，擴充到 mmWave 和兆赫 (THz) 頻段，也包括光譜在內。在此類頻率範圍內，通訊通常是短距離的，但裝置可以十分迷你，能夠支援超大規模多重輸入多重輸出 (ultra-massive MIMO) 之類的技術以及微型蜂群機器人 (昆蟲大小的協作式機器人) 之類的應用。

在減少干擾、提供巨大頻寬、保護視距傳播隱私以及建立發射/接收裝置的技術基礎方面，光學 6G 技術也有不錯的前景。有趣的是，紫外線「不」需要以視距方式傳播，而是在大氣中散射^[2]。

¹⁾ FCC 在 Spectrum Horizons 指令中，開放了 95 GHz 到 3 THz 範圍內的 THz 頻譜執照，以供試驗之用 [37]。

²⁾ 1990 年代後期，早期的 802.11 規格有一個關於紅外線的版本，可提供傳輸速率高達 2 Mbps 的連線能力。當時有幾款特定的筆記型電腦就採用這個版本的規格。

2-3 網路技術

1.1.1

就像 5G 一樣，6G 網路技術會沿用 SDN、NFV 以及網路切片技術。不過，6G 可能會將這些概念發揮到極致，能夠按照個人需求以及應用，客製化網路切片，從而為使用者提供真正合乎客製品質的體驗。這類採用個人化網路切片的系統勢必得大規模運用邊緣運算技術，而且會在核心網路和邊緣運算節點之間形成相當複雜的網路責任分配模式。

3. 可行的 6G 效能目標

新標準採用各式各樣的指標，包括有關資料傳輸速率、延遲以及可用性的一般規格。6G 將延續始於 5G 的趨勢，透過個別指標定義體驗品質 (Quality of Experience, QoE)。當然，資料傳輸速率將有所提高，或許能達到每秒 1 TB 的程度。時間延遲可能降低至數十毫秒；此外，或許可以使用資訊年齡 (age-of-information)，以日期註明資訊的新鮮度 (freshness)，以利按照優先順序處理資訊。在 5G 時代，已經將降低功率消耗訂為目標，希望能讓物聯網裝置電池使用壽命長達 10 年，爾後或許能進一步降低功率消耗，以利能量採集，包括反向散射通訊。6G 可能也會將有關能量採集與無線電力傳輸要求的指標與標準包括在內。6G 標準也可能包括安全韌性指標，特別是考慮到在 6G 問世後，量子計算有可能打破大多數加密標準。

4. 可能出現的 6G 服務

6G 以及更新世代的無線系統究竟能夠提供哪些類型的服務？6G 將以 5G 為基礎，進一步增強既有服務，同時推出更多模式，以利因應具有眾多不同需求的應用。例如，5G 會推出全像投影，而 6G 則有可能實現大規模的高傳真度全像投影。透過能量採集或無線電力傳輸，讓迷你裝置也能進行超低功率通訊，可能成為一個新的應用領域。這類迷你裝置可能安裝於衣物布料，也可以嵌入塑膠或玻璃。此類裝置可以讓成群的小型 UAV (無人航空載具) 或機器人之間彼此通訊，以利執行組裝和修理之類的複雜作業。最終，每個人都可能擁有



數千個無線電系統。若要達成這樣的目標，標準所採用的通訊協定就要有助於將能量傳遞 (無線電力傳輸) 或能量採集配置與通訊協定合併。

可以想見的是，新的應用必定會需要全新層級的延遲管理。例如，若要精準控制採用分散式能源和儲電槽的電力網，時間延遲就必須夠低。觸覺感測應用也將降低延遲的要求推到極限。使用資訊年齡，以日期註明資訊的新鮮度，以利按照優先順序處理資訊運，或者運用 AI 預測通訊或應用程式需求或潛在故障，以利提供穩固的連線能力，這類方式都能達到這方面的要求。這類功能有助於自然流暢地實現訊號“無縫”覆蓋，包括迅速轉換衛星通訊和地面通訊。

時候到了，勢必會出現要求資料傳輸速率更高的服務。其中一項可能的服務或許是視訊桌布。該服務需要利用大型顯示器技術，形成帶有投影影像的房間牆壁。現在已經出現了 8k 影片，支援 8k 影片的資料傳輸速率大約是 360 Mbps。若要提高這種能力，運用每一面牆創造出身歷其境的體驗，就意味著一面牆可能需要 10 Gbps 以上的通訊速率，才能即時顯示投影。在這種情況下，讓通訊鏈路的傳輸速率達到每秒 1 TB，這樣的要求並不是不合理。

感測即服務 (Sensing as a service) 可能是 6G 應用的一個全新類別。6G 訊號能用於測量空氣中的濕度或其他粒子，以利繪製微氣候剖面圖嗎？我們有可能將 6G 訊號當成雷達訊號，精準掌握室內飛行 UAV 的位置嗎？

6G 到底能帶給我們什麼，目前難有定論。6G 標準的初始版本可能會在 2030 年問世，屆時也會經歷數年的修訂。關於 2035 年 6G 標準演進情況的預測，確實十分吸引人，但也只是純理論推測。

2 展望

5G 第 1 階段或 R15 透過定義高效能新空中介面 (NR) 與彈性網路架構，為增強後續版本提供了相當堅固的基礎。R16 和後續版本著重於全新的垂直領域，希望能大幅拓展無線通訊的應用。這股支援垂直領域的趨勢，在 6G 時代應該會加速。

R16 和後續版本將超越以 eMBB (增強行動寬頻) 為主的 R15，拓展支援的服務。5G LAN 可以取代或擴充固定式或無線 LAN，也能提供彈性以及增強效能。在非地面網路中，衛星運用 5G 使服務具有普遍性、連續性以及可擴縮性。得益於 5G 提供的效能，重要的醫學應用能夠實現醫療保健改善與成本節約。5G 技術的發展實現了列隊行駛、先進駕駛以及遠端駕駛等新穎的 V2X (車聯網) 應用。採用 5G 技術的 UAV 能夠支援各式各樣的情境，包括在發生災難時輸送醫療用品。5G 技術可輔助攝影棚或工作室內外的視聽製作服務。網路實體控制應用程式能夠運用 5G 技術，大規模落實工業 4.0。以 NR 為基礎的定位技術支援眾多使用案例，包括緊急情況、UAV 操作、AR/VR/XR 以及工廠自動化。觸感通訊運用觸覺感測技術，將使用者的體驗提升至全新水平。

適用於 5G 的 R16 及後續版本具有無窮潛力，而 6G 則會將使用者體驗提升至全新水平，也會使許多產業發生徹底改革。6G 的特色或許是資料傳輸速率大約在每秒 1 TB，延遲時間大約是數毫秒，裝置和網路能源效率也較高。高傳真度全像投影通訊與多重感知通訊，可能會成為我們日常生活的一部分。醫療保健、製造、娛樂以及交通運輸等產業可能才開始受到 5G 的影響，到了 6G 時代，這些產業將會經歷更大規模的轉型。

我們所處的世界將很大程度上取決於無線通訊技術未來的進步。準備好大開眼界吧！