

MEDIATEK

6G

願景白皮書

發佈日期： 2021-11-17

MediaTek, Inc. All rights reserved.
Unauthorized reproduction or disclosure of this document, in whole or in part, is strictly prohibited.

目錄

圖表目錄	3
1 前言	6
2 時間表 - 2030 及未來	7
3 發展趨勢和系統設計原則	8
3.1 趨勢綜述	8
3.2 S.O.C. - 系統設計原則	9
3.2.1 繁簡得宜 - 6G 極致體驗之關鍵因子	9
3.2.2 臻善致美	10
3.2.3 融合暢達	10
4 無線接取融合	11
5 分散式網路架構	13
6 面向真正無邊緣體驗的 MIMO 演進	15
6.1 超大規模 MIMO 演進到更高載波頻率	15
6.2 分散式異質性 MIMO 架構	15
6.2.1 分散式設計方法	15
6.2.2 終端裝置作為混合節點	16
6.3 主要的性能指標	16
7 面向極致和可預測的 QOS - 精簡的使用者平面通訊協定	17
7.1 為即時沉浸式服務實現極致傳輸速率	17
7.2 新方法：擁塞管理/恢復，而非按序交付	17
7.3 用於動態無線電層/應用層相互感測的跨層 API	18
7.4 精簡的使用者平面通訊協定	19
8 系統能源足跡和能耗效率	20
8.1 極致節能的終端裝置	20
8.2 網路節能	21
8.3 基本的 KPI: 極致性能的能耗效率	21
9 地面與非地面網路融合	23
9.1 TN/NTN 渾然天成	23
9.2 TN/NTN 頻譜複用	24
9.3 單一旦價格合理的 TN/NTN 終端裝置	24
10 內生人工智慧集成系統 - 通信和運算的融合	25
11 頻譜 - 增加頻譜資源，優化頻譜利用	27

11.1	7-24GHz	27
11.2	Sub-THz	27
11.3	靈活雙工的智慧頻譜接取	28
11.4	最佳的頻譜共用	28
12	跨雲、網路和終端裝置的端到端安全架構	29
13	總結	31

Exhibit 1 Terms and Conditions

圖表目錄

圖 1. 6G 時間表	7
圖 2. 6G 相對於前幾代行動通訊系統的觀察趨勢	8
圖 3. 混合節點	11
圖 4. 靈活的資料消費模型	13
圖 5. 應用驅動網路架構的關鍵功能	14
圖 6. 6G 異質性 MIMO 拓撲示範案例 (集中式 RAN)	16
圖 7. 5G 通信協定上的重傳延遲	18
圖 8. 跨層 API 概念	19
圖 9. 終端裝置 Big-Little Modem 設計概念	21
圖 10. 終端裝置輔助喚醒的動態網路節點開/關	21
圖 11. TN/NTN 的整合和融合	24
圖 12. TN/NTN 的頻譜複用	25
圖 13. 6G 時代 AI 集成的機遇	26
表 1. S.O.C. 設計原則: 繁簡得宜、臻善致美和融合暢達	9
表 2. 繁簡得宜的說明性範例	9
表 3. 臻善致美的說明性範例	10
表 4. 融合暢達的說明性範例	10
表 5. 6G 中 MIMO 設計的關鍵性能指標	16
表 6. 影響 6G 極致用戶體驗的主要因素	18
表 7. 無線層和應用層之間關鍵的互相感測因素	18
表 8. 精簡協定的性能標準	19
表 9. 終端裝置節能方案	20
表 10. 網路能耗的潛在研究方向	21
表 11. 能耗領域的挑戰	22
表 12. 地面與衛星通信融合的挑戰和研究方向	23
表 13. Sub-THz 頻譜資源	27

術語	注解
Sub-GHz	Frequency bands below 1GHz 本文用以表示 1GHz 以下頻段
Sub-THz	The research community is currently in discussion regarding the exact definition of this term. For the purposes of this document it refers to frequency ranges between 100GHz and 300GHz

業界當前正在討論該術語的精確定義，本文用以表示 100GHz - 300GHz 頻段

英文縮略語	英文全稱	中文注解
AI	Artificial intelligence	人工智慧
API	Application programming interface	應用程式設計介面
AR	Augmented reality	擴增實境
BBU	Base band unit	基頻處理單元
CP-OFDM	Cyclic prefix OFDM	循環字首 - OFDM
C-RAN	Centralized radio access network	集中式無線電接取網路
DFT-s-OFDM	Direct Fourier transform spread OFDM	離散傅立葉轉換擴展正交分頻多工
eMBB	Enhanced mobile broadband	增強型行動寬頻
FDD	Frequency division duplex	頻分雙工
FR	Frequency range	頻段
GEO	Geosynchronous equatorial orbit	地球同步軌道
HARQ	Hybrid automatic repeat request	混合式自動重送請求
IETF	The Internet engineering task force	網際網路工程任務組
IP	Internet protocol	網路通訊協定
KPI	Key performance indicator	關鍵性能指標
LEO	Low earth orbit	低軌道
LOS	Line-of-sight	視線
MAC	Medium access control	媒體存取控制
MIMO	Multiple input multiple output	多輸入多輸出
ML	Machine learning	機器學習
mMTC	massive MTC	巨量多機器型態通訊
NTN	Non-terrestrial network	非地面網路
OFDM	Orthogonal frequency division multiplexing	正交分頻多工
O-RAN	Open RAN	開放性無線電接取網路
PDCP	Packet data convergence protocol	封包資料匯聚通訊協定
PDU	Protocol data unit	協定資料單元
QoE	Quality of experience	體驗品質
QoS	Quality of service	服務品質

RAN	Radio access network	無線電接取網路
RIC	RAN intelligent controller	RAN 智慧控制器
RLC	Radio link control	無線鏈路控制
RRH	Remote radio head	遠端射頻模組
SESSy	Sustainable environmental sensing systems	永續環境感測系統
TCP	Transmission control protocol	傳輸控制協定
TDD	Time division duplex	分時雙工
TN	Terrestrial network	地面網路
URLLC	Ultra-reliable and low-latency communications	超可靠低延遲通信
V2X	Vehicle-to-everything	車聯網
XR	Extended reality	延展實境

1 前言

隨著 5G 技術的不斷發展和成熟，5G 的使用率也在全球範圍內不斷攀升。從 3GPP (第三代合作夥伴計劃) Rel-18 開始，預計將進入 B5G (Beyond 5G) 的演進週期。因此，當前正值為下一代行動通信系統 (6G) 奠定全球標準的最佳時機。聯發科技在 5G 的設計、標準化及其演進中發揮了重要的領導力，並率先向市場推出了成熟的 5G 終端裝置，能夠在開創性的新型 5G 系統 (包括 5G 無線網和核心網) 中使用。作為世界領先的智慧型手機晶片供應商和公認的 5G 商用產品領導者，聯發科技始終在制定新一代技術標準以及推動技術實現方面處於領先地位。

5G 是圍繞三大核心應用場景進行設計和演進的，即增強型行動寬頻 (eMBB)、超可靠低延遲通信 (URLLC) 和巨量多機器型態通訊 (mMTC)。5G 的建立不僅是為了迎接 4G 在消費者領域引發的行動寬頻革命，也是為了在這個市場之外創造新的增長機會。憑藉 4G 行動物聯網市場的發展基礎，5G 進一步邁出了重大飛躍，面向了具有嚴格要求的工業物聯網。5G 旨在將行動通信的變革力量滲入到社會的各行各業；這是有史以來第一次，單一的通信系統設計不僅能夠滿足在 Sub-6GHz 與毫米波頻段範圍內的授權與非授權頻譜上實現各式各樣的消費級和專業級應用；而且還可以通過將地面網路與空中、衛星通訊基礎設施整合，在傳統地面網路的覆蓋範圍之外提供通訊服務。然而，如今巨大的複雜度伴隨著這種規模宏大的網路和終端裝置的設計而來，導致更高的布建成本和功耗。因此，5G 會漸進式的推出，主要聚焦在 Sub-6GHz 的 eMBB 消費級應用上。從網路經濟的角度來看，實現高頻毫米波網路的無縫覆蓋是極具挑戰性的。此外，儘管開放性無線電接取網路的架構為 5G 佈建帶來更多的靈活性和智慧化，但是目前基本的網路設計架構仍基於傳統的行動網路和分層架構。期望未來會有推動網路架構進一步邁向人工智慧和機器學習新時代的顯著改進方案。

一方面，當前的通信產業將繼續發展 5G 技術，以應對上述挑戰。而另一方面，未來的 6G 技術不僅可以解決這些問題，還能夠為行動網路帶來根本性的變革。我們的 6G 願景是一個全球統一的標準化技術，其性能從一開始就要顯著優於 5G 及其演進版本。6G 將使用原生的自適應無線電和網路技術來達成極端的性能要求，並以完全安全且可持續的方式為消費級和專業級市場的各種資料消費模式提供支援。6G 架構將通過異質性網路架構實現更好的網路經濟性和能源效率，這種架構具有消除私人網路設施和終端裝置之間的界限的特性。6G 的目標是實現無所不在的毫米波覆蓋，並進一步利用更高的頻譜 (~THz)，這就需要更加緊湊且密集的網路部署，因此對網路部署成本的控制就變得至關重要。這樣的背景下，我們預計 6G 終端裝置不僅僅是以無線通訊系統終端的形式存在，它還能夠充當數據路徑中的活動網路節點，並最終形成獨立運行的網路。我們的 6G 願景是一個自我調整的、融合的、超異質性的無線通訊系統，以一種真正無處不在的方式提供普及的行動連接，無論是短程通信、衛星通信還是介於兩者之間的任何通信。6G 系統將具有高度的可擴展性，從而用最精簡的方式實現任何部署場景。人工智慧和機器學習方面的革命性進步將發揮核心作用，並使 6G 願景成為現實。我們需要新穎且實用的工具對系統進行建設、運營和管理，並根據當前的需求來自主、動態地調整系統的整體配置和運行，而無需人工干預，同時能夠反覆地從中學習以提高系統性能。

這份白皮書詳細從以下幾個主題介紹了我們的 6G 願景：時間表、關鍵驅動因素和實現因素。

¹ 參見 Counterpoint Handset Model-Level Chipset Tracker: Q1 2020 - Q2 2021。

2 時間表 - 2030 及未來

6G 標準化和商業化將遵循 ITU-R IMT 2030 及未來的時間表，從 2030 年起開始商用，而 6G 預商用可能提前一年進行。

儘管 ITU-R 計畫分別在 2022 年年中和 2023 年年中完成 IMT2030+ 趨勢和願景的研究報告，聯發科技預計將在 2023/2024 年左右開始 3GPP 的初步標準化工作，並於 2026/2027 年之交發佈正式的規範。

圖 1 展示了上述內容，也描述了預期的 3GPP 版本 (R19~R22)。

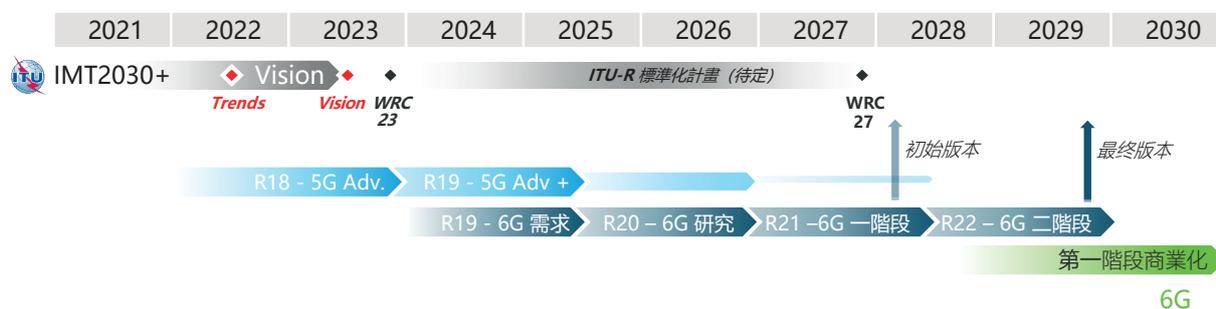


圖 1. 6G 時間表

3 發展趨勢和系統設計原則

3.1 趨勢綜述

下述幾個核心趨勢推動了我們對下一代行動通信網路的願景：

- 新的殺手級應用將進一步推動對系統性能的更高需求，如極致全息和觸覺通信、數位孿生、先進的遠端服務等；這些應用不限於消費者領域，還包括工業和遠端醫療等。
- 由上述新型應用的驅動，資料速率增加 10-100 倍的同時保證超低延遲；
- 額外增加在 7-24GHz 和 subTHz 頻段的頻譜可用性，總可定址頻寬約為 50GHz。這一新的頻譜為極致應用的服務提供了重要支持，但也給克服高頻段傳播衰減帶來了嚴峻挑戰；
- 網路密集化格外重要，主要有兩個原因：一是為了增加低頻段的容量，二是為了克服在新頻段內嚴重的傳播衰減問題。室內基地台部署成本相關的挑戰和其他實際需要解決的問題；
- 實現無處不在的全球連接，包括對目前行動通訊網路還沒有覆蓋的偏遠地區；
- 在 5G 的最初版本發佈之後，首次加入了對 5G 使用案例和應用程式的持續改進。這些使用案例和應用程式受益於無約束的設計原則，而不用考慮早期 5G 版本原有設計的約束，同時最小化 6G 與 5G 共用資源的系統間接費用。

圖 2 描述了 6G 相對於前幾代行動通訊系統的觀察趨勢。

	3G 	4G 	5G 	6G 
寬頻速率 設備 MIMO 數	1 – 10Mbps 1Tx / 1Rx	10Mbps – 1Gbps 1Tx / 2+Rx	100Mbps – 10Gbps 2Tx / 4+Rx	1Gbps – 1Tbps 4Tx / 8+Rx
頻譜範圍	FDD + new TDD (e.g. 2.3GHz) ~100MHz more	+more TDD (2.5GHz) +非授權頻段 (5GHz) ~600+MHz more	+3.5-7GHz +毫米波頻段~ +3+GHz more	+7-24GHz +sub-THz ~50+GHz more
網路加密 ¹	Nominal	+	+ device	++ device
主流應用	移動互聯網 (e-mail, 網頁流覽)	移動視頻 社會化媒體 (+ 低功耗廣域物聯網)	超高清視頻 雲遊戲, 拓展現實 其他垂直行業	N-D 全息通信 人工智慧高效系統

注釋1: 隨着頻譜越來越高, “基礎設施”和“設備”之間的界限越來越模糊。

圖 2. 6G 相對於前幾代行動通訊系統的觀察趨勢

3.2 S.O.C. - 系統設計原則

前一節描述的 6G 趨勢主要依賴於三個基本設計原則的結合：繁簡得宜、臻善致美和融合暢達，如表 1 所示，在下面的小節中將對這三個原則做進一步闡述。

表 1. S.O.C. 設計原則: 繁簡得宜、臻善致美和融合暢達

繁簡得宜	臻善致美	融合暢達
可持續發展	使用者體驗導向的系統優化	跨域融合以提高成本效益和系統性能
<ul style="list-style-type: none"> • 利用適度的複雜度以提高性能 • 簡化傳統設計以提高性能 • 不以犧牲性能為代價 	<ul style="list-style-type: none"> • 關注對未來終端裝置使用者體驗具有重要意義的關鍵維度和應用 • 對無線電介面，頻譜利用和網路架構進行優化 	<ul style="list-style-type: none"> • 無線接入：跨授權頻段、非授權頻段以及共用頻段，具有前傳和回傳的融合接入 • 網路節點終端化，即混合節點 • 地面與非地面例如衛星接取的融合 • 通信與運算融合 • 通信與感測的融合

3.2.1 繁簡得宜 - 6G 極致體驗之關鍵因子

繁簡得宜是增加的複雜度和簡單性的結合，使其剛柔並濟。

- 複雜度的增加是實現諸如資料速率等系統性能飛躍的必要條件，這對於新的 6G 應用來說也是非常必要的；
- 簡單性是實現 6G 目標的必要條件，同時要顯著降低每位元傳輸的複雜度，以便將總體的複雜度控制在現實可行的範圍內。雖然降低複雜度仍然是系統設計的重要目標，但 6G 標準需要謹慎處之，以確保終端裝置和基地台不受過度限制。不必要的限制可能會使系統實現無法獲得最優的能耗/成本效率，以至於可持續發展目標的實現變得遙不可及。對於標準定義的所有領域（如射頻、數位、類比、雲）以及所有協議層，謹慎處之是非常必要的。表 2 中描述了一些說明性範例。

表 2. 繁簡得宜的說明性範例

實現高性能無線介面和技術必要的複雜度	高性能的本地精簡設計
<ul style="list-style-type: none"> • 通過更寬的頻寬（≥1GHz）來擴展資料容量 • 營運在新的頻段： <ul style="list-style-type: none"> ✓ 中高頻段： 7-24GHz ✓ 高頻段： Sub-THz • 更高階的 MIMO: 網路和終端裝置 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 網路側： 高密度天線 ✓ 終端裝置： 8x8 及以上 	<ul style="list-style-type: none"> • 降低無線電介面控制，信令，參考信號及表頭資料間接費用： <ul style="list-style-type: none"> ✓ 頻譜效率 • 精簡協議設計: 更少的協議層和管理負擔，簡化的處理流程 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 實現極致 QoS（延遲和資料速率）的要求 • 較高功率效率 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 每位元低能耗

3.2.2 臻善致美

6G 的不斷最佳化是勢在必行的，然而，無論用戶是 6G 的提供商還是消費者，最佳化過程必須是由終端裝置使用者的實際體驗為主導。下面將圍繞支撐最佳化設計的三個基石來進行闡述，即：

- 最佳化該網路架構使其支援任何實際的網路部署和拓撲場景，其中最核心的是異質性無線網路架構；
- 得益於人工智慧和機器學習領域的革命性進步，最佳化該系統使其從接入網到核心網可以在沒有人工干預的情況下自主進行操作和編排；
- 通過特定的應用跨層設計，最佳化系統以達到最有效地實現最優的端到端應用性能。

表 3 中描述了一些說明性範例。

表 3. 臻善致美的說明性範例

異構無線網路架構	系統融合的人工智慧和機器學習	針對應用的跨層設計
<ul style="list-style-type: none"> • 中心化，分散式，端到端 • 極致無縫 QoS 的用戶體驗 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 超大規模 MIMO ✓ 分散式 MIMO – 無覆蓋邊界 • 終端裝置間協作及 mesh 網路 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 本地 sidelink 和 mesh 網路，解決毫米波和次太赫茲頻率的遮蔽衰落 	<ul style="list-style-type: none"> • AI 輔助的無線接取 • AI 增強的網路運營 • 通過不斷反覆的機器學習運算提高性能 • 跨網路和終端裝置 	<ul style="list-style-type: none"> • 對 AI 應用的最優支援 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 高效的資料傳遞和模型更新管道 • 對超沉浸式和超低延遲應用的最優支援 • 能耗感測的 QoS 交付

3.2.3 融合暢達

跨域融合將在拓展 6G 體驗空間的同時，實現系統性能、覆蓋範圍和成本效率帶來額外的增益，預計在不同域將有更多機會，如無線接取（統一前端/回傳接取、授權頻段/非授權頻段融合）、非地面與地面網路融合、通訊與運算融合、通訊與感測融合，以及最根本的，終端裝置和網路節點之間的融合。在表 4 中可以找到其詳細資訊的描述。

表 4. 融合暢達的說明性範例

無線接取	地面和非地面	通信和計算
<ul style="list-style-type: none"> • 真正的無線行動網路 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 融合接取，前傳和回傳 • 授權頻段，非授權頻段和共用頻段的融合 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 精簡協定，以降低系統間接費用 ✓ 靈活射頻和快速接入 • 通信和感測 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 用於通信和感測的無線資源可以是共用或獨立的 • 網路節點終端化 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 通過混合節點緊湊網路的密集部署 	<ul style="list-style-type: none"> • 地面和非地面網路的接取及服務融合 • 同個終端裝置可以連接地面和非地面網路 • 地面和非地面網路的頻譜複用 	<ul style="list-style-type: none"> • 統一的網路系統架構 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 實現行動終端裝置和邊緣運算之間的資源分享 • 跨雲、網路和終端裝置的安全整合 • 解決 3GPP 和 IETF 之間的重疊問題，以實現沉浸式應用

4 無線接取融合

我們的 6G 願景是通過使用地面、空中或衛星無線電接取技術，支援任何部署場景，無論何時何地都可以提供連接的通用技術設計平台。我們設想的系統能夠以智慧和靈活的方式（見 §11），在滿足相應的區域頻譜法規下，利用潛在的頻譜資源（從 Sub-GHz 到 Sub-THz）為任何給定的通信需求提供最有效的無線接取。這樣的設想對工程實現，尤其是在無線電界面方面，提出了巨大的挑戰。由於無線電介面（例如 Uu 和 sidelink）的不同，不同的頻譜所有權、頻譜區域制度和部署方案，從而導致碎片化的無線接取是不提倡的方式。相反，我們建議通過無線接取融合來實現統一的無線接取技術。這種融合不僅可以實現規模經濟，還將促使價格合理、可靠性高的替代產品方案的產生，例如點對點鏈路、有線或光纖通信鏈路，從而促進網路的部署。

在高頻段（~毫米波及以上）建立網路覆蓋和容量將需要更密集的的無線電節點部署，以克服這些頻段帶來的更顯著的遮蔽衰落，這也說明它們不適合非視線傳輸。只有提供覆蓋範圍的無線節點本身在經濟上可行，即，易於安裝、維護和更換，不需要或很少需要建築物部署成本，密集的無線節點部署才具有經濟可行性。換句話說，如果這些無線節點不僅與終端裝置具有非常高的協同作用，而且還可以是易於使用的終端裝置，那麼這就讓高頻廣覆蓋成為可能。這些無線節點是終端裝置與網路節點融合的產物，稱之為“混合節點”，如圖 3 所示。混合節點可以與任何其他混合節點、終端裝置或基地台通信。混合節點還可以調整它們的中繼能力，例如，對它們進行配置以權衡延遲和傳輸速率的性能。異質性網路結構可以包含類比（如放大前傳中繼器）和數位（如解碼前傳中繼器）的混合節點，並能根據業務需求對通過系統的業務進行智慧路由。混合節點將改變 6G 時代無線覆蓋、網路規劃和運營的方式，它們將在有效解決高頻段頻譜資源的短距離通信方面發揮重要的作用。

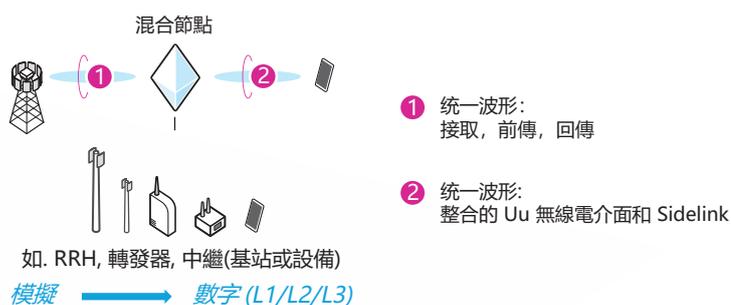


圖 3. 混合節點

無線接取融合的核心和混合節點的主要實現因素是統一波形原則，必須從一開始就按照上述原則設計：

- 滿足接取、前傳網路和回傳網路的要求（至少在傳輸速率、通信範圍和可靠性方面）
- 通過融合設計，實現 Uu 介面網路到終端裝置的無線通訊，以及 sidelink 終端裝置到終端裝置直接的無線通訊。

當然，對於上述 1) 和 2) 的統一波形的定義，要考慮到從 Sub-GHz 到 Sub-THz 的不同特性² 也是極為重要的。雖然使用不同的參數集 Numerology (例如循環字首、子載波間距) 的波形進行統一設計具有可擴展性，但根據這些波形的特點，可能需要不同的互補波形來適應從 Sub-GHz 到 Sub-THz 的全頻譜範圍。例如，雖然在 4G LTE 和 5G NR 中使用了循環字首 - 正交分頻多工 (CP-OFDM) 和離散傅立葉變換 - 拓展 - 正交分頻多工 (DFT-s-OFDM) 兩種 OFDM 波形，但它們的峰均比較大，對頻率偏移高度敏感，對於次太赫茲，這些問題尤為重要。因此，應該研究其他候選波形，如單載波波形。當然，也有必要研究適當的調製方案，用來作為上述方案的補充，如考慮極端資料速率條件下的解調複雜度，(連續) 調製符號之間快速相位變化等方面。最後，應該規範通用的協定層架構，以進一步消除服務和傳輸之間的依賴關係 (見 §7)。

遵循上述原則，無線接取融合技術將使 6G 從運營初期就能夠擴展到不同的部署和使用場景，同時減少實現這一目標所需的工作量。

²信道特性 (例如傳播損耗、多普勒頻移)、設備特性 (例如相位噪聲、功率放大器功效、功率放大器非線性特性)、系統特性 (例如信號帶寬、波束賦形)。

5 分散式網路架構

從傳統的網路架構上看，行動通訊系統一直是集中式的，使用者終端裝置作為一個用戶端，位於運營商控制的網路邊緣，而這個網路是由核心網提供服務的。考慮到在私人網路內，或不涉及網路節點直接在終端裝置之間提供服務（例如，V2X），使網路靠近消費者節點以最小化延遲或擁塞的風險，基於網路中的多個點提供服務的分散式服務成為一種趨勢。這些變化需要靈活的資料消費模型，在該模型中，系統要提供從服務源節點到服務目標節點最佳的資料路徑。這可能涉及使用終端裝置之間的各種接取技術，包含各種網路節點之間的路徑，具體如下圖所示。

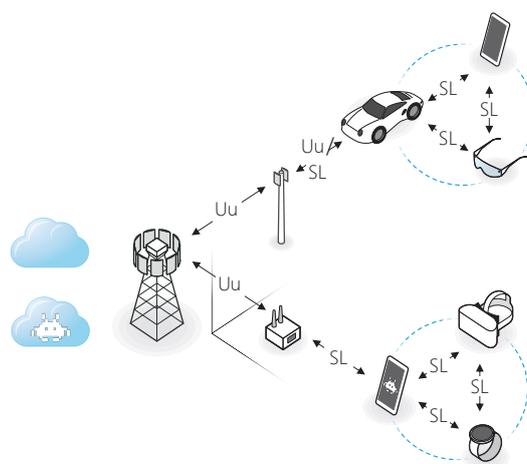


圖 4. 靈活的資料消費模型

我們的 6G 網路架構願景源於這個靈活的資料消費模型，它是為各種應用量身定制的：支援靈活拓撲、應用導向的分散式體系結構。這一模型將在運算、存儲、傳輸和能耗方面以最佳的資源使用效率處理該應用生成的資料，同時滿足所有相關的 QoS 和安全需求。

4G 定義的架構主要是為了傳輸行動寬頻資料，5G 網路架構中增加了實現更好的資料管理的手段，即允許 a) 將資源分割為資料類型和/或所有權的功能（網路切片，私有網路）和 b) 通過無線接取/核心網融合（邊緣運算）使應用更接近終端用戶。以 5G 為基礎，6G 體系結構將提供本機功能支援用以最好地服務應用程式。這一願景的核心是：

- 人工智慧/機器學習的出現，特別是針對消費者應用（如 AR 應用的環境檢測、即時語音翻譯），以及對運算資源的相關需求；
- XR 消費應用的預期爆炸式增長和對更接近終端使用者的在地伺服器的需求（比如，時延需求）；
- 智慧手機和 AR 眼鏡等近距離終端裝置之間對低延遲、高速率資料交換的相關需求。這三個用例概括了 6G 體系架構關鍵的原生功能：
 - ✓ 啟用網路邊緣和/或終端裝置上的運算資源，包括終端裝置和網路邊緣之間潛在的運算共用；
 - ✓ 使伺服器功能在分散在多個節點，這些節點可能分散在網路中；
 - ✓ 啟用終端裝置對終端裝置的操作。

³注：除去 5G 中本已支持的網路切片之外，其他功能為附加功能。

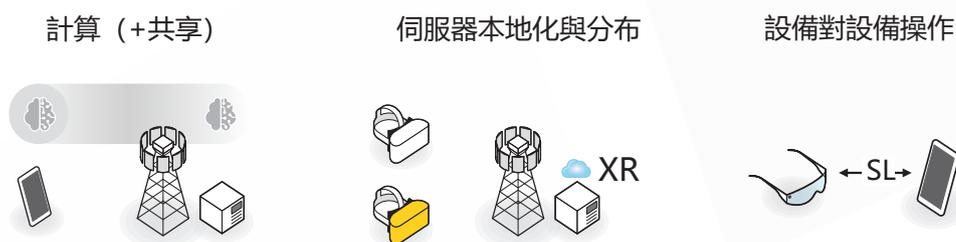


圖 5. 應用驅動網路架構的關鍵功能

靈活的資料使用模型使得 6G 網路架構具有另外一個突出的特點：靈活的拓撲。自行動通信系統出現以來，“網路”和“拓撲”的定義發生了顯著的變化。隨著 5G 的出現，網路類型的多樣化出現了飛躍式的變化：

- 除了由運營商控制的公共地面網路外，還引入了非地面網路和私人網路。
- 通過 sidelink 技術支援終端裝置到終端裝置通信，並逐步採用 sidelink 中繼的形式來支援終端裝置到終端裝置的 ad-hoc 網路；
- 無論是使用行動通訊或非行動通訊無線技術，都已經規範了通過另一個網路訪問一個網路的行為，如 Wi-Fi 或藍牙。

這種多樣化的環境為 6G 提供了一個合流的機會，支援通用系統架構框架下的所有部署模型，包括這些模型之間的無縫互通。

實現靈活拓撲結構的關鍵是支援混合節點（見 §3）和網狀網路。如第 3 節所述，6G 混合節點將改變 6G 時代無線覆蓋和網路規劃的方式，例如，多跳傳輸可以使終端裝置高效地連接到網路上。至關重要的是，無論有無網路參與協作的情況下，混合節點都將能夠考慮資源使用效率、QoS 和安全要求，以及任何可變條件，如衰落、負載、混合節點和終端裝置的電池使用情況等參數，從而動態決定和調整最有效的拓撲和與其相關的資料路徑，最終為終端裝置提供特定服務的覆蓋範圍。除此之外，混合節點能夠將子網路拓撲與其所屬的主網路拓撲隔離開來，從而保證子網路在主網路中的安全運行。

⁴包含以安全的方式快速且動態地加入或退出現有拓撲的能力。

6 面向真正無邊緣體驗的 MIMO 演進

MIMO 和多天線技術一直是提高 4G 和 5G 系統頻譜效率的關鍵技術，波束成型作為一種關鍵的驅動技術，其對應的頻率研究範圍也被擴展到 3GHz，甚至 24-71GHz 頻率範圍。對於 6G，我們希望 MIMO 沿著同樣的道路發展，同時也希望它能成為用於 6G 無線接取網架構設計的協作、無縫和異質的方法的基石。

6.1 超大規模 MIMO 演進到更高載波頻率

次太赫茲頻率將使得天線元件尺寸更小，MIMO 和增強波束成型將作為關鍵的技術解決次太赫茲信號特性帶來的挑戰。在 140GHz 下，給定尺寸的 2D MIMO 天線陣列的元件數量預計將比 28GHz 下增加 25 倍。這樣獲得的更窄的波束也能夠最大化提升頻譜效率和覆蓋範圍，以便最有效的利用較大的潛在頻寬——此時主要限於視線傳輸。此外，還需要特別關注波束管理的設計，以確保發送的波束能夠追蹤接收端的通道狀態，實現最佳鏈路性能。

如果最終能夠解決射頻複雜度問題（在現有毫米波系統克服這些挑戰之後），從而證明未來混合波束成型將更加數位化而非類比化，這將為不同用戶提供更靈活的多路資料傳輸能力，並進一步提高容量和頻譜效率，以及低延遲的增益。

由於要支援更好的波束跟蹤，所以需要行動裝置內部有額外的射頻鏈路和 MIMO 處理操作，這些額外的功能帶來的另一個挑戰是要確保行動裝置的功耗是在可接受的範圍之內。

6.2 分散式異質性 MIMO 架構

6.2.1 分散式設計方法

在分散式 MIMO 部署中，收發信號不是僅僅綁定在一個節點/地點上，而是分佈在多個站點和節點上，從而能夠提高區域內的頻譜效率和用戶體驗度，具體的思考如下幾點所示：

- 聯合疊加傳輸：系統能夠允許不同的無線電站點積極貢獻對單個用戶的通信鏈路，這些信號相互不干擾，進而提高整個區域的可用使用者傳輸速率，從而突破傳統“基地台邊緣”的限制。
- 減輕用戶之間的干擾：規劃跨無線電站的多用戶協作，以儘量減輕跨站區域的使用者間的干擾。

基於上述描述，再加上更高頻段波束成型增益的增加和信號方向性靈敏度的提高，這將推動 6G 無線接取網路架構向 MIMO 處理/調度功能的集中化方向發展。在終端裝置通過某個區域或使用者周圍的條件變化時，為了允許來自不同無線節點波束動態地產生信號，建議採用無縫的“去邊緣覆蓋”設計方法。

需要特別強調的是，啟用這種集中式的 RAN 功能（C-RAN）對無線電站的傳輸網路架構提出了非常嚴格的要求（在同步、延遲和前傳/中傳傳輸頻寬方面）。傳輸網路到無線電站的“最後一公里”

的限制是在 4G 和 5G 部署中實際採用集中式 RAN 的主要障礙。然而，隨著 6G 的出現，在密集的城市和室內分散式網路場景中對更動態環境的需求將推動網路站點的簡化。其中，對於那些特定的部署場景，由於站點之間的距離較短，因此上述問題幾乎可以忽略不計，這為在地的節點提供了好處。對於郊區和農村的網路部署，這些實際的挑戰還會持續一段時間在這些場景中，相應的替代方法（見 §4、§5 和 §9）將更適合提高區域頻譜效率和使用者的體驗。

6.2.2 終端裝置作為混合節點

在前面的章節中提到了終端裝置作為混合節點的可能性和網狀網路，從而能夠在降低無線電站密集化的成本同時擴大網路覆蓋。在使用 MIMO 的背景下，我們希望這種混合節點能夠被所有分散式 MIMO 網路部署所使用以達到最大效果，在一個地理區域內最大限度提升覆蓋和用戶體驗。

圖 6 顯示了這種拓撲的一個示範案例。

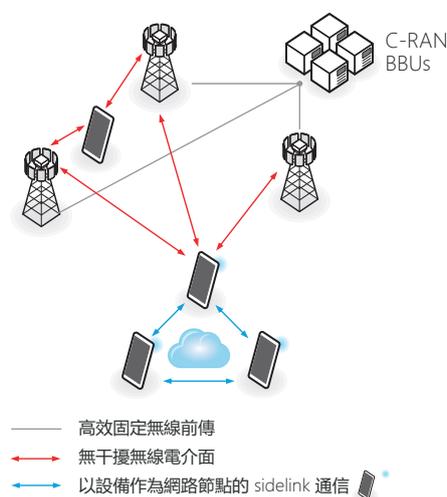


圖 6. 6G 異質性 MIMO 拓撲示範案例 (集中式 RAN)

6.3 主要的性能指標

下表 5 中的性能指標對於 6G 網路中的 MIMO 設計至關重要。

表 5. 6G 中 MIMO 設計的關鍵性能指標

關鍵性能指標 (KPI)	重要性
MIMO 功耗	當頻率擴展到次太赫茲時，MIMO 天線陣列在終端裝置和網路中變得越來越複雜，保持原有功率效率變得越來越有挑戰性。終端裝置電池功耗對於 6G 仍然很重要，而且網路功耗也需要不斷改善，參見 §8。
高性能行動性	對於毫米波和次太赫茲，精確波束跟蹤的能力，以及確保這些波束能夠在最優波束節點/天線之間進行最佳配對，將是最佳用戶體驗的關鍵。
區域頻譜效率和容量	演進到“去覆蓋邊緣”方法的原因是使傳統行動通訊網路的基地台邊緣不再受性能的限制。最大化區域內所有使用者的傳輸量是驅動分散式和異質性 MIMO 的關鍵驅動因素。

7 面向極致和可預測的 QOS - 精簡的使用者平面通訊協定

7.1 為即時沉浸式服務實現極致傳輸速率

6G 旨在為未來的應用提供即時沉浸式服務，如為使用者提供全息影像和觸覺體驗。這些內容通常在邊緣伺服器中渲染，並通過高性能無線鏈路傳遞給使用者裝置。

新的 6G 應用需要以下不同的、具有挑戰性的組合：

- 保證高資料速率超過 1Gbps
- 保證低延遲在 0.5-5ms 範圍內
- 在不影響最終使用者體驗的情況下，容許一定程度的資料丟失

當前的協議設計重點是無損資料傳輸，這種方式不適合高度交互的沉浸式應用，對於這些應用來說，丟失的資料包和延遲的資料包在本質上相同。如同音訊或視訊，接收端無論如何都需要丟棄那些錯過轉碼器最後期限的資料包。

7.2 新方法：擁塞管理/恢復，而非按序交付

5G 和前幾代的行動通訊系統中的更高協定層（RLC 層或 PDCP 層）把無損按序交付作為規範重點，以克服約 1% 的 MAC 層 PDU 丟失率。無損按序列交付對於防止應用層 TCP/IP 協議觸發擁塞控制尤為重要。不幸的是，TCP 擁塞控制並不適用於無線環境，一旦檢測到小包資料丟失，緊接著就會觸發資料速率的急劇降低。由於 RLC 層 PDU 重新傳輸具有較大的往返延遲，因此無損傳輸的成本非常高。更糟糕的是，TCP 中冗餘的重傳層可能會導致另一輪重傳延遲。圖 7 描述了 5G 通信協議層上的重傳延遲。

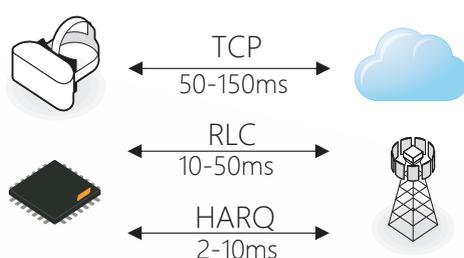


圖 7. 5G 通信協定上的重傳延遲

對於高度互動式沉浸式應用程式，需要採用不同的方法來解決新的用戶體驗干擾因素，如表 6 所示。需要注意的是，所有這些干擾因素都是時變的，並且無法通過基於重新傳輸和無損按序交付的傳統方法加以克服。

表 6. 影響 6G 極致用戶體驗的主要因素

影響性能的主要因素	主要原因
資料包時脈抖動	使用者行動性和資料複用（空中和核心網路）
資料包丟失	網路節點邊緣的傳輸和接收不那麼強韌
資料傳輸速率波動	節點流量暫時超過節點容量。源轉碼器的資料流量需要根據每個使用者可用的資料速率快速、可靠地調整。

7.3 用於動態無線電層/應用層相互感測的跨層 API

為了克服前一節中描述的體驗干擾，發展無線電層/傳輸層和應用層之間的動態相互感測是非常有前景的。表 7 列出了關鍵的相互感測因素，圖 8 展示了我們對跨層 API 概念的看法。

表 7. 無線層和應用層之間關鍵的互相感測因素

互相感測的方面	影響
無線/傳輸層對應用流量需求的感測	應用層會通知無線層如資料塊大小、週期性等資料傳輸模式特徵的變化，
無線/傳輸層對可接受的 QoS 的感測	應用層將可接受的 QoS（例如，可接受的丟包率、時脈抖動或延遲預算）的變化通知無線層
應用層對無線接取 QoS 的感測	將無線層中導致 QoS 的降低或提升的環境變化通知給應用層，且網路要保證特定終端裝置和特定應用的 QoS
應用層的動態 QoS 調節	應用層對無線電條件的變化作出反應，並選擇可能的最佳策略（例如，不同的轉碼器品質、恢復策略等），以最大限度地根據可用 QoS 提高用戶 QoE
渲染功能的動態分割	根據終端裝置/邊緣處理能力和無線條件動態決定終端裝置與邊緣渲染功能的分割。這可以共同最佳化使用者體驗和網路資源利用率。

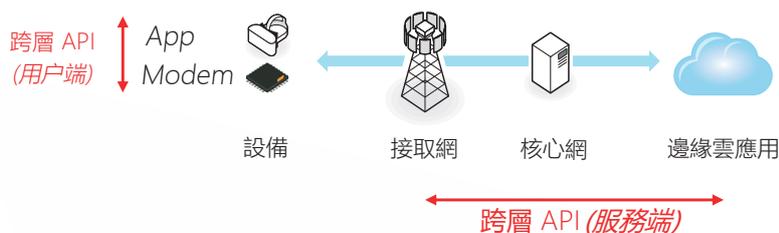


圖 8. 跨層 API 的概念

7.4 精簡的使用者平面通訊協定

我們需要對 6G 通信用戶平面協議進行仔細地重新設計，以有效解決上述用戶體驗干擾因素。通信協定中的較低層需要預測可以保證的性能，並將此資訊傳遞給應用層以供考慮。

不幸的是，上一節中描述的這些相互意識原則雖然是必要的，但還不夠。當將高資料速率和低延遲需求耦合在一起，同時需要確保 6G 通信的安全性和隱私性時，6G 通信協定的處理能力需求、記憶體使用和能量佔用會顯著增加。因此，在不增加資料傳輸的相關成本和能耗的同時，仔細設計精簡的協議以滿足 6G 使用案例的需求變得尤為重要。

雖然半導體技術的進步將緩解部分壓力，但這些新型沉浸式服務的通信和存儲需求將遠遠超過技術發展和整合的速度。我們需要引入 5G 協定中的原有功能，並繼續保留以向後相容原有的服務。同時，在用戶平面協定盡可能精簡的情況下，有必要採用一種新的操作模式，將資料平面內的每個封包的干預保持在最低限度，從而減少其對任何新的高要求服務的總體延遲的影響。在這種新的操作模式中，只有在非常必要的情況下才能引入功能，以保持良好的使用者體驗。這將確保 6G 通信協定能夠在合理的處理能力和存儲限制內，同時以高能效的方式服務於不斷變化的業務。精簡的運營模式性能標準如表 8 所示。

表 8. 精簡協定的性能標準

性能標準	原因
避免無損操作	即時服務不能接受與高層資料恢復相關的延遲。所需的可靠性將需要由較低的協定層層來保證。
避免按序交付	對即時服務來說，重新排序延遲是不可接受的。必須不惜一切代價避免與隊頭阻塞相關的延遲和緩存，並儘快刪除過時的內容。
提前獲取授權資訊	為了減少即時服務的上行處理延遲，那些不需要每調度間隔進行變化的上行授權資訊應該在授權時機之前就獲取到。
減少封包表頭資料間接費用	為了控制高傳輸速率服務的處理間接費用，必須避免控制資訊以與資料資訊相同的速度增長。
實體層和媒體存取控制層協調緊密	為了減少基地台和終端裝置的記憶體佔用，媒體存取控制層和實體層之間需要緊密的協調，只有需要恢復的資訊應該存儲在 HARQ 緩衝區中。

8 系統能源足跡和能耗效率

半導體技術的發展極大地提高了前幾代行動通訊網路的晶片性能，並顯著降低了功耗。在過去，這些半導體能耗利用率的提高使終端裝置和基地台的複雜度增加。然而隨著時間的推移，儘管預期能耗效率將持續提升，其預期提升的速度不太可能滿足 6G 使用案例的需求。為了提供極致的用戶體驗，6G 使用案例需要支援 10-100 倍數據速率提升、更低的延遲、更高的 MIMO 階數，並需要工作在能耗利用率較低的 Sub-THz 頻段上。

在 NR R15 版本之後，就已經顯現出能耗演進放緩的趨勢。很顯然的，如果不在 3GPP 協定中做進一步的推動，可接受的終端裝置功耗的目標就無法達成。因此，我們看到 3GPP 在隨後的版本中也進行了一些補救的工作。

8.1 極致節能的終端裝置

手持裝置從根本上受制於電池容量和散熱能力。為了保證終端裝置表面的溫度處於安全範圍，典型無風扇 6 英寸智慧手機的平均功耗需要限制在 3-5W 以下。雖然電池能量密度可能會在未來 10 年內得以提升，但在同一時期內，熱功率限制不太可能顯著放寬。並且普遍認為，6G 時代會有更多的緊湊型終端裝置和模組的需求。它們可以被用於諸如先進遠端呈現、全息通信、感測網路等這樣的應用中。這些新形式的終端裝置可能會受到更嚴格的限制，不僅因為它們的外形尺寸（如眼鏡這類體積和電池容量受限的終端裝置），還因為它們是穿戴型裝置，而非手持或攜帶型裝置（由於長期與皮膚接觸，這類終端裝置有更嚴格的散熱要求）。表 9 列出了一些值得研究的方向。

終端裝置的峰值功耗和成本通常由接收端下行部分主導，與接收端下行的峰值資料速率近似成正比。在其他條件相同的情況下，終端裝置峰值資料速率增加 10-100 倍會導致峰值功耗也增加大約 10-100 倍，從而產生無法接受的功耗程度。為了將終端裝置的平均功耗保持在可接受的範圍內，終端裝置必須顯著的控制非啟動時段以及低速率工作時段的功耗。這些時段的功耗必須大幅度低於峰值速率時的功耗水準。為實現這一目標，必須確保終端裝置的日常通信行為（控制通道監控、波束管理、鄰區測量、空間態尋呼監聽等行為）不觸發不必要的喚醒動作，進而讓終端裝置盡可能長時間的保留在休眠態。

表 9. 終端裝置節能方案

解決方案	描述
基於終端裝置節能的系統標準	從最開始制定標準時就將終端裝置的節能設為所有協議層的基本 KPI，該 KPI 適用於所有相關的終端裝置優化程式
Big-Little (大小雙核心) modem 架構	6G 規範必須支援 Big-little modem 的設計思路，允許終端裝置在低活躍態下使用低複雜度且節能的子系統。見圖 9
零功耗的空間模式：超低功耗喚醒與能量收集	集能量收集和性能優化於一體的超低功率終端裝置類型，可以在低活躍態運行時不需要任何電池電源。

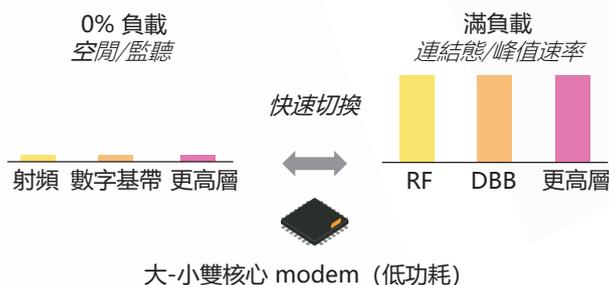


圖 9. 設備 Big-Little Modem 設計概念

8.2 網路節能

5G 網路的能源足跡 (energy footprint) 問題已經引起了人們的關注。這不僅因其對環境的影響，也是因為網路運營商運營成本的影響。在無線層面，基地台的複雜度和基地台的部署密度會進一步增加。所以必須採取有針對性的措施，否則這兩個方面因素會導致網路的能源消耗大幅增加。除此之外，分散式雲化也可能會導致功耗的進一步增加。

在功耗這個問題上，妥協的餘地是有限的。在某些情況下，我們認為可能需要犧牲最終的網路性能或靈活性來平衡功耗問題。表 10 列出了一些潛在的研究方向。

表 10. 網路能耗的潛在研究方向

研究方向	描述
基於網路節能的系統標準	從最開始制定標準時就將網路的節能設為所有協議層的基本 KPI
基於混合節點的混合組網 (見 §4)	基於網路和終端裝置的中繼錨點 (relay anchors) 組合可以在顯著降低能耗的情況下實現宏大的 6G 性能目標。
將終端裝置已有的節能技術延伸至網路	網路在非啟動態或低活躍態下，有機會進一步大幅降低終端裝置功耗。基地台側可以考慮一定程度借鑒終端裝置的節能技術，優化這部分的功耗
動態網路節點開關和終端裝置輔助型的網路喚醒 (如圖 10)	在最小化對連接終端裝置的影響下，網路需要盡可能關閉不必要的網路節點或將其停留在低性能狀態。然而，這很難在不影響網路運行的情況下輕易實現。網路和終端裝置之間更好的相互感測可為這種聯合優化行為提供更好的標準。

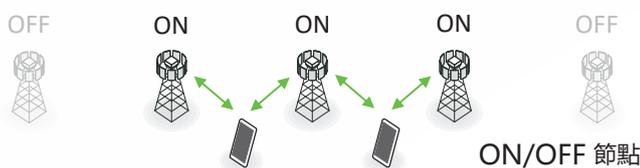


圖 10. 終端裝置輔助喚醒的動態網路節點開/關

8.3 基本的 KPI：極致性能的能耗效率

表 11 總結了終端裝置和網路功耗相關所面臨的一些具體挑戰。

終端裝置節能和網路運營節能的問題，不能像以前幾代行動通訊網路那樣，事後才開始規範和優化。從一開始，所有技術領域（射頻電路設計、數位技術、波形設計、高級 MIMO、實體層過程等）都需要進行深入的能耗研究，將功耗作為基本的 KPI。這可能需要改變傳統上以性能為導向的研究文化和標準化過程。一些現有的系統權衡需要仔細考慮，如終端裝置與網路功耗、功耗與性能、功耗與延遲等。

表 11. 能耗領域的挑戰

挑戰	描述
功耗和流量負載匹配	當資料負載降低時，終端裝置和網路功耗也應大幅降低。
網路密度增加但網路總體功耗不增加	為了提升單位元頻譜容量、克服更高頻段（毫米波，SubTHz）的傳播損耗，需要增加網路密度。但網路的總體功耗不能增加。
“能耗感測”的端到端服務交付	在定義用於 6G 標準的技術解決方案時，必須要首先考慮到，額外的性能和額外的功耗之間有直接的聯繫。
終端裝置和網路間的“能耗協作”	終端裝置和基地台之間更好的“相互感測”有助於在一端或兩端之間實現額外的節能收益。
充分利用網路和終端裝置的關閉時間，來共同節省網路和終端裝置能耗	主動調整網路和終端裝置的非啟動時間，使它們重疊，最大限度地實現聯合節能。

9 地面與非地面網路融合

非地面網路 (NTN) 是一項極具發展前景的技術，其可以補充現有的地面網路部屬，並以類似 eMBB 的資料速率填補現有的地面覆蓋缺口。相較於傳統行動通訊網路，在人口稀疏地區部署 NTN 網路能以更低的成本實現廣域覆蓋。然而，一個必要條件是 NTN 的接取不會給終端裝置使用者帶來額外的負擔：這也意味著重用現有的如智慧手機等主流大眾市場終端裝置，以及現有的手機用戶是一個關鍵的要求。

表 12. 地面與衛星通信融合的挑戰和研究方向

	更高的系統容量	主流高階市場終端裝置	與 TN 無差異的 NTN 服務體驗
NTN/TN 渾然天成	TN/NTN 切換和	對齊 TN/NTN 無線電介面和網路	為源自同一門號的用戶
整合式 TN/NTN 終端裝置	TN/NTN 頻譜複用	消費級手持 TN/NTN 終端裝置	提供無縫的用戶體驗
TN/NTN 在低頻段 (例如 L/S) 的頻譜複用	在 TN 覆蓋之外，運營商可將 TN 的頻譜複用給 NTN 使用	手持終端裝置無需添加額外的射頻前端 (功放/雙工器/濾波器)	與 TN 相同的可用頻譜
衛星部分的成本降低	大量 LEO 衛星提供更高的系統容量		大量低成本 LEO 衛星可以降低服務價格

9.1 TN/NTN 渾然天成

5G NR 技術自 3GPP Rel-15 開始進行規範，隨後在 Rel-17 期間擴展到支持 NTN。6G 技術自開始便為聯合定義 NTN/TN 提供了機會：其通過定義高度整合的網路架構和無線電介面技術，從而不受限於早期標準版本的與舊版相容問題。



圖 11. TN/NTN 的整合和融合

為了從小眾服務發展到大眾市場，終端使用者需要達成以下目標：

- 為所有相關應用提供真正無處不在的服務體驗：寬頻、物聯網、永續環境感測系統，其中 NTN 填補了現有的 TN 覆蓋缺口。
- 為源自同一門號的終端使用者和應用提供無縫 TN/NTN 行動性，類似於現有的國際漫遊協議。
- 價格合理的 NTN 服務，具有可接受的寬頻性能和/或地面覆蓋範圍以外的室內滲透率。
- 通過已建立的零售管道提供價格合理的 TN/NTN 終端裝置。

9.2 TN/NTN 頻譜複用

從歷史上看，衛星和地面頻段是以獨佔方式分配的，完全獨立使用，這不是最佳的頻譜利用方式。對於支援 NTN 的手持終端裝置而言，最理想的頻帶是位於 1.5-2.5GHz 範圍（L/S 頻帶）的 FDD 頻帶，而目前該頻段內只有少量頻譜資源可用於衛星應用。

對於地面運營商來說，在目前覆蓋範圍之外的偏遠地區，通過提供基於 NTN 的 eMBB 行動通訊網路服務來擴大其行動通訊網路覆蓋範圍是一個巨大的機會。這可以基於運營商自己的授權頻段資源來實現，而這些頻段資源目前尚未在人口稀少的地區使用。目前，可用的 NTN 頻段不足以為手持終端裝置提供可接受的寬頻體驗，而這些未使用的地面頻段資源有助於在偏遠地區提供 eMBB 服務。

這種特定的規畫還對實現終端裝置規模化經濟帶來了額外的積極影響。複用 TN 頻段，也使得 NTN 可以充分複用特定於 TN 的射頻前端組件（濾波器、雙工器、寬頻放大器、天線），從而完全避免了終端裝置支援 NTN 所需的額外成本、體積和複雜度。

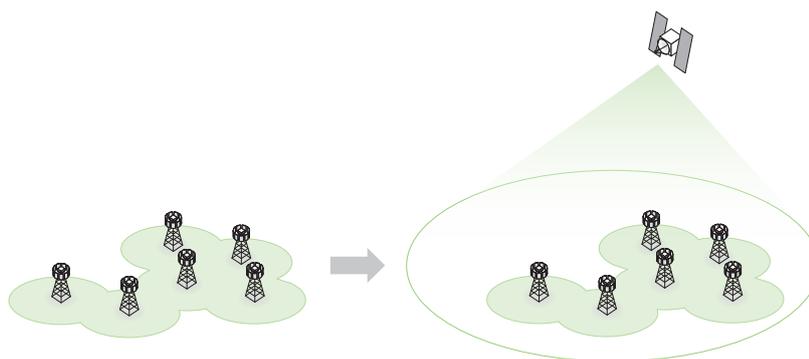


圖 12. TN/NTN 的頻譜複用

9.3 單一且價格合理的 TN/NTN 終端裝置

與地面行動通訊網路的終端裝置相比，現有的手持衛星通信終端裝置通常體積龐大、缺乏吸引力且成本高昂。如前一節所述，通用 TN/NTN 無線電介面和 TN 頻帶複用的組合實際上可以抑制任何類型（射頻前端、射頻收發器、基帶、波形因素等）、任何終端裝置的複雜度增量。

TN/NTN 的技術整合可以與同時提供 TN 和 NTN 覆蓋的單一服務相結合，從而基於現有龐大、動態且高度創新的智慧手機生態系統，將 NTN 轉變為一種大眾市場的主流功能。重要的是，6G TN/NTN 終端裝置能力可以作為一種可被所有用戶廣泛應用的新型標配性功能，而其要求的外形尺寸和成本結構與引入此功能之前可保持一致。因此具備 6G TN/NTN 能力的終端裝置可以通過既有的 OEM 製造和零售管道進行交付。

此外，NTN 技術與 6G 終端裝置 mesh 網/中繼能力的結合可用於在偏遠地區提供更深的室內覆蓋。

10 內生人工智慧集成系統 - 通信和運算的融合

人工智慧和機器學習正迅速滲透到所有行業領域，無論這些領域是專業級用途還是消費級用途。AI/ML 能夠自動執行複雜任務（即，最少且最終無需人工干預），同時反覆地從其操作中學習，隨著時間的推移系統地提高其性能。因此，AI/ML 不僅是 6G 時代大有裨益的工具，它還將在 6G 系統的建立、優化、管理、協調和運行中發揮關鍵作用。

引入人工智慧不需要通過人工干預就可以自動、迭代運算地提高行動網路性能，這樣的設計目標和能力在產業界已經存在相當長時間了。例如，在現有的 4G 和 5G 系統中，自優化網路和最小化路測功能允許以最小的人為干預自主優化網路和終端裝置運行。機器學習為網路和終端裝置帶來了新的機會，它們可以使用巨量資料來識別和學習如何優化系統性能，而無需定義一組預先設定的結果。

AI/ML 不僅將用於優化 6G 終端裝置和 6G 網路的性能，同時也將在 6G 網路和 6G 終端裝置之間協同使用，以優化整個 6G 系統的性能。AI/ML 將實現即時、近即時或非即時的性能優化，具體取決於當前的需求，例如：

- 即時：實體層操作、鏈路自我調整、調度、終端裝置功耗
- 近即時：負載均衡、QoS 優化、干擾管理
- 非即時：網路規劃、網路配置

ML 為網路性能最大化帶來了前所未有的優勢，衡量網路性能的重要 KPI 包括：區域頻譜效率、服務傳輸速率/延遲/可靠性/可用性、終端裝置電池壽命、網路/終端裝置能耗、連接建立延遲/可靠性、終端裝置位置準確性。當將它們分解為影響各個 KPI 的不同功能時，ML 支援這些目標的機會是無窮無盡的，例如優化區域搜索、MIMO 無線鏈路自我調整、行動性、干擾抑制、流量路由等。

然後，當我們將有關端到端應用的資料載入到無線接取域時，就可以進一步優化服務供應。

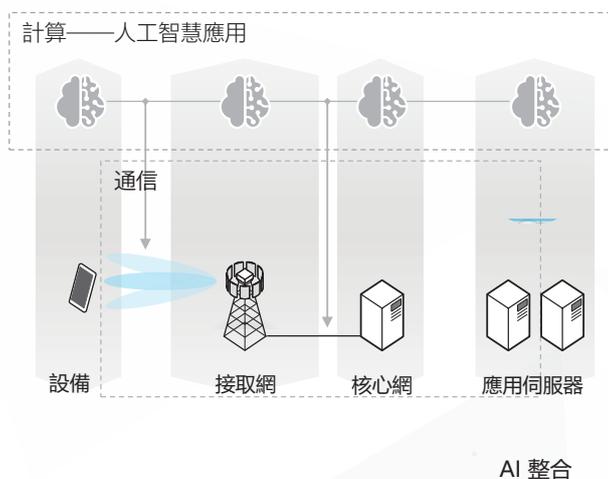


圖 13. 6G 時代 AI 集成的機遇

這種機遇也帶來了一些挑戰，包括：

- 如何在分散式決策、且支援決策的資料來自不同節點的網路中進行最優學習。
- 如何在來自不同廠商的節點間相互連接的情況下，保證多廠商環境下的協同演算法。
- 如何在不降低 KPI 的情況下，高效、安全地管理資料集，並將資料集傳輸到系統的適當位置，以做出此類決策。
- 如何驗證 ML 技術在網路和終端裝置中的性能，以確保在考慮所有 KPI 的情況下做出最佳決策。

上述挑戰要求所有行業參與者建立一個協作的標準化框架，以確定機器學習的關鍵目標領域，定義相關框架和架構，以促進機器學習的成功應用。

這種預備性的研究在 3GPP 5G-advanced 已經開始了。此外，在 ORAN 聯盟內部，已經開展了為資料收集確定網路架構和介面的工作，並定義了 ORAN-RAN 智慧控制器 (RIC)。6G 將成為第一代從初始便與 ML 形式的人工智慧渾然一體的行動通信系統，這將簡化整體系統設計，同時最大限度地提高性能。

11 頻譜 - 增加頻譜資源，優化頻譜利用

越來越多的無線終端裝置服務不同的社會需求，這一趨勢沒有減弱的跡象，並不斷推動越來越高的容量要求，從而需要更多的頻譜來滿足這些終端裝置和應用的流量需求。在本節中，我們將圍繞潛在相關的 6G 新型頻譜，更加智慧化的頻譜接取技術，以及如何優化頻譜共用機制來為 6G 平臺創造更多新機會等內容進行探討。

11.1 7-24GHz

對於 3GPP 目前定義的頻帶，FR1 最大到 7.125GHz，FR2 從 24.25GHz 開始，二者之間的 7-24GHz 範圍記憶體在大量可利用的潛在頻譜資源。該頻段的頻譜特性兼具 FR1 和 FR2 的優點，可使 6G 操作具有以下優點：

- 高階 MIMO（8x8 或更多）—— 可以將更多大的天線陣列整合到更小的物理尺寸區域中。而這正是 FR1 範圍內現有頻段的局限所在，因為該頻段下的波長更長。
- 相較於 FR2 範圍的頻譜，傳播特性得到了改善。

因此，應積極考慮 7-24GHz 頻段作為 6G 運行的候選頻段。

11.2 Sub-THz

在 sub-THz 頻段範圍內，有機會為 6G 通信提供大量的新型頻譜資源。表 13 羅列了不同國家/地區在 sub-THz 範圍內潛在的頻譜資源。

表 13. Sub-THz 頻譜資源

頻率範圍	潛在可用的頻譜資源和時間表	國家/地區
100-200GHz	130-134, 141-148.5, 151.5-164, 167-174.8GHz: 頻寬共計 31.8GHz, 用於固定和/或行動業務。	美國 (聯邦通訊委員會), 歐洲 (電子通信委員會)
≥ 200GHz	252-275GHz: 頻寬共計 23GHz, 指定為地面行動和固定業務共用使用。	全球 (世界無線電大會 16)
275-450GHz	用於固定和行動業務的頻寬為 175GHz, 其中 137GHz 無使用限制, 38GHz 需與地球探測衛星業務共用使用。	全球 (世界無線電大會 19)
其他	頻寬共計 21.2GHz, 用於實驗未授權的使用。	美國 (聯邦通訊委員會)

然而，在這個頻率範圍內的無線通道會經歷較大的傳播和反射損耗，遮擋也會導致 LOS 徑的可用性降低。這些現象導致鏈路性能具有更短的範圍和間歇性的開/關行為等特點。Sub-THz 頻段天線的小尺寸使得收發機可以配備大量的天線單元，從而實現具有高波束增益的窄波束，有助於克服衰減損耗和分子吸收。然而，這也使操作對於波束失准更加敏感，導致對行動用戶的波束跟蹤更具挑戰性。

⁵ 參見 3GPP TR 38.820, “7-24GHz frequency range (Release 16)” V16.1.1, 2021 – 03.

從應用的角度而言，上述特性使 Sub-THz 頻譜適合以下應用：

- 固定回程或行動裝置，例如與一個網路樞紐連接，或作為網路的一部分，並通過狹窄的固定波束和 LOS 點對點/多點連接來最大限度地擴大連接範圍。
- 短距樞紐，在本地視線環境（如室內，大型場館等）中，為潛在的大量使用者提供高資料速率/容量。

為最大化 Sub-THz 的使用機會，需要設計先進的無線接取協定來克服典型的挑戰，同時滿足目標使用場景的需求，同時需要融合性設計（見 §4）以便在不同頻譜授權制度下工作，包括授權頻譜，非授權頻譜或者混合性頻譜。

11.3 靈活雙工的智慧頻譜接取

現有的 0.4-3GHz 頻段對 6G 生態系統仍然很重要，這是由於它們天生的覆蓋優勢，特別是對於室外到室內的通信。頻譜資源稀缺使得 6G 最大化頻譜利用效率變得非常重要。受限於物理天線尺寸以及它們進一步給網路和終端裝置帶來的限制，在這個頻段範圍內通過更高階的 MIMO 實現高頻譜利用率將非常困難，因此仍需對新型方法進行探索。相較於前幾代通信（包括 4G 到 5G）之間的演進，5G NR 已經減少了“始終線上（always-on）”的網路傳輸方式，這使得運營商從 5G NR 向 6G 無線接取的演進變得更為便捷。

更好地利用現有的 3GHz~71GHz 的 5G 高頻段也很重要，我們期望“異構 MIMO”（見 §6）在此發揮重要的作用：其中終端裝置可作為網路節點進行協作，以最大限度地提高地區的整體頻譜利用效率。

鑒於現有頻譜在很大程度上被靜態地定義為“FDD”或“TDD”的雙工模式，我們預計 6G 將是革命性的：通過網路和終端裝置上的全雙工或部分雙工，在所有頻譜上驅動無約束的智慧雙工接取，以最大限度地利用頻譜。6G 還允許以更具創新性的方式組合單獨的頻譜資源（例如高頻段+低頻段），以實現更好的性能與複雜度的權衡。

11.4 最佳的頻譜共用

為了滿足某一地區的峰值和平均流量需求（以及相關的應用要求），對頻譜需求的日益增加將進一步導致需要更優的頻譜接取方式，從而使得網路供應商能夠以最低的成本來滿足這些需求。

鑒於此，6G 系統需要支援最佳的頻譜共用方式，不僅要支援同一網路的運營商和使用者之間的頻譜共用，還要支援不同部署拓撲下的最佳共存。一個例子是，當終端裝置/混合節點被用作 mesh 網路的一部分時，它們的傳輸和接收能夠與同類型的其他節點、以及傳統網路節點的傳輸和接收進行協調，從而避免干擾且最大限度地提升區域內所有使用者的體驗。此外，地面節點和非地面節點間的頻譜複用（見 §9.2）也將帶來一些新的挑戰需要克服，從而能夠支援最佳的複用方式以實現完全無縫的覆蓋。

最後，使 6G 與現有的非行動技術共存也將是確保垂直行業能夠採用 6G，並最大限度地復用任何現有特定頻譜資源的關鍵。

12 跨雲、網路和終端裝置的端到端安全架構

6G 生態系統蓄勢待發，為快速實現社會的數位化轉型（無論是對人、企業還是政府），它必須天生具備強大的可靠性，從而能夠應對任何意外或惡意的侵害，並具備足夠的靈活性以應對新的未知威脅。只有這樣，6G 才能得到消費者、企業和政府的充分信任，並兌現承諾。

作為 6G 成功的條件，對 6G 的信任必然是由終端使用者和發佈運營 6G 的實體（“6G 運營商”）賦予的。信任無疑來源於 6G 可以滿足使用者體驗甚至超過預期性能的能力，但從根本上說，信任根植於 6G 能夠提供全面安全性和彈性的能力。

對 6G 的信任將建立在以下幾個方面的基礎之上：

- 確保 6G 系統和終端裝置是完全安全的，即：通過相關設計，6G 系統在任何時候都能夠充分保護其傳輸或存儲的所有使用者資料和身份；通過擴展，6G 終端裝置可以完全且可驗證地滿足對所有使用者資料和身份的保護需求。
- 它具有高度的內建彈性，即在出現故障時能夠迅速自動恢復的能力，以及在不存在故障的情況下（例如某些政府部署）能夠選擇性地提供更高可用性的能力。

6G 安全不僅包括對使用者資料和身份的保護，也包括允許任何終端裝置之間（雲、網路和終端裝置）相互通信、相互進行身份驗證的必要手段。對類似的通信進行授權不僅可以防止系統被未經授權的使用者使用，也可以防止被惡意使用。

6G 安全面臨三大方面的挑戰：

- 6G 結合雲、網路和終端裝置的新型架構模型；
- AI/ML 在 6G 中的核心角色；
- 運算技術的進步。

6G 生態系統將結合多種技術，包括雲（和相關伺服器）、網路基礎設施、終端裝置以及它們之間的介面。6G 還將具有分散式網路架構模型的特點，例如邊緣運算的廣泛使用和 mesh 網路的出現。這將產生潛在的新型安全性漏洞，例如一些原本處於核心網極為安全的功能被推到了網路邊緣。再比如，終端裝置在網路架構裡不僅扮演非源頭，即末端的角色，也更積極地為其附近的終端裝置提供網路連接，因此將承擔諸如測量和記錄使用資訊的責任，而這項工作過去是在核心網進行的。分散式網路也可能對處理本地資料有自己的要求（例如，部署在安全位置的網路邊緣節點可能需要將一些資料限制在本地，而非與邊緣之外的其他網路節點共用資料）。所以，無論體系架構的模型是什麼，6G 系統所有的組成部分都必須天然獨立且協同地提供基本但高水準的安全性和彈性，更重要的是要始終確保沒有 QoS 的降低（例如延遲方面）。

AI/ML 將在 6G 系統的運行中發揮核心作用，特別是它可以減少或避免人為干預。有了它，預計 6G 系統將產生、傳輸、存儲和利用前所未有的巨量資料。這些資料將包括使用者相關的資料。保護這些資料的機密性、完整性和來源不僅關係到 6G 信任的建立，還嚴重影響到 6G 的實際運營（例如，任何惡意的資料損壞都可能對 6G 的運營產生不利影響）。然而，重要的不僅僅是對資料的保護，還包括檢測和識別任何潛在的資料損壞，比如，在影響 6G 運行之前就將這些資料丟棄。AI/ML 必須在本質上是安全且可被信任的，並且可以廣泛應用於 6G 系統的運行中；但它也將是一個關鍵工具，必然使這些系統複雜而安全。AI/ML 將能夠快速檢測和回應可能出現在 6G 系統中的安全威脅和漏洞，重要的是，從這些事件中學習，以迭代運算提高這些系統的安全級別。

運算技術的進步，尤其是量子運算，可能會對密碼學和社會的數位化構成重大威脅。對於 6G，不僅要從安全的角度，而且要從實際實現的角度出發，考慮非對稱密碼和對稱密碼演算法，來研究能夠抵禦量子電腦密碼分析攻擊的方法。

最後，需要從安全性以及在 6G 系統中實現的複雜度兩方面研究一種有前景的方法，即實體層安全性，它是對更傳統的密碼解決方案的補充。實體層安全可以提供一種有效且高效率的手段來對付無線電訊號上的漏洞和威脅，這些漏洞和威脅無論是在竊聽還是拒絕服務（例如干擾）方面天生就容易受到攻擊。例如，相較於更高層的協定，通過利用無線通道和/或無線終端裝置的實體層屬性和隨機性，可以更有效地實現實體層身份驗證。實體層安全也可以是一個特別強大的工具，以防止通信系統中使用 MIMO 和/或中繼通信（如使用混合節點，見 §4）的竊聽攻擊，這兩者都是 6G 系統的核心元件。MIMO 波束成形技術可以用來干擾潛在的竊聽者；（受信任的）混合節點也可以相互合作，以干擾潛在的竊聽者。

13 總結

6G 是一種面向 IMT2030 及未來的技術，其全球標準化預期將於 2024 年左右由 3GPP 啟動，而相應的正式商用預期在 2030 年左右。下一代無線通訊標準制定將會擴大我們社會的數位化轉型，影響範圍不限於消費者，或是專業市場的企業和政府。這樣如此宏大的目標要求總體系統設計能夠滿足這些市場的極致性能需求，同時能夠以安全和可持續的方式適應其各種資料消費模型和部署場景。

6G 標準的制定看上去非常複雜，但若遵循關鍵的系統設計原則，我們的願景就能夠實現。這些原則就是繁簡得宜、臻善致美和融合暢達，即 S.O.C.：

- 繁簡得宜是必要的額外複雜度與專注於簡單性間的平衡。可以在實現性能飛躍的同時顯著降低每交付位元資料的處理需求，以將成本和能耗保持在實際可控範圍內。
- 臻善致美指的是以最佳化使用者體驗為導向，無論該使用者是 6G 服務的提供者還是消費者。我們期望沿著三個新的關鍵方向進行優化：異質性無線接取體系架構、人工智慧和機器學習，以及專為應用設計的跨層結構。
- 融合暢達指的是對等域之間的融合，這對於解決承受能力和能源效率方面的挑戰是一個重要的機會。該融合包括終端裝置和網路節點之間、不同頻譜管理方式之間、接取、前傳和回傳之間、終端裝置到終端裝置和基地台到終端裝置接入之間、地面和非地面接入之間，通信和運算的融合等等。

與 5G 相比，6G 系統在流量與終端裝置類型、頻譜範圍與政策、網路拓撲等方面的複雜度將相對增加。人工智慧和機器學習可以整合到網路和終端裝置操作的各個領域，從而簡化 6G 的部署和操作。同時，迭代運算學習機制可以整體提高 6G 系統性能，無論是即時方面（如鏈路自我調整、調度）、近即時方面（如負載平衡、干擾管理），還是非即時方面（如網路規劃），因而能夠支援總體目標，如最大化使用者體驗、優化成本效率和最小化能耗。

能源效率對 6G 來說既是一個挑戰，也是一個機遇，可以讓 6G 變得與之前截然不同。社會可持續性目標將推動整體網路能源足跡的減少，同時仍需要性能的數量級增長（以及可能的節點密集化）。在終端裝置方面，我們需要克服散熱和電池容量的挑戰，以實現更高的實際資料速率和新的終端裝置外型，從而實現更先進的沉浸式應用。為了滿足這些需求，無論是在無線研究領域還是在半導體技術領域，我們都需要轉變研究的思路——將能源效率作為基本 KPI。

頻譜將是 6G 系統設計的另一個基本驅動力。為了應付在服務和使用案例中更為多樣化的需求，以及地理上的廣域覆蓋和按需接取服務的需求，系統將需要同時支援現有的頻率和新的頻率範圍，並實現最佳的頻譜共用。用於地面和非地面部署的 5G 以及傳統通信系統將會提高現有頻譜的利用率，將一些頻譜進行再分配，同時會將頻譜擴展到 7-24GHz 以及次太赫茲範圍。6G 能夠滿足不同的頻譜共用機制，從而促進系統部署的頻譜利用率提高。同時又能促進垂直行業市場的傳統頻譜複用。需要不同的部署方案，以便不同的頻率範圍都能得到最佳使用。

MIMO 將在 6G 時代發揮更為重要的作用，在 Sub-THz 頻段，得益於更小的天線陣列尺寸，天線陣列的數量得以大幅提升，從而有望解決 Sub-THz 頻段傳播特性帶來的挑戰。此外，mmWave 和 Sub-THz 頻段導致的網路密集化將進一步推動對去覆蓋邊緣化-分散式 MIMO 的需求，從而保障用戶在不同無線電節點下的無縫式體驗。

無線接取的融合對於實現 6G 目標架構至關重要，因為它可以避免技術碎片化，有助於最大限度地實現技術規模化經濟，從而提高網路和終端裝置的性價比。為此，建議採用統一的無線波形準則，該準則可基於一組簡單的波形和可選參數集進行擴展。此外，終端裝置和網路節點之間的融合，即網路節點的“終端化”或“混合節點”的部署變得尤為重要。該方法可利用更高頻段的頻譜資源（例如從 C 頻段到 mmWave 甚至 Sub-THz 頻段），以一種經濟且有效的方式來擴展地面 6G 的覆蓋。

6G 架構應當具有充分的適應能力，能夠為通信終端裝置間的任意資料業務模型提供最佳的網路拓撲，這些通信終端裝置既可以通過傳統地面網路架構，在一個本地 mesh 網路中進行直連，也可以通過飛行器或衛星終端裝置進行中繼連接。為此，從無線架構的角度來看，混合節點將發揮主要作用，並提供必要的網路功能以協作式地確定（無論是否涉及網路）最佳的無線網路拓撲。此外，6G 架構也將由原生應用所驅動，並具備可配置性以支援：

- 網路邊緣和終端裝置之間的運算資源優化分配、分佈和共用；
- 伺服器功能在多節點間的地化和分佈化；
- 終端裝置到終端裝置的直接作業。

傳統的使用者平面協定按順序來傳遞無損資料，但這不適用於需要低延遲的高交互沉浸式應用，因此需要一種新的方法來解決這些用戶體驗干擾因素（時脈抖動、封包遺失和資料速率波動）所帶來的挑戰。一個精簡的使用者平面通訊協定將依賴於應用程式和無線層之間更強的相互感測，從而實現目標性能，並減少對資料包級別干預的需求（這些干預會導致不可接受的延遲和流量間接費用），同時也能避免由於資料緩衝導致的嚴重的記憶體佔用負擔。

地面和非地面接取的融合是一項極具潛力的發展方向，其能夠以經濟有效的方式填補人口稀少地區現有的行動通訊網路覆蓋缺口。我們希望借助於現有終端裝置和地面行動通訊網路生態系統的規模和市場，以避免給用戶帶來額外的負擔。降低對消費級終端的硬體改造是非常重要的，這樣一來用戶可以通過單一的、可負擔的主流終端裝置、行動通訊網路和應用來接入衛星服務。實現這一目標的關鍵因素是地面/非地面無線電介面和網路的原生整合，以及地面和非地面接取間的頻譜複用。

最後，6G 需要本質上是安全且有彈性的，從而能夠在出現新的威脅時仍可信賴。實體層安全作為傳統加密措施的補充，不僅可以提高 6G 系統相對於 5G 系統的安全性，還可以解決傳統安全措施（如更高層身份驗證）的延遲問題，從而充分支持對延遲敏感的應用。AI/ML 技術將在快速檢測與回應威脅和漏洞方面發揮重要作用，同時能夠從這些漏洞中學習，以防止出現新的安全性漏洞。

Exhibit 1 Terms and Conditions

Your access to and use of this document and the information contained herein (collectively this "Document") is subject to your (including the corporation or other legal entity you represent, collectively "You") acceptance of the terms and conditions set forth below ("T&C"). By using, accessing or downloading this Document, You are accepting the T&C and agree to be bound by the T&C. If You don't agree to the T&C, You may not use this Document and shall immediately destroy any copy thereof.

This Document contains information that is confidential and proprietary to MediaTek Inc. and/or its affiliates (collectively "MediaTek") or its licensors and is provided solely for Your internal use with MediaTek's chipset(s) described in this Document and shall not be used for any other purposes (including but not limited to identifying or providing evidence to support any potential patent infringement claim against MediaTek or any of MediaTek's suppliers and/or direct or indirect customers). Unauthorized use or disclosure of the information contained herein is prohibited. You agree to indemnify MediaTek for any loss or damages suffered by MediaTek for Your unauthorized use or disclosure of this Document, in whole or in part.

MediaTek and its licensors retain titles and all ownership rights in and to this Document and no license (express or implied, by estoppels or otherwise) to any intellectual propriety rights is granted hereunder. This Document is subject to change without further notification. MEDIATEK DOES NOT ASSUME ANY RESPONSIBILITY ARISING OUT OF OR IN CONNECTION WITH ANY USE OF, OR RELIANCE ON, THIS DOCUMENT, AND SPECIFICALLY DISCLAIMS ANY AND ALL LIABILITY, INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, CONSEQUENTIAL OR INCIDENTAL DAMAGES.

THIS DOCUMENT AND ANY OTHER MATERIALS OR TECHNICAL SUPPORT PROVIDED BY MEDIATEK IN CONNECTION WITH THIS DOCUMENT, IF ANY, ARE PROVIDED "AS IS" WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, WHETHER EXPRESS, IMPLIED, STATUTORY, OR OTHERWISE. MEDIATEK SPECIFICALLY DISCLAIMS ALL WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, NON-INFRINGEMENT, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, COMPLETENESS OR ACCURACY AND ALL WARRANTIES ARISING OUT OF TRADE USAGE OR OUT OF A COURSE OF DEALING OR COURSE OF PERFORMANCE. MEDIATEK SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY MEDIATEK DELIVERABLES MADE TO MEET YOUR SPECIFICATIONS OR TO CONFORM TO A PARTICULAR STANDARD OR OPEN FORUM.

Without limiting the generality of the foregoing, MEDIATEK MAKES NO WARRANTY, REPRESENTATION OR GUARANTEE REGARDING THE SUITABILITY OF ITS PRODUCTS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE, NOR DOES MEDIATEK ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT, CIRCUIT OR SOFTWARE. You agree that You are solely responsible for the designing, validating and testing Your product incorporating MediaTek's product and ensure such product meets applicable standards and any safety, security or other requirements.

The above T&C and all acts in connection with the T&C or this Document shall be governed, construed and interpreted in accordance with the laws of Taiwan, without giving effect to the principles of conflicts of law.