

5G 基礎設施： 提升密度降低功耗

■文：徐俊毅

5G 願景正在逐步實現

早在 2015 年，國際電聯 (ITU) WP5D 第 22 次會議中，IMT-2020，也就是第五代移動通信內容得到明確，這就是現在大家熟知的 5G 通信規範。從命名上可以看出，工作組制定的 5G 相關規範，所期望的成熟時間就是 2020 年。

ITU 同時提出了未來的 5G 三大主要應用場景：

- 增強型移動寬頻 (enhanced mobile broad band, eMBB)：在不同場景提供 Gbps 為基礎，用戶在高速移動 (高速公路、高速鐵路 500km/h) 時保障 100Mbps 的連接速率。
- 大規模機器類型通信 (massive machine type communications, mMTC)：每平方公里設備接入量從 4G 時代的 1 萬個提升到 100 萬個，同時還要保證資料連接品質和功耗控制。
- 超可靠和低延遲通信 (ultra-reliable and low latency communications, URLLC)：自動駕駛、車聯網、遠端手術、遠端施工等關鍵應用中，保證穩定高可靠性連接和低時延

圖說：AR/VR 再度升溫



三大主要應用場景內容涵蓋：Gbps 速率級別的移動寬頻資料接入、智慧化的生活 (城市、家庭、辦公)、超高清視頻 (8K 解析度) 雲遊戲、線上 AR/VR、工業自動化、關鍵任務應用、自動駕駛汽車等等。

2020 年初發生的 COVID-19 疫情，一度讓很多行業陷入困境，影響了 5G 市場成長的速度，但是隨之而來的數位化浪潮，反而使得很多 5G 相關的應用場景具備了快速落地的條件：

被疫情拉長的社交距離，正在被 AR/VR 拉回。居家隔離的人

們透過 AR/VR 增強的視頻進行交互，還可以參觀博物館、“前往”旅遊景點，“親臨”大型商場進行購物，在一些醫療實踐中，醫生透過使用 AR/VR 設備與病人溝通病情，甚至進行手術嘗試。越來越多應用正在獲得市場認可。

在 Facebook 更名為 Meta 之後，AR/VR 再度升溫，據 ABI Research 預測，到 2025 年，VR 和 AR 的市場總額將達到 2920 億美元。提供極致用戶體驗的遊戲、建模、即時渲染、沉浸式教學等高階 VR/AR 應用，需要高速可靠的移動通信網路，為 5G 運營商提供

圖說：大量物聯網設備正在接入 5G 網路



更多機會。

與此同時，大量物聯網設備正在接入 5G 網路，Machine Research 預測，全球物聯網設備的接入量將在 2025 年達到 251 億個，年複合增長率超過 20%。中國移動的報告指出，到 2022 年，中國的物聯網設備數量就將達到 45 億，其中過半來自 5G 市場的成長，到 2025 年，中國大陸物聯網設備數量將超過 53 億，超 7 成與 5G 相關。

傳統 4G 網路很難勝任自動駕駛對資料交互和時延（毫秒級別的資料處理和判斷）的需求，5G 通信成為不二選擇，依託 5G 網路進行的智慧交通、自動駕駛項目在全球各地進行著實驗。根據 Navigant Research 預測，到 2030 年，全球自動駕駛相關的車輛將達到 2300 萬輛。

隨著越來越多的 5G 應用場景得到使用，5G 基礎設施不足的問題變得更加突出，2021 年，5G 基

站的建設速度加快了起來。

5G 基站建設加速

根據 GSA 今年 8 月份公佈的書，全球已經有 70 多個國家和地區 175 家電信運營商推出了 5G 商用服務，另有近 300 家運營商正在加快投資部署 5G 相關業務。

根據中國工業和資訊化部 11 月份公佈的最新資料，目前中國擁有的行動電話基站總數接近 1000

萬個，其中 4G 基站總數為 585 萬個，而已建成的 5G 基站數量超過 115 萬個，其中相當一部分 5G 基站是採用室外大型基站外掛 5G 天線 AAU 來實現。儘管面臨關鍵晶片短缺的問題，但是中國大陸的 5G 基站數量仍占全球總量 70% 以上，已經成為全球規模最大、技術更為先進的 5G 獨立網路，大陸所有地級城市、97% 的縣城城區、40% 的鄉鎮實現 5G 網路覆蓋，5G 終端使用者達到 4.5 億，占比全球 80%，5G 應用案例過萬個，內容涵蓋工業、醫療、教育、交通等多個關鍵領域。

同時，中國大陸工信部還提出了繼續增建 5G 基站的計畫，將 5G 基站覆蓋到行政村落，預計到 2025 年，中國大陸部署的 5G 基站數量將超過 360 萬個，達到每萬人擁有 26 個 5G 基站的覆蓋水準。作為 5G 大型基站（接入用戶數量 1000 人以上）的補充，各種小基站（接入數量 500 人）以下，將在 2023 年之後開始發力，其未

圖說：愛立信 mini-AAU 天線



圖片來源：愛立信網站

來規模將至少是大型基站的 2 倍以上，方能滿足未來 5G 信號覆蓋的基本要求。

5G 基站功耗 2 倍於 4G 基站

2,3 年以前，5G 基站剛剛開始部署時，能耗問題就變得十分突出。與 4G 基站相比，5G 基站能耗要高出很多。

從射頻系統來看，4G 基站採用 8 天線 RRU 天線矩陣，2D MIMO (多輸入輸出)，而 5G 基站是用 64 甚至更多天線 AAU 天線矩陣，實現 3D MIMO。4G 基站 AAU 單磁區輸出功率在 40W 到 80W 之間，經過優化的 5G AAU 單磁區輸出功率仍然高於 200W。綜合評估結果是，在效率相同的情況下，5G 射頻系統的功耗是 4G 的 2 倍以上，中國

移動的測試資料是 2.5 倍到 3.5 倍。

從基站部署來看，由於 5G 使用了較高的頻段——以適應高頻寬和 Massive MIMO 的要求——單基站的覆蓋面積

圖說 :5G 天線系統



圖片來源 :adi.com

與 4G 相比會更小，也就意味著覆蓋同樣的範圍，理論上需要 5G 基站的數量是 4G 的 1.2~1.4 倍。

此外，每一個基站都需要空調對整個系統的溫度進行調節，綜合來看，空調與基站系統的能耗比約為 1:1，也就是說，還有除了用於通信的能耗，用於散熱的能耗同樣驚人，如果是溫度較高的地區，散熱能耗占比還要增加。

射頻系統、基站宏觀數量以及散熱幾大因素，讓 5G 基站的功耗問題變得十分突出，這還是中國目前沒有開放 5G 商用毫米波頻段的情況，有業者表示如果一個 5G 基站的多個 AAU 全開啓，那麼運營商就純屬為電力公司打工了。

來自中國鐵塔資料顯示，一個 5G 室外基站單租戶平均功耗在 3.8KW 左右，是 4G 基站的 3 倍以上，單個 5G 基站單租戶年綜合電

費約 2.5 萬元人民幣 / 年。按照中國目前已經建成 115 萬個 5G 基站來計算，三大運營商每年需要為基站支付的電費就達到 300 億元人民幣左右。中國的三大移動通信運營商，在開啓 5G 商用網路之後，年度電費支出從 500 億元人民幣左右，上升至超過 1200 億元人民幣，電費支出漲了 2.4 倍多，讓財大氣粗的運營商肉疼不已。這些還只是 5G 基站部署初期的情況，未來 5G 基站的建設規模還將繼續擴大。因此，使用者享受高速網路的同時，相關業者需加快節能減排的步伐，才能讓 5G 基礎建設的道路更加平坦。

5G 射頻關鍵技術與功耗

基站的通信系統中，功耗分為 RRU 和 BBU 兩部分，通常 RRU 也就是遠端射頻單元的功耗

常見縮寫注解：

BBU(Baseband Unit)，基站系統中負責處理基帶信號的單元

RRU(Remote Radio Unit) 遠端射頻單元，是現代基站的兩大核心 (BBU 和 RRU) 之一。

AAU(Active Antenna Unit) 有源天線單元，將 RRU 與無源天線整合在一起

AAS(Active Antenna System)，有源天線系統，可看成多組 AAU 組合

3D-MIMO(3D Multiple Input Multiple Output) 天線技術，也稱為 Massive-MIMO 或 mMIMO 天線技術，大規模多輸入多輸出天線技術。

這項技術不僅實現了水平面的波束賦型，同時也利用更多的振子和通道實現了垂直面的波束賦型，在更大空間範圍實現通信，如跨樓層應用。

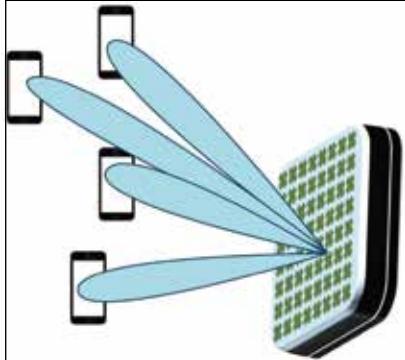
占比最大，高達 80%。

早期的 RRU 和 BBU 相距不遠，RRU 與天線 Antenna 通過饋線連接，後來隨著通信技術的演進，RRU 開始安裝到通信塔上，與 BBU 之間採用光纖通信。在 4G 時代後期，由於引入了 Massive MIMO 技術（也稱為 3D MIMO 技術）採用傳統方法，將多個 RRU 與無源天線之間連接，需要用到大量連接線，設備複雜度增加，可靠性下降，於是設計人員使用了 AAU，將原先 RRU 和無源天線組合到一起，解決了可靠性問題，同時還提升了射頻系統的效率。

由多個 AAU 組成的 AAS 系統便於運營商大幅度提升其容量（5G 最高可增加五倍）及其網路的覆蓋範圍。功率放大器（PA）集群與天線元件是 AAS（目前最多可包含 1,024 個 PA）的基本組成部分，可提供完整的網路接入功能，以連接至基帶節點。通過 mMIMO 可實現頻率複用，並且頻率複用已成為提高 BTS 容量的主要促成因素，用於實施空間多工。

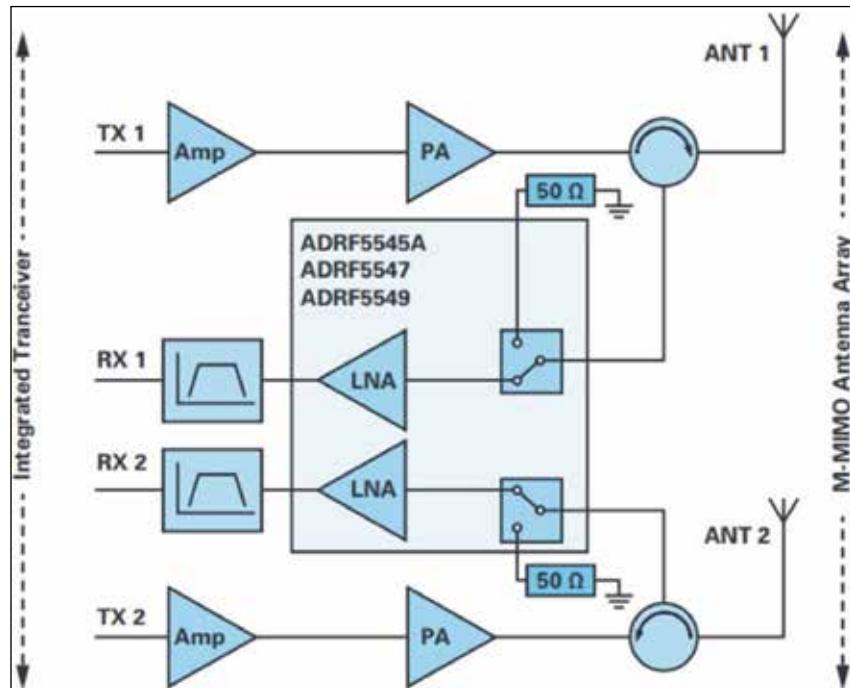
“在 4G LTE 蜂窩基站後期部署中，普遍採用大規模多路輸入、

圖說：Massive-MIMO 示意圖



圖片來源：ADI.com

圖說：Massive-MIMO 射頻前端



圖片來源：ADI.com

多路輸出 (Massive MIMO) 無線電技術，特別是在密集的城市地區，小型蜂窩有效地填補了蜂窩覆蓋的空白，同時提高了資料服務速度。此架構的成功清楚印證了其價值。因為這種架構本身具備所需的頻譜效率和傳輸可靠性，它成為新興的 5G 網路無線電的優選架構。” ADI 射頻和微波控制產品部門的行銷與產品經理 Bilge Bayrakci 說

Massive MIMO 架構為接收器架構允許 5G 運營商精確地將信號從蜂窩網站指向目標接收器（而不是在所有方向上的高功率傳輸），這樣每個接收器消耗的能量較少，並且蜂窩網站可以以相同的頻率傳輸信號到其它接收器，從而具有前所未有的靈活性。

“由於基站射頻系統的功耗增加，電源管理匯流排 (PMBus) 的作

用越來越明顯。與此同時，高壓降壓型變換器正在不斷改進以適應 PA 數量的增加，需要 3D 熱耗散和具有可變電流限制的 100V 操作轉換器。為了在增加密度的同時，在無線電中提供精密的時鐘和收發器電路，還可以通過多通道專用轉換器來降低尺寸和噪音，將轉換器作為低壓差穩壓器的替代品，開關速度高於 1MHz，以便在保持效率的同時降低尺寸。” TI Sector General Manager Pietro Scalia 指出。

GaN 是 5G 的超級動力

以 4G 基站採用 4T4R 方案為例，三個磁區，對應功率放大器 (PA:Power Amplifier) 需求量為 12 顆，同等情況下的 5G 基站，採用 64T64R 主流方案是，對應的 PA 需求量高達 192 顆。前面提到，

基站通信系統中，遠端射頻單元 RRU 功耗占比高達 80%，而在這 80% 的功耗中，又有 70% 的能源被 PA(Power Amplifier) 消耗。因此，在 5G 應用中，PA 成為了非常關鍵的元件。

PA 有矽基 LDMOS 或射頻氮化鎵 (GaN) 兩種材料，最早的 PA 器件來自 motorola 分出來的 freescale，採用了 LDMOS 材料，後來陸續有 NXP 和英飛凌加入這一市場。進入 4G 時代之後，GaN 材料主要優點是可以實現更高的功率密度，優秀表現獲得了市場認可，在高功率 5G 時代更是拉開了與 LDMOS 材料的距離。由於 5G 有兩個不同的頻域，sub-6GHz 和 mmWave，在高頻率下，GaN 在超過 2GHz 以上的頻段中優勢十分明顯。隨著 5G 市場的發展，預計整個 GaN RF 市場規模將在 2025 年達到 20 億美元。中國目前尚未開放 mmWave 頻段商用，這意味著在 5G 毫米波市場，GaN RF 具有非常可觀的潛力。

“GaN 是一種 III-V 直接帶隙半導體技術。由於其具備更高的效率、出色的高壓可持續性、更低的功耗、更高的溫度屬性和功率處理特性，GaN 在功率電子設備領域的應用越來越廣泛。這些屬性使 GaN 成為 5G 射頻的焦點，尤其是在毫米波 5G 網路中。雖然我們都‘聽說過’ 5G 的各種前景，隨著主要的無線網路運營商向其客戶推出 5G 服務，如今大城市中的許多人，更確切地說大約有 500 萬人，開始瞭解這些前景。但其實我

們尚未到那一步。完全不是那麼回事。我們的目標是到 2025 年連接 28 億用戶。要實現這一目標，就意味着要改造整個移動基礎設施，雖然這是一項複雜的任務，但卻是能夠完成的。借助 GaN 技術，5G 將在不知不覺中達到數十億用戶。

“Qorvo 高性能解決方案部門總經理 Roger。

GaN PA 的高功率密度還支援更小的外形尺寸，需要更少的 PCB 空間。在給定區域內，系統設計人員可以產生比其他技術更多的功率。或者，對於給定的功率級，系統設計人員可以縮小 RFFE 的尺寸並降低成本。

GaN PA 對 5G 基礎設施市場的吸引力是顯而易見的一一更便宜、更高效、頻寬更寬的基站。隨著 GaN 在這市場中激增，規模經濟增加，價格將繼續下降到大規模普及的程度。

儘管 LDMOS 技術在基站 RF 系統中仍然佔據著最大的市場份額，但 GaN 預計將在 5G 大規模 MIMO 部署中取代它。

降低 5G 基礎設施功耗問題需要多個環節的合作

面對 5G 基礎設施的功耗問題，除了電信運營商，相關系統業者也在努力幫助運營商降低電費。除了採用新材料提升射頻系統的效率，包括愛立信、華為、中興、諾基亞等公司均給出了精准控制基站休眠的方案。透過對運營商業務的分析整理，優化射頻的系統的工作

時間，在閒時進行降低頻率、載波關斷、基站休眠等操作。在浙江，華為與鐵塔公司的實驗表明，可以為每個 5G 基站降耗 17%，節約電費超 5000 元以上。

愛立信則更進一步提出潮汐功放技術，讓基帶系統不休眠，不徹底關斷，借助 AI 技術優化業務模型，動態調節功耗，在非典型業務負荷下，基站的射頻單元功耗可以降低 20%，整體功耗下降 15%。

蜂窩基礎設施對性能的要求更為嚴苛，這些針對信號鏈系統的功耗控制，需要半導體公司提供更加完整的解決方案，解決成本、功耗及靈活性的問題。

“聽起來很簡單，這些都是非常困難的問題，解決這些問題需要類比電路、混合信號電路和數位電路設計人員、信號處理博士、嵌入式即時軟體設計人員以及其他人員通力合作。很多人認為 ADI 是元件供應商，但其實需要大規模的系統級工作。我們提供的最終產品可能是大型系統中的一個元件，但它非常複雜，需要基於我們對整個系統的理解來定義這個產品。” ADI 公司汽車，通信和航空航天技術副總裁 Tony Montalvo 博士說。

JMA 與其技術合作夥伴 ADI 公司合作，就開發出了新的 5G 零延遲寬頻互聯網接入，每個基站可以為多達 100,000 個設備和節點提供大規模連接，確保身處全球各地場館的粉絲能夠線上與家人和朋友分享自己的喜悅。