

# 透過 mMIMO 與精確波束成形技術實現 5G 網路潛力

**Bhavesk Rathod**

Applications engineer  
Wireless Infrastructure

## 簡介

隨著每個新的無線通訊世代到來，對更高資料傳輸率與更低延遲的需求大幅增加。5G 延續此趨勢，提供每秒數十 Gb 的輸送量與次毫秒級延遲，這對擴增實境、工業物聯網 (IIoT) 及自主式系統等應用至關重要。實現性能目標（尤其在密集城市與高移動性情境下）需要兩項技術：巨量多輸入多輸出 (mMIMO) 與波束成形。

5G mMIMO 系統使用大型天線陣列，規模通常從 16 傳送/16 接收天線到 128 傳送/128 接收天線。這些天線支援空間多工處理，在相同頻率上同時傳輸多個資料串流，以在不增加頻寬或功率的情況下提升頻譜效率與使用者容量。

透過相位陣列天線實現的波束成形可進行空間濾波，將射頻 (RF) 能量導引並集中於目標使用者，從而抑制干擾並提高訊號雜訊比。波束成形需要天線間一致的相位對齊。它能提高 RF 頻率（例如 FR1 與 FR2 頻段）的性能，在這些頻段中，自由空間路徑損耗與訊號遮蔽是重大挑戰。

為克服這些挑戰，5G mMIMO 結合波束成形可實現高輸送量、低延遲通訊並確保擴展性。這些技術結合後，使網路營運商與開發人員能透過精確天線控制，針對高頻段開發創新的無線應用。

實現 mMIMO 與波束成形需要使用 RF 收發器將位元轉換為 RF，反之亦然。由於 mMIMO 與波束成形皆需空間與時間準確度，RF 收發器的位元至 RF 轉換過程必須具備精確時間戳記，以及跨多個天線的時間同步。

具備 5G 能力的 RF 收發器設備使無線電能同時支援 4G 與 5G 運作。根據第三代合作夥伴計畫 (3GPP) 的 5G 規範，5G 在以下特定領域優於 4G：

- 增強型行動寬頻 (eMBB)

- 用於工業應用的關鍵通訊 (CC) 與超可靠低延遲通訊 (URLLC)
- 巨量物聯網 (mIoT)。
- 靈活的網路運作，透過網路切片、雲端原生基礎設施與軟體定義網路支援多樣化應用與終端使用者需求，實現適應性與網路最佳化。

## 什麼是 5G mMIMO？

5G MIMO 是 5G 網路系統中使用的無線通訊技術。典型 MIMO 無線電可能擁有 16 到 32 個傳送與接收天線，而單一無線電單元中的 mMIMO 則有 64、128 甚至更多天線。在單一無線電單元中封裝大量天線有助於以更高的資料傳輸率服務更多使用者。

基於 mMIMO 的 5G 網路支援空間多工處理，能在不增加額外頻寬或傳送功率的情況下大幅提升通道容量。

隨著產業往更高 5G 頻率發展（如 24GHz 至 40GHz 的毫米波 [mmWave]），波束成形變得更加重要。毫米波頻率使在受限空間內配置大量天線成為可能，因為天線尺寸極小。mMIMO 展現出顯著優勢，不僅增強輸送量與覆蓋範圍，還能在不增加資源（頻寬、功率、無線電）的情況下同時支援多個使用者。這使 5G mMIMO 成為實現 3GPP 為 5G 網路定義的更高資料傳輸率、超低延遲及巨量連接目標之必備技術。

## 5G mMIMO 與波束成形

波束成形為 5G 無線通訊系統所需的核心關鍵技術。5G 超寬頻運作於 sub-6GHz 頻率範圍與毫米波 (mmWave) 頻段。此頻段易受訊號衰減與路徑物體干擾影響，且毫米波穿透牆壁的能力不如 4G。因此，5G 需透過波束成形將功率集中於特定區域以實現更高的資料傳輸率，尤其在密集城市佈建中。請參閱 [圖 1](#)。

波束成形的另一項優點是利用 3GPP 版本定義的波束轉向與波束追蹤，維持與移動車輛等行動目標的連線性。波束成形架構可分為數位、類比或混合式波束成形。我們來探討此技術背後的數學原理。

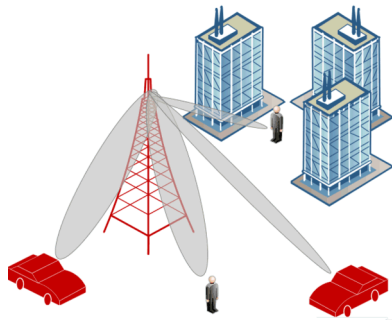


圖 1. 波束成形如何協助人口稠密的城市地區透過 5G 網路連接更多使用者。

### 波束成形背後的數學原理

方程式 1 模型化通道上的訊號傳播，方程式 2 顯示詳細 H 矩陣。矩陣 H 中的每個元素  $h_{mn}$  代表從每個傳送天線 n 到每個接收天線 m 的複數增益。其中  $\rho$  為接收端訊號， $\tau$  為傳送訊號，矩陣 H 為通道特性矩陣。矩陣 H 代表每個通道的增益與相位反應。

$$\rho = H \times \tau \tag{1}$$

$$\rho = \begin{bmatrix} h_{11}h_{12} \cdots h_{1n} \\ \vdots \\ h_{m1}h_{m2} \cdots h_{mn} \end{bmatrix} \tau \tag{2}$$

在線性預先編碼下，方程式 3 計算傳輸訊號  $\tau$  為：

$$\tau = \Sigma w \times s \tag{3}$$

其中 s 為傳送符號，w 為線性預先編碼向量。

預先編碼向量透過調整每個傳送通道相對相位差來決定波束方向。

為計算預先編碼向量，需估算 H 矩陣。每個傳送器具備決定性相對相位差，這點至關重要；否則估算的 H 矩陣與計算出的預編碼向量將不成立。波束成形仰賴傳送訊號的相位準確度，以便在接收端進行建設性干涉（同相加成）。

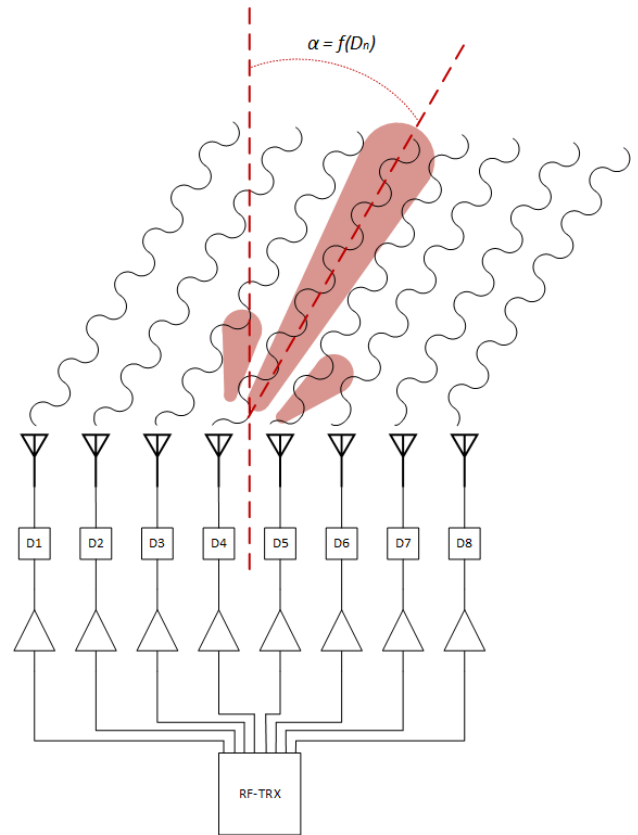


圖 2. 透過調整時間同步天線間的相位（使用 8 通道收發器）形成的波束。

當無線電單元上有多個類比前端裝置時，要同步同一個 mMIMO 中多個傳送路徑的輸出相位，會變得不易處理。128 天線 mMIMO 系統將擁有 8 到 16 通道類比前端裝置。

### mMIMO 系統目前的挑戰

在典型 5G mMIMO 收發器中，單一電路板整合了多個 RF 收發器。針對 64 通道配置，電路板可配置 8 個 8 通道收發器或 4 個 16 通道收發器。可靠的波束成形要求所有傳送與接收路徑在整個系統生命週期內保持相位同步，包含初始系統啟動、類比前端與 ASIC 或 FPGA 間的 JESD204B 與 JESD204C 鏈路重新初始化，以及上電重設。這是所有無線電系統設計師面臨的核心挑戰。藉由決定性相對相位關係，複合天線陣列能以可預測的方式形成波束並導引其方向。

利用收發器內建數值控制振盪器 (NCO) 的內部相移功能，所能補償的僅限於多單元天線陣列中存在的任何殘餘靜態相位偏移。由於此偏移在啟動週期、JESD 重新連接事件

與電源週期中保持不變，單次 NCO 校準即可對齊所有通道相位，進而維持波束成形性能。但無線電上所有 RF 收發器保持時間同步的基本需求依然存在。

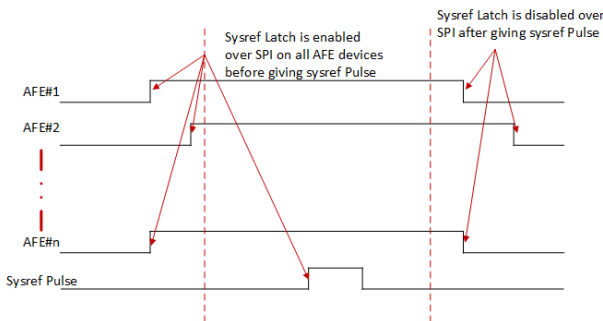
TI 的 AFE80xx 與 AFE81xx 系列 RF 積體電路包含多項功能，可協助設計師達成 mMIMO 要求。

### 使用單次 sysref 模式

大多數系統的預設運作模式是連續 sysref 模式，其中 sysref 是週期性低頻訊號。但在 AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192 中，可使用單次系統參考時脈 (sysref) 模式實現多裝置同步。在單次模式下，sysref 訊號是單一脈衝，同時提供給電路板上所有類比前端。當所有類比前端相對於參考時脈在完全相同的瞬間接收到 sysref 時，它們自然會達成相位同步。

實作此方法的挑戰之一在於如何在電路板上達成 sysref 與參考時脈對多個裝置的差動佈線。在印刷電路板無線電層級，使用者需要將 sysref 與參考時脈佈線相對於參考時脈的定時維持在皮秒等級。

如 **圖 3** 中所示，使用 AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190 與 AFE8192 的單次 sysref 模式需要特定順序。



**圖 3.** 單次 sysref 模式時間圖。

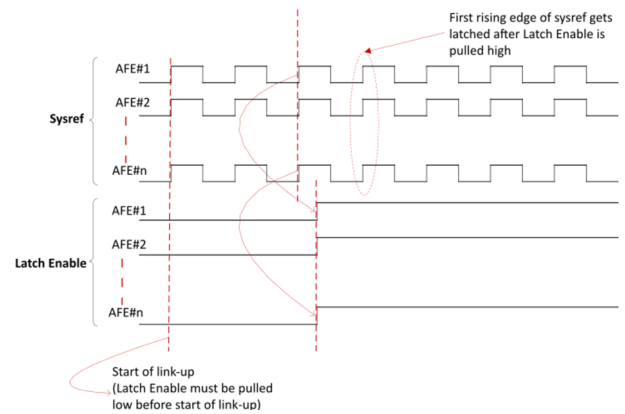
### 透過 GPIO 使用共用時間戳記訊號來對齊 RF 積體電路時間

也可以使用基於通用輸入/輸出 (GPIO) 的控制來啟用 sysref 門鎖。在此模式下，sysref 可在連續 sysref 模式下運作。所有類比前端裝置在接收到基於 GPIO 的門鎖啟用訊號後，將門鎖至第一個參考時脈上升緣。所有後續脈衝將被忽略。

此方法僅需將 CMOS GPIO 訊號佈線至所有類比前端，相較於單次 sysref 方法，這讓實作相對簡單，因為在電路板

上將差動訊號佈線至多個類比前端裝置並達成長度匹配具有挑戰性。同時，此方法需要從主機 ASIC 同步每個裝置一個 GPIO。若主機 ASIC 或 FPGA 沒有足夠 GPIO，則此方法不適用。

如 **圖 4** 中所示，使用基於 GPIO 的控制來啟用 AFE8092、AFE8030、AFE8128、AFE8190、AFE8192 的 sysref 門鎖需要特定順序。

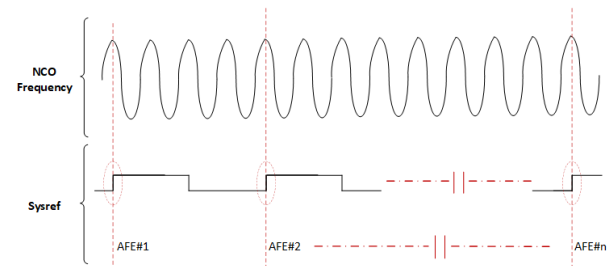


**圖 4.** 使用基於 GPIO 控制啟用 sysref 門鎖模式的時間圖。

### NCO 選擇

實現相位同步最簡單的方式是選擇為 sysref 頻率整數倍的傳送器與接收器 NCO。此方法甚至適用於連續 sysref 模式，因為它不需要額外機制來同步跨多個類比前端元件的傳送與接收 NCO。

若 NCO 頻率限制對最終應用是可接受的，此方法最為合適，因為無需更改硬體即可達成相位同步。在類比前端裝置重新連結或電源循環的情況下，使用者需要遵循特定的軟體程序。**圖 5** 顯示在此模式下，即使所有類比前端門鎖至不同的 sysref 邊緣也無妨。



**圖 5.** 說明 NCO 頻率等於 sysref 頻率四倍的範例。

## 結論

將 mMIMO 與波束成形技術整合是釋放 5G 網路潛力的關鍵，能實現前所未有的資料傳輸率與超低延遲。藉由運用大型天線陣列與精確空間濾波，這些技術克服了高頻訊號傳播的挑戰，確保各種情境下可靠且高輸送量的通訊。如 3GPP 規範所述，5G 在 eMBB、CC、URLLC、mIoT 及靈活的網路運作方面的增強能力，主要歸功於 mMIMO 與波束成形的協同效應。

TI 的 AFE8092、AFE8030、AFE8128 以及 AFE8190、AFE8192 收發器可協助網路營運商支援擴增與虛擬實境、IIoT 與自主系統等無線應用。

## 關於作者

Bhavesh Rathod 為德州儀器應用工程師，專精於 RF 應用與無線基礎設施解決方案。Bhavesh 擁有晶片後驗證與嵌入式系統實務經驗，支援頂尖無線基礎設施技術開發。他取得普渡大學電機與電腦工程碩士學位，以及浦那工程學院電機工程學士學位。Bhavesh 因其在被動穩定通訊衛星 Swayam 的貢獻，於 2017 年獲得甘地青年技術創新獎。

**重要聲明：**本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

## IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](http://ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025