

Keysight Technologies

Massive MIMO：常見問題集

作者：Roger Nichols / Keysight Technologies

白皮書



Unlocking Measurement Insights

簡介

我小的時候住在科羅拉多州東部的小鄉鎮，家裡有一台黑白電視機，每次在看我最喜歡的電視節目時，畫面經常會出現疊影，讓我感到很失望。我記得父母安慰我說電視沒壞，只是天線在接收「回音」。這個回音顯然來自大約 50 英里外洛基山脈的前嶺。直到很久之後我才知道「多徑干擾」的物理現象，以及在類比通訊中用於減輕其影響的各種技術。數位通訊的出現和數位無線收發器的微型化，以及它們擁有的龐大計算能力，讓我們不僅能夠「修正回音」，而且能夠利用它，從發射器到接收器獲得更多資訊。

$$C = M \times B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

$$C = \text{通道容量} \frac{\text{bits}}{\text{second}}$$

M = 通道數，MIMO 階數

B = 頻寬 (Hz)

$\frac{S}{N}$ = 信噪比 (線性功率比)

圖 1：簡化的向農 - 哈特萊定律 (Shannon-Hartley Law)：注意 M 對於容量的意義

多路輸入、多路輸出 (MIMO)：藉由為向農 - 哈特萊定律 (Shannon-Hartley Law) (參見圖 1) 添加一個有利條件，以提高以前頻譜的資料速率，這個方法獲得無線通訊史上前所未有的關注。業界對於 5G MIMO 的討論主要集中於「Massive MIMO」，對某些人而言這是個相對較新的概念。



MIMO 技術的研究最早始於 Ernst F. W. Alexanderson¹，而後由 R.C.A. Communications 的 H. H. Beverage 和 H. O. Peterson 接手²，再後來 D. G. Brennan 也對此貢獻良多³。上個世紀 90 年代中期，Foschini（貝爾實驗室）、Raleigh、Cioffi 和 Alamouti 的研究備受關注，他們的工作重點是為通道建構數學模型，並提出使用大量天線來大幅擴充通道容量的方法。我推薦所有對無線通訊技術發展史感興趣的人，找出這些舊論文來閱讀，這樣不僅可了解產業前景，而且還能發現這些新興的技術，如 MIMO，可以溯源到無線通訊開拓者所在的年代，雖然他們現在早已作古。

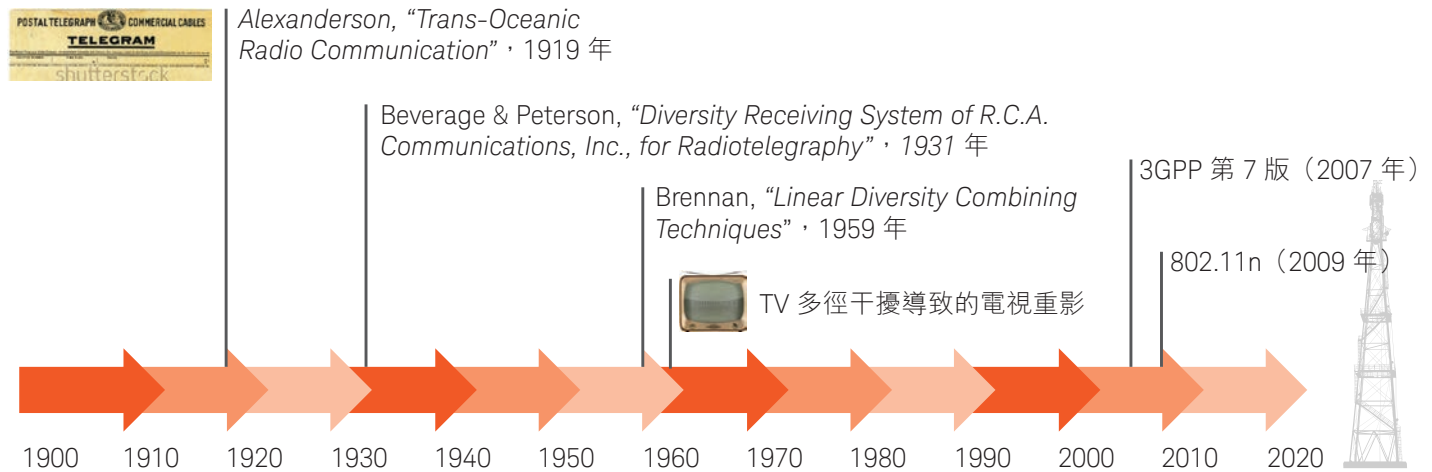


圖 2：MIMO 發展史上的重要里程碑

從 802.11n (2009) 標準開始，MIMO 和相關的 MIMO 天線技術就包含在 WiFi 標準中，並且從 2007 年 (UMTS/WCDMA/ HSDPA 中的 3GPP 第 7 版) 開始，就包含在蜂巢式行動無線標準中。然而，什麼是「MIMO」？在研討會和論文中，伴隨此一術語出現的往往是複雜晦澀的公式（幾乎用上了所有大小寫的希臘字母）；而後還要應用線性代數。如果您想要建構物理和計算模型，決不可輕視這個必要的步驟。問題是，業界要不就使用極其複雜的數學運算，要不就使用非常簡化的卡通圖解來說明原理，其中天線陣列通過不同路徑將信號發送給使用者 -- 例如，信號遇到山峰會反彈回來。

1 Alexanderson, Ernst F. W., "Trans-Oceanic Radio Communication" : 美國電氣工程師協會會報，第 38 卷，第 2 期，1919 年 7 月

2 Beverage, H. H., Peterson, H. O., "Diversity Receiving System of R.C.A. Communications, Inc., for Radiotelegraphy" : 無線電工程師協會會刊，第 19 卷，第 4 期，1931 年 4 月 4 日

3 Brennan, D. G., "Linear Diversity Combining Techniques" : 無線電工程師協會會刊，第 47 卷，第 1075-1102 頁，1959 年 6 月

部署 MIMO 技術時，假設發射器和接收器之間，以及周圍存在的空氣、車輛、樹木、房屋和山脈，會導致無線信號沿著多個獨立（正交）路徑傳播。智慧型基頻系統可透過獨立的天線和收發器鏈彼此相連，並使用上述複雜的數學模型來分離或重組來自不同路徑的信號，以建立多個實用的通訊通道。相較之下，過去只能建立單一通道。接下來，智慧型基頻系統將執行以下任務：

1. 使用多個路徑來減少單一資料集的誤碼率（透過多個路徑發送相同的資訊，增加邊限，以有效減少誤碼率並增加可靠性）
2. 使用多個路徑傳輸不同資料集（透過不同路徑發送不同資訊，進而使用多個通道來增加容量）
3. 控制多徑干擾的固有特性，在無線通道的任何實際位置消除（相消干擾）或增強（相長干擾）信號

最近十年，隨著新概念「Massive MIMO」的提出，相關討論日趨熱絡，並提及了許多重要的術語：

- **SU-MIMO**：單一使用者 MIMO-- 使用多個無線路徑來改善與單一使用者的通訊
- **MU-MIMO**：多使用者 MIMO-- 使用多個無線路徑和多名使用者的獨特和疊加的信號，藉以增加多使用者所使用的通道容量
- **FD-MIMO**：全維度 MIMO--3GPP 第 13 版中的術語，指使用 2D 天線陣列充分利用 3D 通道的優勢（距離、寬度、高度），同時支援 3D 波束成形
- **Massive MIMO**：MU-MIMO 的特例，能夠透過大型收發器陣列來增大多徑通道，進而擴大通道容量、提高頻譜效率和效能

MIMO 常見問題集

看到人們對這些話題展開熱烈的討論，我覺得獲益匪淺，因為我對 MIMO 的大部分知識，都源自於這些討論。

以下是我曾見到甚至親身參與過激烈討論的一些有趣的主题：

「MIMO」是否與「波束成形」意思相同？

當然不是。「波束成形（beamforming）」是指控制所發射的無線信號的方向和「形狀」。上述的 MIMO 天線技術，至少有些是使用主動天線單元的相位關係來「形塑」這些波束。因此，MIMO 可利用波束成形；實際上，FD MIMO 有兩個模式可透過「MIMO 波束成形」進行嚴格的特性分析。但是相控陣列波束成形被廣泛用於很多非 MIMO 應用。

「看到人們對這些話題展開的熱烈討論，我覺得獲益匪淺，因為我對 MIMO 的大部分知識，都源自於這些討論。」

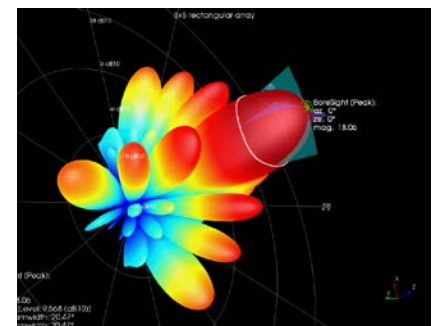


圖 3：波束成形範例

「大規模」意味著很多天線。到底有多少？

我聽過各式各樣的答案，讓我想起 5G Massive MIMO 的創始者、諾基亞貝爾實驗室的 Thomas Marzetta 博士說過的話⁴。Marzetta 表示基地台 MIMO 天線陣列數比使用者數「多得多」。這就是我們感到困惑的開始。Marzetta 不僅明確保證有很多天線（「越多越好」），而且每個天線都是獨立基地台收發器鏈的一部分。Massive MIMO 可增加容量、減少位元能耗、提高頻譜效率，使得行動通訊業者能節省可觀的成本。但是，想要達到節省的目標，大幅增加的基頻處理所帶來的能耗和成本，必須低於新技術所實現的節省。到底有多少天線？我讀過一篇可信的文章，預計在未來十年間，此技術可支援不到 500 個天線⁵。

「到底有多少天線？
... 技術能夠支援不到
500 個天線 ...」

FD-MIMO 算不算 Massive MIMO？哪一種是 5G Massive MIMO？

一個 FD MIMO 天線陣列有 64 個單元，因此可視為「大規模 (Massive)」⁶。另一份最近發表的文章特別將 FD-MIMO 稱為「大規模」⁶。但是 Marzetta 博士的定義，透露了他和產業及學術界同事正在推動的獨特想法：

- 足夠的天線可適當間隔，實現通道正交和「通道硬化」（此術語指隨著 MIMO 天線數的增加，導致隨機無線通道的特性越來越確定的現象）。
- 連到每個用戶端設備的單一鏈路和同時使用時間頻率「資源區塊」；亦即在不同位置的用戶端設備，正好在相同的頻率和時間進行通訊。因此該術語稱為「空間分集」。
- 使用測得結果而不是假定的通道狀態資訊。

大多數 MIMO 系統要有一個「訓練」過程來建構和維護通道模型。在蜂巢式系統中，我們藉由傳輸被稱為「導頻」的預設波形來完成這項工作。解調導頻結果的振幅和相位響應，向接收器展示了通道中多徑單元的本質。之後，可在下列任一位置應用演算法：

- 在接收器端，用於從通道中的正交路徑分隔必要的資料流程；或
- 在發射器端，預先將發送的資料編碼，使其在到達接收器天線時，每個天線都正好（僅）獲得所需的正交信號。

4 Marzetta, Thomas L., "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas": IEEE 無線通訊會刊, 第 9 卷, 第 11 期, 第 3590-3600 頁, 2010 年 11 月

5 Jakob Hoydis, Stephan ten Brink, Mérouane Debbah, "Massive MIMO in the UL/DL of Cellular Networks: How Many Antennas Do We Need?", 在選定地區的 IEEE 通訊期刊, 第 31 卷, 第 2 期, 2013 年 2 月

6 Hyungju Ji、Yoonsun Kim、Joho Lee、Eko Onggosamusi、Youngnan Nam、Jianzhong Zhang、Byungju Lee 和 Byongyo Shim: "Overview of Full-Dimension MIMO in LTE-Advanced Pro", IEEE 通訊雜誌, 第 55 卷, 第 2 期

3GPP LTE MIMO 使用由基地台 (eNodeB 或 eNB) 產生並由用戶端設備 (UE) 解讀的導頻。然後，用戶端設備將通道資訊發回 eNB，使其能夠預先解碼下一個發送的信號。如此一來，用戶端設備承擔了通道評估的責任，增加了將解讀發送回 eNB 用戶端設備的上行鏈路指令開銷。Marzetta 表示 MIMO 不會擴展，除非任務顛倒過來 - 由用戶端設備發送導頻信號，eNB 則負責所有演算法運作。雖然 FD MIMO 具有較多的天線數，但仍依賴用戶端設備來解讀導頻信號。

其實「大規模」本身意味著很多基地台天線。
「FDD 就是一場災難。
故事結束。」

您能否在 FDD 通訊中進行 Massive MIMO ？

3GPP 第 13 版允許 FDD LTE 系統使用 FD-MIMO。一旦接受 FD-MIMO 是「大規模」，那麼這個問題的答案是：「可以」。但是通道訓練很花時間，而可用的時間有限，主要原因有兩個：

1. 我們假設通道僅在有限的時間內保持恒定 (通道同調時間)，之後通道狀態資訊不再有效，需重複進行導頻 / 通道評估過程。
2. 必須保留一些通道同調時間，以便傳輸使用者負載 (payload) 資料。

上個月在舊金山舉行的無線通訊與網路大會 (WCNC) 中，我有幸參加了 Marzetta 博士關於 Massive MIMO 的講座。對於 FDD MIMO 的可擴展性，他有兩點很不滿意的地方。首先，通道狀態資訊假設用於鏈路之一。導頻只在下行鏈路發送，因此系統必須假設另一頻率的上行鏈路擁有相同的通道特性。或許更重要的是，他的工作成果顯示，通道訓練時間會因系統是 FDD 或 TDD 而不同。在 TDD 系統中，訓練時間僅與細胞 (cell) 中的用戶數 K 成正比。但是在 FDD 中，訓練時間與使用者數和基地台天線數 M 的 2 倍之和成正比 ($K + 2M$)。其實「大規模」本身就意味著很多基地台天線，我在此引用 Marzetta 博士的一句話：「FDD 就是一場災難。故事結束。」

Massive MIMO 是否只能當作毫米波技術？

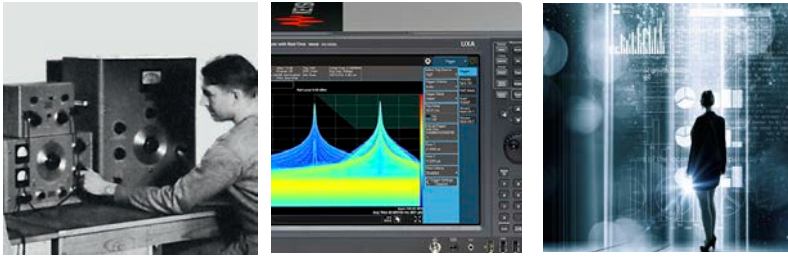
絕對不是。到今天為止，大多數 Massive MIMO 研究都假定波長與 6 GHz 以下頻率相關。Massive MIMO 的初始商用部署肯定將於 6 GHz 以下的頻段運作。

5G：MIMO 的下一步

5G 能否實現？我們能否在 5G 中實現 Massive MIMO，以便擴大容量、提高效能和頻譜效率？答案是：「可以」。業界的研究已經獲得令人印象深刻的結果，最近還進行了令人矚目的展示 (例如在 2017 年 2 月全球行動通訊大會中進行的展示)。我們承諾將使用我們的新數位技術，來充分利用豐富的無線通道，進而繼續推動產業創新。我對其滿懷期待，就像我很期待大家熱烈討論下一個產業創新是什麼，能否實現，以及我們多久能夠看到它實現。

演進

是德科技獨一無二的硬體、軟體，支援及專家組合，可協助您拓展全新的局面。
讓我們成為帶動前瞻技術不斷演進的推手。



薪火相傳 - 惠普將火炬傳給安捷倫，再由安捷倫交棒給是德科技

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

透過個人化頁面查看與您息息相關的資訊。

KEYSIGHT SERVICES

Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

是德科技服務

www.keysight.com/find/service

是德科技擁有領先業界且陣容堅強的專業人員、量測程序和測試工具，可提供一應俱全的設計、測試和量測服務。如此一來，我們協助您部署新技術，並改善量測程序，以便降低成本。

三年保固

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

除了享有卓越的產品規格外，您還可獲得與眾不同的產品擁有體驗。是德科技是全球所有量測儀器廠商中，唯一保證所有儀器皆享 3 年保固的廠商。此外，是德科技針對所有配件、校驗裝置、系統和客製化產品，提供完整的 1 年保固。



是德科技保固保證方案

www.keysight.com/find/AssurancePlans

是德科技提供長達十年保固，以避免任何意外的維修費用，確保儀器能夠在規格範圍內運作，讓您能永遠信賴儀器提供的量測準確度。



是德科技銷售夥伴

www.keysight.com/find/channelpartners

兩全其美：是德科技專業的量測技術與齊備的產品，搭配是德科技銷售夥伴的服務與彈性價格。

www.keysight.com/find/

www.keysight.com/find/

有關是德科技電子量測產品、應用及服務的詳細資訊，可查詢我們的網站或來電洽詢

聯絡窗口查詢：

www.keysight.com.tw/find/contactus

台灣是德科技網站：

www.keysight.com.tw

台灣是德科技股份有限公司

免費客服專線：0800-047-866

104 台北市復興南路一段 2 號 7 樓

電話：(02) 8772-5888

324 桃園市平鎮區高雙路 20 號

電話：(03) 492-9666

802 高雄市四維三路 6 號 25 樓之 1

電話：(07) 535-5035

DEKRA Certified
ISO 9001 Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

是德科技 -

DEKRA Certified ISO 9001:2015

品質管理系統。

本文件中的產品規格及說明如有修改，恕不另行通知。

© Keysight Technologies, 2017

Published in USA, July 13, 2017

中文版：5992-2452ZHA

www.keysight.com.tw



Unlocking Measurement Insights