談5G的五個主要技術

交通部中華技術服務社 顧問 劉時淼老師
兼台灣區電信工程工業同業公會 技術諮詢顧問

談5G前，先瞭解行動通信發展過程。

一、前言

1G第一代行動通信於1979年從日本開始遍及美洲、歐洲到1999年，使用頻帶800MHz。僅限語音，但講電話不再受線路的牽絆。因是類比系統，常被盜打，且通話費高。

2G，1991年從芬蘭開始到2013年，頻帶900MHz及1800MHz，採SIM卡（Subscriber Identity Module）綁住使用者身份。行動通信開始個人化及數位化，不再被盜撥，手機可傳簡訊、簡單上網，及來話顯示。此系統遍及全世界，稱為全球行動通信（Global System for Mobile Communication，GSM）系統，是往後新世代行通信技術的基礎。

3G，2001年由日本DoCoMo推出，使用2100MHz頻帶。3G手機可以寬頻上網且標準統一，可藉網際網路全球傳送封包且能夠漫遊。2002年黑莓機出現，其功能全拜3G之賜。2007年iPhone出現，需要功能更強大的4G，3G因而漸漸的退出市場。

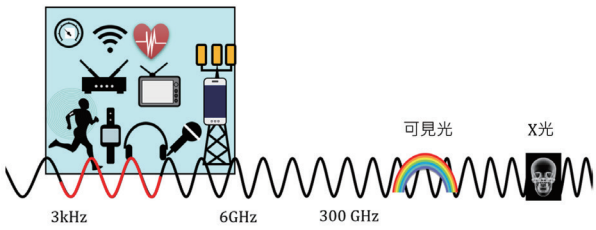
2009年4G首見於挪威的斯德哥爾摩，頻帶1800MHz，正式名稱LTE（Long Term Evolution），俗名4G，開創資訊串流（即直播）年代。高速行動可傳送速率100Mbps；走路或定點，1Gbps。2G轉換成3G只要換個SIM，但換成4G時須使用專用手機，為製造商帶來大量的商機。4G已有物聯網系統，傳送速度仍然無法滿足快速（即時性高）的物聯網應用。

5G是物聯網的年代。出現在4G的物聯網有智慧家庭、智慧建築、智慧城市、…，這些都屬於靜態，不那麼的即時性。5G除了含蓋4G原有系統之外，另有即時性很強的系統，如自動駕駛、觸覺系統、虛擬實境、及各種天災緊急通告系統。5G電話及視訊服務延續4G，通信功能會繼續提昇。這種現象對科技產業帶來相當大的商機，也對人們的生活帶來很大的便利。

5G在技術上有很大的改革，包含使用毫米波（4G使用的是公尺及公寸波）、小天線、巨量天線、波束賦形、單頻雙工等，茲一一介紹於后：

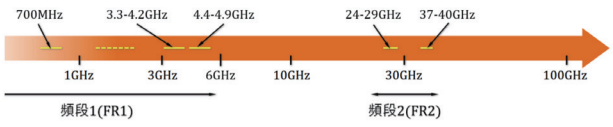
二、毫米波（Millimeter Wave）

我們的手機及日常使用的電子產品都使用射頻，大部份在6GHz以下。此頻段已經容納許多產品的電子通信，而新產品不斷加入使用，更顯得擁擠。



圖（一）目前電磁波頻段使用的情形

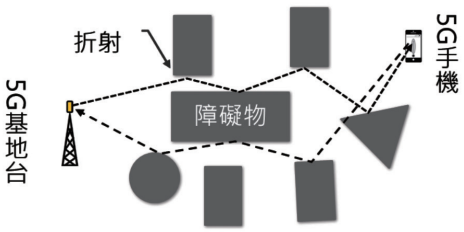
5G把6GHz以上未被使用的頻段拿來使用，並延伸到100GHz。因未使用過，稱為新無線（New Radio，NR）。目前NR分成兩個波段，6GHz以下為波段一，但實際上是5GHz。24GHz到30GHz，39GHz為波段二，如下圖。



圖（二）5G頻譜

700MHz原本用於4G偏遠地區。基於成本及地勢環境的考量，5G也使這段頻帶。優點是低衰減，但是容量低。

高頻段有頻寬大及高容量的好處，可用於都會區的密集涵蓋。缺點是衰減大，容易受到大氣、雨滴、及植物吸收。毫米波信號不太會繞射，卻很會折射，短距離通信時，有助於通信。

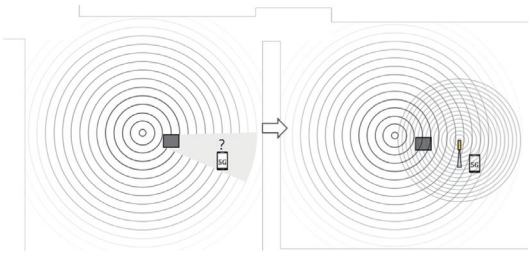


圖（三） 毫米波反射

三、小天線

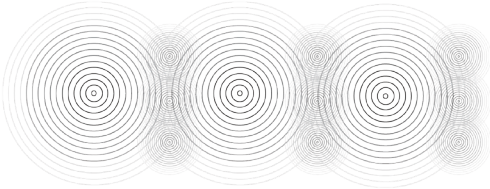
天線的大小與波長成正比，5G使用毫米波，大部份基地台的涵蓋半徑約20公尺，比4G小10倍。由小天線構成的地基台稱為小基地台（Small Cell），大天線構成的基地台稱為大基地台（Macro Cell）。小天線基地台可以密集的建置，改善死角問題。但基地台的數量多，建置成本高。

當5G手機正好躲在障礙物後面且毫米波無法折射到位時，可藉由附近的小天線把轉接信號到電波暢通的大天線。



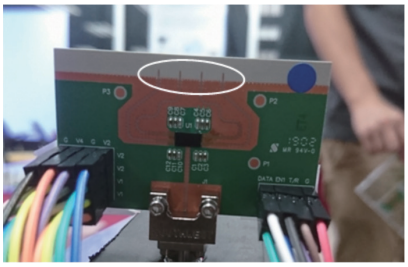
圖（四）小天線彌補通信死角

在郊區，收信時好時壞。主要的原因是大地基台的涵蓋被山丘阻擋，或兩基地台間的空 檔地區，也可用小基地台彌補，如下圖。



圖（五）小基地台彌補大基地台通信死角

毫米波天線只有幾毫米長，基地台內固定及支持天線的物件大於天線本身許多，下圖中白線圈內有四支天線。



圖（六）毫米波天線實物

在都會區小天線可直接嵌在牆面、號誌桿、燈桿、路牌、甚至於地下人手孔、橋樑…只要稍微擬態即不容易認出，有助於市容觀瞻。

圖（七）小天線的建置

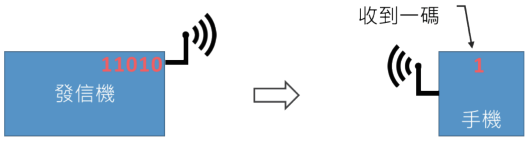
小基地台可分擔大細胞的話務及改善使用經驗，價格低，營運支出也相對較小。不過，數以千計的小基地台佈建於各地，管理及變動作業所需的成本及作業方式比大基地台來得複雜。

四、巨量天線（Massive MIMO）

MIMO是什麼？取Multi-Input Multi-Output各字首就變成MIMO。基地台天線與手機之間通常有許多障礙物，影響了鏈路容量及收信。此問題可用空間多樣性（Space Diversity）技術來解決，此技術之論述如下：

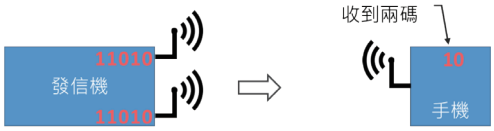
下圖，基地台發信機與手機收信機之間有

一比次串（11010）要傳送。倘若只用一支發射天線時，收信機只能收到一碼。一個發信機配一個收信機，，多樣性增益（Diversity Gain）為〝1〞。



圖（八）增益為〝1〞的收發信組合

如果在發信端加裝一支天線，同時發送兩組一樣的信號，則收信機收到的信號會改善一倍。兩個發信機配一個收信機，，多樣性增益（Diversity Gain）為〝2〞。

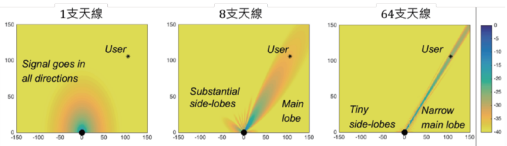


圖（九）增益為〝2〞的收發信組合

在收信端加裝一支天線，同時發送兩組一樣的信號，則收信機收到的信號會再改善一倍。兩個發信機配兩個收信機，，多樣性增益（Diversity Gain）為〝4〞。

圖（十）增益為〝4〞的收發信組合

天線數量越多，增益性越佳，電波能量越能目標天線聚焦。圖（十一）為瑞典大學Emil Bjornson教授所做的實驗。一支天線，電波微弱且擴散；八支天線，電波聚焦；64天線，波束成形，全部聚焦對著手機，收信效果更好。



資料來源：Massive MIMO for 5G: How Big Can it Get?, Dr. Emil Björnson Department of Electrical Engineering (ISY), Linköping University Sweden

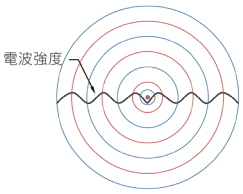
圖（十一）天線數量與波束形狀

4G已經使用MIMO，8支天線一組。在5G，天線數量可從64支增加到1024支，因數量龐大，故稱為巨量天線（Massive MIMO）。

五、波束賦形（Beamforming）

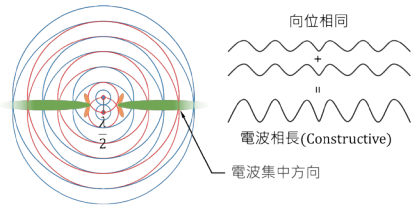
5G時，基地台天線數量大於鄰近的手機，電波像天女散花一樣的射出去，而手機要的只是它天線收得到的電波，其他的電波全消失在空中。這種現象對電信公司而言等於在燒錢，波束賦形技術就是用來解決這個問題。

下圖是一支全向性天線（Omnidirectional Antenna）涵蓋的鳥瞰，電波向四面八方發射，如水漣　。從側面看，電波呈正弦波，紅、藍各為正負最大值。



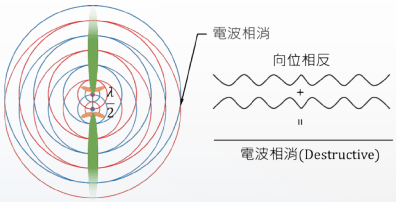
圖（十二）全向性天線電波示意圖

如果在距離這支天線電波半波長的地方放第二支天線，且同時發射電波。這兩支天線所發射的電波相位完全相同，於是正極相加（紅紅相加），負極也相加（藍藍相加），稱為相長（Constructive）。形成波束，朝水平方向射出。



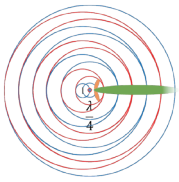
圖（十三）兩天線電波相位相同時發射水平電波

假使第二支天線所發射的電波相位與第一支完全相反時，兩個電波的正極與負極相加（紅藍相疊），則電波強度等於零，此現象稱為相消（Destructive）。波束方向與前例相差90°　。



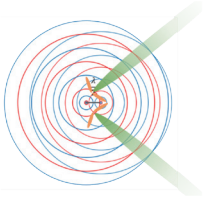
圖（十四）天線電波相消時發射垂直電波

如果兩天線距離為四分之一波長，相位相同且同時發射電波，則波束只朝一個方向發射，如圖（十五），此天線稱為指向性天線（Directional Antenna）。



圖（十五）兩天線距離時之波束方向

如果兩支天線不同一時間發射電波，則波束會依這兩天線發射電波的時間差而朝不同方向發射，就如同探照燈的擺動。巨量天線就像如來佛掌，手機逃不出其範圍，如下圖。

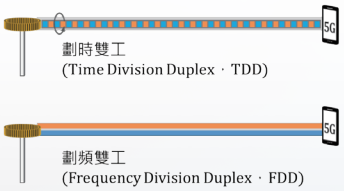


圖（十六） 發射時間不同時之波束方向

但是基地台要如何對準不停移動的手機？5G手機只要在使用，一定會丟出信號與最近的機基地台溝通。基地台測出手機與波束偏離的角度，立即調整修正對準手機，波束就這樣跟著手機跑。

六、單頻雙工（In-band Full Duplex）

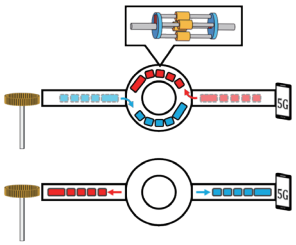
行動通信不是Walki Talki，必須雙工（Full Dulex），用起來才方便。從基地台傳信號給手機的電路稱為下行頻道，反向稱為上行頻道。把上、下行頻道依頻段分開叫做劃頻雙工（Frequency Division Duplex，縮寫FDD）。若把頻道給下行專用後，再交換給上行專用，這種技術稱為劃時雙工（Time Division Duplex，縮寫TDD）。



圖（十七） FDD與TDD示意圖

把手機與基地台信號比喻成火車列，兩支手機同時發射信號給對方。FDD用兩條軌道，一條上行，一條下行，因此不會對撞。TDD用一條軌道，下行駛完換上行，也不會對撞。

不過，這些都不是真正的全頻雙工！兩者都無法使這兩列火車在〝同一時空使用同一軌道〞！5G需要真正的單頻雙工，頻譜才能翻倍使用。近年發展出極高速的矽電晶體交換機（Silicon Transistor），把這兩列火車在對撞之前錯開。這種方式稱為中繼全雙工（Relay Full Duplex）。這種方式僅能使用於送、收端離交換點等距的條件。



圖（十八）單頻全雙工示意圖

既有的行動通信網路FDD及TDD仍佔多數，新建的系統必須與既有系統磨合，所以現行的行動通信網路是新舊並存。

七、結語

1G到4G都採用大涵蓋及高功率，對於能源及頻譜的使用效率不是那麼重視。然而，5G把使用頻譜擴展到毫米波範圍，因波長短，基地台涵蓋面積縮小，相對的數量倍數增加。而且5G連網元件數量是4G的萬倍，必須提高能源及頻譜效率才能因應龐大的硬體及軟體運作。

頻寬很貴！NCC標售出去的頻寬都是以億計算。所有的發射電波都必須準確的對準移動中的手機，有如打飛靶高手。從經營的角度，電波一點都不能浪費，所以有波束賦形。除了不能浪費還要提高效率，因此有單頻雙工的需求！

5G才剛開始，至少要等十年才會人手一支。十年後又進入6G，屆時地球上空的同步衛星將大量的取代現有基地台，行動通信涵蓋將更綿密。