

# 6GHz以下頻段之多天線波束成形技術研究

## Study of Sub-6GHz Hybrid Beamforming Technology

林敬銜      吳秋萍      許仁源      方士豪  
Jing-Shiun Lin, Ciou-Ping Wu, Jen-Yuan Hsu, Shih-Hao Fang

### 中文摘要

現行4G頻段的使用率已經達到飽和，為了提升服務品質，在5G系統預計將會開放更多頻段來支援場景的應用。另外，在次6GHz的頻段下，資料傳輸率必須要達到最高1Gbps。相較於現行LTE頻段，在次6GHz頻段進行資料傳輸時，會因採用高頻段傳輸而造成路徑損失的影響將進一步地增大，進而將減少細胞覆蓋率。因此，若5G基地台在相同傳輸功率下，欲達到和LTE相同的覆蓋範圍，則巨量天線系統、波束成形、波束追蹤等技術皆不可或缺。為了達到基站共站，提出非均勻的波束成形技術來改善高頻率所造成的路徑損失效應。透過部份窄波束來集中能量以將訊號發送到較遠的位置；寬波束則運用於一般情況。為了提供高移動速度的需求，波束追蹤技術也將進一步地被探討。如此一來，可以減少基地台佈建成本，讓電信業者加速5G系統佈建。

### Abstract

Due to the crowded frequency band in LTE systems, 5G system is expected to provide more frequency bands to improve service quality in more usage scenarios. In addition, the data transmission rate must be up to 1Gbps in the sub-6GHz band. However, as data transmission in the sub-6GHz, due to the usage of high frequency bands, path loss will be increased, thereby reducing the cell coverage compared to the existing LTE systems. Hence, if 5G base stations to provide the same cell coverage under the constraints of transmission power, these techniques such as massive MIMO, beamforming, and beam tracking are indispensable. To achieve the coexisting with LTE base stations, a non-uniform beamforming pattern is proposed to compensate the path loss caused by high-frequency transmission. The proposed beam pattern includes narrow beams and wide beams. The narrow beams are used to concentrate the signal energy to send to a distant location; the wide beams are applied to the general case. Furthermore, to provide the demand for high mobility, the beam tracking technique will be further explored. As a result, the cost of deploying the 5G base station can be reduced and then the telecom operators can speed up the 5G system deployment.

### 關鍵詞 ( Key Words )

長期演進技術 ( Long Term Evolution ; LTE )

第五代行動通訊 ( The Fifth Generation Mobile Communication )

巨量通訊 ( Massive MIMO )

波束成形 ( Beamforming )

波束追蹤 ( Beam Tracking )

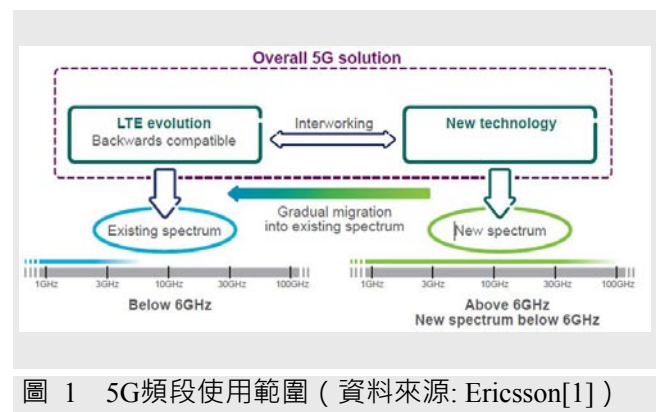
## 1 · 前言

第三代合作夥伴計畫 ( 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project; 3GPP ) 於今年4月開始進行5G新無線電 ( New Radio; NR ) 的制定，計劃於2019年6月向國際電信聯盟 ( International Telecommunication Union; ITU ) 遞交5G提案，其中初期研究項目 ( Studying Item ) 預計進行至2017年3月。目前，NR技術細節尚未十分明確，但主要朝向三大方面來發展，一是增強式行動寬頻 ( enhanced Mobile Broadband; eMBB )，用以持續加強於居家或公眾場合上網等行動寬頻應用；二為大量佈建的公眾物聯網，稱為巨量機器型態通訊 ( Massive machine type communication; mMTC )，是作為智慧家庭、智慧城市以及具少量資訊傳輸的穿戴式電子裝置之通訊應用；三為具可靠/低延遲通訊 ( Ultra-reliable and Low-latency Communications; URLLC )，用以實現健康監督、無人駕駛以及工業自動化。

根據圖1所示，5G系統將會使用更多頻段，目前初步定義頻段範圍可介於1GHz ~ 100GHz之間。目前可以6GHz做為區隔，eMBB、URLLC和mMTC這三大應用需求皆可以操作於次6GHz頻段，特別是需要較大的覆蓋面積的mMTC應用，將以低於1GHz的頻段為主。在高於6GHz以上的毫米波 ( mmWave ) 頻段，將會有數百MHz的通道頻寬可以使用，相較於現行的長期演進技術 ( Long Term Evolution; LTE ) 系統一個最大通道頻寬僅20MHz高出不少，因此預期可以提升資料傳輸率。然而現階段毫米波仍有許多問題待克服，其中主要是高傳輸路徑損失 ( Path Loss )、傳播訊號易受反射衰落 ( Fading )、遮蔽效應 ( Shadowing Effect ) 以及戶外高速交遞等考驗而造成傳輸訊號品質下降。相較於次6GHz的頻段，毫米波的射頻技術實現難度高，以至於收發機的成本也相對較高。雖然毫米波被預期是5G系統會採用的頻段，但現階段電信營運商、晶片商將會先以次6GHz為優先考量，並預估2017年將會制定初步系統規格。

相較於現行LTE的頻段，在次6GHz頻段進行資料傳輸時，會因採用高頻段傳輸而造成能

量損益急遽增加的情況。若5G基地台 ( Base Station ) 在相同的傳輸功率下，欲達到和LTE相同的覆蓋範圍，則巨量天線系統 ( Massive MIMO )、波束成形 ( Beamforming )、波束追蹤 ( Beam Tracking ) 等技術皆不可或缺。巨量天線系統，亦可稱為大規模天線系統 ( Large Scale Antenna Systems ) 或稱大規模多輸入多輸出系統 ( Large Scale MIMO )。在巨量天線系統中，傳送端具有大量數目的天線，可同時服務多個使用者裝置，其可能實現方式包含了線性 ( Linear )、矩形 ( Rectangular )、圓柱形 ( Cylindrical ) 與分散式 ( Distributed ) 等多種天線型態[2]。波束成形是目前用來改善訊號對雜訊比最常見的技術之一，此技術是透過調整基頻端各天線所對應之訊號權重比例及方向來集中發射能量給目標裝置，藉此來提高傳輸距離與降低對非目標裝置的干擾訊號能量，進而改善訊號對雜訊比。波束成形技術可以被用於5G所定義的頻段中，然而不同於毫米波頻段，次6GHz頻段會面臨較大的抵達角度 ( Angle-of-Arrival; AoA ) 擴展 ( Spread ) 和高移動基本環境之需求。有鑒於此，由天線陣列 ( Antenna Array ) 所形成的波束，其寬度會隨著提高訊號精準度而相對變窄。在用戶裝置會移動的情況下，則會衍伸出訊號對準的問題，所形成的波束需隨著用戶端移動而有所調整，以提供移動傳輸能力，故波束追蹤將是維持訊號品質的關鍵技術。因此，次6GHz頻段之多天線波束成形技術仍有討論的必要性。



## 2 · 多天線與波束成形技術簡介

### 2.1 巨量天線 (Massive MIMO)

巨量天線是5G的候選技術之一，能夠提高服務的使用者數目與提升資訊傳輸率。在次6GHz頻段的基地台預計可採用大量天線，初步設定天線數目可超過64根。搭配波束成形技術，預先編碼技巧將能量集中於目標用戶，進一步降低對非目標裝置的干擾訊號能量。不同於傳統運用時間域或頻率域的切割方式讓用戶間達到共享資源，波束成形技術則利用了空間域 (Spatial Domain) 來區分不同用戶，因此可以同時提升頻譜效益與能源效率。圖2顯出巨量天線可能實現方式包含了線性 (Linear)、矩形 (Rectangular)、圓柱形 (Cylindrical) 與分散式 (Distributed) 等多種天線型態。

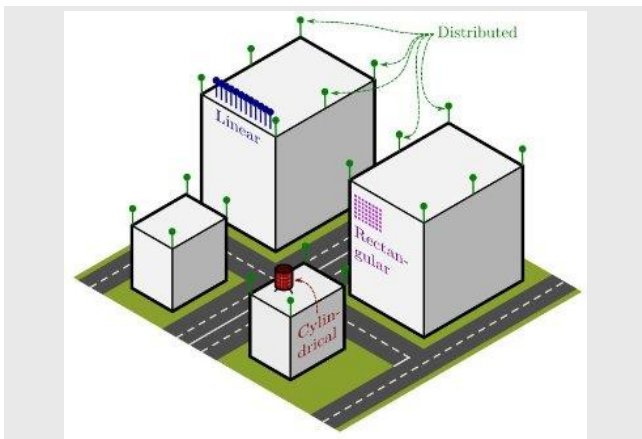


圖 2 巨量天線實現種類[2]

### 2.2 波束成形 (Beamforming)

在過去十幾年，數位波束成形技術已廣泛地應用於許多無線通訊系統中，其中包含802.11x及LTE系統。如圖3所示，在傳送端與接收端使用天線陣列，並可在基頻端調整各天線訊號間的權重比例來將訊號集中在多個特定方向，也會抑制某些特定方向訊號能量而達到干擾消除，故可以有效地提高訊號雜訊比[3]-[4]。在5G系統中，除了考慮數位波束成形技術外，類比波束成形 (Analog Beamforming) 和混合式波束成形 (Hybrid Beamforming) 也被納入討論範圍。圖4為類比波束成形架構，透過調整射頻端的天線板 (Antenna Panel) 之係

數，來達到能量集中的目的。相較於數位波束成形，類比方式的精準度及調整彈性皆不及於數位方式，故無法達到有效的干擾消除；然而在數位波束成形的架構中，每一根天線都需要一組數位類比轉換器 (Digital-to-analog Circuit; DAC) 和類比數位轉換器 (Analog-to-digital Circuit; ADC)，因此隨著頻寬增加及天線數目增加，所需要的成本將會劇增。混合式波束成形是結合類比與數位方式的優點，將天線陣列分成許多區塊 (Section)，而同區塊共同使用一個DAC與ADC轉換器。因此，若配合適當的天線陣列組態設定，不但可以大量減少轉換器的數量以節省硬體成本外，也可以獲得可觀的天線增益 (Antenna Gain)。波束成形的技術採用，使無線訊號的能量更為集中，除了能提高訊號波束的精準度外，亦能減少雜訊的產生。但在提高訊號波束精準度的同時，波束的寬度也相對變窄，因此基地台與手機間的波束管理 (Beamforming Management) 成為5G系統中一項相當重要的議題。

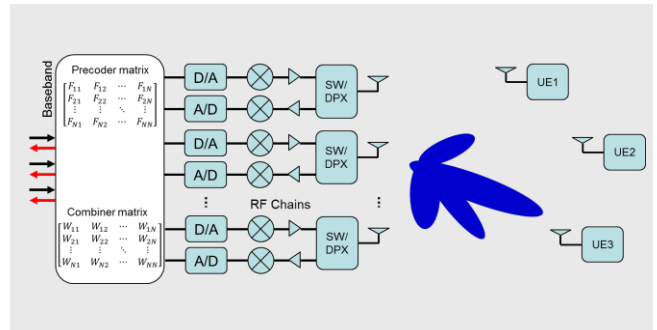


圖 3 數位波束成形架構

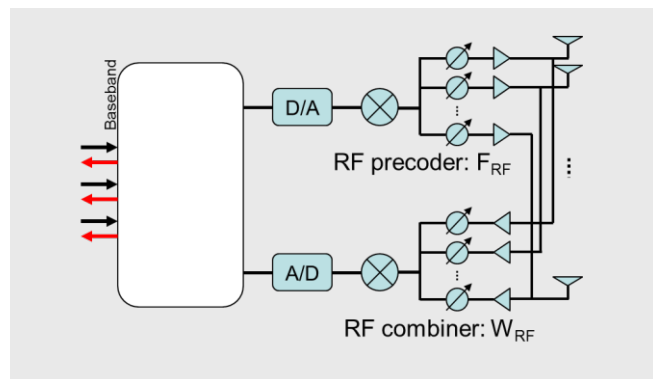


圖 4 類比波束成形架構

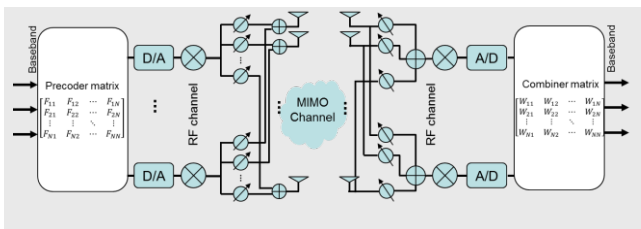


圖 5 混合式波束成形架構

針對波束管理部份，目前3GPP已進行三次會期來討論。在RAN1#86會期中決議：在波束管理程序中時，手機能針對基地台的傳送波束及接收波束進行量測，找出下行（Downlink）傳送中最適當的波束配對。在RAN1#86bis會期中，亦針對上行（Uplink）傳送，定義了上行波束管理，程序大致上與RAN1#86所定義之下行波束管理程序雷同，但改為由基地台端進行量測。針對用於波束量測的參考訊號部分，在RAN1#86會期決議通道狀態資訊參考訊號（CSI-RS）除了通道狀態量測外，亦須支援波束管理程序，其餘參考訊號則需進一步討論；至於用於上行波束量測的參考訊號則尚未決定。過去LTE在通道狀態資訊（Channel State Information; CSI）中，為降低訊息的傳送量而採用隱式回饋機制，亦即手機僅回傳部分通道資訊給基地台；承如上述，波束的精準度為5G中相當重要的議題，因此在RAN1#86會期中，除了隱式反饋機制外，明確反饋機制亦納入3GPP的討論範疇，以提高傳送波束的精準度，但資訊回饋的資料量及種類，則需進一步討論。

### 2.3 波束追蹤（Beam Tracking）

能有效地運用波束成形的前提是訊號的接收方位須能準確估計，因此要探討波束方位估測之技術。在[5]-[7]提出針對數位波束成形的訊號到達方向（Direction of Arrival; DoA）與離開方向（Direction of Departure; DoD）的估測演算法，主要是將天線陣列所收集到的資料，透過其特徵結構（Eigen Structure）來進行估測。多重訊號分辨（Multiple Signals Classification; MUSIC）演算法[5]是將收到訊號的自相關矩陣做特徵值分解（Singular Value Decomposition; SVD）後，依據所求得的特徵向量將空間分成訊號子空間與雜訊子空間，並

利用這兩者子空間相互正交的特性，進而求出所要的DoA方位。值得注意的是DoA只能決定訊號之接收方向，但假設通道具有可逆性（Reciprocity），則就可以找到相對應的DoD方位。MUSIC演算法須利用搜尋方式找出解，其估測準確性取決於掃描的柵格（Grid）大小，因此實現上可能具高複雜度。旋轉不變技巧之訊號參數估測（Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariant Techniques; ESPRIT）演算法[7]則是運用發射天線陣列與接收陣列的旋轉不變特性來估測DoA。

## 3. 次6GHz的多天線波束成形技術

在次6GHz的巨量天線系統中，若採用3.5GHz或者5.8GHz為中心頻率，相較於LTE系統大部份採用2GHz以下的頻段，5G系統將會產生較嚴峻的路徑衰減。然而，若要達到5G與4G基地台共站，勢必須要延伸5G基地台的覆蓋範圍。因此如何利用混合式波束成形技術來補償高頻所造成的路徑損失是一個有待研究的課題，其中主要有三大方面需要權衡：

- (1) 路徑補償能力與天線個數
- (2) 波束寬度尺寸與空間多工增益
- (3) 系統效能與複雜度

另外，不同於毫米波頻段所具有電波指向性高的特性，在次6GHz頻段下要支援波束采集（Beam Acquisition）與波束追蹤於高移動環境是具有困難度的。在不同應用環境中，抵達角度也會有所不同，因此造成傳統估測所認為最強的路徑未必會有最佳的效能。除此之外，針對高移動的用戶端也必須使用波束追蹤技術來確保通訊品質。底下將針對這些問題，提出可能的解決方案。

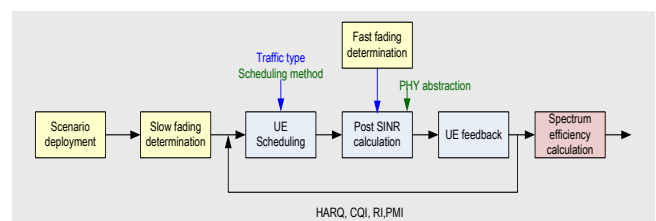


圖 6 系統級模擬平台



### 3.1 通道分析方法

如前言所述，波束成形能夠有效提高訊號傳送範圍外，亦可透過調整波束的方向性來有效降低傳送信號對鄰近區細胞 ( Neighboring Cell ) 內手機或行動裝置的干擾，以提高整體系統資料吞吐量 ( Data Throughput )。為了同時觀察波束成形的信號增強與雜訊抑制的能力，根據[8]與[9]建立包含多個區細胞的系統級模擬平台 ( System Level Simulator; SLS )，如圖6所示，其步驟說明如下：

( 1 ) 環境佈建 ( Scenario Deployment )：根據模擬場景，決定基地台或區細胞的數量、位置及涵蓋範圍及其傳收點 ( Transceiver point; TRP ) 的位置；接著決定手機的位置。

( 2 ) 慢衰減推算 ( Determination )：通道的慢衰減參數包含路徑衰減、天線增益及遮蔽效應等；當環境佈建完成後，透過各基地台與天線的相對位置，推估各項慢衰減參數。在此步驟中，手機會根據通道衰減的強弱決定其服務區細胞 ( Serving Cell )。

( 3 ) 資料排程 ( UE Scheduling )：各基地台根據各手機欲傳送資料型態 ( Traffic Type )，將欲傳送封包進行排程。

( 4 ) 快衰減推算：根據使用者的移動速度及其通道的時延擴展計算各連結間 ( 指單一基地台和單一手機 ) 的通道效應。

( 5 ) 訊號與雜訊比計算 ( Post SINR Calculation )：基地台會依據波束管理程序中所取的通道狀況，調整其波束方向與權重後傳送信號。在此模擬平台中，結合目前的通道係數以及波束參數，計算各手機的訊雜比，並推得相對應封包的傳送正確率。

( 6 ) 使用者反饋 ( UE Feedback )：手機回傳確認字符 ( ACK/NACK ) 給基地台，以利後續排程。

( 7 ) 頻譜效益計算 ( Spectrum Efficiency Calculation )：

透過累加，即可計算整體系統的吞吐量，及所有手機的訊雜比分佈及平均值。

### 3.2 非均勻類比波束 ( Non-uniform Analog Beamforming ) 設計

如圖7所示，基地台可以支援不同波束寬度，一來寬波束可以用來服務覆蓋範圍的用戶，並可以提高的多樣性 ( Diversity ) 及空間多工增益；二來對於較遠的用戶端，可以透過調整天線訊號間的權重比例來集中傳輸能量，運用窄波束以提供更高的天線增益來補償路徑損失。如此一來，若將來次6GHz頻段採用3.5GHz或5.8GHz為中心頻率，其所造成的覆蓋範圍縮小的問題就可以獲得改善，透過混合式波束成形技術，將可以實現4G/5G基地台共站。

### 3.3 波束追蹤估測

一般來說，波束訊號入射到天線陣列會有一個入射角度的影響，稱之為操控向量 ( Steering Vector )。如圖8所示，在巨量天線系統下，若採用的是混合式平面陣列天線，則代表DOA估測需要估計兩個角度，一個是方位角 ( Azimuth Angle ) 與仰角 ( Elevation Angle )，因此MUSIC演算法需要兩個維度搜尋。為了要支援高速移動用戶，須透過上行/下行波束管理程序，利用波束量測的參考訊號來進行方位的估測。

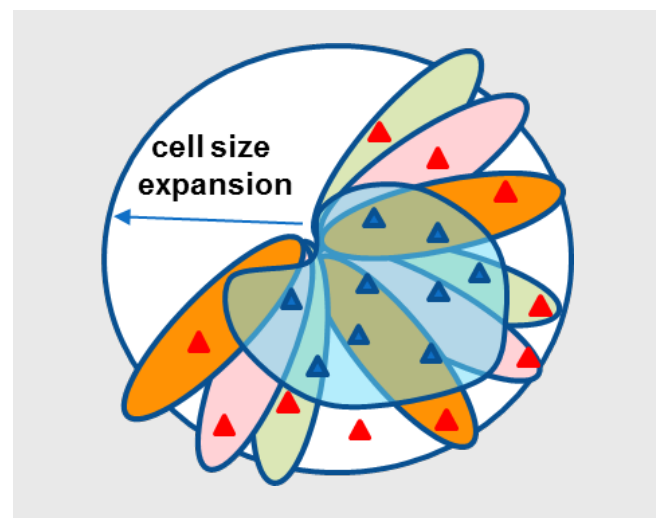


圖 7 非均勻波束設計

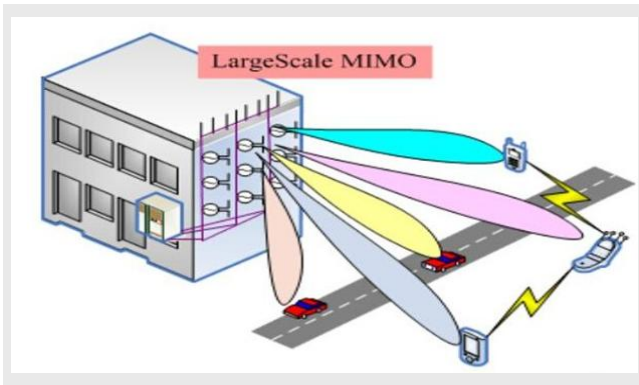


圖 8 波束采集與波束追蹤

#### 4 · 結論

相較於毫米波頻段，次6GHz頻段技術相對較為成熟，但若要實現4G/5G基地台共站，減低電信營運商（中華電信、台灣大哥大、遠傳電信）對5G基地台的佈建成本，非均勻波束設計可能是一種解決方案之一。另外，透過波束追蹤關鍵技術的開發，可提供移動用戶更佳的通訊服務。如此一來，預期可以加速5G系統在次6GHz頻段加速商用時程。

#### 參考文獻

- [1] Ericsson White Paper, 5G Radio Access – Capabilities and Technologies.
- [2] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Magazine*, pp. 186-195, Feb. 2014.
- [3] N. Celik *et al.*, “Implementation and experimental verification of hybrid smart-antenna beamforming algorithm,” *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.* vol. 5, pp. 280-283, 2006.
- [4] Z. Zhang *et al.*, “Hybrid smart antenna systems using directional elements – performance analysis in flat Rayleigh fading,” *IEEE Trans. Antennas Propag.* vol. 51, no. 10, pp. 2926-2935, Oct. 2003.
- [5] R. O. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, no. 3, pp.

276-180. Sep. 1986.

- [6] X. F. Zhang, L. Y. Xu, L. Xu, and D. Z. Xu, “DOD and DOA estimation in MIMO radar with reduced-dimension MUSIC,” *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 1161-1163, Dec. 2010.
- [7] B. Ottersten, M. Viberg, and T. Kailath, “Performance analysis of the total least squares ESPRIT algorithm,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 39, pp. 1122-1135, May 1991.
- [8] *Study on Channel Model for Frequency Spectrum above 6GHz*, 3GPP, TR38.900, 2016.
- [9] “WINNER II Channel Models,” IST-4-027756 WINNER II, D1.1.2 V1.2.

#### 作者簡介

林敬銜



現任工業技術研究院資訊與通訊研究所 (ITRI/ICL) 新興無線應用技術組 (Emerging Wireless Division) 基頻設計部 (Baseband Design Department) 工程師。2015年取得國立成功大學電機工程研究所博士學位。主要負責5G系統演算法與LTE實體層設計。

[E-mail:JingShiunLin@itri.org.tw](mailto:JingShiunLin@itri.org.tw)

吳秋萍



現任工業技術研究院資訊與通訊研究所 (ITRI/ICL) 新興無線應用技術組 (Emerging Wireless Division) 基頻設計部 (Baseband Design Department) 工程師。2007年取得清華大學通訊所碩士學位。主要負責5G系統演算法與LTE實體層設計。

[E-mail:TammyWu@itri.org.tw](mailto:TammyWu@itri.org.tw)

許仁源



現任工業技術研究院資訊與通訊研究所 (ITRI/ICL) 新興無線應用技術組 (Emerging Wireless Division) 基頻設計部 (Baseband Design Department) 經理。1999 年取得國立清華大學電機工程研究所碩士學位。主要負責無線通訊系統與基頻訊號處理。

[E-mail: jyshu@itri.org.tw](mailto:jyshu@itri.org.tw)

方士豪



現任工業技術研究院資訊與通訊研究所 (ITRI/ICL) 新興無線應用技術組 (Emerging Wireless Division) 基頻設計部 (Baseband Design Department) 資深工程師。2012 年取得國立成功大學電機工程研究所博士學位。主要負責巨量天線系統基頻設計與 LTE 實體層設計。

[E-mail: shfang@itri.org.tw](mailto:shfang@itri.org.tw)