

運用多準則決策於長期演進技術雙工模式之評選

廖芳誼、陳文字

國立成功大學電信管理研究所

摘要—隨著第四代行動通訊(4G)寬頻執照將於 2013 年底前釋出，臺灣通訊市場已逐漸邁入 4G 時代。然而身為 4G 主流技術的 LTE 卻同時界定了 FDD (frequency division duplexing) 和 TDD (time division duplexing) 兩種規格，觀察國外經驗，業者在面對 LTE 佈建時將面臨 FDD-LTE、TDD-LTE 和 FDD/TDD LTE 三種模式的選擇。因此，本研究以多準則決策法建立一套 LTE 雙工模式的評估架構，以提供業者在決策上的參考。而根據研究結果，建議最適合運作於臺灣通訊環境的方案為 FDD-LTE 單模網路，其次為 FDD/TDD LTE 雙模網路。

一、緒論

隨著國內通訊市場邁入成熟期以及智慧型手機普及化趨勢，行動上網使用人數的爆增促使電信業者必須提供更大的頻寬傳輸速率。因此，能夠提供更穩定、更大傳輸速度的 4G 通訊服務成為我國積極發展的目標。

根據政府 4G 頻譜釋照時程的規劃，國家通訊傳播委員會(NCC)已公佈將於 2013 年底前採技術中立原則釋出執照，並且預計釋出的頻段包含 700MHz、900MHz 和 1800MHz，以 5MHz*2 為單位，共 27 個單位進行拍賣；此外，交通部郵電司於 2012 年 9 月也表示，第二階段釋照規劃將進行 2.6GHz 頻段的釋出。由此可知，國內業者進行 LTE 網路佈署指日可待。

然而 LTE 的技術在 3GPP Release8 的版本中卻同時界定了分頻雙工 (frequency division duplexing, FDD) 與分時雙工 (time division duplexing, TDD) 兩種模式，兩者不論在先天技術、產業發展或者使用頻段上皆有差異，因此，運作上各有優缺點。

由於目前業者在計劃佈建 LTE 時將面臨(1)FDD-LTE 單模網路、(2)TDD-LTE 單模網路以及(3)FDD/TDD LTE 雙模網路三種選擇，因此，本研究採用目前被廣泛應用在計畫評估的多準則決策 (multiple criteria decision making, MCDM)法針對 LTE 可行方案建立完整的評估，以提供電信業者在 LTE 雙工模式選擇上的決策參考。因此，本研究希望最後達成以下三個目的：

- (1) 根據 MCDM 理論，建立 LTE 雙工模式評選的架構。
- (2) 找出適合分析 LTE 三種可行方案的評估準則。
- (3) 根據結論提出業者在 LTE 雙工模式選擇的參考。

二、文獻回顧

2.1 LTE 發展概述

由於行動通信已從單純的語音、數據通信服務，朝向更多樣化多媒體應用的服務，為了提供更高品質的無線

通訊服務，2008 年 3GPP 在 Release 8 提出了 FDD-LTE 和 TDD-LTE 的技術標準，並且在 2010 年通過 ITU 的評估，與 LTE-Advanced、WiMAX2、WiMAX 以及 HSPA+共同納入 4G 標準。

根據 GSA (the Global Mobile Suppliers Association) 10 月的統計顯示，全球有 351 個營運商在 104 個國家投資 LTE 網路佈建；105 個商用 LTE 網路在全球 48 個國家 [1]。在全球主要大型電信業者加入 LTE 的行列之後，幾乎可確定 LTE 成為未來 4G 發展的主流技術。

2.2 FDD-LTE 與 TDD-LTE 兩者關係之相關研究

FDD-LTE 數據的傳輸採用不同的頻率，並以成對的頻段來進行上下鏈傳輸；而 TDD-LTE 則是使用相同頻段但透過不同時間差來完成傳送與接收。參考過去針對兩者進行比較分析的相關文獻[2]-[4]，如表 1 所示，可以發現 FDD-LTE 和 TDD-LTE 在運作上各有不同的優缺點，才造成業者在面對 LTE 雙工模式選擇的困難。

表 1 FDD-LTE 和 TDD-LTE 綜合比較表格

		FDD-LTE	TDD-LTE
技術	雙工技術	分頻雙工	分時雙工
	傳輸模式	全雙工系統	半雙工系統
	頻譜需求	使用對稱式頻譜	使用非對稱式頻譜
	傳輸應用	適合對稱式傳輸應用	適合非對稱傳輸應用
	基站規劃	基站規劃複雜度較低	考慮系統的鄰頻干擾，基站規劃較複雜
	頻譜效率	頻譜利用效率較高	需預留較大的保護帶
成本	頻譜彈性	上下鏈路頻寬固定	動態分配上下鏈頻寬
	硬體成本	須增加 duplex filters 且上下鏈接收天線階開，硬體成本較高	接收/發送共用部分元件，不需要 duplex filters，硬體成本較低
頻段	頻段位置	較低頻段	>1GHz 高頻段
	主流頻段	700MHz/800MHz/900MHz/1800MHz	2.3GHz/2.6GHz
產業	網路設備	前五大：Ericsson, ALU, NSN, ZTE, Huawei	可商用出貨者：Huawei, ZTE, NSN, Ericsson
	終端設備	約349款	約68款

2.3 多準則決策

檢視過去與計畫評估、策略選擇的相關研究，可發現不少 MCDM 在這類研究上的運用。而多準則決策方法種類繁多，主要常見的方法如下：

- (1) **簡單加權法 (Simple Additive Weighting method, SAW)**：是將每個準則分配權重，再把各準則績效值轉換成數字後乘上權重，找出得分最高的最適方案。
- (2) **層級分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP)**：是將各項準則延展成不同層級，再利用成對比較法建立權重得到各準則優先權，進而得到最適計畫。

- (3) **TOPSIS 評估法**：是採用與正理想解之相對接近值的方法來進行方案的排序。
- (4) **ELECTRE 評估法**：是利用方案間較優排序關聯的連續評估，利用「超越關係」及「最小優勢方案」建立方案間之相關性及淘汰較差之方案。

三、 研究架構與構面分析

3.1 建立研究架構

由於簡單加權法具有理論基礎簡單且容易計算的優勢，在 MCDM 中是最常被使用的方法之一 (Kirkwood & Corner, 1993)，故本研究採用 SAW 方法，並且結合 AHP 法的概念搭配專家問卷找出各準則的權重，再運用 SAW 的運算，計算出方案的總得分，尋找出符合決策者理想的方案。故本研究所提出評估流程如圖 1 所示。

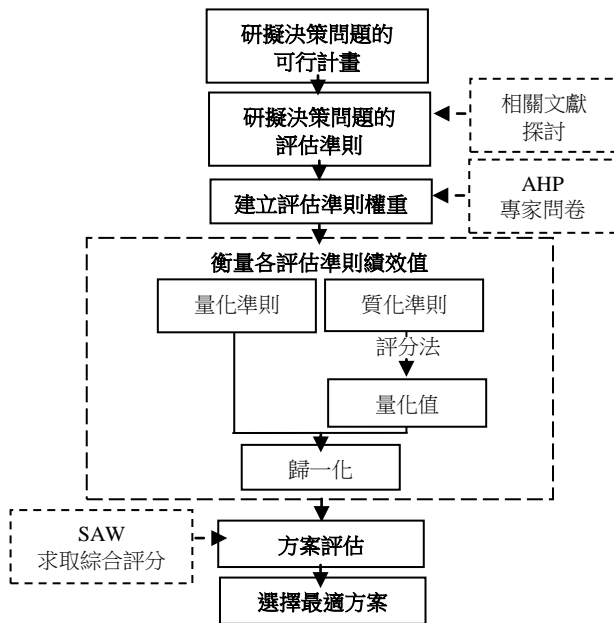


圖 1 本研究之多準則決策評估模式流程圖

3.2 建立 LTE 可行方案

根據我國 4G 頻譜的規劃，預計釋出的 700MHz、900MHz 和 1800MHz 皆屬於 FDD-LTE 的頻段；而 2.6GHz 則可用於發展 TDD-LTE，由於我國頻譜發放技術中立性原則，業者可依本身的需求自行搭配頻譜的競標組合；再根據國外營運商的經驗，本研究歸納出我國業者在 LTE 雙工模式的選擇上有三種可行方案：

方案一、FDD-LTE 單模網路

FDD-LTE 是從 WCDMA 演進而來，有利於具備 2G 與 3G 網路的營運商直接進行升級；再加上受到美國許多大型營運商的支持和領先佈建，其商用化時間較早且產業鏈較為成熟，在北美與日本已擁有相當的用戶數。

方案二、TDD-LTE 單模網路

TDD-LTE 是由中國的中國移動電信來主導，由於中國的網路市場規模幾乎可媲美美國境內目前的發展，再加上各國政府可用頻譜資源日漸稀少的趨勢，不少營運商看好 TDD-LTE 未來的市場發展潛力。

方案三、FDD/TDD LTE 雙模網路

由波蘭 Aero2 以及瑞典 Hi3G 首先示範的 LTE 雙模融合網路，考量頻譜資源取得的難易度以及數據服務的使用特性，雙模網路雖然產業發展較晚，但在近年由於其營運上的優勢，受到愈來愈多營運商的重視，並且在歐洲也進入了 FDD/TDD 融合網路的熱潮期。

3.3 建立評估構面及準則

參考關於 FDD-LTE 和 TDD-LTE 兩者的比較資料，以及不同電信技術比較或通訊網路方案評選的相關文獻 [5]-[6]，本研究彙整出技術、成本和產業環境三大評選考量構面；構面下則包含篩選出的九項評估準則，如圖 2 所示。

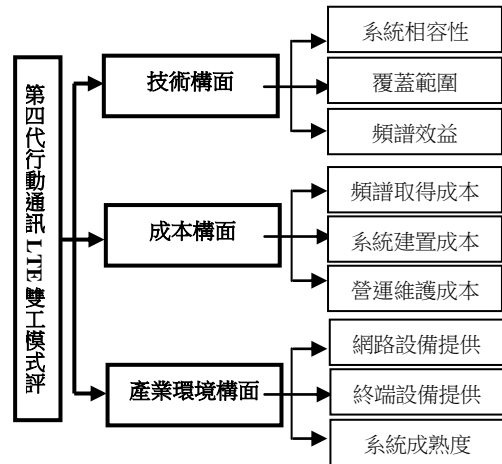


圖 2 LTE 雙工模式評選之評估準則結構圖

四、 實證分析結果

4.1 評選準則之相對權重分析

本研究在建立評估層級架構之後，採用 AHP 專家問卷法建立準則權重。本研究問卷寄發於 2013 年 2 月至 4 月，通過一致性檢定，滿足 $C.R. \leq 0.1$ 條件的有效問卷共 7 份，調查對象為電信通訊領域及 4G 網路架構之專家。其各評估構面及準則之權重如表 2 所示。其中權重較高者為產業環境構面的影響，專家主要認為系統成熟度、營運維護、網路設備及終端設備提供的條件，是影響 LTE 系統後續經營的關鍵，故必須特別注意。

表 2 評選準則之相對整體權重

評估項目	構面權重	層級內權重	整體權重	排序
技術構面	0.171			
系統相容性		0.298	0.051	9
覆蓋範圍		0.320	0.055	8
頻譜效益		0.383	0.065	7
成本構面	0.336			
頻譜取得成本		0.222	0.075	6
系統建置成本		0.268	0.090	5
營運維護成本		0.510	0.171	2
產業環境構面	0.493			
網路設備提供		0.222	0.109	4
終端設備提供		0.294	0.145	3
系統成熟度		0.484	0.239	1

4.2 各方案評估準則之績效值

針對 LTE 可行方案的評選，本研究提出 9 個準則來進行評估。其中量化準則將由各方案產生之數據取得績

效值，質化準則則採用 1-5 尺度評分法，以 1 至 5 分別表示最差、差、中等、佳、極佳。

(1) 系統相容性

是指三個 LTE 方案在我國現存的通訊系統下，其技術性的交換與支持的困難程度，故為質性準則。參考 Capgemini 評估系統相容性的作法[7]，本研究考慮我國使用的 3G 通訊標準為 WCDMA 及 CDMA2000 系統，與 FDD-LTE 為兼容性升級，故給予 5 分；TDD-LTE 是 TD-SCDMA 的演進技術，故給予 1 分，雙模網路由於也包涵 TDD 的技術，故給予 2 分。

(2) 覆蓋範圍

系統的覆蓋能力代表業者在固定區域大小與固定人口覆蓋率下為應付話務需求的基地台佈置彈性及覆蓋效能，故為質性準則。根據 Capgemini 和 Qualcomm 的技術報告指出，FDD-LTE 覆蓋範圍大約比 TDD-LTE 多 40%~80% [7]-[8]，考慮我國頻譜發放政策，則估計我國 FDD-LTE 平均範圍將比 TDD-LTE 多 50%。在 FDD/TDD LTE 雙模網路的部份，在兩者互相搭配的佈建之下，可達到最大的覆蓋效能，故給予 5 分；而 TDD-LTE 次之，給予 4 分；FDD-LTE 給予 2 分。

(3) 頻譜效益

是指每單位頻譜所能提供的數據吞吐量，代表網路系統的效能，為量化準則。考慮較符合消費者使用行為的高比重下鏈需求，TDD-LTE 可彈性分配上下鏈比率傳輸的優勢，使其可提供更高的頻譜利用率。根據 Motorola (2011)的實測結果顯示[9]，FDD-LTE 在非對稱業務的低上鏈負載使得頻譜利用率比 TDD-LTE 低約 40%；假設以 TDD-LTE 績效值作為衡量基準 100%，則 FDD-LTE 為 60%；而雙模網路由於是以 TDD-LTE 負責主要數據傳輸需求，故以 90%做為績效值。

(4) 頻譜取得成本

此部份為業者為獲得執照使用權力所必須付出的競標金額。估算方式如下：

A. 700 MHz 及 900 MHz

此兩頻段由於位置接近，故以國外數位紅利頻段的拍賣經驗，並且與我國拍賣規則類似、同樣以 5MHz*2 為單位釋照的國家做為樣本進行估算。如表 3 所示，預計我國 700 及 900MHz 頻段的取得成本約台幣 20.36 (NT/MHz-PoP)。

表 3 數位紅利頻段平均拍賣價格

國家	拍賣日	拍賣頻段	平均拍賣金額 (€/MHz-PoP)
德國	2010/05	800MHz (2*30MHz)	€0.73
西班牙	2011/07	790-862MHz (60MHz)	€0.47
義大利	2011/09	800MHz (6lots of 2*5MHz)	€0.83
瑞典	2011/03	800MHz (3*30MHz)	€0.42
丹麥	2012/06	800MHz(791-821/832-862)	€0.16
平均			€0.522/MHz-PoP ≈ 20.36NT/MHz-PoP

B. 1800 MHz

參考 DotEcon & Aetha (2012)的資料[10]，全球 1800MHz 執照價格約為 0.212 英鎊(€/MHz-PoP)，折合台幣約 0.67 (NT/MHz-PoP)。

C. 2.6 GHz

由於 2.6GHz 的拍賣主要完成於歐洲地區，故本研究選擇歐洲國家經驗做為估算參考，如表 4。由於丹

麥和澳大利亞 2.6GHz 採成對和非成對頻譜共同競標，難以區分各別平均價格，因此以整體 2.6GHz 競標價格計算。根據國外經驗計算結果，預測我國業者所需負擔的 TDD 頻譜取得成本，約為台幣 1.58/MHz-PoP。

表 4 國外 2.6GHz 非對稱頻譜平均拍賣價格

國家	日期	2.6GHz 非成對頻譜拍賣頻寬	拍賣金額 (€/MHz-PoP)
挪威	2007	2*30 fungible(FDD/TDD)+ 50MHz Unpaired	€0.031
瑞典	2008	50MHz Unpaired	€0.037
芬蘭	2009	50MHz(2570MHz-2620MHz)	€0.002
丹麥	2010	50MHz (2570MHz-2620MHz) +2*70MHz Paired	€0.175
澳大利亞	2010	50MHz Unpaired+ 2*70MHz Paired	€0.025
德國	2010	50MHz	€0.021
西班牙	2011	30MHz unpaired	€0.014
義大利	2011	30MHz unpaired	€0.040
比利時	2011	2.6GHz – Unpaired 45MHz	€0.045
葡萄牙	2011	2*70MHz, 50MHz	€0.016
平均			€0.0406/MHz-PoP ≈ NT1.58/MHz-PoP

D. 各方案頻譜取得成本估算

本研究各方案之頻譜取得成本計算以每張執照 40MHz 為基準，我國人口=23,000,000，計算如下：

(a.) FDD-LTE 單模網路：

平均 FDD 頻譜成本
 $= [20.36 + 20.35 + 9.67] / 3 = 16.97 (NT/MHz-PoP)$ ；
 建議頻寬=2*20MHz；
 FDD-LTE 頻譜成本=16.97*23,000,000*40 ≈ 154 億

(b.) TDD-LTE 單模網路：

平均 TDD 頻譜成本=1.58(NT/MHz-PoP)；
 建議頻寬=40MHz；
 TDD-LTE 頻譜成本=1.58*23,000,000*40 ≈ 15 億

(c.) FDD/TDD LTE 雙模網路：

平均 FDD 頻譜成本=16.97 (NT/MHz-PoP)；平均 TDD 頻譜成本=1.58(NT/MHz-PoP)；
 建議頻寬=2*10MHz+ 20MHz；
 雙模網路頻譜成本=(16.97*20MHz+1.58*20MHz)* 23,000,000 ≈ 85 億

(5) 系統建置成本

LTE 系統在初期便已針對 FDD 和 TDD 模式做最佳化設計，故兩者的系統建置成本差異不在於基地台本身，而在於所使用的頻段。故本研究以資本支出與使用頻譜關連性，如圖 3 所示。以 700MHz 作為衡量基準 100%，估算三個方案的系統建置成本：

A. FDD-LTE：取圖中 700MHz、850MHz、2.1GHz 的支本支出作近似，並且以幾何平均數進行運算。

建置成本= $\sqrt[3]{1 * 1.26 * 3.28} = 1.605 = 160.48\%$

B. TDD-LTE：取 2.5GHz 做我國 2.6GHz 頻段的近似，故績效值為 455%。

C. FDD/TDD LTE 雙模：根據已商用 FDD/TDD LTE 雙模網路的波蘭 Aero2 建置經驗，其指出融合網路的投入成本僅需比 FDD-LTE 建置成本多 30% [11]，故雙模網路建置成本 =160.48%*(1+30%)=208.62%

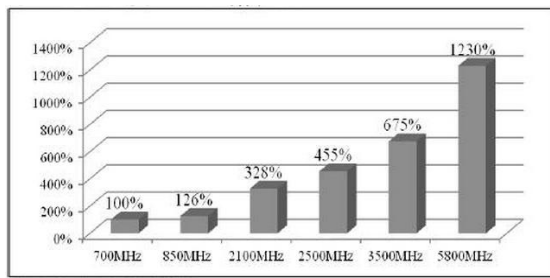


圖 3 基礎建設資本支出與使用頻譜關聯性
來源：IBTSIC (2012)

(6) 營運維護成本

根據專家的說明，維運成本大致上是由業者和系統供應商簽訂合約，以每年固定提撥建置成本的 1%~3% 做為維運費用。因此可以得知各方案營運維護成本與系統建置支出具有相同的比率，故兩項成本績效值相同。

(7) 網路設備提供

此部份是統計到 2012 為止，三個方案各別擁有且實際在市場商用出貨的設備商數量做為績效值，如表 5。

表 5 網路設備提供績效值

LTE 評選方案	方案一	方案二	方案三
系統設備主要供應商	Ericsson, ALU, NSN, Huawei, ZTE, Samsung	Ericsson, ALU, NSN, Huawei, ZTE, Samsung	Ericsson, Huawei, ZTE
績效值(家數)	6	6	3

(8) 終端設備提供

為反應業者在不同方案下所能提供的手機多樣性，本研究整理至 2012 年底為止，三種方案下已推出可支援的手機品牌家數做為績效值，故為量化準則，如表 6。

表 6 可行方案終端設備提供績效表現

LTE 評選方案	方案一	方案二	方案三
品牌製造商	Apple, Samsung, Nokia, Sony, RIM, HTC, Motorola, Pentech, LG, ZTE, ASUS, Kyocera	Huawei, Motorola, Sharp, Fujitsu, Kyocera, ZTE	Huawei, ZTE
績效值(家數)	12	6	2

(9) 系統成熟度

由於通訊系統的發展與成熟往往取決於全球業者的廣泛參與，因此本研究統計 LTE 三個方案下，已正式商用化營運的業者家數做為績效值，如表 7 所示。

表 7 可行方案系統成熟度績效表現

LTE 評選方案	方案一	方案二	方案三
績效值(張數)	133	10	4

4.3 LTE 雙工模式方案評估

綜合以上整理，本研究各方案績效值詳表 8 所示。

表 8 LTE 雙工模式方案績效值

	方案一	方案二	方案三
系統相容性(1-5 尺度)	5	1	2
覆蓋範圍(1-5 尺度)	4	2	5
頻譜效益(TDD-LTE=100%)	0.60	1	0.90
頻譜取得成本(億元)	154	15	85
系統建置成本(700MHz=100%)	1.60	4.55	2.09
營運維護成本(700MHz=100%)	1.60	4.55	2.09
網路設備提供(家數)	6	6	3
終端設備提供(家數)	12	6	2
系統成熟度(張數)	133	10	4

將各個績效進行單位及方向的歸一化後，經由 SAW 的計算，乘上權重，即可得各方案綜合評點值。根據評選擇序的結果，如表 9 所示，由方案一獲得最高分。

表 9 各方案綜合評點及排序

	方案一	方案二	方案三
綜合評點值	0.65	0.33	0.35
決策排序	1	3	2

為求周延的評估結果，本研究以極值權重(Extreme Weight)的觀念進行敏感度分析。考慮本研究構面權重排序： $W3$ 產業環境構面(0.493) > $W2$ 成本構面(0.336) > $W1$ 技術構面(0.171)，取極值權重值向量可能集合：

情況 A: $W_a=(W1, W2, W3)=(0, 0, 1)$

情況 B: $W_b=(W1, W2, W3)=(0, 0.5, 0.5)$

情況 C: $W_c=(W1, W2, W3)=(1/3, 1/3, 1/3)$

我們將這三種情況依其比例各自分配至評估準則，再根據評估準則之極值權重進行敏感度分析，如表 10。

表 10 LTE 方案評選敏感度分析表

	情況 A	情況 B	情況 C
方案一	0.70	0.71	0.60
方案二	0.20	0.38	0.34
方案三	0.09	0.41	0.39

就整體敏感度分析而言，狀況 A、B、C 均以方案一為最佳方案，顯示本研究評估結果具有高度周延性。

結論

本研究以企業需求為導向，透過資料蒐集、文獻回顧回顧、專家問卷等方式，提出一套 LTE 雙工模式的評估架構。根據研究結果顯示，目前最適合運作於臺灣通訊環境方案一、FDD-LTE 單模網路，其次為方案三、FDD/TDD LTE 雙模網路。建議臺灣一般業者在規劃 4G 網路佈建時應以 FDD-LTE 單模網路為優先考量，若受限於 FDD 足夠頻譜取得的困難，也該以 FDD/TDD LTE 雙模網路的佈建為替代方案。

參考文獻

- [1] GSA, Evolution to LTE Report, *GSM/3G Market/Technology update*, 2012
- [2] A.Z. Yonis, M.F.L. Abdullah, M.F. Ghanim, *LTE-FDD and LTE-TDD for cellular communication*, Progress in electromagnetic research symposium proceedings, 1467-1471, 2012
- [3] A. Ivanov, *TD-LTE and FDD-LTE a basic comparison*, Ascom, 2012
- [4] 王竣彥、宋庭禎，*全球LTE產業與標準現況*，工研院資通所，2012
- [5] Y. Yuan, W. Zheng, Y. Wang, Z. Xu, Q. Yang, Y. Gao, *Xiaolingtong versus 3G in China: Which will be the winner?*, Telecommunications Policy, 297-313, 2006
- [6] D. Saugstrup, A. Henten, *3G standards: the battle between WCDMA and CDMA2000*, Emerald Group Publishing, Vol.8, pp10-20, 2006
- [7] L. Asplund, P. Nandan, *Long Term Evolution-LTE opportunities and challenges for Telcos*, Capgemini Telecom & Media, Issue 58, 2011
- [8] Qualcomm, *LTE TDD-The Global Solution for Unpaired Spectrum*, 2011
- [9] Motorola, *TD-LTE: Enabling New Possibilities and Revenues for Operators- Maximizing adaptable DL: UL ratio and lower spectrum costs*, Motorola solution paper, 2010
- [10] DotEcon & Aetha, *Spectrum value of 800MHz, 1800MHz and 2.6GHz*, 2012
- [11] *全球TD-LTE市場發展機會分析*，工研院資通所-產經中心，2012。