

國立政治大學資訊科學系
Department of Computer Science
National Chengchi University

碩士論文

Master's Thesis

應急蜂巢式行動通訊網路的跨網路拓樸設計
Cross Network Topology Design for Contingency
Cellular Network

研究生：黃冠傑

指導教授：連耀南

中華民國一百零二年三月

March 2013

應急蜂巢式行動通訊網路的跨網路拓樸設計
Cross Network Topology Design for Contingency
Cellular Network

研究生：黃冠傑 Student：Kuan-Chieh Huang

指導教授：連耀南 Advisor：Yao-Nan Lien

國立政治大學

資訊科學系

碩士論文

A Thesis

submitted to Department of Computer Science

National Chengchi University

in partial fulfillment of the Requirements

for the degree of

Master

in

Computer Science

中華民國一百零二年三月

March 2013

應急蜂巢式行動通訊網路的跨網路拓樸設計

摘要

當大型災害發生時，往往造成傷亡慘重，若能把握於救災黃金 72 小時內救出受困民眾，則可望挽回更多寶貴的生命，但災區的通訊網路基礎設施時常因災害而遭受嚴重的損毀，無法正常運作。救災工作在缺乏通訊系統的支援下，因溝通協調的困難，大大提高救援的困難度。

我們分析歸納應急通訊系統的七大技術需求，提出一個可快速恢復特定區域通訊服務的網路，並為其設計通訊的拓樸結構。我們稱該網路為應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network)，簡稱 CCN 網路。CCN 網路利用倖存的連通基地台和斷訊卻沒有損毀的基地台，以無線電連接起來建構一個臨時性的通訊系統，具有建置速度快、使用門檻低等多項特點，災區內擁有行動電話的使用者，可利用本網路作為救災通訊之用。

本研究中，我們以各基地台通訊範圍內的通訊需求人數與災區毀損程度，作為效益參數，在數量有限的應急通訊設備下，連接不同電信業者倖存的基地台，建立應急蜂巢式行動網路的跨網路拓樸，此拓樸除追求最大救災效益外，並顧及通訊品質，避免建立負載失衡的連線。我們將問題塑模為一類似圖論中的 K-Maximum Spanning Tree 問題，稱為 Depth Bounded Mutually Exclusive K-Maximum Profit Spanning Tree 問題，並且提供數個快速的啟發式演算法，可在緊急時快速地建立應急蜂巢式行動網路的跨網路拓樸。

Cross Network Topology Design for Contingency Cellular Network

Abstract

When stricken by a large-scale disaster, the efficiency of disaster response operation is very critical to life saving. However, communication systems, such as cellular networks, usually crashed due to various causes that make coordination extremely difficult for many disorganized disaster response workers. Unfortunately, rapid deployment of many existing emergency communication systems relies on a good transportation system, which is usually not available in a catastrophic natural disaster.

We analyze 7-ability for emergency communication systems and propose a Contingency Cellular Network (CCN) by connecting disconnected base stations together with wireless links and contingency recovery packages. CCN can support existing mobile phone users with limited capability. Such a system can support a large number of voluntary workers in the early hours of a catastrophic natural disaster, thus save many lives.

This thesis addresses the design of forwarding topology using multiple operator's base stations aiming to maximize the efficiency of disaster response. We take the degree of emergency degree of the damage, population of each stricken as the priority measure as well as the amount of emergency recovery resources as the constraint to determine the topology. We model the CCN Cross Network Topology Design problem into a K-Maximum Spanning Tree Problem aiming to maximize disaster operation

efficiency. The problem is proven to be NP Hard. We also design some efficient heuristic algorithms to solve the problem when it is needed in urgent.



誌謝辭

時間過得非常快，轉眼間研究所的生活即將畫上句點，回顧這兩年多的研究所生涯，在研究過程之中，雖然時常遇到困難，但在老師們細心的指導和同學之間互相的幫助之下，讓我能順利解決問題，使我獲益匪淺。

在兩年多的研究過程中，首先誠摯的感謝我的指導教授連耀南教授，非常感謝老師您總是不厭其煩的指導我們，並且於每週的進度報告中點出問題，給予我適當的建議，鉅細靡遺的叮嚀我們在研究之中一些常犯的錯誤，讓我接下來的研究過程才能事半功倍。除了學業上的指導，老師也會時常教導我們許多課外的知識並且和我們分享日常生活的經驗，讓我的學習不僅侷限於課本之中。此外也要感謝蔡志宏教授、陳耀宗教授、胡誌麟教授及蔡瑞煌教授在口試時給予我的指導與建議，讓本篇論文能夠更完整而嚴謹。

在兩年多的實驗室生活之中，充滿歡笑與汗水，同學之間彼此相互鼓勵的精神，非常難得可貴，感謝智賢、卡比、丁丁、玉潔，在我剛進學校時給予我適時的幫助；筱慈、小 M、山高學長，在我還是碩一新生時對我非常照顧；同屆的郁翔，在充滿壓力的研究過程中，總是能夠帶給我歡樂；實驗室的學弟妹耿誠、阿衣，給我非常多的幫助，讓我覺得我像是他們兩位的學弟；隔壁實驗室的賀翔、小倩、英明、昶瑞、欣諦、偉迪、煜泓、宇軒、凱柔、小璇，謝謝你們所帶給我的歡樂時光；此外，非常感謝宗仁給予我程式上的指導；也感謝怡萱總是能夠分擔我的壓力，陪我一起解決問題；還要感謝許多曾經幫助過我的人，沒有你們，我的研究絕對無法完成。

求學的階段是非常艱辛與困苦的，感謝我的父母親在背後給予我的支持與鼓勵，擁有你們的支持，才是我繼續前進的動力。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親與所有親人，謝謝你們的照顧。

黃冠傑 March 2013

目錄

第一章、簡介.....	1
1.1、災區應急通訊系統需求分析.....	3
1.1.1、大型天然災害發生時救災行動面臨的挑戰.....	3
1.1.2、固網與行動通訊系統癱瘓原因.....	5
1.1.3、通訊設備修復困難.....	7
1.1.4、大型災害的救災時效.....	7
1.1.5、應急通訊網建置之挑戰與需求.....	8
1.1.6、應急通訊網效能指標.....	12
1.2、應急通訊網路簡介.....	13
1.3、論文架構.....	14
第二章、相關研究.....	15
2.1、第三代行動通訊架構.....	15
2.1.1、通用行動通訊系統陸地無線接入網 (UTRAN).....	16
2.1.2、核心網路 (Core Network).....	16
2.1.3、3G 網路通訊協定.....	17
2.2、應急通訊系統種類.....	18
2.2.1、專用高抗災通信平臺.....	19
2.2.2、無線對講機 (Walkie-Talkie).....	19
2.2.3、業餘無線電 (Amateur radio).....	20
2.2.4、行動衛星通訊 (Satellite mobile phone).....	21
2.2.5、專業用集群通訊系統 (Trunking radio).....	22
2.2.6、移動基地台 (Cell on wheels).....	23
2.2.7、行動隨意式網路 (MANET).....	24
2.2.8、過去應急通訊系統相關研究.....	25
2.2.9、應急通訊系統綜合比較.....	28
2.3、相關演算法.....	30
2.3.1、精確解法 (Exact Algorithm).....	30
2.3.2、後啟發式演算法 (Meta-heuristics).....	32
2.3.3、評論.....	35
2.4、生成樹演算法.....	36
2.4.1、最小生成樹 Minimum Spanning Tree (MST).....	36
2.4.2、最大生成樹 Maximum Spanning Tree (MaxST).....	36
2.4.3、K-Minimum Spanning Tree (K-MST).....	36
2.4.4、K-Maximum Spanning Tree (K-MaxST).....	37
第三章、應急蜂巢式行動通訊網路 (CCN).....	38
3.1、系統架構.....	40

3.1.1、CCN 連網方式.....	41
3.1.2、系統元件.....	42
3.2、通訊模式.....	45
3.2.1、災區通訊型態分類.....	45
3.2.2、CCN 通訊模式.....	46
3.3、CCN 功能架構(Functional Architecture).....	49
3.4、CCN 服務流程.....	52
3.5、建置與運轉流程.....	55
3.6、重要研究議題與未來研究方向.....	56
第四章、應急蜂巢式行動通訊網路的跨網路拓樸設計.....	60
4.1、設計理念與目標.....	60
4.2、CCN 網路拓樸的建構.....	61
4.3、多連網台網路拓樸規劃.....	63
4.4、問題定義.....	63
4.4.1、救災效益定義.....	64
4.4.2、問題描述.....	64
4.5、最佳化問題模型.....	65
4.5.1、限制深度互斥模型(DBME K-MaxST).....	65
4.5.2、自律深度互斥模型(DCME K-MaxST).....	66
4.5.3、自律深度模型(DC K-MaxST).....	67
4.6、演算法設計.....	69
4.6.1、CCN Topology Design – Depth Bounded Mutually Exclusive.....	69
4.6.2、CCN Topology Design – Depth Controlled Mutually Exclusive.....	74
4.6.3、CCN Topology Design – Depth Controlled.....	78
第五章、效能評估.....	80
5.1、實驗目的.....	80
5.2、實驗環境.....	80
5.3、實驗說明.....	81
5.4、實驗一：小規模實驗.....	81
5.4.1、評估指標.....	81
5.4.2、實驗參數設定.....	81
5.4.3、實驗結果.....	82
5.5、實驗二：大規模實驗.....	91
5.5.1、評估指標.....	91
5.5.2、實驗參數設定.....	92
5.5.3、實驗結果.....	92
5.6、實驗總結.....	100
第六章、結論與未來展望方向.....	101

參考文獻 103
附錄 108



圖目錄

圖 1、通訊線路與設備於災害中受損	4
圖 2、行動通訊網路受損主要原因	6
圖 3、獲救時間與存活率之關係	8
圖 4、CCN 網路	14
圖 5、System Architecture of 3GPP Release 99	15
圖 6、3GPP Release 5 架構	17
圖 7、3GPP Release 7 架構	18
圖 8、應急通訊系統使用時機	18
圖 9、CCN 網路架構	39
圖 10、連網台	40
圖 11、孤立台	40
圖 12、CCN 基地台間之連線	41
圖 13、孤立台藉 CCN 連線連上核心網路	42
圖 14、CCN 應急修復包(CRP)	43
圖 15、孤立台恢復連線方式	44
圖 16、CCN 功能架構	49
圖 17、一般通話模式通話建立流程	53
圖 18、無線電對講機模式通話建立流程	53
圖 19、群組通訊模式通話建立流程	54
圖 20、孤立台恢復連線之方式	61
圖 21、CCN Forwarding Tree	61
圖 22、網路拓樸規劃限制因素	62
圖 23、多連網台問題轉換單一連網台問題	63
圖 24、CCNTD-DBME 演算法流程圖	69
圖 25、CCNTD-DBME 演算法	70
圖 26、CCNTD-DBME 演算法範例	70
圖 27、CCNTD-DBME 演算法步驟一	71
圖 28、CCNTD-DBME 演算法步驟二	71
圖 29、CCNTD-DBME 演算法步驟三	72
圖 30、CCNTD-DBME 演算法步驟四	72
圖 31、CCNTD-DBME 演算法步驟五	73
圖 32、CCNTD-DCME 演算法流程圖	74
圖 33、CCNTD-DCME 演算法	74
圖 34、CCNTD-DCME 演算法範例	75
圖 35、CCNTD-DCME 演算法步驟一	75
圖 36、CCNTD-DCME 演算法步驟二	76
圖 37、CCNTD-DCME 演算法步驟三	76

圖 38、CCNTD-DCME 演算法步驟四	77
圖 39、CCNTD-DCME 演算法步驟五	77
圖 40、CCNTD-DC 演算法流程圖	78
圖 41、CCNTD-DC 演算法	78
圖 42、CCNTD-DC 演算法範例	79
圖 43、實驗 1(a)：總效益比較	83
圖 44、實驗 1(a)：CCN FT 深度比較	83
圖 45、實驗 1(a)：總加權效益比較	84
圖 46、實驗 1(a)：服務涵蓋率比較	84
圖 47、實驗 1(a)：效益涵蓋率比較	85
圖 48、實驗 1(b)：總效益比較	86
圖 49、實驗 1(b)：CCN FT 深度比較	86
圖 50、實驗 1(b)：總加權效益比較	87
圖 51、實驗 1(b)：服務涵蓋率比較	87
圖 52、實驗 1(b)：效益涵蓋率比較	88
圖 53、實驗 1(c)：總效益比較	89
圖 54、實驗 1(c)：CCN FT 深度比較	89
圖 55、實驗 1(c)：總加權效益比較	90
圖 56、實驗 1(c)：服務涵蓋率比較	90
圖 57、實驗 1(c)：效益涵蓋率比較	91

表目錄

表 1、近年大型天然災害傷亡損失記錄	2
表 2、應急通訊網建置需求	8
表 3、應急通訊系統比較	29
表 4、災區通訊需求分類	45
表 5、實驗一：實驗參數設定	82
表 6、實驗二：實驗參數設定	92
表 7、實驗 2(a)：實驗結果(一)	93
表 8、實驗 2(a)：實驗結果(二)	94
表 9、實驗 2(a)：總效益、樹深與總加權效益比較(一)	95
表 10、實驗 2(a)：總效益、樹深與總加權效益比較(二)	95
表 11、實驗 2(a)：總效益、樹深與總加權效益比較(三)	95
表 12、實驗 2(a)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(一)	95
表 13、實驗 2(a)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(二)	96
表 14、實驗 2(a)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(三)	96
表 15、實驗 2(b)：實驗結果(一)	97
表 16、實驗 2(b)：實驗結果(二)	98
表 17、實驗 2(b)：總效益、樹深與總加權效益比較(一)	99
表 18、實驗 2(b)：總效益、樹深與總加權效益比較(二)	99
表 19、實驗 2(b)：總效益、樹深與總加權效益比較(三)	99
表 20、實驗 2(b)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(一)	99
表 21、實驗 2(b)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(二)	99
表 22、實驗 2(b)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(三)	100

第一章、 簡介

近年來，全球天災頻傳，極端氣候、大型地震...等，造成大範圍災害，其規模一次比一次嚴重，如表 1 就是近幾年較著名的天然災害統計[10,28,36]，以最近 2011 年 3 月 11 日發生的日本東北地震為例，在經歷芮氏 9.0 規模地震之後，緊接著 23 公尺高的海嘯和令全世界恐慌的核災，所造成的三種複合式重大災害，令多次參與災區救援的救災人員也為之驚訝，而台灣處於環太平洋地震帶以及西太平洋颱風路徑上，四面環海、地形差異大，頻繁的地震、颱風、土石流和水災...等天然災害，更對台灣造成嚴重的損害，所有這些損害當中，對人們影響最大的即是基礎設施的毀損，尤其是通訊系統的癱瘓影響救災效率甚鉅。本論文旨在提出一個簡單有效的應急通訊系統提供緊急通訊使用。

目前無線通訊已完全融入一般大眾的生活與工作之中，無線通訊系統的成熟，為使用者帶來極大的便利性，但當大規模的地震或強烈颱風等重大天然災害發生時，通訊系統卻常常隨著電力與交通系統的損毀而癱瘓。以莫拉克風災/八八水災為例，許多基地台因建在高處免於被洪水淹沒而結構未損，但沿著道路及橋樑鋪設的電力與通訊線路，卻隨道路橋樑坍塌而損毀，造成行動通訊系統也隨之癱瘓，電力與基地台 Backhaul 線路成為行動通訊網路的弱點。由歷年大型災變中，多數災區內之行動通訊系統全面中斷，即可印證行動通訊系統其實是極為脆弱。由於受到諸多外在因素的牽連，建造強固的基地台與交換機房仍是無濟於事，無法保證通訊系統可用度。國家通訊傳播委員會雖然在各地建置具有衛星通訊能力的強固基地台，但因成本高昂之故，數量遠遠不足，僅能作為官方救災指揮之用，對於廣大地區的受災與救災人員而言，只是杯水車薪。[32,55]

有效運作的通訊系統是災情傳遞、資源調度以及互助協調是否順利的關鍵因素，災民的存活率會隨著時間的推移快速下降，這也是所謂的救援黃金 72 小時，受困的災民在此段時間內會有較高的存活率。除去災難發生當下的求援，災後組織救援也是通訊服務的另一個重點，災區內電力、瓦斯、食物、飲水、禦寒衣物、醫藥等維生系統癱瘓下，倖存人員的維生也是救災的重要任務。因此盡速恢復通訊以輔助救災、求援為刻不容緩的事情，越早恢復通訊就能救援越多災民，因此在災害來臨通訊中斷時，快速的建構一個應急通訊系統供給災區內的災民與救災人員使用，成為一個關鍵性的問題。

應急通訊系統有很多種方法可以建構，本篇論文所探討的應急通訊系統是利用原有行動通訊系統中倖存的連通基地台和斷訊卻沒有損毀的基地台建構一個暫時性的網路，稱為**應急蜂巢式行動通訊網路**(Contingency Cellular Network, CCN)，此種應急通訊系統的主體為兩種基地台：完好維持正常功能可對外連線的稱為**連網台**，功能完整但無法對外進行正常連線的稱**孤立台**。本文旨在探討 CCN 網路的跨網路拓樸規劃以追求最大的救災效益，同時並考量網路通訊的負載與通訊品質。

表 1、近年大型天然災害傷亡損失記錄

事件	日期	規模	傷亡人數統計
Chi-Chi, Taiwan Earthquake	09/21/1999	7.3 Richer Scale	Dead : 2,415 Injured : 11,306
Katrina Hurricane	08/23/2005	Category 3	Dead : 1,836 at least
SiChuan, China Earthquake	05/12/2008	7.9 Richer Scale	Dead : 69,227 Injured : 374,176
L'Aquila, Italy Earthquake	04/06/2009	6.3 Richer Scale	Dead : more than 150 Injured : 1,500
88 Flood, Taiwan	08/08/2009	>2500mm Rainfall within 2 days triggered by Typhoon Morakot	Dead : more than 475
Port-au-Prince,	01/13/2010	7.0 Richter Scale	Dead : more than 230,000

Haiti Earthquake			Affected : 3 millions
Chile Earthquake	02/27/2010	8.8 Richer Scale	Dead : more than 800
QingHai, China Earthquake	04/14/2010	7.1 Richer Scale	Dead : more than 1,706 Injured : 12,135
Christchurch, New Zealand Earthquake	02/22/2011	6.3 Richer Scale	Dead : 145 more than 100 injured and missing
Japan	03/11/2011	9.0 Richer Scale	Dead : 16,079 Missing : 3,499
Turkey Earthquake	10/23/2011	7.3 Richer Scale	Dead : more than 272 Injured : more than 1,300
U.S Hurricane Sandy	10/29/2012	Category 1-2	Dead : 124 50 billion U.S dollars loss

1.1、災區應急通訊系統需求分析

在災害發生時普遍大眾最需要的服務之一是「通訊」(包括災情傳遞、受困人員之求救、救災人員聯繫協調...等),但在大型天然災害下通訊系統卻非常脆弱,現有很多應急通訊系統尚有很大的改進空間。本節試從 921 地震與歷年來的大型天災中歸納出一些救災行動面臨的挑戰經驗,以供應急通訊系統設計之參考 [9,20,25,27,28,32,34,42,51]。

1.1.1、大型天然災害發生時救災行動面臨的挑戰

■ 建築物倒塌,人員受困,亟待救援

看似高大且堅固的建築物在地震襲擊時應聲倒下,有許多民眾因來不及逃生而被困在瓦礫堆下,等待救援。而受困於災難現場的人員,必須在 72 小時內搶救出來,否則生還機會極為微弱。因此災難發生之初,最重要之救難工作乃在集中所有救難資源搶救受困人員,這段時間稱為「黃金 72 小時」。

■ 通訊網路幾乎全面癱瘓

包括固網、行動電話在內的通訊聯絡網路幾乎全面癱瘓。倖存的通訊網路也

因塞滿大量的關懷電話，無法供救災使用。

■ 災區的交通全面癱瘓，外援進入緩不濟急

道路橋樑柔腸寸斷，甚至被大量志願救災車輛塞爆道路。在莫拉克颱風後，受惡劣天候影響，直昇機亦難以接近災區。而 2010 年海地地震中，太子港機場雖逃過一劫，但因機場無法提供返航油料因而飛機無法降落，關閉數天之久。總而言之，災變初期，尤其是黃金 72 小時之內，主要依賴在地的人力物力投入救援，無法太過依賴外界支援。



圖 1、通訊線路與設備於災害中受損

■ 專業救災人員嚴重不足

有組織有訓練的專業救災人員之數量遠遠不足，尤其是災變初期交通系統癱瘓，災區外及國際的專業救難團隊需克服交通阻隔方能進入災區，因此災變初期必須動員大量的在地志願人員投入救難救災。

■ 行政指揮系統失靈

各級行政系統可能癱瘓，導致既有通聯組織亦隨之癱瘓，例如八八水災中，小林村長就不幸罹難，2004 年七二水災中，台中縣和平鄉松鶴派出所為土石流淹沒，完全與外界失聯達數天之久。2010 年海地地震中，政府大樓癱塌，所有部長全部失聯，僅有一個光桿的海地總統獨撐大局，所有行政系統形同癱瘓。

■ 物資不易協調分配，資源嚴重錯置

因通聯系統癱瘓，災情資訊收集不易，在災情資訊紊亂不全的情況下，難以對救災物資作有效且適當的分配，即使分配得宜，如何送達又是另外一個問題。救災物資的錯置，尤其是醫療用品，使得很多亟待救助的受難者無法即時得到所需資源而喪生(例如：海地地震中，就發覺極度缺乏處理外傷必須的抗生素)。

■ 救災人員彼此溝通困難，不易協調

有組織有訓練的專業救災人員之數量遠遠不足，尤其是災變初期，必須動員大量的在地志願人員投入救難救災。而這些志願人員幾乎沒有通訊聯絡工具可協助彼此之間的協調連絡，致使救災效率極低。更有甚者，救災工作因溝通不良而彼此干擾，例如當一個救難團隊在使用高靈敏麥克風探測倒塌建物是否有倖存者時，建物他側卻在乒乒乓乓的進行挖掘工作，而呼嘯而過的救護車聲音也是驚天動地的。

由於通訊聯絡不良，資訊缺乏，資訊無法交流等諸多因素，導致救難工作缺乏效率與救難資源之嚴重錯置，因而喪失了很多可以救人一命的機會，許多生靈因資訊溝通不良而喪失即時獲救之機會，令人扼腕。

1.1.2、固網與行動通訊系統癱瘓原因

行動電話藉由無線電互相通訊，在一般人之普遍認知中，它不受天災的影響，在災害來臨時可作為緊急通訊之用。但事實上卻非如此，商用行動通訊系統其實必須仰賴固定通訊網路，其基地台之後端多利用固網幹線連上核心網路，無線的鏈結只存在於終端使用者(手機)與基地台之間，而從基地台到後端機房仍然是利用固網線路連接。從莫拉克風災(八八水災)及 921 集集大地震的經驗中，我們歸納出影響行動電話可用度的主要因素如下：

- 各種機房或因電力中斷且備用發電機因油料告罄，或因冷卻系統遭強震摧毀，而停止運轉。
- 基地台遭強震摧毀或因電力中斷而癱瘓(備用電源僅能支持四至五小時[56]，而八八水災中 3300 座斷訊的基地台中，約 70%是因為電力中斷而中斷服務)。
- 基地台連接基地台控制器(Base Station Controller)或行動交換機(Mobile Switching Center)的後端固定網路線路(Backhaul)損毀。

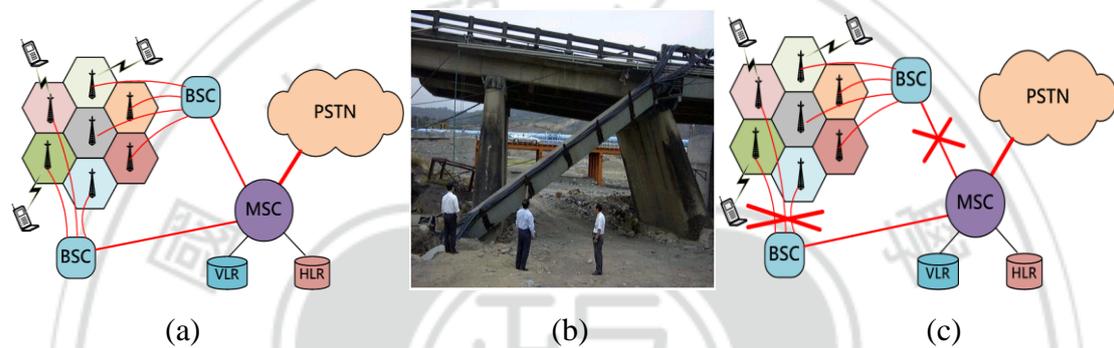


圖 2、行動通訊網路受損主要原因

(a)行動通訊網路架構、(b)固網隨橋斷而斷、(c)行動通訊因後端連線中斷而癱瘓

大部分的電力線路與固網線路為了架設與維修方便，經常是沿著道路橋樑鋪設。而道路橋樑的損毀必將導致電力與通訊線路中斷，如圖 1 所示。而行動通訊系統也常隨之中斷，如圖 2 所示，(a)是行動通訊系統的基本架構，基地台後端必須有固網連線(Backhaul)連到控制器或交換機，(b)是 921 地震中受損的一座橋，我們可以看到很多固網幹線隨著橋斷而斷掉，從(c)可以很清楚的看出即使基地台本身完好無缺，但因後端連線斷掉，而被迫停止運轉。以莫拉克風災/八八水災為例，基地台多建在高處可避免被洪水淹沒，但道路柔腸寸斷，二十餘座大型橋樑遭洪水沖毀，而隨著道路及橋樑鋪設的通訊線路也隨之柔腸寸斷，造成行動通訊系統也隨之癱瘓，電力與基地台 Backhaul 線路成為行動通訊網路的弱點。

由歷年大型災變中多數災區內之行動通訊系統全面中斷，即可印證行動通訊系統其實是極為脆弱，由於受到諸多外在因素的連累，建造強固的基地台與交換

機房仍是無濟於事，無法大幅提升系統可用度。

在沒有行動通訊系統的支援下，救難工作只能靠原始的面對面方式進行溝通，無奈因地形阻隔，交通不便，效率極差，甚至在一棟倒塌大樓兩側之團隊都無法面對面溝通，因而互相干擾救災行動。

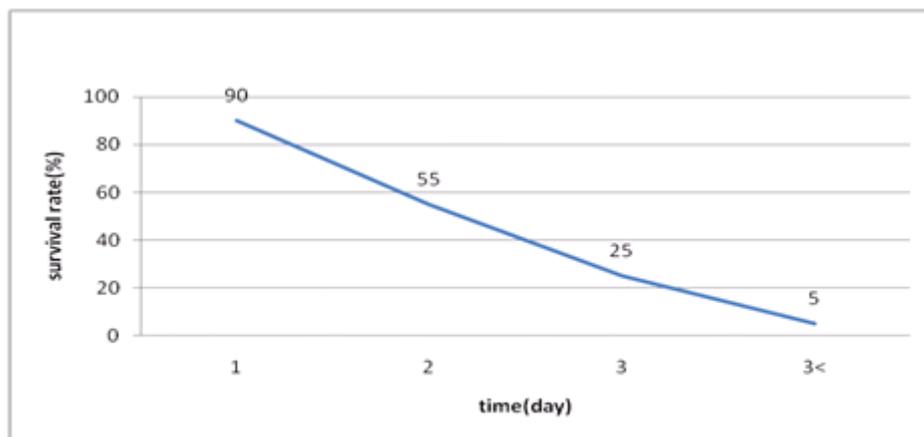
1.1.3、通訊設備修復困難

在災害中，由於交通系統癱瘓，大型修復機具無法進入災區，進行第一時間的搶修，加上技術人力不足，所需資材調度不及等諸多因素，搶修實際毀損的基地台通訊設備，並使災區通訊全面恢復，向來是一項艱鉅的任務。以 921 地震為例，中華電信耗費 15 天，才搶通災區電信網路。在八八水災中，斷訊基地台總數達 3300 餘座，中華電信斷訊基地台達 1800 座，其中 550 座在兩天之後仍無法恢復運轉。換言之，在關鍵的黃金 72 小時內，大量的行動電話將陷於癱瘓，無法及時修復。再觀察近年來各處天然災害的搶救效率，即使如美國、日本這種先進國家也無法在黃金 72 小時內修復大部分的電力及通訊系統。且不談卡翠納颱風摧毀新奧爾良讓美國的緊急救災機關 FEMA (Federal Emergency Management Agency) 備受責難，就連 2011 年一個輕度熱帶氣旋橫掃美東就讓數百萬戶居民斷水斷電達數星期之久。2011 年的日本地震更讓世人大吃一驚，因地震頻仍而對地震之準備號稱世界之最佳的日本，竟然不堪一擊。世人在面對大型天然災害時，其實仍然是脆弱不堪的，通訊設備因為受制於橋樑道路的脆弱，不但容易受損，也不容易快速修復。

1.1.4、大型災害的救災時效

「黃金 72 小時搶救時間(Golden 72 Hours)」，指的是在災難發生後，搶救倖存生命的關鍵救難時機。災後受困的人員會因外傷、失溫及缺乏食物飲水等因素，使得存活機率隨著時間流逝而急速下降。根據統計，在災後 24 小時內獲救的存活

率可高達 90%；在災後 25~36 小時間獲救，存活率銳減為 50%~60%；在災後 36~72 小時間獲救，存活率僅剩 20%~30%；在超過 72 小時後獲救，存活率則剩下 5%~10%，受困人員能倖存的機率就極低了，如圖 3 所示。



資料來源: 百度百科 <http://baike.baidu.com/view/1592635.html>

圖 3、獲救時間與存活率之關係

1.1.5、應急通訊網建置之挑戰與需求

由於時間與資源之限制，災區應急通訊網的建置面對了許多挑戰與特殊需求。在嚴格的時間限制和極端的環境條件之下，應急通訊系統的建置與一般的通訊系統完全不同。

表 2、應急通訊網建置需求

7-ability	Popularity	<ul style="list-style-type: none"> • user friendly • sufficient amount of terminals
	Usability	<ul style="list-style-type: none"> • task original communication services • adequate quality of service • long standing time of terminals • mobility
	Practicability	<ul style="list-style-type: none"> • low development cost • easy acquisition of equipment • construct rapidly and easily
	Capacity	<ul style="list-style-type: none"> • sufficient number of concurrency users • resist the burst of call request
	Sustainability	<ul style="list-style-type: none"> • reliability • fast recovery
	Adaptability	<ul style="list-style-type: none"> • self-adjustment
	Operability	<ul style="list-style-type: none"> • OAM functions

根據我們的親身經歷和觀察，在災區的應急通訊系統應該要能夠迅速被建立和提供緊急的通訊服務。在嚴格的時間限制和極端的環境條件之下，建置應急通訊系統的需求可歸納成七個面向如表 2 所示。普及性和可用性是終端使用者需求。而實際可行性、負載能力、持續性、可調性和維運性則是用來滿足網路管理者的需求。

I. 終端使用者需求

- (1) **普及性(Popularity)**：由於缺少終端設備，許多常見的應急通訊系統，例如衛星通訊系統，群集無線電系統和業餘無線電系統只能用在特殊的小群組。大多數的受災者和志願救災團隊通常無法利用這些通訊系統進行通話。使用者在使用群集無線電系統和業餘無線電系統時，需要經過特殊訓練才能使用，群集無線電系統和業餘無線電系統的普遍性是有限的。易於使用的終端設備的普及性成為一個應急通訊系統的重要需求。其要件有二(a)易於使用。(b)可方便及低價的普及於災區使用者。
- (2) **可用性(Usability)**：由於在災區的極端條件之下，應急通訊系統必須妥善處理所有使用者的各種通訊需求，為了滿足可用性，應急通訊系統應該提供任務導向的通訊服務，並且可以支援移動性的通訊服務和擁有良好的通訊品質。此外，終端設備的待機時間最好能長於一天，避免頻繁的充電。
 - **任務導向的通訊服務(Task Oriented Communication Services)**：包含了普通話模式(POTS)，對講機模式(walkie-talkie)和群組通訊模式(Agency)的服務。因為災難應變工作者需要互相進行通訊，只提供普通的通訊服務是不夠的。在救災團隊之間需要進行通訊時，往往不知通話對方的身份及電話號碼，應急通訊系統應能提供對講機通訊模式以增加救災團隊之間的通訊效率。此外，在進行救災任務時，常需連絡特定任務群組而非對特定個人，例如某一傷患需要外科醫

生治療時，救援人員未必知道特定醫生，此時如有個代表外科醫生的群組通訊代表號，就可讓救援人員直接撥打代表號，即可連絡上任一個外科醫生。

- **適當的通訊品質服務(Adequate Quality of Service)**：救災工作常陷於兵荒馬亂，吵雜無比的環境中，良好的通訊品質可減少通訊連絡的失誤，降低救災任務忙中有錯的機會，以提升救災的效率。反之亦然。
- **長效的終端設備(Long Standing Time of Terminals)**：災區中的電力供應常常中斷，縱使有應急的發電設備，也是小規模居多。而隨身攜帶充電器的使用者為數不多，因而在災區中為終端設備充電極為不易，終端設備待機時間的長短變成為一項重要需求。多年來我們一直致力於應急通訊網路的研究，我們發現在沒有備用電池的情況之下，筆記型電腦的待機時間只有大約 2 至 3 個小時。即使能夠找到電源進行充電，在使用 2 至 3 個小時之後，必須再進行充電。因此，如果能使用長時間的終端設備，提供至少 10-12 小時的使用時間，每天只須充電一次即可應付一整天的救災需求。
- **移動性(Mobility)**：災區中的使用者，一則多在戶外，二則常需移動，因此終端設備必須具備高度移動性。為了支援移動性，應急通訊系統使用無線網路將優於有線網路。由於移動性對大多數的通訊系統來說是不可或缺的，因此，所使用的終端設備需要為可攜帶性的設備。

II. 網路管理者需求

- (3) **實際可行性(Practicability)**：實際可行性是應急通訊系統中的最基本也最首要的需求。首先要考慮的是建置與操作應急通訊網路的可行性。需要符合以下三大特點：低開發及建置成本，建構速度快，設備容易取得

(重型設備可能因道路中斷或地形阻隔而無法運入災區)。

- **低開發成本(Low Development Cost)**：比起正常的通訊系統應急通訊網路不從事營利，而使用應急通訊系統的機會也是備而罕用，導致市場狹小。通訊設備廠商缺乏誘因投資於應急通訊網路的研究發展。因此系統開發成本必須嚴格控制，而盡量使用災區倖存的通訊設備正是降低開發成本的一個重要手段。
- **易於獲取網路設備(Easy Acquisition of Equipment)**：由於災區之交通可能癱瘓，地形可能複雜，使外部援助難以運送進入災區。直升機或空投成為最終運輸工具。因此，設備的大小和重量應盡量縮小。相較於完全由災區外部運入的應急通訊系統，我們設計的應急蜂巢式通訊網路，利用既有的網路設備所建構，其優越性是顯而易見的。
- **建構速度快(Construct Rapidly and Easily)**：受困者的存活率取決於搶救時間。受困者越早獲救，存活率越高。存活率在 24 小時內是 90%，在 25 至 48 小時之間降至 50%，49 至 72 小時只剩 20%，超過 72 小時後，存活率不到 5%。為了挽救更多的生命，應急通訊系統應盡快建構。此外，專業技術人力可能不足，應急通訊系統可能需要由非專業人員協助建造，因此應急通訊系統之建構，應盡量減低對專業技術人力的需求。

- (4) **負載能力(Capacity)**：災區內的通訊需求量與實際承載能力可能存有極大差異，必須有適當的允入控制機制。以汶川地震為例，災區內部通話量為平時的 10 倍；外界至災區為平時的 5 至 6 倍；北京至災區則為平時的 80 倍，由此可知災區的通話量遠較平常高上數倍。應急通訊網路能負荷的通話量遠較正常時期之公眾網路小，難以容納如此大量的通話量，再者應急通訊網路不應支援與救災無關的通話。因此，應急通訊網

路應具有適當的拒絕服務請求的能力，以免爆量的通訊要求造成網路擁塞。

- (5) **持續性(Sustainability)**：既有的通訊網路之搶修通常需時數天至數星期之久，以 921 地震為例，中華電信耗費 15 天，才全面恢復電信網路，因此應急通訊網路在一般的公眾網路恢復之前應穩定的運轉一段時間。

以下是兩個主要性能因素：

- **可靠性 (Reliability)**：在資源許可之下，盡可能提高系統的可靠性，避免頻繁的中斷。
- **快速恢復(Fast Recovery)**：應急通訊網路未必有超高的可靠度，在服務中斷後，應能輕易及快速的修復完成並且持續提供服務。

- (6) **可調性(Adaptability)**：災區中受災情況往往變化莫測，應急通訊系統應具備可調整的能力，在有限的資源下，盡力提供災區通訊服務，避免通訊資源的不當配置影響救災效率。調適方式可為手動或自動，視開發資源而定。

- (7) **維運性(Operability)**：運轉、營運、管理和維護功能稱為 OAM 功能。
- **OAM Functions**：當應急通訊網路因為不明原因損壞時，OAM 必須協助儘快找出原因、排除故障，恢復運轉。OAM 的功能主要是指以下幾個方面：系統維護、數據管理、警告處理、測試管理、話務統計、環境與電源監控、操作權限管理、軟體更新管理。

1.1.6、應急通訊網效能指標

分析以上應急通訊系統需求，我們可以歸納出八項評斷指標：

- I. **使用成本**：廣泛使用此應急通訊系統的成本
- II. **建置難易度**：將此應急通訊系統建置起來的困難度
- III. **設備取得難易度**：將應急通訊系統運送進入災區的難易度

- IV. 終端設備普及率：災區人員具有此應急通訊系統通訊設備的程度
- V. 終端設備操作難易度：災區人員操作此通訊設備的難易度
- VI. 終端設備可移動性：災區人員攜帶通訊設備移動的能力
- VII. 通訊品質：利用此應急通訊系統的通訊品質
- VIII. 系統運轉難易度：應急通訊系統建置起來後維持運轉的難易度

1.2、應急通訊網路簡介

目前常見的應急通訊系統有無線對講機(Walkie-Talkie)、業餘無線電(Amateur radio)、行動衛星通訊、集群通訊系統(Trunking radio)、移動式基地台等。而近年來有許多研究倡議使用 MANET (Mobile Ad Hoc Network) [4,12,43]建構應急通訊系統。這些系統或多或少存在一些缺陷，例如：

行動衛星通訊是利用人造衛星作為中繼站轉發無線電信號，在使用者之間進行的通訊，可不受任何環境限制也不受天災之影響，但它的缺點很明顯在於價格太高因而普及率低，一般人不會持有此種設備。

集群通訊系統具有充沛的調度功能(群組呼叫、優先分級、快速接續...等)，通常為軍、警及專業救難隊等專業單位所擁有，需要專業團隊臨時建構才可使用，因係專用設備，價格昂貴無法供應大量的終端設備。

移動式基地台為國內最常見的應急通訊系統，常被當成是現場緊急通訊的首選方式，但因造價昂貴而數量稀少。

Amateur radio 則是俗稱的業餘無線電，只要頻率相同，電波所及範圍內即使不知道對方身分也可通訊，具有很好的廣播功能，缺點為數量稀少。

MANET 則是具有多跳、自組織、自癒的寬頻無線網路，並不需要有線基礎設施支持，在 MANET 網路中所有節點可隨時加入或離開，只需任意與其中一個節點相連即可，建構快速但穩定度低，也不及行動電話之普及與方便。

Walkie-Talkie 則與上述所提幾種應急通訊系統不一樣，其優點眾多，包括體

積小、重量輕、可供長時間使用、不需事先佈建...等，但也有著現實的問題，在很多國家除專業救難隊以外，幾乎沒有普遍擁有。

需額外設備的應急通訊系統，在災害發生後往往因為道路支離破碎不能直接進入災區，即使進入了也只有少數人可以使用，無法普及到一般災民，因此我們提出了兩種方法解決此問題，第一種為利用 MANET 應急通訊系統，稱為 P2PNet，在大型天然災害發生之初期，可迅速的讓受災人員與救難人員以自有的電腦設備建構簡單的 MANET 模擬 Walkie-Talkie 進行短距離群組通訊，其系統優勢為筆電等設備可就地取材，只需具備基礎電腦知識即可架設使用。第二種是應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network, CCN)，利用現有的行動通訊系統中未損毀但失去電力或連網能力的基地台，以 Wi-Fi 等無線設備互相連線，建立一個臨時網路，供災區的手機用戶使用，其優勢為大量的手機用戶可立即投入救災使用，如圖 4，本論文即是在此基礎(CCN)上進行研究。

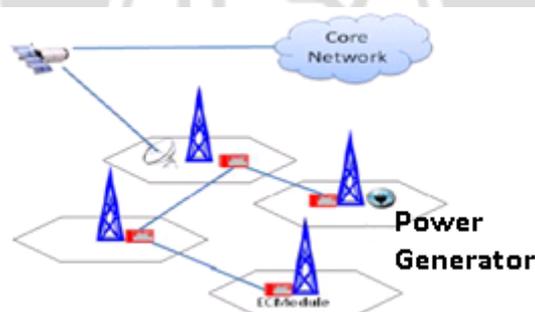


圖 4、CCN 網路

1.3、論文架構

本文共分成六章，第二章介紹現行的 3G 行動網路架構和目前常見的應急通訊系統。第三章說明如何用現行的 3G 行動通訊網路來建構一個應急通訊系統。第四章介紹我們提出之跨網路拓樸設計方法，並針對此應急通訊系統的跨網路拓樸設計的問題，提出合適之模型與演算法。第五章則藉由實驗數據驗證我們的方法可行性。第六章則為結論與未來發展。

第二章、 相關研究

2.1、 第三代行動通訊架構

第三代行動通訊簡稱 3G (3rd-generation)，是指高速數據傳輸的蜂巢式行動通訊技術。3G 技術能夠同時傳送聲音(通話)及數據(電子郵件、即時通訊等)。代表特徵是提供高速數據服務。相對於第一代(1G)類比式行動電話系統與第二代(2G)只具有通話和一些諸如時間、日期等固定格式數據的手機通訊技術規格之 GSM、CDMA 等數位調變式手機，3G 手機是將無線通訊與 Internet 等多媒體傳輸結合的新一代行動通訊系統，主要由 UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) 與 CN (Core Network) 兩部分組成[48]，如圖 5，其中，UTRAN 用於處理所有與 Radio 相關的功能，而 CN 則處理行動通訊系統內的所有語音呼叫和資料傳輸與內外網路間的交換與繞送。

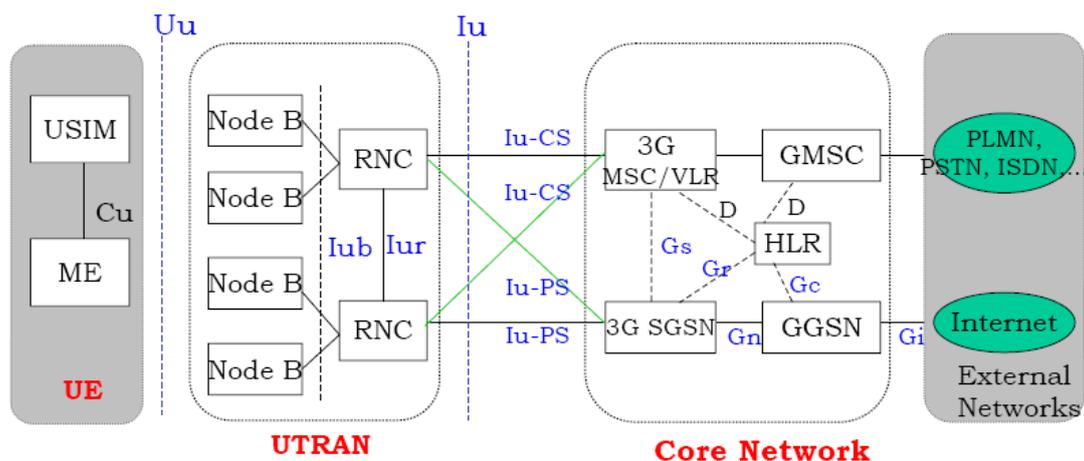


圖 5、System Architecture of 3GPP Release 99

2.1.1、通用行動通訊系統陸地無線接入網 (UTRAN)

UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network)由多個 RNS (Radio Network Sub-system)所組成，每個 RNS 包括一個 RNC 與其數個相連的 Node B，RNC 與 Node B 之間使用 Iub 介面相連，每一個 RNC 透過 Iu-PS 介面與一個 SGSN 相連，並透過 Iu-CS 介面與一個 MSC 相連[17]。

- **RNC (Radio Network Controller)**:無線網路控制器是 3G 網路的一個關鍵部分。它提供 Mobility management、呼叫處理、鏈接管理和切換機制，具體工作為管理用於傳輸用戶數據的無線接入、管理和優化無線網路資源以及無線連結維護，意即 RNC 控制管轄範圍內所有 Node B 的無線電資源，包括無線電頻道的指配、回收與管理，作為 Service access point 提供服務給 Core Network[17]。以台灣而言，一台 RNC 大約控制 50~300 座基地台。
- **Node B**:即是基地台(Base station)，配備收發天線及無線電頻道，提供無線電通道資源，通過 Iub 介面和 RNC 互連，主要處理與 UE (User Equipment) 間 Uu 介面實體層協議。功能有展頻、調變、通道訊號編碼及通道訊號解碼，還包括基頻信號和射頻信號的相互轉換等功能[33]。

2.1.2、核心網路 (Core Network)

核心網路(Core Network)分為 CS-CN (Circuit Switched Core Network)和 PS-CN (Packet Switched Core Network)，由 CS 交換機、PS 路由器、資料庫及長途幹線組成，主要設備存放於電信機房中，包含了 HLR、MSC/VLR、GMSC、SGSN、GGSN 五個部分：[33]

- **HLR (Home Location Register)**:本籍位置記錄器，是一永久性用戶資料庫，保存用戶的基本資料，如 SIM 的卡號、手機號碼和用戶狀況(例如當前的位置、是否開機等)。行動業者所有客戶的 Service profile 都儲存於 HLR，直到

客戶退租為止。

- **MSC (Mobile Switching Center)**：行動電話交換機，負責所管轄服務區內行動客戶的移動管理及呼叫處理。
- **VLR (Visitor Location Register)**：訪客位置記錄器，通常每個 MSC 都有自己專屬的 VLR，以記錄當時正漫遊在其服務區內的行動客戶相關資料，如客戶目前所在位置區、Service profile...等。
- **GMSC (Gateway MSC)**：開口行動電話交換機，提供 CS domain 連接到外界 PSTN (Public Switched Telephone Network)或其他 PLMN (Public Land Mobile Network)的交換機。
- **SGSN (Serving GPRS Support Node)**：負責數據封包的 Mobility management、路由轉發、會話管理、邏輯鏈結管理、加密和輸出等功能。
- **GGSN (Gateway GPRS Support Node)**：提供 PS domain 連接到外界網路的交換機。

2.1.3、3G 網路通訊協定

Before 3GPP release 5：在 3GPP Release 5 [48]之前的 3G 架構下，用戶手機本身會具備自己的 IP 位置，透過 Node B 連線到 RNC 後，RNC 會用自己的 IP 將用戶的封包封裝起來，並且與 SGSN 透過 Iu-PS 連線，然後 SGSN 會再用 Gn/Gp 介面與 GGSN 連線，中間其實就是 Tunnel，一直到 GGSN 以後，才會將原本用戶手機的封包解除封裝送到 Internet，如圖 6。

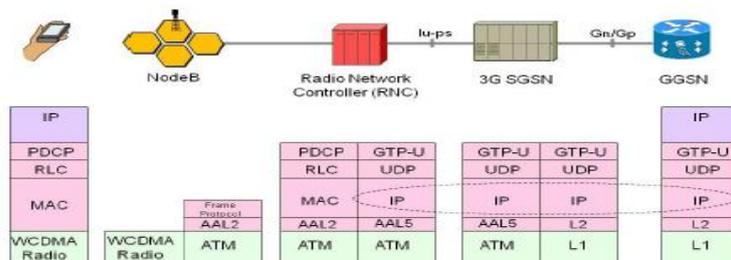


圖 6、3GPP Release 5 架構

3GPP R5 to R7：新的 3GPP R5 到 R7 版本[48]，精簡了網路的架構，首先是 HSDPA 移除了 Drift RNC 元件，並且將 Drift RNC 的功能移到 Node B，再來是修改 SGSN，讓 RNC 可以直接與 GGSN 使用 Tunnel 連線，如圖 7，在 HSPA+ 的版本，又將 RNC 的部分功能移到 Node B 上面。

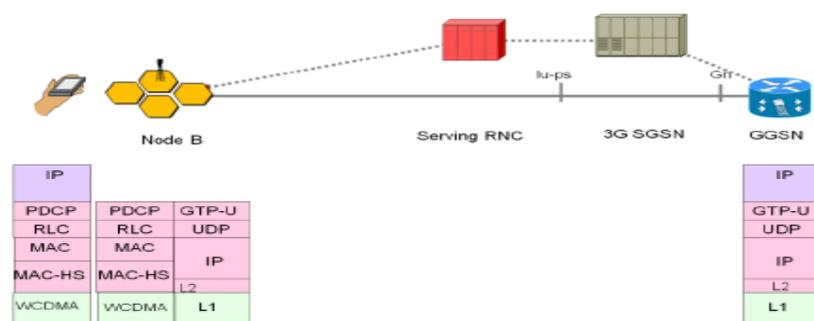


圖 7、3GPP Release 7 架構

2.2、應急通訊系統種類

- 系統使用時機

在災害初期原有通訊系統由於災害發生而無法使用，但災害初期是受困人員存活率最高的時候，快速建置一個應急通訊系統可在此時提供倖存者及救災人員所需的通訊服務，隨著時間的推移，電信公司將會逐步修復原有的行動通訊系統，而應及通訊系統的作用也會慢慢下降直到所有基地台修復完成，如圖 8 所示。

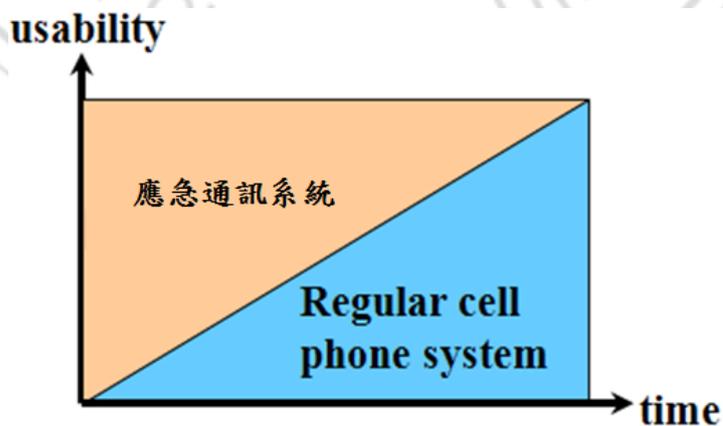


圖 8、應急通訊系統使用時機

我們以 1.1.4 所歸納的需求，檢視分析現有應急通訊系統的適用性。

2.2.1、專用高抗災通信平臺

專用高抗災通信平臺[57,58]為國家通訊傳播委員會於莫拉克風災後，協調地方政府與電信業者共同出資，就偏鄉通訊設施進行改善，於高雄那瑪夏、茂林、桃源、六龜、杉林、鳳山等 6 處，以「消防救災體系與行動通信系統結合」、「整合光纖、微波、衛星鏈路形成多重中繼傳輸備援路由」及「加強電力備援系統」等設計理念完成之應急通訊平臺。其佈建的方法為在災前預先佈建強固機房並於特定基地台佈建衛星、微波等無線通訊設備，以確保政府救災體系緊急通訊順暢。

- 優點
 - 災前即已佈建完成，災難發生時，馬上就可以使用
 - 系統可靠性高
 - 結合行動通信系統與消防救災體系
- 限制
 - 由於成本過高，佈建數量極為有限，無法全面佈建，僅能佈建於少數具高潛在危險的特定區域

2.2.2、無線對講機 (Walkie-Talkie)

無線對講機(俗稱 Walkie-Talkie)是一種手持的雙向無線電收發器，使用免執照的 ISM 頻道，同時間只有一位使用者可以廣播語音訊息(半雙工) [27]。無線對講機不需佈建通訊網路，只要雙方擁有無線對講機即可進行通話。

- 優點
 - 不需佈建通訊網路即可使用
 - 體積小、重量輕，可隨身攜帶
 - 電池充電後可長時間使用
 - 電波所及範圍內即使不知道對方身份、地點也可通訊

- 限制
 - 在世界很多地方普及率低(例如：台灣在八八水災中，政府花了 7/14 天從廠商借得 240/1052 支無線對講機，太少也太慢)
 - 需要簡單學習才能使用(緊急時無經驗之使用者必須在短時間內讀懂說明書，自行學習使用)，尤其是普及率低的地方
 - 沒有優先分級能力

2.2.3、業餘無線電 (Amateur radio)

業餘無線電[10,18]，俗稱火腿(Ham radio)，與無線對講機相似，但通訊的距離較遠。其原理為通過無線電進行訊號傳輸，早期使用長波段，因為長波段能量損失小且能繞過障礙物，但由於長波的天線設備龐大、昂貴、通訊量小，後期使用能藉電離層反射的短波，使得無線電設備價錢大幅降低，一般使用者也有能力使用，因此短波成為業餘愛好者的使用主流。

- 優點
 - 不需佈建通訊網路即可使用
 - 電波所及範圍內即使不知道對方身份、地點亦可大範圍廣播通訊，適合做訊息發佈
- 限制
 - 普及率低，擁有業餘無線電設備的民眾非常稀少
 - 使用困難，需要執照方能操作，但擁有執照的人員數量稀少(在八八水災中，7 天之後第一座業餘無線電台才架設完成)
 - 行動力低

2.2.4、行動衛星通訊 (Satellite mobile phone)

1990 年代數個使用非同步衛星的行動衛星通訊系統被提出，例如 GSM 的衛星版—Motorola 的鉅計劃(Iridium)、IS-95 的衛星版—Qualcomm 的全球通(Globalstar)，主要提供語音以及低速率資料傳輸服務[50]。

為了降低延遲時間，避免通話受到干擾，行動衛星通訊大多使用軌道高度 10,000~20,000km 的中軌道衛星搭配 750~2,000km 的低軌道衛星通訊系統。衛星就像不斷移動的基地台，一般而言，中軌道衛星繞行地球一周約為 6 個小時，而低軌道衛星繞行地球一周則約為 100 分鐘。由於衛星高掛於太空中，不受地震等天災影響，在災害來臨時，成為一個可靠的應急通訊系統，但因其使用頻段較高，易受惡劣天候影響。衛星造價高昂且使用者數量稀少，導致通話費用極高，雖然行動衛星通訊手持設備可以僅操作在衛星通訊模式，但因通話費用因素，一般皆為衛星/地面蜂巢式雙模手持設備，在地面蜂巢式行動通訊系統的服務範圍內，優先使用地面蜂巢式行動通訊系統，否則使用含蓋範圍廣的行動衛星通訊系統，如鉅計劃和全球通[31,50]。

鉅計劃 (Iridium)：鉅計劃為包含 11 個衛星軌道平面，66 顆衛星的行動衛星通訊系統。每顆衛星重 689 公斤，衛星間可以彼此通訊。運作於 2001 年 3 月，提供語音、傳真、資料和 GPS (Global Positioning System)服務，採用分頻多工結合分時多工技術及 QPSK 調變技術。

全球通 (Globalstar)：全球通開始營運於 2000 年春天，為一包含 6 個衛星軌道平面，48 顆衛星的行動衛星通訊系統。全球通每顆衛星重 450 公斤，衛星間彼此無法通訊。提供語音、傳真、資料、GPS 和 paging 服務，使用分碼多工技術和 QPSK 調變技術。

- 優點
 - 覆蓋面廣，通訊距離遠
 - 不受地震等天災、地理條件影響限制
 - 可隨身攜帶
 - 易於實現多點通訊、具有優良的廣播特性
- 限制
 - 價格高昂
 - 普及率非常低
 - 易受氣候影響

2.2.5、專業用集群通訊系統 (Trunking radio)

由早期的專用無線電調度系統逐漸發展形成的，系統中每一個無線設備都會透過一個或多個中繼站來把訊息發散出去，這種通訊系統主要用於對戶外作業的移動用戶提供調度與指揮控制等服務，具有普通無線電通訊的語音、數據等功能外，還具備群組呼叫、優先分級、快速接續等能力[51]。其作法是由中央控制器集中控制和管理系統中的每一個頻段，以動態方式迅速的把空閒頻段分配出去，用戶群會呈現樹狀結構，常用於指揮調度通訊，例如美規的 Project 25[2]以及歐規的 TETRA[1]應急通訊系統。由於需專業人員架設，一般未經訓練的民眾不會使用。因此，主要使用者為軍、警或專業救難團隊。

Project 25 : APCO (Association of Public-safety Communications Officials-international)於 1989 年推動的計劃(簡稱 P25)，制定了相關標準來提供服務以及各廠商互連相容能力(Multi-vendor interoperability)，以求找到符合公共安全與關鍵性任務需求之解決方案，P25 具備支援類比/數位(analog/digital)之中繼集群模式，在小於 200 個使用者時或小規模地方政府受限於預算時才採用類比模式，否則通常採用數位中繼集群模式。

TETRA (Terrestrial Trunking Radio): 又稱 Trans-European Trunking Radio，為專業移動無線電(Professional Mobile Radio, PMR)和雙向收發器(Walkie-Talkie)規範，類似於 P25 為專門設計用於公共安全與關鍵性任務需求之無線電通訊規範，除了以公共安全(Public safety)與關鍵性任務需求之解決方案為考量設計外，也提供給鐵路運輸列車服務和捷運系統無線電通訊服務等大眾交通系統。與 P25 不一樣地方為 TETRA 只提供數位式中繼集群模式。

- 優點

- 通訊網路架設快
- 涵蓋範圍廣
- 可靠性高

- 限制

- 話機數量有限
- 需經專業訓練才會使用
- 適用於特定使用者，主要為軍、警或專業救難團隊
- 因體積、重量過大無法空投，如果交通系統癱瘓，不易運送至災區

2.2.6、移動基地台 (Cell on wheels)

移動基地台實際上就是一個可移動的通訊系統，透過開到現場的車載平台，搭建通訊網路，實際處理現場傳輸來的語音、影像、圖片等數據，實現現場各種不同規格、不同頻段通訊網路的交換，構成統一的應急指揮平台。

由於移動式基地台具有架設速度快、運用靈活、調度方便、自帶電源設備等特點，因此，在大多數天然災害、突發事件和重大事件發生的情況下，應急通訊車通常是現場應急通訊的首選方式之一，但專業設備需專人操作，且成本高昂無法大量佈署，導致接通手機數量有限，並且需要完好交通系統才能進入災區，在大型天然災害中所能負擔的通訊比例不大，並且因為交通可能斷絕，這些設備無

法在第一時間送進災區，延誤救災效率，目前中華電信在台灣北部有 18 台、中部有 11 台、南部有 8 台移動式基地台，相較於數千座癱瘓的基地台，數量遠不敷所需。

- 優點
 - 佈建速度快
 - 擁有行動電話之一般民眾皆可使用
- 限制
 - 造價高昂數量不足，無法大量部署
 - 因體積、重量過大無法空投，如果交通系統癱瘓，不易運送至災區

2.2.7、行動隨意式網路 (MANET)

Ad hoc 網路是一種沒有有線基礎設施支持的移動網路，由具有無線區域網路能力的筆電或平板電腦構成，每個節點皆可移動，並由這些節點構成一個網路，在 Ad hoc 網路中，當兩個移動設備在彼此的連線覆蓋範圍內時，它們可以直接通訊，但是由於移動設備的通訊覆蓋範圍有限，如兩個相距較遠的設備要進行通訊時，須藉由中間節點的轉發才能實現[12,43]。它有以下特點：

- **無控制節點**：所有節點皆可隨時加入或離開
- **容易組織**：不需要固定網路設施支持，能在任何時間、地點快速建構

在我們的先前研究中，提出一個 P2Pnet，利用志願救災人員的筆記型電腦等建構成 MANET 網路平台，再利用 VoIP 技術實現應急通訊系統，稱為 P2Pnet [22,28,29,30]，可以在沒有連接 Internet、沒有伺服器的情況下支援緊急的通訊與資訊運用[27]。

P2Pnet 依照傳統網路分層的概念，在網路層與傳輸層之間加入一個名為「網路服務層」的中介層，以完成 P2Pnet 所需功能。在實體層與網路層中，P2Pnet 將會試圖利用所有可運用的資源，包含 WiMAX，Mesh network 與 VANET 等，

機會網路(Opportunistic network)的技術將會把各個獨立的 P2Pnet 整合成為一個互通的網路，在此情況下，網路節點之間可以將封包廣播到其鄰近的節點，在短時間內建立可用的通訊管道，以提供災區作為初期的緊急通訊之用。
[3,22,26,28,29,30,39,40]

這個系統可以提供部分的救災人員使用，但是仍有未足之處。一是可以支援的人數僅限於擁有筆記型電腦的人，遠不敷所需，而擁有行動電話手機的人數遠高於此，幾乎人人攜帶行動電話，二是 P2Pnet 系統仍須一定的專業知識才能安裝並操作本系統，三是筆電內建的 Wi-Fi 的通訊距離較短，雖經過 Multi-hop 轉接，能支援順暢通話的 VoIP 仍然不能及遠。

- 優點
 - 可以使用災區內志願救災人員的筆電等設備就地取材來建構，節省大量經費
 - 不受交通系統癱瘓之影響，就地取材，立即建構，在第一時間投入救災
- 限制
 - 使用者必須具備建置系統的技術知識，並非一般使用者可以使用
 - 具通話品質的 VoIP 之有效距離極短，有待克服
 - 尚在實驗階段，並無成熟產品，尚須繁複的設定方能使用

2.2.8、過去應急通訊系統相關研究

- Autonomous Networked Robots for the Establishment of Wireless Communication in Uncertain Emergency Response Scenarios [43]：本篇主要探討災害發生後，利用自主機器人在災區內建立 Wireless ad hoc network，使受困的災民能和外界通訊。作者將事先預估的人群分布資訊搭配分散式演算法運行於機器人上，並藉由最小生成樹(Minimum spanning tree)演算法來改進服務範圍重疊之缺點，當機器人之數量較少時使用第一種演算法較為合適，

若該區的頻寬需求較大時，則使用第二種演算法較為合適。

- Autonomous Community Construction Technology for Timely Transmitting Emergency Information [46]: 本篇主要探討 Wireless sensor network 在災害發生時的相關應用，目前 Wireless sensor network 已被廣泛應用於應急管理體系 (EMS)。由於一般即時發送緊急訊息的系統均使用集中式的管理，並不適合救災情況會隨時變動的災區使用，因此，作者提出利用 Autonomous Decentralized System (ADS)的方式在災區傳送即時訊息，稱為 Autonomous Community Construction Technology。最後經由模擬可知，作者所提出的方法非常適合在災區傳送即時訊息。
- An Integrated Communication-Computing Solution in Emergency Management [6]: 本篇作者在多年來致力於緊急情況和危機管理系統之研究，在本文中，作者藉由 Multiple Parallel 的模型來整合網路層(Network layer)和網路應用層(Application layer)，在不同層的節點可以依據其他節點所給予的資訊來選擇最適當的網路，作者期望能在災害發生時，建立一個較穩定的異質通訊網路(Heterogeneous meshed communication system)。
- Computational Public Safety in Emergency Management Communications[37]: 本篇主要探討應急管理系統中的各種不同類型之網路，作者討論了各種無線網路的通訊方案，並分析其使用的可行性。例如，傳播延遲，封包傳遞率和傳輸率。針對 WiMAX、Xbee、藍芽和 Wi-Fi 等環境進行測試，作者發現 Wi-Fi 是目前應急管理最適合的網路環境，其網路的傳輸速率和涵蓋範圍都優於其他環境。
- Ad Hoc Communications for Emergency Conditions [12]: 本篇主要探討在災區的通訊方式，作者提出利用智慧型手機作為節點，並透過 Wi-Fi 的方式建立起 Ad hoc 網路進行通訊。整體架構包括廣播和路由協議，其主要的方式為，將訊號向間隔 120 度角的節點進行廣播並建立起網路拓樸，在緊急情況之下，

即可以架設短距離的 Ad hoc 網路供通訊使用。

- Taiwan Earthquake Event Report, Risk Management Solutions [10]: 本篇主要探討在 1999 年 9 月 21 日發生於台灣的一個大地震，集集(chi-chi)大地震，作者將此次地震所造成的相關災害透過照片和圖表等數據來說明，其中包括許多交通建設的損壞、房屋倒塌、電力系統中斷和基礎設施損毀...等，並於本文各章節中探究其原因，提出適當的建議，以供相關單位可針對目前缺失的部分進行補強，減少人員的傷亡和財務的損失。
- Improving Disaster Management [44]: 本篇主要探討在災區的訊息傳遞方式，作者認為有效的訊息傳遞在災害發生時是非常重要的，無論是災情的傳遞或是受困的災民都急需訊息傳遞的需求。因此，學者們制定了一套災害管理系統，利用手機當作節點來傳遞訊息，如此一來，當災害發生時，即可迅速的將訊息透過節點和節點之間的 relay 傳送至目的地。
- A Disaster Information System by Ballooned Wireless Ad Hoc Network [40]: 本篇主要在探討如何在通訊網路全面中斷的情況下，建構一個可以使用的網路環境。作者將無線傳輸設備綁在多個氫氣球上，在距離地面約 40m~80m 的空中建立起 Ad hoc 網路，恢復某一特定地區的網路。作者於某一校園進行實際測試，並透過一中央伺服器(WIDIS)將該區的資訊與外界相連。
- Construction of Wireless Network for Information Communication for a Disaster-affected Island [45]: 本篇作者主要探討災害發生後，海底線路損毀，造成大陸本島與其相鄰小島之間的通訊中斷，並提出相關的應對方法。研究團隊將無線發射器與大範圍指向性天線架設在船隻上，利用海上的船隻當作訊號傳送的中繼節點，將大陸本島的網路訊號透過無線傳輸的方式傳送到相鄰的小島上，藉此恢復陸地與小島的通訊。
- Network Topology Planning for Contingency Cellular Network[19]: 本篇主要探討災害發生後，災區通訊網路基礎設施常因災害遭受嚴重損毀，無法正常運

作，在缺乏通訊系統的支援下，大大提高救援的困難度。作者提出一個可快速恢復特定區域通訊服務的網路，並為其設計通訊的拓樸結構，不但將通訊品質納入考量，還考慮拓樸結構中的流量負載，以避免建立通訊流量過度集中及訊號衰減過大的拓樸。文末，提供數個演算法，用以建立應急蜂巢式行動網路拓樸。

2.2.9、應急通訊系統綜合比較

表 3 以應急通訊系統八項評斷指標進行優劣分析，沒有任何一種應急通訊系統是完美無缺的，以簡單易行的 Walkie-Talkie 而言，在很多地區有極高的普及率(例如：美國)，但在台灣其普及率極低，就無法在災害發生時投入應用，畢竟一般民眾不願為了機率極低的大型天災而隨時隨地攜帶手機以外的通訊設備。其他幾種通訊系統或多或少都有缺陷，無法支援大量志願救災人員及災民的通訊需求。

而近年來的很多研究主要在利用隨意網路或者異質網路來建構一個 MANET 網路以支援應急通訊，這些研究也都面臨一些客觀環境上的問題，我們設計實驗過的 P2Pnet，當距離超過 25m 時，封包將會大量遺失，VoIP 的語音品質大受影響，這種系統所能發揮的功效還是非常有限，如果有一個系統能快速方便的讓民眾的手機恢復部分通訊功能，例如在基地台的範圍內網內互打，或當成無線對講機使用，將可以對救災工作提供更大的方便。再者，在資通傳資源極為有限的情況之下，我們應該盡可能利用所有可利用的資源投入救災工作。因此，設法讓斷訊手機恢復部分通訊功能成為一個值得研究的問題。我們所提出的應急蜂巢式行動通訊網路可以更有效的支援大規模的災區內行動電話用戶。

表 3、應急通訊系統比較

	使用 成本	建構難 易度	設備取得 難易度	終端設備 普及率	終端設備操 作難易度	終端設備 移動性	通訊 品質	運轉難 易度
Walkie-Talkie	低	不需建構	易	視地區 而定	需簡單學習	高	中	無
Amateur radio	中	需專業人士 架構	易	低	需專業執照	低	中	無
行動衛星通訊	極高	既存	易	低	易	高	中	無
集群通訊系統	高 (量少)	簡單	難(需道路 運送)	低	需簡單學習	高	高	中
移動式基地台	高 (量少)	簡單	難(需道路 運送)	高	易	高	高	中
MANET	低	需專業安 裝設定	就地取材	中	易	中	低	中
CCN 應急通 訊系統	低	中	重量輕 可空運	高	易	高	高	中

2.3、相關演算法

2.3.1、精確解法 (Exact Algorithm)

又稱為最佳解法，透過嚴謹的數學模型或電腦數據結構規劃，利用數學法則或數據結構搜尋的方式求得問題的解。使用此演算法時，須要先將問題中的資料數據化，並透過相關轉換將其轉換成符合數學表達式子的因子來供運算式使用，當條件都滿足時，即可經由反覆的計算來獲得最佳解。其最大的缺點是反覆的運算過程中，所需要的運算時間會因為數值的累積而越來越多，因此，在運算因子基數龐大的問題之中並不適用。此種解法通常用來解決非 NP 難度的問題。常見的精確解法類型如下：

分枝界限法 (Branch and Bound)

以系統化的方式對有限制條件的問題進行求解，將原來的問題分枝為許多的子問題並針對子問題分別進行求解，在求解的過程中，每個子問題的解若超出可行解的限制範圍時，則不再進行子問題的分枝。如此一來，即減少了搜尋範圍，重複進行直到找出可行解為止。雖然設計出來的演算法其時間複雜度會比貪婪演算法高，但保證能夠求出問題的最佳解。其步驟如下所述：[5]

1. 將目前最佳解的值設為與問題的目標解相反(若問題的目標為求取最小化的解，則設定目前最佳解的值為無窮大)。
2. 從限制範圍之外的節點之中挑選出一個節點，由此節點的下一階層中，分枝出新的節點。
3. 對新分枝出來的所有節點進行上、下限值的計算。
4. 對所有節點進行限制條件的測試，判斷此節點的值是否優於目前最佳解，若沒有，則此節點不再進行分枝。

5. 是否存在尚未被限制的節點，若有，則執行步驟二，若無尚未被限制的節點，則演算法結束，所求之解即為最佳解。

整數規劃法 (Integer Programming)

整數規劃法是一種在求算的過程中，限制變數必須是整數的線性或非線性規劃問題，將問題表示成目標方程式及限制式進行求解。此演算法的複雜度會隨著限制式的增加而提高。

非線性的整數規劃問題可分為線性和整數兩個部分，在線性規劃問題之中，所求出的最佳解可能是小數或分數，此時，只要把所求得的非整數解四捨五入即可。在整數規劃問題中，限制所有變數為整數，稱為純整數規劃法；若只限制部分的變數為整數，則稱為混合整數規劃法；若所有變數限於 0 或 1，則稱為 01 規劃。[23]

動態規劃法 (Dynamic Programming)

動態規劃法將原來的問題分解為許多的子問題並針對子問題分別進行求解，將所求得的子問題的解儲存起來，藉由許多子問題的解來得到原問題的解。如此一來，演算法在執行時即可避免大量的重複運算，節省時間。適合使用動態規劃法求解的問題必須滿足以下性質：[47]

1. 最佳化原理：意旨一個最佳策略的子策略也會是最佳的。
2. 無後向性：某一階段的狀態之下一狀態不受其之前狀態所影響。
3. 子問題的重疊性：將原問題分解為許多子問題求解，如此一來，演算法在執行時可避免大量的重複運算，節省時間。

2.3.2、後啟發式演算法 (Meta-heuristics)

後啟發式演算法(Meta-heuristics)是一種目前新興的最佳化演算法，其概念經常藉由觀察自然界的變化所獲得，此類的演算法在求算時具有彈性，可針對許多不同種類問題進行求解，不但演算過程簡單易懂、求解的效率也非常高，是目前許多演算法之中非常重要的方法之一。

常見的隨機型演算法若以粒子數量進行區分，可分為兩類，一是單粒子型的演算法，通常較為簡單快速，爬山演算法、禁忌搜尋法、模擬退火法，皆為單粒子型演算法的經典解法。另一類則為多粒子型的演算法，遺傳演算法、粒子群演算法、蟻群演算法，皆為多粒子型演算法的經典解法。單粒子演算通常較簡單且執行速度快，但在求解時，若較佳解的分布區域較廣，時常會導致陷入局部最佳解的情況，而多粒子演算法擁有粒子隨機分散的優點，在求解時，較容易找到全域最佳解，但由於實作上相對複雜，往往導致演算時間過長。

單粒子型的隨機演算法：

爬山演算法 (Hill-Climbing Algorithm) (HC)

屬於單粒子型的隨機演算法，擁有實作容易、執行速度快的優點。因此，時常被用來跟其它最佳化演算法進行比較。但在演算法執行時，只會和鄰近的點比較，導致陷入局部最佳解的情況。因此無法找到更好的解。

禁忌搜尋法 (Tabu Search) (TS)

是一種用來跳出局部最佳解的搜尋演算法，利用禁忌串列的結構 (Tabu List)，將前幾次求算時所求出的結果記錄下來，以避免重複運算的情況，禁忌串列的結構越大則越不容易陷入區域最佳解。禁忌搜尋法並沒有最佳的參數設定，必須根據問題的複雜程度來決定。其組成要素如下：[21]

- 鄰近搜尋(neighborhood search)：尚未滿足停止條件時，將目前的所有解當中具有先後順序的粒子彼此進行位置交換，在每次的演算過程中，把所有鄰近解之中最佳的解作為新的解。若此解優於目前的最佳解，則取代成為目前的最佳解。
- 禁忌名單(tabu list)：為一個限制變化的儲存架構，將鄰近搜尋過程中的解之變化紀錄下來。禁忌串列的結構越大則越不容易陷入區域最佳解，但所需的記憶體儲存空間也相對增加。
- 解禁規則(aspiration rule)：藉由此規則可將記錄在禁忌名單中的變化移除。
- 停止條件(stopping criterion)：演算過程中，若搜尋達到此條件則演算法結束，並將此時的解作為最終解。

模擬退火法 (Simulated Annealing) (SA)

是一種隨機性的最佳化演算法，此演算法針對物質在結晶之後的退火過程進行模擬，用粒子的結晶狀態來表示問題的解空間。首先快速求得一個初始解，此解經過變化後會生成一個新的解，若此新解優於初始解時，將其取而代之；否則，根據當時的溫度參數及該解變壞的程度來決定此解是否能被接受。演算法利用溫度參數的機制有機會跳脫局部最佳解，隨著溫度逐步的下降，接受壞的新解之機會也會減少，當達到一定的溫度後，演算法結束，並將此時的解作為最終解。[38]

多粒子型的隨機演算法：

遺傳演算法(Genetic Algorithm) (GA)

此演算法模擬生物學家達爾文的自然淘汰法則和遺傳選擇的生物進化過程學說。利用隨機化的技術對群體中的所有個體進行編碼，演算法中的過程包括，選擇、交叉和變異、參數編碼、初始群體的設定等。[11,35]

遺傳演算法的基本原理如下：

1. 選擇(Selection)：從群體中選擇出較能適應整體環境的個體並繁殖下一代。
如此一來，可將較佳的解遺傳至下一代。
2. 交叉(Crossover)：從群體中選擇出較能適應整體環境的個體並針對兩個不同的個體進行基因的交換，產生出新的個體。
3. 變異(Mutation)：針對選中的個體進行某些基因的轉化。例如，在串列 c_i 中，如果某個位置的基因為 1，當產生變異時，將其改為 0。

粒子群演算法 (Particle Swarm Optimization) (PSO)

是一種透過模擬鳥類群體覓食行為的多粒子隨機演算法。在此演算法中，將鳥比喻為粒子，鳥群即為粒子群。在覓食的過程中，粒子們會追隨目前的最佳粒子來搜尋覓食的地點，鳥類們藉由群體之間的互相溝通，可得知更佳的覓食地點，所有的鳥群皆會自行飛往最佳的覓食地點覓食。粒子透過體極值(pBest)、全局極值(gBest)來更新自己目前的位置。[13,24]

粒子根據以下的公式來更新自己的速度和位置：

$$v[] = v[] + c1 * rand * (pbest[] - present[]) + c2 * rand * (gbest[] - present[]) \dots \dots (1)$$

$$present[] = present[] + v[] \dots \dots \dots (2)$$

- $v[]$ ：代表粒子飛行的速度。
- $present[]$ ：代表粒子目前的所在位置。
- $pbest[]$ ：代表每一個粒子到目前為止的最佳位置。
- $gbest[]$ ：代表所有的粒子到目前為止的最佳位置。
- $rand$ ：介於 0 至 1 之間的隨機常數。

- c_1 、 c_2 ：代表環境比例因數，其值受族群數量不同所影響，通常 $c_1 = c_2 = 2$ 。

蟻群演算法 (Ant Colony Optimization) (ACO)

是一種透過模仿螞蟻尋找食物的多粒子隨機演算法。在自然界中的螞蟻並沒有視覺，當一隻螞蟻出外覓食的時候，為了確保可以順利回到原來的巢穴，在覓食的過程中，會沿途分泌一種稱為費洛蒙的化學物質作為返回原來巢穴的依據。此演算法主要針對每一條覓食路徑的費洛蒙多寡進行選擇，若需要較長的時間才能返回巢穴，則會造成費洛蒙的揮發；下一次螞蟻選擇覓食路徑時，則會挑選費洛蒙較多的路徑進行覓食，最後即會找到一條最佳的覓食路徑。

2.3.3、評論

由於上述的精確解法與後啟發式演算法複雜度過高，無法滿足本研究要求能快速得出相近於最佳解的需求。雖然藉由後啟發式演算法所求出的解能成為本問題在求解時的一個指引，但我們卻無法驗證此指引是否存在，而在無法透過大量模擬來驗證的情況之下，證明此種解法之正確性是非常困難的，因此我們捨棄這幾種求解的方法，而採用求解速度較快的貪婪式演算法，並掌握後啟發式演算法中的精神，對於本問題進行求解。

2.4、生成樹演算法

2.4.1、最小生成樹 Minimum Spanning Tree (MST)

最小成本展開樹，Minimum Spanning Tree (MST)，為圖論中的一個經典問題[8]。給定一個連通且具有權重的無向圖，生成樹意指從該圖上分離出一棵包含圖上所有節點的樹狀結構，便是該圖的生成樹。一個圖可能會有許多不同的生成樹，而該圖所有生成樹中，權重值總和最小的生成樹，即為最小生成樹。以貪婪法則為設計的 Prim's Algorithm 及 Kruskal's Algorithm 是尋找最小生成樹的兩個經典演算法[8]。

2.4.2、最大生成樹 Maximum Spanning Tree (MaxST)

最大生成樹，Maximum Spanning Tree (MaxST)，是指該圖所有生成樹中，權重值總和最大者。雖然與最小生成樹所求之生成樹的定義不同，但經由演算法轉換後，最大生成樹仍可使用最小生成樹演算法求解，轉換步驟如下：

1. 將給定的無向圖中所有節點的權重值取負值
2. 執行演算法求取該圖的最小生成樹
3. 將最小生成樹上所有節點的權重值取負值，轉換回原始給定的初始值
4. 所求得之生成樹即為最大生成樹

經由上述的步驟，我們利用最小生成樹的演算法，只需經過多項式時間 (Polynomial time) 的轉換演算法，即可求得最大生成樹[41]。

2.4.3、K-Minimum Spanning Tree (K-MST)

該圖的所有生成樹中，權重值總和最小且只含有 k 個點的生成樹，即為 K-Minimum Spanning Tree[7]，其中 $k \leq n$ 。K-MST 為 NP 難度的問題，當圖中的

節點具有權重時，稱為 Node-Weighted K-MST 問題，為 NP-Completeness 問題[14]；當圖中的邊具有權重定時，稱為 Edge-Weighted K-MST 問題，為 NP-hardness 問題[15]。

2.4.4、 K-Maximum Spanning Tree (K-MaxST)

該圖的所有生成樹中，權重值總和最大且只含有 k 個點的生成樹，即為 K-Maximum Spanning Tree，其中 $k \leq n$ 。由 2.4.2 節所述之最小和最大生成樹的轉換步驟，K-Maximum Spanning Tree 亦可以在多項式時間(polynomial time)內，由 K-Minimum Spanning Tree 演算法轉換所求得[41]。本研究所求的 CCN Forwarding Tree 掌握了 K-Maximum Spanning Tree 演算法的精神進行求解。

第三章、 應急蜂巢式行動通訊網路 (CCN)

應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network, CCN)，以下簡稱 CCN 網路。CCN 網路的建置目的是在大型災害發生後的交通及通訊尚未修復之緊急黃金 72 小時救援時期，提供即刻臨時性的通訊。CCN 網路建置於原 2G、3G 蜂巢式行動通訊網路之上，係利用在災害中服務中斷但結構完好的行動通訊網路基地台，藉由臨時供應的電力，恢復其運轉，並藉由無線通訊設備[28]連接鄰近的基地台，再藉由點對點(Hop-by-hop)方式遞送訊號至有對外連線能力之基地台或通訊節點(如衛星通訊裝置、移動基地台等)，形成一臨時性的通訊網路，使災區人員能藉由 CCN 網路利用手機進行通訊，降低災區的通訊阻礙，進而提升救災效率。

CCN 網路利用現有的 2G、3G 蜂巢式行動通訊網路建構，由於手機、平板電腦等行動裝置在現今社會中十分普及，使用者不需要持有額外的設備即可加入 CCN 網路進行通訊，且在大型災害中，基地台運作停擺多肇因於停斷電及後端線路(Backhaul)的毀損，大部分的斷訊基地台，其實本身並無損壞，若可直接利用這些既有的基地台設備，則 CCN 網路的建置成本可大幅降低。再者，蜂巢式行動通訊網路的基地台分佈拓樸，在建置時期即經過完善的設計，不但設置的地理位置經過測量規劃，而且多設置於高處，訊號良好、無 Line-of-sight 問題，故在緊急時期，若可直接使用蜂巢式行動通訊網路的基地台，則不須花費額外的人力及時間選擇 CCN 網路的無線電站台架設地點，可以快速佈建。另外，建置 CCN 網路所需的額外設備(應急修復包)具有可事前儲備、輕量等優點，當災害來臨時，可直接由災區內部供應或由直升機空投取得，使得系統建置更為容易。

如圖 9 所示，CCN 利用無線通訊設備連結斷訊的基地台群，並將訊號遞送至具備與後端核心網路通訊能力之基地台，藉此使斷訊基地台回復通訊。

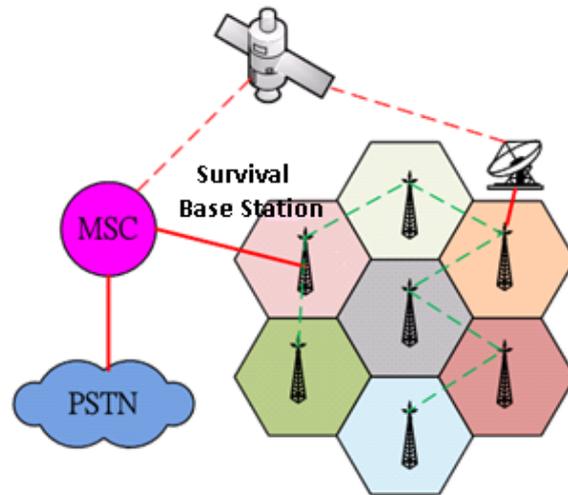


圖 9、CCN 網路架構

- **CCN 可行性分析：**

我們利用原有基地台建構應急通訊系統的方式具有下列幾項優勢：

- I. 一般民眾逃難時，多半攜帶手機，如能救活基地台，讓受困與救災人員立即恢復通訊能力，效益極大。
- II. 重覆使用原有行動通訊基地台，大幅降低成本且涵蓋範圍廣。
- III. 這些基地台都已在災區內，不會因為交通因素導致設備因道路、橋梁的中斷無法進入災區，延誤建構應急通訊系統的時間。
- IV. 額外設備(應急修復包)重量極輕，可以用直升機空運或空投。
- V. 基地台的拓樸，多半經過精心設計，地點絕佳，不需耗時費力選擇無線電基站地點。
- VI. 基地台之間距離不遠，且都在高處，不虞視線受阻，容易用簡單的無線電設備互連。
- VII. 手機普及率非常高，使用者可直接用既有手機不需改裝即可通訊，且使用者不需訓練，只要會使用原有手機即可使用(但通訊功能僅限於救災使用)。

3.1、系統架構

我們先前的研究[27,28,54]發覺大部分斷訊基地台之結構完整，但因停斷電或後端線路毀損使其無法提供正常服務。因此提出利用空投或直昇機等方式提供應急修復包(Contingency Recovery Package, CRP, 可儲備於國家防救災中心或行動電話公司)，修復包內含發電機、燃油、無線通訊...等設備，藉由這些基本設備，使基地台能維持基本運轉，基地台再利用無線通訊設備以跳接方式互連，回復與核心網路之間的連線，使其能連上後端核心網路，恢復部分通訊功能。應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network)架構如圖 9 所示。

我們將基地台依其對外通訊的連線能力，定義如下：

- **連網台(Survival base station)**：與後端核心網路正常通訊，傳遞資料並持續提供服務之基地台，稱為連網台，如圖 10。連網台的構成要件為其基地台本身完好或配有衛星等通訊設備，使其具有與後端核心網路通訊之能力。

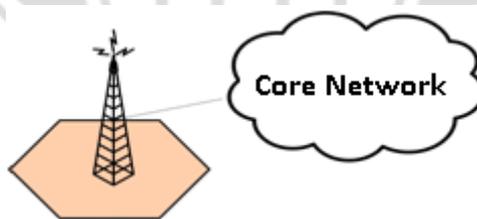


圖 10、連網台

- **孤立台(Isolated base station)**：無法與後端核心網路通訊，造成通訊服務提供中斷，但基地台設備本身並無毀損之基地台，稱為孤立台，如圖 11。其形成孤立的原因可能為電力中斷、實體對外線路損毀所導致。

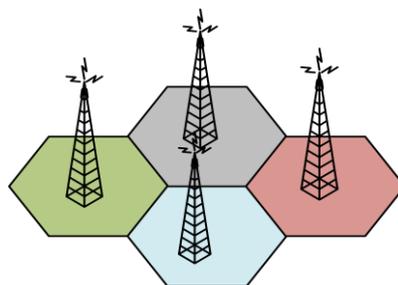


圖 11、孤立台

3.1.1、CCN 連網方式

當兩基地台彼此相鄰，可用無線通訊方式連線互相交換資料時，這兩基地台互為彼此的鄰台。

CCN 網路即是在孤立台上佈建簡易的輔助設備「應急修復包(CRP)」，使孤立台利用鄰台連結到連網台，由於連網台的功能沒有受損，即可透過連網台連線到後端核心網路，在 2G 系統為 BSC (Base Station Controller)及 MSC (Mobile Switching Center)，而在 3G 系統則為 RNC (Radio Network Controller)及 MSC、SGSN (Serving GPRS Support Node)等，基地台必須與它們建立連線才可交換信令(Signaling)與資料(Data)提供電信服務，如圖 12。CCN 將利用各種無線連線方式[37]與鄰台相連，鄰台之間將會不斷相連擴展，形成一個全新的網路。CCN 通訊模式如圖 13。

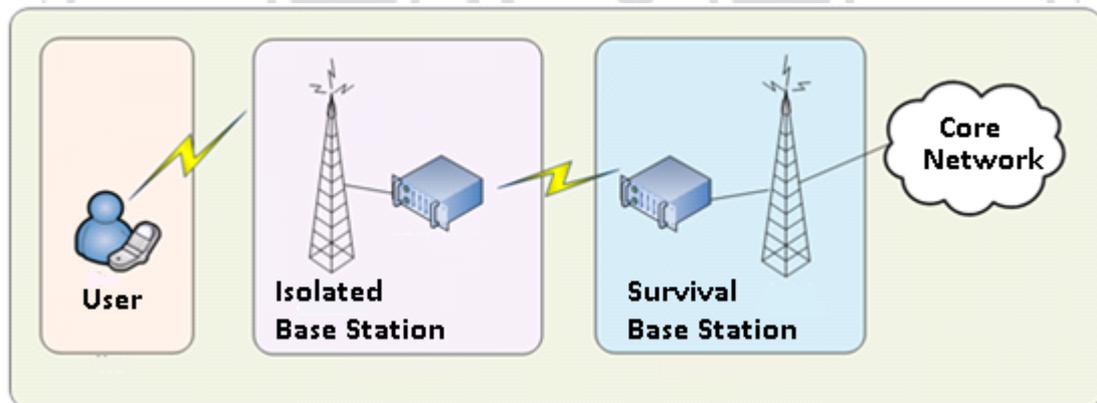


圖 12、CCN 基地台間之連線

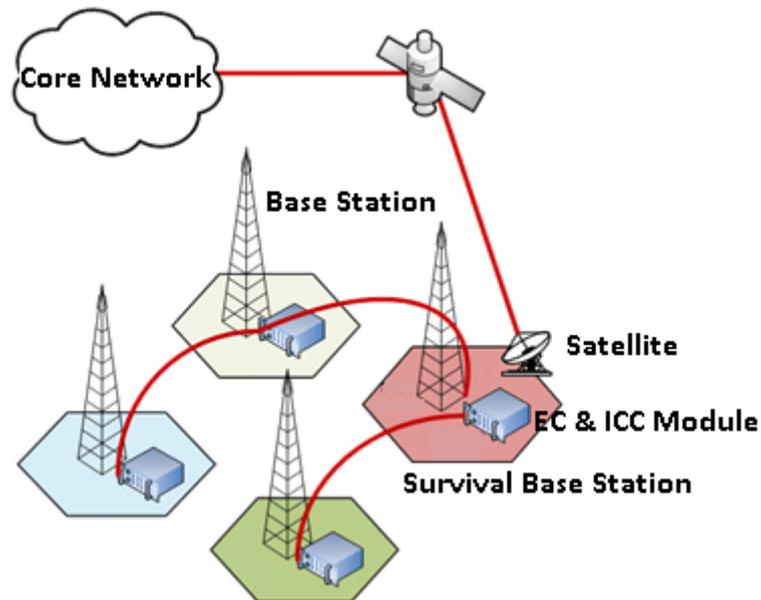


圖 13、孤立台藉 CCN 連線連上核心網路

- **轉送拓樸(Forwarding Tree)：**

災區基地台可能失去電力供應或 Backhaul 中斷而無法與後端核心網路直接連上，CCN 透過無線電對講機連接相鄰的孤立台，再經多重跳接的方式連結到連網台，由於連網台的功能沒有受損，即可透過連網台連線到後端核心網路。

為了簡單起見，CCN 採用樹狀轉送拓樸，其根節點為連網台，其餘節點為孤立台。由於一個 CCN 網路對外的頻寬極為有限，如果災區有多個連網台或災區範圍太大，可將災區切割成多個 CCN 網路拓樸，除保障通訊品質外，也避免當災區面積太大，話務須經多次轉送浪費太多頻道資源，建議每個 CCN 網路的轉送拓樸深度控制在 3~5 hop 之內。

3.1.2、系統元件

CCN 之建構需要在各孤立台附加額外設備，所需的元件為發電機、燃油、無線通訊設備，部分則需衛星通訊設備。平時包裝成「應急修復包(Contingency Recovery Package)」，如圖 14，儲存於國家救災單位，於災害發生時運送至災區建構 CCN。相關元件介紹如下：

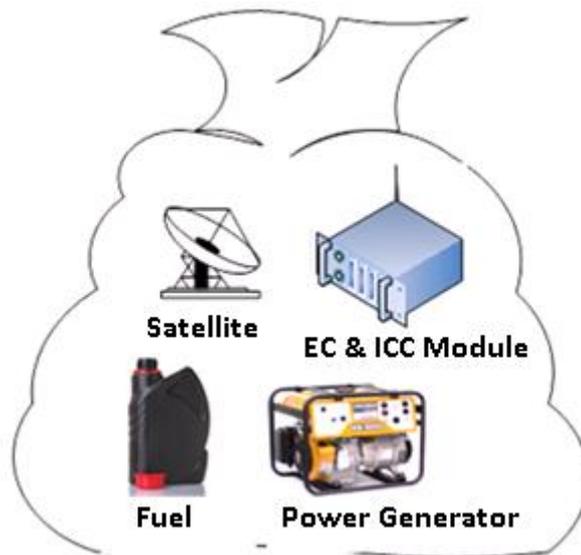


圖 14、CCN 應急修復包(CRP)

- **Power Module**：災區因為災害的發生，基礎建設遭到毀損，無法提供災區基地台運轉所需的電源，雖然基地台備有備用電源，但一般的基地台備用電源僅能維持一至數小時，不足以支撐到災區電力系統復原(如前所述，八八水災中 3300 座斷訊的基地台中，約 70% 是因為電力中斷而斷訊)，因此能讓基地台持續運轉的小型輕便發電機及燃油為很重要的元件之一。
- **Inter-Cell Communication Module (ICC Module)**：孤立台為了要與連網台相連，必須透過與鄰台的多重跳接方式達成，包括「孤立台—孤立台」以及「孤立台—連網台」間的連接，均須仰賴 ICC Module 的無線通訊能力(例如：WiMAX、Wi-Fi)。孤立台藉由 ICC Module 與鄰台相連進而恢復連外能力，最後與後端核心網路相連，達成資料遞送。
- **Emulated Controller Module (EC Module)**：負責處理、運算、轉送資料，為 CRP 的核心運算元件，當孤立台透過 ICC Module 與鄰台相連時，由此模組來控制包含資料轉送路徑、基地台頻寬分配控制、通話允入控制等，並提供虛擬鏈結讓基地台與後端連線，也須提供虛擬 BSC 功能提供網內互打服務[33]。EC Module 也是 CCN 與原先受損的行動通訊網路系統間之通訊介面，CCN 藉由此模組與既有的行動通訊網路介接，交換電信的控制信令與

資訊。EC Module 功能模組如圖 16。

- **Satellite Communications Module (Optional)**：衛星通訊設備，如果災區內沒有連網台，則須利用衛星通訊設備架設至少一個連網台，此外，如果災區面積太大，離連網台太遠的孤立台所傳送的資料須經多次轉送，為了避免多次轉送佔用太多頻寬且增加了斷訊的機會，可以考慮挑選某些孤立台加裝衛星通訊設備，直接把孤立台建構成連網台，將一個龐大負擔過重的 CCN 網路，分解成數個負擔較輕的 CCN 網路。由於衛星通訊設備價格昂貴，無法普及所有基地台，只能用於少數基地台。

CCN 孤立台恢復連線方式，如圖 15 所示。手機信號透過孤立台 EC Module 處理並經 ICC Module 轉送至鄰台。此時孤立台資料便可透過鄰台，以多重跳接的方式，連上後端核心網路。

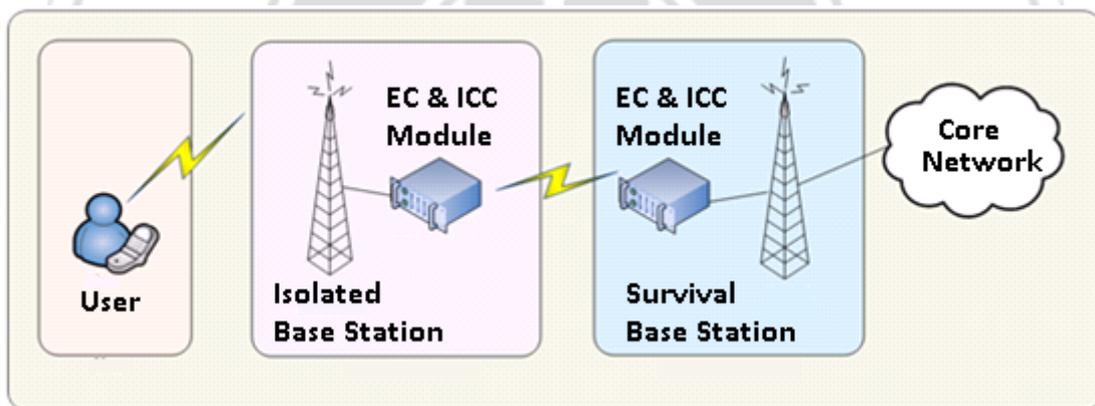


圖 15、孤立台恢復連線方式

除了衛星通訊模組之外，其他硬體模組造價均很便宜，一般電腦搭配通訊模組即可，即使經費有限，也可大量佈建，而且不需購置終端設備，使用者使用自己原有的手機即可，每個使用者之單位建置成本可大幅下降。

3.2、通訊模式

3.2.1、災區通訊型態分類

我們將災區通訊依通話功能大概分為四類，分別為急難救助、災情回報、救災相關和互道平安。詳細分類如表 4 所示。依急迫性由高而低排序，依序為急難救助、災情回報、救災相關和互道平安。「通話分類」欄位中的數字代表該通話類別的急迫性，數字越小急迫性越高。

表 4、災區通訊需求分類

通話分類	通話功能	發/受話端	說明
1	急難救助	災區(外)民眾 受困人員 → 緊急救難人員 緊急救難中心	受困民眾對外求援之用
2	災情回報	受困人員 ↔ 緊急救難中心 災區居民 ↔ 緊急救難中心 緊急救難人員 ↔ 緊急救難中心	各地災情狀況之回報、傳達
3	救災相關	緊急救難人員 ↔ 緊急救難中心 緊急救難人員 ↔ 緊急救難人員 緊急救難中心 → 受困民眾/災區居民 災區(外)民眾 → 緊急救難中心	救災資源分配、指揮調度、 救災人員追蹤以及二次災害之預警等 A 緊急醫療救護及協助 B 醫療設備、器材、人員

				之調度
				C 緊急救難機具及設備調度
				D 二次災難預警廣播
				E 受災民眾協尋作業
				F 救援物資之協調、調度、補給、發放
				G 緊急救難人員調度、狀況回報
				H 後續就醫治療及照護
4	互道平安	受困民眾/居民 ↔ 災區居民 受困民眾/居民 ↔ 災區外民眾 緊急救難人員 ↔ 緊急救難中心 緊急救難人員 ↔ 緊急救難人員親屬		脫困人員報平安、災區外人員詢問災區內民眾狀況

3.2.2、CCN 通訊模式

經分析災區通訊需求，我們規劃了數種通訊模式：一般模式，無線對講機模式，以及群組通訊模式。

- 一般模式(Ordinary Mode)

此即原有的行動通訊模式(POTS)，在 CCN 服務範圍內的手機可與 CCN 內外任何電話通訊，使用者不須進行任何設定，即可如常使用這個模式。但此種通訊模式必須佔用寶貴的連外資源，因為此類通訊必須經過交換機進行交換，必須使用原有之 HLR/VLR 等資料庫，所佔用的 CCN 資源非常可觀。必須配備具有差異化優先等級的允入控制，方能有效運用寶貴的資源。

- **無線對講機模式(Walkie-Talkie Mode)**

在正常運轉下，基地台都可以擁有上百個無線電頻道供使用者使用，而 CCN 內的基地台所獲配的連外頻寬通常將遠低於所獲配的無線電頻道，造成無線電頻道之閒置。我們設計的無線對講機模式以利用閒置的頻道讓 CCN 服務範圍內的手機在同一基地台涵蓋範圍內進行廣播通話(一對多)，而不必使用連外頻寬。

無線對講機模式對災區內的使用者特別有用，因為志願救災人員以及受困災民彼此之間並不熟識，無由得知欲通話對象之電話號碼，故沒有限定接收者的廣播模式非常適合於災區使用，在緊急中也免去撥號碼的不方便，受困民眾更可能是在黑暗中，或困在狹小空間中，無法方便撥號。因此，這個模式相當有用。以下是幾種可能的方式，讓不熟悉此操作模式的使用者在災變來臨時，迅速瞭解並啟動此模式：

- **由 119 轉告**

一般民眾在緊急時，最可能撥的號碼是 119，但在災區內，連外的 119 也可能不通。當 CCN 建置完成後，可以在災區內設立 119 專線（稱為 CCN-119，以與正常 119 區別），就近處理求援電話。可由 CCN-119 轉告使用者，撥一個特定的號碼，(例如 118)，即可將手機轉變成無線對講機。

- **國家指定特殊緊急號碼**

為了減輕 CCN-119 的負擔，以及節省使用者的時間，可由國家指定一個特殊緊急號碼(例如 118)並廣為散佈，不過，因為此種號碼很少有使用的機會，民眾不易熟記，也浪費了一個國家編碼，因此國家願意為救災而採用此方式的意願不得而知。

- **由 CCN 基地台傳送簡訊到服務範圍內所有手機通知撥號方式**

此法很容易實行，可是受困的使用者如果不方便讀取簡訊，將會錯失

與救援人員聯繫的機會。

- **群組通訊模式(Agency Mode)**

災區中，大量的救災通訊都具備幾個共同特色：

- **彼此不知電話號碼，也沒有時間記憶或記錄對方號碼**

災害發生初期，大部分依靠在地的志願性救災人員，臨時組成的團隊，彼此不知對方的電話號碼，而且在兵荒馬亂之中，亦無時間記憶，也很可能不方便將電話號碼存入手機之中。

- **大部分的通訊是對特定角色，而非特定個人**

例如：向任一個骨科醫生求救、需要某型血液進行輸血急救、需要重機械支援、需要油壓剪切斷鋼筋、向指揮中心回報狀況...等。這些通話對象，均非特定個人，而是一個特定角色。

- **緊急程度較高，且各有不同**

上舉數例都是緊急任務，比一般電話較為緊急，但彼此緊急程度則有所不同。

由於以上的特點，我們規劃了**群組通訊模式**，遵循以下數個原則：

- 群組通訊模式內不同的群組各自負責不同的任務，這些不同的群組稱為 agency group

- 每一個群組，指定一個代表號，各群組有優先順序，代表號則於災區廣為宣傳

- 每一個群組的成員註冊其電話號碼及所屬群體

- 呼叫某一群組時，該群組所有成員的手機都會接到來電訊號

- 受話群組的任一個成員可以承接呼叫

註冊成員的電話號碼，將記錄於 CCN 資料庫中，CCN 的管理者可根據各個群體的優先次序進行允入控制，此外，在允入一般模式的電話時，也可根據這個資料庫決定各個電話號碼的優先度。群組通訊模式利用閒置的頻道讓

CCN服務範圍內的手機可與CCN內任何受話群體內的任一個成員通話(非廣播通話)，無論呼叫者和受話者是否在同一基地台的涵蓋範圍之下。呼叫某一群體時，該群體所有成員的手機都會接到來電訊號，受話群組的任一成員可以承接呼叫，當群組內任一成員承接呼叫後，呼叫者即可和該成員進行通話，而此時群組內其他成員的手機的來電訊號即會消失(一對一)。

此外，如果 CCN 無法取得 HLR 的資訊時，原先的電話號碼在內部無法被 Terminate，換言之，原有電話號碼在 CCN 內部是無效的。為解決此問題，CCN 管理人員可以臨時指派號碼給使用者。而號碼的指派，可參考國家編碼計畫，採用 12 或其他 1 字頭的三位或四位號碼，簡化撥號。CCN 臨時指派號碼可透過現場公告、簡訊或 CCN-104 查號等機制提供給 CCN 服務範圍內的使用者查詢使用。

3.3、CCN 功能架構(Functional Architecture)

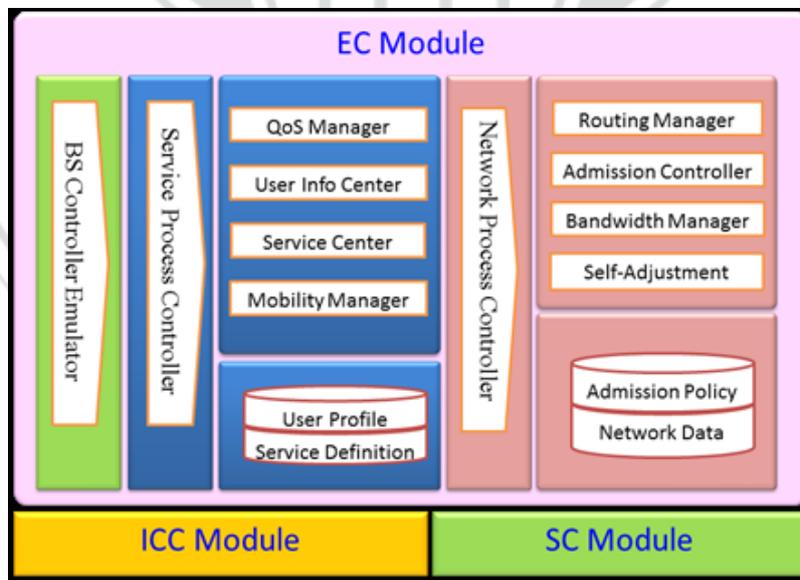


圖 16、CCN 功能架構

系統架構如圖 16 所示，EC Module 內各元件的功能詳述如下：

- **服務流程控制器(Service Process Controller)**：服務流程控制器和相關的功能元件相互合作，提供使用者服務。
- **用戶個人資料(User Profile)**：紀錄一些用戶資訊，例如手機號碼、IMSI、agency group、service level agreement (SLA) 等。
- **服務定義(Service Definition)**：定義 CCN 通訊模式提供服務的流程及其功能。通訊模式可以被新增或修改藉由新增或修改它的服務定義。
- **虛擬 BSC(BS Controller Emulator)**：處理基地台之間的通訊協定和將信號及資料轉換到 VoIP 封包之中。現今的行動網路是由多家電信公司的基地台組成，電信公司的軟體和硬體更新時，若 EC Module 沒有立即更新，可能無法正常的運作。EC Module 是一種應急設備，並無商業利益可圖，不易獲得充裕的資金及資源供 EC Module 不斷的進行更新。為了確保 CCN 能夠有效發揮功能，我們使用虛擬 BSC 來處理基地台間的連線問題。當基地台更新後，只需更新虛擬 BSC，其他的功能元件則不需改變。
- **服務中心(Service Center)**：由於 CCN 擁三種不同的通訊模式。服務中心會視來電請求為何種通訊模式，提供相對應功能以滿足使用者的需求。
- **用戶資訊中心(User Info Center)**：負責管理用戶的身份。用戶資訊中心將使用者分成兩類，一種是擁有戶資訊的 agency group 成員以及沒有用戶資訊的匿名使用者。當匿名使用者連接到 CCN 時，用戶資訊中心會預設他的 agency group 及 SLV 並且將這些用戶資訊記錄下來。
- **QoS 管理員(QoS manager)**：負責決定通話品質。由於不同的通話會有不同的緊急程度，因此我們根據緊急程度提供不同的通話品質，越急迫的通話獲得越大的頻寬以提供更好的服務品質，反之亦然。通話的緊急程度由發、受話者事先註冊的 agency group 決定。若發、收話者雙方事先並未註冊，則將會優先考慮那些已經註冊的成員。根據通話的迫切性給予不同的頻寬，期望

能在不影響救災效率的前提下，盡可能的提供更多的通話服務。

- **行動管理員(Mobility Manager)**：負責找出受話者的位置。
- **網路流程控制器(Network Process Controller)**：網路服務流程控制器和相關的功能元件共同合作提供服務。
- **網路資料(Network Data)**：紀錄網路狀態資訊，例如網路拓樸、頻寬分配的狀況以及頻寬的利用率等。
- **允入政策(Admission policy)**：紀錄網路的允入政策，如鄰台間的頻寬分配。
- **允入控制器(Admission Controller)**：災區中的通話量遠超過平時的通話量，應急蜂巢式行動網路的負載量遠小於一般的公共網路，難以處理大量湧入的通話，因此並非所有的通話都能夠被接通。允入控制器根據允入政策進行允入管控。
- **路由管理員(Routing Manager)**：負責規劃管理網路拓樸以及轉送路徑。在緊急維修規劃期以 off-line 方式進行網路拓樸規劃，其後系統在緊急服務運轉期會根據災區通訊需求進行動態調整網路拓樸，以達到最大救災效益。
- **頻寬管理員(Bandwidth Manager)**：負責分配及管理無線頻寬。由於資訊需透過鄰台間轉送，因此每個基地台能使用的頻寬數量需要合理的分配，以滿足救災需求，避免基地台的頻道數量分配失衡。系統透過頻寬管理員，根據CCN相關人員在緊急維修規劃期所做的規劃進行分配。若頻寬管理不當，某些基地台的頻寬可能會被轉送的話務給壅塞，無法提供通訊服務。最壞的情況是所有的頻寬都被一些受災輕微的區域所佔據，使得受災較嚴重的區域獲得不到任何的頻寬。為了達到最佳救災效益，必須合理的分配每個基地台所能使用的頻寬。
- **自我調整(Self-Adjustment)**：當網路環境變動時，負責重新規劃網路拓樸及分配頻寬資源。

3.4、CCN 服務流程

根據元件的功能，我們將 CCN 提供服務的流程分為三個層面，如圖 17 所示，分別為存取用戶、服務程序、網路服務。用戶存取負責與終端用戶之間的溝通；服務程序負責處理用戶的請求；網路服務負責網路管理和資料數據的傳輸，本節介紹三種通訊模式的運作流程。

- **一般模式建立服務流程：**

STEP 1~3 存取用戶：當發話者撥打電話時，虛擬基地台控制器(BSC)會將發話者的請求連同發話者、受話者雙方的電話號碼一起傳送至服務程序層。

STEP 4~5 服務程序：在這個階段服務流程控制器和相關的 EC Module 功能元件會負責處理使用者的呼叫請求。首先，系統從用戶資訊中心查詢到使用者的個人資料。然後，系統利用服務中心針對不同的呼叫請求提供相對應的服務程序，接著，系統利用行動管理員找到受話者的位置，若是群組通訊模式，會找到 K 個相鄰的群組成員。再來，系統會透過 Qos 管理員根據發、受話者的用戶資訊來決定通訊品質，最後，系統將通話請求連同發、受話者的用戶資訊、通訊的品質、以及受話者的位置一起傳送到網路服務層。

STEP 6~8 網路服務：在這階段網路服務控制器以及 ICC Module 相關的功能元件共同合作提供網路服務。首先系統透過路由管理員查尋出轉送路徑，接著頻寬管理員會透過允入控制器根據頻寬使用率以及通話的緊急程度評估這個通話請求，如果這個通話請求被准許了，頻寬管理員會分配這個通話所需要的頻寬，最後通話請求會透過長距離的無線設備以多重跳接的方式轉送到目的地的基地台。

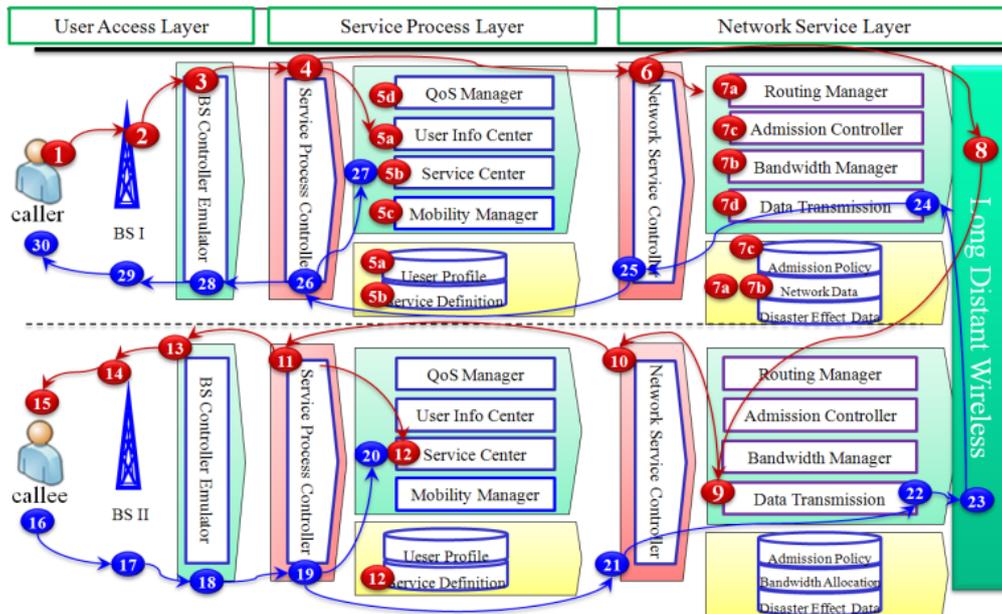


圖 17、一般通話模式通話建立流程

STEP 9~10 網路服務：系統透過多重跳接的方式將通話請求傳送到目的地。而網路服務控制器則會將通話請求轉送到服務程序層。

STEP 11~12 服務程序：服務流程控制器透過服務中心查詢出服務的項目為何，並且根據查詢的結果提供服務。

STEP 13~15 存取用戶：服務流程控制器透過虛擬基地台控制器送出一個信號給受話者，此時受話者的手機會響起。

STEP 16~30 建立通話：當受話者接起電話後，系統會送出一個認證給發話者並且在發話者和受話者之間建立一條虛擬的通道。

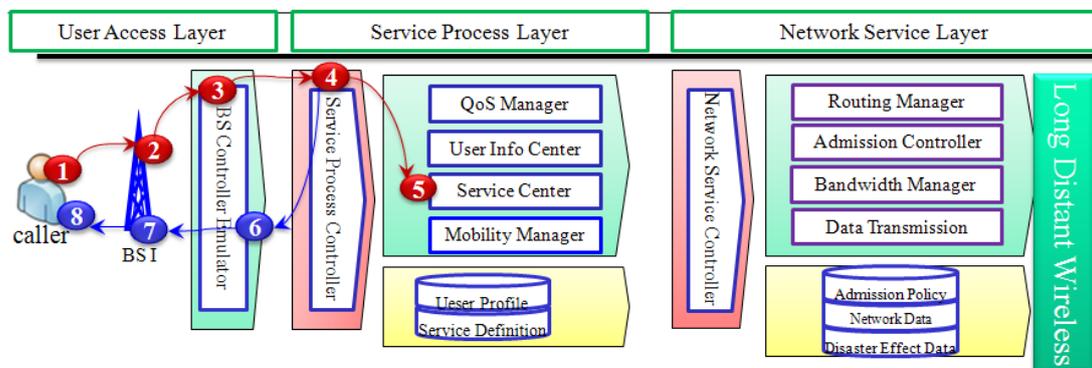


圖 18、無線電對講機模式通話建立流程

- 無線電對講機模式建立服務流程：

無線電對講機模式建立服務流程如圖 18 所示。STEP 4~5，服務流程控制器接收到通話請求後，系統會透過服務中心辨識通話請求的種類。若通話請求為無線電對講機模式，此時系統會透過服務流程控制器會將發話者加入無線電對講機群組。由於無線電對講機模式是在相同的基地台之下使用，因此發話者的聲音會透過虛擬基地台控制器被廣播到無線電群組內的其他成員，不須透過長距離無線電設備轉送。

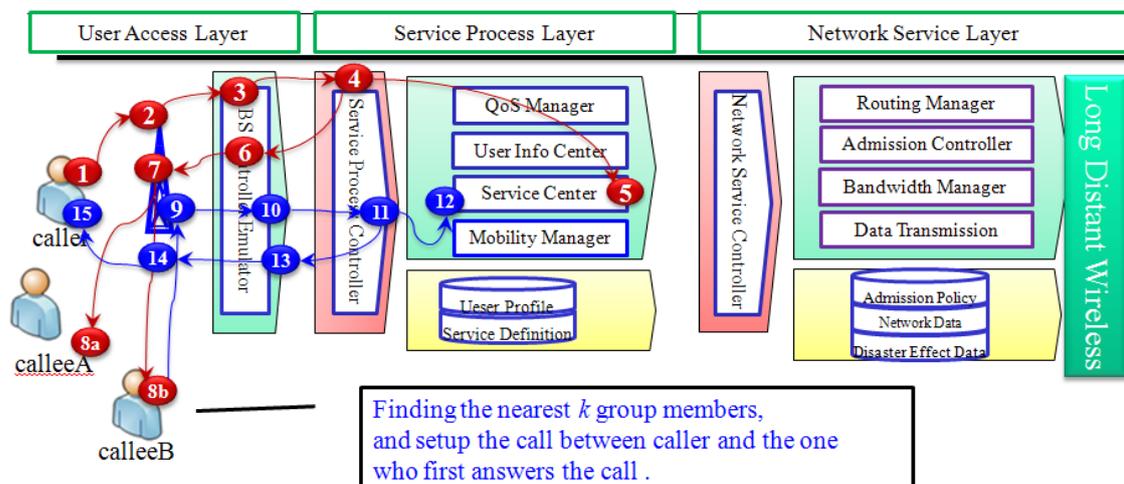


圖 19、群組通訊模式通話建立流程

- 群組通訊模式建立服務流程：

群組通訊模式建立服務流程如圖 19 所示。STEP 4~5，服務流程控制器透過服務中心辨識通話請求的種類並且找出受話群的組成員。若群組內成員都在同一個基地台下時，系統會將通話請求廣播至所有的群組成員。接著當群組內某個成員接起電話時，系統就會在發話者和這位成員之間建立通話。若群組內成員並不在同一個基地台下時，此時系統送出通話請求的程序則如圖 17 所示。

3.5、建置與運轉流程

建置災區電信網之步驟分四個階段，各階段需完成的工作如下：

- **第一階段：災情評估 (Damage Assessment Phase)**

STEP 1 天災發生，導致基地台電力中斷或網路連線中斷

STEP 2 偵測損害情形，如有內建自動化建構機制，則啟動自我修復

STEP 2.1 基地台偵測到電力中斷，則切換至備用電源

STEP 2.2 基地台偵測網路連線中斷，找出訊息轉送路徑(Auto configure)，
重建與 RNC 之間的連線

STEP 3 回報損害原因與無線連線涵蓋範圍內的基地台至控制中心

STEP 4 繼續提供通話服務，直到備用電力用完為止

- **第二階段：緊急維修規劃期 (CCN Planning Phase)**

STEP 1 選定欲建構 CCN 之災區

STEP 2 蒐集統計並評估受損狀況，確定孤立台與連網台

STEP 2.1 規劃最佳之無線連線網路拓樸

STEP 2.2 根據載具所能攜帶的應急修復包的數量，排定基地台修復次序

STEP 2.3 規劃修復路線

STEP 2.4 進行基地台之修復

STEP 3 進行頻寬分配

STEP 4 決定服務(通話服務、數據通訊服務、簡訊服務) 開放策略及允入政策

- **第三階段：緊急維修建置期 (CCN Deployment Phase)**

STEP1 依據第二階段規劃之結果，進行 CCN 網路佈建與設定

- **第四階段：緊急服務運轉期 (CCN Operation Phase)**

STEP 1 基地台依服務開放策略，提供允許開放的服務

STEP 2 CCN 電話號碼指派，各救災群體註冊號碼

STEP 3 依頻寬分配策略，實施允入控制，提供服務

3.6、重要研究議題與未來研究方向

為提供應急通訊所需之功能，如允入控制、Intranet 建構、自動化建構等功能，需整合現有基地台運作流程才可實現。而整合方法可分為二種：嵌入式與外接式。現有行動電話系統，如 GSM 2G 和 3G，並未將應急通訊納入系統設計考量，如採用嵌入式的作法，成本和技術門檻高，難以說服行動通訊業者採納。反觀外接式的成本和實作技術門檻則遠低於嵌入式，行動通訊業者不需大幅變更系統即可配合，因此配合意願較高，較符合應急通訊系統的需求，避免業者之抵制。

但新一代的系統，如 LTE，已將應急通訊納入系統設計的考量[49]，大幅降低使用嵌入式所需的成本和技術。因此若能先以外接式的方式提供救災通訊所需基本的功能；針對新一代的基地台，部分進階功能則可用嵌入式的方式來實作。二種方式互相搭配運用，不但可滿足救災通訊所需的機能，又可有效控制實作的成本和技術門檻，增加 CCN 網路實現之可能性。

- **嵌入式：**將應急通訊所需之功能嵌入基地台中，此種方式需修改基地台的軟硬體。好處是災害來臨時，可立刻啟動運轉，在災害發生之初期立即發揮功能支援搶救工作。缺點為需大量修改現存基地台，大幅增加建構成本，且新功能嵌入的實作方法隨基地台製造廠商或型號不同而異，實現難度頗高。
- **外接式：**推持現有基地台運作機制，藉由外接的設備(例如 EC Module)來提供新功能。好處是設備數量大幅減少，不需更改現有基地台。缺點是必須在緊急時運送至災區建構，耽誤災區的搶救工作。

建構 CCN 網路需克服之挑戰如下：

- **整體網路拓樸規劃：**此為首要議題。因多數的基地台無法直接連上後端網路，需透過多重跳接的方式連上，因而其中跳接點的選擇、網路拓樸的規劃將決

定整個網路的效能、救災效益和穩定度。在設計 CCN 拓樸時，我們將依據 CRP 的數量，選擇數個救災效益大的孤立台佈建 CRP，並藉由多重跳接的方式連接後端網路，以恢復通訊。救災效益需考量的因素有災區緊急或受災輕重程度、投入救災人員的數量等，而設計策略需將救災效益最大化並適當地分散流量，避免建立負載量不均衡、跳接點過多的網路拓樸，增加其穩定度。分流的設計是依照各區受災程度估算可能的通話量並加以分流，避免話務集中在某些網段，造成網路提前壅塞。如此便可在有限的資源下提供最大的通話量，並可避免網路壅塞和維持網路的穩定。

- **建構排程**：由於災區的交通系統可能癱瘓，因此 CCN 的建構需視各種運輸能力與建置人員數量而規劃，以派送建構 CCN 所需的 CRP 資源。由於各個地方受災情況不盡相同，CCN 的建構順序也須辨明輕重緩急依序建構，如何在網路拓樸已知情況下決定 CCN 建構排程，以達到最大的救災效益，即為建構排程意義所在。
- **頻寬分配**：CCN 網路中基地台分為連網台以及孤立台，當孤立台提供服務時，因資料需透過鄰台轉送，各節點所需頻寬包含發自本地基地台的流量以及為鄰台轉送的流量。考量 CCN 頻寬資源有限，且各地災情嚴重程度不同、緊急程度不同、使用者話務功能重要性不同、通訊品質需求不同，在最大化救災效益的前提下快速妥適的分配有限之頻寬，讓每個基地台分配到的頻寬資源符合救災通訊需求，避免分配失衡。
- **Intranet 建構**：在現有的行動通訊架構下，兩部手機通話的語音封包傳送路徑均需繞送至後端核心網路的交換機進行連接，即使這兩部手機位於同一基地台的服務範圍內也是如此。災區內所有的通話，包含災區內部通話，均需佔用到連外的頻道，如前所述，連網台對外的頻道數極為有限，在 CCN 多重跳接且連網台連外頻道極為有限的情況下，各孤立台能分配到的實際連外頻道數，必遠低於其裝備所能支援的頻道數量，因此，各孤立台將會有大量

的剩餘閒置頻道。而救災通訊裡通話數需求最大且最為重要的是災區內部通訊。救災人員之間常有頻繁的通話需求。因此，建立 Intranet 的通道，讓同屬同一基地台信號範圍內的手機之間，可以利用閒置無線電頻道彼此互通，在不佔用連外頻道的情況下，支援類無線對講機的通訊模式，提升整體通訊系統的利用率與可用性，對救災人員之間的溝通協調將有極大的幫助。

- **基地台介面整合：**CCN 利用蜂巢式行動通訊網路原有的基地台設備，另外介接具有運算處理能力的 EC Module，以達到提供行動裝置通訊服務的目地。因此這些外來設備必須無縫地與基地台介接，包括各種通訊協定，以確保基地台可恢復運作。
- **允入政策制定：**允入控制讓系統依據特定條件，選擇性地接受使用者請求，其作用有二：一是避免系統因接受過多的服務請求，造成資源耗盡，以確保系統穩定性；二是安排優先次序，確保重要性高的請求可以優先使用。災區通話量為平時的數倍且應急通訊系統容量不及於平時的公眾網路，允入控制可保護系統免於被大量的通話請求癱瘓，以維持系統的穩定度。在 2005 年倫敦地鐵車站爆炸事件，原是屬於小區域局部傷亡事件，不應該造成通訊系統癱瘓，但爆炸發生後，公眾電信網路話務量急遽增加，大量使用者同時撥著電話確認親友平安，且佔線時間過長，影響到倫敦地區的通訊網路運作和政府搶救工作執行。此外，災區通話種類繁多且重要性不等，從緊急救助到互道關懷電話都有。允入控制可確保緊急救助電話優先使用系統，避免頻寬被重要程度較低的通話佔滿，將更有利於災區救援的進行，因此具有優先等級控管能力的允入政策是一個主要研究議題。
- **自動化建構：**救災分秒必爭，若能事先規劃並架設好 EC Module 和無線連線設備(ICC Module)，減少通訊服務空窗期，這樣就可以爭取更多寶貴的時間。由於基地台的位置及可供連線的方向都是預知的，基地台之間的互連可以預先規劃並架設好 EC Module 和 ICC Module，位於受災風險高之區域可

考慮使用嵌入式設計，當災害發生時，孤立台在失去備用電力之前即可啟動自動化建構程序，利用分散式演算法的方式自動建構一個初期的 CCN，協助第一時間的救災工作及收集各種資料，直到電源耗盡，所收集到的資訊將可加速第二階段 CCN 的建構。為提高自動建構的成功率和可用度，網路拓樸規劃需確保各基地台至連網台均有替代路徑；除此之外，若鄰近有設置強固基地台，則可優先選定其作為連網台。因為強固基地台平時即備有衛星通訊，具有聯外能力且抗災系數高，較一般基地台更適於擔任連網台。

- **跨網路 CCN：**(使用不同電信公司基地台共建 CCN)：災害來臨時，各行動通信公司的網路可能支離破碎，同一家電信公司倖存的孤立基地台可能無法順利連接成一個可用的 CCN，如果聯合各家公司的基地台，順利建成 CCN 的機會大幅增加，但是跨網路 CCN 的技術挑戰更艱鉅，尤其是控制信令將需要大修改，更是加倍的困難。

第四章、 應急蜂巢式行動通訊網路的跨網路拓樸設計

4.1、 設計理念與目標

在災難發生後，災區通話量遠較平常高上數倍。以汶川地震為例，災區內部通話量為平時的 10 倍；外界至災區為平時的 5 至 6 倍；北京至災區則為平時的 80 倍。應急通訊網路能負荷的通話量遠較正常時期之公眾網路小，難以容納如此大量的通話量。消極方面，雖可於網路容量不足時，拒絕新的服務請求，以免網路擁塞。但在此之前，應盡力妥善規劃既有資源之應用，提高系統容量，而災區網路的網路拓樸規劃的優劣與否，不但會影響到整體網路的通訊品質，甚至會影響到系統容量，例如，如果一個拓樸的深度太長，使得訊號須經多次轉送方能到連網台時，不但訊號品質大受影響，且多次轉送亦會佔用太多頻寬。因此，災區網路的網路拓樸規劃就顯得格外重要。

我們在[19]中已有初步的拓樸設計，該論文假設所有基地台都來自於同一電信業者，在建構 CCN 拓樸時，同一業者的基地台可能無法順利建成 CCN，若能聯合各家公司的基地台，順利建成 CCN 的機會將可大幅增加。但不同業者的基地台之服務範圍彼此之間會有重疊的情況，在某一地區選擇了某一業者的基地台作為 CCN 的節點之後，在同一地區則不須再選擇其他業者的基地台，浪費寶貴的 CCN 資源。根據這個目標與限制，本論文為 CCN 提出跨網路的拓樸問題之最佳化模型與解決方案。

4.2、CCN 網路拓樸的建構

在 CRP 內的 ICC Module 數量的多寡，直接決定該設備所能鏈接的鄰台個數，當 CRP 內含有兩組 ICC Module 時，只能連接兩個鄰台，可建立一個線狀的網路拓樸。若 CRP 內含有三組 ICC Module 時，則可建立一個樹狀的網路拓樸(當然，也可能建成非樹狀拓樸)。本研究暫時將網路拓樸建立成一個類似樹狀結構的網路，稱之為 CCN Forwarding Tree (CCN FT)，如圖 20、21 所示。未來將研究多路徑的拓樸結構。

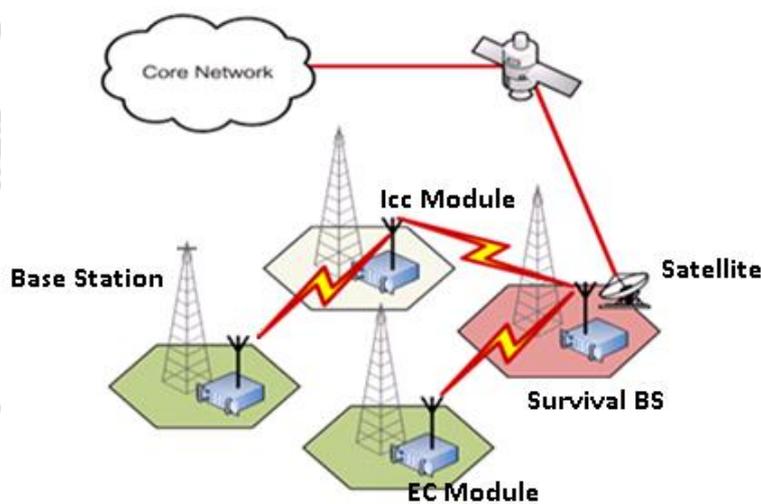


圖 20、孤立台恢復連線之方式

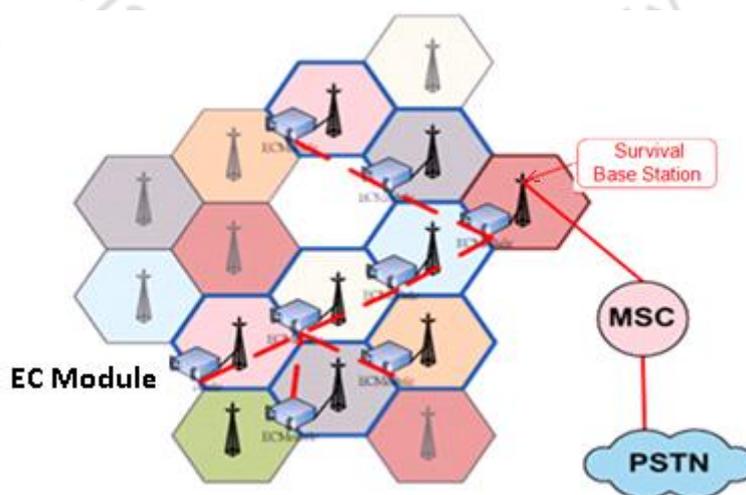


圖 21、CCN Forwarding Tree

一個好的網路拓樸規劃可以提高整個網路的效能、服務量和穩定度。為了確保整體網路拓樸的穩定性，在規劃網路拓樸時，我們須要考慮到以下因素：

- **資源有限**

在災害發生時，行動通訊網路極為脆弱，斷訊的基地台為數眾多。而應急修復包(CRP)的數量有限，而運送能力更是受制於交通系統的存活狀況以及運送工具的能量，無法搶救所有孤立台，因此，如何在有限資源下建構 CCN 網路，使 CCN 可覆蓋服務的總效益達最大，將是一大問題。

- **控制流量負載**

如圖 22，CCN 網路藉由多點繞送的方式遞送資料，因此，拓樸上的某個節點如果負責轉送太多訊務時，頻寬負載將大幅增加，造成網路負載失衡的現象。因此，為了控制網路的負載平衡和維持通訊的品質，我們不希望 CCN FT 網路的流量過度集中於部分節點。

- **減少通訊延遲**

如圖 22，CCN 網路資料如經多次轉送，會對網路傳輸品質造成影響，其傳遞時間會隨著轉送次數而增加，因此，我們希望藉由限制 CCN FT 的深度(Depth)，減低轉送的次數。

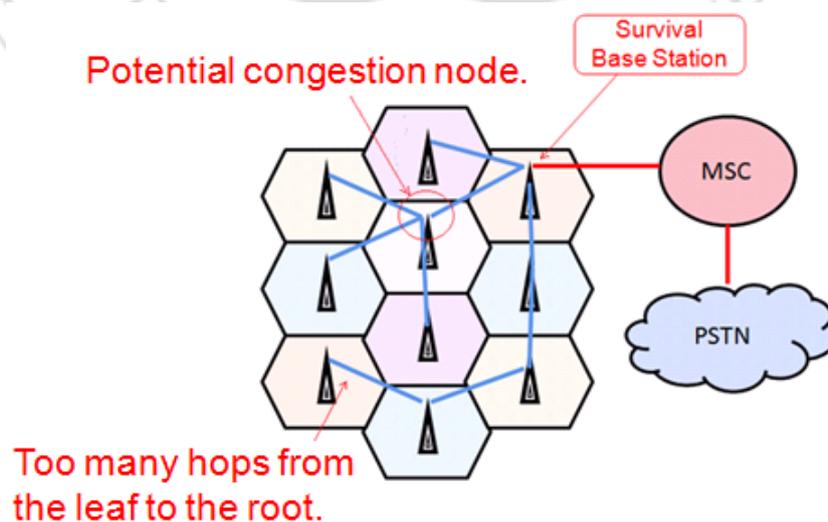


圖 22、網路拓樸規劃限制因素

4.3、多連網台網路拓樸規劃

在災區中可能會有數個連網台，此時，只要將多連網台的問題轉換為單一連網台的問題後，即可使用單一連網台的拓樸規劃模型求解，如圖 23，轉化步驟如下：

1. 在原來的網路拓樸之外，額外增設一個虛擬的根節點
2. 將所有的連網台連到此虛擬的根節點

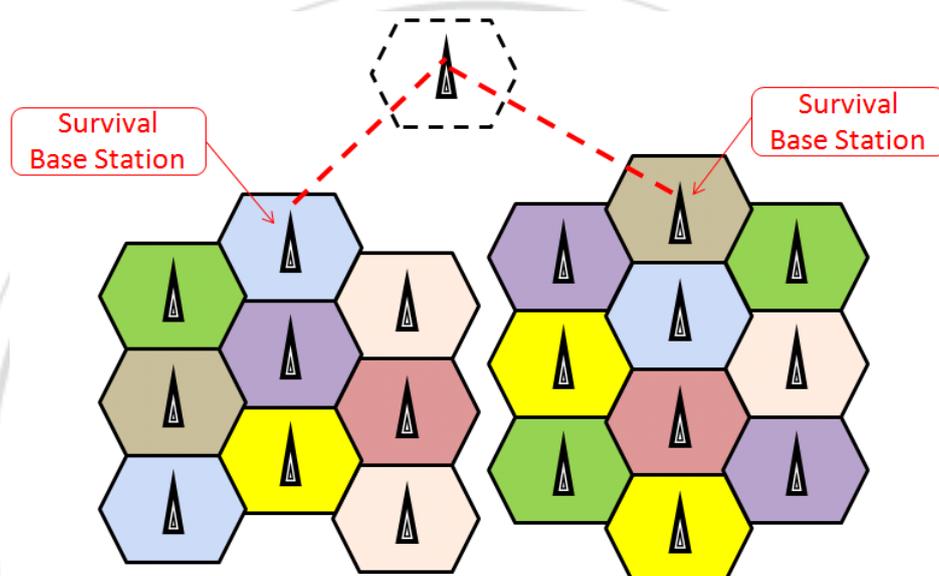


圖 23、多連網台問題轉換單一連網台問題

4.4、問題定義

在建構 CCN 拓樸時，同一業者的基地台可能無法順利建成 CCN，若能聯合各家公司的基地台，順利建成 CCN 的機會將可大幅增加。不同業者的基地台之服務範圍彼此之間會有重疊的情況，在某一地區選擇了某一業者的基地台作為 CCN 的節點之後，在同一地區則不須再選擇其他業者的基地台，浪費寶貴的 CCN 資源。因此，在設計跨網路 CCN 的拓樸時須在同一地區內從數個基地台中選出一個進行搶救，使得拓樸設計變得更加複雜了。

4.4.1、救災效益定義

本論文將「盡可能提高災後存活人數」定為救災效益。此處之救災效益是針對單一基地台所定義，例如，搶救某一基地台對於該基地台服務範圍內人員所能帶來的救災助益。主要是根據各基地台涵蓋範圍內的人口涵蓋率、災情緊急程度等資訊所定義出的效益。

由於災區的受災情況以及救災優先順序通常均由模型使用者(國家救災單位)收集匯整，工程人員並無能力定義出救災效益函數(如效益遞減函數)，必須由國家救災單位根據實際災情而定。

4.4.2、問題描述

我們將跨網路拓樸設計問題以數學模型表達，同一地區內不同業者的基地台間的互斥關係，以互斥的 edge 表達。

• 名詞定義

- 救災效益(Profit)：恢復該孤立台的通訊對於該地區能帶來的救災助益。
- 效益遞減函數(Attenuation function)：在基地台半徑彼此重疊的區域內搶救一個基地台後，同區域內剩餘基地台之救災效益將隨效益遞減函數遞減。
- 樹狀轉送拓樸(Forwarding Tree)：CCN 應急通訊系統中串連各節點之拓樸連線，其根節點為連網台，其他則為孤立台。
- 最佳化目標：在有限資源下，使 CCN 可覆蓋服務的總效益達最大
- 給定參數：
 - 給定一個具有權重的無向圖 $G(V, E, E')$ ，內含有 n 個節點(v_i)、鏈結($e_{i,j}$) 代表節點 v_i 與節點 v_j 之間可建立無線鏈結、權重($w_{i,j}$)代表鏈結($e_{i,j}$)的品質熵數(Quality Entropy)，是一個與服務品質高低相反、且具有可加性質之數，此值越小則服務品質越好。鏈結($e'_{i,j}$)代表節點 v_i 與節點 v_j 位在

同一服務區域內，而存在互斥關係，根節點為 v_0 。

- 給定 CCN FT 的深度上限 B 。
- 給定應急修復包(CRP)的數量 K 。
- 給定救災效益函數(P)，包含初始救災效益值(p_i)及效益遞減函數 $g(k)$ 。

4.5、最佳化問題模型

本研究提出了三個模型，第一個模型為 Depth Bounded Mutually Exclusive K-Maximum Profit Spanning Tree (簡稱限制深度互斥模型，DBME K-MaxST)，除了救災資源有限的因素，還必須限制拓樸的深度並且考慮所選擇的基地台之間彼此是否存在著互斥的關係，以避免資源的浪費；第二個模型為 Depth Controlled Mutually Exclusive K-Maximum Profit Spanning Tree (簡稱自律深度互斥模型，DCME K-MaxST)，限制深度互斥模型的樹深限制有可能會導致某些救災效益較大的節點無法被搶救，此外，且 CCN FT 的樹深上限必須由模型使用者根據不同情況自行決定，但模型之使用者在急切之中不易定義適當的樹深限制，因此我們提出了自律深度互斥模型來改善上述問題，這個模型將各節點的救災效益依據與連網台的總品質熵數而折減，使得離連網台較近的節點獲得較高的優先度，如此，此模型能自動限制樹的深度；第三個模型為 Depth Controlled K-Maximum Profit Spanning Tree (簡稱自律深度模型，DC K-MaxST)，因為不同業者的基地台的半徑會有重疊的情況，在較為重要的區域(即需要較多通話量的地區)，若能連接多個基地台，將可增加該地區的通話流量，提升整體救災效率。在建構 CCN FT 時，藉由效益遞減函數折減同一服務區域內多個基地台的救災效益來避免所搶救的基地台過於集中於同一區域，造成資源分配不平均。

4.5.1、限制深度互斥模型(DBME K-MaxST)

限制深度互斥模型(DBME K-MaxST)，的要旨是從具有互斥關係的節點之中挑選

出節點並將其連結成 CCN FT，使得總效益為最大的樹狀結構；然而，為了避免所連結的 CCN FT 過深，導致整體網路不穩定，在此模型中限制了 CCN FT 的深度上限，模型描述如下：

Given a graph, $G = (V, E, E'), B, K, P$, where

$V = \{v_i | i = 0, 1, \dots, n\}$ is the set of nodes (連網台與孤立台群), v_0 is the root node that has an external link(連網台), degree of $v_i \leq 6$,

$E = \{e_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ is the set of candidate links to be selected to construct wireless connections,

$E' = \{e'_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ is the set of mutually exclusive links, if $e'_{ij} = 1$, v_i and v_j are mutually exclusive,

$B \in Z^+$ is the maximum depth of CCN Forwarding Tree ,

$K \in Z^+$ is the total number of available resources (CRP) ,

$P = \{p_i | p_i \in Z^+, i = 0, 1, \dots, n\}$ is the set of profits associated with nodes.

CCNTD-DBME problem is to find a CCN Forwarding Tree T , where

$T(V_T, E_T) \subseteq G(V, E)$, v_0 is the root of T , such that the total profit $\sum_{v_i \in V_T} (P_i)$ is

maximized, subject to $|V_T| = K$, the depth of $T(V_T, E_T) \leq B$ and e'_{ij} must not exist

if $v_i, v_j \in V_T$.

4.5.2、自律深度互斥模型(DCME K-MaxST)

限制深度互斥模型的樹深限制有可能會導致某些救災效益較大的節點無法被搶救，此外，且 CCN FT 的樹深上限必須由模型使用者根據不同情況自行決定，但模型之使用者在急切之中不易定義適當的樹深限制，因此我們提出了自律深度互斥模型來改善上述問題。

此模型與限制深度互斥模型的目標相同，但在挑選節點時，須考慮到節點之間隨著距離增加而增加的品質熵數，拓樸中的任一節點之救災效益隨著品質熵數增加而銳減。模型描述如下：

Given a graph, $G = (V, E, E'), K, P, W$, where

$V = \{v_i | i = 0, 1, \dots, n\}$ is the set of nodes (連網台與孤立台群), v_0 is the root node that has an external link(連網台), degree of $v_i \leq 6$,

$E = \{e_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ is the set of candidate links to be selected to construct wireless connections,

$E' = \{e'_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ is the set of mutually exclusive links, if $e'_{ij} = 1$, v_i and v_j are mutually exclusive,

$K \in \mathbb{Z}^+$ is the total number of available resources (CRP),

$W = \{w_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ is the weight of the edge between v_i and v_j , representing the quality entropy of the edge, the lower the entropy is, the better the quality is,

$P = \{p_i | p_i \in \mathbb{Z}^+, i = 0, 1, \dots, n\}$ is the set of profits associated with nodes.

With respect to a CCN Forwarding Tree, we define L_k to be the path from v_0 to v_k ,

$c_k = \sum_{e_{ij} \in L_k} w_{ij}$. CCNTD-DCME problem is to find a CCN Forwarding Tree T , where

$T(V_T, E_T) \subseteq G(V, E)$, v_0 is the root of T , such that the total profit $\sum_{v_i \in V_T} \left(\frac{p_i}{c_i}\right)$ is

maximized, subject to $|V_T| = K$ and e'_{ij} must not exist if $v_i, v_j \in V_T$,

4.5.3、自律深度模型(DC K-MaxST)

此模型與自律深度互斥模型類似，不同的是，同一地區可以選擇多個半徑互相重疊的基地台。因為不同業者的基地台的半徑會有重疊的情況，在較為重要的區域(即需要較多通話量的地區)，若能連接多個基地台，將可增加該地區的通話流量，

提升整體救災效率。此外，在建構 CCN FT 時，藉由效益遞減函數來避免所搶救的基地台過於集中於同一區域，造成資源分配不平均。在模型中所使用到的服務品質熵數(Quality Entropy)，是一個與服務品質高低相反、且具有可加性質之數，此值越小則服務品質越好。模型描述如下：

Given a graph, $G = (V, E)$, $K, P, W, g(k)$, where

$V = \{v_i | i = 0, 1, \dots, n\}$ is the set of nodes (連網台與孤立台群), v_0 is the root node that has an external link(連網台), degree of $v_i \leq 6$,

$E = \{e_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ is the set of candidate links to be selected to construct wireless connections,

$K \in Z^+$ is the total number of available resources (CRP),

$W = \{w_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ is the weight of the edge between v_i and v_j , representing the quality entropy of the edge, the lower the entropy is, the better the quality is,

$P = \{p_i | p_i \in Z^+, i = 0, 1, \dots, n\}$ is the set of profits associated with nodes,

$M = \{m_i | m_i \in Z^+, i = 1, \dots, n\}$ is the set of mutually exclusive groups, the nodes in the same group are mutually exclusive,

$g(k)$ is the profit attenuation function of the k -th node which is selected in the same service area (mutually exclusive group), for example, $g(k) = \frac{1}{\sqrt{k}}, k \in Z^+$.

With respect to a CCN Forwarding Tree, we define L_k to be the path from v_0 to v_k , $c_k = \sum_{e_{ij} \in L_k} w_{ij}$. CCNTD-DC problem is to find a CCN Forwarding Tree T , where

$T(V_T, E_T) \subseteq G(V, E)$, v_0 is the root of T , such that the total profit $\sum_{v_i \in V_T} \left(\frac{p_i}{c_i}\right) \cdot g(k)$

is maximized, subject to $|V_T| = K$.

4.6、演算法設計

4.5 節所述的三個問題皆為一 NP-hardness 問題，以現有的技術無法在有效的時間內找到最佳解，所以我們為這三個模型設計了快速的啟發式演算法。三種演算法皆採用 Iterative 方式，每一步挑選一個節點配置 CRP，逐步將所有的 CRP 配置完。每一個節點的挑選以當下救災效益最高的節點為挑選原則。

4.6.1、CCN Topology Design – Depth Bounded Mutually Exclusive

- 演算法流程

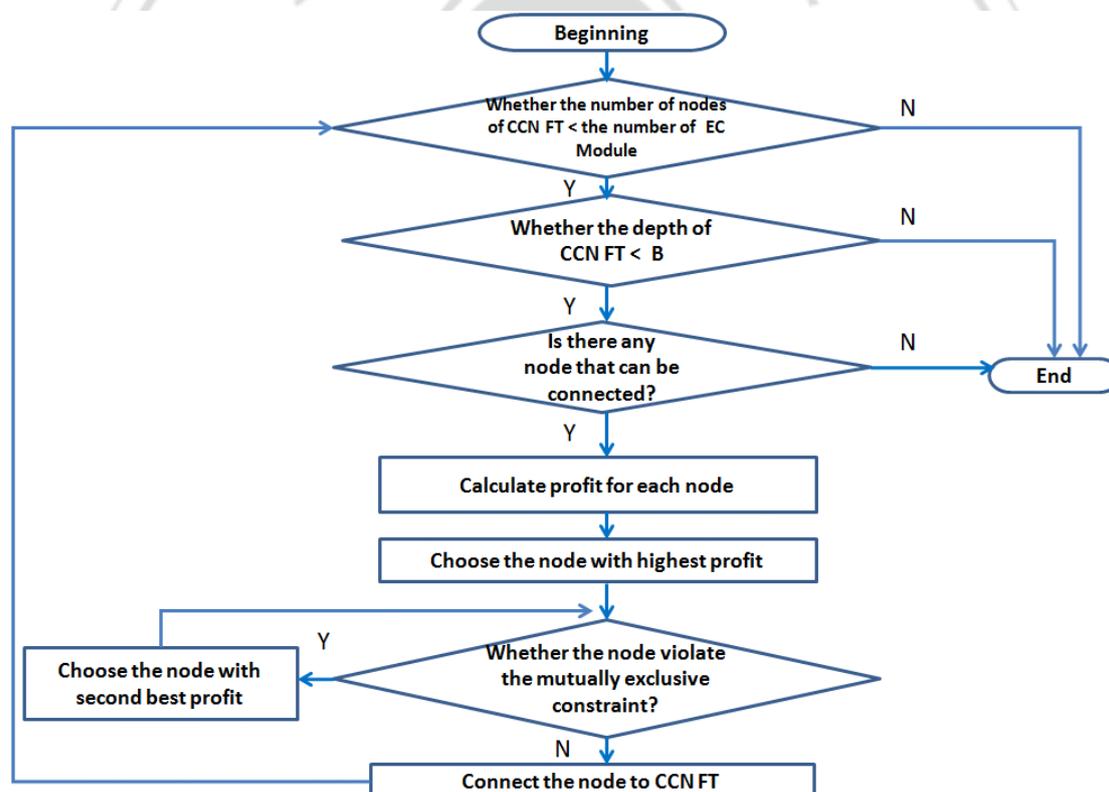


圖 24、CCNTD-DBME 演算法流程圖

```

pseudo code CCNTD-DBME :
CCNTD-DBME( $G, p, r, K, B$ )
Set  $T = \{\}$  /*the set of edges*/
Set  $U = \{r\}$  /* the set of vertexes ,  $r$  is the root of the tree */
while size of  $U \leq K$  do
let  $v$  be a highest profit node adjacent to  $U$  such that
 $v \in V(G) - U, u \in U$  and depth of the Tree  $\leq B$ 
if  $v$  is not violated the mutually exclusive constraint
    add  $v$  to  $U$ 
    add link( $u, v$ ) to  $T$ 
    delete  $v$  from  $V - U$ 
end if
end while

```

圖 25、CCNTD-DBME 演算法

• 演算法範例

我們以一個簡單的例子來說明 CCNTD-DBME 演算法，如圖 26 所示，圖中共有 20 個點，我們假設應急修復包(CRP)個數為 5，所有節點的救災效益權重值介於 1 至 10 之間，樹深限制為 3，虛線標示出基地台之間彼此存在互斥關係，演算法從樹根開始。

- $V = \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8, V_9, V_{10}, V_{11}, V_{12}, V_{13}, V_{14}, V_{15}, V_{16}, V_{17}, V_{18}, V_{19}\}$
- $T = \{\}$
- $U = \{r\}$
- #of resource (K): 5
- B (bound): 3

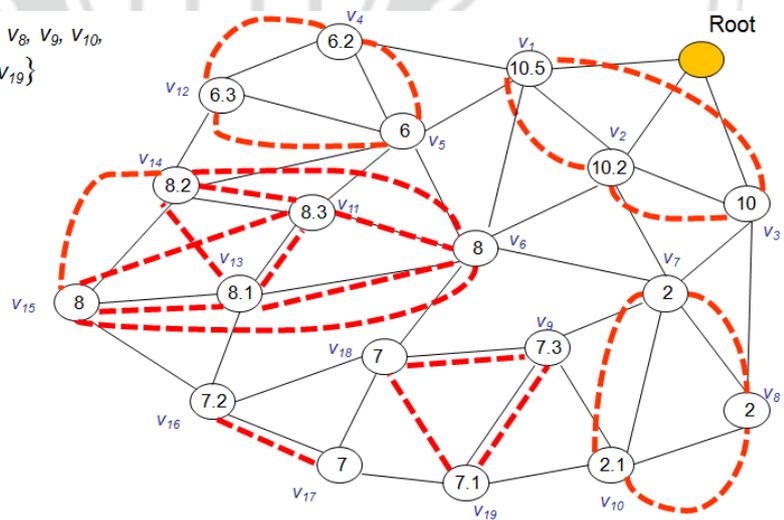


圖 26、CCNTD-DBME 演算法範例

如圖 27 所示，因為 v_1 、 v_2 、 v_3 這三個基地台之間彼此存在互斥關係，選擇其中一個基地台後則不須再選其他的基地台，因此挑選救災效益最大的基地台 v_1 配置 CRP。

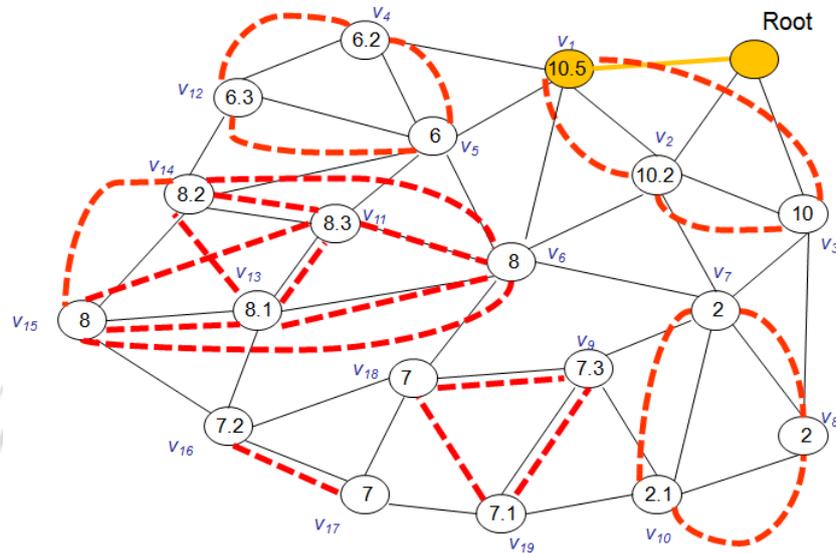


圖 27、CCNTD-DBME 演算法步驟一

如圖 28 所示，與 v_1 相鄰的合法候選節點為 v_4 、 v_5 和 v_6 ，因為 v_6 為三者之中救災效益最大的基地台，因此挑選 v_6 配置 CRP。

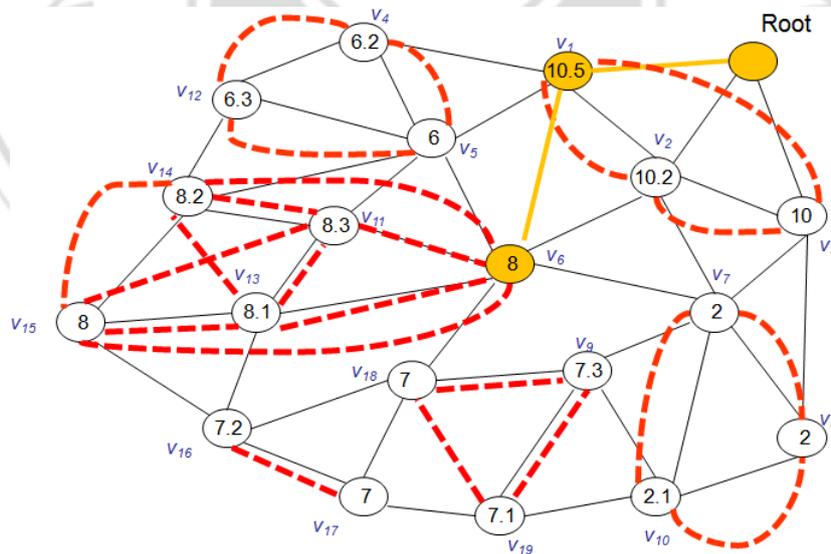


圖 28、CCNTD-DBME 演算法步驟二

如圖 29 所示，與 v_1 、 v_6 相鄰的合法候選節點為 v_4 、 v_5 、 v_7 和 v_{18} ，因為 v_{18} 為四者之中救災效益最大的基地台，因此挑選 v_{18} 配置 CRP。

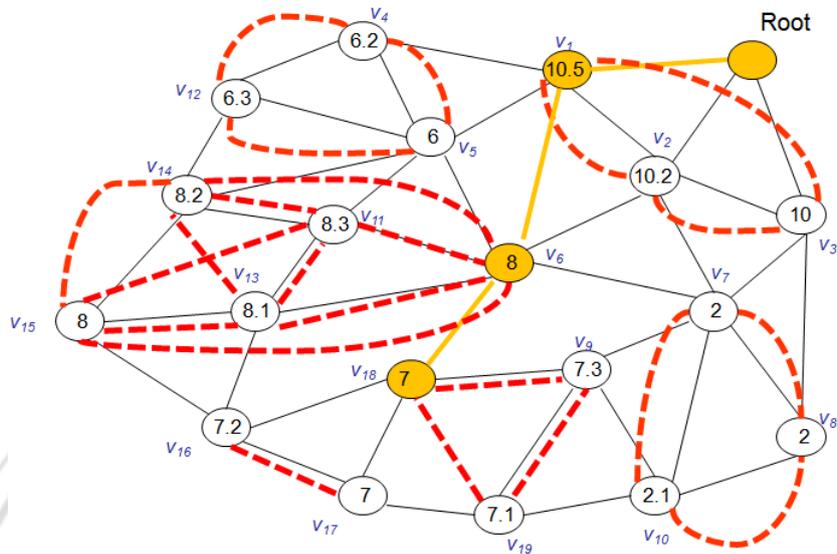


圖 29、CCNTD-DBME 演算法步驟三

如圖 30 所示，與 v_1 、 v_6 、 v_{18} 相鄰的合法候選節點為 v_4 、 v_5 、 v_7 、 v_{16} 和 v_{17} ，雖然 v_{16} 為五者之中救災效益最大的基地台，由於樹深限制為 3，因此只能挑選救災效益最佳的 v_4 配置 CRP。

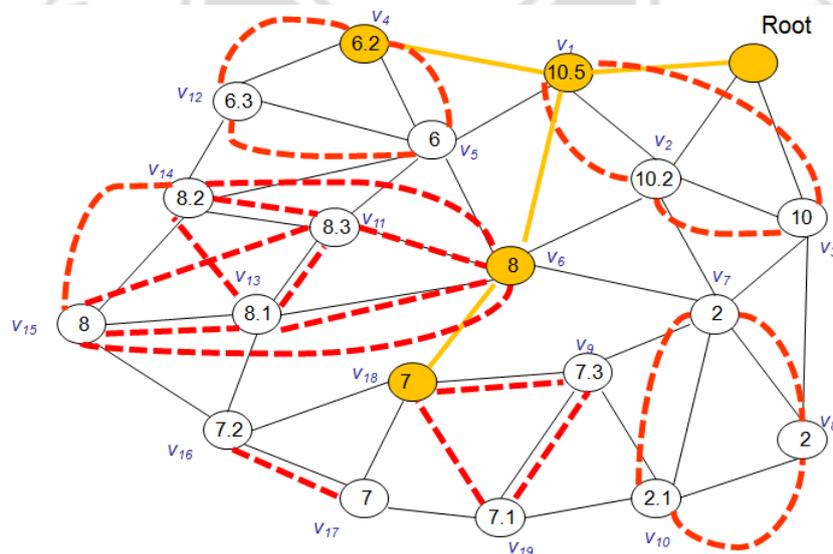


圖 30、CCNTD-DBME 演算法步驟四

如圖 31 所示，與 v_1 、 v_4 、 v_6 、 v_{18} 相鄰的合法候選節點為 v_7 、 v_{16} 、 v_{17} ，雖然 v_{16} 為三者之中救災效益最大的基地台，但因為樹深限制為 3，因此只能挑選救災效益次佳的 v_7 配置 CRP。應急修復包個數已配置完畢，因此演算法結束，總效益為 33.7，CCN FT 深度為 3。

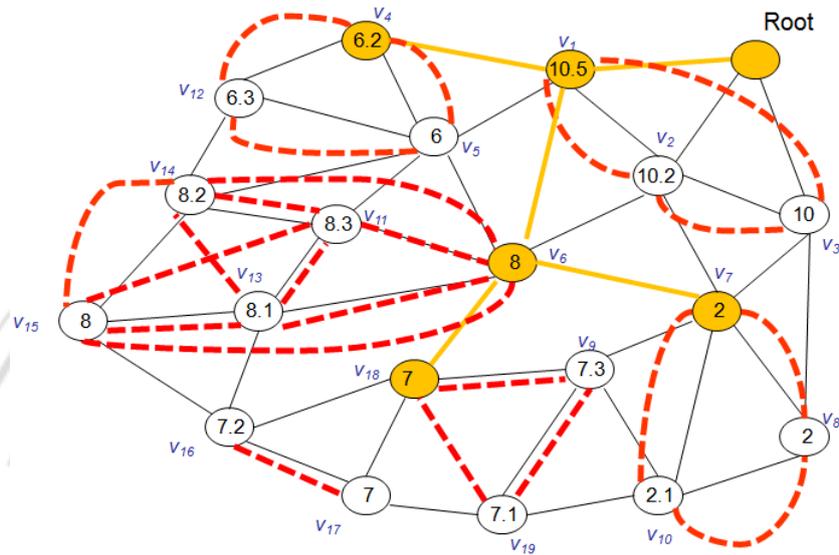


圖 31、CCNTD-DBME 演算法步驟五

4.6.2、CCN Topology Design – Depth Controlled Mutually Exclusive

• 演算法流程

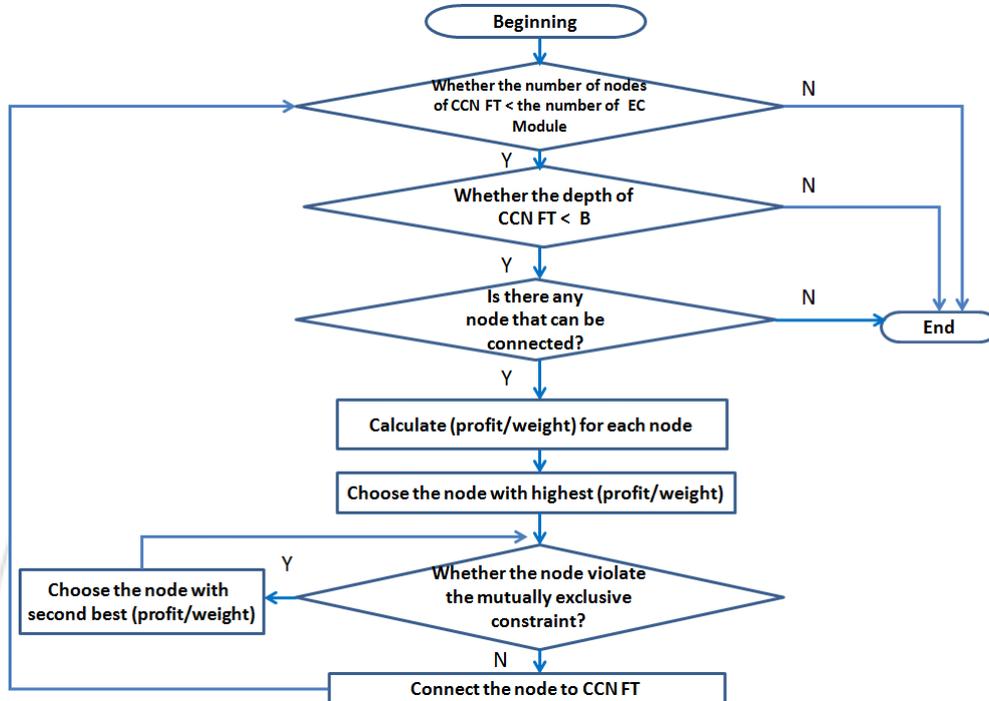


圖 32、CCNTD-DCME 演算法流程圖

pseudo code CCNTD-DCME :

CCNTD-DCME (G, p, v_0, K, W)

Set $S = \{v_0\}$ /* the set of vertexes, v_0 is the root of the tree */

Set $T = \{\}$ /* the set of edges in G */

Set $P = \text{infinity}$ /* the set of initial profit */

Set $W = \text{infinity}$ /* the weight of the edge from v_0 to v_i */

Set $C = \text{infinity}$ /* the (profit/weight) of the node */

while size of $S \leq K$ do

 for $i = 1$ to n

$W[i] = T[v_0, i]$

$C[i] = P[i] / W[i]$

 end for

 for $i = 1$ to $n-1$

 choose a vertex w in $V-S$ such that $C[w]$ is largest

$C[w] = \max(C[w], P[w] / (W[u] + T[u, w]))$

 if w is not violated the mutually exclusive constraint

 add w to S

 add link(v, w) to T

 delete w from $V-S$

 end if

 end for

end while

圖 33、CCNTD-DCME 演算法

• 演算法範例

我們同樣以一個簡單的例子來說明 CCNTD-DCME 演算法，如圖 34 所示，圖中共有 20 個點，我們假設應急修復包(CRP)個數為 5 個，所有節點的救災效益權重值介於 1 至 10 之間，基地台彼此之間的邊具有權重，代表基地台之間的距離 (quality entropy)，虛線標示出基地台之間彼此存在的互斥關係，演算法從樹根開始。在挑選要配置 CRP 的基地台時，依據每個基地台所能提供的節點加權效益 (weighted profit of node) 為考量，其計算方式為： $\left(\frac{P_i}{C_i}\right)$ 。

- # of resource (K): 5
- Node weight: 1~10
- Edge weight: 1~5

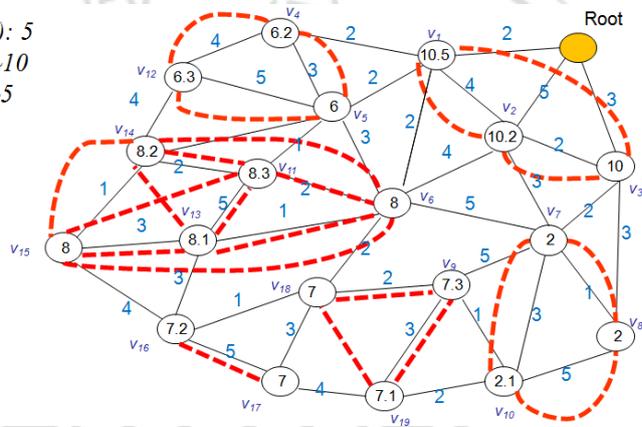


圖 34、CCNTD-DCME 演算法範例

如圖 35 所示，因為 v_1 、 v_2 和 v_3 這三個基地台之間彼此存在互斥關係，選擇其中一個基地台後則不須再選其他的基地台，三者的節點加權效益分別為 10.5/2、10.2/5、10/3，因此挑選節點加權效益最大的基地台 v_1 配置 CRP。

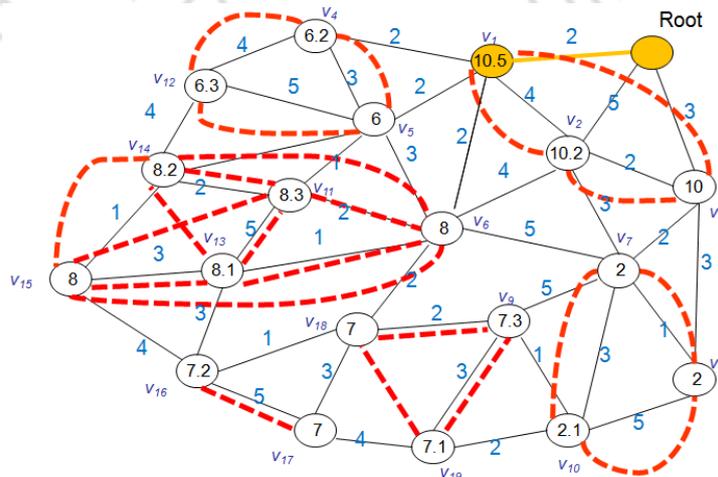


圖 35、CCNTD-DCME 演算法步驟一

如圖 36 所示，與 v_1 相鄰的合法候選節點為 v_4 、 v_5 和 v_6 ，而三者的節點加權效益分別為 $6.2/4$ 、 $6/4$ 、 $8/4$ ，因此挑選節點加權效益最大的基地台 v_6 配置 CRP。

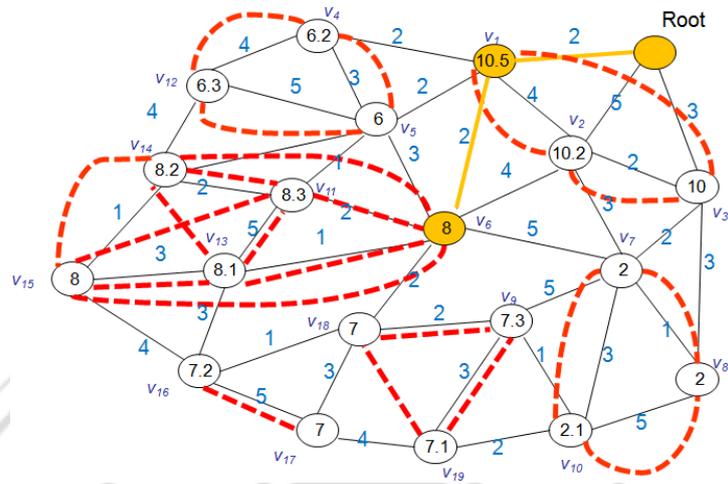


圖 36、CCNTD-DCME 演算法步驟二

如圖 37 所示，與 v_1 、 v_6 相鄰的合法候選節點為 v_4 、 v_5 、 v_7 、 v_{18} ，而 v_4 、 v_5 、 v_7 和 v_{18} 四者的節點加權效益分別為 $6.2/4$ 、 $6/4$ 、 $2/9$ 和 $7/6$ ，因為 v_4 為四者之中節點加權效益最大的基地台，因此挑選 v_4 配置 CRP。

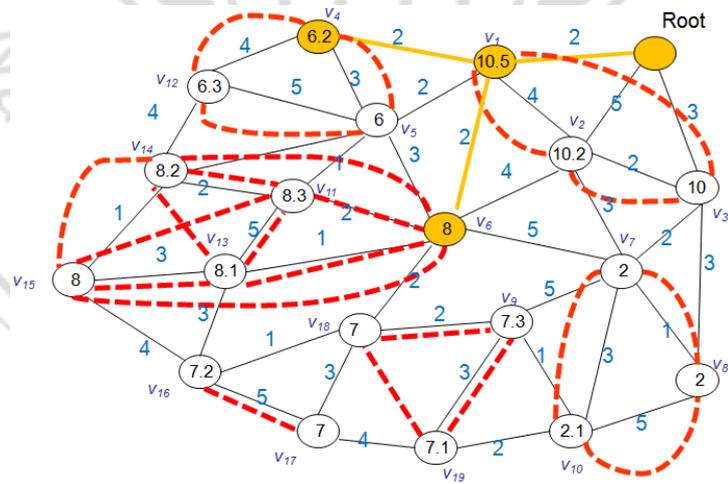


圖 37、CCNTD-DCME 演算法步驟三

如圖 38 所示，與 v_1 、 v_4 、 v_6 相鄰的合法候選節點為 v_7 和 v_{18} ，而 v_7 和 v_{18} 的節點加權效益分別為 $2/9$ 和 $7/6$ ，因為 v_{18} 為兩者之中節點加權效益最大的基地台，因此挑選 v_{18} 配置 CRP。

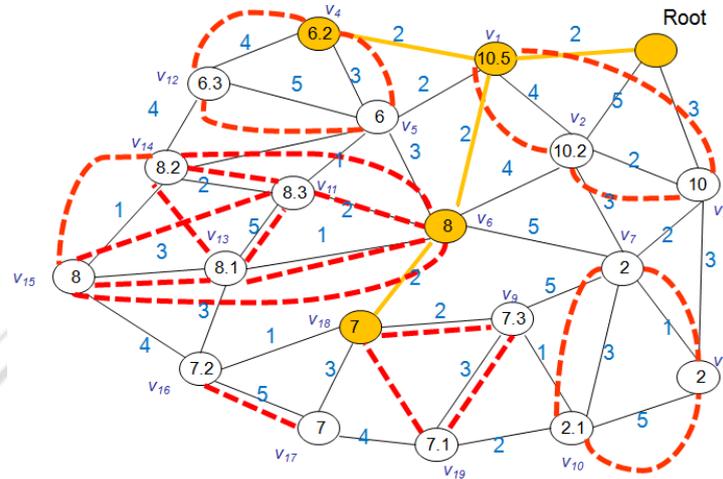


圖 38、CCNTD-DCME 演算法步驟四

如圖 39 所示，與 v_1 、 v_4 、 v_6 、 v_{18} 相鄰的合法候選節點為 v_7 和 v_{16} ，而 v_7 和 v_{16} 的節點加權效益分別為 $2/9$ 和 $7.2/7$ ，因為 v_{16} 為兩者之中節點加權效益最大的基地台，因此挑選 v_{16} 配置 CRP。應急修復包個數已配置完畢，因此演算法結束，總效益為 38.9，CCN FT 深度為 4。

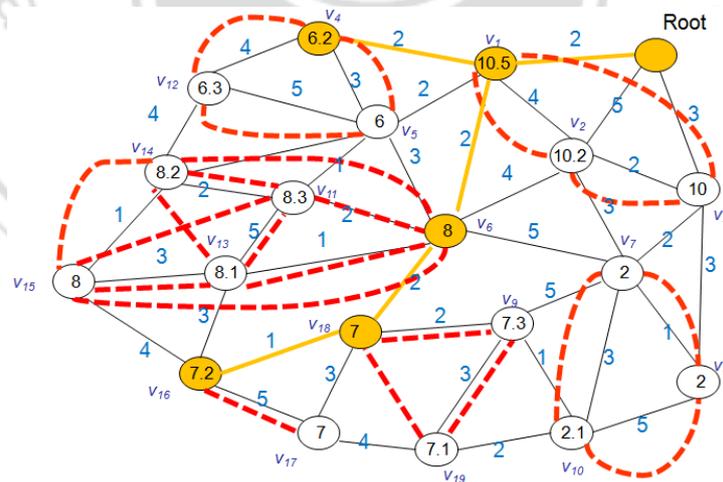


圖 39、CCNTD-DCME 演算法步驟五

4.6.3、CCN Topology Design – Depth Controlled

- 演算法流程

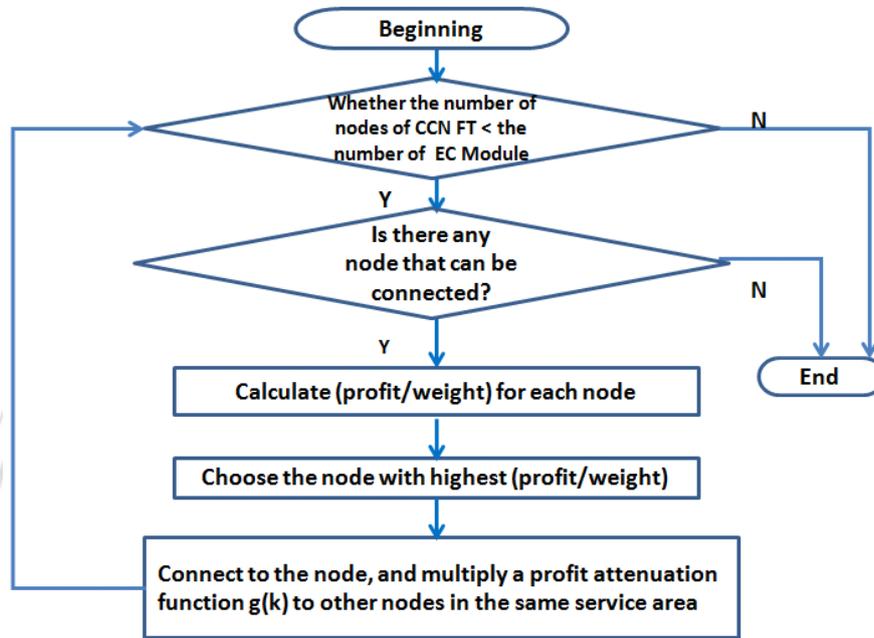


圖 40、CCNTD-DC 演算法流程圖

```

pseudo code CCNTD-DC :
CCNTD-DC (G,p, v0,K,)
Set S = {v0} /* the set of vertexes , v0 is the root of the tree */
Set T = {} /*the set of edges in G */
Set P = infinity /* the set of initial profit */
Set W = infinity /* the weight of the edge from v0 to vi */
Set C = infinity /* the (profit/weight) of the node*/
while size of S ≤ K do
for i = 1 to n
W[i] = T[v0, i]
C[i] = ( P[i] / W[i] )
end for
for i = 1 to n-1
C[w] = max( C[w], P[w] / (W[u] + T[u, w]) )
choose a vertex w in V-S such that C[w] is largest
add w to S
add link(v, w) to T
delete w from V-S
for j = 1 to n-2
if b and w are in the same service area
C[b] = C[b] · g(k) /* g(k)= is the profit attenuation function of the k-th node in the same service area */
end if
end for
end for
end while
    
```

圖 41、CCNTD-DC 演算法

• 演算法範例

我們同樣以一個簡單的例子來說明 CCNTD-DC 演算法，如圖 42 所示，(a) 圖中共有 5 個點，我們假設應急修復包個數為 4 個、效益遞減函數 $g(k)=1/k$ ，所有節點的救災效益權重值介於 1 至 10 之間，圓圈標示出位於同一服務區域內之基地台，演算法從樹根開始。在挑選要配置應急修復包(CRP)的基地台時，依據樹根到該基地台的所能提供的救災效益為考量；(b)與根節點相鄰的合法候選節點為 v_1 、 v_2 、 v_3 和 v_4 ，因為 v_2 為四者之中 profit 最大的基地台，因此挑選 v_2 配置 CRP 並將和 v_2 同服務區域的節點 v_1 乘以效益遞減函數($g(k)=1/2$)，避免基地台過於集中於同一服務區域，此時 v_1 之救災效益更改為 5；(c)與根節點和 v_2 相鄰的合法候選節點為 v_1 、 v_3 和 v_4 ，因為 v_4 為三者之中 profit 最大的基地台，因此挑選 v_4 配置 CRP 並將和 v_4 同服務區域的節點 v_3 乘以效益遞減函數($g(k)=1/2$)，避免基地台過於集中於同一區域，此時 v_3 之救災效益更改為 4；(d)與根節點和 v_2 、 v_4 相鄰的合法候選節點為 v_1 和 v_3 ，因為 v_1 為兩者之中 profit 最大的基地台，因此挑選 v_1 配置 CRP。應急修復包個數已配置完畢，因此演算法結束。

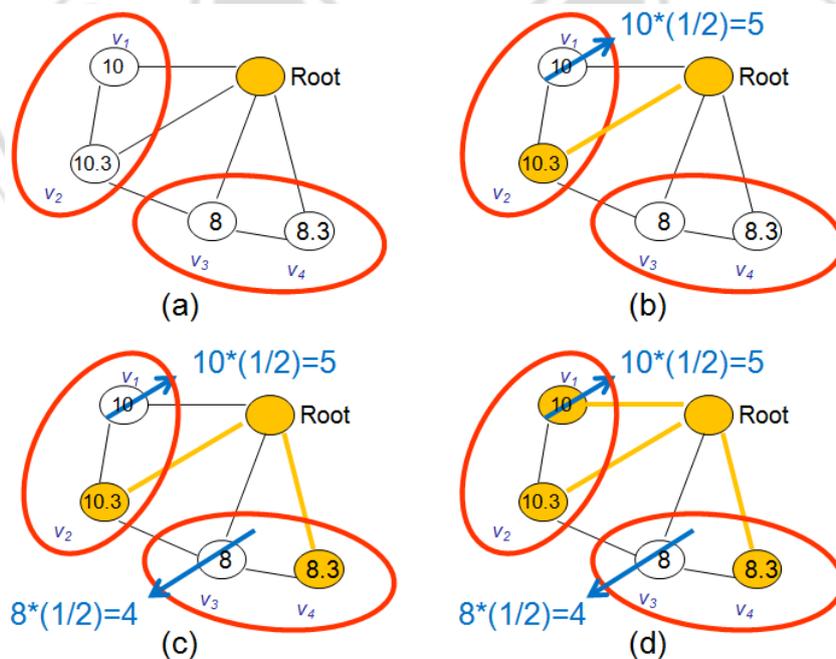


圖 42、CCNTD-DC 演算法範例

第五章、效能評估

5.1、實驗目的

我們以電腦模擬的方式，評估 CCN Topology Design – Depth Bounded Mutually Exclusive(CCNTD-DBME)演算法、CCN Topology Design – Depth Controlled Mutually Exclusive(CCNTD-DCME)演算法及 CCN Topology Design –Depth Controlled(CCNTD-DC)演算法的效能，並與暴力法求得之最佳解比較。效能評估指標為總效益(total profit)、樹深度(depth of CCN FT)、總加權效益(weighted profit) (註，以 Quality Entropy 加權，加權值越小越好)、服務涵蓋率(service coverage) 及效益涵蓋率(profit coverage)等。

5.2、實驗環境

我們利用 C 語言實作 CCNTD-DBME、CCNTD-DCME 和 CCNTD-DC 等三個演算法，並隨機產生大量模擬案例，憑以計算各演算法在不同環境條件下之效能。使用的電腦軟硬體規格如下：

- 處理器：Pentium(R) Dual-Core CPU E6600 @3.06GHz 2.53GHz
- 記憶體：2.00 GB
- 系統類型：Win7 32bit
- 開發環境：DEV C++

5.3、 實驗說明

我們利用電腦模擬評估三種演算法之效能，實驗一為小規模實驗，利用五種不同評估指標比較三種演算法；實驗二則進行大規模實驗運算，藉由實驗的結果，分析出不同情況所適合的模型。

5.4、 實驗一：小規模實驗

我們利用隨機的方式，分別產生 10 個不同的小規模案例，每一個 case 不僅只有圖，還有 K、B、P、W...等其他參數。

5.4.1、 評估指標

實驗結果以以下之評估指標進行評估：

- total profit of CCN FT: 演算法產生之 CCN FT 所有節點的效益參數之加總。
- depth of CCN FT: 演算法產生之 CCN FT 所具有的樹深度值。
- weighted profit: 演算法產生之 CCN FT 所有節點的節點加權效益之加總。
- service coverage (服務涵蓋率): 演算法產生之 coverage of CCN FT。
- profit coverage (效益涵蓋率): $\text{profit coverage} = \frac{\text{total profit of CCN FT}}{\text{total profit of all groups}} \dots\dots\dots(3)$

5.4.2、 實驗參數設定

每個子實驗分別以隨機方式產生 10 個實驗案例為實驗的對象，我們假設同一區域內不同業者的基地台個數為 2 個，並以恢復該案例區域 50% 的基地台為目標來建立 CCN FT，換言之，各子實驗的 K 值為原圖大小的 1/2，B 為樹深之限制，N 為在相同的服務區域之節點(同一服務區域之節點其救災效益產生方式為：利用隨機的方式產生某一節點之救災效益，剩餘節點之救災效益與其值差距不超過正負百分之十)。效益參數為介於 1 至 10 之隨機常數，1 為最低效益，10 為最高

效益；邊之權重參數介於 1 至 5 之隨機常數，分別進行三個實驗，其他參數如表 5 之說明：

表 5、實驗一：實驗參數設定

子實驗名稱	Graph Size		K	B	N
	Number of nodes	Number of edges			
1(a)	10	20	5	2~4	2
1(b)	20	40	10	3~5	2
1(c)	30	60	15	4~6	2

其中，當圖形大小達 20 個點以上時，暴力法無法在有效時間內獲得運算結果，因此，以 CCNTD-DBME 演算法、CCNTD-DCME 演算法及 CCNTD-DC 演算法三者進行比較。

5.4.3、實驗結果

- 實驗 1(a)：10 nodes graphs，K=5，N=2

從圖 43 可以觀察出，CCNTD-DC 可獲得較大的總效益，在樹深度為 2 和 3 的限制條件之下，CCNTD-DBME 演算法在多數的例子中，獲得的總效益小於其它三者，而將樹深限制改為 4 後，某些案例所得到的總效益則優於 CCNTD-DCME，並且可獲得與 CCNTD-DC 及暴力法相當的總效益。此外，雖然暴力法可以保證取得最佳效益解，但暴力法求解的演算時間相當大(隨案例而異)，當案例中的節點個數較多時，即無法在有效時間內取得其解。

在樹深比較上，因為 CCNTD-DBME 需要經由人為設定才能控制所計算出的 CCN FT 的深度，較不實用；而 CCNTD-DCME 則會自動調整深度，較為實用，從圖 44 可以觀察出，在多數的案例之中，CCNTD-DCME 及 CCNTD-DC 所求得的 CCN FT 不會太深。如圖 45，若以總加權效益(weighted profit)為評估依據時，在多數的案例之中，CCNTD-DC 所得到的總加權效益較好。雖然 CCNTD-DC 可獲得較大的總加權效益，但以 CCN FT 的服務涵蓋率(service coverage)做為評估

指標時，如圖 46，CCNTD-DC 所求得的 CCN FT 其服務涵蓋率則明顯小於其它三者。

如圖 47，若以效益涵蓋率(profit coverage)為評估依據時，在多數的案例之中，CCNTD-DC 所得到的效益涵蓋率較好。

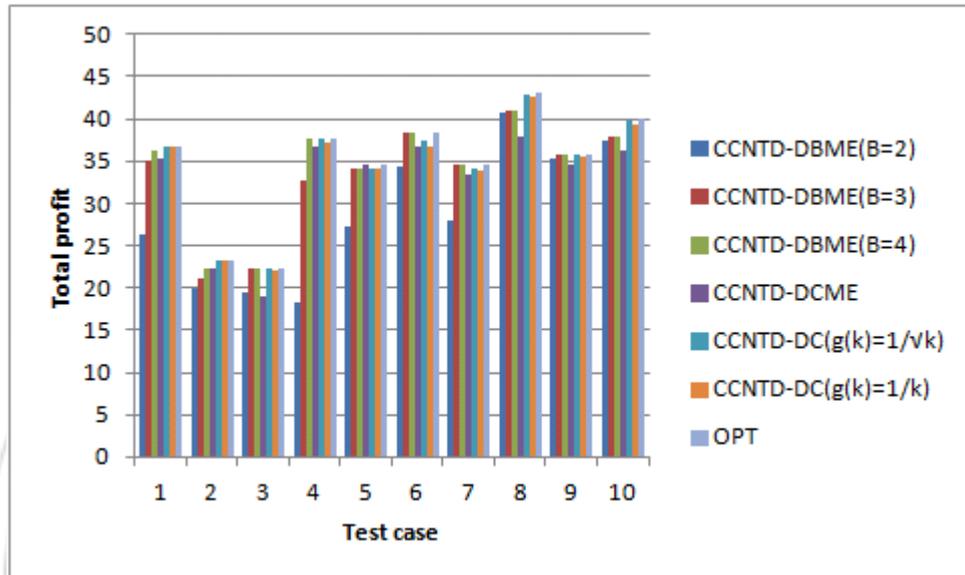


圖 43、實驗 1(a)：總效益比較

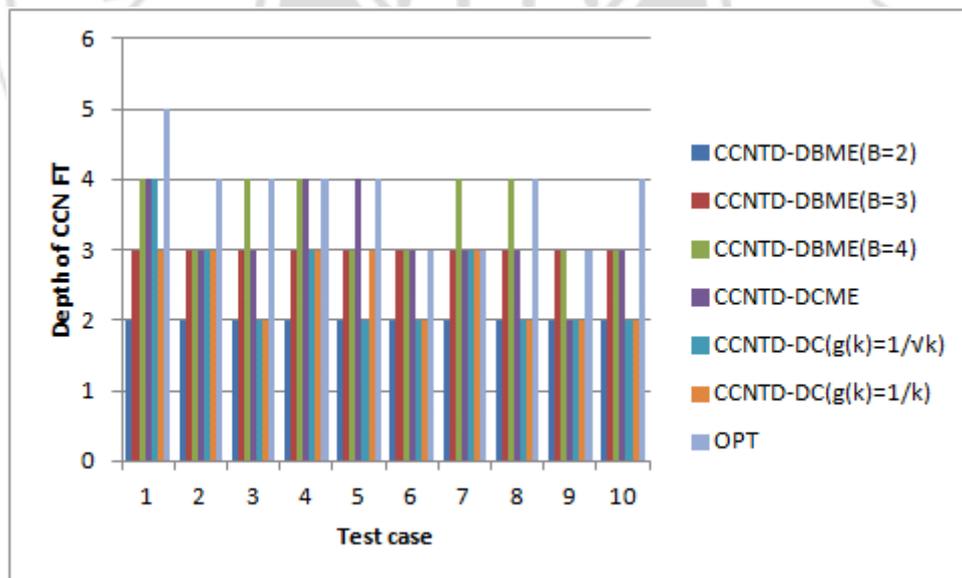


圖 44、實驗 1(a)：CCN FT 深度比較

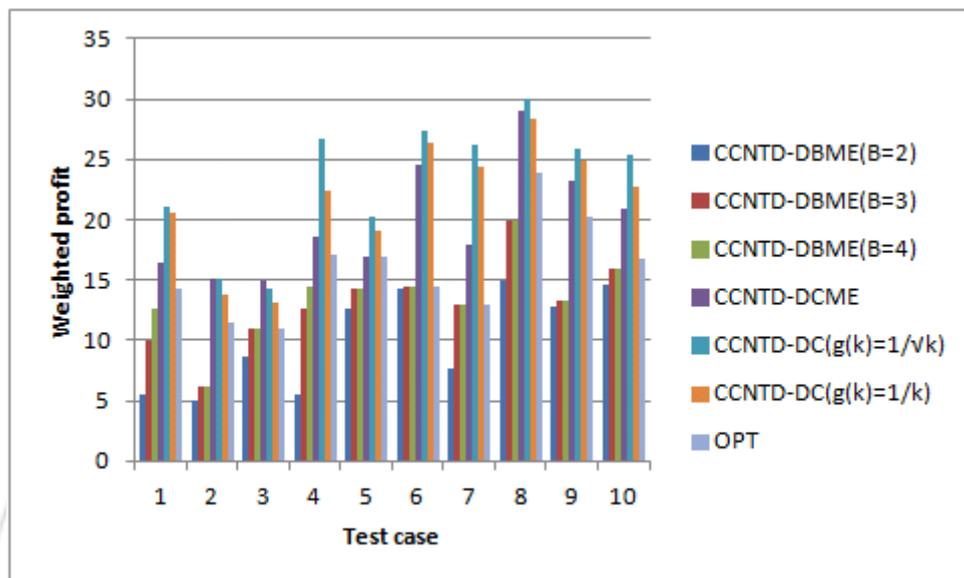


圖 45、實驗 1(a)：總加權效益比較

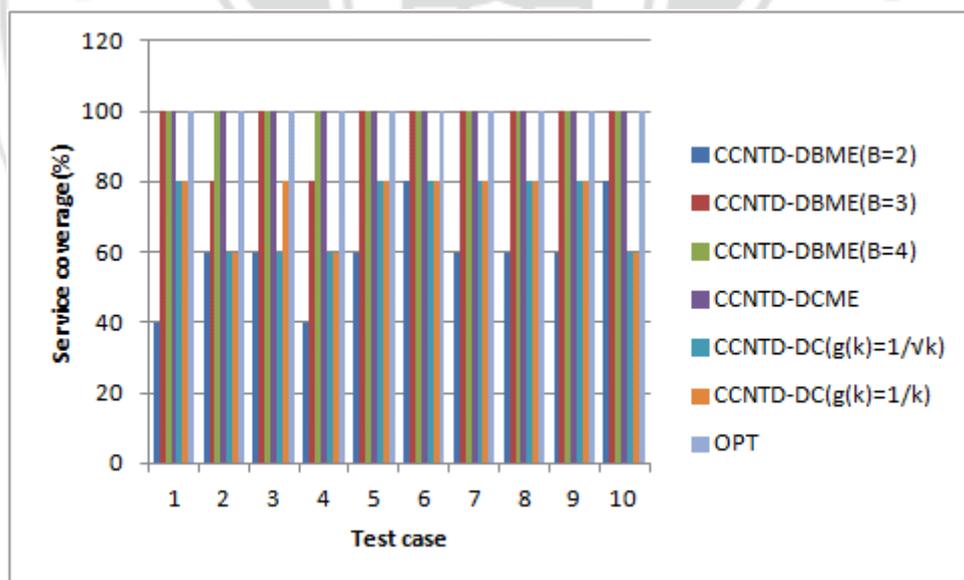


圖 46、實驗 1(a)：服務涵蓋率比較

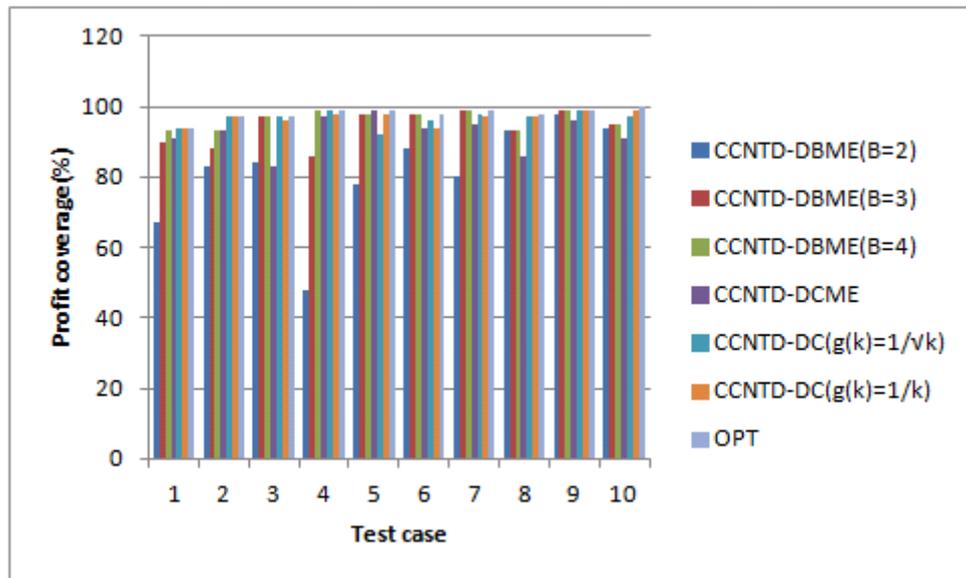


圖 47、實驗 1(a)：效益涵蓋率比較

- 實驗 1(b)：20 nodes graphs，K=10，N=2

從圖 48 可以觀察出，CCNTD-DC 可獲得較大的總效益，在樹深度為 3 和 4 的限制條件之下，CCNTD-DBME 演算法在多數的例子中，獲得的總效益小於其它三者，而將樹深限制改為 5 後，某些案例所得到的總效益則優於 CCNTD-DCME，並且可獲得與 CCNTD-DC 相當的總效益。

從圖 49 可以觀察出，在多數的案例之中，CCNTD-DCME 及 CCNTD-DC 所求得的 CCN FT 不會太深。如圖 50，若以總加權效益(weighted profit)為評估依據時，在多數的案例之中，CCNTD-DC 所得到的總加權效益較好。雖然 CCNTD-DC 可獲得較大的總加權效益，但以 CCN FT 的服務涵蓋率(service coverage)做為評估指標時，如圖 51，CCNTD-DC 所求得的 CCN FT 其服務涵蓋率則明顯小於其它三者。

如圖 52，若以效益涵蓋率(profit coverage)為評估依據時，在多數的案例之中，CCNTD-DC 所得到的效益涵蓋率較好。

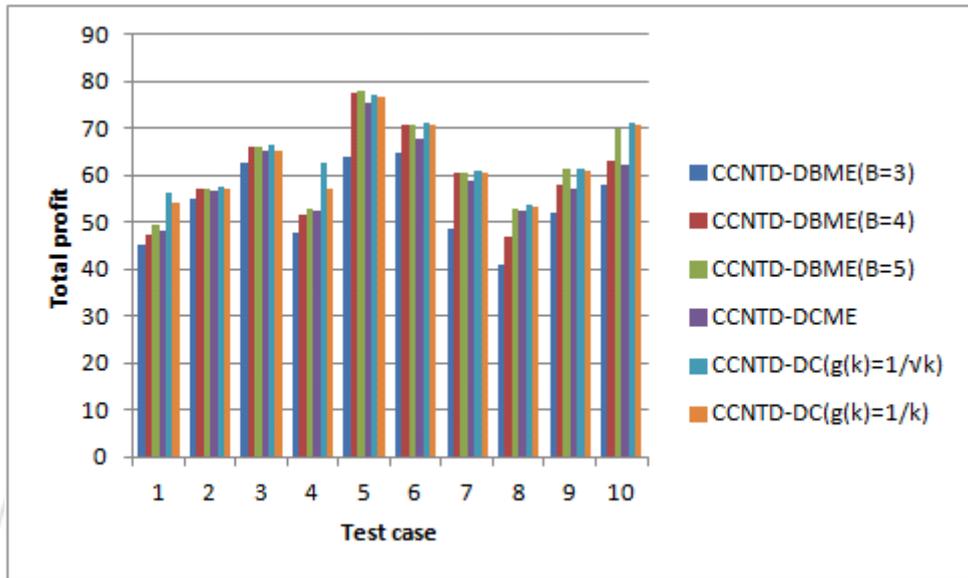


圖 48、實驗 1(b)：總效益比較

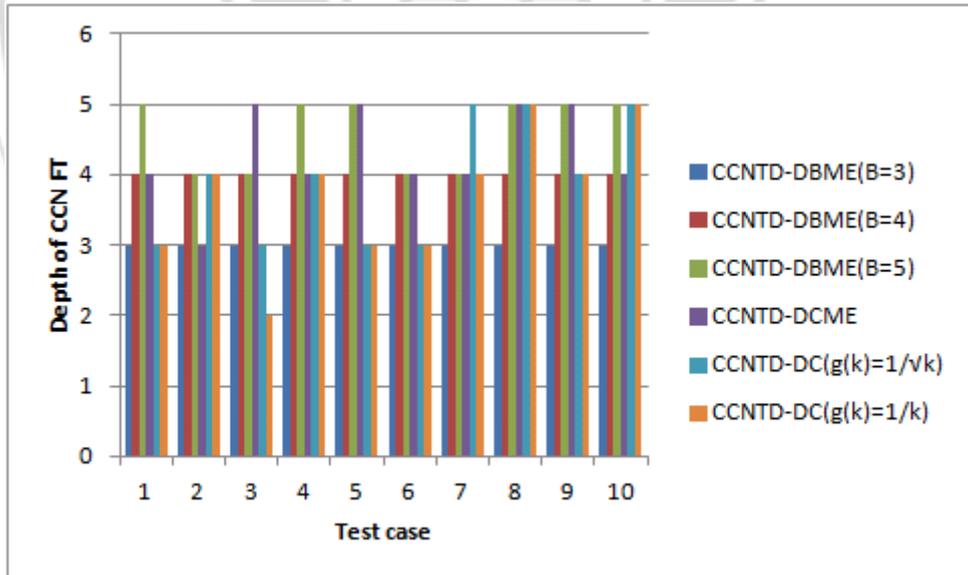


圖 49、實驗 1(b)：CCN FT 深度比較

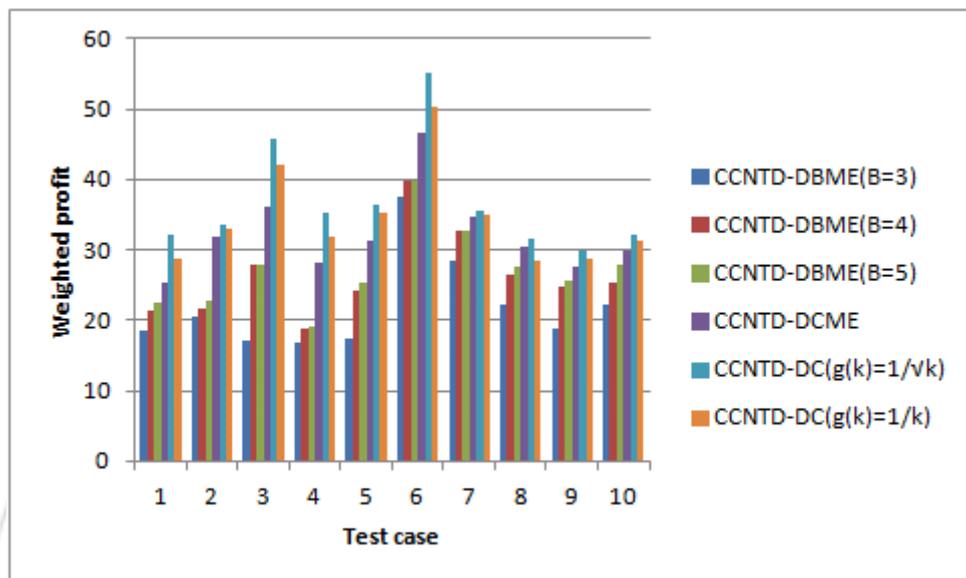


圖 50、實驗 1(b)：總加權效益比較

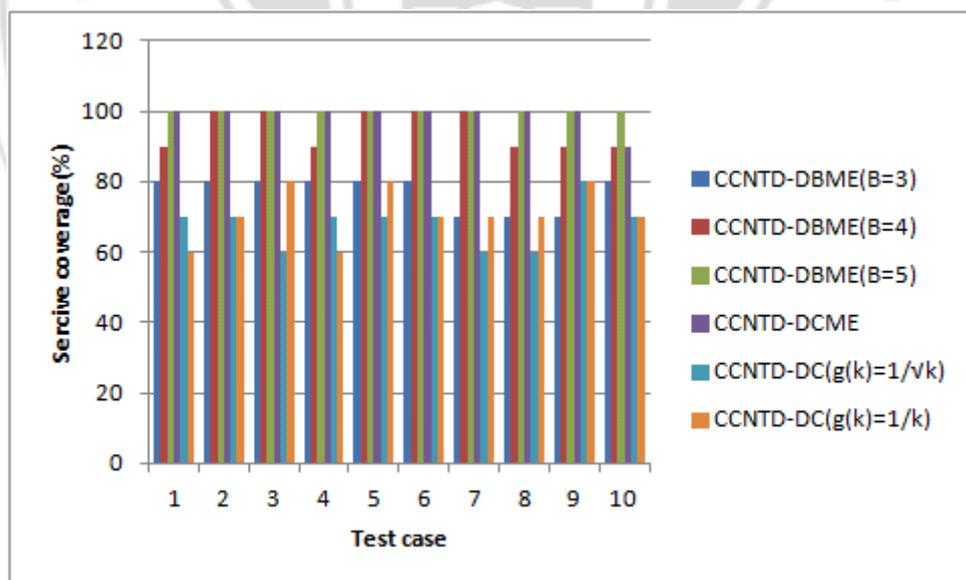


圖 51、實驗 1(b)：服務涵蓋率比較

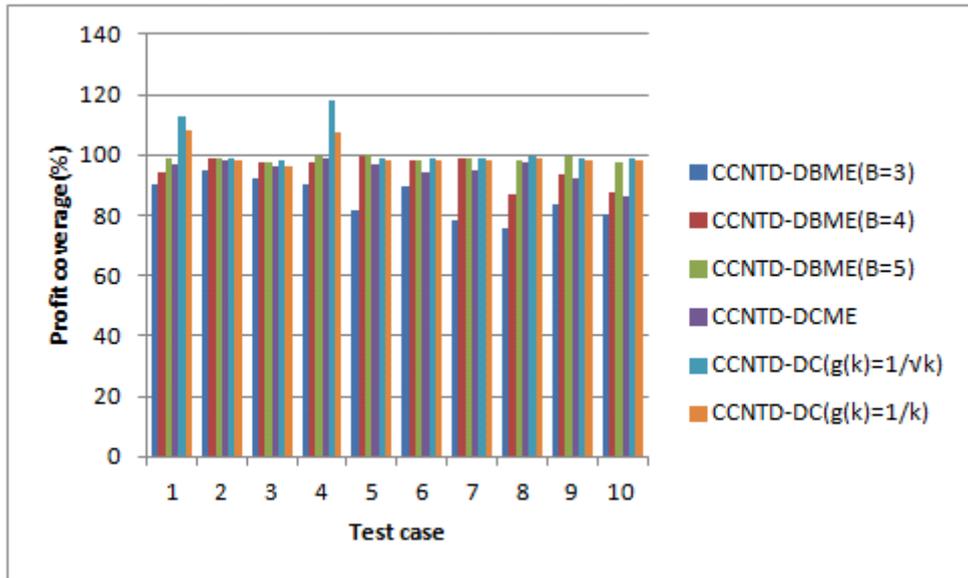


圖 52、實驗 1(b)：效益涵蓋率比較

● 實驗 1(c)：30 nodes graphs，K=15，N=2

從圖 53 可以觀察出，CCNTD-DC 可獲得較大的總效益，在樹深度為 4 和 5 的限制條件之下，CCNTD-DBME 演算法在多數的例子中，獲得的總效益小於其它三者，而將樹深限制改為 6 後，某些案例所得到的總效益則優於 CCNTD-DCME，並且可獲得與 CCNTD-DC 相當的總效益。

從圖 54 可以觀察出，在多數的案例之中，CCNTD-DCME 及 CCNTD-DC 所求得的 CCN FT 不會太深。如圖 55，若以總加權效益(weighted profit)為評估依據時，在多數的案例之中，CCNTD-DC 所得到的總加權效益較好。雖然 CCNTD-DC 可獲得較大的總加權效益，但以 CCN FT 的服務涵蓋率(service coverage)做為評估指標時，如圖 56，CCNTD-DC 所求得的 CCN FT 其服務涵蓋率則明顯小於其它三者。

如圖 57，若以效益涵蓋率(profit coverage)為評估依據時，在多數的案例之中，CCNTD-DC 所得到的效益涵蓋率較好。

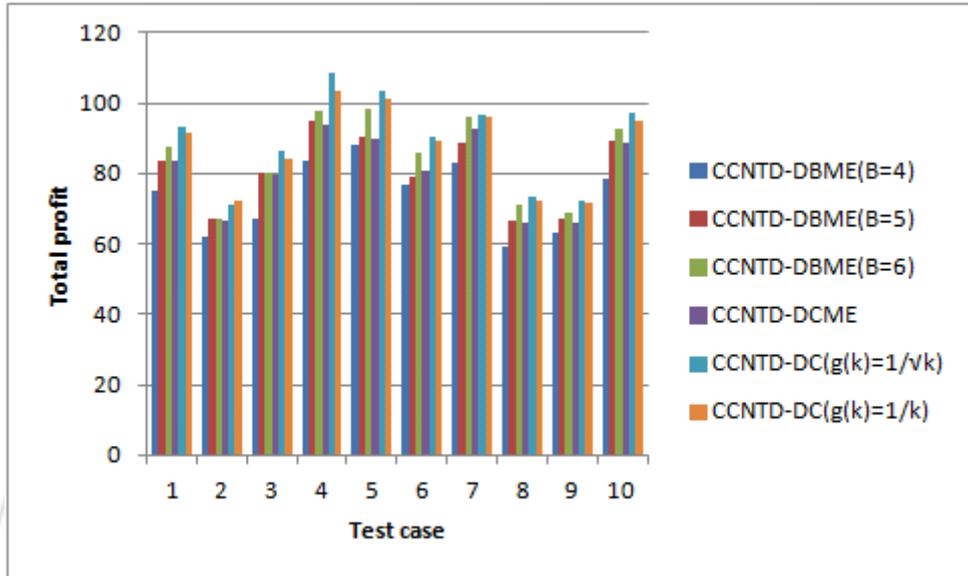


圖 53、實驗 1(c)：總效益比較

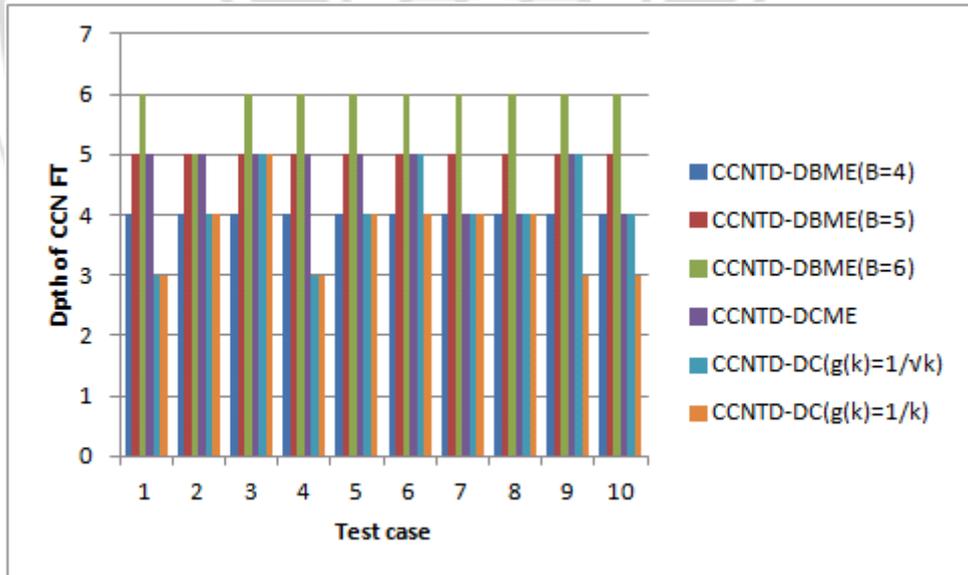


圖 54、實驗 1(c)：CCN FT 深度比較

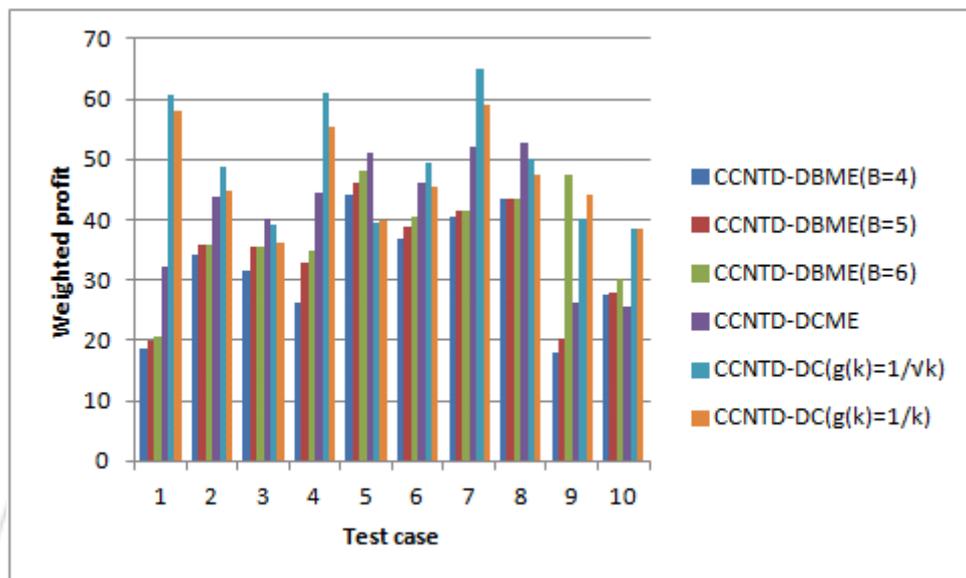


圖 55、實驗 1(c)：總加權效益比較

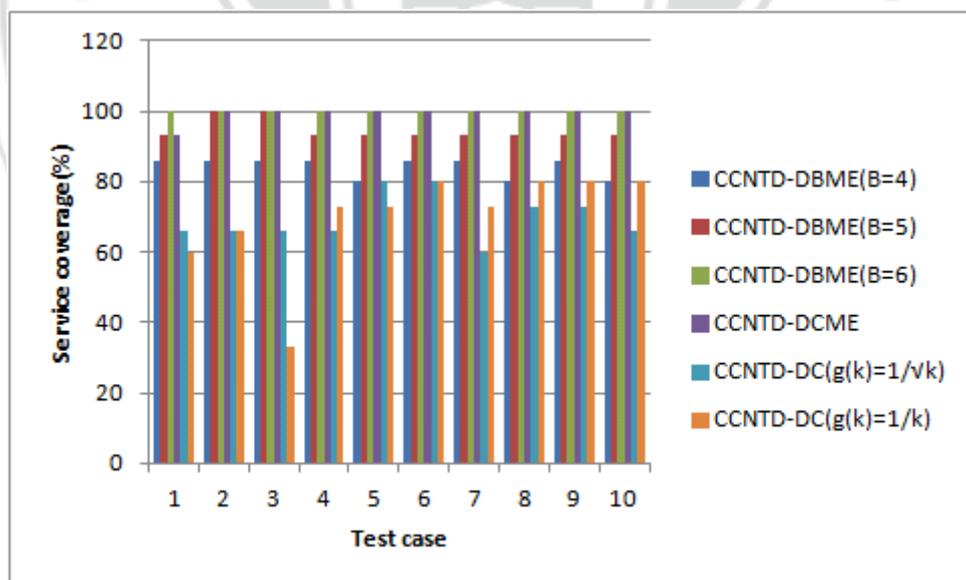


圖 56、實驗 1(c)：服務涵蓋率比較

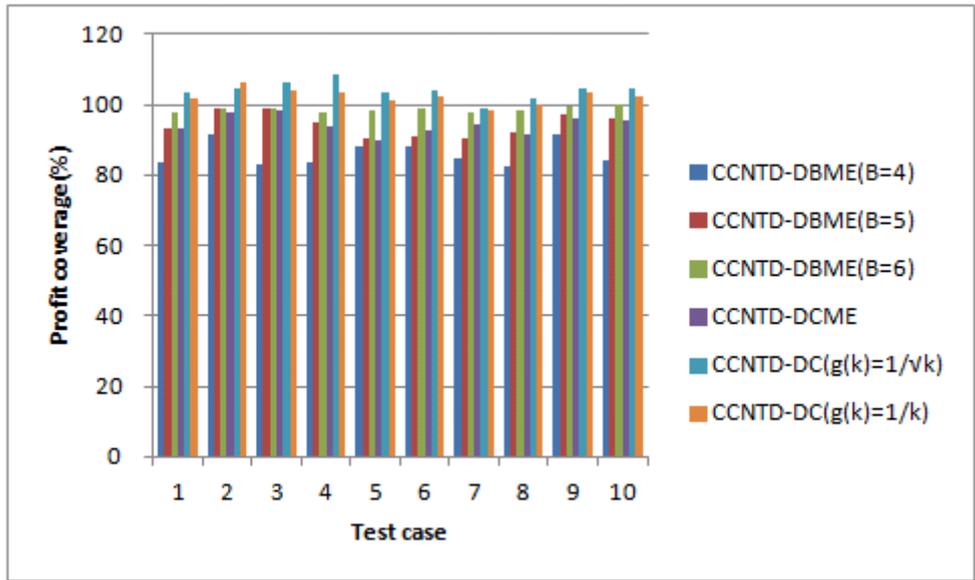


圖 57、實驗 1(c)：效益涵蓋率比較

5.5、實驗二：大規模實驗

我們利用隨機產生的方式，將各個子實驗分別產生出 50 個大規模的案例，並分別針對 CCNTD-DBME、CCNTD-DCME 及 CCNTD-DC 演算法進行運算，以比較三種演算法所求得的 CCN FT 之總效益、CCN FT 深度、總加權效益(weighted Profit)、服務涵蓋率(service coverage)及效益涵蓋率(profit coverage)。

5.5.1、評估指標

由於每個案例皆為獨立不相關，故實驗結果用以下之評估指標進行評估：

- profit gape：兩個演算法之效益差百分比

$$\text{profit gape} = \frac{\text{profit}(\text{algorithm1}) - \text{profit}(\text{algorithm2})}{\text{profit}(\text{algorithm2})} \dots\dots\dots(4)$$

- depth gape：兩個演算法之樹深差

$$\text{depth gape} = \text{depth of algorithm1} - \text{depth of algorithm2} \dots\dots\dots(5)$$

- weighted profit gape：兩個演算法之總加權效益差百分比

$$\text{weighted profit gape} = \frac{\text{weighted profit}(\text{algorithm1}) - \text{weighted profit}(\text{algorithm2})}{\text{weighted profit}(\text{algorithm2})} \dots\dots\dots(6)$$

- service coverage gap：兩個演算法之服務蓋範率差百分比

$$\text{service coverage gap} = \text{service coverage of algorithm1} - \text{service coverage of algorithm2} \dots \dots \dots (7)$$

- profit coverage gap：兩個演算法之效益涵蓋率差百分比

$$\text{profit coverage gap} = \text{profit coverage of algorithm1} - \text{profit coverage of algorithm2} \dots \dots \dots (8)$$

5.5.2、實驗參數設定

每個子實驗分別以隨機方式產生 50 個實驗案例為實驗的對象，我們假設同一區域內不同業者的基地台個數為 2~5 個，並以恢復該案例區域 25% 的基地台為目標來建立 CCN FT，換言之，各子實驗的 K 值為原圖大小的 1/4，B 為樹深之限制，N 為在相同的服務區域之節點(同一服務區域之節點其救災效益產生方式為：利用隨機的方式產生某一節點之救災效益，剩餘節點之救災效益與其值差距不超過正負百分之十)。效益參數為介於 1 至 10 之隨機常數，1 為最低效益，10 為最高效益；邊之權重參數介於 1 至 5 之隨機常數，分別進行兩個實驗，其他參數如表 6 之說明：

表 6、實驗二：實驗參數設定

子實驗名稱	Graph Size		K	B	N
	Number of nodes	Number of edges			
2(a)	100	500	25	5~7	2~5
2(b)	500	1000	125	8~10	2~5

5.5.3、實驗結果

- 實驗 2(a)：100 node graphs，K=25，B=5~7，N=2~5

如表 9、12，在此 50 個隨機案例中，CCNTD-DCME 與 CCNTD-DBME (B=7) 的 profit gap 最大值為 10.16，即在該案例當中，CCNTD-DCME 所得到的總效益比 CCNTD-DBME (B=7) 多 10.16，profit gap 的總平均值為 -1.56，即在這些隨機案

例中，CCNTD-DCME 所得到的總效益比 CCNTD-DBME (B=7)平均少 1.56；而以樹深度 depth gap 觀察則可發現，CCNTD-DCME 與 CCNTD-DBME (B=7)的 depth gap 總平均值為-1.02，即在這些隨機案例中，CCNTD-DCME 產生之樹深比 CCNTD-DBME(B=7)平均少 1.02。

若從 weighted profit gap 觀察可發現 CCNTD-DCME 所得到的 weighted profit 比 CCNTD-DBME(B=7)平均多 8.56；從 service coverage gap 觀察可發現 CCNTD-DCME 所得到的 service coverage 比 CCNTD-DBME(B=7)平均多 1.04；從 profit coverage gap 觀察則可發現 CCNTD-DCME 所得到的 profit coverage 比 CCNTD-DBME(B=7)平均少 2。

表 7、實驗 2(a)：實驗結果(一)

實驗 2(a)：100 Node Graphs, K=25															
Case No.	CCNTD-DBME(B=5)					CCNTD-DBME(B=6)					CCNTD-DBME(B=7)				
	P	D	W	S	PC	P	D	W	S	PC	P	D	W	S	PC
1	187.60	5	84.38	67	88	196.20	6	86.21	70	93	197.00	6	87.26	73	93
2	160.28	5	63.57	71	77	170.51	6	64.39	75	82	176.67	7	66.78	78	85
3	227.89	5	43.30	68	89	233.94	6	54.30	75	92	238.66	7	56.75	78	94
4	163.40	5	50.56	69	84	178.40	6	52.97	72	91	182.70	7	55.23	75	94
5	212.21	5	57.86	72	88	223.54	6	64.31	75	93	232.40	7	65.81	75	97
6	168.00	5	78.00	67	79	172.90	6	78.63	70	82	179.90	7	79.23	73	85
7	196.09	5	60.34	69	86	204.67	6	65.88	72	90	219.36	7	67.97	75	97
8	218.37	5	82.78	76	90	227.54	6	84.52	80	94	235.00	7	86.48	83	97
9	228.99	5	84.72	67	86	236.99	6	75.21	70	89	245.15	7	78.36	73	93
10	217.83	5	95.63	71	88	228.28	5	98.12	75	92	231.14	6	99.63	78	93
11	245.60	5	98.23	71	90	259.69	6	100.76	75	95	264.68	7	103.45	78	97
12	255.98	5	104.88	69	93	257.18	6	105.90	72	93	262.77	7	106.04	75	95
13	202.63	5	100.34	67	83	212.84	6	109.62	70	87	223.74	7	111.96	73	91
14	166.80	5	68.72	72	66	170.35	6	70.36	75	67	178.03	7	72.36	75	70
15	169.73	5	78.62	69	75	172.23	6	80.62	72	76	180.32	7	86.23	75	80
16	206.25	5	103.35	68	83	222.35	6	106.96	75	90	232.26	7	112.37	78	94
17	203.90	5	83.95	71	87	207.12	5	87.44	75	88	215.36	6	89.62	78	92
18	197.10	5	90.23	67	87	200.10	6	92.33	70	89	205.70	7	94.88	73	91
19	221.90	5	93.87	67	88	223.94	6	95.52	70	89	230.60	7	98.63	73	91
20	193.82	5	106.01	71	82	194.49	6	108.98	75	83	207.53	7	109.50	78	88
21	166.70	5	80.40	68	84	170.40	6	83.52	75	86	178.00	7	86.48	78	90
22	192.66	5	88.54	69	86	205.05	6	90.18	72	91	209.22	7	93.22	75	93
23	173.79	5	67.37	72	80	179.25	6	69.94	75	83	186.39	6	72.77	75	86
24	204.39	5	90.81	67	87	211.53	6	93.85	70	90	215.29	7	95.54	73	92
25	168.26	5	29.24	69	75	176.43	6	39.17	72	79	181.52	7	41.35	75	81
26	172.80	5	73.90	76	73	178.80	6	75.93	80	75	182.80	7	78.93	83	77
27	229.78	5	77.11	69	87	238.47	5	81.82	72	91	239.02	6	83.65	75	91
28	204.82	5	85.16	68	84	211.50	6	84.04	75	86	227.55	7	86.75	78	93
29	211.05	5	102.70	71	86	221.82	6	103.62	75	90	229.86	7	105.75	78	93
30	269.45	5	127.94	67	93	272.56	6	132.54	70	94	277.65	7	138.54	73	95
31	153.00	5	79.78	69	79	155.30	6	81.26	72	80	159.60	7	83.33	75	82
32	209.17	5	72.68	76	89	211.59	6	69.97	80	90	221.68	7	71.33	83	94
33	228.27	5	53.32	67	90	236.74	6	56.01	70	94	242.38	6	57.34	73	96
34	191.29	5	63.12	71	81	194.22	6	69.09	75	82	213.79	7	72.36	78	91
35	226.59	5	75.41	68	88	237.63	6	78.36	75	92	241.37	7	82.48	78	94

36	169.70	5	66.47	69	80	179.10	6	68.62	72	84	186.60	7	73.32	75	88
37	219.36	5	70.21	72	82	228.26	6	72.52	75	86	233.10	7	73.68	75	88
38	195.39	5	87.39	67	84	199.77	6	88.08	70	86	214.75	7	92.22	73	93
39	221.21	5	159.97	69	87	226.21	6	162.34	72	89	235.21	7	166.97	75	92
40	232.25	5	74.80	76	90	239.69	6	78.03	80	93	243.69	7	82.87	83	95
41	174.52	5	85.30	67	84	183.40	6	87.52	70	88	189.40	7	88.50	73	91
42	223.73	5	113.75	71	92	231.86	5	116.52	75	96	236.37	6	121.54	78	98
43	219.88	5	82.79	68	93	224.88	6	84.52	75	95	231.88	7	86.25	78	98
44	218.58	5	72.28	69	85	223.81	6	74.32	72	87	231.54	7	76.36	75	90
45	176.06	5	52.50	72	82	188.97	6	58.32	75	87	191.55	7	62.33	75	89
46	151.00	5	62.80	67	76	155.60	6	64.25	70	78	172.10	7	68.52	73	86
47	210.55	5	87.21	69	89	219.39	6	88.65	72	93	219.39	7	92.52	75	93
48	177.37	5	79.48	67	72	180.67	5	83.14	70	74	182.52	6	85.21	73	74
49	158.62	5	74.01	72	76	167.41	6	76.03	75	80	177.95	7	80.25	75	86
50	184.30	5	63.34	69	91	189.60	6	66.23	72	94	196.60	7	71.58	75	97

P: Profit、D: Depth、W: Weighted Profit、S: Service Coverage、PC: Profit Coverage

表 8、實驗 2(a)：實驗結果(二)

Case No.	CCNTD-DCME					CCNTD-DC($g(k)=1/\sqrt{k}$)					CCNTD-DC($g(k)=1/k$)				
	P	D	W	S	PC	P	D	W	G	PC	P	D	W	S	PC
1	192.00	6	93.20	74	91	211.50	4	111.96	52	100	208.50	5	107.46	63	98
2	178.60	5	83.32	80	85	198.69	4	96.38	50	95	200.70	5	98.40	53	96
3	235.46	6	64.33	79	92	234.21	5	111.55	53	92	242.17	4	121.52	59	95
4	172.20	6	59.21	77	88	193.30	3	120.00	51	99	204.60	4	110.81	54	105
5	217.90	6	74.92	77	91	225.46	4	102.08	54	94	223.57	4	98.07	53	93
6	179.60	5	90.06	74	85	207.90	3	114.89	47	98	209.90	5	95.10	49	99
7	206.36	6	70.19	73	91	237.06	4	122.05	48	104	236.45	5	109.24	51	104
8	220.97	6	99.13	84	91	258.48	4	127.26	46	107	247.03	4	107.41	47	102
9	224.26	6	83.21	75	85	253.37	4	148.64	53	96	252.35	4	129.91	51	95
10	216.93	6	103.14	80	87	217.10	3	128.73	52	88	213.91	4	128.73	53	86
11	253.98	6	110.83	79	93	256.57	4	128.36	43	94	262.13	5	118.52	48	96
12	242.47	5	112.44	77	88	253.29	4	117.65	41	92	261.15	5	103.72	43	95
13	235.72	6	124.64	75	96	256.90	5	126.43	43	105	257.93	5	113.55	44	105
14	177.80	6	79.71	76	70	197.20	4	84.65	48	78	207.50	4	97.27	51	82
15	175.64	6	94.19	75	78	197.34	4	98.17	44	87	207.68	4	103.20	45	92
16	218.70	6	106.95	78	88	242.17	4	116.57	48	98	236.67	5	106.26	49	95
17	210.20	6	97.94	78	89	227.40	4	113.68	41	97	229.34	5	100.17	43	98
18	206.40	6	94.79	74	91	216.60	4	103.95	45	96	214.70	4	95.90	47	95
19	225.81	6	99.42	75	89	246.26	4	123.46	43	97	239.67	4	113.18	41	95
20	228.61	5	113.98	80	97	212.31	3	126.42	45	90	214.97	4	117.94	47	91
21	180.70	6	97.35	79	91	194.10	4	98.80	44	98	188.90	5	89.56	46	95
22	213.78	6	94.14	75	95	218.83	4	104.94	47	97	214.62	5	100.51	49	95
23	182.41	6	80.39	75	84	192.26	5	92.69	46	89	188.97	5	94.33	47	87
24	218.44	6	99.83	74	93	233.95	4	120.38	51	100	220.41	5	110.54	47	94
25	176.23	6	43.32	76	79	187.31	4	88.54	45	84	179.59	5	86.24	42	81
26	180.70	6	88.60	83	76	221.30	5	120.71	53	93	206.50	4	105.52	49	87
27	235.51	5	100.80	75	90	251.98	4	131.30	51	96	248.89	4	129.75	53	95
28	218.54	6	102.39	79	89	237.97	4	134.59	45	97	232.05	4	128.51	43	95
29	228.28	6	112.62	78	93	232.84	4	135.37	48	95	241.65	5	132.67	51	98
30	278.05	6	148.08	73	96	283.10	4	151.23	51	97	288.08	5	140.21	48	99
31	162.40	6	86.06	76	84	186.60	5	94.45	47	96	184.30	5	88.62	45	95
32	218.83	6	87.59	83	93	222.51	5	112.51	45	95	225.15	3	106.48	47	96
33	231.99	6	67.95	75	92	239.81	4	115.02	43	95	245.83	4	109.97	45	97
34	208.18	5	89.10	78	88	213.37	4	92.76	51	90	209.84	3	90.85	49	89
35	239.53	6	86.51	79	93	247.68	4	122.77	50	96	242.99	4	124.92	50	94
36	178.40	6	77.93	75	84	203.70	5	83.96	56	96	195.50	5	80.22	54	92
37	226.13	6	85.76	76	85	245.62	5	122.37	51	92	243.74	4	114.73	52	92
38	212.21	6	107.35	73	91	227.25	5	115.56	54	98	210.55	5	101.50	52	91
39	232.76	6	166.97	76	91	248.43	5	170.52	51	97	242.28	5	165.48	49	95
40	239.83	6	76.55	84	93	253.17	5	115.43	46	99	246.01	5	125.83	48	96
41	182.80	5	95.53	73	88	196.20	5	98.97	49	94	191.60	5	97.56	51	92
42	229.86	6	120.30	80	95	239.74	5	127.17	46	99	238.10	3	123.28	49	98

43	227.27	5	100.77	78	96	241.36	4	128.16	51	102	239.53	5	117.98	53	101
44	226.85	6	94.33	79	88	249.68	4	126.99	48	97	245.46	5	117.25	49	95
45	182.73	6	70.38	77	85	205.62	5	87.29	53	95	208.47	4	76.83	51	97
46	182.10	5	72.35	79	91	185.70	5	85.72	43	93	187.10	5	73.65	51	94
47	212.05	6	102.03	76	90	219.58	4	112.63	48	93	216.76	4	99.62	46	92
48	200.38	6	87.35	76	82	212.84	5	97.08	43	87	215.87	5	94.14	46	88
49	179.75	6	80.87	75	86	186.61	5	99.83	46	90	182.41	5	85.51	48	88
50	195.60	6	65.27	75	97	205.90	5	92.03	47	102	209.50	4	86.33	51	104

P: Profit、D: Depth、W: Weighted Profit、S: Service Coverage、PC: Profit Coverage

表 9、實驗 2(a)：總效益、樹深與總加權效益比較(一)

	Profit Gape			Depth Gape			Weighted Profit Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=5)	-5.28	20.60	5.59	0	1	0.82	-1.78	48.57	17.06
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=6)	-5.72	17.54	1.95	-1	1	-0.08	-1.90	29.40	12.40
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=7)	-8.52	10.16	-1.56	-2	0	-1.02	-8.82	24.77	8.65

表 10、實驗 2(a)：總效益、樹深與總加權效益比較(二)

	Profit Gape			Depth Gape			Weighted Profit Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC($g(k)=1/\sqrt{k}$) VS CCNTD-DCME	-7.13	22.47	7.22	-3	0	-1.54	1.44	104.39	26.42
CCNTD-DC($g(k)=1/k$) VS CCNTD-DCME	-5.97	18.82	6.57	-3	0	-1.34	-8.9	99.08	19.45

表 11、實驗 2(a)：總效益、樹深與總加權效益比較(三)

	Profit Gape			Depth Gape			Weighted Profit Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC($g(k)=1/\sqrt{k}$) VS CCNTD-DBME(B=7)	-6.07	21.06	5.48	-4	-1	-2.56	2.13	117.27	37.39
CCNTD-DC($g(k)=1/k$) VS CCNTD-DBME(B=7)	-7.45	18.27	4.86	-4	-1	-2.36	-5.44	114.13	29.79

表 12、實驗 2(a)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(一)

	Service Coverage Gape			Profit Coverage Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=5)	3	12	7	-5	15	5
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=6)	0	9	3.68	-8	9	-2
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=7)	-2	6	1.04	-8	9	-2

表 13、實驗 2(a)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(二)

	Service Coverage Gape			Profit Coverage Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC($g(k)=1/\sqrt{k}$) VS CCNTD-DCME	-38	-19	-28.04	-7	17	6
CCNTD-DC($g(k)=1/k$) VS CCNTD-DCME	-36	-10	-26.92	-6	17	6

表 14、實驗 2(a)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(三)

	Service Coverage Gape			Profit Coverage Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC($g(k)=1/\sqrt{k}$) VS CCNTD-DBME(B=7)	-38	-19	-28	-5	16	5
CCNTD-DC($g(k)=1/k$) VS CCNTD-DBME(B=7)	-36	-10	-26.92	-7	14	4

- 實驗 2(b)：500 node graphs，K=125，B=8~10，N=2~5

如表 18、21，在此 50 個隨機案例中，CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)與 CCNTD-DCME 的 profit gape 最大值為 14.9，即在該案例當中，CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)所得到的總效益比 CCNTD-DCME 多 14.9，profit gape 的總平均值為 6.07，即在這些隨機案例中，CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)所得到的總效益比 CCNTD-DCME 平均多 6.07；而從樹深度 depth gape 觀察之，CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)與 CCNTD-DCME 的 depth gape 總平均值為-1.12，即在這些隨機案例中，CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)產生之樹深比 CCNTD-DCME 平均少 1.12。

若從 weighted profit gape 觀察可發現 CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)所得到的 weighted profit 比 CCNTD-DCME 平均多 25.18；從 service coverage gape 觀察可發現 CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)所得到的 service coverage 比 CCNTD-DCME 平均少 30；從 profit coverage gape 觀察可發現 CCNTD-DC ($g(k)=1/\sqrt{k}$)所得到的 profit coverage 比 CCNTD-DCME 平均多 5。

表 15、實驗 2(b)：實驗結果(一)

實驗 2(b)：500 Node Graphs, K=125															
Case No.	CCNTD-DBME(B=8)					CCNTD-DBME(B=9)					CCNTD-DBME(B=10)				
	P	D	W	S	PC	P	D	W	S	PC	P	D	W	S	PC
1	878.30	8	265.63	79	78	911.00	9	268.32	81	81	930.80	10	270.33	82	82
2	1095.74	8	304.08	86	85	1113.43	9	312.85	87	87	1123.70	10	316.15	87	87
3	762.50	8	224.67	90	75	788.10	9	228.52	91	78	793.20	10	232.60	91	78
4	984.13	8	270.63	86	88	994.84	9	277.25	87	89	1001.56	10	282.45	87	89
5	1079.98	8	263.72	84	96	1088.89	9	268.52	85	97	1102.06	10	275.84	85	98
6	1063.09	8	332.29	90	97	1068.75	9	338.47	90	97	1079.75	10	345.25	92	98
7	853.80	7	311.03	84	80	864.10	8	316.15	85	81	848.50	9	318.47	85	79
8	954.00	8	338.83	81	87	1016.16	9	342.26	82	93	1022.87	10	346.85	82	93
9	969.51	8	334.23	85	86	1026.46	9	338.15	87	91	1035.00	10	342.17	87	92
10	1011.03	8	347.55	83	94	1024.57	9	354.85	83	95	1030.23	10	364.51	84	96
11	839.10	8	267.85	85	93	852.80	9	272.64	87	95	878.20	10	281.15	87	97
12	852.91	8	303.27	81	84	915.77	9	309.47	82	90	930.39	10	321.12	82	92
13	859.47	8	288.96	83	89	900.64	9	282.18	82	93	937.07	10	280.73	83	97
14	838.50	8	250.61	86	94	843.10	9	253.77	87	95	845.40	10	258.15	88	95
15	881.08	8	330.22	73	81	908.89	9	328.15	73	84	919.20	10	331.54	74	84
16	986.39	7	209.81	87	92	1006.39	8	211.25	88	94	1015.81	9	213.85	88	95
17	1076.45	8	323.42	88	90	1069.99	9	324.95	89	89	1087.59	10	336.42	90	91
18	809.70	8	290.64	81	83	829.10	9	299.52	81	85	835.90	10	304.14	83	85
19	923.24	8	367.28	81	90	971.27	9	372.52	81	95	976.69	10	384.25	81	95
20	792.50	8	261.27	82	80	805.80	9	268.40	83	81	816.00	10	272.61	84	82
21	833.08	8	241.59	85	83	835.90	9	243.58	86	83	841.80	10	245.21	87	84
22	1028.51	8	349.26	81	94	1043.58	9	351.25	82	95	1056.65	10	358.51	82	96
23	1070.16	8	328.52	85	95	1091.10	9	338.89	85	97	1096.10	10	341.41	87	98
24	889.20	8	266.40	86	95	901.20	9	269.42	87	96	914.70	10	272.51	87	98
25	1058.06	8	290.50	87	96	1066.02	9	291.52	88	97	1071.92	10	292.06	89	98
26	1116.67	8	335.58	85	94	1134.58	9	339.84	86	96	1151.08	10	342.75	87	97
27	785.00	8	247.45	86	91	812.90	9	248.88	86	94	836.20	10	251.52	86	97
28	990.08	8	294.50	86	91	1004.33	9	296.78	87	93	1032.88	10	298.41	87	95
29	1104.71	8	301.45	89	93	1116.80	9	303.87	90	94	1123.34	10	309.12	91	95
30	1083.88	8	370.09	80	95	1092.78	9	368.62	81	95	1111.89	10	372.85	81	97
31	955.60	7	402.38	92	93	962.59	8	403.48	92	93	967.05	9	422.74	93	94
32	811.60	8	231.62	86	89	822.00	9	228.25	87	90	829.10	10	227.62	87	91
33	993.07	8	282.71	87	81	1023.81	9	288.41	87	83	1045.07	10	291.45	88	85
34	946.80	8	240.26	87	81	949.97	9	243.52	88	81	983.46	10	247.15	89	84
35	966.93	8	254.18	85	92	1008.49	9	259.08	87	96	1018.27	10	261.79	87	97
36	970.82	8	349.64	86	89	982.33	9	350.13	88	90	991.62	10	353.87	88	90
37	809.90	8	205.85	92	78	812.60	9	206.09	92	78	815.30	10	205.19	93	78
38	970.92	8	324.76	92	83	1003.23	9	325.09	92	85	1026.14	10	326.68	93	87
39	930.45	8	211.08	85	86	939.43	9	218.89	85	86	944.33	10	223.15	86	87
40	825.80	8	314.85	87	83	831.80	9	316.44	88	84	838.40	10	325.83	88	84
41	936.91	8	354.29	83	94	947.30	9	358.14	84	95	958.34	10	362.41	85	96
42	1062.61	8	328.96	88	91	1105.37	9	329.07	88	94	1128.53	10	331.14	88	96
43	973.09	8	394.64	87	93	991.41	9	398.69	87	95	1004.38	10	402.19	88	96
44	924.41	7	361.72	90	86	939.32	8	371.62	92	88	949.07	9	373.90	91	89
45	809.30	8	179.46	88	81	841.70	9	181.90	89	84	829.70	10	183.64	90	83
46	997.48	8	267.62	87	89	1009.71	9	268.13	89	90	1029.07	10	272.34	89	92
47	924.36	8	329.46	86	93	928.53	9	331.81	87	93	945.53	10	336.17	88	95
48	836.10	8	270.75	80	77	839.10	9	272.36	82	77	842.60	10	287.51	83	78
49	907.35	8	336.55	87	84	912.34	9	338.14	88	84	922.58	10	341.77	89	85
50	791.80	8	270.54	87	81	812.10	9	276.55	88	83	821.90	10	281.49	88	84

P: Profit、D: Depth、W: Weighted Profit、S: Service Coverage、PC: Profit Coverage

表 16、實驗 2(b)：實驗結果(二)

實驗 2(b)：500 Node Graphs, K=125															
Case No.	CCNTD-DCME					CCNTD-DC(g(k)=1/√k)					CCNTD-DC(g(k)=1/k)				
	P	D	W	S	PC	P	D	W	S	PC	P	D	W	S	PC
1	924.00	8	284.14	81	82	1028.8	7	402.99	55	91	1009.40	7	388.12	63	89
2	1098.95	7	311.68	88	85	1187.61	7	382.42	55	92	1160.50	6	377.33	56	90
3	784.10	7	251.25	91	78	899.5	7	328.12	65	89	863.30	7	290.96	67	85
4	996.83	8	283.92	87	89	1013.98	6	397.56	59	90	1022.76	6	347.75	62	91
5	1081.70	9	297.54	86	96	1123.25	7	391.68	58	100	1115.50	7	357.36	57	99
6	1051.32	7	343.71	91	96	1064.43	6	396.15	61	97	1103.25	5	377.56	66	100
7	893.30	7	324.58	87	84	1005.3	7	343.46	61	94	945.90	7	306.11	64	89
8	1019.68	7	362.48	82	93	1032.25	6	400.42	53	94	1047.51	7	381.29	57	95
9	1075.69	8	348.09	87	96	1097.35	6	393.85	58	98	1108.05	6	399.16	57	99
10	1037.53	7	371.89	83	97	1062.08	6	430.03	56	99	1071.08	5	373.49	57	100
11	848.00	7	275.16	88	94	968.3	6	327.47	56	107	939.80	7	331.77	65	104
12	877.84	7	321.91	82	87	952.61	7	403.59	55	94	986.57	6	386.92	55	97
13	878.13	8	294.83	84	91	964.28	7	351.63	57	100	950.14	6	293.84	56	98
14	844.70	7	268.08	88	95	951.5	6	334.51	61	107	934.08	6	283.75	61	105
15	995.15	7	355.38	74	91	1010.66	7	399.04	46	93	1016.73	6	364.44	50	93
16	994.81	7	232.72	88	93	1021.57	5	373.44	58	95	1032.31	5	357.90	56	96
17	1076.38	8	353.48	90	90	1107.72	5	446.97	58	93	1114.58	5	401.93	55	93
18	831.50	7	301.45	82	85	908.3	7	374.31	56	93	913.00	6	323.32	54	93
19	975.78	7	378.63	83	95	1058.18	6	454.95	55	103	1090.30	6	357.76	53	106
20	814.40	6	274.23	84	82	844.8	6	337.28	54	85	838.60	5	288.25	58	84
21	838.50	7	259.27	87	83	890.8	7	366.69	60	88	902.00	6	322.79	57	89
22	1032.84	7	361.13	82	94	1058.47	5	402.89	55	96	1023.56	7	345.72	56	93
23	1081.21	7	331.43	87	96	1098.92	5	455.69	53	98	1101.26	6	386.66	58	98
24	896.30	8	276.65	87	96	972.5	7	369.18	61	104	960.60	5	318.03	59	102
25	1027.88	7	336.56	89	94	1025.85	5	404.69	62	94	992.20	7	387.70	60	90
26	1139.33	7	350.69	88	96	1164.6	6	415.25	56	98	1171.25	6	393.34	58	99
27	817.40	8	259.71	87	95	869.3	5	320.15	56	101	857.60	7	309.65	59	99
28	996.66	7	313.18	89	92	1039.05	6	340.47	57	96	1042.21	7	332.06	60	96
29	1119.74	7	308.95	90	94	1130.72	5	441.68	58	95	1127.90	6	366.95	59	95
30	1086.96	6	382.48	82	95	1146.33	7	442.17	50	100	1135.23	7	392.51	52	99
31	943.89	7	428.93	93	91	1012.46	6	526.36	56	98	1021.03	6	390.51	59	99
32	838.90	7	251.92	88	92	849.5	5	310.50	58	93	857.70	6	271.01	60	94
33	1002.92	7	299.73	88	81	1063.37	6	410.65	60	86	1074.12	5	384.70	58	87
34	956.27	7	261.10	90	82	1058.38	6	413.17	59	91	1026.68	6	341.94	61	88
35	1006.13	6	301.44	88	96	1085.8	5	330.18	61	103	1053.99	6	316.13	57	100
36	962.00	7	366.58	89	88	993.28	5	398.66	56	91	1009.61	7	403.51	59	92
37	840.40	7	231.04	94	81	855.4	6	377.90	62	82	859.00	7	348.17	64	83
38	1004.60	8	338.54	95	85	1038.35	6	416.28	61	88	1042.48	6	378.23	63	89
39	982.51	7	239.33	88	90	993.15	6	365.27	58	91	1038.06	5	354.52	60	95
40	821.20	8	342.16	89	83	898	5	305.14	60	90	874.10	5	302.53	57	88
41	927.69	7	367.25	86	93	990.26	5	412.52	59	99	982.38	6	396.00	57	99
42	1081.57	7	347.72	91	92	1160.23	7	420.17	59	99	1152.90	6	372.50	59	98
43	975.86	6	413.30	89	93	1032.18	6	442.16	56	99	1079.92	6	434.16	57	103
44	921.76	7	390.57	92	86	1014.94	6	405.83	60	95	1009.73	5	415.23	59	94
45	810.20	7	197.69	90	81	920.3	6	376.88	60	92	913.70	5	355.78	64	92
46	999.53	7	277.27	89	89	1053.07	6	379.95	55	94	1047.53	7	336.61	59	93
47	923.27	6	347.56	88	93	984.91	5	412.25	59	99	964.74	6	393.10	58	97
48	839.50	7	287.16	82	78	907.8	5	375.34	54	84	890.80	7	357.14	56	82
49	903.06	7	354.22	89	84	1037.58	6	350.38	57	96	994.67	5	329.12	59	92
50	837.90	7	290.44	89	86	857.1	7	336.58	56	88	832.40	6	312.75	59	85

P: Profit、D: Depth、W: Weighted Profit、S: Service Coverage、PC: Profit Coverage

表 17、實驗 2(b)：總效益、樹深與總加權效益比較(一)

	Profit Gape			Depth Gape			Weighted Profit Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=8)	-2.85	12.95	2.01	-2	1	-0.88	0.89	18.59	6.55
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=9)	-4.14	9.49	-0.04	-3	0	-1.88	-2.2	16.35	5.37
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=10)	-6.29	8.26	-1.21	-4	-1	-2.88	-2.92	15.24	3.81

表 18、實驗 2(b)：總效益、樹深與總加權效益比較(二)

	Profit Gape			Depth Gape			Weighted Profit Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC(g(k)=1/√k) VS CCNTD-DCME	-0.2	14.9	6.07	-3	1	-1.12	-10.82	90.64	25.18
CCNTD-DC(g(k)=1/k) VS CCNTD-DCME	-3.47	12.77	5.58	-3	1	-1.06	-11.58	79.97	14.54

表 19、實驗 2(b)：總效益、樹深與總加權效益比較(三)

	Profit Gape			Depth Gape			Weighted Profit Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC(g(k)=1/√k) VS CCNTD-DBME(B=10)	-4.3	18.48	4.76	-5	-3	-4	-6.35	105.23	30.09
CCNTD-DC(g(k)=1/k) VS CCNTD-DBME(B=10)	-7.44	11.63	4.28	-5	-3	-3.94	-7.62	93.74	19.09

表 20、實驗 2(b)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(一)

	Service Coverage Gape			Profit Coverage Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=8)	0	3	2	-2	10	2
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=9)	0	3	1	-3	7	0
CCNTD-DCME VS CCNTD-DBME(B=10)	-1	3	0	-6	7	-1

表 21、實驗 2(b)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(二)

	Service Coverage Gape			Profit Coverage Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC(g(k)=1/√k) VS CCNTD-DCME	-37	-26	-30	0	13	5
CCNTD-DC(g(k)=1/k) VS CCNTD-DCME	-35	-18	-29	-4	11	5

表 22、實驗 2(b)：服務涵蓋率與效益涵蓋率比較(三)

	Service Coverage Gape			Profit Coverage Gape		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
CCNTD-DC($g(k)=1/\sqrt{k}$) VS CCNTD-DBME(B=10)	-37	-24	-29	-4	15	4
CCNTD-DC($g(k)=1/k$) VS CCNTD-DBME(B=10)	-35	-19	-28	-8	11	4

5.6、實驗總結

CCNTD-DBME 演算法需要經由人為設定才能控制所計算出的 CCN Forwarding Tree 的深度，較不實用；而 CCNTD-DCME 演算法所計算出的 CCN Forwarding Tree 的深度則會自動調整樹深，較為實用。CCNTD-DCME 及 CCNTD-DC 所取得的 CCN FT 平均樹深較淺，如此一來，資料在遞送時則不須經過許多節點，減少通訊延遲及降低封包遺失率，對網路傳輸品質較為穩定。若 CCN 網路以救災總效益為優先目標且能容忍 CCN Forwarding Tree 深度過深所造成的影響，則較宜採用 DBME K-MaxST 模型並搭配 CCNTD-DBME 演算法，可獲得較高的總效益(total profit)及總加權效益(weighted profit)；但若 CCN Forwarding Tree 的深度須受到適當的節制，則採用 DCME K-MaxST 模型並搭配 CCNTD-DCME 演算法，可獲得較穩定的拓樸與不錯的總效益。

在較為重要的區域(即需要較多通話量的地區)，需要連接兩台或兩台以上基地台時，採用 CCNTD-DC 演算法，可獲得較大的總效益、總加權效益及較大的效益涵蓋率(profit coverage)；但若以 CCN FT 的服務涵蓋率(service coverage)為重要評估指標時，則採用 CCNTD-DCME 演算法，可獲得較大的服務涵蓋率。

系統使用者亦可在建立案例時，同時使用三種演算法進行運算，再針對系統的需求與演算的結果，取得最佳的拓樸分佈。

第六章、 結論與未來展望方向

當大型災害發生時，往往造成傷亡慘重，若能把握於救災黃金 72 小時內救出受困民眾，則可望挽回更多寶貴的生命，但災區的通訊網路基礎設施時常因災害而遭受嚴重的損毀，無法正常運作。救災工作在缺乏通訊系統的支援下，因溝通協調的困難，大大提高救援的困難度。本論文旨在快速進行跨網路拓樸規劃，供應急通訊系統使用。

我們提出利用無線電將功能完整但無法對外進行正常連線的基地台連接起來，建構一個臨時性的行動通訊網路，稱為應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network, CCN)，在災難發生時，因多數的基地台無法直接連上後端網路，需透過多重跳接的方式連上。網路拓樸的規劃將決定整個網路的效能、救災效益和穩定度。

然而，當災害來臨時，各行動通信公司的網路可能支離破碎，同一家電信公司倖存的孤立基地台可能無法順利連接成一個可用的 CCN，如果聯合各家公司的基地台，順利建成 CCN 的機會大幅增加，我們提出能夠反映各基地台災情緊急程度，且適合於 CCN 樹狀結構的最佳化拓樸規劃模型，以追求救災效益的最大化，供使用者(救災指揮單位)系統化的解決 CCN 跨網路拓樸設計問題。本模型及跨網路拓樸設計演算法可決定 CCN 的跨網路拓樸。

CCN 跨網路拓樸問題類似於 K-Minimum Spanning Tree Problem，我們證明該問題屬於 NP-Hard 問題，但因為發生突發性大型天然災害時，可容許之計算時間極為短暫，因此我們針對不同的情況提出三個快速簡單的啟發式演算法 CCNTD-DBME、CCNTD-DCME、CCNTD-DC，以快速得到一個相近於最佳解的跨網路拓樸規劃。CCNTD-DBME 演算法藉由互斥邊和樹深的限制，在資源有

限的情況下，找出最大化救災效益的 CCN FT；CCNTD-DCME 演算法在求算 CCN FT 時，考量 weighted profit，改善了 CCNTD-DBME 演算法所衍生的問題，樹深過深和因為樹深的限制，導致重要節點無法被搶救。此外，CCNTD-DBME 演算法需要經由人為設定才能控制所計算出的 CCN Forwarding Tree 的深度，較不實用；而 CCNTD-DCME 演算法所計算出的 CCN Forwarding Tree 的深度則會自動調整樹深，較為實用；CCNTD-DC 演算法藉由效益遞減函數折減同一服務區域內多個基地台的救災效益來避免所搶救的基地台過於集中於同一區域，造成資源分配不平均。

本研究提出的模型仍有改進之空間，例如不同形狀的拓樸結構、Multi-path 的拓樸設計。此外，在建構 CCN 網路上，我們仍有許多議題需要克服與解決。在拓樸設計完成後，必須依各方考量，為 CCN 網路制定允入控制政策、建立 Intranet 以及設計基地台與 CRP 設備的介接介面，期待 CCN 網路系統能對災區的救災工作做出重大貢獻，多救一些寶貴的生命。

參考文獻

- [1] Alfayez Adel, Assiri Majid, Clerk Rutvij, and Alsaadan Usamah, "Evaluating the Viability of TETRA for US Public Safety Communication," *University of Colorado at Boulder Interdisciplinary Telecommunications Program Capstone Project*, Boulder, USA, Nov. 2009.
- [2] Association of Public-Safety Communications Officials International, Project 25, <http://www.apcointl.org/frequency/project25.php>, retrieved May. 2010.
- [3] Yong Bai, Wencai Du, Zhengxin Ma, Chong Shen, Youling Zhou and Baodan Chen, "Emergency communication system by heterogeneous wireless networking," *2011 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, June. 2010.
- [4] Melanie Basich, "Wireless When You Need It," <http://www.policemag.com/Channel/Technology/Articles/Print/Story/2009/01/Wireless-When-You-Need-It.aspx>, retrieved Jan. 2009.
- [5] Jean-Charles Bazin, and Hongdong Li, and In So Kweon, and Cédric Démonceaux, and Pascal Vasseur, and Katsushi Ikeuchi, "A Branch and Bound Approach to Correspondence and Grouping Problems," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Tokyo, Dec. 2012.
- [6] Carlo Bertolli, Daniele Tarchi, Romano Fantacci, Marco Vanneschi, and Andrea Tassi, "An Integrated Communication-Computing Solution in Emergency Management," *ACM International Wireless Communications and Mobile Computing Conference 6th*, Caen, France, June. 2010.
- [7] Christian Blum, Maria J. Blesa, "New metaheuristic approaches for the edge-weighted k-cardinality tree problem," *Computers and Operations Research*, vol. 32, no. 6, June 2005, pp. 1355-1377.
- [8] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest and Clifford Stein. *Introduction to Algorithms*, Third Edition. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2009.
- [9] Raheleh Dilmaghani, and Ramesh Rao, "A Systematic Approach to Improve Communication for Emergency Response," *Proc. of 42nd Hawaii Int'l Conference on System Sciences*, Waikoloa, Big Island, Hawaii, Jan. 2009.
- [10] Weimin Dong, et al., Chi-Chi, "Taiwan Earthquake Event Report, Risk Management Solutions," Inc., https://www.rms.com/Publications/Taiwan_Event.pdf, retrieved Mar. 2010.
- [11] Jinling Du, and Dalian Liu, "Hybrid Genetic Algorithm for the Multi-objective Flexible Scheduling Problem," *IEEE International Conference on*

- Computational Intelligence and Security*, Nanning, China, Dec. 2010.
- [12] Arjan Duresi, Mimoza Duresi, Vamsi Paruchuri, and Leonard Barolli, "Ad Hoc Communications for Emergency Conditions," *IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Biopolis, Singapore, Mar. 2011.
- [13] R. C. Eberhart, and J. Kennedy, "New Optimizer Using Particle Swarm Theory," *Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, Nagoya, Japan, Oct. 1995.
- [14] Ulrich Faigle and Walter Kern, "Computational Complexity of Some Maximum Average Weight Problems with Precedence Constraints," *Operations Research*, vol. 42, no. 4, Jul. - Aug., 1994, pp. 688-693.
- [15] Matteo Fischetti, Horst W. Hamacher, Kurt Jørnsten, Francesco Maffioli, "Weighted k-cardinality trees: complexity and polyhedral structure," *Networks*, vol. 24, issue 1, 1994, pp. 11–21.
- [16] M.R. Garey, and M.D. Johnson. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. 1979. ISBN 0-7167-1045-5.
- [17] Harri Holma and Antti Toskala, *WCDMA for UMTS : radio access for third generation mobile communications*, Third Edition. Chichester, England: Wiley, 2004.
- [18] Hong Kong Amateur Radio Transmitting Society, *Proposal on Amateur Radio Emergency Service in Hong Kong-Mobileizing Radio Amateur's community Resources for Disaster and Emergency Communications*, Document No. 06/XIII/018, Aug. 2005.
- [19] Jyh-Shyan Huang, Yao-Nan Lien and Yu-Chieh Huang, "Network Topology Planning for Contingency Cellular Network," *Proceedings of 17th Mobile Computing Workshop*, Aug. 2012, Taoyuan, Taiwan, NSC 100-2221-E-008.
- [20] ITR-RESCUE, Robust Networking and Information Collection Project, <http://www.itr-rescue.org/research/networking.php>, retrieved Feb. 2010.
- [21] Bahareh Jalili, and Mehrdad Dianati, "Application of Taboo Search and Genetic Algorithm in planning and optimization of UMTS radio networks," *ACM International Wireless Communications and Mobile Computing Conference 6th*, New York, USA, June 2010.
- [22] Hung-Chin Jang, Yao-Nan Lien and Tzu-Chieh Tsai, "Rescue Information System for Earthquake Disasters Based on MANET Emergency Communication Platform," *Proc. of the ACM International Workshop on Advanced Topics in Mobile Computing for Emergency Management: Communication and Computing Platforms (MCEM 2009)*, June, 2009, Leipzig, Germany, pp. 623-627.

- [23] K. Habibul Kabir, and Masahiro Sasabe, and Tetsuya Takine, "Integer programming formulation for grouping clusters in ferry-assisted DTNs," *IEEE 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, Fukuoka-shi, Japan, March. 2012.
- [24] J. Kennedy, and R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," *IEEE International Conference on Neural Network*, vol. 4, Perth, Australia, Nov. 1995, pp. 1942-1948.
- [25] Richard E. Krock, "Lack of Emergency Recovery Planning Is a Disaster Waiting to Happen," *IEEE Communications Magazine*, Jan. 2011.
- [26] Tae-Ho Lee and Taesang Choi, "Self powered wireless communication platform for disaster relief," *2011 Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, Sep. 2011.
- [27] Yao-Nan Lien, Li-Cheng Chi and Yuh-Sheng Shaw, "A Walkie-Talkie-Like Emergency Communication System for Catastrophic Natural Disasters," *Proc. of ISPAN09*, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 2009.
- [28] Yao-Nan Lien, Hung-Chin Jang, and Tzu-Chieh Tsai, "A MANET Based Emergency Communication and Information System for Catastrophic Natural Disasters," *IEEE Workshop on Specialized Ad Hoc Networks and Systems*, Montreal, Canada, June. 2009.
- [29] Yao-Nan Lien, Li-Cheng Chi and Chih-Chieh Huang, "A Multi-hop Walkie-Talkie-Like Emergency Communication System for Catastrophic Natural Disasters," *Proceedings of International Conference on Parallel Processing Workshop (on Applications of Wireless Ad Hoc and Sensor Networks)*, San Diego, CA.
- [30] Yao-Nan Lien, Hung-Chin Jang and Tzu-Chieh Tsai, "Design of P2Pnet: An Autonomous P2P Ad-Hoc Group Communication System," *Proceedings of The First International Workshop on Mobile Peer-to-Peer Information Services (MP2PIS)*, May 18-21, 2009, Taipei, Taiwan,
- [31] Jaeao Lim, Richard Klein, and Jason Thatcher, "Good Technology, Bad Management: A Case Study of the Satellite Phone Industry," *Journal of Information Technology Management*, vol. XVI, no.2, 2005, pp. 48-55.
- [32] Kelly T. Morrison, AT&T, "Rapidly Recovering from the Catastrophic Loss of a Major Telecommunications Office," *IEEE Communications Magazine*, vol.19, no.1, Jan. 2011. pp. 28-35.
- [33] E. Natalizio, "The practical experience of implementing a GSM BTS through open software hardware," *2010 International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL)*, Nov. 2010.

- [34] J. Chris Oberg, Andrew G. Whitt, Robert M. Mills, "Disasters Will Happen - Are You Ready?," *IEEE Communications Magazine*, vol.49, no.1, Jan. 2011. pp. 36-45.
- [35] Ren Qing-dao-er-ji, and Yuping Wang, Xiaojing Si, "An Improved Genetic Algorithm For Job Shop Scheduling Problem," *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Security*, Nanning, China, Dec. 2010.
- [36] Yang Ran, "Considerations and Suggestions on Improvement of Communication Network Disaster Countermeasures after the Wenchuan Earthquake," *IEEE Communications Magazine*, vol.49, no.1, Jan. 2011. pp. 44-47.
- [37] Cristina Ribeiro, and Alexander Ferworn, "Computational Public Safety in Emergency Management Communications," *ACM International Wireless Communications and Mobile Computing Conference 6th*, New York, USA, Oct. 2010.
- [38] María Luisa Santamaría, and Sebastià Galmé, "Multi-objective Simulated Annealing Approach for Optimal Routing in Time-Driven Sensor Networks," *IEEE 19th Annual International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, Singapore, July. 2011.
- [39] Zhenhong Shao, Yongxiang Liu, Yi Wu and Lianfeng Shen, "A Rapid and Reliable Disaster Emergency Mobile Communication System via Aerial Ad Hoc BS networks," *2011 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, Sep. 2011 .
- [40] Yoshitaka Shibata, Yosuke Sato, Naoki Ogasawara, Go Chiba, "A Disaster Information System by Ballooned Wireless Adhoc Network," *IEEE International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, Fukuoka, Japan Mar. 2009.
- [41] Steven S. Skiena. *The algorithm design manual*. London: Springer-Verlag London, 2008.
- [42] The Weather Channel, "Earthquake Deaths to Reach 3.5 Million by 2100," <http://www.weather.com/news/science/earthquake-deaths-dramatic-rise-20130221>, retrieved Feb. 2013.
- [43] Stelios Timotheou and Georgios Loukas, "Autonomous Networked Robots for the Establishment of Wireless Communication in Uncertain Emergency Response Scenarios," *ACM symposium on Applied Computing*, New York, USA, Mar. 2009.
- [44] Sarah Underwood, "Improving Disaster Management," *Comm. of ACM*, vol. 53, no. 2, Feb. 2010, pp. 18-20.
- [45] Misako Urakami, Yuya Okada, Yasuyuki Niwa, Hisaya Motogi, Hiroshi Matsuno, "Construction of Wireless Network for Information Communication for a Disaster-affected Island," *IEEE International Conference on Advanced*

- Information Networking and Applications Workshops*, Perth, Australia Apr. 2010
- [46] Fan Wei, Md.Emadatul Haque, Yukihiro Fukunaga, Takehiro Gouda, Xiaodong Lu and Kinji Mori "Autonomous Community Construction Technology for Timely Transmitting Emergency Information," *IEEE Symposia and Workshops on Ubiquitous, Autonomic and Trusted Computing*, Shaanxi, China, Oct. 2010.
- [47] Jiayang Yu, and Ruonan Rao, "A Method for Solving the Performance Isolation Problem in PaaS Based on Forecast and Dynamic Programming," *IEEE Fourth International Conference on Computational and Information Sciences (ICIS)*, China, August. 2012.
- [48] 3GPP, Specifications, <http://www.3gpp.org/Specifications>, retrieved Nov. 2011.
- [49] 3GPP, TS 23.401, "General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access" version 11.0.0
- [50] 林進豐, 行動衛星通訊, 五南出版社, ISBN : 9789571150062, Dec. 2007
- [51] 孫玉, 應急通信技術總體框架討論, 人民郵電出版社, ISBN : 7115208328, 2009
- [52] 張雪麗等, 應急通信新技術與系統應用, 機械工業出版社, ISBN : 9787111292982, Jan. 2010
- [53] 姚國章, 應急管理信息化建設, 北京大學出版社, ISBN : 9787301155806, Sep. 2009
- [54] 連耀南, 黃智賢, 大型自然災害下大規模救災緊急通訊系統方案, *Proc. of 2010 National Symposium On Telecommunications*, TaoYuan, Taiwan, Dec.2010.
- [55] 楊永年, "八八水災救災體系之研究," *公共行政學報*, vol. 32, pp.143-169.
- [56] 交通部電信總局, 九二一震災災後重建電信問答手冊, <http://kbteq.ascc.net/archive/dgt/dgt01.html>, retrieved Dec. 2011.
- [57] 國家通訊傳播委員會, 高雄縣莫拉克颱風災後通訊傳播設施改善實施計畫, Jun. 2010
- [58] 高抗災通信平臺, http://88flood.www.gov.tw/committee_news_detail.php?cn_id=506, retrieved Dec. 2011.

附錄

複雜度分析：

我們針對 K 個點的最小生成樹問題 K -Minimum Spanning Tree Problem (K -MST)、最大生成樹問題 K -Maximum Spanning Tree (K -MaxST) 和 CCN 跨網路拓樸設計的限制深度互斥模型 (CCNTD-DBME) 做問題分析，並證明 CCN 跨網路拓樸設計問題為一 NP-Hard 問題 [16]。

K-Minimum Spanning Tree (K-MST) :

The K -Minimum Spanning Tree problem is as follow. Given an undirected graph, $G(V,E)$ with non-negative edge costs and an integer K , the K -Minimum Spanning Tree (K -MST) of G is a tree of minimum cost that spans exactly K vertices of G .

K-Maximum Spanning Tree (K-MaxST) :

Given an graph, $G(V,E)$, K -Maximum Spanning Tree (K -MaxST) problem is to find a maximum total profit spanning tree whose number of nodes is an integer K .

CCN Topology Design - Depth Bounded Mutually Exclusive (CCNTD-DBME) :

CCN Topology Design-Depth Bounded Mutually Exclusive problem is to find a K -MaxST of maximum total profit in a graph, and those nodes of K -MaxST are not mutually exclusive and the depth of K -MaxST is no more than an integer D .

As a decision problem, we ask simply whether a mutually exclusive concerned and depth bounded K -spanning tree of a given total profit P exists in the graph.

(A) CCNTD-DBME is in NP :

Suppose we are given a graph $G(V,E,\bar{E})$, and an instance P of profit, and an instance D of tree depth. The certificate we choose is CCNTD-DBME K-MaxST $\subseteq G(V,E,\bar{E})$ itself. The verification algorithm affirms that the total profit of CCNTD-DBME K-MaxST $=P$, and then it checks, whether the tree depth $\leq D$ and all nodes in CCNTD-DBME K-MaxST are not mutually exclusive. This verification can be performed straightforwardly in polynomial time.

(B) CCNTD-DBME is NP-Hardness :

We now prove that CCNTD-DBME problem can be reduced to K-MaxST problem straightforwardly. Given an instance $X:[G(V,E),P,K]$ in K-MaxST problem, we can find an instance $Y:[G'(V',E',\bar{E}),P',K',D]$ in CCNTD-DBME problem such that an optimal solution a_y for Y is also an optimal solution for X . Let $V'=V$, $E'=E$, $P'=P$, $K'=K$, $D=K$ and $\bar{E}=\{ \}$. The verification can be performed in polynomial time. Denote the total profit of a solution a for X and Y to be $p_x(a)$ and $p_y(a)$, respectively. Because $P'=P$, we can easily prove $p_x(a)$ and $p_y(a)$ are equal. For simplicity, both $p_x(a)$ and $p_y(a)$ are denoted as $p(a)$.

First, we prove a_y is a valid solution for X . Since $D=K$ and $\bar{E}=\{ \}$, if we simply find a K-MaxST for graph G without any constraint. First, the depth D of the K-MaxST is always between 1 and $(K-1)$, that is $1 \leq D \leq K-1$, which is always smaller than the depth bound constraint K . Secondly, there is no mutually exclusive constraint such that any solution of K-MaxST is a valid solution of CCNTD-DBME.

Conversely, suppose the G' has a DBME K-MaxST whose depth bound constraint $D=K$ and $\bar{E}=\{ \}$. The K-MaxST with bounded depth $D=K$ and $\bar{E}=\{ \}$ must be a valid K-MaxST in G , for a similar argument, we can prove that solution a_y of Y

must be a valid solution for X .

Next, we prove that an optimal solution a_y for Y is also an optimal solution for X by contradiction. As we have proved, a_y is also a valid solution for X , whose total profit is $p(a_y)$. Assume a_y is not an optimal solution for X , there must be another solution a_x , whose total profit $p(a_x)$ is greater than $p(a_y)$. And any valid a_x is also a valid solution for Y , whose total profit is $p(a_x)$, which is greater than $p(a_y)$. This contradicts to the assumption that a_y is an optimal solution for Y . As a result, a_y must be an optimal solution for X . The reduction of CCNTD-DBME to K-MaxST problem is done. The proof of NP-hardness of CCNTD-DBME is straightforward. Q.E.D.

