

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頻寬分配
Bandwidth Allocation for Contingency Cellular Network

研究生：吳雲鼎

指導教授：連耀南

中華民國一百零一年四月

April 2012

應急蜂巢式行動通訊網路的頻寬分配

Bandwidth Allocation for Contingency Cellular Network

研究生：吳雲鼎 Student：Yun-Ting Wu

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

中華民國一百零一年四月

April 2012

應急蜂巢式行動通訊網路的頻寬分配

摘要

大型天然災害會癱瘓通訊系統，嚴重影響到救災效率，本論文旨在快速進行可用連外頻寬分配，供應急通訊系統使用。無線通訊技術的成熟，為使用者帶來極大的便利性，但當發生大規模的地震或強烈颱風等重大天然災害時，通訊系統卻常常因架構等因素，隨著電力與交通系統的損毀而癱瘓。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，而有效運作的通訊系統卻是災情傳遞、資源調度以及互助協調是否順利的關鍵因素。

本篇論文所探討的應急通訊系統是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，稱為應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network, CCN)。由於 CCN 的連外頻寬有限，大量話務將造成通訊系統壅塞，影響重要訊息傳遞，且災區各個地方受災情況不盡相同，使得 CCN 的頻寬資源需視各地災情緊急程度與需求進行規劃配置，以充分發揮頻寬效益傳遞重要資訊。本論文主要在探討如何在 CCN 網路拓樸已決定的情況下進行頻寬分配，以達到最大的救災效益。因此我們提出一適合 CCN 樹狀結構的頻寬分配優化模型，以追求救災效益的最大化，這個模型可供使用者(救災指揮單位)系統化的解決 CCN 頻寬分配問題。

本論文所提出的頻寬分配模型包含 CCN 樹狀拓樸、基地台數目、可用之連外頻寬資源限制、各基地台 Backhaul 頻寬限制、基本頻寬需求限制、差異化之通訊品質通道和效益遞減函數。我們證明此模型是 NP-Hard 問題，並提出一個考慮各基地台的災情緊急程度以及通訊品質需求差異而進行快速頻寬分配的演算法，此演算法透過計算頻寬分配總救災效益決定優劣。經實驗，可快速得出接近最佳解的頻寬分配結果。

Bandwidth Allocation for Contingency Cellular Network

Abstract

When stricken by a large-scale disaster, the efficiency of disaster response operation is very critical to life saving. We propose to build a contingency cellular network to support emergency communication in large scale natural disasters by connecting disconnected base stations. This thesis addresses the bandwidth allocation problem. The advance of mobile communication technologies has brought great convenience to users. Cellular phone becomes the first communication tool most people would use in emergency. However, cellular networks were usually crashed in earthquake, typhoons or other natural disasters due to power outage or backhaul breakage. Unfortunately, the efficiency of communication system is a critical factor to the success of disaster response operation such as resource allocation as well as coordination of rescue and relief operations. We designed a contingency cellular network (CCN) by connecting physically intact but service-disrupted base stations together with wireless links. As the bandwidth resource in CCN is limited, a smart bandwidth allocation to facilitate prioritized bandwidth sharing will maximize the contribution of CCN to the disaster response operation. We model the CCN Bandwidth Allocation Problem into a Nested 0-1 Knapsack Problem aiming to maximize disaster operation efficiency. The problem is proven to be NP Hard. We also design an efficient heuristic algorithm to solve the problem when it is needed in urgent.

誌謝辭

終於到了誌謝辭的時刻，走走停停的研究生生涯終於邁入尾聲，看著論文回想這段時期，很辛苦卻也很踏實，在進入職場多年後，能夠重回校園學習，實在是難得的經驗。

這本論文的完成，首先要感謝的是指導老師連耀南教授。老師實事求是且觀察入微的精闢見解與嚴謹的治學態度，讓我不但在學術研究上學習到應有的思考方式，也在相關工作領域上獲益良多。此外也要感謝台灣大學蔡志宏教授、交通大學陳耀宗教授、政治大學姜國輝教授及中央大學胡誌麟教授在口試時的指導與建議，讓這本論文更臻完整，在此獻上由衷的感激。

感謝智賢學長在公忙之餘犧牲午餐時間以及陪伴小朋友的時間與我研討並提供許多寶貴建議。感謝實驗室的學弟妹們，彥嵩、筱慈、冠傑、郁翔、耿誠、采衣、文晟、期淳、惠晴，謝謝你們在研究過程中提出各種看法與協助，也謝謝冠傑、郁翔在口試過程給予的大力幫忙。

感謝系上老師在研究所這段期間的授課，讓我收穫許多新知及見聞，也感謝系上助教群給予各項行政作業的諮詢與支援，讓我省下許多寶貴的時間。

兼顧工作與求學的過程是艱辛的，要感謝父母親對我的養育與關懷，也要特別感謝愛妻芳如，在我碩士進修期間對家庭的付出與照顧，使我能全心全意的投入工作與學業，謹以此論文獻給她，並致上我最誠摯的謝意與感激。

吳雲鼎 謹誌於

政治大學 資訊科學研究所

April 2012

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、 | 災區通訊需求分類..... | 10 |
| 1.1.7、 | 應急通訊網頻寬資源使用需求..... | 11 |
| 1.2、 | 應急通訊網路簡介..... | 12 |
| 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)..... | 15 |
| 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..... | 18 |
| 2.2.2、 | 無線對講機 (Walkie-Talkie) | 19 |
| 2.2.3、 | 業餘無線電 (Amateur radio)..... | 19 |
| 2.2.4、 | 行動衛星通訊..... | 20 |
| 2.2.5、 | 專業用集群通訊系統 (Trunking radio)..... | 21 |
| 2.2.6、 | 移動基地台 (Cell on wheels)..... | 22 |
| 2.2.7、 | 行動隨意式網路 (MANET)..... | 23 |
| 2.2.8、 | 過去應急通訊系統相關研究..... | 24 |
| 2.2.9、 | 應急通訊系統綜合比較..... | 27 |
| 第三章、 | 應急蜂巢式行動通訊網路 (CCN)..... | 29 |
| 3.1、 | 系統架構..... | 30 |
| 3.2、 | 系統元件..... | 32 |
| 3.3、 | 系統使用時機..... | 35 |
| 3.4、 | 可行性分析..... | 35 |
| 3.5、 | 轉送拓樸 (Forwarding tree) | 36 |
| 3.6、 | 通訊模式..... | 36 |
| 3.7、 | 建置與運轉流程..... | 39 |
| 3.8、 | 重要研究議題..... | 40 |
| 第四章、 | CCN 頻寬分配 | 44 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.1、 | 設計理念與目標..... | 44 |
| 4.1.1、 | CCN 頻寬使用需求分析 | 44 |
| 4.1.2、 | 環境假設..... | 45 |
| 4.1.3、 | 設計考量與目標..... | 46 |
| 4.2、 | 問題定義..... | 47 |
| 4.2.1、 | 救災效益定義..... | 47 |
| 4.2.2、 | CCN 頻寬分配問題描述 | 47 |
| 4.3、 | 計算複雜度分析..... | 50 |
| 4.3.1、 | 0-1 Knapsack Problem (0-1 KP)..... | 50 |
| 4.3.2、 | CCN Bandwidth Allocation Problem (CCN-BA)..... | 50 |
| 4.3.3、 | CCN-BA 計算複雜度 | 51 |
| 4.4、 | 啟發式頻寬分配演算法..... | 52 |
| 4.4.1、 | 演算法設計..... | 52 |
| 4.4.2、 | BAG 演算法 | 54 |
| 4.4.3、 | BAG 演算法範例..... | 56 |
| 第五章、 | 效能評估 | 64 |
| 5.1、 | 實驗設計..... | 64 |
| 5.1.1、 | 實驗環境..... | 64 |
| 5.1.2、 | 評估指標..... | 65 |
| 5.2、 | 救災效益函數..... | 65 |
| 5.3、 | 實驗參數..... | 65 |
| 5.4、 | 實驗結果..... | 66 |
| 5.4.1、 | 實驗一..... | 66 |
| 5.4.2、 | 實驗二..... | 70 |
| 5.4.3、 | 實驗三..... | 74 |
| 5.5、 | 實驗總結..... | 75 |
| 第六章、 | 結論與未來展望方向 | 81 |
| 參考文獻 | | 83 |

圖目錄

| | |
|---|----|
| 圖 1、固網與行動通訊系統癱瘓..... | 4 |
| 圖 2、行動通訊網路受損主要原因..... | 6 |
| 圖 3、獲救時間與存活率統計..... | 8 |
| 圖 4、CCN 網路..... | 13 |
| 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、CCN 架構示意圖..... | 30 |
| 圖 9、CCN 網路架構圖..... | 30 |
| 圖 10、連網台..... | 31 |
| 圖 11、孤立台..... | 31 |
| 圖 12、CCN 通訊模式示意圖..... | 32 |
| 圖 13、CCN 緊急修復包(ERP)..... | 33 |
| 圖 14、EC Module 功能模組..... | 34 |
| 圖 15、孤立台恢復連線方式..... | 34 |
| 圖 16、CCN 使用時機..... | 35 |
| 圖 17、CCN-BA 巢狀背包問題..... | 51 |
| 圖 18、BAG 演算法流程..... | 53 |
| 圖 19、範例-CCN 樹狀轉送拓樸..... | 54 |
| 圖 20、範例-CCN traffic relay 及頻寬限制..... | 55 |
| 圖 21、範例-CCN 各鏈結之可用頻寬..... | 57 |
| 圖 22、範例-時間點一之候選節點..... | 58 |
| 圖 23、範例-時間點一頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬..... | 59 |
| 圖 24、範例-時間點二之候選節點..... | 59 |
| 圖 25、範例-時間點二頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬..... | 60 |
| 圖 26、範例-時間點三之候選節點..... | 61 |
| 圖 27、範例-時間點三頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬..... | 61 |
| 圖 28、範例-時間點四之候選節點..... | 62 |
| 圖 29、範例-時間點四頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬..... | 63 |
| 圖 30、範例-時間點五之候選節點..... | 63 |
| 圖 31、實驗一基地台數量與效能之關係-平均誤差..... | 69 |
| 圖 32、實驗一基地台數量與效能之關係-平均最佳解達成率..... | 69 |
| 圖 33、實驗二基地台數量與效能之關係-平均誤差..... | 73 |
| 圖 34、實驗二基地台數量與效能之關係-平均最佳解達成率..... | 73 |
| 圖 35、大規模系統下 BAG 演算法效能-準誤差(100 個基地台)..... | 75 |
| 圖 36、大規模系統下 BAG 演算法效能-準最佳解達成率(100 個基地台)..... | 75 |
| 圖 37、基地台數量與效能之綜合評估-平均誤差..... | 77 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 圖 38、基地台數量與效能之綜合評估-平均最佳解達成率 | 78 |
| 圖 39、BAG 演算法效能比較(6 個基地台) | 78 |
| 圖 40、BAG 演算法效能比較(7 個基地台) | 79 |
| 圖 41、BAG 演算法效能比較(8 個基地台) | 79 |
| 圖 42、BAG 演算法效能比較(9 個基地台) | 80 |
| 圖 43、BAG 演算法效能比較(10 個基地台) | 80 |

表目錄

| | |
|--|----|
| 表 1、大型天然災害傷亡損失記錄..... | 2 |
| 表 2、災區通訊需求分類..... | 10 |
| 表 3、應急通訊系統比較..... | 28 |
| 表 4、範例-CCN-BA 候選配置 | 54 |
| 表 5、範例-CCN-BA 候選配置集合表更新 | 56 |
| 表 6、範例-[$v_5, 5k$]救災效益遞減變化 | 56 |
| 表 7、範例-CCN 可用頻寬..... | 56 |
| 表 8、範例-CCN 初始救災效益 | 57 |
| 表 9、範例-CCN 每單位頻寬初始救災效益 | 57 |
| 表 10、範例-基本 Channel 需求..... | 58 |
| 表 11、範例-時間點一頻寬分配情形 | 58 |
| 表 12、範例-時間點一頻寬分配後救災效益 | 59 |
| 表 13、範例-時間點二頻寬分配情形 | 60 |
| 表 14、範例-時間點二頻寬分配後救災效益 | 60 |
| 表 15、範例-時間點三頻寬分配情形 | 61 |
| 表 16、範例-時間點三頻寬分配後救災效益 | 61 |
| 表 17、範例-時間點四頻寬分配情形 | 62 |
| 表 18、範例-時間點四頻寬分配後救災效益 | 62 |
| 表 19、範例-時間點五頻寬分配情形 | 63 |
| 表 20、測試案例參數..... | 65 |
| 表 21、實驗一結果-演算法誤差(6 個基地台)..... | 66 |
| 表 22、實驗一結果-演算法誤差(7 個基地台)..... | 67 |
| 表 23、實驗一結果-演算法誤差(8 個基地台)..... | 67 |
| 表 24、實驗一結果-演算法誤差(9 個基地台)..... | 68 |
| 表 25、實驗一結果-演算法誤差(10 個基地台)..... | 68 |
| 表 26、實驗二結果-演算法誤差(6 個基地台)..... | 70 |
| 表 27、實驗二結果-演算法誤差(7 個基地台)..... | 71 |
| 表 28、實驗二結果-演算法誤差(8 個基地台)..... | 71 |
| 表 29、實驗二結果-演算法誤差(9 個基地台)..... | 72 |
| 表 30、實驗二結果-演算法誤差(10 個基地台)..... | 72 |
| 表 31、大規模系統下 BAG 演算法準誤差(100 個基地台) | 74 |
| 表 32、綜合效能評估-平均誤差 | 76 |
| 表 33、綜合效能評估-平均最佳解達成率 | 76 |
| 表 34、綜合效能評估-最佳解個數 | 77 |

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[8,16,21]，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。

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**。由於 CCN 的連外頻寬有限，大量話務將造成通訊系統壅塞，影響重要訊息之傳遞，且災區各個地方受災情況不盡相同，因此必須根據各地災情緊急程度與需求，將寶貴的 CCN 頻寬資源審慎地配置給各地災區。網路拓樸的規劃是本研究團隊的另一研究主題，而本文旨在探討如何在 CCN 網路拓樸已決定的情況下，進行 CCN 頻寬分配以達到最大的救災效益。

表 1、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 | > 2500 mm Rainfall within 2 days triggered by Typhoon Morakot | Dead : more than 475 |
| Port-au-Prince, Haiti Earthquake | 01/13/2010 | 7.0 Richter Scale | Dead : more than 230,000 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 |
| 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 |

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 [7,10,15,16]。

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。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、固網與行動通訊系統癱瘓

■ 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。

■ 行政系統癱瘓

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，使效率極低。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

行動電話使用無線電通訊，在一般人之普遍認知中，它抗災應付緊急情況的能力應該是相當高，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，無線的部分只存在於終端使用者(手機)到基地台那一段，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[34]，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，甚至同在一棟倒塌大樓之各團隊都無法面對面溝通。

1.1.3、通訊設備修復困難

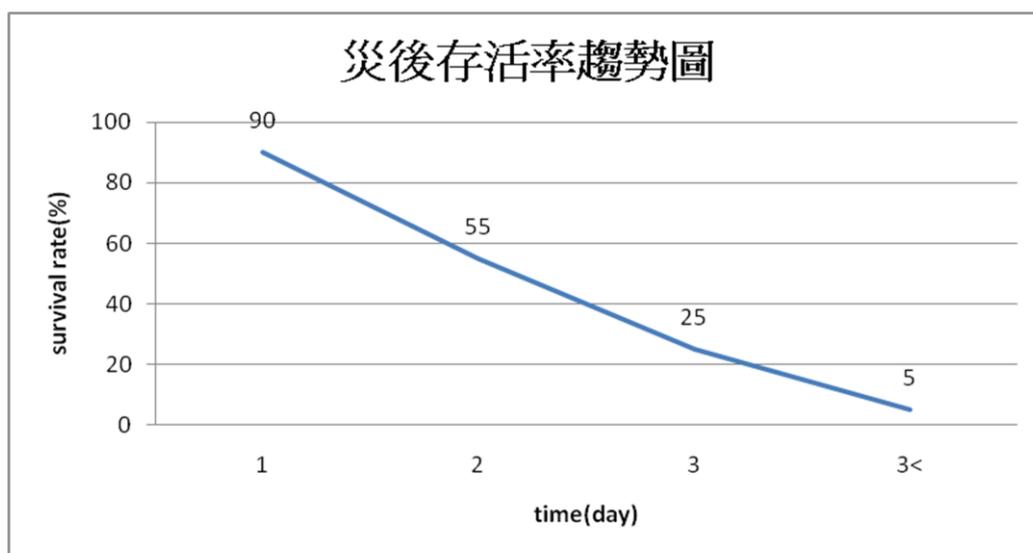
在災害中，由於交通系統癱瘓，加上技術人力不足，所需資材調度不及等諸多因素，搶修實際毀損的基地台通訊設備，並使災區通訊全面恢復，向來是一項艱鉅的任務，大型修復機具無法進入災區，進行第一時間的搶修。以 921 地震為例，中華電信耗費 15 天，才搶通災區電信網路。在八八水災中，斷訊基地台總數達 3300 餘座，中華電信斷訊基地台達 1800 座，其中 550 座在兩天之後仍無法恢復運轉。換言之，在關鍵的黃金 72 小時內，大量的行動電話將陷於癱瘓，無法及時修復。再觀察近年來各處天然災害的搶救效率，即使如美國、日本這種先進國家也無法在黃金 72 小時內修復大部分的電力及通訊系統。且不談卡翠納颶風摧毀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。

然而，在大型災害發生後，因為通訊中斷，造成人員溝通困難，使災區的交

通、通訊皆陷入極度混亂的狀態，並造成資源分配與人員調度上的不均，使得某些災區獲得的人力、物力過剩，而某些地區則是極度匱乏。又因為地形上的阻隔、交通的不便利以及救災人員缺乏通訊介面溝通，使得救災資訊無法完整傳遞，導致救災人員誤判情勢而錯失救援機會。



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

圖 3、獲救時間與存活率統計

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：

I. 建置需求

- (1) **系統元件必須取得容易**：系統元件(例如長距離 Wi-Fi 設備)須可就地取材或運送容易。災區內的道路系統可能已經癱瘓，使得物資只能倚賴空中運輸，大型設備例如裝在車上可以機動移到任何地點快速架設的移動基地台，不便利用空中運輸送至災區，且數量有限，無法廣泛使用。
- (2) **建置難度低**：災區現場兵荒馬亂，難保有充足的專業人員來建置應急通訊網路。因此，建置的難度越低越好。要求系統元件取得容易和建置難度低的主要目的是希望可以提高建置應急通訊網的成功率。建置成功率

越高，越能廣泛使用於災區。

- (3) **建置速度快**：為把握救災的時效性，應急通訊網建置速度越快越好，隨著時間拉長，傷亡率會快速增加，而且行動通訊營運商也逐漸修復其通訊網路，應急通訊系統會隨著時間而逐漸被取代，若建置時間緩慢則無建置之必要。

II. 運轉需求

- (1) **使用端設備數量多、成本低**：客製化的無線電話機，因小量生產，其成本較大量生產的通用話機高昂，一個應急通訊系統若須有特定的話機才可使用，常因成本及分配之故，很難在短時間讓大量志願救災人員人手一機，這會讓應急通訊系統的服務能量大打折扣。手機已經是最普遍的隨身物品之一，如果可以不需改裝手機即能投入使用，所有斷訊的手機將可立即投入救災使用。
- (2) **易於使用，不需特別訓練**：在緊急狀態下無法從容的提供使用訓練，因此最好是未經訓練就可使用。要求話機容易取得和易於使用的主要目的是為了降低使用應急通訊網的門檻，讓有需要的人員可以輕易使用。舉例而言，我們可以設計讓使用者撥一個特定號碼(例如 118)，即可將手機變成無線對講機，讓位於基地台涵蓋範圍內的手機同時收話。
- (3) **具備允入控制機制，可抵擋瞬增的話務量**：災區話務量常會有瞬增的特性。應急通訊網因為是臨時搭建，系統能容納的通話數遠不如一般的公眾網路，更容易因這些瞬增的話務量導致整個系統癱瘓。因此，應急通訊網需具備允入控制，當系統負載過高時，須能拒絕新的通話請求。
- (4) **具救災緊急通話先行之功能**：如表 2 災區通訊需求分類，不同的通話功能有著不同的急迫性。應急通訊網須有緊急通話先行的功能，急迫性高的通話可優先使用。如此，可以避免整個應急通訊網被急迫性較低的互道平安通話佔滿，使得急迫性較高的急難救助通話卻無法通話。

(5) **具行動能力**：執行救災任務需要來回走動，應急通訊網須提供行動力，讓救災人員可在行動中使用。

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. **進入災區難易度**：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

1.1.6、災區通訊需求分類

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 2 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 2、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 | 受困人員 → 災區(外)民眾 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 | 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 | 脫困人員報平安、災區外人員詢問 災區內民眾狀況 |
| | 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 | | |

1.1.7、應急通訊網頻寬資源使用需求

交通部電信總局於「九二一震災災後重建電信問答手冊」提到：意外災害發生時災區電話常常無法撥通。除通訊系統受創等原因外，由於現今傳播媒體均能迅速將災難訊息快速揭示，通往災區表示關懷慰問之電話蜂擁而至，使得話務量異常暴增、壅塞，甚至導致電信交換機自動關閉(即當機)，民眾無法撥通電話。

相同的，災區應急通訊系統啟用後，一樣將面臨頻寬資源有限以及瞬間大量話務湧入、壅塞的現象，再加上各地災情嚴重程度不同、緊急程度不同、使用者需求不同等因素，可能造成應急通訊系統運作不穩定、慰問關懷電話排擠救災訊息傳遞以及頻寬使用效益不彰等問題，故應急通訊系統頻寬資源之運用必須兼顧以下需求：

I. 系統穩定運作

由於應急通訊系統是臨時搭建，系統能容納的通話數遠不如一般的公眾網路，面對災區這些瞬增的話務量，可能導致整個系統癱瘓。因此，應急通訊系統需進行頻寬分配並據以實施允入控制，當系統負載過高時，需能拒絕

新的通話請求，確保應急通訊系統穩定運作，不受瞬間大量話務影響。

II. 確保重要話務清晰傳遞

應急通訊系統頻寬資源有限，在開放頻寬資源競爭的情況下，可能使重要訊息因競爭不到資源而無法傳遞，影響救災。因此，應急通訊系統需要提供急難救助、災情通報等重要話務傳遞通道，並保障資源可用性與通話品質，確保重要話務清晰傳遞。

III. 最大化頻寬資源使用效益

災區緊急救災通報與一般民眾慰問關懷話務均佔用應急通訊系統相同之頻寬資源，於無形中降低了頻寬資源使用效益，藉由話務分級與差異化通訊品質，可在滿足不同話務需求的同時，有效提升可用通道量。有鑒於各地區災情嚴重程度不同、緊急程度不同，將整體可用通道依救災需求調度，充份利用每一份資源，最大化整體頻寬資源使用效益。

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) [4,6,25]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。

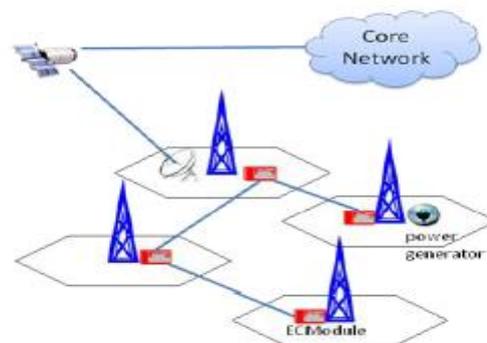


圖 4、CCN 網路

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頻寬分配方法，對於此應急通訊系統的連外頻寬資源分配問題，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[28]，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。

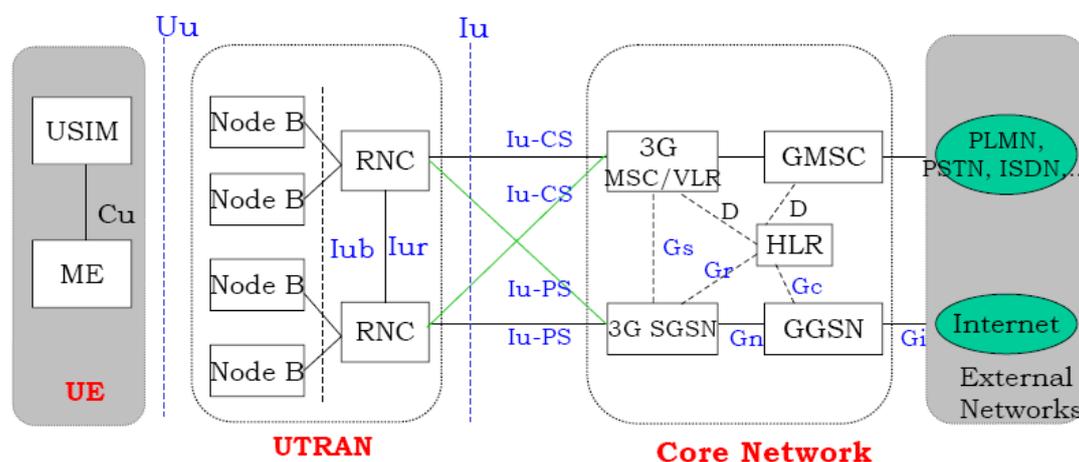


圖 5、System Architecture of 3GPP Release 99

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。

- **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。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。

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：

- **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)**：閘口行動電話交換機，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 [28]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。

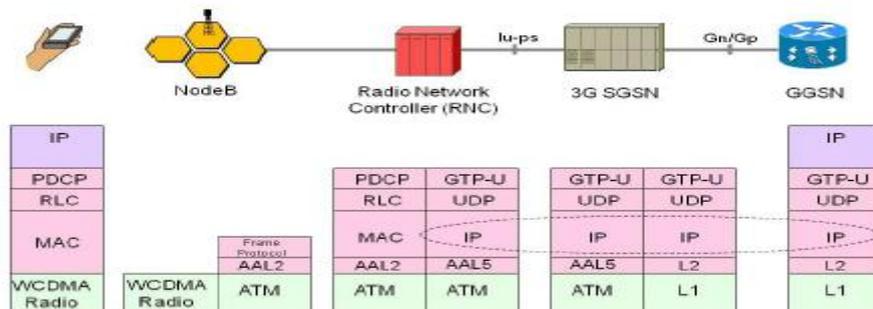


圖 6、3GPP Release 5 架構

3GPP R5 to R7：新的 3GPP R5 到 R7 版本[28]，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。

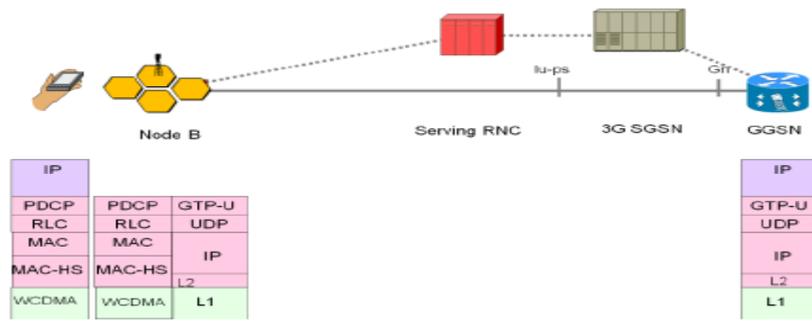


圖 7、3GPP Release 7 架構

2.2、 應急通訊系統種類

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

高抗災通信平臺[35,36]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 7,418 萬元，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) [15]。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[8,12]，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

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 的鉆計劃(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[30]。

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，如鉆計劃和全球通[14,30]。

鉆計劃 (Iridium)：鉆計劃為包含 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[31]。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[1]以及歐規的 TETRA[2]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[6,25]。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
- **平衡性差**：容易形成不平衡網路，對個別節點有很高的負擔

我們投入災區應急通訊系統的研究，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 [11,16,17,18]，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[15]。

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。 [5,11,13,16,17,18,23,24]

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 [25]：利用自主移動機器人，在災區和救難中心建構一個 Wireless ad hoc network 達到通訊目的，作者透過預測人群聚集的地方提出一個在每個機器人上運行的分散式演算法，使他們共同最大化災民可能出現的地點，目標是最大限度地連接到網絡上的災民。同時為了要有效的分配時間和資源，根據機器人的重疊範圍，透過最小生成樹(Minimum spanning tree)制定一個改進演算法。實驗結果顯示第一種演算法適合機器人數量少的時候，第二種演算法適合機器人能提供大頻寬的環境。

- Autonomous Community Construction Technology for Timely Transmitting Emergency Information [27]：本篇討論一個 Autonomous community construction technology 應用在傳送有時效限制的緊急訊息。Wireless sensor network 在災難應急網路中已有廣泛的應用，傳統的及時緊急訊息傳送是建立在靜態以及集中式管理的條件下，可是實際的及時緊急訊息傳送是在隨時會發生變動的災區。本論文討論的 Autonomous community construction technology 利用 Autonomous Decentralized System (ADS)，每個子系統能自動收集、判斷和運作，改善傳統方法的限制，來達成在動態災區的及時緊急訊息傳送。本論文的結果也經由 Omnet 模擬傳統方法與此論文提出的 Autonomous community construction technology，證實有助於災區的及時訊息傳送。
- An Integrated Communication-Computing Solution in Emergency Management [3]：在本篇中，作者透過設計一個有效的模型整合各種網路以建立一個可靠且迅速的異質通訊網路(Heterogeneous meshed communication system)，支援不同情況下的緊急危機管理系統，為了驗證有效性，作者提出了一個整合網路應用層(Application layer)和網路層(Network layer)的實例，透過 Multiple Parallel Modules (ParMods)，各節點(Node)互相交換彼此的資訊(e.g. network

latencies)，網路應用層(Application layer)即可在考慮到其他節點情況下，選擇最符合需要的網路。

- Computational Public Safety in Emergency Management Communications [22]：在本篇中，作者分析了各種無線網路通訊選項在應急通訊背景下的可靠度。除了 Propagation delay、Packet delivery ratio 和 Transmission rates 等傳輸品質以外，還加上在有妨礙通訊的條件下進行實驗。作者的實驗環境為完全擬真(使用實際的設備在現實的環境下)。實驗的對象有 Xbee、Bluetooth、WiMAX 和 Wi-Fi。經過實驗，作者認為在考量到經濟效益之下，Wi-Fi 是目前應急管理通訊在災害現場的最佳選擇，其傳輸速率和範圍都優於其他選項。
- Ad Hoc Communications for Emergency Conditions [6]：作者提出了利用普及率很高的具 Wi-Fi 能力的智慧型手機為節點，建構一個 Ad hoc 網路來進行通訊，其架構包含了可以自行適應網路條件的廣播和路由協議。其做法為由一節點開始，向各間隔 120 度角的節點廣播，透過此廣播方式來組織拓樸，並由此拓樸節點知道路由傳輸路徑。經過作者實驗在節點密度高的時候傳輸延遲會有顯著的改善。
- Taiwan Earthquake Event Report, Risk Management Solutions [8]：本篇主要探討在 1999 年 9 月 21 號台灣中部發生的集集(chi-chi)大地震，作者利用詳細的數據及照片說明了此次地震的相關影響，包含了建築物的倒塌、基礎設施的損毀、交通的中斷、經濟影響以及大面積的地型變化和景觀改變等，並在每章節詳細的分析損毀原因，其中特別值得注意的是對於電力系統中斷的原因分析及影響，作者指出台灣全島只有台電的單一電網，當關鍵電力輸送線路中斷(例如高壓電塔倒塌)，會造成南北電力供應失衡、電壓下降，影響台灣北部高科技工業的生產，進而影響到全球高科技產業的供應。集集(chi-chi)大地震後，軍事用途、關鍵基礎設施、急難救援相關及大型工業優先復電，但台灣北部部分居民及小型企業，仍每日輪流停電 7 小時達三個星期之久。

- Improving Disaster Management [26]: 作者認為通訊是災害發生時很重要的一環，但當通訊基礎建設損毀或電話網路超過負載時，必須制定一套有效的災害管理機制。但本篇研究學者的研究方向與傳統現場工作人員認為的救災工具存在很大的差異，研究學者認為資訊系統雖然可以處理大量的數據，評估災難現象以輔助救災，但目前的問題在於資訊的傳達而不是在技術上，學者們開發出一套利用日常個人通訊設備當作節點傳遞災情訊息的系統，此系統可以有效的在災害發生時迅速的將災情透過語音或文字廣播出去，減少其他傳達方式的傳遞耽擱。
- A Disaster Information System by Ballooned Wireless Ad Hoc Network [23] : 本篇主要在探討當災難發生時，通訊網路及交通中斷，如何建構一個可靠、穩定的網路環境，研究團隊利用氫氣球(距地面 40m~80m)在空中建立一個即時的隨意式網路(Ad hoc network)以供訊息傳遞，連線拓樸為最小生成樹，並透過一固定伺服器(WIDIS)與外部網路相連，與許多研究不同的是此系統(Wide area Disaster information Network, WDN)已被實作出來，而不是一假設系統。

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能效還是非常有限，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 CCN 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 | 進入災區難易度 | 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 |

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，藉由額外的電力、通訊設備輔助，使其恢復部份通訊能力，並藉由無線通訊設備[22]連接具通訊能力的基地台群，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，可藉此達到應急通訊系統應可快速佈建的要求。另外，建置 CCN 網路所需的額外設備(緊急修復包)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 8 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。

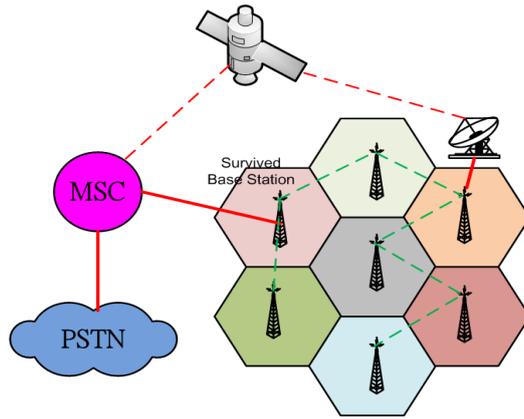


圖 8、CCN 架構示意圖

3.1、 系統架構

我們先前的研究[15,16,33]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緊急修復包(Emergency Recovery Package, ERP, 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。

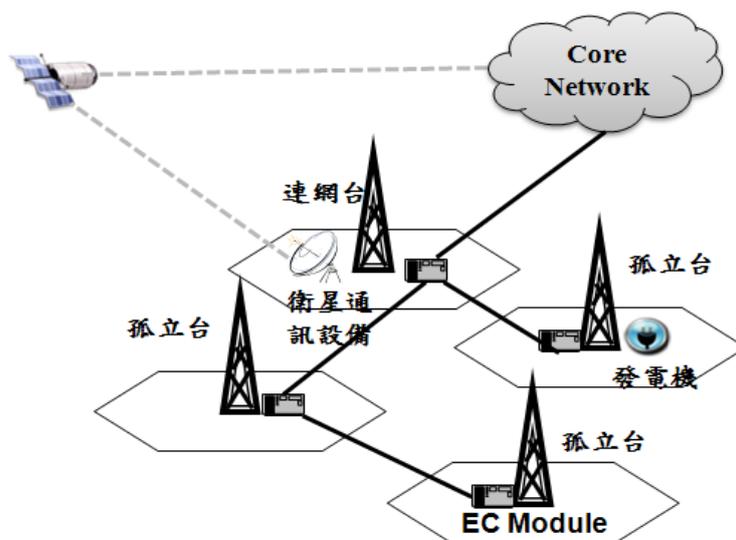


圖 9、CCN 網路架構圖

我們將基地台依其對外通訊的連線能力，定義如下：

- **連網台(Survived base station)**：可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。

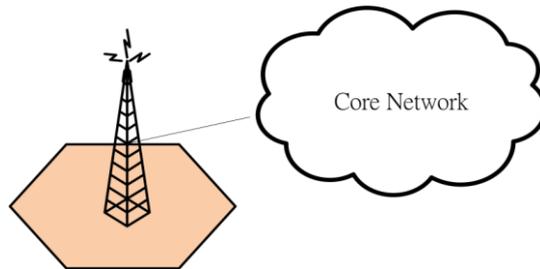


圖 10、連網台

- **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。

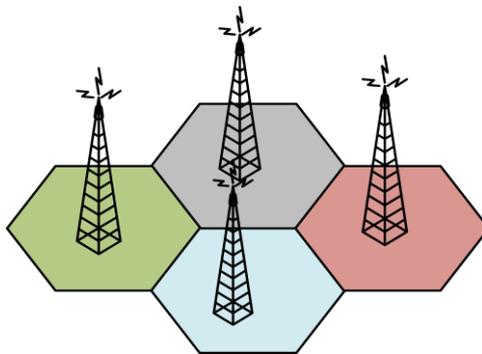


圖 11、孤立台

- **鄰台**：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「緊急修復包(ERP)」，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。CCN 將利用各種無線連線方式[22]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 12。

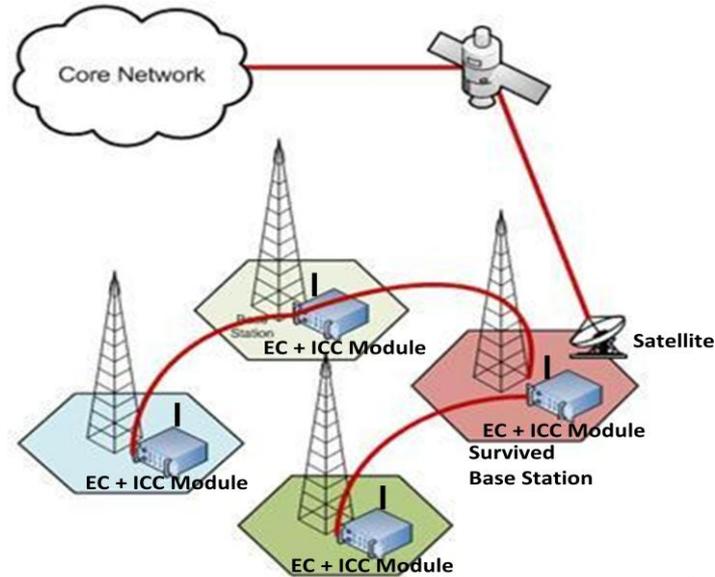


圖 12、CCN 通訊模式示意圖

3.2、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「緊急修復包(ERP)」，如圖 13，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：

- **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 ERP 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[19]。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 14。
- **Satellite Communications Module**：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。

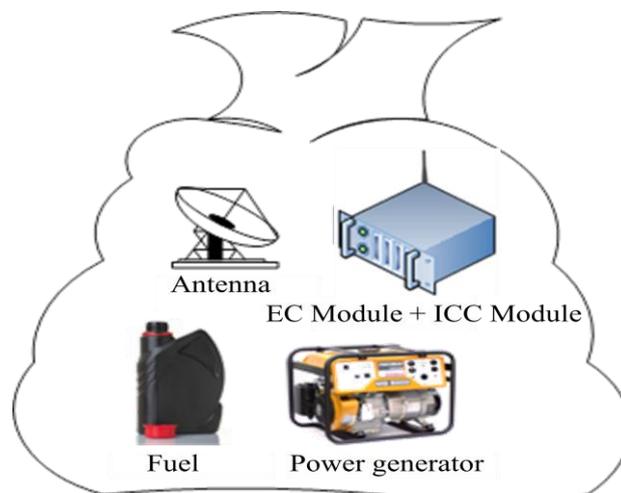


圖 13、CCN 緊急修復包(ERP)

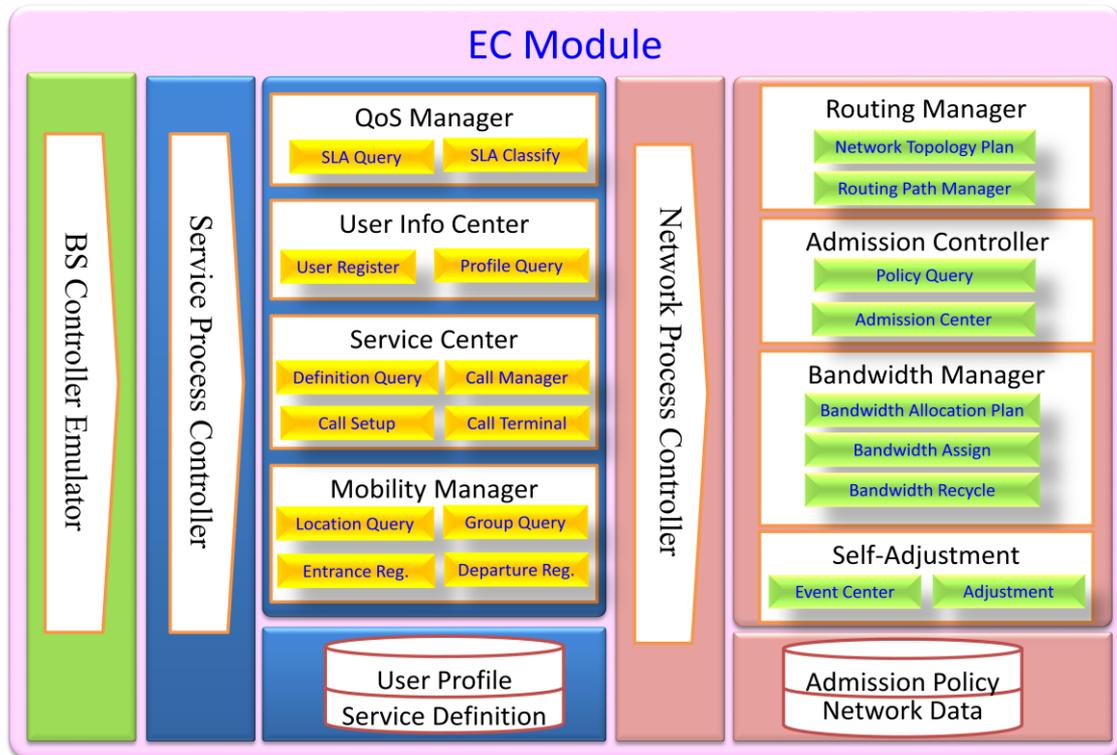


圖 14、EC Module 功能模組

如圖 15,(a)是 CCN 孤立台與鄰台連線架構,手機信號透過孤立台 EC Module 處理並經 ICC Module 轉送至鄰台,而從(b)可知孤立台利用緊急修復包恢復各項功能之後,利用長距離 Wi-Fi 等無線鏈結元件(ICC Module)與鄰台建立連線。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。

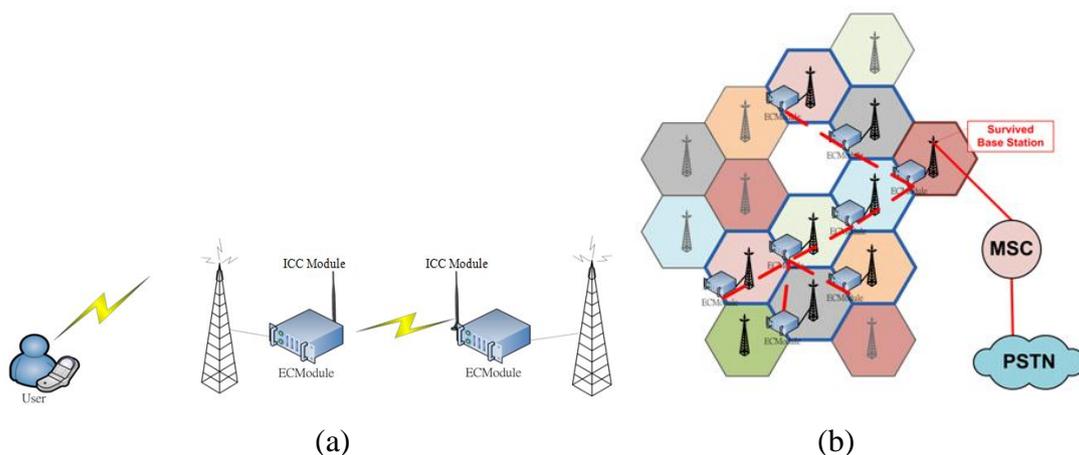


圖 15、孤立台恢復連線方式

(a)CCN 孤立台與鄰台連線架構、(b)鄰台間以多重跳接恢復與核心網路連線

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。

3.3、 系統使用時機

如前所述，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 CCN 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，使用原有手機不需要訓練即可快速上手使用，但由於此系統是依附原有通訊設備，隨著時間的推移，電信公司將會逐步修復原有基地台，此系統的作用也會慢慢下降直到所有基地台修復完成，如圖 16 所示。

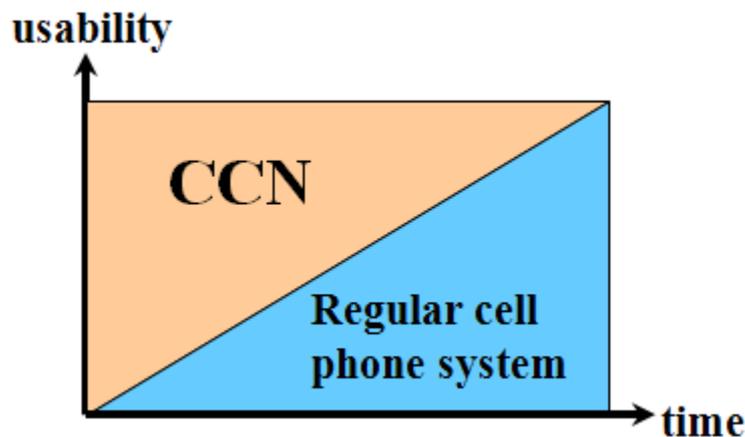


圖 16、CCN 使用時機

3.4、 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(緊急修復包)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)。

3.5、 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 透過無線電通訊連接相鄰的孤立台，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。

3.6、 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**優先群集模式**。

- **一般模式(Ordinary Mode)**

此即原本的行動通訊模式，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 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，而在 CCN 裡面的基地台所獲配的頻寬通常將遠低於所獲配的無線電頻道，造成頻道之間置，無線對講機模式利用閒置的頻道讓基地台涵蓋範圍內的手機互相通訊，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。

- **優先群集模式(Priority Group 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、需要怪手支援、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**優先集群模式**，遵循以下數個原則：

- 每一個群體，指定一個代表號，各群體有優先順序，代表號則於災區廣為宣傳

- 每一個群體的成員註冊其電話號碼及所屬群體

- 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

- 受話群體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。

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。

3.7、 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緊急修復包的數量，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) 開放策略以及允入政策

- **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

3.8、 重要研究議題

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[29]，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 ERP 的數量，選擇數個救災效益大的孤立台佈建 ERP，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 ERP 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**：在孤立台提供服務時，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。頻寬分配方法將於第四章詳細敘述。

- **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(例如分散式 Minimum spanning tree)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係數高，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、 CCN 頻寬分配

4.1、 設計理念與目標

一般而言，行動通訊基地台透過 BSC(2G)/RNC(3G)連接核心網路，在頻寬使用上，通常具備下列特性：

- 基地台通常各自有專用頻寬連接 BSC/RNC，其所擁有的頻寬則提供給信號涵蓋範圍內的各用戶使用
- 頻寬之分配及品質不因通話內容的重要性而有差異
- 無特殊事件下，話務量之變化不大，不會瞬間大幅變動
- 在商業因素考量下，常使用服務集縮比，通常為 1：20 [32]

當天然災害發生造成災區通訊受創，因而啟用 CCN 應急通訊系統時，先進行拓樸規劃與建構排程，待佈建完成後，應急通訊服務開通，其涵蓋範圍內的手機將恢復與行動核心網路各元件(如 VLR/HLR/MSC)的信號交換與註冊，重新進入可收發話狀態，由於 CCN 之通訊資源有限且電信業者原本就有集縮比設計，勢必無法滿足全部災區通訊需求。再考量到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、通訊品質需求不同等因素，如何在最大化救災效益的前提下，快速妥適的分配有限之頻寬資源成為 CCN 設計的一個重要課題。

本文以 CCN 連外頻寬及各節點互連頻寬之分配為研究標的，在 CCN 轉送拓樸(Forwarding tree)及可用頻寬已確定的情況下，進行頻寬分配之研究。

4.1.1、 CCN 頻寬使用需求分析

CCN 通訊頻寬之限制與使用需求如下：

I. 頻寬資源有限

- 無法滿足所有連外頻寬需求。
- 鄰台連接頻寬有限且不等：CCN 以無線通訊方式連接鄰台，受距離等地理因素影響，與鄰台互連之穩定可用頻寬，有限且不等。

II. 網路拓樸限制

- 多次轉送(Multi-hop relay)：CCN 內各孤立台無法直接連上核心網路，因此必須循著樹狀結構的拓樸，將話務透過鄰台逐步轉送到連網台，才能連上核心網路，各節點所需頻寬包含發自本地基地台的流量(Local traffic) 以及為鄰台轉送的流量(Forwarding traffic)。
- 過多的轉送將浪費頻寬資源。

III. 差異化頻寬使用需求

災區通訊存在重要性的差異，例如災情通報、指揮調度與互報平安的重要性不同，未差異化通訊品質將造成頻寬資源使用浪費。而 CCN 頻寬的使用，因基地台涵蓋範圍之災害程度、緊急程度或受災人口多寡而使頻寬使用效益亦具有差異。

4.1.2、環境假設

基於 CCN 拓樸以及連網台連外頻寬應用，我們作以下假設：

- I. CCN 樹狀轉送拓樸(Forwarding tree)、連外總頻寬以及鄰台間互連頻寬均穩定存在，當有拓樸節點異動或可用頻寬變動時，再由使用單位依需求重新分配頻寬。
- II. 使用 Circuit switching 模式
 - 當災害發生，受災區一片兵荒馬亂，應急通訊系統應該越簡單越好，使容易快速建置，而 Circuit switching 的控制比 Packet switching 容易。
 - 救災作業中語音通信很重要，Circuit switching 維持 QoS 比 Packet switching 容易。

- 簡化 Bandwidth allocation 成為 Channel allocation 問題。

4.1.3、設計考量與目標

基於前述之 CCN 頻寬使用需求分析及環境假設，歸納 CCN 頻寬分配設計考量應包括：

- 以提升整體頻寬使用效益為目標
- 差異化通訊品質，依需求分配選用，減少頻寬浪費
 - 災情通報等重要話務，需以高品質 Channel 傳遞
 - 慰問關懷話務以 64K 或 16K 品質傳遞，效果無太大差異
- 反應 Channel 配置對不同災情、環境所產生的救災效益(Profit)差異
- 每個基地台可接受的使用者數量需作合理分配，避免分配過度集中，使分配失衡
- CCN topology 以及 Inter base station 鏈結對流量負載的限制

災區通訊存在重要性的差異，例如災情通報與互報平安的重要性不同，在頻寬資源寶貴的災區，若未區分其優先等級將形成資源的浪費，耽誤救災工作。此外，將 Channel 之通訊品質分級，便可在確保高品質通訊之餘，在相同總頻寬下創造更大通訊量，有更多 Channel 資源可以分配。因此，CCN 各 Channel 的使用效益應依地點與 Channel 頻寬而有差異。

為避免頻寬集中分配到部分基地台造成分配失衡，頻寬分配應確保各節點能夠取得基本需求數量的 Channel。此外，各基地台隨著分配數量的逐漸增加，Channel 帶來的邊際效益也將遞減，讓頻寬分配合理地分散到各基地台，因此頻寬分配所帶來的效益將伴隨一個遞減函數，隨基地台獲得分配的 Channel 數量而改變，第一個配發到的 Channel 對基地台具有最大的效益。

CCN 樹狀轉送拓樸(Forwarding tree)形成一個多次轉送的環境，每個節點除

了發自本地基地台的流量外，還需為鄰台轉送流量，因此越接近連網台就越容易形成流量瓶頸。因此頻寬分配時，亦應考慮到各鏈結的總流量，不可超過其最大頻寬限制。

綜上，頻寬分配問題可簡單描述為：在 CCN 樹狀轉送拓樸(Forwarding tree) 環境下，於有限時間內找出一組頻寬分配，使所有基地台救災效益總和最大化。

4.2、 問題定義

每個基地的上行鏈結承載著發自該基地台的話務量以及所轉送來自下行鏈結的話務量，所謂的頻寬分配是該基地台可容許發出的話務量，因為所有基地台所發出的總話務量不可超過連網台的連外頻寬，因此連外頻寬可作為分配的標的。

4.2.1、 救災效益定義

當分配一個 Channel 給某一節點時，所能帶給其服務範圍內人員的救災助益稱為救災效益(Profit)，由於各地災情不一、緊急程度不一、災民需要的協助也不同，因此各節點獲得頻寬配置將產生不同的救災效益。此外，第一個配發到的 Channel 對基地台將具有最大的效益稱為初始救災效益(Initial profit)，而隨著分配數量的逐漸增加，Channel 帶來的邊際效益將遞減。

由於災區的情況通常由國家救災單位收集整合，工程人員並無能力定義出救災效益函數(如初始救災效益值、效益遞減函數)，必須由國家救災單位根據實際災情而定義。

4.2.2、 CCN 頻寬分配問題描述

- 名詞定義

- 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。

- 節點：CCN 基地台，包含孤立台及連網台。
- 連外頻寬：連網台與 BSC/RNC 間可用頻寬。
- 各節點互連頻寬：CCN 鄰台間透過 ICC Module 佈建之穩定可用頻寬。
- 基本 Channel 需求：各節點因應救災需要，必須保留發自本地基地台流量所使用之最小 Channel 數。
- Channel 種類：差異化品質之話務分級，例如以 64k 通訊品質傳送話務之 Channel、以 32k 通訊品質傳送話務之 Channel。
- 救災效益(Profit)：分配一個 Channel 給某一節點時，所能帶給其服務範圍內人員的救災助益。
- 初始救災效益(Initial profit)：各 Channel 種類配給基地台的第一個 Channel 所帶來之救災效益。
- 效益遞減函數(Attenuation function)：隨著分配數量的逐漸增加，各 Channel 種類帶給基地台的救災效益將隨效益遞減函數遞減。
- 單位頻寬救災效益(Profit density)：救災效益/該 Channel 的頻寬大小。
- 頻寬分配模型的使用者：國家救災單位。
- CCN 頻寬資源的使用者：CCN 範圍內手機持有者。
- **最佳化目標**：在有限頻寬下，使 CCN 頻寬配置的救災總效益最大化。
- **給定參數**
 - 給定一個 CCN 應急通訊系統樹狀轉送拓撲 T ，內含有 i 個節點(v_i)、 $i-1$ 條鏈結($e_{i,j}$)分別串連節點 v_i 與節點 v_j ，根節點為 v_1 。
 - 給定 CCN 應急通訊系統連外頻寬(c_l)以及各互連鄰台間可用頻寬(c_i)。
 - 給定可選用 Channel 種類之頻寬需求(b_i)。
 - 給定救災效益函數(F)，包含初始救災效益值(f_{ij})及效益遞減函數 $g(k)$ 。
 - 給定各節點基本 Channel 需求(d_{ij})。

- 問題模型

Given CCN forwarding tree $T=(V,E)$, where

$V = \{v_i \mid i=1, \dots, n\}$ is the set of survival base station, v_1 is the root node that has an external link(連網台),

$E = \{e_{ij} \mid v_i, v_j \in V\}$ is the set of edges between v_i and v_j ,

$C = \{c_i \mid i=1, \dots, n\}$ is the set of uplink capacity of v_i ,

$c_i \leq c_j$, if v_j is the parent node of v_i ,

$B = \{b_j \mid j=1, \dots, m\}$ is the set of bandwidth required per channel class, b_j is the bandwidth required of channel class j ,

$F = \{f_{ij} \mid i=1..n, j=1..m\}$ is the set of the profit of channel assigned, f_{ij} is the profit of the first channel of class j assigned to v_i ,

$g(k)$ is the profit attenuation function of the k -th same channel class assigned to the same node, $k \in Z^+$,

$D = \{d_{ij} \mid i=1..n, j=1..m\}$ is the set of the amount of basic channel needs,

$d_{ij} \in Z^+$ is the basic needs of channel class j assigned to v_i ,

$A = \{a_{ij} \mid i=1..n, j=1..m\}$ is the set of the amount of channel assigned for

local traffic of v_i , $a_{ij} \in Z^+$ is the amount of channel class j assigned to v_i , and

$LB(v_i) = \sum_{j=1..m} a_{ij} \cdot b_j$ is the local bandwidth required of v_i ,

the CCN bandwidth allocation problem is to find A

to maximize
$$\sum_{\substack{i=1..n \\ j=1..m \\ k=1..a_{ij}}} f_{ij} \cdot g(k),$$

subject to $LB(v_i) + \sum_{\forall v_i \in \text{descent}(v_i)} LB(v_i) \leq c_i$ and $[a_{ij}] \geq [d_{ij}], \forall i, j$.

4.3、 計算複雜度分析

CCN 的頻寬分配(CCN bandwidth allocation problem), 其實是一種巢狀的 0-1 背包問題。因為 0-1 背包問題是 NP-Hard 問題, CCN 頻寬分配問題自然也是 NP-Hard。本節將證明應急蜂巢式行動通訊網路的頻寬分配問題為 NP-Hard 問題。

4.3.1、 0-1 Knapsack Problem (0-1 KP)

Given a knapsack and a set of items, the objective of 0-1 knapsack problem is to select a subset of the items such that the total value of the selected items is maximized without having the weight sum to exceed the capacity.

Mathematical definition of the 0-1 Knapsack Problem[20] : Given n items to pack in some knapsack of capacity c . Each item j has a profit p_j and weight w_j , and we wish to find the set of items $n \subseteq N$ to

$$\begin{aligned} \text{maximize } z &= \sum_{j=1}^n p_j x_j \\ \text{subject to } \sum_{j=1}^n w_j x_j &\leq c, \quad x_j \in \{0, 1\}, j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

KP is NP-hard [9,20] and it is therefore very unlikely that a polynomial time algorithm can be devised.

4.3.2、 CCN Bandwidth Allocation Problem (CCN-BA)

在 CCN forwarding tree 環境下, 各節點(v_i)有 m 個 Channel class 可供選擇配置, 和一個 Uplink capacity 限制, 而每一個配置的 Channel 獲得一個對應的救災效益。

CCN的每個節點都可視為一個背包問題，需選擇適當的 Channel 分配進去，使在 Upstream capacity 的限制下，獲取最大效益。各節點除了發自本地基地台的流量外，還需為鄰台轉送流量，因此 CCN 所有節點除了自成一個背包問題外，各節點與父節點也將形成另一個背包問題，與祖父節點再形成另一個背包問題，形成巢狀背包問題(Nested 0-1 KP)，如圖 17。

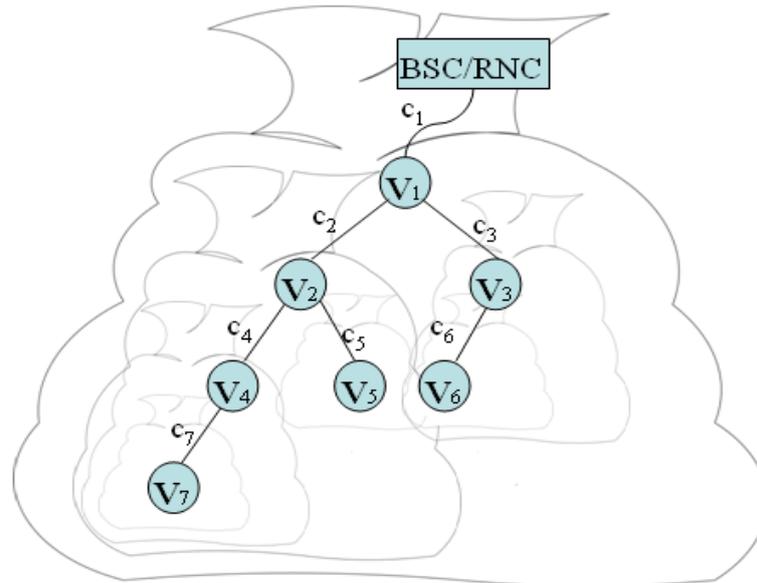


圖 17、CCN-BA 巢狀背包問題

4.3.3、CCN-BA 計算複雜度

Given an instance $X:[C,W,P]$ in 0-1 knapsack problem, we can find an instance $Y:[V,T,C',B,F,D,G]$ in CCN-BA such that an optimal solution a_y for Y is also an optimal solution for X . Let instance Y be a one level tree, where $V=T=\{v_1\}$, $C'=\{C\}$, $B=W$, $F=P$, $D=\{0\}$, and $G=\{1\}$. Denote the total profit of a solution a for X and Y to be $p_x(a)$ and $p_y(a)$, respectively. Because $F=P$, 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 allocation for X . Since $B=W$, $F=P$, and $C'=\{C\}$, any solution of Y whose total bandwidth must less than or equal to the given limit C so that a_y must be a valid allocation for X .

Since instance Y is a one level tree, for a similar argument, we can prove that any valid allocation a_x for X is also a valid allocation for Y .

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 allocation for X , whose total profit is $p(a_y)$. Assume a_y is not an optimal allocation for X , there must be another allocation a_x , whose total profit $p(a_x)$ is greater than $p(a_y)$. And any valid a_x is also a valid allocation 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 CCN-BA to 0-1 Knapsack Problem is done. The proof of NP-hardness of CCN-BA is straightforward. Q.E.D.

4.4、 啟發式頻寬分配演算法

4.4.1、 演算法設計

CCN 頻寬分配是一個 NP-Hard 問題，由於救災工作必需與時間賽跑，當 CCN 涵蓋基地台數量多時，可供選擇分配之 Channel 配置方案將大增，使無法在限定時間內找出最佳解，因此本論文提出一個啟發式演算法，可在短時間內計算出一個接近最佳解的 CCN 頻寬分配組合，我們稱之為 Bandwidth Allocation Greedy 演算法，簡稱 BAG。

BAG 採用 Iterative 方式，每一步挑選一個節點分配一個 Channel(稱為節點-Channel 組合)，逐步將所有頻寬分配完，或剩餘頻寬無法分配為止。每一步的挑選以單位頻寬救災效益最高的節點-Channel 組合為標的。

• **BAG 演算法流程**

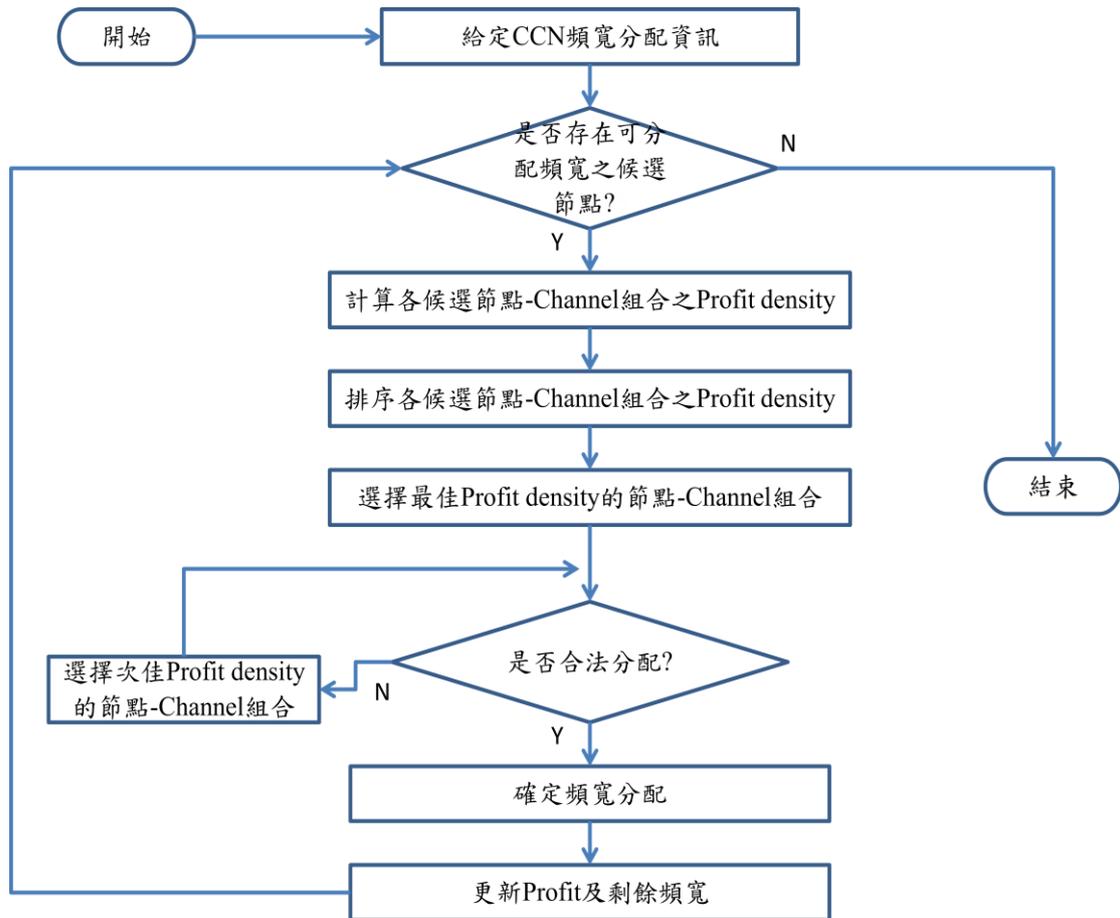


圖 18、BAG 演算法流程

• **BAG 演算法 Pseudo Code**

BAG(T,C,B,F,D)

Set A={}

Set V={}

initial A = D

initial V = V_T

initial C = C-(A · B)

if any $c_i < \text{minimum } b_j$

delete v_i and descent(v_i) from V

end if

while V is not empty do

sort F of V by ProfitDensity(F/ b_j)

find maximum $f_{ij} \cdot g(k)$ subject to each c_i for every proceeding node from v_i to

$root \geq b_j$

```

plus 1 to  $a_{ij}$ 
subtract  $b_j$  from each  $c_i$  for every proceeding node from  $v_i$  to  $root$ 
update  $f_{ij} : g(k+1)$  to F
if any  $c_i < \text{minimum } b_j$ 
    delete  $v_i$  and  $\text{descent}(v_i)$  from V
end if
end while

```

4.4.2、BAG 演算法

BAG 演算法以 CCN 樹狀轉送拓樸內各節點與可選擇 Channel 類別之排列組合形成候選集合，頻寬分配時，將以候選集中具有最佳單位頻寬效益(Profit density)之節點-Channel 組合進行配置。以圖 19、表 4 為例， $[v_5, 7k]$ 為最高 Profit density (3.29) 的節點-Channel 組合，將優先獲得頻寬分配。

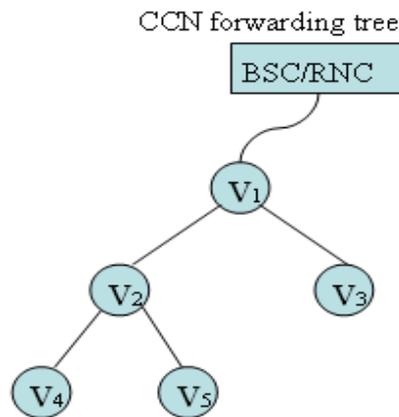


圖 19、範例-CCN 樹狀轉送拓樸

表 4、範例-CCN-BA 候選配置

| Node \ Channel class | 12k | | 7k | | 5k | |
|----------------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|
| | Profit | Profit density | Profit | Profit density | Profit | Profit density |
| v_1 | 16 | 1.33 | 13 | 1.86 | 5 | 1.00 |
| v_2 | 15 | 1.25 | 10 | 1.43 | 7 | 1.40 |
| v_3 | 25 | 2.08 | 20 | 2.86 | 10 | 2.00 |
| v_4 | 18 | 1.50 | 12 | 1.71 | 8 | 1.60 |
| v_5 | 29 | 2.42 | 23 | 3.29 | 15 | 3.00 |

由於 CCN 流量的多次轉送特性，流量需經由路徑上各節點轉送，佔用各節點頻寬資源，因此在頻寬配置前，必需先確認從受配發節點到 Root 連外的路徑

上，是否仍有足夠頻寬，一旦發現路徑上頻寬資源不足，將改選擇次佳單位頻寬效益(Profit density)進行配置，如次佳配置亦無法符合頻寬限制，將選擇再次佳分配，直到所有連外頻寬無法再分配出任一 Channel 為止。以圖 20 為例，當 $[v_5, 7k]$ 為最佳單位頻寬效益(Profit density)時(圖 20.(a))，將會佔用 v_5, v_2, v_1 各 7k 頻寬，但發現 v_2 到 v_1 頻寬不足，於是將另選擇次佳單位頻寬效益(Profit density)嘗試配置，以表 4 為例， $[v_5, 5k]$ 是次佳單位頻寬效益(Profit density)，而且 v_5, v_2, v_1 路徑上有足夠的 5k 頻寬，故此次頻寬分配選擇為 $[v_5, 5k]$ (圖 20.(b))。

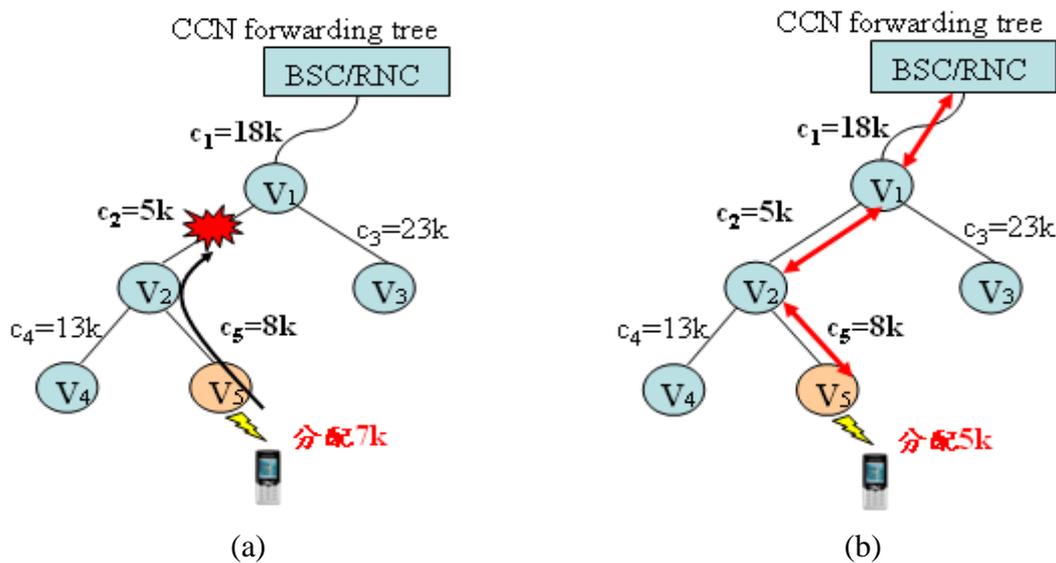


圖 20、範例-CCN traffic relay 及頻寬限制

隨著各節點分配到頻寬數量的增加，頻寬帶來之救災效益(Profit)會隨效益遞減函數變化，因此頻寬分配後必需更新對應之救災效益，再重新與其他候選配置方案做比較。假設效益遞減函數為 $\frac{1}{\sqrt{k}}$ ，其中 k 為”下一次”獲分配的 Channel 是第 k 個 Channel，以表 4 為例，當 $[v_5, 5k]$ 獲第 1 次頻寬分配後，下一次若獲分配則為第 2 個 Channel，因此表 4 中 $[v_5, 5k]$ 的[Profit, Profit density]應以初始救災效益值(Initial profit)乘以 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ，更新為 $[10.61, 2.12]$ (如表 5、表 6)，並以此更新過後之單位頻寬救災效益(Profit density)與其他候選配置方案做比較。

表 5、範例-CCN-BA 候選配置集合表更新

| Node \ Channel class | 12k | | 7k | | 5k | |
|----------------------|--------|----------------|--------|----------------|--------------|----------------|
| | Profit | Profit density | Profit | Profit density | Profit | Profit density |
| v_1 | 16 | 1.33 | 13 | 1.86 | 5 | 1.00 |
| v_2 | 15 | 1.25 | 10 | 1.43 | 7 | 1.40 |
| v_3 | 25 | 2.08 | 20 | 2.86 | 10 | 2.00 |
| v_4 | 18 | 1.50 | 12 | 1.71 | 8 | 1.60 |
| v_5 | 29 | 2.42 | 23 | 3.29 | 10.61 | 2.12 |

表 6、範例- $[v_5, 5k]$ 救災效益遞減變化

| | | | | | |
|---|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| [$v_5, 5k$]效益遞減函數： $\frac{1}{\sqrt{k}}$ | | | | | |
| 第 1 次頻寬分配 | | 第 2 次頻寬分配 | | 第 3 次頻寬分配 | |
| Profit | Profit density | Profit | Profit density | Profit | Profit density |
| 15 | 3.00 | 10.61 | 2.12 | 8.66 | 1.73 |

當剩餘的 CCN 連外頻寬無法再配發任何一種 Channel 使用時，也就是當 CCN 剩餘的連外頻寬小於可供選擇之最小頻寬 Channel，演算法結束。

4.4.3、BAG 演算法範例

BAG 演算法以一個 CCN 樹狀轉送拓樸為範圍，依據其中各節點分配到不同種類的 Channel 時，可分別帶來的效益多寡，以及樹狀轉送拓樸各節點互連頻寬限制，進行頻寬分配。給定初始狀態資訊如下：

- CCN 樹狀轉送拓樸

如圖 19。

- 可用頻寬限制

表 7、範例-CCN 可用頻寬

| Node \ Item | v_1 | v_2 | v_3 | v_4 | v_5 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Link capacity (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5) | 58 | 30 | 20 | 20 | 20 |

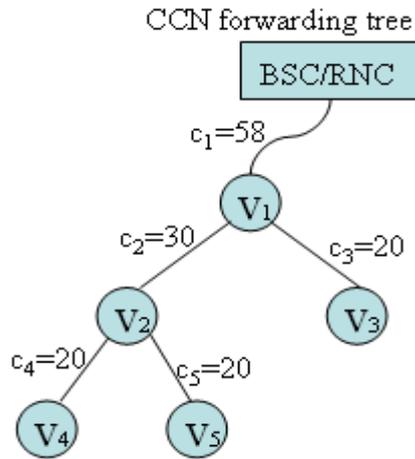


圖 21、範例-CCN 各鏈結之可用頻寬

- 可供選用之 Channel 種類：{12k, 7k, 5k}
- 救災效益函數

救災效益函數 = 初始救災效益 x 效益遞減函數

表 8、範例-CCN 初始救災效益

| Node \ Channel class | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|-----|----|----|
| v_1 | 16 | 13 | 5 |
| v_2 | 15 | 10 | 7 |
| v_3 | 25 | 20 | 10 |
| v_4 | 18 | 12 | 8 |
| v_5 | 29 | 23 | 15 |

$$\text{效益遞減函數 } g(k) = \frac{1}{\sqrt{k}}$$

每單位頻寬救災效益(Profit density) = 救災效益/頻寬

表 9、範例-CCN 每單位頻寬初始救災效益

| Node \ Channel class | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|------|------|------|
| v_1 | 1.33 | 1.86 | 1.00 |
| v_2 | 1.25 | 1.43 | 1.40 |
| v_3 | 2.08 | 2.86 | 2.00 |
| v_4 | 1.50 | 1.71 | 1.60 |
| v_5 | 2.42 | 3.29 | 3.00 |

- 基本 Channel 需求

表 10、範例-基本 Channel 需求

| Node \ Channel class | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|-----|----|----|
| v_1 | 0 | 1 | 0 |
| v_2 | 0 | 1 | 0 |
| v_3 | 0 | 1 | 0 |
| v_4 | 0 | 1 | 0 |
| v_5 | 0 | 1 | 0 |

我們以圖 22 到圖 30 以及表 11 到表 19 解釋 BAG 演算法，共分五個時間點，從初始給定資訊優先分配各節點基本 Channel 需求開始，之後將剩下的頻寬透過 BAG 演算法，依據頻寬限制條件下之最佳單位頻寬救災效益值(Profit density)逐一分配，茲詳述如下：

- I. 時間點一，候選節點： $[v_1, v_2, v_3, v_4, v_5]$ ，如圖 22，各節點基本 Channel 需求頻寬分配： $[v_1, 7k]$ 、 $[v_2, 7k]$ 、 $[v_3, 7k]$ 、 $[v_4, 7k]$ 、 $[v_5, 7k]$ 。分配後，頻寬配置情形如表 11，以救災效益遞減函數更新頻寬分配救災效益如表 12，CCN 樹狀轉送拓樸頻寬限制更新如圖 23。

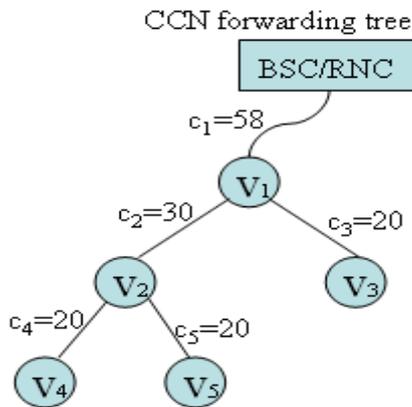


圖 22、範例-時間點一之候選節點

表 11、範例-時間點一頻寬分配情形

| Node \ Channel class | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|-----|----|----|
| v_1 | 0 | 1 | 0 |
| v_2 | 0 | 1 | 0 |
| v_3 | 0 | 1 | 0 |
| v_4 | 0 | 1 | 0 |
| v_5 | 0 | 1 | 0 |

表 12、範例-時間點一頻寬分配後救災效益

| Node \ Channel class | 12k | | 7k | | 5k | |
|----------------------|--------|----------------|--------------|----------------|--------|----------------|
| | Profit | Profit density | Profit | Profit density | Profit | Profit density |
| v_1 | 16 | 1.33 | 9.19 | 1.31 | 5 | 1.00 |
| v_2 | 15 | 1.25 | 7.07 | 1.01 | 7 | 1.40 |
| v_3 | 25 | 2.08 | 14.14 | 2.02 | 10 | 2.00 |
| v_4 | 18 | 1.50 | 8.49 | 1.21 | 8 | 1.60 |
| v_5 | 29 | 2.42 | 16.26 | 2.32 | 15 | 3.00 |

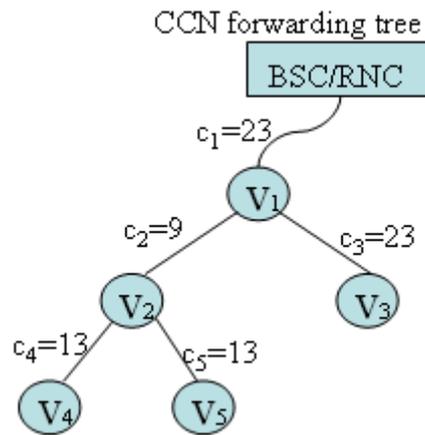


圖 23、範例-時間點一頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬

II. 時間點二，候選節點： $[v_1, v_2, v_3, v_4, v_5]$ ，如圖 24，候選節點中，最大 Profit density 之頻寬分配選擇為 $[v_5, 5k]$ (表 12)。分配後，頻寬配置情形如表 13，以救災效益遞減函數更新頻寬分配救災效益如表 14，CCN 樹狀轉送拓樸頻寬限制更新如圖 25。

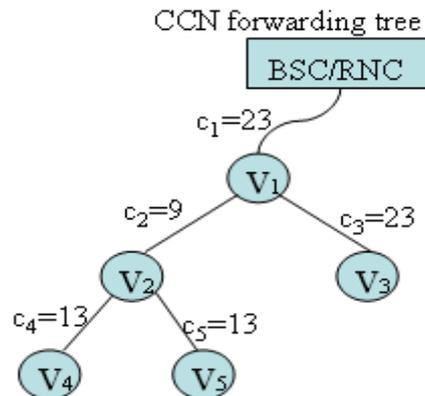


圖 24、範例-時間點二之候選節點

表 13、範例-時間點二頻寬分配情形

| Node \ Channel class | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|-----|----|----|
| v_1 | 0 | 1 | 0 |
| v_2 | 0 | 1 | 0 |
| v_3 | 0 | 1 | 0 |
| v_4 | 0 | 1 | 0 |
| v_5 | 0 | 1 | 1 |

表 14、範例-時間點二頻寬分配後救災效益

| Node \ Channel class | 12k | | 7k | | 5k | |
|----------------------|--------|----------------|--------|----------------|--------------|----------------|
| | Profit | Profit density | Profit | Profit density | Profit | Profit density |
| v_1 | 16 | 1.33 | 9.19 | 1.31 | 5 | 1.00 |
| v_2 | 15 | 1.25 | 7.07 | 1.01 | 7 | 1.40 |
| v_3 | 25 | 2.08 | 14.14 | 2.02 | 10 | 2.00 |
| v_4 | 18 | 1.50 | 8.49 | 1.21 | 8 | 1.60 |
| v_5 | 29 | 2.42 | 16.26 | 2.32 | 10.61 | 2.12 |

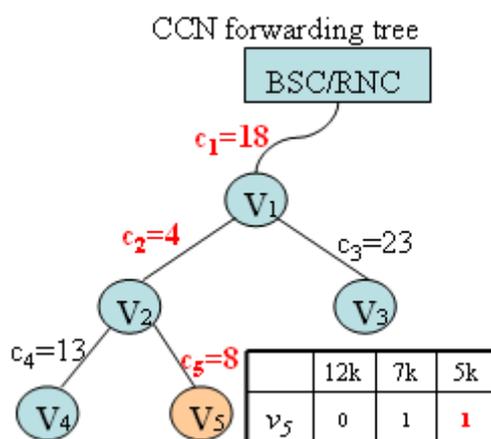


圖 25、範例-時間點二頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬

III. 時間點三，候選節點： $[v_1, v_3]$ ，如圖 26。由於 v_2 剩餘可用頻寬已小於可供選擇之最小頻寬(5k)，因此 v_2 及其 Subtree 各節點均自候選節點中刪除。候選節點中，最大 Profit density 之頻寬分配選擇為 $[v_3, 12k]$ (表 14)。分配後，頻寬配置情形如表 15，以救災效益遞減函數更新頻寬分配救災效益如表 16，CCN 樹狀轉送拓樸頻寬限制更新如圖 27。

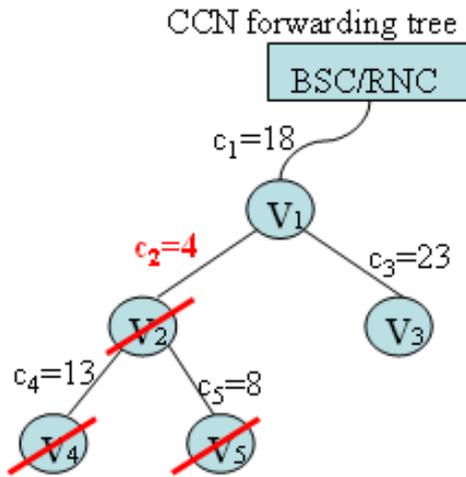


圖 26、範例-時間點三之候選節點

表 15、範例-時間點三頻寬分配情形

| Channel class \ Node | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|-----|----|----|
| v_1 | 0 | 1 | 0 |
| v_2 | 0 | 1 | 0 |
| v_3 | 1 | 1 | 0 |
| v_4 | 0 | 1 | 0 |
| v_5 | 0 | 1 | 1 |

表 16、範例-時間點三頻寬分配後救災效益

| Channel class \ Node | 12k | | 7k | | 5k | |
|----------------------|--------------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|
| | Profit | Profit density | Profit | Profit density | Profit | Profit density |
| v_1 | 16 | 1.33 | 9.19 | 1.31 | 5 | 1.00 |
| v_3 | 17.68 | 1.47 | 14.14 | 2.02 | 10 | 2.00 |

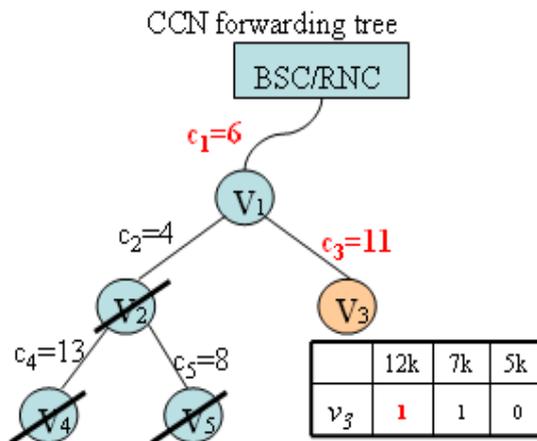


圖 27、範例-時間點三頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬

IV. 時間點四，候選節點： $[v_1, v_3]$ ，如圖 28，候選節點中，最大 Profit density 之頻寬分配選擇為 $[v_3, 7k]$ (表 16)，但由於 v_1 連外頻寬已不足 7k，故改選擇次佳 Profit density $[v_3, 5k]$ (表 16)。分配後，頻寬配置情形如表 17，以救災效益遞減函數更新頻寬分配救災效益如表 18，CCN 樹狀轉送拓樸頻寬限制更新如圖 29。

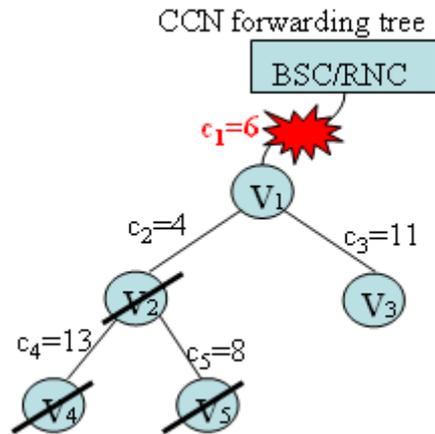


圖 28、範例-時間點四之候選節點

表 17、範例-時間點四頻寬分配情形

| Channel class \ Node | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|-----|----|----|
| v_1 | 0 | 1 | 0 |
| v_2 | 0 | 1 | 0 |
| v_3 | 1 | 1 | 1 |
| v_4 | 0 | 1 | 0 |
| v_5 | 0 | 1 | 1 |

表 18、範例-時間點四頻寬分配後救災效益

| Channel class \ Node | 12k | | 7k | | 5k | |
|----------------------|--------|----------------|--------|----------------|-------------|----------------|
| | Profit | Profit density | Profit | Profit density | Profit | Profit density |
| v_1 | 16 | 1.33 | 9.19 | 1.31 | 5 | 1.00 |
| v_3 | 17.68 | 1.47 | 14.14 | 2.02 | 7.07 | 1.41 |

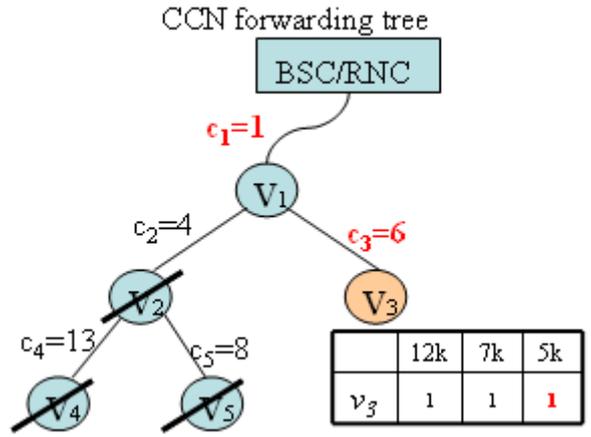


圖 29、範例-時間點四頻寬分配後樹狀轉送拓樸剩餘頻寬

V. 時間點五，候選節點： $[0]$ ，如圖 30，頻寬分配完成。由於 v_1 剩餘可用頻寬已小於可供選擇之最小頻寬(5k)，因此 v_1 及其 Subtree 各節點均自候選節點中刪除。最終頻寬配置情形如表 19，總救災效益(Total profit) = Profit of basic needs + Profit of channel assigned by profit density = $(13+10+20+12+23)+15+25+10=128$ 。

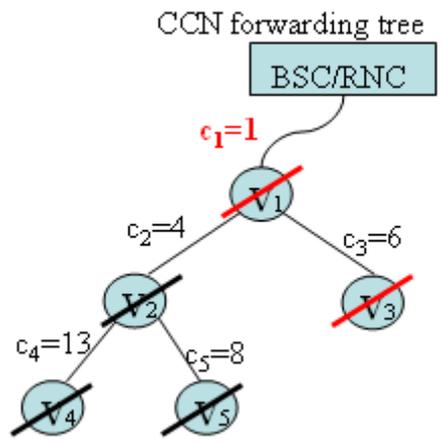


圖 30、範例-時間點五之候選節點

表 19、範例-時間點五頻寬分配情形

| Channel class \ Node | 12k | 7k | 5k |
|----------------------|-----|----|----|
| v_1 | 0 | 1 | 0 |
| v_2 | 0 | 1 | 0 |
| v_3 | 1 | 1 | 1 |
| v_4 | 0 | 1 | 0 |
| v_5 | 0 | 1 | 1 |

第五章、效能評估

我們對所提出之 BAG 演算法進行效能評估，判斷演算法解與最佳解的差距，因本問題之複雜度，難以利用數學的方式證明與最佳解的差距，因此我們使用電腦隨機產生大量模擬案例，評估 BAG 演算法的效能，觀察在不同規模之下其與最佳解之差距。

5.1、實驗設計

我們以 6 至 10 個斷訊基地台的小範圍災區以及 100 個斷訊基地台的大範圍災區為實驗環境，分別在相同的網路拓樸及頻寬資源限制下，找出最佳解以相互比較，每一種災區規模各做 10 個獨立測試。

- 實驗一：

以 $\frac{1}{\sqrt{k}}$ 為效益遞減函數，基地台個數為 6~10 個。

- 實驗二

以 $\frac{1}{k}$ 為效益遞減函數，基地台個數為 6~10 個。

- 實驗三

大規模案例(100 個基地台)測試，以 $\frac{1}{\sqrt{k}}$ 為效益遞減函數。

5.1.1、實驗環境

我們利用 C 語言針對提出的 BAG 演算法實做，將亂數產生的 Instance 進行計算，得出最佳解、最差解，憑以計算 BAG 演算法在不同環境條件下之效能。

實驗用電腦軟硬體規格：

- 處理器：Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E7400 @ 2.80GHz 雙核
- 記憶體：2.00 GB

- 系統類型：32 位元 Microsoft Windows XP SP3

5.1.2、 評估指標

由於實驗案例是由亂數隨機產生，每次實驗皆獨立不相關，因此計算所得效能必須經過正規化(Normalization)，如公式 1 所示，稱為誤差(Deviations from optimum solution，簡稱 Deviation)，方能互相比較。

- 誤差=(最佳解-演算法解)/(最佳解-最差解).....(1)

5.2、 救災效益函數

各基地台之救災效益是當該基地台獲得頻寬分配時，對所服務災區所提供的效益，而救災效益函數為隨著頻寬分配數量變化的救災效益，隨著頻寬分配數量越多，每單位頻寬資源帶來的救災效益將會越來越低，我們假設了二個簡單的非線性效益遞減函數($\frac{1}{\sqrt{k}}$ 、 $\frac{1}{k}$)，使用於我們的實驗中。

5.3、 實驗參數

表 20、測試案例參數

| Parameters | Range of values |
|----------------------|--------------------------------------|
| Link capacity | Uniform(32, 100) |
| Initial profit | Uniform(30, 100) |
| Attenuation function | $\frac{1}{\sqrt{k}}$ 、 $\frac{1}{k}$ |
| Channel class | Uniform(16, 32) |
| Forwarding tree size | 6、7、8、9、10、100 |

5.4、 實驗結果

本節呈現並分析實驗結果，5.4.1 節及 5.4.2 節為實驗一、二的結果，而 5.4.3 節為大規模實驗的結果。BAG solution 是演算法解，Performance range 為最佳解與最差解之差距。

5.4.1、 實驗一

表 21、22、23、24、25 及圖 31、32 為實驗一(效益遞減函數 $\frac{1}{\sqrt{k}}$)的實驗結果，由這些結果可以發現，50 個測試案例之整體誤差範圍在 0~10.68%，當基地台數量為 7 時，獲得 7 個最佳解(零誤差)，基地台數量為 10 時，獲得 4 個最佳解，整體實驗共獲得最佳解 27 個。隨著基地台數量增加，平均誤差值緩慢增加，由 2.50% 增加至 4.46%。不同基地台個數演算法平均效能，則由 6 個基地台的 98.21% 略降至 10 個基地台的 96.71%。

表 21、實驗一結果-演算法誤差(6 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 407.76 | 133.65 | 274.11 | 398.47 | 3.39% | 97.72% |
| 2 | 466.52 | 68.53 | 397.99 | 466.52 | 0.00% | 100.00% |
| 3 | 388.00 | 121.08 | 266.92 | 360.69 | 10.23% | 92.96% |
| 4 | 456.99 | 151.89 | 305.10 | 456.99 | 0.00% | 100.00% |
| 5 | 393.40 | 158.00 | 235.40 | 385.62 | 3.30% | 98.02% |
| 6 | 401.00 | 105.28 | 295.72 | 401.00 | 0.00% | 100.00% |
| 7 | 302.38 | 111.46 | 190.92 | 302.38 | 0.00% | 100.00% |
| 8 | 477.40 | 86.32 | 391.08 | 446.00 | 8.03% | 93.42% |
| 9 | 540.00 | 137.00 | 403.00 | 540.00 | 0.00% | 100.00% |
| 10 | 457.87 | 91.38 | 366.49 | 457.87 | 0.00% | 100.00% |
| | | | | Average | 2.50% | 98.21% |

表 22、實驗一結果-演算法誤差(7 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-------------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | $E=(A-D)/C$ | $F=D/A$ |
| 1 | 430.40 | 110.00 | 320.40 | 404.40 | 8.11% | 93.96% |
| 2 | 438.57 | 109.00 | 329.57 | 408.35 | 9.17% | 93.11% |
| 3 | 483.06 | 119.00 | 364.06 | 483.06 | 0.00% | 100.00% |
| 4 | 448.00 | 119.70 | 328.30 | 420.00 | 8.53% | 93.75% |
| 5 | 454.64 | 111.38 | 343.26 | 454.64 | 0.00% | 100.00% |
| 6 | 484.81 | 113.00 | 371.81 | 484.81 | 0.00% | 100.00% |
| 7 | 537.00 | 92.33 | 444.67 | 537.00 | 0.00% | 100.00% |
| 8 | 459.81 | 134.78 | 325.03 | 459.81 | 0.00% | 100.00% |
| 9 | 504.47 | 128.00 | 376.47 | 504.47 | 0.00% | 100.00% |
| 10 | 481.40 | 136.00 | 345.40 | 481.40 | 0.00% | 100.00% |
| | | | | Average | 2.58% | 98.08% |

表 23、實驗一結果-演算法誤差(8 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-------------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | $E=(A-D)/C$ | $F=D/A$ |
| 1 | 477.18 | 133.65 | 343.52 | 477.18 | 0.00% | 100.00% |
| 2 | 457.87 | 91.21 | 366.65 | 431.35 | 7.23% | 94.21% |
| 3 | 373.07 | 110.41 | 262.66 | 362.45 | 4.04% | 97.15% |
| 4 | 522.00 | 110.87 | 411.13 | 522.00 | 0.00% | 100.00% |
| 5 | 430.00 | 100.52 | 329.48 | 429.23 | 0.24% | 99.82% |
| 6 | 500.71 | 97.87 | 402.84 | 500.71 | 0.00% | 100.00% |
| 7 | 464.45 | 89.09 | 375.36 | 464.45 | 0.00% | 100.00% |
| 8 | 517.00 | 125.30 | 391.70 | 517.00 | 0.00% | 100.00% |
| 9 | 444.30 | 112.75 | 331.55 | 416.30 | 8.45% | 93.70% |
| 10 | 428.71 | 109.65 | 319.06 | 428.71 | 0.00% | 100.00% |
| | | | | Average | 2.68% | 98.01% |

表 24、實驗一結果-演算法誤差(9 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 400.00 | 103.00 | 297.00 | 376.00 | 8.08% | 94.00% |
| 2 | 404.00 | 153.06 | 250.94 | 389.64 | 5.72% | 96.45% |
| 3 | 413.52 | 93.66 | 319.86 | 390.52 | 7.19% | 94.44% |
| 4 | 458.11 | 112.67 | 345.44 | 458.11 | 0.00% | 100.00% |
| 5 | 548.00 | 75.39 | 472.61 | 548.00 | 0.00% | 100.00% |
| 6 | 451.47 | 131.04 | 320.43 | 429.47 | 6.87% | 95.13% |
| 7 | 432.52 | 116.51 | 316.01 | 432.52 | 0.00% | 100.00% |
| 8 | 476.00 | 82.24 | 393.76 | 476.00 | 0.00% | 100.00% |
| 9 | 477.05 | 130.87 | 346.18 | 477.05 | 0.00% | 100.00% |
| 10 | 426.00 | 86.81 | 339.19 | 400.00 | 7.67% | 93.90% |
| | | | | Average | 3.55% | 97.39% |

表 25、實驗一結果-演算法誤差(10 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 492.71 | 100.52 | 392.19 | 492.71 | 0.00% | 100.00% |
| 2 | 461.21 | 84.52 | 376.68 | 441.00 | 5.36% | 95.62% |
| 3 | 495.05 | 83.53 | 411.52 | 495.05 | 0.00% | 100.00% |
| 4 | 401.00 | 120.00 | 281.00 | 371.00 | 10.68% | 92.52% |
| 5 | 419.69 | 125.65 | 294.04 | 400.00 | 6.70% | 95.31% |
| 6 | 513.18 | 91.38 | 421.80 | 513.18 | 0.00% | 100.00% |
| 7 | 429.00 | 94.92 | 334.08 | 402.00 | 8.08% | 93.71% |
| 8 | 430.00 | 129.63 | 300.37 | 410.00 | 6.66% | 95.35% |
| 9 | 411.00 | 102.80 | 308.20 | 389.00 | 7.14% | 94.65% |
| 10 | 530.71 | 110.92 | 419.79 | 530.71 | 0.00% | 100.00% |
| | | | | Average | 4.46% | 96.71% |

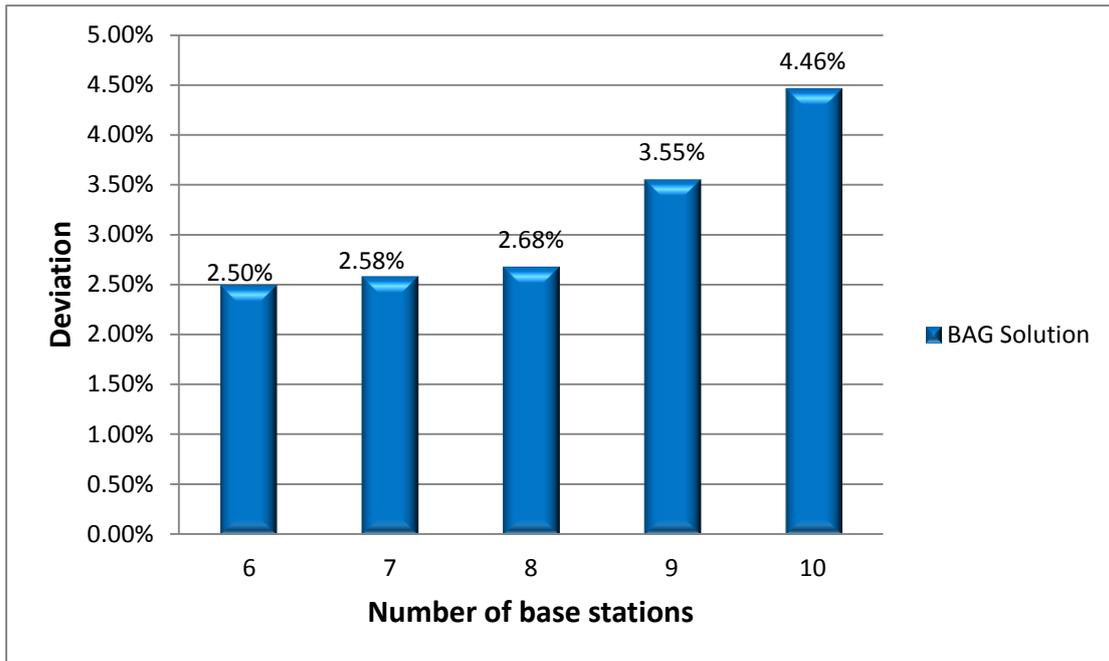


圖 31、實驗一基地台數量與效能之關係-平均誤差

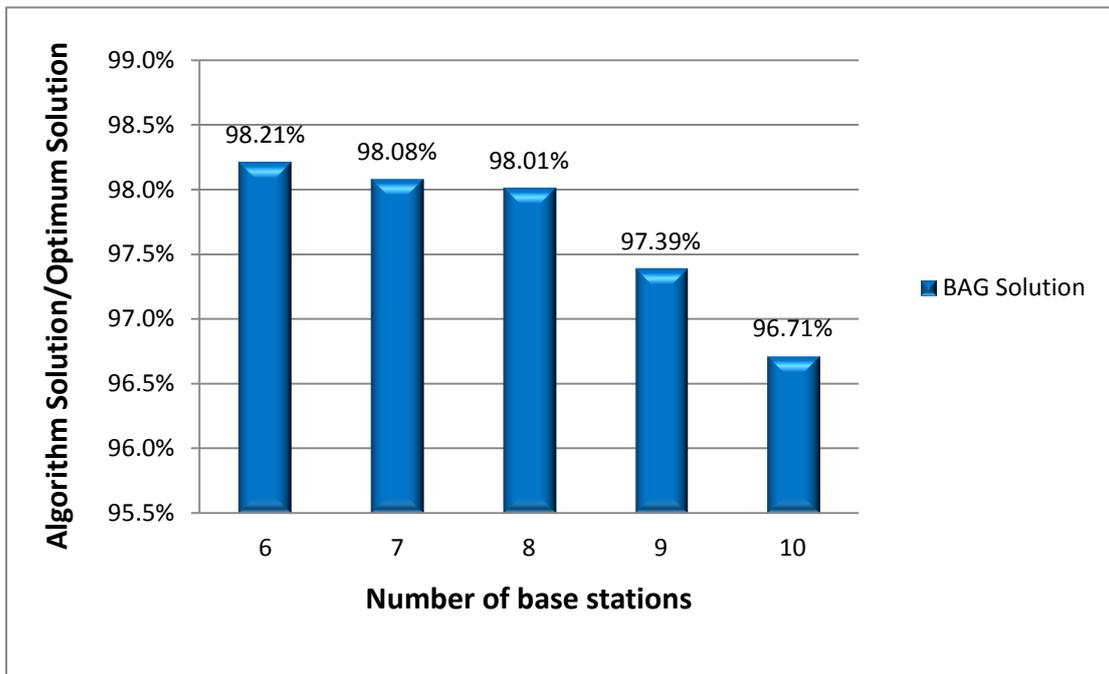


圖 32、實驗一基地台數量與效能之關係-平均最佳解達成率

5.4.2、實驗二

表 26、27、28、29、30 及圖 33、34 為實驗二(效益遞減函數 $\frac{1}{k}$)的實驗結果，由這些結果可以發現，50 個測試案例之整體誤差範圍在 0~14.03%，當基地台數量為 6~10 個時，可獲得 2~3 個最佳解(零誤差)，整體實驗共獲得最佳解 14 個；隨著基地台數量增加，平均誤差值範圍在 3.14%~4.76%。不同基地台個數演算法平均效能，則由 6 個基地台的 97.58%略降至 10 個基地台的 96.32%。

表 26、實驗二結果-演算法誤差(6 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 436.00 | 73.33 | 362.67 | 414.00 | 6.07% | 94.95% |
| 2 | 440.00 | 55.00 | 385.00 | 435.00 | 1.30% | 98.86% |
| 3 | 388.00 | 97.17 | 290.83 | 388.00 | 0.00% | 100.00% |
| 4 | 431.00 | 125.00 | 306.00 | 423.00 | 2.61% | 98.14% |
| 5 | 388.00 | 120.05 | 267.95 | 369.00 | 7.09% | 95.10% |
| 6 | 401.00 | 97.00 | 304.00 | 401.00 | 0.00% | 100.00% |
| 7 | 296.00 | 75.95 | 220.05 | 279.00 | 7.73% | 94.26% |
| 8 | 460.00 | 64.58 | 395.42 | 446.00 | 3.54% | 96.96% |
| 9 | 520.00 | 137.00 | 383.00 | 520.00 | 0.00% | 100.00% |
| 10 | 436.00 | 73.33 | 362.67 | 425.00 | 3.03% | 97.48% |
| | | | | Average | 3.14% | 97.58% |

表 27、實驗二結果-演算法誤差(7 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 435.00 | 106.25 | 328.75 | 424.00 | 3.35% | 97.47% |
| 2 | 422.00 | 99.00 | 323.00 | 408.00 | 4.33% | 96.68% |
| 3 | 466.00 | 89.58 | 376.42 | 444.00 | 5.84% | 95.28% |
| 4 | 448.00 | 111.00 | 337.00 | 420.00 | 8.31% | 93.75% |
| 5 | 420.00 | 83.33 | 336.67 | 420.00 | 0.00% | 100.00% |
| 6 | 465.00 | 108.17 | 356.83 | 445.00 | 5.60% | 95.70% |
| 7 | 537.00 | 75.00 | 462.00 | 537.00 | 0.00% | 100.00% |
| 8 | 447.00 | 108.17 | 338.83 | 447.00 | 0.00% | 100.00% |
| 9 | 486.00 | 113.67 | 372.33 | 467.00 | 5.10% | 96.09% |
| 10 | 481.40 | 133.15 | 348.25 | 460.00 | 6.15% | 95.55% |
| | | | | Average | 3.87% | 97.05% |

表 28、實驗二結果-演算法誤差(8 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 380.00 | 93.50 | 286.50 | 362.00 | 6.28% | 95.26% |
| 2 | 448.00 | 85.00 | 363.00 | 430.00 | 4.96% | 95.98% |
| 3 | 372.00 | 97.17 | 274.83 | 359.00 | 4.73% | 96.51% |
| 4 | 510.00 | 97.17 | 412.83 | 510.00 | 0.00% | 100.00% |
| 5 | 430.00 | 80.67 | 349.33 | 425.00 | 1.43% | 98.84% |
| 6 | 483.00 | 90.00 | 393.00 | 466.00 | 4.33% | 96.48% |
| 7 | 447.00 | 71.50 | 375.50 | 436.00 | 2.93% | 97.54% |
| 8 | 517.00 | 93.75 | 423.25 | 517.00 | 0.00% | 100.00% |
| 9 | 439.00 | 105.50 | 333.50 | 410.00 | 8.70% | 93.39% |
| 10 | 413.00 | 88.00 | 325.00 | 396.00 | 5.23% | 95.88% |
| | | | | Average | 3.86% | 96.99% |

表 29、實驗二結果-演算法誤差(9 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 426.00 | 69.67 | 356.33 | 376.00 | 14.03% | 88.26% |
| 2 | 404.00 | 120.05 | 283.95 | 381.00 | 8.10% | 94.31% |
| 3 | 410.00 | 75.17 | 334.83 | 386.00 | 7.17% | 94.15% |
| 4 | 502.00 | 82.24 | 419.76 | 502.00 | 0.00% | 100.00% |
| 5 | 452.00 | 93.50 | 358.50 | 452.00 | 0.00% | 100.00% |
| 6 | 441.00 | 88.20 | 352.80 | 424.00 | 4.82% | 96.15% |
| 7 | 432.52 | 116.51 | 316.01 | 432.00 | 0.16% | 99.88% |
| 8 | 462.00 | 66.00 | 396.00 | 461.00 | 0.25% | 99.78% |
| 9 | 469.00 | 97.92 | 371.08 | 469.00 | 0.00% | 100.00% |
| 10 | 426.00 | 69.67 | 356.33 | 400.00 | 7.30% | 93.90% |
| | | | | Average | 4.18% | 96.64% |

表 30、實驗二結果-演算法誤差(10 個基地台)

| Instance \ Profit | Optimum solution | Worst solution | Performance range | BAG solution | Deviation | BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------|------------------|----------------|-------------------|--------------|-----------|-----------------------------|
| | A | B | C=A-B | D | E=(A-D)/C | F=D/A |
| 1 | 523.00 | 104.50 | 418.50 | 484.00 | 9.32% | 92.54% |
| 2 | 455.00 | 67.83 | 387.17 | 441.00 | 3.62% | 96.92% |
| 3 | 492.00 | 62.50 | 429.50 | 492.00 | 0.00% | 100.00% |
| 4 | 401.00 | 120.00 | 281.00 | 371.00 | 10.68% | 92.52% |
| 5 | 410.00 | 85.75 | 324.25 | 400.00 | 3.08% | 97.56% |
| 6 | 508.00 | 73.33 | 434.67 | 508.00 | 0.00% | 100.00% |
| 7 | 429.00 | 88.50 | 340.50 | 402.00 | 7.93% | 93.71% |
| 8 | 430.00 | 111.83 | 318.17 | 410.00 | 6.29% | 95.35% |
| 9 | 411.00 | 82.50 | 328.50 | 389.00 | 6.70% | 94.65% |
| 10 | 523.00 | 104.50 | 418.50 | 523.00 | 0.00% | 100.00% |
| | | | | Average | 4.76% | 96.32% |

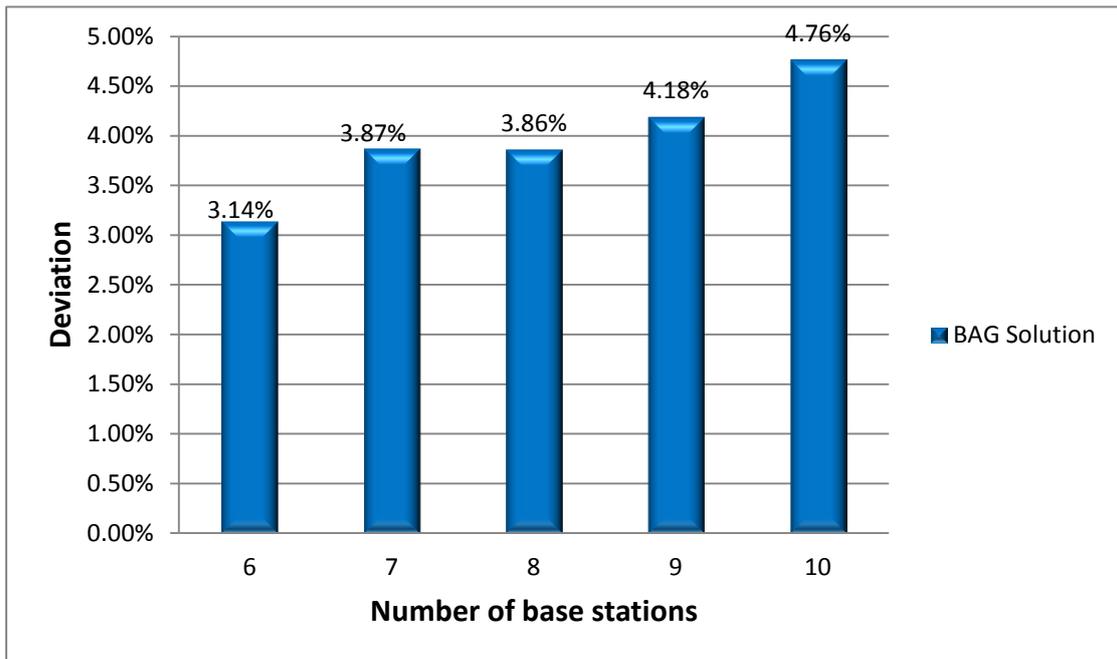


圖 33、實驗二基地台數量與效能之關係-平均誤差

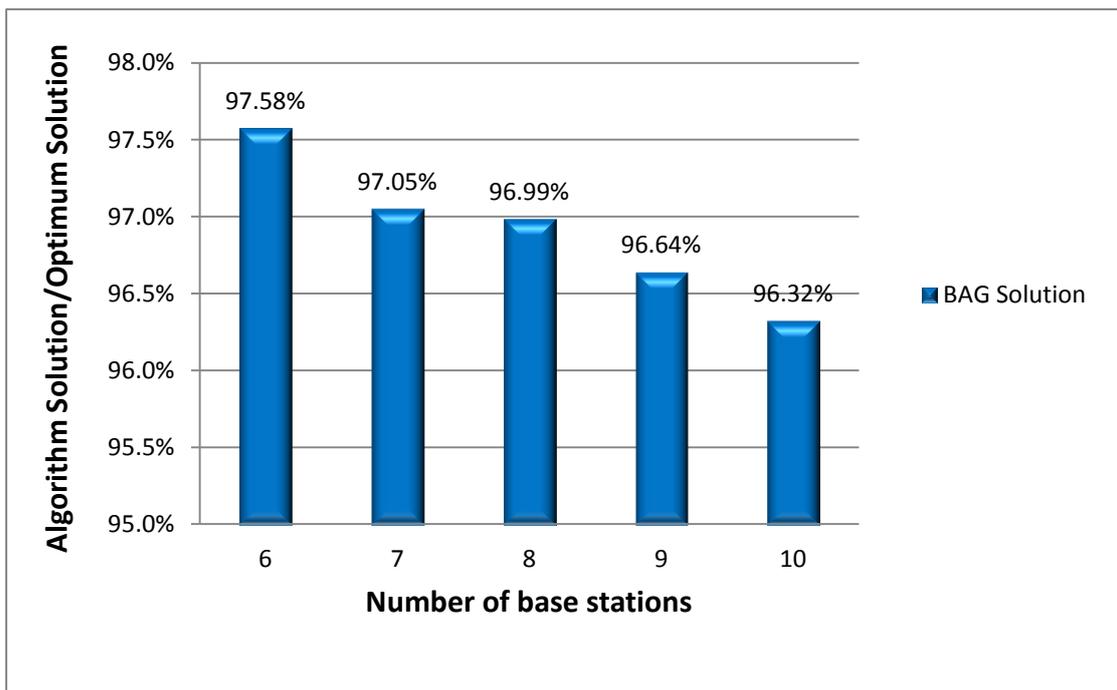


圖 34、實驗二基地台數量與效能之關係-平均最佳解達成率

5.4.3、實驗三

實驗三進行大規模案例實驗，基地台個數設定為 100，由於 100 個基地台計算最佳解的時間太長難以忍受，因此放棄計算最佳解，而是採用 10 萬個解中的最佳解與最差解，稱為**準最佳解**(Pseudo optimum solution)與**準最差解**(Pseudo worst solution)，我們用**準誤差**(Pseudo deviation)來評估效益(公式 2)，以此來分析 BAG 演算法在大規模案例時的效能。我們進行 10 次獨立實驗，並計算其平均效能，由表 31 可發現 BAG 演算法的效能在 10 次獨立實驗都能超過準最佳解。

- 準誤差 = (演算法解 - 準最佳解) / (max(準最佳解, 演算法解) - 準最差解).....(2)

表 31 為實驗三的實驗結果，10 個測試案例之整體準誤差範圍在 21.12% ~41.30%，平均準誤差 32.71%。

表 31、大規模系統下 BAG 演算法準誤差(100 個基地台)

| Instance \ Profit | Pseudo optimum solution | Pseudo worst solution | Performance range | BAG solution | Pseudo deviation | BAG solution/ Pseudo Opt. solution |
|-------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|------------------|------------------------------------|
| | A | B | C=D-B | D | E=(D-A)/C | F=D/A |
| 1 | 449.00 | 109.46 | 480.54 | 590.00 | 29.34% | 131.40% |
| 2 | 458.00 | 161.01 | 418.99 | 580.00 | 29.12% | 126.64% |
| 3 | 419.00 | 139.25 | 442.75 | 582.00 | 36.82% | 138.90% |
| 4 | 451.00 | 188.35 | 395.65 | 584.00 | 33.62% | 129.49% |
| 5 | 459.00 | 155.93 | 440.07 | 596.00 | 31.13% | 129.85% |
| 6 | 414.00 | 140.96 | 453.04 | 594.00 | 39.73% | 143.48% |
| 7 | 390.00 | 114.22 | 469.78 | 584.00 | 41.30% | 149.74% |
| 8 | 471.00 | 116.28 | 449.72 | 566.00 | 21.12% | 120.17% |
| 9 | 486.00 | 161.08 | 425.92 | 587.00 | 23.71% | 120.78% |
| 10 | 401.00 | 140.96 | 442.04 | 583.00 | 41.17% | 145.39% |
| | | | | Average | 32.71% | 133.58% |

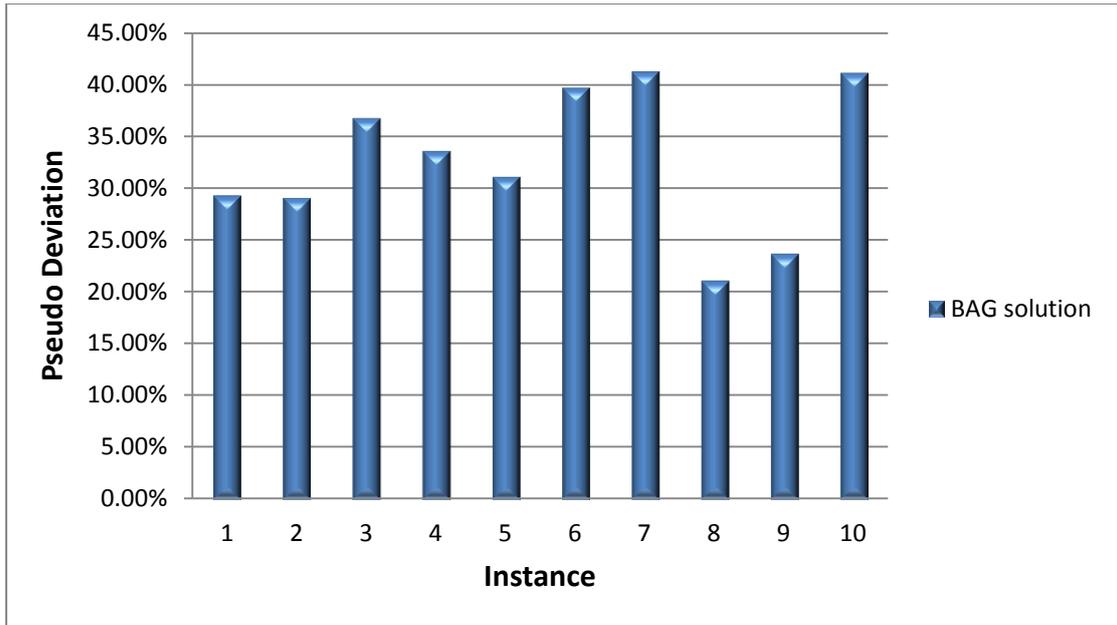


圖 35、大規模系統下 BAG 演算法效能-準誤差(100 個基地台)

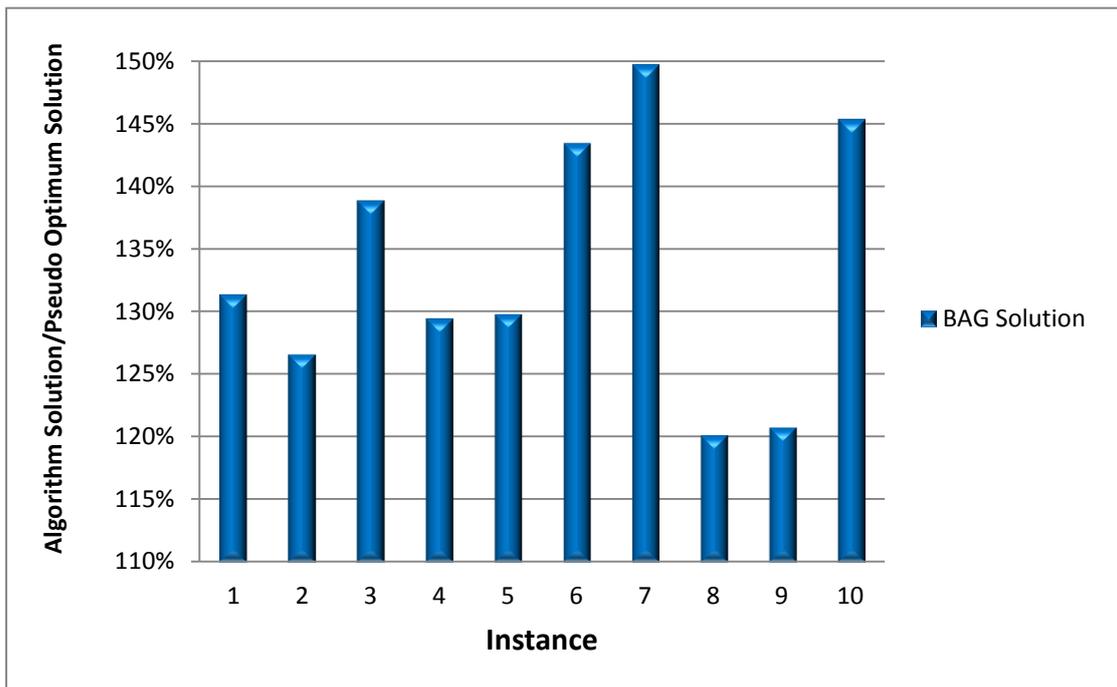


圖 36、大規模系統下 BAG 演算法效能-準最佳解達成率(100 個基地台)

5.5、 實驗總結

在實驗一環境下，BAG 演算法的平均誤差為 3.15%，平均最佳解達成率為

97.68%；在實驗二環境下，BAG 演算法的平均誤差為 3.96%，平均最佳解達成率為 96.92%。隨著環境複雜度的增加，BAG 演算法與最佳解誤差有逐步上升趨勢，平均誤差由 6 個基地台的 2.82% 提升至 10 個基地台的 4.61%，如表 32 所示；而平均最佳解達成率隨著環境複雜度的增加亦有逐步下降趨勢，由 6 個基地台的 97.89% 下降至 10 個基地台的 96.52%，如表 33 所示；同時環境複雜度增加也使獲得最佳解(零誤差)之機會下降，當 7 個基地台時，實驗一、二合計獲得 10 個最佳解，當 10 個基地台時，合計獲得 7 個最佳解，如表 34 所示。

表 32、綜合效能評估-平均誤差

| Number of base stations | Experiment 1 (效益遞減函數 $\frac{1}{\sqrt{k}}$) | Experiment 2 (效益遞減函數 $\frac{1}{k}$) | Average deviation |
|-------------------------|--|---|-------------------|
| 6 | 2.50% | 3.14% | 2.82% |
| 7 | 2.58% | 3.87% | 3.23% |
| 8 | 2.68% | 3.86% | 3.27% |
| 9 | 3.55% | 4.18% | 3.87% |
| 10 | 4.46% | 4.76% | 4.61% |
| Average deviation | 3.15% | 3.96% | 3.56% |

表 33、綜合效能評估-平均最佳解達成率

| Number of base stations | Experiment 1 (效益遞減函數 $\frac{1}{\sqrt{k}}$) | Experiment 2 (效益遞減函數 $\frac{1}{k}$) | Average BAG solution/ Opt. solution |
|-------------------------|--|---|--|
| 6 | 98.21% | 97.58% | 97.89% |
| 7 | 98.08% | 97.05% | 97.57% |
| 8 | 98.01% | 96.99% | 97.50% |
| 9 | 97.39% | 96.64% | 97.02% |
| 10 | 96.71% | 96.32% | 96.52% |
| Average | 97.68% | 96.92% | 97.30% |

表 34、綜合效能評估-最佳解個數

| Number of base stations | Experiment 1 (效益遞減函數 $\frac{1}{\sqrt{k}}$) | Experiment 2 (效益遞減函數 $\frac{1}{k}$) | Total number of optimum solution |
|----------------------------------|--|---|----------------------------------|
| 6 | 6 | 3 | 9 |
| 7 | 7 | 3 | 10 |
| 8 | 5 | 2 | 7 |
| 9 | 5 | 3 | 8 |
| 10 | 4 | 3 | 7 |
| Total number of optimum solution | 27 | 14 | 41 |

由實驗結果發現，隨著環境複雜度的增加，BAG 演算法與最佳解誤差將逐步上升，會造成此種原因可能是因為 BAG 演算法為了在有限時間內快速得到一組不錯的頻寬分配而採取了貪婪策略，在每次的頻寬分配決策都是朝當下最具效益的分配方式前進，而且不回頭，因此不能保證永遠得到最佳解；而隨著實驗環境基地台數量的增加，可行解之數量亦將隨之增加，因此造成演算法誤差相對提升。

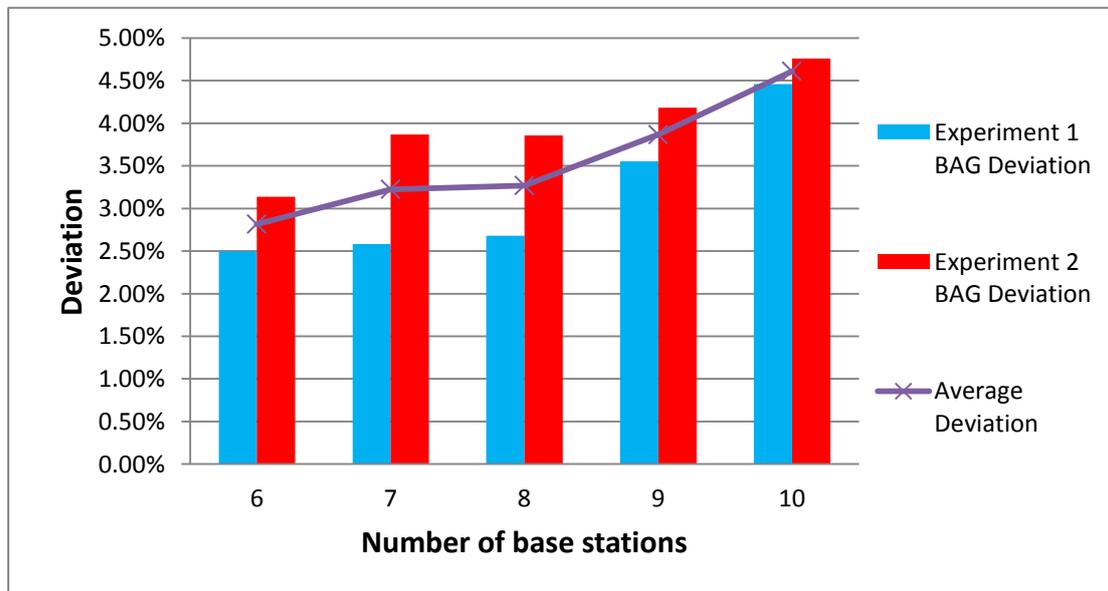


圖 37、基地台數量與效能之綜合評估-平均誤差

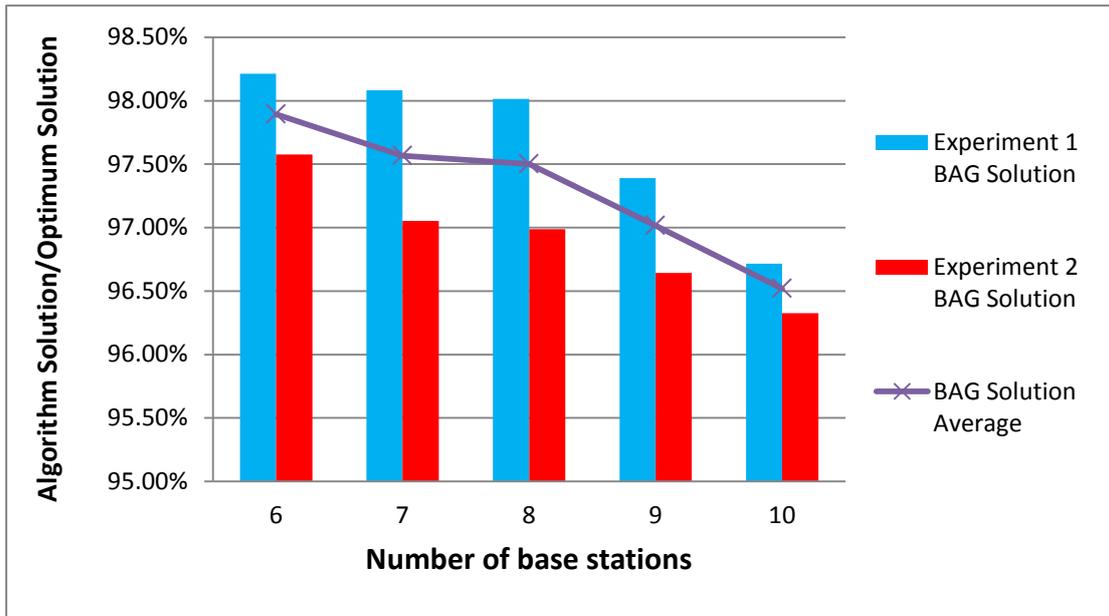


圖 38、基地台數量與效能之綜合評估-平均最佳解達成率

實驗一與實驗二除效益遞減函數外，其餘實驗參數皆相同，可用以比較效益遞減函數 $\frac{1}{\sqrt{k}}$ 、 $\frac{1}{k}$ 之影響，如圖 39、40、41、42、43。由於我們提出的 BAG 演算法採取貪婪策略，不容易在所有測試案例取得最佳解，因此我們以窮舉法取得之最佳解進行效益遞減函數之比較。若以平均誤差小者為優，發現 BAG 演算法在效益遞減函數為 $\frac{1}{\sqrt{k}}$ 時，比為 $\frac{1}{k}$ 時表現較好，但因兩者所得之總效益並非由相同參數計算而得，無法論斷效益遞減函數應採何者較佳。

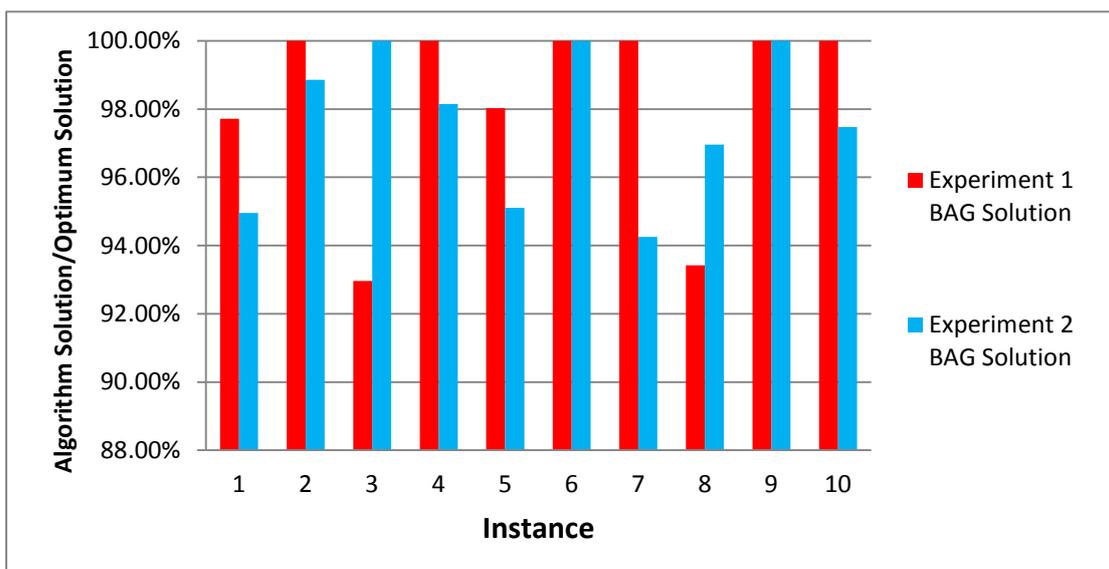


圖 39、BAG 演算法效能比較(6 個基地台)

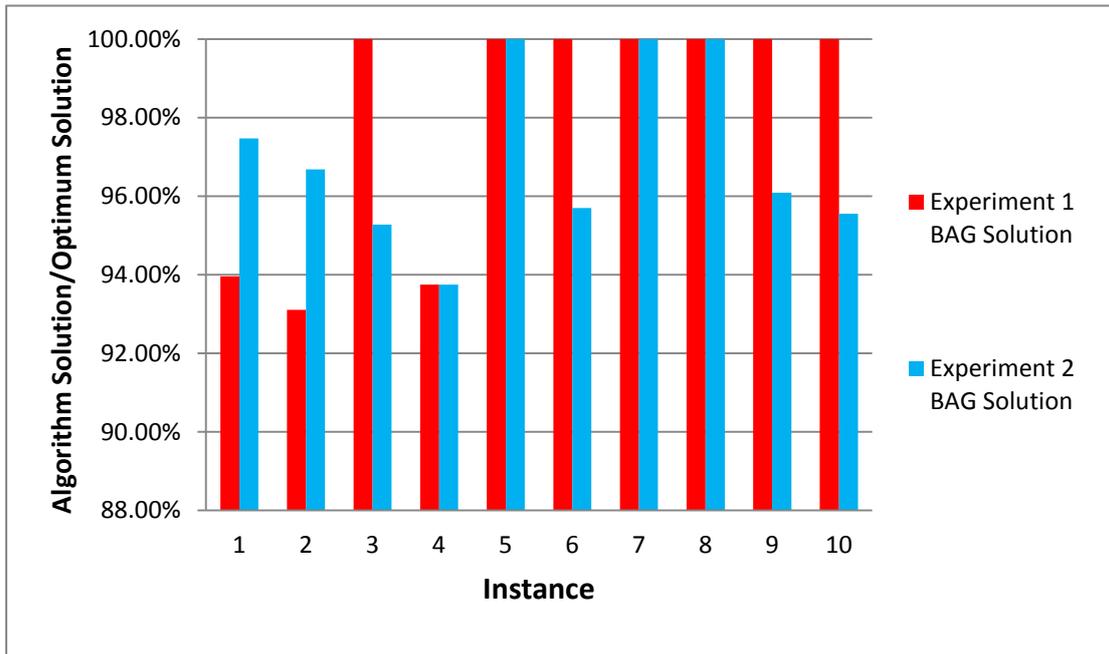


圖 40、BAG 演算法效能比較(7 個基地台)

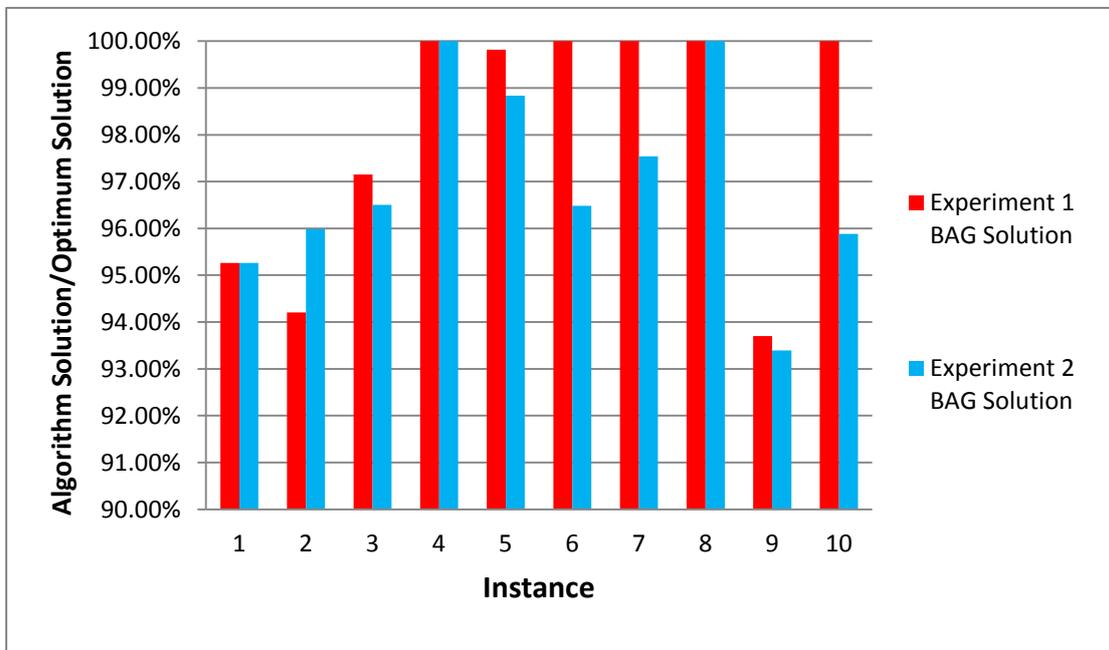


圖 41、BAG 演算法效能比較(8 個基地台)

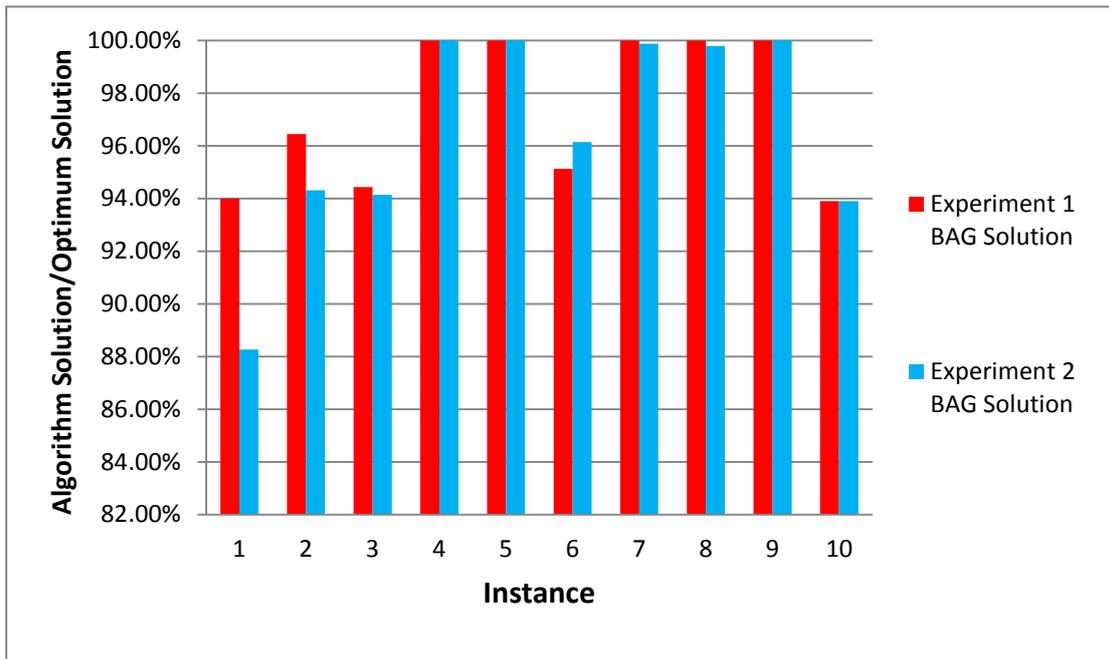


圖 42、BAG 演算法效能比較(9 個基地台)

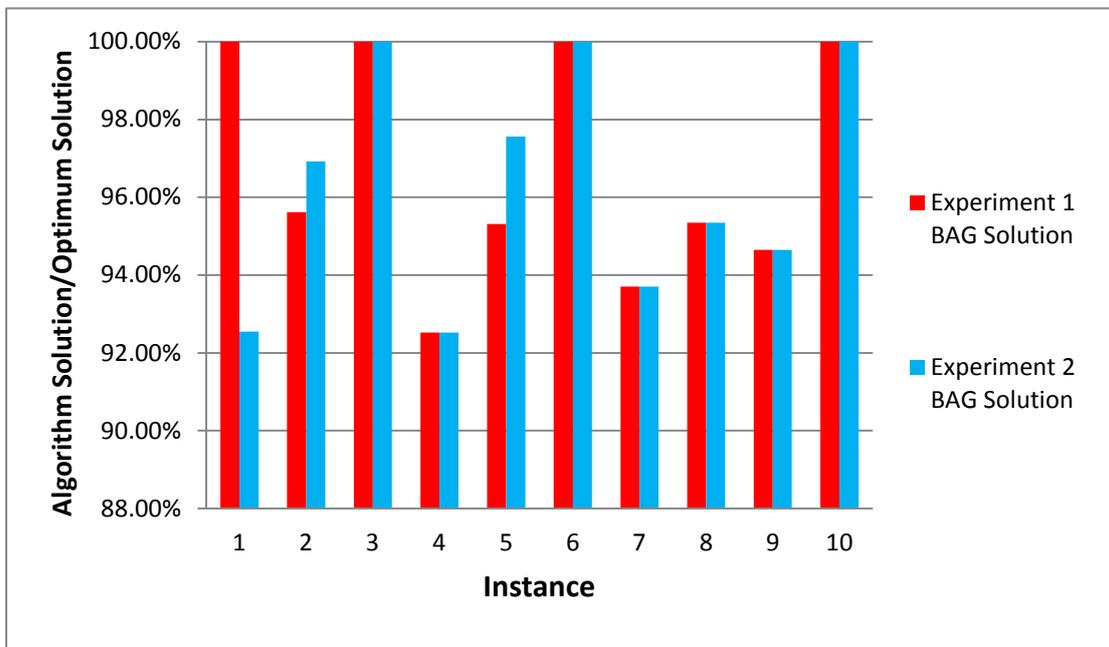


圖 43、BAG 演算法效能比較(10 個基地台)

第六章、 結論與未來展望方向

大型天然災害發生時通訊系統常會癱瘓，而有效運作的通訊系統卻是災情傳遞、資源調度以及互助協調是否順利的關鍵因素。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)，由於各個地方受災情況不盡相同且通訊資源有限，CCN 必須反應災區需求之輕重緩急妥適分配頻寬，因此在網路拓樸規劃完成，基地台依排程陸續開通服務後，必須根據各地災情緊急程度及網路拓樸進行 CCN 頻寬分配規劃，以達到最大的救災效益。

本研究提出一個兼顧各基地台災情緊急程度以及通訊需求差異，且適合於 CCN 樹狀結構的最佳化頻寬分配模型，以追求救災效益的最大化。這些模型可供使用者(救災指揮單位)系統化的解決 CCN 頻寬分配問題。頻寬分配給基地台可獲得之效益由救災單位根據所收集到的各地災情自行定義，本模型及頻寬分配演算法可決定 CCN 連外頻寬使用之分配。

CCN 頻寬分配問題是 Nested 0-1 Knapsack 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，因此我們提出一個啟發式演算法：BAG，以快速得到一個相近於最佳解的頻寬分配。BAG 演算法透過 Profit density 找出每次頻寬分配的最佳 Profit 配置，並在確認頻寬資源後配發，直到剩餘的 CCN 連外頻寬無法再配發任何一種 Channel 使用為止。因此在限定時間內即可提供不錯的頻寬分配組合，並且每當網路拓樸、可用頻寬或災情程度變動時，能快速的重新運算修改頻寬分配。

我們利用電腦模擬評估演算法之效能，假設網路拓樸及頻寬資源固定，以基地台個數多寡來分析其對演算法的影響，實驗一、二分別以不同之效益遞減函

數帶入。實驗案例由亂數隨機產生，以正規化的誤差值來評估頻寬分配組合之優劣。結果顯示，我們提出之演算法可在數秒內得出與最佳解誤差範圍在 0~14.03% 之近似最佳解。

本研究提出的模型仍有改進之空間，例如加入 CCN 各鄰台間剩餘的頻寬運用考量、以節點為單位作為頻寬分配效益遞減範圍、網路拓樸變化對演算法效能及誤差之影響與改良、非單一路由選擇之頻寬分配、反應環境變化之動態頻寬分配、配合允入控制的調適。此外，如能聯合不同電信公司之基地台建構 CCN 時，CCN 的連外可能不再是單一出口，且各地區可供應急通訊用的基地台也不再是單一選擇，而必須在服務範圍相互重疊的數個基地台內擇一加入，如何於多重路由與多重連外資源整體考量下妥適分配頻寬亦是研究課題，避免資源分配之重疊，浪費寶貴的災區通訊資源。

參考文獻

- [1] Association of Public-Safety Communications Officials International, Project 25, <http://www.apcointl.org/frequency/project25.php>, retrieved May 2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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] 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.
- [6] Arjan Durrezi, Mimoza Durrezi, Vamsi Paruchuri, and Leonard Barolli, "Ad Hoc Communications for Emergency Conditions," *IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Biopolis, Singapore, Mar. 2011.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] M.R. Garey, and M.D. Johnson. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. 1979. ISBN 0-7167-1045-5.
- [10] ITR-RESCUE, Robust Networking and Information Collection Project, <http://www.itr-rescue.org/research/networking.php>, retrieved Feb. 2010.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Jaeao Lim, Rchard 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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,
- [19] 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.
- [20] David Pisinger, "Algorithm for Knapsack Problems" Dept. of Computer Science, University of Copenhagen, Denmark, Feb. 1995.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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 .
- [25] 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.
- [26] Search Underwood, "Improving Disaster Management," *Comm. of ACM*, vol. 53, no. 2, Feb. 2010, pp. 18-20.
- [27] 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.
- [28] 3GPP, Specifications, <http://www.3gpp.org/Specifications>, retrieved Nov. 2011.
- [29] 3GPP, TS 23.401, "General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access" version 11.0.0
- [30] 林進豐, 行動衛星通訊, 五南出版社, ISBN : 9789571150062, Dec. 2007
- [31] 孫玉, 應急通信技術總體框架討論, 人民郵電出版社, ISBN : 7115208328, 2009
- [32] 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
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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
- [36] 高抗災通信平臺, http://88flood.www.gov.tw/committee_news_detail.php?cn_id=506, retrieved Dec. 2011.