

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

應急蜂巢式行動網路的拓撲設計  
Topology Design For Contingency Cellular  
Network

研究生：黃玉潔

指導教授：連耀南

中華民國一百年五月

May 2011

應急蜂巢式行動網路的拓撲設計

Topology Design For Contingency Cellular Network

研究生：黃玉潔

Student: Yu-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

中華民國一百年五月

May 2011

## 摘要

大型災害頻傳傷亡慘重，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，但災區通訊網路基礎設施常因災害而遭受嚴重損毀，無法正常運作。救災工作在缺乏通訊系統的支援下，因溝通協調的困難而紊亂無章、效率低落。

本研究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撲結構。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 網路利用無線電連接災區行動電話網路中斷訊但結構未損的基地台建構而成，具有建置速度快、使用門檻低等多項特點，可支援災區救援的緊急通訊。

本研究中，我們以各毀損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，嘗試在蜂巢式網路的格網架構以及數量有限的緊急通訊設備下，選擇效益較高的位置點配置緊急通訊設備，建立應急蜂巢式行動網路的網路拓撲，此拓撲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-Minimum Cost Spanning Tree (K-Cardinality Tree or KCT)問題，稱為 Depth Bounded K-Maximum Profit Spanning Tree 問題，並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拓撲。

## Abstract

When a catastrophic natural disaster occurs, the efficiency of disaster response operation is critical to life saving. However, communication systems, such as cellular networks, usually crashed due to various causes that make coordination difficult for many disorganized disaster response workers extremely. 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 propose a Contingency Cellular Network (CCN) by connecting disconnected base stations together with wireless links and portable power generators. 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 saving many lives.

Communication traffics, either voice or data, are forwarded hop-by-hop to the external network that remains operational. The efficiency and effectiveness of CCN is obviously depends on the topology of such a forwarding network. This thesis addresses the design of forwarding topology aiming to maximize its efficiency. 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 topology design problem into a Depth Bounded K-Maximum Spanning Tree Problem. The problem is proven NP-hard and we designed an efficient heuristic algorithm (DBTB) to solve it. We also model CCN topology design problem into a Hop Concerned K-Maximum Spanning

Tree Program and designed a HCTB algorithm to solve it. The simulation results show that DBTB algorithm can control tree depth effectively but HCTB can gain more profit.

# 目錄

摘要.....	i
Abstract .....	ii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
第一章 緒論 .....	1
1.1 簡介 .....	1
1.2 大型天然災害的影響.....	2
1.3 大型天然災害對通訊的衝擊.....	3
1.4 大型災害的救災時效.....	6
1.5 通訊設備修復困難.....	7
第二章 相關研究 .....	8
2.1 第三代行動通訊系統架構.....	8
2.1.1 UTRAN.....	8
2.1.2 CN.....	9
2.2 應急通訊的設計需求.....	10
2.3 常見應急通訊介紹與比較.....	11
2.3.1 無線對講機.....	11
2.3.2 業餘無線電.....	12
2.3.3 移動基地台 (Cell on Wheels).....	13
2.3.4 中繼式無線電系統.....	14
2.3.5 MANET.....	15
2.3.6 應急通訊系統比較.....	16
2.4 展開樹演算法.....	17

2.3.1 最小成本展開樹 .....	17
2.3.2 最大成本展開樹 .....	17
2.3.3 K-Minimum Cost Spanning Tree.....	18
2.3.4 K-Maximum Cost Spanning Tree .....	18
2.3.5 Steiner K-Cut Problem .....	18
第三章 應急蜂巢式行動網路(CCN).....	19
3.1 系統簡介 .....	19
3.2 系統架構 .....	20
3.3 系統使用時機.....	24
3.4 系統元件 .....	24
3.5 研究議題 .....	27
3.5.1 網路拓撲規劃 .....	27
3.5.2 建構排程設計 .....	28
3.5.3 網路頻寬分配 .....	29
3.5.4 Priority-based 允入控制.....	29
3.5.5 Intranet 建構.....	29
3.5.6 自動化建構.....	30
3.5.7 基地台介面整合 .....	30
3.6 重要實作議題探討.....	31
第四章 應急蜂巢式行動網路的拓撲規劃 .....	33
4.1 CCN 網路拓撲規劃的重要性.....	33
4.2 無線通訊模組鏈結數對拓撲規劃的影響 .....	33
4.2.1 2-link 無線模組.....	33
4.2.2 3-link 無線模組.....	34
4.3 CCN 網路拓撲的建構.....	35
4.4 效益參數 .....	37
4.5 多連網台的網路拓撲規劃.....	37

4.6	CCN Forwarding Tree.....	37
4.6.1	ERP 數量之限制.....	41
4.6.2	Relay-hop 數量對拓撲的影響.....	41
4.7	最佳化問題模型.....	43
4.7.1	限深模型(DB K-MaxST).....	43
4.7.1.1	NP-Completeness .....	44
4.7.2	折減模型(HC K-MaxST).....	46
4.8	演算法設計.....	46
4.8.1	Depth Bounded Tree Building (DBTB) Algorithm.....	47
4.8.2	Hop Concern Tree Building (HCTB) Algorithm .....	49
第五章	效能評估 .....	52
5.1	實驗目的 .....	52
5.2	實驗環境 .....	52
5.3	實驗一：小規模實驗.....	52
5.4	實驗二：大規模實驗.....	57
5.5	實驗結論 .....	63
第六章	結論與未來工作.....	64
	參考文獻.....	65



## 圖目錄

圖 1	行動通訊網路毀損的固定線路示意圖 .....	4
圖 2	大型天然災害中斷裂的橋梁 .....	5
圖 3	橋梁斷裂導致實體線路斷裂 .....	5
圖 4	建物結構毀損導致實體通訊線路斷裂 .....	5
圖 5	行動通訊網路後端線路中斷示意圖 .....	6
圖 6	救出時間與存活率關係圖 .....	7
圖 7	3G 系統架構圖 .....	8
圖 8	無線對講機 .....	12
圖 9	業餘無線電 .....	13
圖 10	移動基地台 .....	14
圖 11	中繼式無線電 .....	15
圖 12	CCN 網路示意圖 .....	20
圖 13	連網台 .....	21
圖 14	孤立台 .....	21
圖 15	緊急修復包(ERP) .....	22
圖 16	CCN 通訊架構 .....	23
圖 17	CCN 通訊模式示意圖 .....	23
圖 18	CCN 使用時機 .....	24
圖 19	EC Module 功能模組 .....	26
圖 20	CCN 拓撲示意圖 .....	28
圖 21	2-link 無線模組 .....	34
圖 22	線狀網路 .....	34
圖 23	3-link 無線模組 .....	35
圖 24	樹狀網路 .....	35
圖 25	CCN 網路藉由 ERP 進行資料傳遞 .....	36
圖 26	孤立台恢復連線之方式 .....	36
圖 27	一連網台與孤立台群 .....	38
圖 28	建置 ERP 於選定之孤立台 .....	39
圖 29	等待建立鏈結的 ERP 群 .....	39
圖 30	為 ERP 群建立網路拓撲 .....	40
圖 31	CCN 拓撲建立完成 .....	40
圖 32	CCN 運作並提供通訊 .....	41
圖 33	max relay hop = 6 .....	42
圖 34	max relay hop = 4 .....	43

圖 35	DBTB 演算法步驟 .....	48
圖 36	暴力法求解 .....	49
圖 37	HCTB 演算法步驟 .....	50
圖 38	實驗 1(a)：總效益比較.....	54
圖 39	實驗 1(a)：CCN FT 深度比較.....	55
圖 40	實驗 1(a)：運算時間比較.....	55
圖 41	實驗 1(b)：總效益與樹深比較 .....	56
圖 42	實驗 1(c)：總效益與樹深比較.....	57

## 表目錄

表 1	大型天然災害的死亡人數紀錄.....	2
表 2	應急通訊系統之比較.....	16
表 3	實驗一：實驗參數設定.....	53
表 4	實驗二：參數設定.....	58
表 5	實驗 2(a)：實驗結果.....	59
表 6	實驗 2(a)：總效能與樹深比較.....	60
表 7	實驗 2(b)：實驗結果.....	60
表 8	實驗 2(b)：總效能與樹深比較.....	61
表 9	實驗 2(c)：實驗結果.....	62
表 10	實驗 2(c)：總效能與樹深比較.....	63

# 第一章 緒論

## 1.1 簡介

近幾年全世界天災頻傳，地震、颱風、颶風等大規模的天然災害，席捲全球各地，造成了許多的生命傷亡與經濟損失。2011 年 3 月 11 日發生於日本矩震級規模 9.0 的東北地方太平洋近海地震[21]，地震發生後，接連引起的餘震、火災、海嘯及核電廠輻射外洩，造成了日本國內超過 16,000 人死亡、4,500 人失蹤及 5,500 受傷的嚴重災情[22]，而輻射外洩對全世界的長時間影響仍無法斷定。另外，發生於 2010 年 1 月的海地太子港地震、2004 年 12 月的南亞海嘯皆造成數十萬人死亡，災後難民更不計其數。表 1 記錄了近年來發生於世界各地的大型天然災害所造成的人員死亡統計，可以發現人員的傷亡都非常慘重，其中以 2010 年的海地地震、2004 年的南亞海嘯、2008 年的四川地震及 2011 年的東北日本地震為最，死亡人數皆達萬人以上。

而在上述的大型災害中，通訊系統的癱瘓對於後續救援行動效率的影響甚深。本論文提出一個可快速恢復特定區域通訊服務的網路系統，並為其設計通訊的拓撲結構。我們稱此網路為應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network)，並簡稱為 CCN 網路。CCN 網路利用無線電連接災區行動電話網路中斷訊但結構未損的基地台建構而成，可支援災區救援的緊急通訊。由於救災資源有限，我們無法在災後第一時間全面修復癱瘓之行動網路通訊，因此我們將選擇數個救災效益較高的基地台佈建緊急通訊設備，以建立 CCN 網路。本文旨在探討 CCN 網路的拓撲規劃以追求最大的救災效益，同時並顧及網路通訊的品質與負載。

表 1 大型天然災害的死亡人數紀錄

Event/ Place	Type	Date	Dead
<b>North-East Japan</b>	Earthquake Tsunami	2011.03.11	15,698
<b>QingHai, China</b>	Earthquake	2010.04.14	1706
<b>Chile</b>	Earthquake	2010.02.27	800
<b>Port-au-Prince, Haiti</b>	Earthquake	2010.01.13	230,000
<b>SiChuan, China</b>	Earthquake	2008.05.12	69,227
<b>Katrina, US</b>	Hurricane	2005.08.23	1,836
<b>Indian Ocean, South Asia</b>	Earthquake Tsunami	2004.12.26	192,000
<b>Chi-Chi, Taiwan</b>	Earthquake	1999.09.21	2,415

## 1.2 大型天然災害的影響

當大型天然災害發生時，災區景象多半殘破不堪、怵目驚心，交通、建設受到巨大損害，人員性命更遭受威脅，不僅許多受困民眾等待第一時間的援助，且有更多已脫困的民眾需要後續的安置與醫療。從前述的大型天災中，我們可以綜合歸納出大型天災所造成之影響[24]，並條列如下：

- **建築倒塌**：許多建築物遭遇颱風、地震、土石流等災害時，因結構無法支撐承受，而於災害中坍塌毀損，導致人員活埋受困其中，需要即時地救助。
- **交通癱瘓**：因災害而引起的道路坍塌、橋梁斷裂，使得災區對內、對外的聯絡道路中斷，而颱風、豪大雨等氣候影響型的災害，亦影響救援機的起降，使得交通原本就不發達的山區災區完全孤立，外援難以進入馳援。在海地地震的案例中，首都的太子港機場雖未在地震中遭受破壞，但卻因為機場無法提供飛行機具所需之燃料，導致各救難單位完全無法進入，延誤救災。而在 921 地震、海地地震及汶川地震的例子中，平面道路系統在災害初期全面對外斷絕，使得外援無法快速進入災區，因而延宕救災時效。

- **專業救難人員不足**：專業救難人員之數量在大型災害中，往往顯得不足，且在災後初期，因集結、物資準備及交通癱瘓等因素，專業救難人員通常難以在第一時間即刻深入災區，所以，災後初期的救援行動必須仰賴當地志願人員的投入。
- **通訊中斷**：災後因建物損毀、停斷電或瞬間過大通訊流量(關懷電話)所造成的通訊中斷，對災後救援有著莫大的影響，災情回報、救援行動的籌畫與連繫、人員統合、物資補給等工作，無一不仰賴通訊設備，故中斷的通訊對災後救援有著極嚴重的負面影響。當為數眾多的救災單位欲進入災區協助救援之時，通訊設備因災害而毀損，導致無法發揮正常通訊傳輸功能，使得救災單位無法相互聯繫安排、統合人力與資源，全力投入救災工作，受困人員也因而無法在第一時間獲得救援。

### 1.3 大型天然災害對通訊的衝擊

而災害對於通訊網路所造成的衝擊在於，電力系統受損使得通訊設備因缺乏電力而中斷、橋梁道路斷裂使得附於其上的實體通訊線路與輸電線路斷裂、建築物倒塌使得通訊設備隨之毀損[15][25]。由於通訊系統在災後救難中，承擔協調調度的重任[12][13][14]，一旦毀損，勢必減低救災效率。

通訊系統對救災行動極其重要，但從以往大型災害的實際災變經驗當中，我們發現這些平常穩定可靠的公眾通訊網路，幾乎全面中斷，致使通訊系統癱瘓。而在大型災害中，固網與行動通訊系統癱瘓的主要原因有三：

- **電力中斷**：大型天然災害發生後，常造成電力供應系統的毀損，絕大多數的通訊中斷肇因於電力方面的中斷，一旦電力中斷，雖基地台本身配有備援電力系統，但因備援電力系統僅約能提供數小時的電力供應，在備援電力供應

的時限內，若電力系統未能及時修復，即便通訊設備本身未遭毀損，亦無法正常執行通訊功能。以 2009 年 8 月 8 日發生的八八水災中 3300 座斷訊的基地台為例，其中約 70% 的服務中斷基地台，是肇因於電力中斷。

- **後端線路毀損：**基地台(base station)與基地台控制器(base station controller, BSC)、行動交換機(mobile switch center, MSC)間固定線路的毀損，如圖 1 所示。現今的行動通訊系統實體線路之佈建，多附著於道路或橋樑之上，當道路坍塌、橋樑斷裂時，也間接造成行動通訊系統的實體線路毀損，如圖 2、圖 3 及圖 4 所示，一旦後端(基地台與行動交換機間)線路毀損，即使前端的基地台設備未受災害毀損且供電無虞，基地台亦喪失通訊之能力，圖 5 則標示出在災害中導致通訊中斷的線路。以八八水災為例，水患淹沒台灣南部地區，許多的民房、建築皆沉於水中，但由於基地台多建置於樓房頂部，未受水患的破壞，故基地台本身結構完好、功能也未受影響，但因後端線路的毀損，依舊造成嚴重的通訊中斷問題。

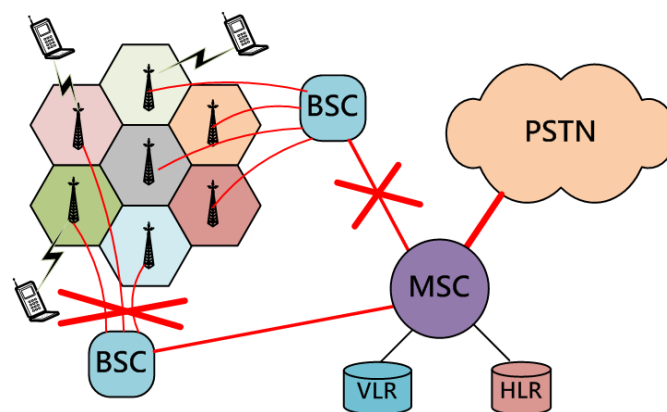


圖 1 行動通訊網路毀損的固定線路示意圖



圖 2 大型天然災害中斷裂的橋梁



圖 3 橋梁斷裂導致實體線路斷裂



圖 4 建物結構毀損導致實體通訊線路斷裂



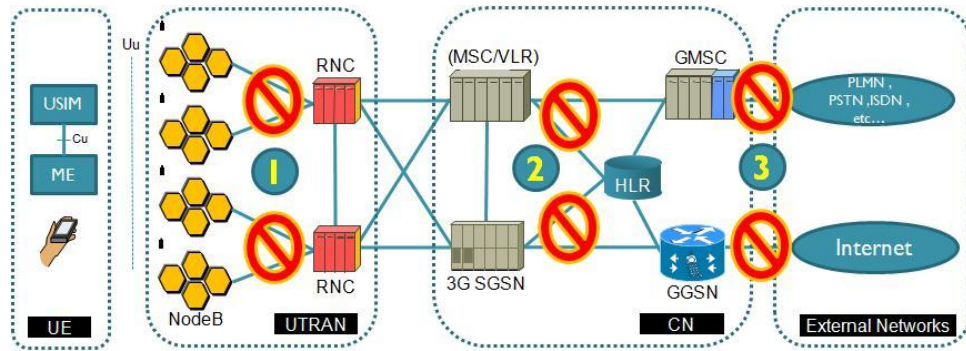


圖 5 行動通訊網路後端線路中斷示意圖

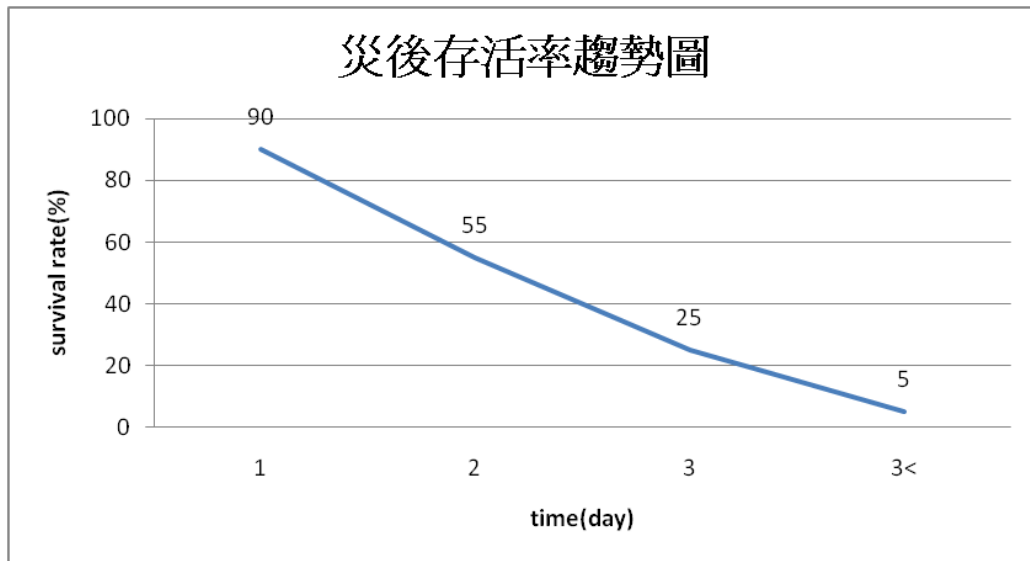
- **基地台毀損**：基地台本身或行動通訊業者之實體機房毀損，此類型的設備毀損，需靠工程人員至現場逐一修復，才得以排除。但在對外交通中斷的重災區中，救難人員都難以進入的情況下，工程人員更無可能在災後第一時間進入並搶修通訊設備，勢必對救援行動造成極大之影響。

#### 1.4 大型災害的救災時效

「黃金 72 小時搶救時間(Golden 72 Hours)」，指得是在災難發生後，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，受困人員的獲救存活率高 90%；至 25~36 小時期間，存活率銳減為 50%~60%；至 36~72 小時期間，存活率僅剩 20%~30%；超過 72 小時後，存活率則剩下 5%~10%，生還機會極為渺茫，如圖 6 所示。

然而，在災難發生後，因為通訊中斷，造成人員溝通困難，使得災區的交通、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、物資協調調度不易以及救災人員缺乏通訊介面進行溝通，使得救災資訊無法完整傳遞，導致救難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 6 救出時間與存活率關係圖

### 1.5 通訊設備修復困難

在災害中，搶修實際毀損的基地台通訊設備，並使災區通訊全面恢復，具有十分難度，並且相當耗費時間，因許多重災區的交通中斷，大型修復機具無法進入災區，進行第一時間的搶修。以民營的中華電信公司為例，1999年9月21日在台灣發生了芮氏規模7.3的集集大地震，地震發生的當時，災區通訊網路隨即中斷，而中華電信公司則耗費了15天，才搶通災區的電信網路；再以八八水災為例，當時，南台灣斷訊基地台的總數量約為3300座，其中1800座屬於中華電信公司。在密集搶修的兩天之後，仍然有高達550座基地台無法恢復運作。換言之，在關鍵的黃金72小時內，大量的行動電話網路將陷於癱瘓，無法及時修復。

## 第二章 相關研究

### 2.1 第三代行動通訊系統架構

第三代行動通訊系統，3rd generation mobile telecommunications，簡稱 3G，指得是高速率數據傳輸的蜂巢式行動通訊技術。3G 支援同時傳遞音訊與數據資料，與類比式信號傳輸的第一代行動通訊系統(1G)及提供低速率數位式信號傳輸的第二代行動通訊系統(2G)相比，3G 系統為結合了無線通訊與 Internet 的新一代行動通訊系統，主要由 UTRAN 與 CN 兩個部分所組成，行動裝置透過 UTRAN 與 CN 相互溝通，而 CN 則是處理行動網路中語音與數據資料的內外網繞送與交換，UTRAN 與 CN 間則以 Iu 介面相連接，3G 系統架構如圖 7 所示。

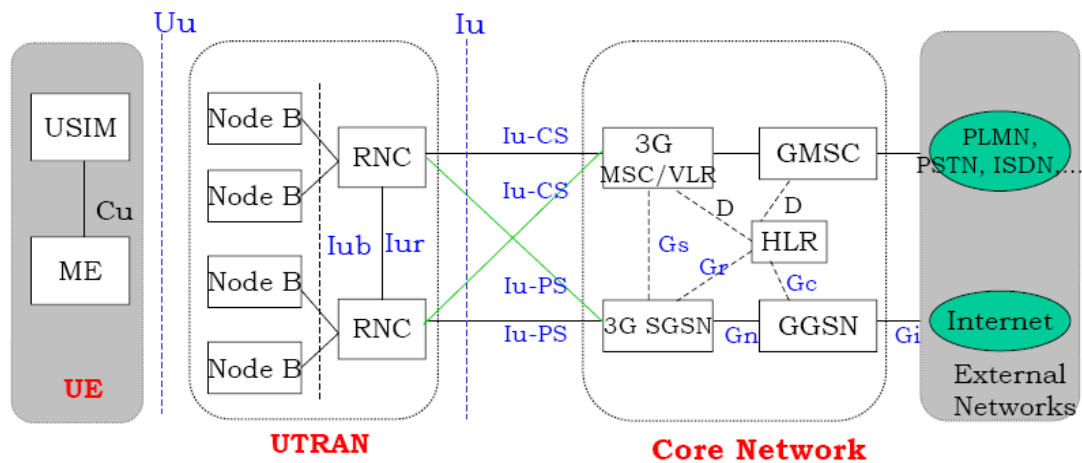


圖 7 3G 系統架構圖

#### 2.1.1 UTRAN

UMTS Terrestrial Radio Access Network，簡稱 UTRAN，為 UMTS 的無線接入網，

由多個 RNS(Radio Network Subsystem)所組成，其中，每個 RNS 包含一個 RNC 以及數個 Node B，RNC 與 Node B 之間以 Iub 介面相連。每一個 RNC 透過 Iu-PS 介面，與 CN 中的一個 SGSN 相連接；另外，則透過 Iu-CS 介面，與 CN 中的一個 MSC 相連接。以下分別介紹 RNC 與 Node B 之功能：

- RNC：無線電網路控制器，為 Radio Network Controller 的簡稱，擁有並控制其區域範圍內所有 Node B 的無線電資源，為 UTRAN 中提供 CN 服務的服務存取點(Service Access Point, SAP)。RNC 的無線電資源管理包含，Load Control、Admission Control、Packet Scheduling、Channel Allocation、Power Control、Outer Loop Power Control、Handover Control、Macro Diversity、Ciphering、Segmentation\Reassembly、Broadcast Signaling、Mobility Management 等功能[11]。以台灣實際情況而言，一台 RNC 約控制 50 至 300 台 Node B。
- Node B：即為無線基地台(Base Station)，藉由 WCDMA Uu 無線介面與行動裝置通訊並以 Iub 介面與一個 RNC 相連接。功能包含有 Modulation/Demodulation、Spreading、Channel Coding、RF Processing、Inner Loop Power Control 等[16]。

### 2.1.2 CN

核心網路，Core Network 的簡稱，提供 Circuit-Switched (CS) domain 與 Packet-Switched (PS) domain 兩種通訊服務，包含 HLR、MSC/VLR、GMSC、SGSN、GGSN 五個部分，逐一說明如下[16]：

- HLR：Home Location Register 的簡稱，為一用戶資料庫，儲存行動用

戶的基本資訊，包括用戶 SIM(Subscriber Identity Module)卡上的 IMSI(International Mobile Subscriber Identity)、行動電話號碼、行動裝置位置訊息等。

- MSC：Mobile Switching Center 的簡稱，為處於該 MSC 服務區域的行動裝置提供 CS domain 服務的資料交換中心。
- VLR：Visitor Location Register 的簡稱，為一儲存漫遊用戶資料及其行動裝置在該服務系統中的精確位置資訊之資料庫。
- GMSC：Gateway MSC 的簡稱，提供 CS domain 與 PLMN(Public Land Mobile Network)、PSTN(Public Switched Telephone Network)等外部網路連接的交換設備。
- SGSN：Serving GPRS Support Node 的簡稱，功能與 MSC/VLR 相似，但用於提供 PS domain 的服務。
- GGSN：Gateway GPRS Support Node 的簡稱，提供 PS domain 與 Internet 等外部網路連接的交換設備。

## 2.2 應急通訊的設計需求

由救災黃金 72 小時與存活比率的分析，如圖 6 可以得知，若能在災後初期，突破救災的瓶頸，提升搶救效率，以最快的速度、最有效率的方式，盡快救出受困人員，則受災人員的存活與獲救比率，必可大幅提升。

因此，我們參考[7][12][14][15]的研究，提出了數個應急通訊系統在設計上，所必須具備的功能與需求，並條列如下：

- **黃金 72 小時時期，提供通訊：**在最緊急的災後 72 小時內，完成建置並提供臨時的應急通訊服務。由於時間緊迫且專業工程人員不足，所以建置應急通訊系統的元件必須要容易取得，且系統必須要符合佈建容易、快速的要求。
- **使用在地資源：**由於災後各災區可能面臨到交通全面中斷、物資無法送達的問題，故應急通訊系統的建置必須充分利用災區當地資源，盡量減低對於外援的依賴。
- **提供給大量非專業人員使用：**應急通訊系統旨在提供給大量臨時性、自主性的非專業人員使用，故系統在使用者端的設備，必須是大量普及且價格低廉，並且在操作使用上必須簡單上手，不需經過專業訓練，即可為一般大眾所使用。另外，由於災區救援行動的性質，該設備亦必須具有移動性，讓使用者可在移動間順暢、不中斷地進行通訊。
- **輕型裝備：**無論是建置系統的元件亦或是使用者端的設備，都必須符合輕便可攜的條件。因為，建置系統的裝備有極大可能必須仰賴直昇機送入交通中斷之地區，過重或過大的設備運送，都會為救援行動添增難度。而使用者端由於必須在災區中進出救援，故通訊設備亦必須輕便易攜，減低救災人員的負荷，提升救災效率。

## 2.3 常見應急通訊介紹與比較

本章將針對現有的緊急通訊系統進行介紹，並說明比較如下：

### 2.3.1 無線對講機

俗稱 walkie-talkie，為一手持式的雙向無線收發器，如圖 8，使用免執照的 ISM 頻道，不需佈建基礎通訊網路即可使用，體積小且重量輕，只要是頻率設定相同並在電波所及範圍內的雙方，即可通訊，且其在電池充電後，即可長時間提供通訊，於隨身攜帶使用上，極具便利性，而在通訊方面則具有很高的通訊可靠度。但因無線對講機在全球及台灣社會中，普及率極低，且無經驗之使用者，難以在短時間內自行學習使用，故無法廣泛使用於救災當中。以八八水災為例，政府在災害發生後即進行無線對講機的募集，欲供災區通訊使用，但災害後的 7 天僅募集到 240 支，14 天後共募集到 1052 支，不僅募集時間過長，無法提供災後初期的緊急救援使用，無線對講機計千支的總數也遠遠少於災區內投入的救災人員人數，遠不敷大量救災人員所需。



圖 8 無線對講機

### 2.3.2 業餘無線電

Amateur Radio，常稱之為 Ham Radio，類似於廣播電台，但其訊號涵蓋範圍較小，如圖 9。業餘無線電為長距離的無線通訊設備，不需佈建通訊網路設施，即可使

用且具可靠性。於訊號範圍內可對持有裝置者，進行訊息廣播，因此，即使是陌生的通訊雙方亦可藉此建立溝通，適合於災後做為傳遞、廣發訊息之用，但國內外的業餘無線電擁有者極少、普及率過低，未受過訓練者難以直接使用，且不具移動性，故難以做為災後應急通訊設備。再以八八水災為例，災後七天，災區內才完成第一座基地台的架設，災後兩星期，完成約 10 座基地台架設。與無線對講機同樣因設備的不普及，無法因應緊急救災的大量人員使用。



圖 9 業餘無線電

### 2.3.3 移動基地台 (Cell on Wheels)

為現今手機系統用於應付臨時性大量話務的移動式無線基地台，如圖 10，多裝設於車輛上，具有可快速架設、易調度、不需額外電源供應等優點，常在人潮大量聚集的活動中，提供行動裝置通訊服務，亦能在緊急之時刻提供穩定的行動通訊服務，但因其造價昂貴、數量不足且體積過大不適合空投，所以無法大量佈署於交通中斷的災區中。以台灣中華電信持有移動基地台數量之現況為例，北部地區備有 18 台、中部地區 11 台、南部地區 8 台，全台總計擁有 37 台移動基地台，而其他民營行動電話業者所擁有的移動基地台為數更少。總的來說，國內現存行



動基地台的總量遠低於斷訊基地台總量，故於災害中所能發揮的功能非常有限。



圖 10 移動基地台

#### 2.3.4 中繼式無線電系統

Trunked Radio，常作為緊急救援之用，具架設速度快、涵蓋範圍廣、可靠性高等多項優點，如圖 11。但同樣因昂貴、數量不足無法大量佈署，且因使用人員皆需經過專業訓練，故難以使用於一般人員之救援行動上，通常為軍方人員或專業救難隊持有。現今主要的中繼式無線電系統如北美地區所使用的 Project 25[1]及歐盟地區的 TETRA[2]。



圖 11 中繼式無線電

### 2.3.5 MANET

為 Mobile Ad Hoc Network 的縮寫，不需要事前建立的基礎架構，支援臨時性、無組織、無伺服器及無網路的特殊情況，可在災區內利用行動裝置(如筆記型電腦、平板電腦等)快速佈建完成。在 Ad Hoc 網路中，將具有通訊能力的裝置視為節點，每個節點皆具有移動性，並由這些結點組成網路，傳遞訊息，當任兩節點在彼此的通訊範圍內，即可進行通訊。

P2Pnet 即為我們先前在 MANET 架構下所提出的應急通訊系統，我們利用災區自願參與救援的人員提供之行動裝置，建構隨意型網路並運用 peer-to-peer(P2P)技術，在無網際網路連線、無伺服器的環境下提供緊急的通訊與資訊運用[14]。P2Pnet 由於利用災區當地自願人員提供之行動裝置建構，故毋須龐大的建置經費，並因裝置元件(行動裝置)取得容易，故可在對外阻隔之災區內迅速建構完成。但因其通訊距離過短、無法提供穩定的通訊品質，且使用者必須具有一定的系統建置知識，故無法用於組織大量的一般志願救難人員及單位，因此依然存在實際施用上的瓶頸。

### 2.3.6 應急通訊系統比較

上述的應急通訊系統各有其限制，其優缺點表列如表 2。除行動無線基地台可大量廣泛適用一般使用者外，其餘系統的使用者均設定為少數特定對象，無法普遍用於災區的救災通訊。但行動基地台因運送至災區困難且數量極有限，故只能使用於特定地點，難以應付災區通訊的需求。因此為了加速救災行動的進行，急需研發新的救災應急通訊系統，以滿足災區通訊的基本要求。如此，才可廣泛被使用於災區的救災通訊。

表 2 應急通訊系統之比較

通訊系統	優點	缺點
Walkie-Talkie	convenient reliable no infrastructure	low popularity
Amateur Radio	reliable no infrastructure	low popularity
Cell on Wheels	reliable for cell phone users	too few too expensive too heavy
Trunked Radio Based Emergency Communication Systems	reliable no infrastructure	too expensive need special training
MANET	low deployment cost locally available	short distance

## 2.4 展開樹演算法

### 2.3.1 最小成本展開樹

最小成本展開樹，Minimum Spanning Tree(MST)，為一圖論中的經典問題[6]。給定一個連通且具有權重的無向圖，展開樹(spanning tree)指得是一個連接該圖中所有節點的樹狀結構，一個圖可擁有許多不同的展開樹，其中，最小成本展開樹，即是該圖所有展開樹中，權重值總和最小者。最小成本展開樹為一個具有最佳解的問題，也就是給定一個圖，我們可以在多項式時間(polynomial time)內為該圖求得其最小成本展開樹。著名的最小成本展開樹演算法有以貪婪法則為設計的 Prim's Algorithm 及 Kruskal's Algorithm。

### 2.3.2 最大成本展開樹

最大成本展開樹，Maximum Spanning Tree，亦為一種最佳化的展開樹問題，與最小成本展開樹的不同在於，最小成本展開樹求的是一圖中總成本和最小的展開樹，而最大成本展開樹則是求一圖中總成本和最大的展開樹。雖最大與最小成本展開樹的定義不同，但仍可使用類似於最小成本展開樹演算法求取最佳解，步驟說明如下：

1. 將圖中所有節點的權重值取負值
2. 求該圖的最小展開樹
3. 最後再將節點的權重值取負值，轉換回原始的初值

由以上步驟我們可以得知，利用最小成本展開樹的演算法，只需經過多項式時間的轉換演算法，即可求得最大成本展開樹[20]。

### 2.3.3 K-Minimum Cost Spanning Tree

K-Minimum Cost Spanning Tree 又稱為 K-Cardinality Tree (KCT)，指得是從有  $n$  個節點的圖中，找出其權重值總和最小且只含有  $k$  個點的展開樹，其中  $k \leq n$ [3]。KCT 問題不論權重在點上或是邊上，皆為 NP 難度的問題，其中，Edge-Weighted KCT 為 NP-hardness 問題[9]，而 Node-Weighted KCT 則為 NP-Completeness 問題 [8]。

### 2.3.4 K-Maximum Cost Spanning Tree

K-Maximum Cost Spanning Tree，則是從有  $n$  個節點的圖中，找出其權重值總和最大且只含有  $k$  個點的展開樹，其中  $k \leq n$ 。由前述最小與最大成本的轉換步驟，我們可推得，K-Maximum Cost Spanning Tree 亦可在多項式時間內，利用轉換演算法，自 K-Minimum Cost Spanning Tree 轉換而得[20]。

### 2.3.5 Steiner K-Cut Problem

Steiner K-Cut Problem 是一種圖形切割(partition)問題，給定一個無向且具有權重的圖  $G = (V, E)$ 、一個點集合  $X \subseteq V$  以及一個正整數  $k \leq |X|$ ，Steiner K-Cut 求得是找出一個能將  $G$  切成  $k$  個部分(part)的最小權重的邊集合，且  $X$  中的所有點分別屬於每個部分。Steiner K-Cut Problem 為一 NP-Complete 問題[4]，可用研究 [5][10][18]取得次佳解。本研究中的「區域切割問題」可採用上述解法求解。

## 第三章 應急蜂巢式行動網路(CCN)

### 3.1 系統簡介

應急蜂巢式行動網路(Contingency Cellular Network, CCN), 以下簡稱 CCN 網路。CCN 網路的建置目的為, 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、通訊設備供應, 使其恢復通訊能力, 並藉由無線鏈路[17], 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 蜂巢式行動網路建構, 主要由於手機、平板電腦等行動裝置在現今社會中十分普及, 使用者不再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, 基地台的運作停擺多肇因於停斷電及基地台後端線路的毀損, 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, 蜂巢式網路的基地台分佈拓撲, 在建置時期即經過完善的設計與規劃, 不但設置的地理位置經過測量規劃且多設置於高處, 訊號良好、無 line-of-sight 問題, 故在緊急時期, 若直接使用蜂巢式網路的基地台, 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的快速佈建建置要求。另外, 建置 CCN 網路所需的額外設備(緊急物資包)具有可事前儲備、輕量等優點, 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。

系統示意如圖 12 所示，利用無線鏈路連結斷訊的基地台群，並將訊號遞送至具後端通訊能力之基地台或衛星通訊設備與後端網路介接，藉此使斷訊基地台，回復通訊。

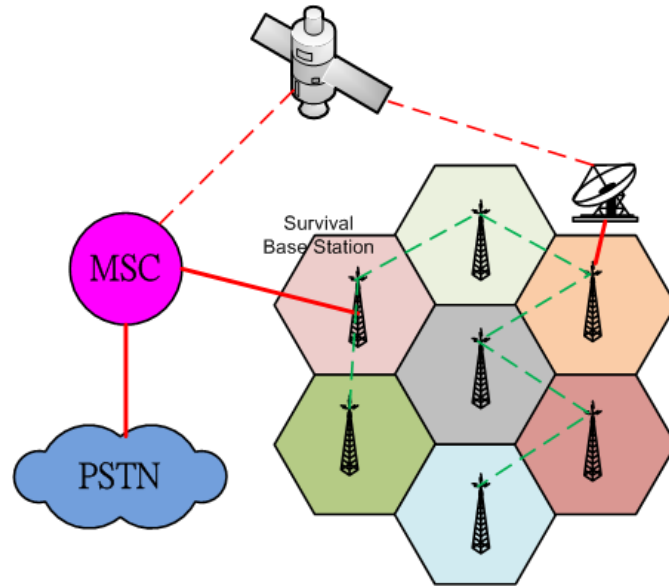


圖 12 CCN 網路示意圖

### 3.2 系統架構

我們將基地台依其對外通訊的連線能力，定義如下：

- **連網台**：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(Survival Base Station)，如圖 13。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，具有與後端核心網路通訊之能力。

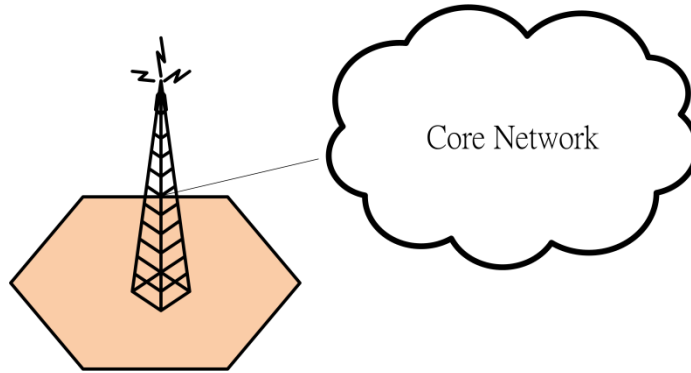


圖 13 連網台

- **孤立台**：無法與後端網路通訊，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，稱之為孤立台(Isolated Base Station)，如圖 14。其形成孤立的原因可能由電力中斷、實體對外線路損毀所導致。

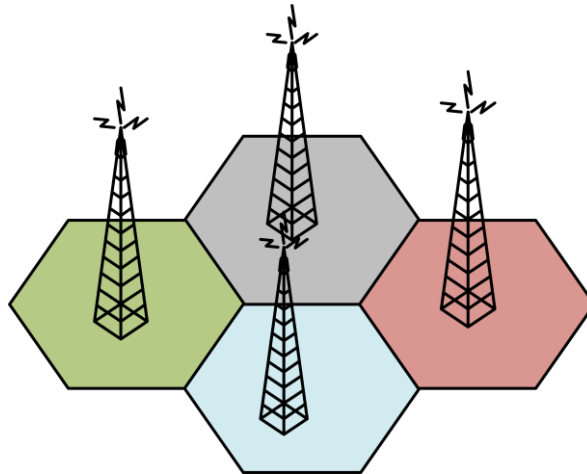


圖 14 孤立台

- **鄰台**：兩基地台彼此相鄰，並可藉由無線鏈路連接，相互傳遞資料者，則這兩基地台互為彼此的鄰台。

我們將搶救斷訊基地台所需的軟硬體設備，包裝成「緊急修復包」(Emergency



Recovery Package, ERP), 並利用空運或空投等方式置放於斷訊基地台, 以供搶修人員進行基地台之修護。ERP 如圖 15 所示並將於 3.4 節詳細說明。

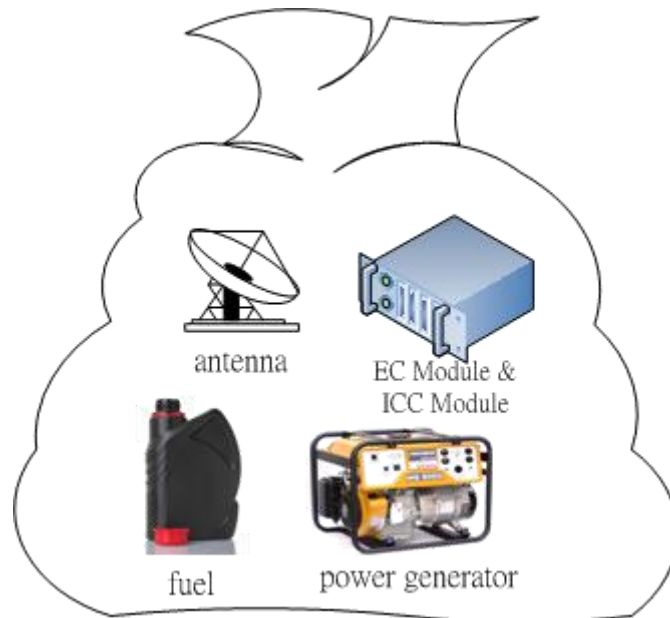


圖 15 緊急修復包(ERP)

CCN 網路的通訊架構如圖 16 所示, 各基地台之間藉由無線鏈路, 以多點跳送(multi-hop relay)的方式, 連接至連網台並連接到核心網路。圖 17 則說明在 CCN 網路上訊息傳送的方式。

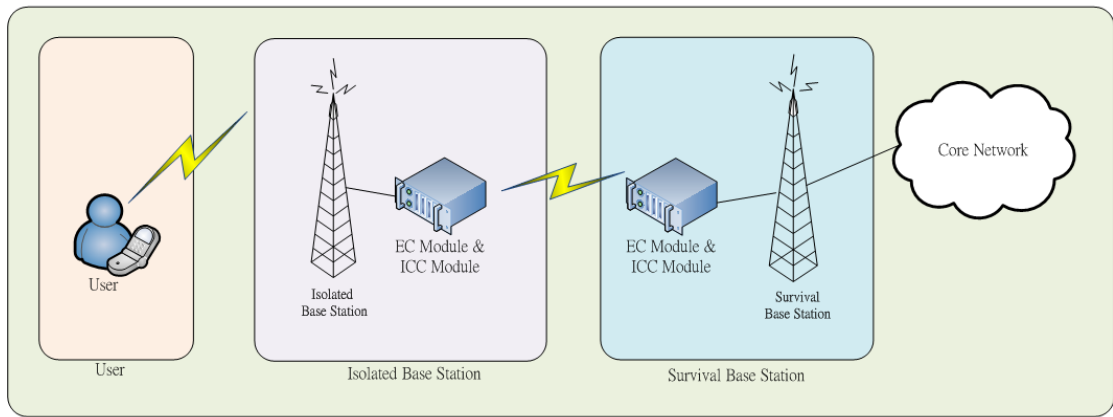


圖 16 CCN 通訊架構

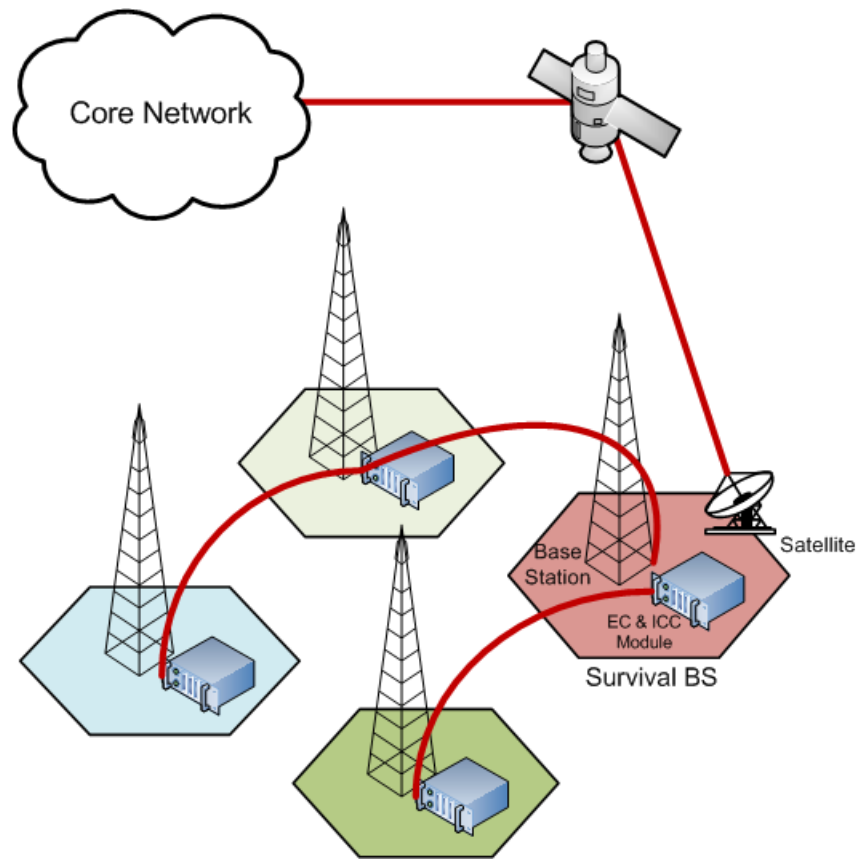


圖 17 CCN 通訊模式示意圖

### 3.3 系統使用時機

CCN 網路建立的目的是在於，為災後常態行動通訊中斷的時期，提供一臨時性的通訊網路，使得災區人員可藉由行動裝置通訊，以協助救災。由於本系統建置目的並非取代常態性行動網路系統，所以隨著時間推進，當電信業者逐步修復災區通訊，此系統的作用也將隨之減低，直至所有斷訊基地台修復為止，如圖 18 所示。

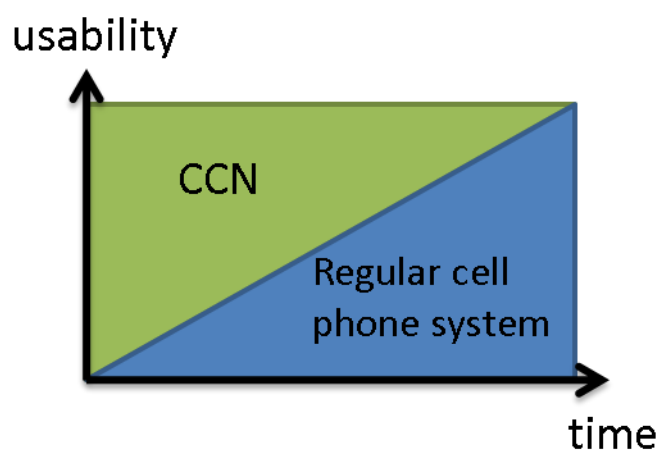


圖 18 CCN 使用時機

### 3.4 系統元件

CCN 網路的建立需在孤立台上附加額外設備，其所需的資源包含發電機、燃油、無線通訊設備、衛星通訊設備等，稱之為緊急修復包(Emergency Recovery Package, ERP)，如圖 15 所示。ERP 可事先儲備於防災單位，並於災害發生時由災區內部調度支援，或由直升機等方式空投至災區使用。

ERP 由四個模組所組成，包含 Power Module、ICC Module、Satellite Communication Module 及 EC Module，元件模組逐一說明如下：

- **Power Module**：提供基地台電力，包含發電機及燃油等供電設備。一般運作中的基地台多備有不斷電系統(Uninterruptible Power Supply, UPS)，讓基地台設備在電力供應異常時，仍維持正常的系統運作。但一般的不斷電系統多半僅能供應數小時電力，在大型災害中，無法發揮功效，故為能持續供應基地台運作所需的電力，輕便可攜的小型發電機具，為佈建 CCN 網路所需具備的元件之一。
- **ICC Module**：為 Inter-Cell Communication Module 的簡稱，係與鄰台之間無線通訊的軟硬體模組，包含如 WiMax、長距離 WiFi 等的無線電收發器 ( Wireless Transceiver)，負責基地台之間的無線通訊鏈路之建立與維持。CCN 網路中「孤立台—孤立台」以及「孤立台—連網台」間的連接與資料傳遞，即是仰賴 ICC Module 的無線通訊能力，藉由無線電訊號連接鏈路，達成資料的遞送。
- **EC Module**：為 Emulate Controller Module 的簡稱，為 ERP 的核心運算元件，負責允入控制(admission control)、資料遞送(data forwarding)、網路頻寬分配 (bandwidth allocation)、網內通訊(intranet communication)等的資料運算處理，是 ERP 中的決策元件。EC Module 也是 CCN 網路與原先受損的行動網路系統間的通訊介面，CCN 網路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 19 所示。

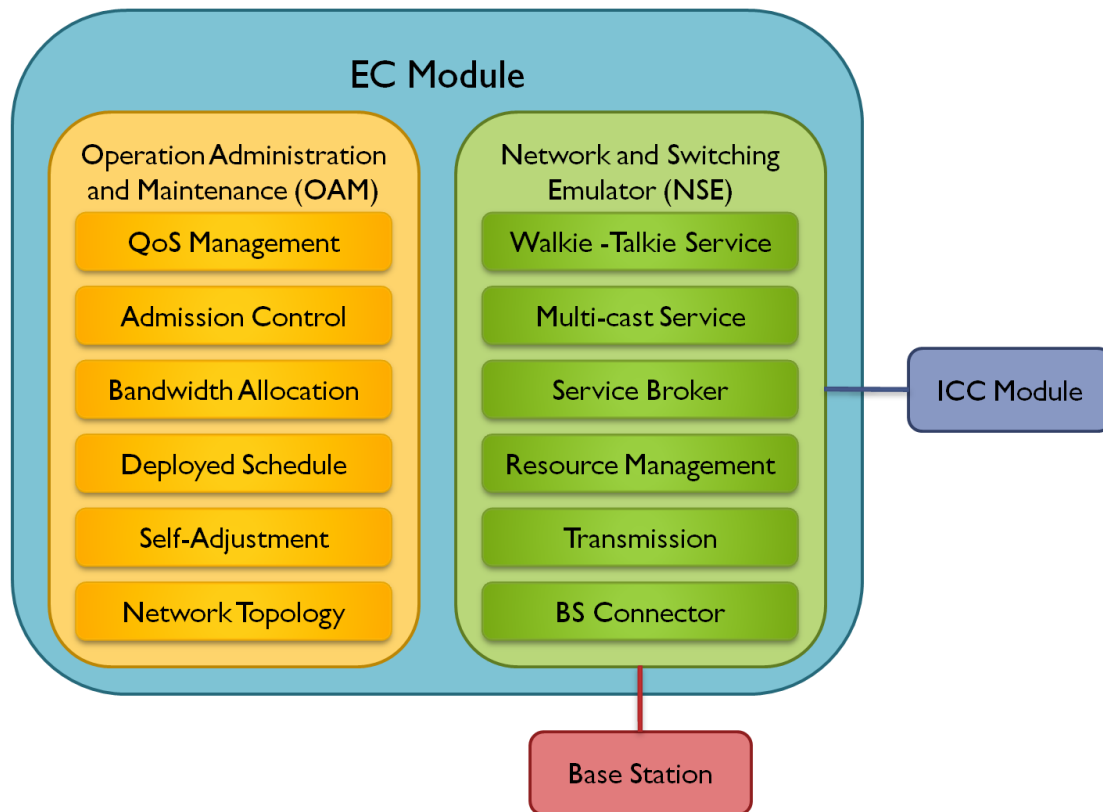


圖 19 EC Module 功能模組

- **Satellite Communications Module**：衛星通訊模組，在 CCN 網路中，負責協助恢復孤立台的後端通訊能力，使之成為連網台。前述提及，衛星通訊設備具有完整的後端通訊能力，在災害及應急時期是極佳的通訊方案，唯獨所費不貲、設備數不足，無法全面佈建於災區。而在完全對外中斷的災區中建立 CCN 網路，則須依賴至少一個連網台，做為連外通訊管道，故需挑選合適之行動網路基地台，裝置衛星通訊模組，為 CCN 網路建立核心網路之連結。

### 3.5 研究議題

CCN 網路的建置目的在於，提高大型災害發生後的黃金 72 小時時限內之救災效率。欲在如此急迫的時間內完成一穩定、有效的通訊系統，則必須多方進行考量與設計。CCN 網路建置的相關議題探討，如下：

#### 3.5.1 網路拓撲規劃

網路拓撲的規劃與設計為建立 CCN 網路的首要議題。以 CCN 網路的設計，孤立台群將以多重跳接的方式，與連網台建立無線鏈路、交換資訊，而之中跳接點的選擇、網路拓撲的規劃，將直接決定整體網路的效能與網路穩定度。在設計 CCN 拓撲時，我們將依據 ERP 的數量，選擇數個救災效益大的孤立台點佈建 ERP，並藉由多重跳接的方式，連接這些孤立台點與連網台點，以恢復其通訊，另外，網路流量的負載平衡亦須納入考慮，適當地分散鏈路上的資訊流量，避免建立負載量過大、跳接點過多的網路拓撲，同時也需避免資料傳遞上的壅塞、延遲(delay)問題，以維持網路訊息傳遞的品質，提升整體的救災效益。

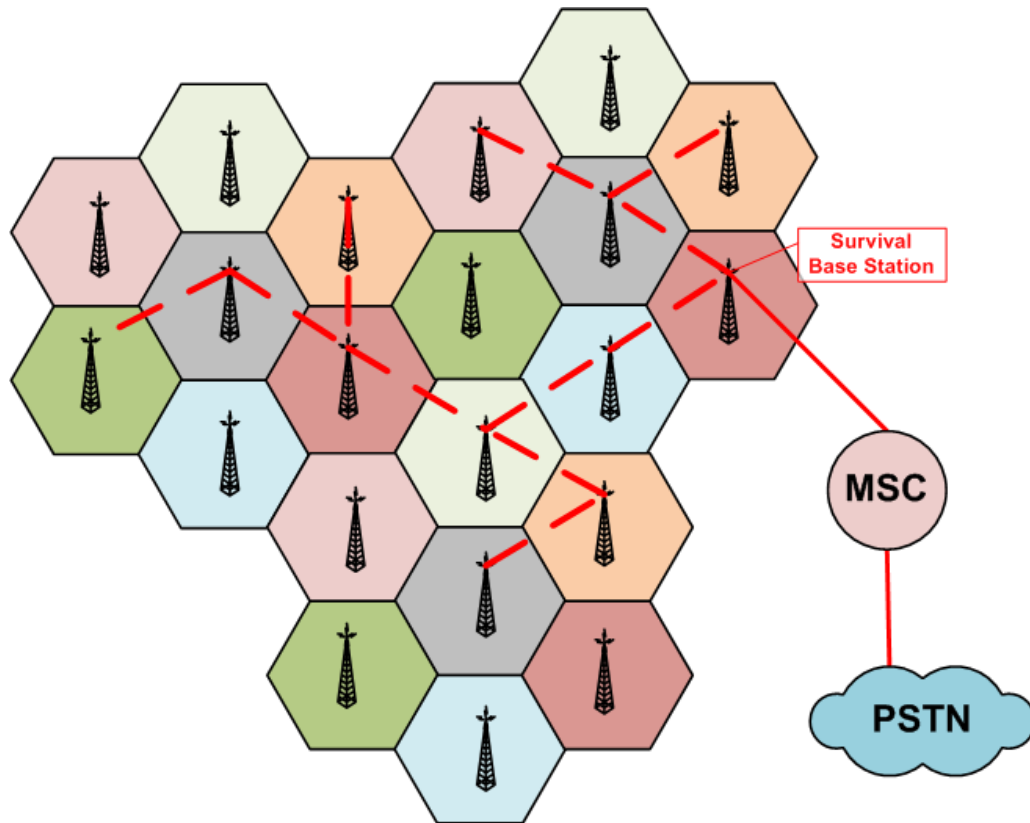


圖 20 CCN 拓樸示意圖

### 3.5.2 建構排程設計

在大型災害發生後，許多災區面臨部分或全面性的交通中斷，我們欲在這些交通運輸能力受限的地區，派送建構 CCN 網路所需的 ERP 資源，則須經過適當的排程規劃。由於災區受災程度有輕重之別，且運輸工具的能力及建置人員數量皆有限，故我們必須考量各地區的通訊需求程度，決定適當的孤立台群搶救順序，優先於通訊需求度高的地區建置 CCN 網路，恢復其通訊能力，接著，再逐步恢復其他地區通訊，以求 CCN 網路能發揮最大的救災效益，此即為建構排程設計的目的。

### 3.5.3 網路頻寬分配

CCN 網路採用多重跳接的方式建立網路拓撲，然而整體網路所能負荷之總通訊流量及通訊通道(channel)數量有限，因此為求通訊品質之穩定，必須控制各個網路節點(即被選定用以建立 CCN 網路之孤立台)的通訊流量。頻寬分配問題即是，考慮每個 CCN 網路節點的流入通訊量與流出通訊量，計算出各節點可允許的使用者數，為各節點分配適合的通訊頻道量，避免發生某些節點所擁有的頻寬完全被轉送的資訊佔據，自身無法提供通訊服務的情況。

### 3.5.4 Priority-based 允入控制

允入控制指得是，系統依據特定條件，選擇性地接受使用者請求。CCN 網路導入允入控制的目的是在於，避免系統因接受過多的通訊請求而癱瘓以及保證優先權高的請求可獲得通訊資源。在災後時期，不論是來自於各單位搜救調度的通訊，或是來自於一般民眾的關懷電話，都使得行動通訊網路的話務量遠大於常時，然而，藉由多重跳接建立的 CCN 網路所能容納的通訊流量本就不及常時的行動通訊網路，如此一長一消，使得系統所能容許的通訊量大減，為使系統穩定運作，因此僅有部分的通訊請求能夠被允許建立，priority-based 允入控制則是為各個通訊請求建立優先次序，確保如救災調度等優先權較高的通訊請求能優先使用系統資源，以利救災行動的進行。

### 3.5.5 Intranet 建構

在現有的蜂巢式行動通訊網路架構下，行動裝置與行動裝置間的通訊封包必須經



由後端核心網路的繞送，方能彼此傳遞，即使兩裝置皆處於同一基地台的服務範圍內。換言之，同一基地台服務範圍下的裝置間通訊，依然需後送至核心，才可完成。在 CCN 網路多重跳接且連網台連外頻道極為有限的架構下，各孤立台能分配到的實際外送頻道數，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。而在災後救援上，災區內部搜救人員間的通訊占了通訊需求的極大比例，因此，我們希望能建立 Intranet 的通訊架構，讓同基地台服務範圍下的使用者，在不佔用連外頻道的情況下，能夠利用閒置頻道進行類無線對講模式的通訊，提升整體通訊系統的利用率與可用性。

### 3.5.6 自動化建構

救災行動分秒必爭，若能事先規劃並架設好 EC Module 和 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藉由預先規劃並架設 EC Module 和 ICC Module 達成，而位於受災風險高之區域則可考慮使用嵌入式的設備，當災害發生，孤立台失去電力以前，即可啟動自動化建構程序。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。

### 3.5.7 基地台介面整合

CCN 網路利用蜂巢式行動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 設備，以達到提供行動裝置通訊服務的目地。因此，EC Module 必須能實現與基地台間的無縫介接，其中包括雙方的軟、硬體介面與通訊協定等部分，都經過完整的設計規劃，以確保 EC Module 與基地台皆能成功運作，發揮通訊能力。

### 3.6 重要實作議題探討

為實現 CCN 網路的頻寬分配、允入控制、Intranet 建構等功能，在應急時期，勢必改變現有基地台的運作流程，因此，我們提出「嵌入式」與「外接式」兩種方式，分別說明如下：

- **嵌入式**：修改現有基地台之軟硬體結構，將應急通訊系統之功能模組嵌入其中。嵌入式的系統運作方式，可在災害發生時立即啟動運作，支援災區搜救工作，且系統運作較具效率，可提供的功能較多且較具彈性，適合實現複雜度高的功能，但其最大的缺點為，需要大量修改現有的基地台系統，使得系統建置成本提高，且由於基地台的製造商及型號有所不同，亦為嵌入式模組的實作增添難度。
- **外接式**：藉由外接模組、維持現有基地台運作機制的方式，實現應急通訊之功能。外接式的系統運作方式，不必修改現有的基地台系統，且單一外接設備可適用於不同的基地台系統，使得系統的建置成本大幅降低，但所能提供的功能較為有限，且在災後的即時性搶修上，則較不有利，需要依賴額外的運送、架設工作，減低救援的速度。
- 維持現有基地台運作機制，藉由外接的設備(如 EC Module)來提供新功能。優點是不需更改現有基地台，且同一外接設備可適用於不同的系統。缺點是

僅能提供較簡單的基本功能。

現有的行動通訊系統，如 GSM、3G 等，在系統設計上並未將應急通訊納入，如採用嵌入式系統的實作方式，在成本及技術面上的高門檻，將難以說服行動通訊服務提供者採納；而外接式系統的低成本及低技術門檻特性，在系統實施上，則較為可行。

新一代的行動通訊系統，如 LTE，則已將應急通訊納入系統設計，如此將大幅降低嵌入式系統的使用成本及門檻。因此，若利用外接式系統提供應急通訊所需的基本功能，另外再針對新一代的基地台，以嵌入式的方式實作進階功能，搭配兩種實施方式同時運行，既可實現應急通訊，亦可控制建置成本，增加 CCN 網路實現的可能性。

## 第四章 應急蜂巢式行動網路的拓撲規劃

### 4.1 CCN 網路拓撲規劃的重要性

網路拓撲規劃的優劣與否，直接影響到整體網路品質的穩定度，更進一步影響整體救災的效益。好的網路拓撲規劃不僅是建立一網路，還需考量整體網路負載，避免網路壅塞及延遲，進而提高救災效益。

我們利用現有的行動通訊蜂巢式網路，以各毀損基地台通訊範圍內的通訊需求人數與災區毀損程度，作為各基地台位置的效益參數，選擇效益較高的孤立台配置緊急修復包，並使用無線鏈路，連接各基地台，建立應急蜂巢式行動網路的網路拓撲，此拓撲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。

### 4.2 無線通訊模組鏈結數對拓撲規劃的影響

CCN 網路的拓撲結構受制於 ERP 內的無線通訊模組實際天線鏈結數量，因為天線鏈結數量的多寡，直接決定該設備所能通訊鏈接的鄰台數，以下我們以 2-link 與 3-link 無線模組為例，說明無線通訊模組的鏈結數對拓撲規劃產生之影響。

#### 4.2.1 2-link 無線模組

當某孤立台配置的 ERP 配備有兩組無線鏈結設備時，如圖 21 所示，我們利用其中一個鏈結連接已連接上連網台之鄰台；另外一剩下的鏈結則用來連接最具救災效益之其他孤立鄰台，如此，我們可建立一線狀的網路拓撲，如圖 22 所示。

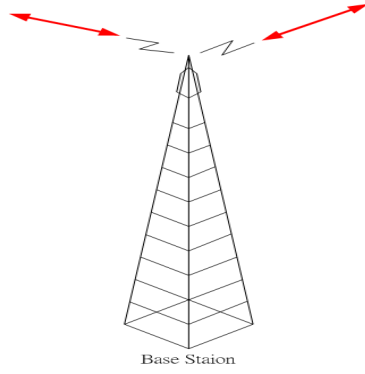


圖 21 2-link 無線模組

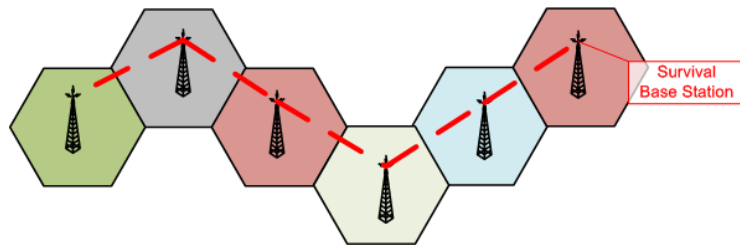


圖 22 線狀網路

#### 4.2.2 3-link 無線模組

當某孤立台配置的 ERP 配備有三組無線鏈結設備時，如圖 23 所示，我們同樣利用其中一個鏈結連接已連接上連網台之孤立鄰台；另外一剩下的兩個鏈結則用來連接最具救災效益之其他兩個孤立鄰台，如此，我們可建立一樹狀的網路拓撲，如圖 24 所示。

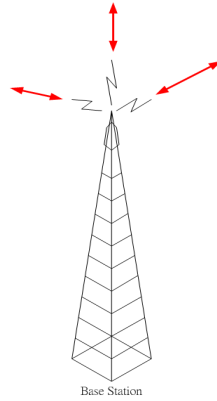


圖 23 3-link 無線模組

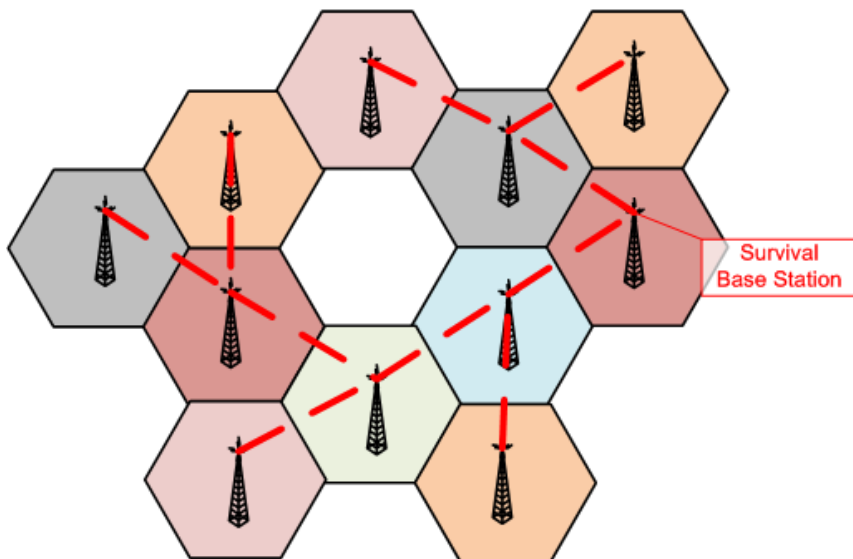


圖 24 樹狀網路

### 4.3 CCN 網路拓撲的建構

我們挑選災區內斷訊但結構未毀損且對於救災具有較高效益的基地台並配置 ERP，恢復基地台本身的通訊能力，並利用無線電相連基地台群，恢復其後端通訊能力。其中，基地台利用原有的通訊能力支援基地台與行動裝置間的通訊，而 ERP 模組則以多點跳送的方式接力連接至連網台，取代中斷的基地台與後端之連線。

如圖 25 所示，基地台本身的通訊旨在與行動裝置間的資料傳遞，而實際的資料遞送，則是藉由 ERP 模組之間的多點跳送，負責轉送來自基地台介面的資訊。

經由上述，我們說明 CCN 網路的拓撲規劃，事實上即是 ERP 裝置與連網台間的資訊繞送路徑之規劃，如圖 26。

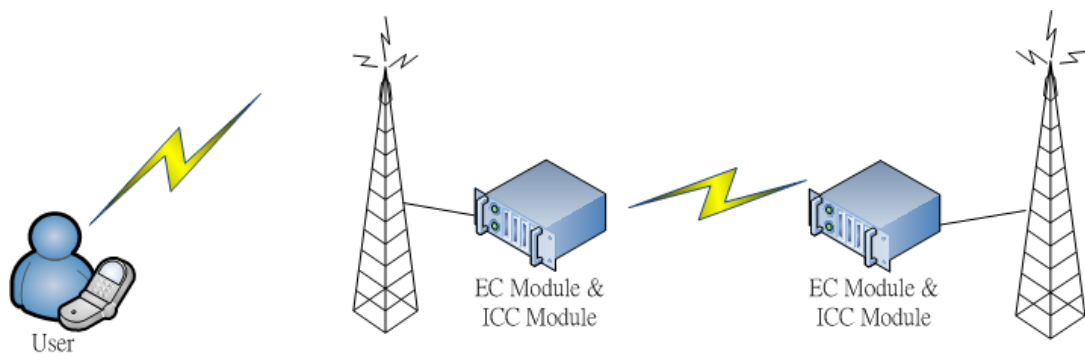


圖 25 CCN 網路藉由 ERP 進行資料傳遞

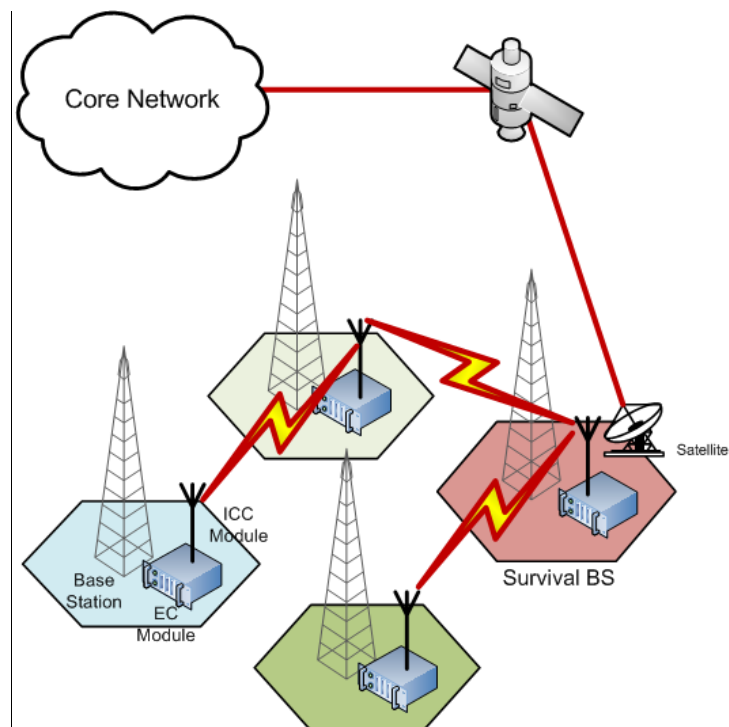


圖 26 孤立台恢復連線之方式

#### 4.4 效益參數

為 CCN 網路從孤立台群中選擇適當的網路節點時，我們將以效益參數為選擇的基礎，效益參數值越高者，即表示恢復該孤立台的通訊對於整體的救災效益較高，例如該孤立台位於嚴重受災的區域；效益參數值越低者，則表示恢復該孤立台通訊對於整體救災效益並不大，例如該孤立台位於未受災的地區。

由於災區的受災情況以及救災優先度的考慮，均由國家救災單位蒐集與定義，本論文不宜越俎代創代為定義各基地台的救災效益，而留待使用者自行定義。

#### 4.5 多連網台的網路拓撲規劃

災區中如有多個連網台時，我們的單一連網台拓撲規劃模型，也可用以求解。多連網台的網路拓撲規劃問題可以簡單地轉化成單一連網台的網路拓撲規劃問題。其轉換步驟如下：

1. 在網路拓撲之外，增設一個虛擬的根節點，
2. 將所有連網台連到此虛擬根節點。

#### 4.6 CCN Forwarding Tree

我們希望建立一類似樹狀的網路，並稱之為 CCN Forwarding Tree (CCN FT)。利用一個具有對外通訊能力的基地台，也就是連網台，做為 CCN FT 的樹根(root)，並從孤立台群中，依據各個孤立台的效益參數(profit)，選取數個效益較高的孤立台做為 CCN FT 的節點，並配置 ERP，藉由 ERP 的無線鏈路連接各個基地台。

資料的繞送，採用多點跳送方式，將資料從 CCN FT 的 leaf nodes，跳接傳



送至連網台，最後，再藉由連網台連接後端網路，將資料外送，完成資料的傳送。

CCN FT 建置過程如下：

1. 有一欲建立 CCN 的連網台及其孤立台群，如圖 27 所示。
2. 從孤立台群中，選擇救災效益較高的數個孤立台配置並架設 ERP 裝置，如圖 28 所示。
3. ERP 佈建完成後，等待依拓撲規劃建立鏈結，如圖 29 所示。
4. 為 ERP 群建立網路拓撲，提供通訊能力，如圖 30 及圖 31 所示。
5. CCN 網路開始運作，提供災區行動裝置通話及資料傳輸功能，如圖 32 所示。

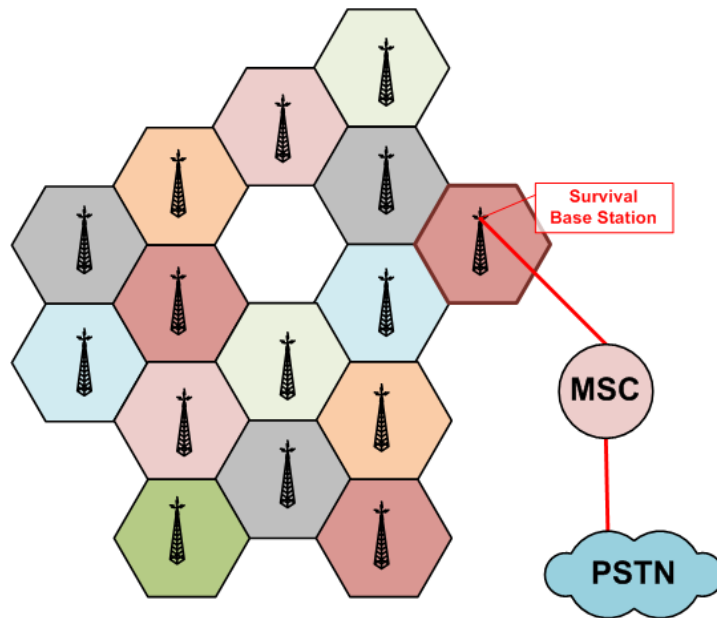


圖 27 一連網台與孤立台群

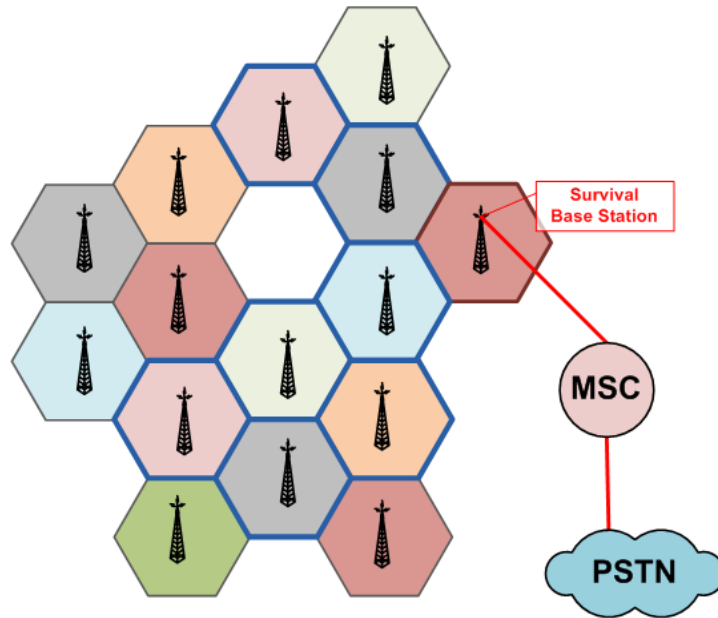


圖 28 建置 ERP 於選定之孤立台

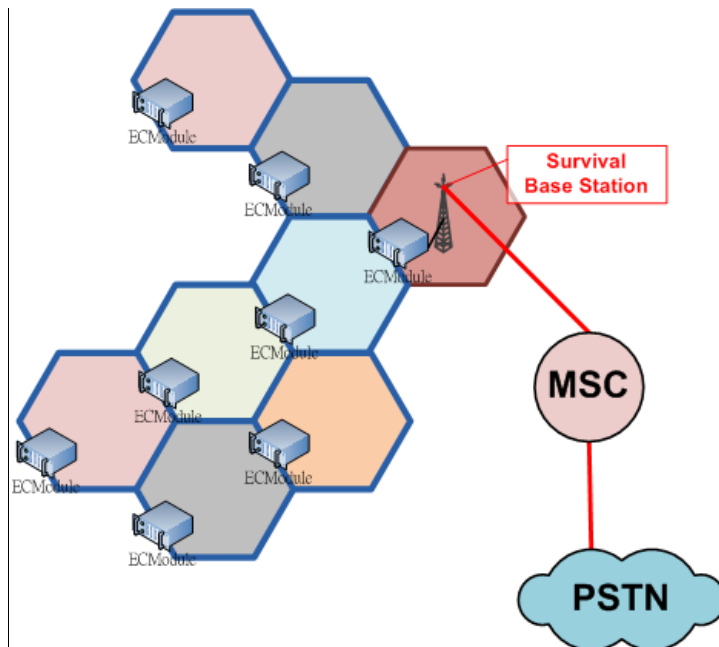


圖 29 等待建立鏈結的 ERP 群

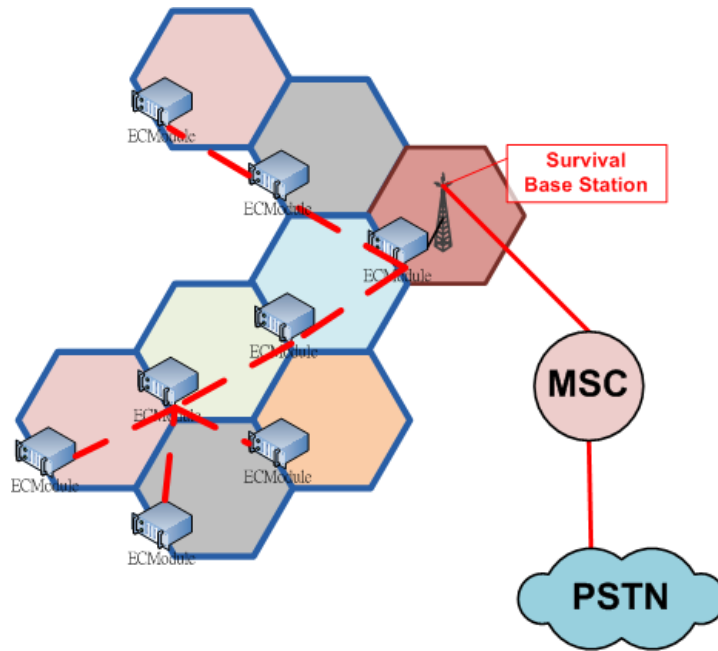


圖 30 為 ERP 群建立網路拓撲

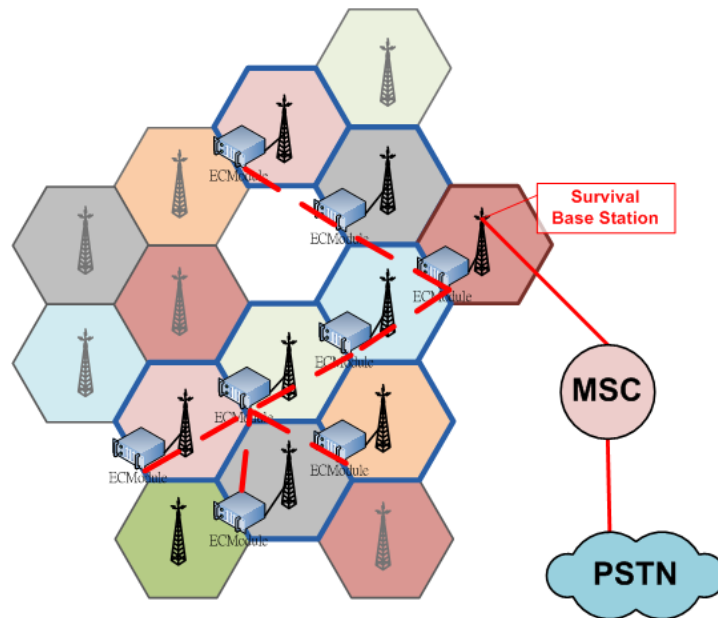


圖 31 CCN 拓撲建立完成

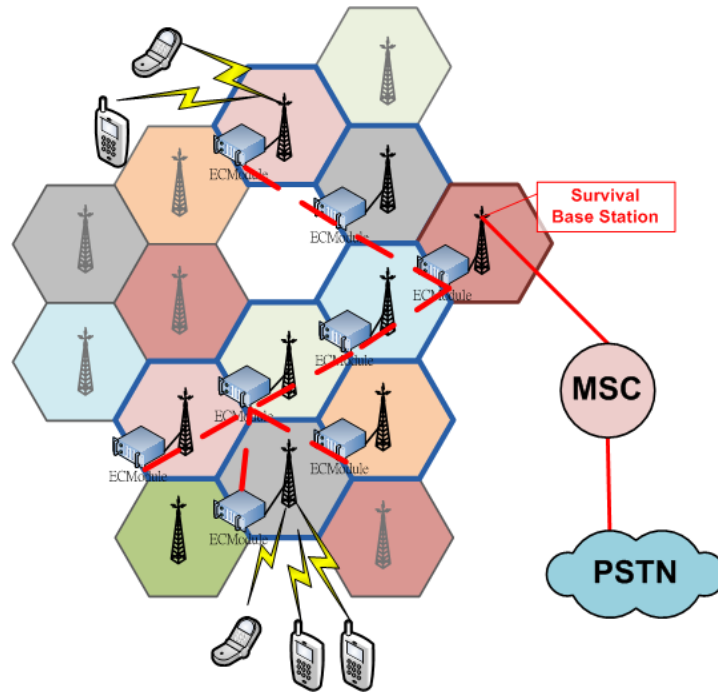


圖 32 CCN 運作並提供通訊

#### 4.6.1 ERP 數量之限制

從歷年大規模天災的經驗中我們可以得知，行動通訊網路極為脆弱，斷訊的基地台為數眾多，而 ERP 數量畢竟有限，故無法佈建於所有孤立台上，所以我們必須依據 ERP 的數量，從孤立台群中，選擇數個效益較高的孤立台佈署 ERP。

我們利用 Profit Function 為每個孤立台建立 4.4 節所提及之效益參數，Profit Function 由國家救災單位評估考量後建立，以每個孤立台位置的通話需求人口數目以及受災程度等綜合因素考量，訂定各個孤立台的 profit 效益參數。Profit 越高的孤立台，代表其在 CCN 佈建 ERP 的排序順位上越高。

#### 4.6.2 Relay-hop 數量對拓撲的影響

CCN 網路藉由多點繞送的方式遞送資料，因此，拓撲上資料遞送的 relay-hop 數會對網路傳輸品質造成影響，當 relay-hop 數過大時，網路上所傳遞的資訊隨著

經過 hop 數量的增加，將產生資料流量累增，造成網路負載失衡的現象，且因為資訊的傳遞必須經過許多節點，對於通訊亦會造成延遲及增加封包遺失率的後果。圖 33 及圖 34 為兩個完全相同的基地台分佈，但利用不同的拓撲建立 CCN FT，圖 33 中節點的最大跳送數為 6，終端節點的資料必須經過 6 次跳送，方可送達連網台；圖 34 中節點的最大跳送數為 4，終端節點的資料只需經過 4 次跳送，即可送達連網台。

因此，考慮網路的負載、通訊的品質，我們不希望 CCN FT 的 relay hop 數太大，換言之，我們希望可以控制 CCN FT 的深度(depth)，藉以減低資料跳送的距離。

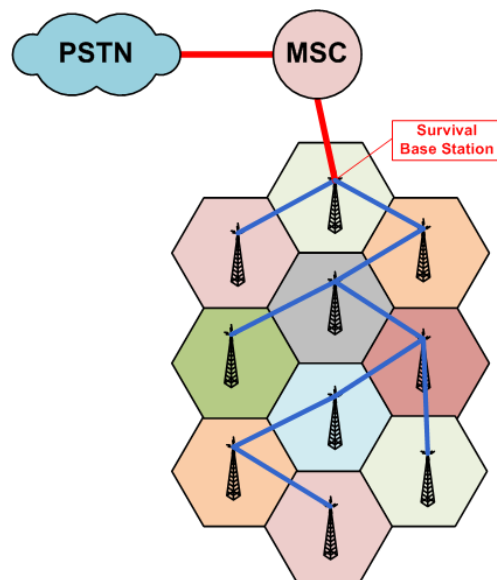


圖 33 max relay hop = 6

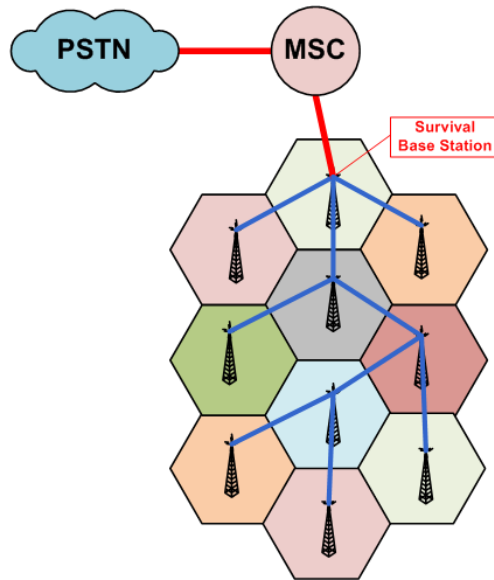


圖 34 max relay hop = 4

#### 4.7 最佳化問題模型

我們將建立 CCN FT 問題塑模為一類似圖論中的 K-Minimum Cost Spanning Tree (K-Cardinality Tree or KCT) 問題，本研究提出了兩個模型，第一個為 Depth Bounded K-Maximum Profit Spanning Tree (簡稱限深模型，DB K-MaxST)，其中，除了選取 K 個最大效益的基地台外，還考慮連線中的流量負載，以避免建立通訊流量太集中及太深的拓撲結構；第二個模型為 Hop Concern K-Maximum Profit Spanning Tree (簡稱折減模型，HC K-MaxST)，旨在提高離連網台較近的近端節點優先度，讓 CCN FT 拓撲盡量扁平化。

##### 4.7.1 限深模型(DB K-MaxST)

此模型為，在 CCN FT 的樹深度至多為 B 的條件下，計算出最大總效益的樹狀結構的總效益，模型描述如下：

- Given a graph  $G(V,E)$ , where
  - $V = \{v_i | i = 0, 1, \dots, n\}$  is the set of nodes (連網台與孤立台群).

- $v_o$  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 links to be construct if selected, and a wireless connection between  $v_i$  and  $v_j$  can be established on  $e_{ij}$ .
  - $P = \{p(v_i) | p(v_i) \in \mathbb{Z}^+, v_i \in V\}$ ,  $p(v_i)$  is the profit of  $v_i$ .
  - $\mathcal{K} \in \mathbb{Z}^+$  is the total number of resources (ERP).
  - $\mathcal{B} \in \mathbb{Z}^+$  is an upper bound of the depth of CCN forwarding tree.
- In CCN Forwarding Tree, define “Forwarding Path of  $v_i$ ” to be the path from  $v_i$  to  $v_o$  through  $\text{path}\langle v_i, \dots, v_o \rangle$ .
  - DB K-MaxST is to find a CCN forwarding tree  $T(V_T, E_T)$ ,  $T(V_T, E_T) \subseteq G(V, E)$ , where  $v_o$  is the root of  $T(V_T, E_T)$ , such that the total profit  $\sum_{v_i \in V_T} p(v_i)$  is maximized, subject to  $|V_T| = \mathcal{K}$  and the depth of  $T(V_T, E_T) \leq \mathcal{B}$ .

#### 4.7.1.1 NP-Completeness

Given a 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  $K$ , and depth bounded K-Max Spanning tree (DB K-MaxSTDB) problem is to find a K-MaxST and the depth of K-MaxST is no more than an integer  $\mathcal{D}$ .

The DB K-MaxST is the optimization problem of finding a depth bounded K-spanning tree (DB K-ST) of maximum total profit in a graph. As a decision problem, we ask simply whether a depth bounded K-spanning tree (DB K-ST) of a given total profit  $\mathcal{P}$  exists in the graph. The formal definition is

DB K – MaxST =  $\{ \langle G, \mathcal{P} \rangle : G \text{ is a graph with a DB K – ST of total profit } \mathcal{P} \}$

(A) DB K-MaxST is in NP

Suppose we are given a graph  $G\{V, E\}$ , and a integer  $\mathcal{P}$ . The certificate we choose is the DB K-MaxST  $\subseteq G\{V, E\}$  itself. The verification algorithm affirms that the total profit of DB K-MaxST =  $\mathcal{P}$ , and then it checks, whether the tree depth  $\leq B$ . This verification can be performed straightforwardly in polynomial time.

(B) DB K-MaxST is NP-Hardness

To prove that DB K-MaxST is NP-hard, we show that  $K - \text{MaxST} \leq_p \text{DB K} - \text{MaxST}$ .

Let  $G\{V, E\}$  be an instance of K-MaxST. We construct an instance of DB K-MaxST as follows. We form the graph  $G'(V', E')$ , where  $V' = V$ ,  $E' = E$ ,  $K' = K$ , and  $\mathcal{D} = K$ .

The instance of DB K-MaxST is then  $(G', K)$ , which is easily formed in polynomial time.

We now should show the graph  $G$  has a K-MST if and only if graph  $G'$  has a DB K-MaxST whose bound constraint =  $K$ . The process is very straightforward.

If we simply found a K-MaxST for graph  $G$  with no other constraint, the depth  $\mathcal{D}$  of the K-MaxST is always between 1 and  $(K-1)$ , that is  $1 \leq \mathcal{D} \leq K - 1$ , which is always smaller than the depth bound constraint  $K$ .

Conversely, suppose the  $G'$  has a DB K-MaxST whose depth bound constraint  $\mathcal{D} = K$ . The K-MaxST with bounded depth  $\mathcal{D} = K$  is always to be the K-MaxST in  $G$ , just like no depth bound.



### 4.7.2 折減模型(HC K-MaxST)

此模型與限深模型類似，唯拓撲中的任一節點之救災效益隨著深度而折減，模型描述如下：

- Given a graph  $G(V,E)$ , where
  - $V = \{v_i | i = 0, 1, \dots, n\}$  is the set of nodes (連網台與孤立台群).
  - $v_o$  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 links to be construct if selected, and a wireless connection between  $v_i$  and  $v_j$  can be established on  $e_{ij}$ .
  - $P = \{p(v_i) | p(v_i) \in \mathbb{Z}^+, v_i \in V\}$ ,  $p(v_i)$  is the profit of  $v_i$ .
  - $\mathcal{K} \in \mathbb{Z}^+$  is the total number of resources (ERP).
  
- HC K-MaxST is to find a CCN Forwarding Tree  $T(V_T, E_T)$ ,  $T(V_T, E_T) \subseteq G(V, E)$ , where  $v_o$  is the root of  $T(V_T, E_T)$ , and  $h(v_i)$  is the number of hops from root to  $v_i$ , such that the total profit  $\sum_{v_i \in V_T} \left( \frac{p(v_i)}{h(v_i)} \right)$  is maximized, subject to  $|V_T| = \mathcal{K}$ .

## 4.8 演算法設計

由於 DB K-MaxST 問題為一 NP-hardness 問題而 HC K-MaxST 也雷同，以現有的技術無法在有效時間內找到最佳解(optimal solution)，所以，我們為這兩個模型設計了啟發式演算法。

#### 4.8.1 Depth Bounded Tree Building (DBTB) Algorithm

Depth bounded tree building algorithm 是 DB K-MaxST 問題的求解啟發式演算法，其虛擬碼如下：

*DBTB(G, p, r, K, B)*

*Set T = {} /\* bounded depth tree \*/*

*Set U = {r} /\* r is the root of T, belong to G\*/*

*while elements in U has at least one adjacent node*

*while size of T < K do*

*let v be a highest profit adjacent node of u such that*

*$v \in V(G) - U, u \in U$  and depth of  $u \leq B - 1$*

*add v to U*

*add link(u, v) to T*

*delete v from V-U*

*end while*

*end while*

BDTBA

# of resource ( $K$ ): 5  
 Node weight: 1~5  
 B (bound): 3

Total Profit: 14

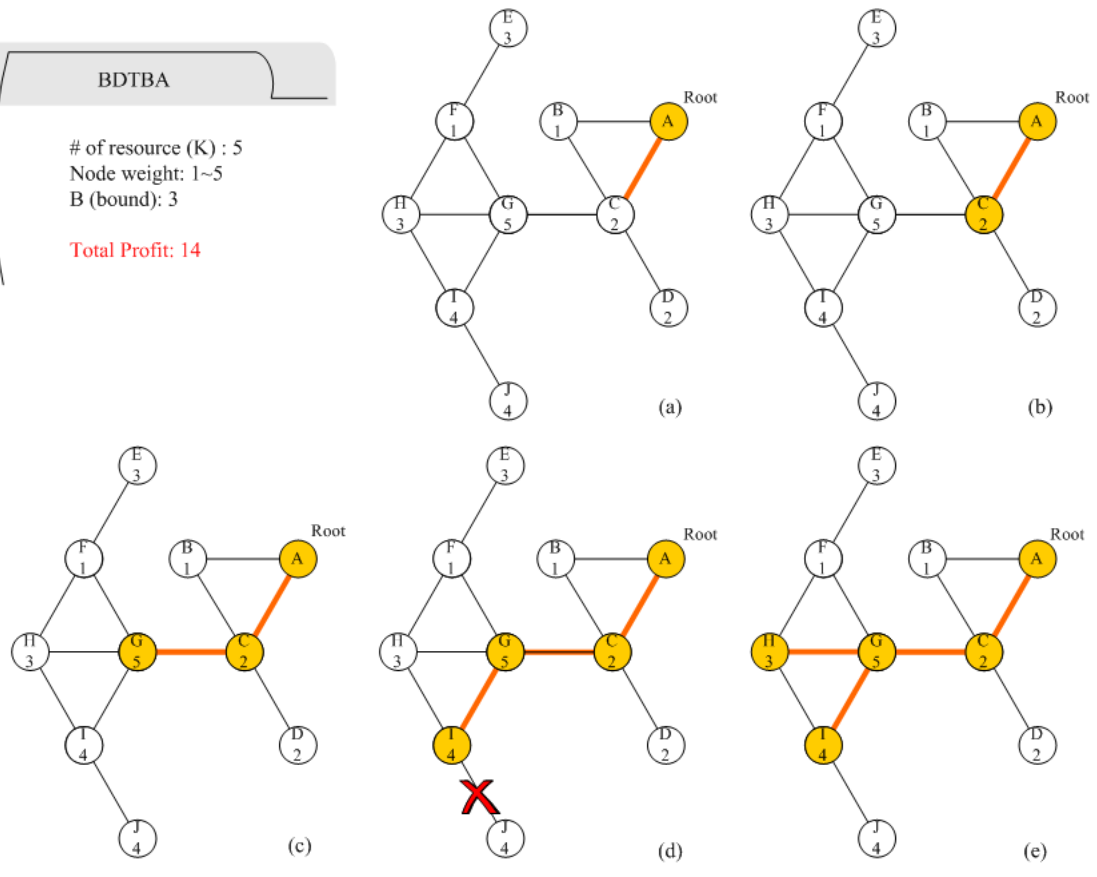


圖 35 DBTB 演算法步驟

我們以一個簡單的舉例說明 DBTB 演算法，如圖 35 所示，(a)總資源數  $K = 5$ ，所有節點權重值介於 1 至 5 之間，樹深限制  $B = 3$ ，而節點 A 為本圖的樹根，演算法從此處開始；(b) 搜尋與 A 相鄰節點並比較其值，因 C 值比 B 大，選擇 C 點；(c) 搜尋與 C 相鄰節點並比較其值，因 G 值為 B, G, D 三者中最大者，選擇 G 點；(d) 搜尋與 G 相鄰節點並比較其值，因 I 值為 F, H, I 三者中最大者，選擇 I 點；(e) 搜尋與 I 相鄰節點並比較其值，J 值雖為為 H, J 兩者中最大者，但其深度為 4 大於  $B$ ，故選擇值次大的 I 點，資源用罄，演算法結束，總效益為 14。

與利用暴力法求得之最佳解，圖 36，相比，得到相同的 CCN FT。

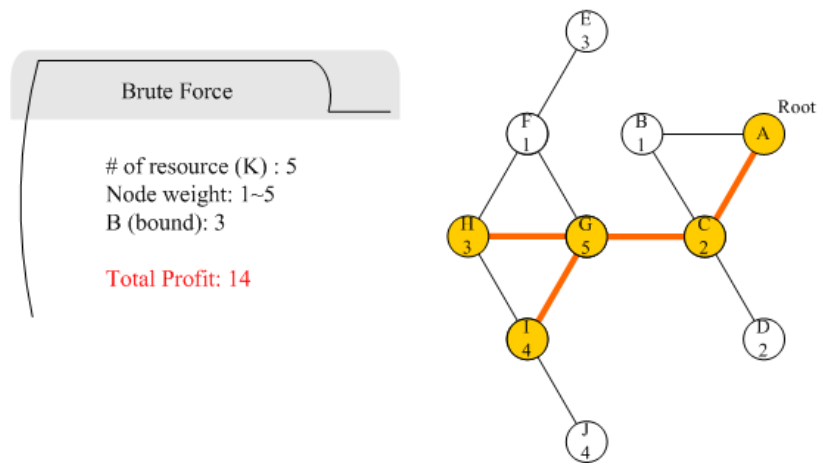


圖 36 暴力法求解

#### 4.8.2 Hop Concern Tree Building (HCTB) Algorithm

Hop concern tree building algorithm 是 HC K-MaxST 問題的求解啟發式演算法，其虛擬碼如下：

$HCTB(G, p, r, K,)$

Set  $T = \{\}$  /\* hop-concern tree \*/

Set  $U = \{r\}$  /\*  $r$  is the root of  $T$ , belong to  $G$ \*/

while elements in  $U$  has at least one adjacent node

while size of  $T < K$  do

let  $v$  be a highest (profit/hop) adjacent node of  $u$  such that  $v \in V(G) - U, u \in U$

/\* hop = the # of relay hops from root to  $v$ \*/

add link( $u, v$ ) to  $T$

delete  $v$  from  $V - U$

end while

end while

HCTBA

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

Total Node Profit: 12  
Total Count Profit: 6+5/6  
Tree Depth: 3

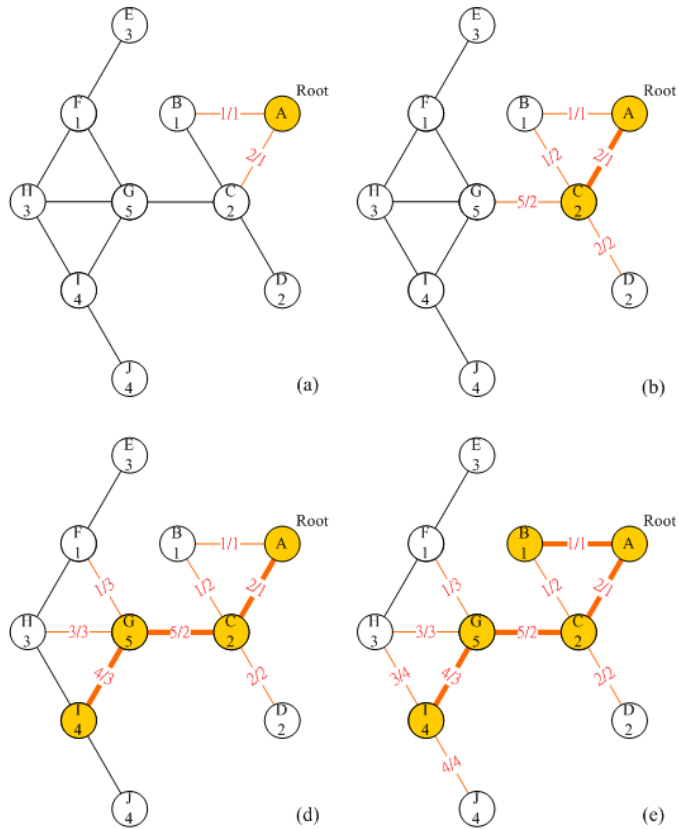


圖 37 HCTB 演算法步驟

我們以同樣的例子說明 HCTB 演算法，如圖 37 所示，(a)總資源數 $\mathcal{K} = 5$ ，所有節點權重值介於 1 至 5 之間，而節點 A 為本圖的樹根，演算法從此處開始，搜尋與 A 相鄰節點並比較其連接邊權重與跳點數比值(以下簡稱 P/H 值)，C 與 B 點之跳點數為 1，經計算 $e_{A,C}$ 的 P/H 值為 $2/1$ 大於  $e_{A,B} = 1/1$ ；(b)選擇 C 點建立子樹，計算子樹與其所有相鄰點的鄰邊並比較其 P/H 值， $e_{C,G} = 5/2$ 為其中最大者；(c)選擇 G 點建立子樹，計算子樹與其所有相鄰點的鄰邊並比較其 P/H 值， $e_{G,I} = 4/3$ 為其中最大者；(d)選擇 I 點建立子樹，計算子樹與其所有相鄰點的鄰邊並比較其 P/H 值， $e_{A,B} = 1/1$ 為其中最大者，資源用罄，演算法結束，總效益為 12。

與利用暴力法求得之最佳解，圖 36，相比，得到不同的 CCN FT，且 HCTB 的

總效益少 14.3%，但其深度為 3 的節點只有一個(I 點)，而暴力法求得之 CCN FT 則有兩個深度為 3 的節點(H 點及 I 點)。

## 第五章 效能評估

### 5.1 實驗目的

以電腦實驗模擬真實環境的方式，進行演算法效能的評估。我們利用電腦模擬評估 Depth Bounded Tree Building 演算法及 Hop Concern Tree Building 演算法的效能，並與暴力法求得之最佳解比較，數值的比較包括每個案例圖(Test Case)所建立 CCN FT 之總效益(Total Profit)、每個案例所花費的運算時間(Computing Time)以及每個案例所生成的 CCN FT 的樹深度(Tree Depth)。

### 5.2 實驗環境

本實驗的實驗環境為一運算電腦，其規格如下：

- 處理器：AMD Athlon 64 X2 Dual, Core Processor 5000+, 2.61 GHz.
- 記憶體：3.00GB RAM
- 作業系統：Windows server
- 開發環境：Visual Studio .NET 2010
- Framework：.Net Framework 4

### 5.3 實驗一：小規模實驗

我們利用隨機的方式，分別產生 10 個不同的案例圖，並進行 Depth Bounded Tree Building 演算法、Hop Concern Tree Building 演算法與暴力法運算，以求取 CCN FT。

### 5.3.1 評估指標

實驗結果以以下之評估指標進行評估，包括：

- 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。
- Computing Time: 演算法運算所需之時間。
- Tree Depth of CCN FT: 演算法產生之 CCN FT 所具有的樹深度值。

### 5.3.2 實驗參數設定

各子實驗分別以隨機方式產生 10 個實驗案例圖為實驗對象，並以恢復該案例區域 50% 基地台為目標建立 CCN FT，換言之，各子實驗的 K 值為圖大小的  $1/2$ 。另外，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，其他參數如表 3 之說明：

表 3 實驗一：實驗參數設定

子實驗名稱	Graph		K (CCN FT size)	B (depth bound)
	size	edges		
1(a)	10	13-19	5	3
1(b)	20	43-30	10	4
1(c)	30	49-69	15	5

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 Depth Bounded Tree Building 演算法、Hop Concern Tree Building 演算法兩者比較。



### 5.3.3 實驗結果

- 實驗 1(a)：10 nodes graph, K=5, B=3

從圖 38、圖 40 及圖 39 可以觀察出，DBTB 在絕大多數案例皆可獲得與暴力法相當的總效益，而 HCTB 在半數的例子中，獲得的總效益小於兩者。雖然暴力法可以保證取得最佳效益解，但此實驗中，DBTB 及 HCTB 兩演算法在所有案例的運算時間皆為 0 ms，相較之下，暴力法求解的演算時間相當大(0~246 ms，隨案例而異)，當案例的節點數多時，即無法在有效時間內取得其解。而在樹深度比較上 HCTB 求得之 CCN FT 擁有最小的樹深，也代表該樹的延遲及負載失衡問題最小。

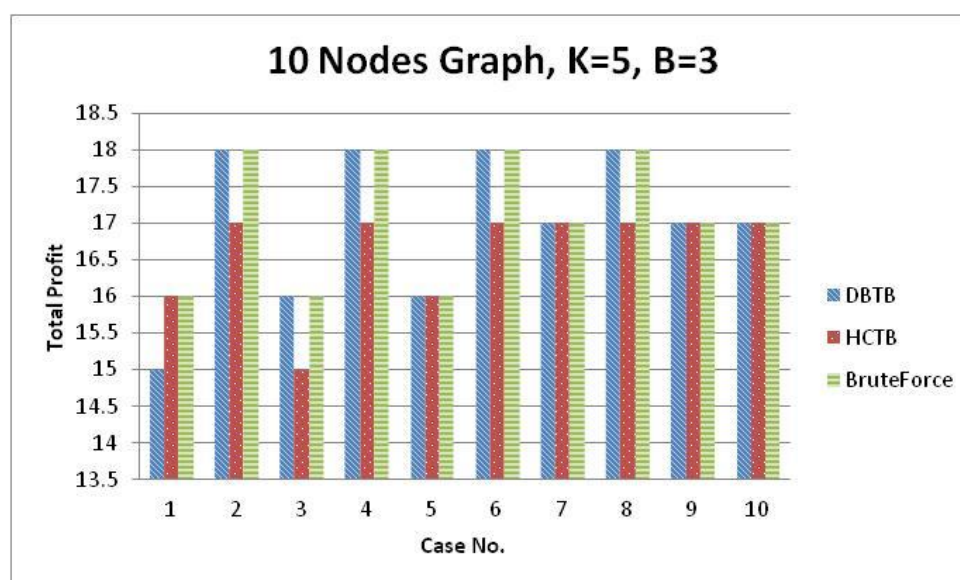


圖 38 實驗 1(a)：總效益比較

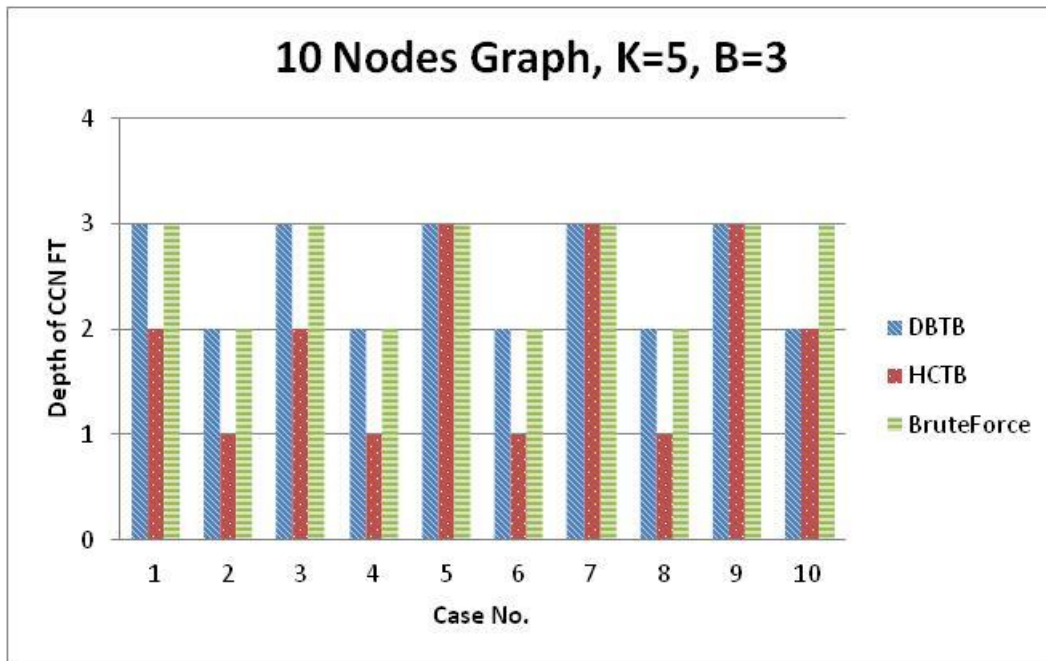


圖 39 實驗 1(a)：CCN FT 深度比較

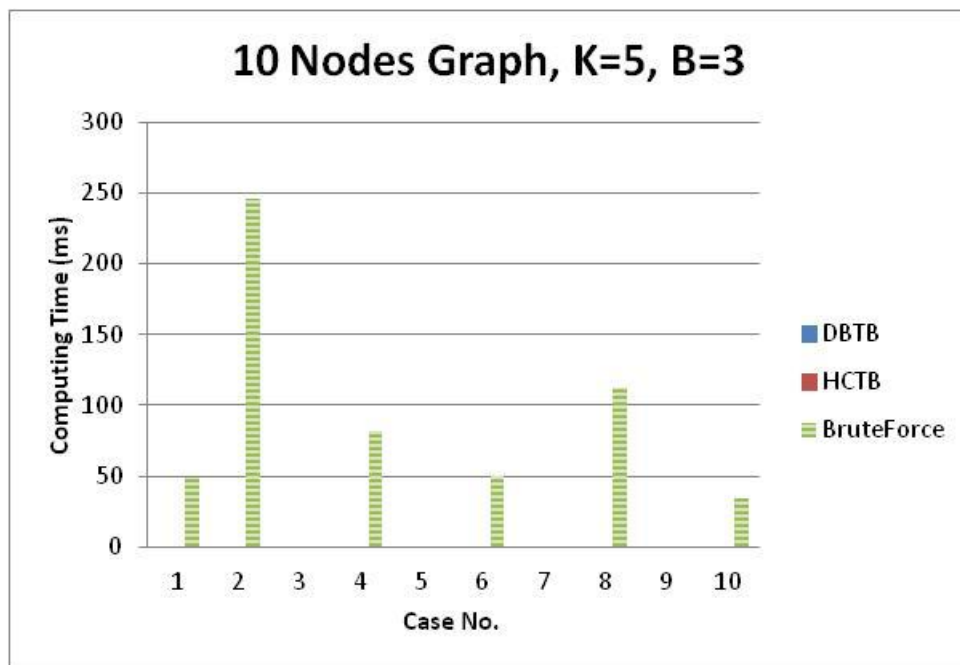


圖 40 實驗 1(a)：運算時間比較

- 實驗 1(b)：20 nodes graph, K=10, B=4

從圖 41 可觀察出當樹深限制較寬鬆時，HCTB 在十個案例的樹深皆大於等

於 B 值，而在樹深較大的幾個案例中，HCTB 的總效益亦大於 DBTB 之總效益。

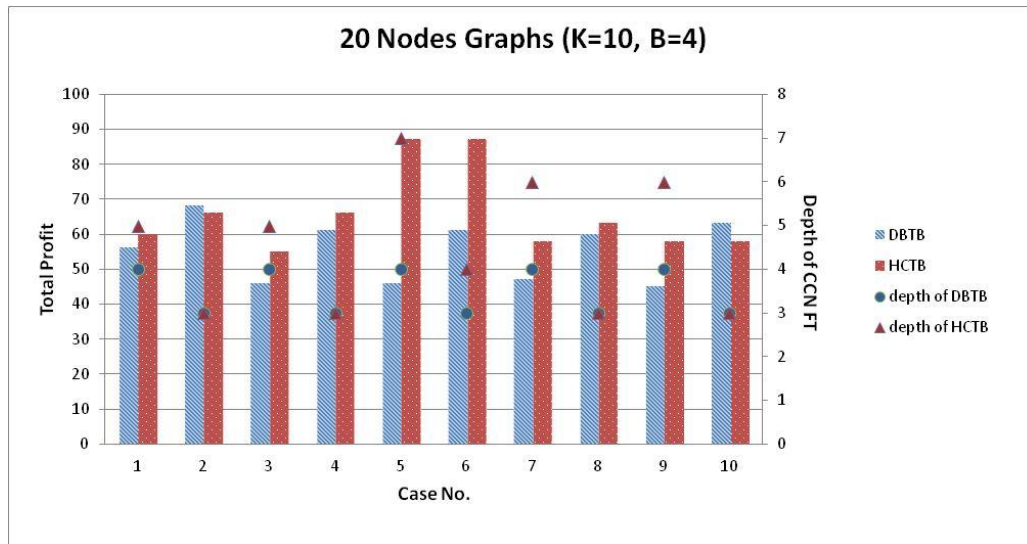


圖 41 實驗 1(b)：總效益與樹深比較

- 實驗 1(c)：30 nodes graph, K=15, B=5

從圖 42 發現，兩演算法求得之總效益相當，但在半數案例中，HCTB 所生成之樹深較小。

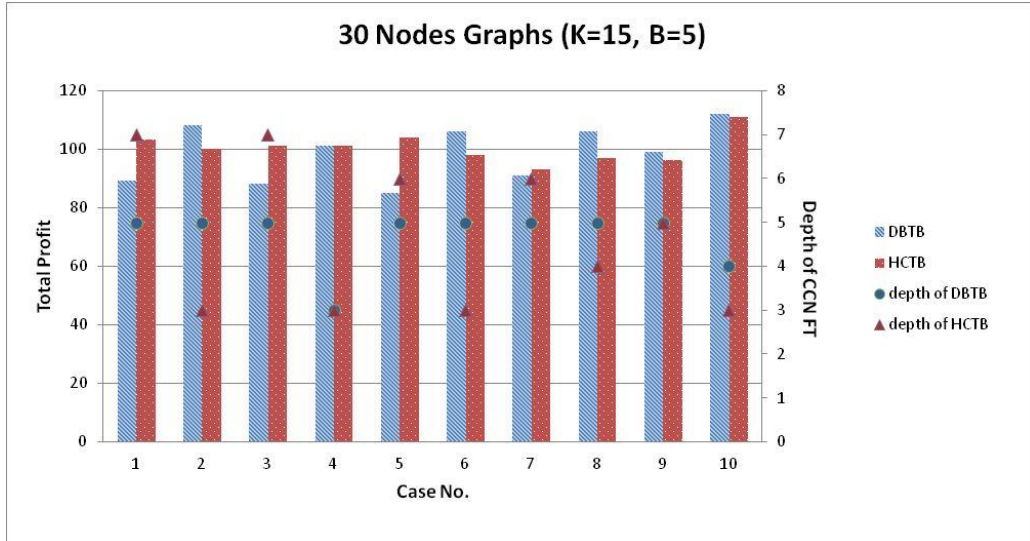


圖 42 實驗 1(c)：總效益與樹深比較

#### 5.4 實驗二：大規模實驗

我們利用隨機的方式，分別為各子實驗產生 100 個不同的大型案例圖，並分別進行 Bounded Depth Tree Building 演算法、Hop Concern Tree Building 演算法運算，以求取 CCN FT。由於 Bounded Depth Tree Building Algorithm、Hop Concern Tree Building Algorithm 啟發式算法，運算時間極短，故在此運算時間不列入評估。

##### 5.4.1 評估指標

由於每個案例皆為獨立結果不相關，故實驗結果以以下之評估指標進行評估，包括：

- Depth gape：HCTB 與 BDTB 的樹深差

$$\text{Depth gape} = \text{depth of HCTB} - \text{depth of DBTB}$$

- Profit gape：HCTB 與 DBTB 的效益差百分比

$$\text{profit gape} = \frac{\text{profit(HCTB)} - \text{profit(DBTB)}}{\text{profit(DBTB)}}$$

#### 5.4.2 實驗參數設定

各子實驗分別以隨機方式產生 100 個大型實驗案例圖為實驗對象，並以恢復該案例圖區域 50% 基地台為目標建立 CCN FT，換言之，各子實驗的 K 值為該圖大小的  $\frac{1}{2}$ 。另外，效益參數同樣為介於 1 至 10 之隨機常數，1 為最低效益，10 為最高效益，其他參數以表 4 說明如下：

表 4 實驗二：參數設定

子實驗名稱	Graph		K (CCN FT size)	B (depth bound)
	size	edges		
2(a)	50	73-122	25	6
2(b)	100	157-261	50	10
2(c)	200	283-540	100	13

#### 5.4.3 實驗結果

- **實驗 2(a)**：50 nodes graphs, K=25, B=6

實驗結果如表 5 及表 6 所示。在此 100 個隨機案例中，HCTB 與 DBTB 的 Depth gape 最大值為 5，即該案例中 HCTB 產生之樹深比 DBTB 大 5，而在 HCTB 樹深小於 DBTB 的案例中，HCTB 產生之樹深比 DBTB 小 2；而 Depth gape 的總平均值為 0.6，即在這些隨機案例中，HCTB 產生之樹深比 DBTB 平均多 0.6。而以平均總效益觀察之，HCTB 產生之 CCN FT 的平均樹深雖比 DBTD 多 0.6，但其 Total Profit 亦比 DBTB 平均多 5.66%。

表 5 實驗 2(a)：實驗結果

實驗 2(a)：50 nodes graphs, K=25, B=6													
Case No.	DBTB		HCTB		Depth gape	Profit gape	Case No.	DBTB		HCTB		Depth gape	Profit gape
	D	P	D	P				D	P	D	P		
1	6	143	6	140	0	-2.10	51	6	143	9	171	3	19.58
2	6	161	4	151	-2	-6.21	52	6	159	7	175	1	10.06
3	6	158	4	148	-2	-6.33	53	6	178	6	173	0	-2.81
4	6	161	5	159	-1	-1.24	54	6	149	8	168	2	12.75
5	6	141	7	149	1	5.67	55	6	153	7	156	1	1.96
6	6	139	7	144	1	3.60	56	6	155	6	174	0	12.26
7	6	138	5	136	-1	-1.45	57	6	162	9	180	3	11.11
8	6	159	4	140	-2	-11.95	58	6	172	5	176	-1	2.33
9	6	127	6	147	0	15.75	59	6	165	7	175	1	6.06
10	6	160	5	152	-1	-5.00	60	6	162	7	166	1	2.47
11	6	161	5	147	-1	-8.70	61	6	171	6	164	0	-4.09
12	6	125	7	141	1	12.80	62	6	170	6	167	0	-1.76
13	6	136	6	148	0	8.82	63	6	151	7	160	1	5.96
14	6	160	6	149	0	-6.88	64	6	134	7	137	1	2.24
15	6	149	5	141	-1	-5.37	65	6	172	4	169	-2	-1.74
16	6	108	6	137	0	26.85	66	6	158	6	169	0	6.96
17	5	156	4	155	-1	-0.64	67	6	173	6	169	0	-2.31
18	6	160	4	158	-2	-1.25	68	6	168	7	173	1	2.98
19	6	152	5	142	-1	-6.58	69	6	157	8	171	2	8.92
20	6	155	7	153	1	-1.29	70	6	144	8	158	2	9.72
21	6	132	7	144	1	9.09	71	6	115	9	140	3	21.74
22	6	139	6	149	0	7.19	72	6	170	7	171	1	0.59
23	6	130	4	122	-2	-6.15	73	6	168	7	173	1	2.98
24	6	141	5	128	-1	-9.22	74	6	146	9	176	3	20.55
25	6	144	6	136	0	-5.56	75	6	175	6	177	0	1.14
26	5	153	5	147	0	-3.92	76	6	169	6	170	0	0.59
27	6	125	7	123	1	-1.60	77	6	164	7	177	1	7.93
28	6	114	8	121	2	6.14	78	6	132	7	140	1	6.06
29	6	131	4	118	-2	-9.92	79	6	173	6	172	0	-0.58
30	6	140	4	119	-2	-15.00	80	6	170	6	164	0	-3.53
31	6	143	7	150	1	4.90	81	6	128	9	148	3	15.63
32	6	115	8	138	2	20.00	82	6	103	8	128	2	24.27
33	6	143	8	147	2	2.80	83	5	141	5	143	0	1.42
34	6	136	6	126	0	-7.35	84	6	137	8	159	2	16.06
35	6	140	5	126	-1	-10.00	85	6	127	7	144	1	13.39
36	6	146	6	148	0	1.37	86	6	147	6	151	0	2.72
37	6	136	8	140	2	2.94	87	6	121	10	144	4	19.01
38	6	138	4	146	-2	5.80	88	6	145	5	148	-1	2.07
39	6	123	7	123	1	0.00	89	6	125	8	142	2	13.60
40	6	140	6	147	0	5.00	90	6	158	6	162	0	2.53
41	6	156	7	161	1	3.21	91	6	131	8	155	2	18.32
42	6	180	6	183	0	1.67	92	6	126	9	150	3	19.05
43	6	171	6	177	0	3.51	93	6	100	8	140	2	40.00
44	6	131	6	150	3	14.50	94	6	130	7	147	1	13.08
45	6	145	6	151	6	4.14	95	6	124	7	139	1	12.10
46	6	144	9	172	3	19.44	96	6	139	7	148	1	6.47
47	6	153	8	166	2	8.50	97	6	109	9	131	3	20.18
48	6	162	6	161	0	-0.62	98	6	115	8	151	2	31.30
49	6	145	9	174	3	20.00	99	6	94	11	127	5	35.11
50	6	135	8	161	2	19.26	100	6	147	5	148	-1	0.68

D: depth  
P: profit

表 6 實驗 2(a)：總效能與樹深比較

	Tree depth			Depth gape			Profit gape (%)		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
HCTB	4	11	6.57	-2	5	0.6	-15.00	40.00	5.66
DBTB	5	6	5.97						

● 實驗 2(b)：100 nodes graph, K=50, B=10

結果如表 7 及表 8 所示。在此 100 個隨機案例中，HCTB 與 DBTB 的 Depth gape 最大為 9，而在 HCTB 樹深小於 DBTB 的案例中，HCTB 產生之樹深比 DBTB 小 4；而 Depth gape 的總平均值為 1.11，即在這些隨機案例中，HCTB 產生之樹深比 DBTB 平均多 1.11。而以平均總效益觀察之，HCTB 產生之 CCN FT 的平均樹深雖比 DBTD 多 1.11，但其 Total Profit 亦比 DBTB 平均多 4.44%。

表 7 實驗 2(b)：實驗結果

實驗 2(b)：100 nodes graph, K=50, B=10													
Case No.	DBTB		HCTB		Depth gape	Profit gape	Case No.	DBTB		HCTB		Depth gape	Profit gape
	D	P	D	P				D	P	D	P		
1	10	290	11	280	1	-3.45	51	10	295	19	310	9	5.08
2	10	305	9	298	-1	-2.30	52	10	322	11	329	1	2.17
3	10	309	6	297	-4	-3.88	53	10	282	15	314	5	11.35
4	10	287	10	298	0	3.83	54	10	306	14	332	4	8.50
5	10	265	11	296	1	11.70	55	10	292	9	309	-1	5.82
6	10	300	9	292	-1	-2.67	56	10	288	10	288	0	0.00
7	10	312	10	307	0	-1.60	57	10	306	10	288	0	-5.88
8	10	276	12	292	2	5.80	58	10	263	9	321	-1	22.05
9	10	296	10	291	0	-1.69	59	10	294	12	310	2	5.44
10	10	285	9	293	-1	2.81	60	10	299	11	310	1	3.68
11	10	301	9	290	-1	-3.65	61	10	288	14	320	4	11.11
12	10	260	13	287	3	10.38	62	10	305	9	294	-1	-3.61
13	10	297	9	288	-1	-3.03	63	10	286	10	286	0	0.00
14	10	233	12	293	2	25.75	64	10	310	11	331	1	6.77
15	10	294	14	314	4	6.80	65	10	284	14	328	4	15.49
16	10	313	7	282	-3	-9.90	66	10	265	10	282	0	6.42
17	10	287	10	294	0	2.44	67	10	281	13	317	3	12.81
18	10	295	10	289	0	-2.03	68	10	286	11	311	1	8.74
19	10	275	9	275	-1	0.00	69	10	307	9	293	-1	-4.56
20	10	312	9	302	-1	-3.21	70	10	254	15	288	5	13.39
21	10	350	10	331	0	-5.43	71	10	272	15	327	5	20.22
22	10	367	9	335	-1	-8.72	72	10	308	16	307	6	-0.32
23	10	358	9	348	-1	-2.79	73	10	260	15	319	5	22.69



24	10	342	11	345	1	0.88	74	10	327	9	304	-1	-7.03
25	10	347	10	340	0	-2.02	75	10	309	11	306	1	-0.97
26	10	347	10	340	0	-2.02	76	10	330	10	341	0	3.33
27	10	378	7	344	-3	-8.99	77	10	285	14	315	4	10.53
28	10	338	13	351	3	3.85	78	10	273	11	295	1	8.06
29	10	351	9	348	-1	-0.85	79	10	272	9	296	-1	8.82
30	10	316	10	345	0	9.18	80	10	298	10	328	0	10.07
31	10	351	10	348	0	-0.85	81	10	262	10	292	0	11.45
32	10	328	13	351	3	7.01	82	10	266	10	281	0	5.64
33	10	303	13	361	3	19.14	83	10	276	14	288	4	4.35
34	10	366	9	355	-1	-3.01	84	10	273	11	284	1	4.03
35	10	382	6	348	-4	-8.90	85	10	215	13	276	3	28.37
36	10	376	7	349	-3	-7.18	86	10	252	12	261	2	3.57
37	10	297	10	343	0	15.49	87	10	259	10	254	0	-1.93
38	10	346	7	349	-3	0.87	88	10	258	10	278	0	7.75
39	10	369	8	349	-2	-5.42	89	10	269	11	279	1	3.72
40	10	323	14	354	4	9.60	90	10	265	11	263	1	-0.75
41	10	302	12	325	2	7.62	91	10	212	19	291	9	37.26
42	10	308	13	344	3	11.69	92	10	285	13	286	3	0.35
43	10	243	18	328	8	34.98	93	10	265	11	283	1	6.79
44	10	320	14	332	4	3.75	94	10	263	12	259	2	-1.52
45	9	292	9	289	0	-1.03	95	10	270	10	254	0	-5.93
46	10	297	14	328	4	10.44	96	10	250	9	266	-1	6.40
47	10	303	13	319	3	5.28	97	10	275	12	280	2	1.82
48	10	299	10	323	0	8.03	98	10	277	14	283	4	2.17
49	10	309	10	287	0	-7.12	99	10	253	10	282	0	11.46
50	10	275	13	285	3	3.64	100	10	252	12	251	2	-0.40

D: depth  
P: profit

表 8 實驗 2(b)：總效能與樹深比較

	Tree depth			Depth gape			Profit gape (%)		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
HCTB	6	19	11.1	-4	9	1.11	-9.90	37.26	4.44
DBTB	9	10	9.99						

● 實驗 2(c)：200 nodes graph, K=100, B=13

結果如表 9 及如表 10 所示。在此 100 個隨機案例中，HCTB 與 DBTB 的 Depth gape 最大為 10，而在 HCTB 樹深小於 DBTB 的案例中，HCTB 產生之樹深比 DBTB 小 3；而 Depth gape 的總平均值為 2.9，即在這些隨機案例中，HCTB 產生之樹深比 DBTB 平均多 2.9。而以平均總效益觀察之，HCTB 產生之 CCN FT 的平均樹深雖比 DBTD 多 2.9，但其 Total Profit 亦比 DBTB 平均多 5.82%。



表 9 實驗 2(c)：實驗結果

實驗 2(c) : 200 nodes graphs, K=100, B=13													
Case No.	DBTB		HCTB		Depth gape	Profit gape	Case No.	DBTB		HCTB		Depth gape	Profit gape
	D	P	D	P				D	P	D	P		
1	13	682	15	726	2	6.45	51	13	647	17	706	4	9.12
2	13	747	12	714	-1	-4.42	52	13	625	18	686	5	9.76
3	13	720	15	715	2	-0.69	53	13	693	18	679	5	-2.02
4	13	703	13	708	0	0.71	54	13	650	18	679	5	4.46
5	13	590	16	726	3	23.05	55	13	609	21	667	8	9.52
6	13	678	17	690	4	1.77	56	13	487	18	658	5	35.11
7	13	725	12	733	-1	1.10	57	13	692	13	712	0	2.89
8	13	764	10	714	-3	-6.54	58	13	666	17	689	4	3.45
9	13	760	10	717	-3	-5.66	59	13	604	20	692	7	14.57
10	13	627	15	730	2	16.43	60	13	685	13	673	0	-1.75
11	13	622	15	711	2	14.31	61	13	449	23	649	10	44.54
12	13	663	15	697	2	5.13	62	13	603	18	652	5	8.13
13	13	772	10	723	-3	-6.35	63	13	662	12	713	-1	7.70
14	13	666	14	699	1	4.95	64	13	658	16	660	3	0.30
15	13	638	18	719	5	12.70	65	13	664	14	670	1	0.90
16	13	589	19	694	6	17.83	66	13	663	17	687	4	3.62
17	13	769	10	753	-3	-2.08	67	13	657	15	673	2	2.44
18	13	727	14	721	1	-0.83	68	13	521	20	621	7	19.19
19	13	732	13	694	0	-5.19	69	13	660	16	651	3	-1.36
20	13	699	16	699	3	0.00	70	13	643	17	676	4	5.13
21	13	633	19	717	6	13.27	71	13	631	20	658	7	4.28
22	13	662	14	679	1	2.57	72	13	646	23	666	10	3.10
23	13	714	14	725	1	1.54	73	13	710	11	695	-2	-2.11
24	13	711	15	743	2	4.50	74	13	605	19	674	6	11.40
25	13	664	18	713	5	7.38	75	13	602	23	667	10	10.80
26	13	671	19	728	6	8.49	76	13	629	14	607	1	-3.50
27	13	709	12	662	-1	-6.63	77	13	657	18	682	5	3.81
28	13	692	15	667	2	-3.61	78	13	657	12	709	-1	7.91
29	13	511	21	706	8	38.16	79	13	621	12	659	-1	6.12
30	13	651	16	683	3	4.92	80	13	613	16	635	3	3.59
31	13	715	14	704	1	-1.54	81	13	725	13	709	0	-2.21
32	13	705	14	720	1	2.13	82	13	549	23	634	10	15.48
33	13	713	11	689	-2	-3.37	83	13	639	13	638	0	-0.16
34	13	705	16	714	3	1.28	84	13	605	13	608	0	0.50
35	13	676	14	676	1	0.00	85	13	585	18	633	5	8.21
36	13	711	19	734	6	3.23	86	13	521	18	591	5	13.44
37	13	749	13	704	0	-6.01	87	13	594	17	610	4	2.69
38	13	470	16	678	3	44.26	88	13	621	15	611	2	-1.61
39	13	602	20	722	7	19.93	89	13	539	17	625	4	15.96
40	13	589	18	705	5	19.69	90	13	611	19	609	6	-0.33
41	13	614	15	665	2	8.31	91	13	630	14	611	1	-3.02
42	13	681	15	705	2	3.52	92	13	721	13	700	0	-2.91
43	13	669	16	684	3	2.24	93	13	605	20	634	7	4.79
44	13	688	14	670	1	-2.62	94	13	623	13	606	0	-2.73
45	13	693	13	663	0	-4.33	95	13	604	16	612	3	1.32
46	13	626	18	668	5	6.71	96	13	563	15	601	2	6.75
47	13	638	20	671	7	5.17	97	13	558	18	625	5	12.01
48	13	561	22	690	9	22.99	98	13	693	13	710	0	2.45
49	13	565	18	647	5	14.51	99	13	559	18	613	5	9.66
50	13	673	14	703	1	4.46	100	13	642	13	621	0	-3.27

D: depth  
P: profit

表 10 實驗 2(c)：總效能與樹深比較

	Tree depth			DSepth gape			Profit gape (%)		
	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.	Min	Max	Avg.
HCTB	10	23	15.9	-3	10	2.9	-6.63	44.54	5.82
DBTB	13	13	13						

### 5.5 實驗結論

從以上實驗，我們可以發現啟發式演算法 HCTB 及 DBTB 在運算時間上，明顯優於暴力法。在樹深限制對於總效益影響評估上，由於 HCTB 並未限制樹深，故 HCTB 取得的樹深度通常較深，但同時其總效益也高於 DBTB。

換言之，若 CCN 網路能容忍較多的 hop relay 次數，則採用 K-MaxSTHC 模型並搭配 HCTB 演算法，可獲得較高的總效益；但若 forwarding tree 的深度須受到嚴格控制，則採用 K-MaxSTDB 模型並搭配 DBTB 演算法，可獲得較高的總效益。

系統使用者亦可在建立案例圖時，同時使用兩演算法進行運算，再針對系統需求與演算結果，取得最佳的拓撲分佈。

## 第六章 結論與未來工作

大型天然災害頻繁發生，常導致性命財產的損失，而在救災工作上擔任協調調度工作的通訊系統常因災害而中斷，影響救援。我們提出一利用無線鏈路連接功能正常但對外通訊中斷的基地台的方法，並依此建立一個臨時性行動通訊網路，稱之為應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network, CCN)。由於修復通訊連接的 ERP 設備不足以應付大型災害中所有的受災基地台，故我們必須依據 ERP 設備的數量，選擇數個符合救災效益的基地台進行通訊的恢復，建立網路，此即為網路拓撲設計問題，設計中亦必須考慮通訊延遲、網路負載等問題，以令 CCN 網路正常運作。

本研究提出一種樹狀的 CCN 網路，利用多重跳接的方式連接通訊結點、傳遞訊息，稱之為 CCN Forwarding Tree，文中並提出兩種最佳化模型(限深模型與折減模型)，以期得到最佳的救災效益。其中，我們證明限深模型為一 NP-hard 問題，並為兩個模型分別設計啟發式演算法。

我們以電腦模擬的方式，評估折減模型與限深兩演算法與暴力法的效能，折減模型雖會得到較大的總效益值，但同時，其較大的樹深度也必須考量；而限深模型因樹深受限，故其可以維持一定的樹深，但其總效益在多數情況下相對小於折減模型。

在建立 CCN 網路上，我們仍有許多議題需要克服與解決。在拓撲設計完成後，必須依各方考量，為 CCN 網路設計節點建置排程、分配網路頻寬、制定允入控制政策、建立 Intranet 以及設計基地台與 ERP 設備的介接介面，以期 CCN 網路系統能在災害中，發揮其最大的功效。

## 参考文献

- [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] 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.
- [4] Chandra Chekuri, Sudipto Guha, “The Steiner k-Cut Problem,” *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, vol. 20, issue 1, 2006.
- [5] Chandra Chekuri, Sudipto Guha and Joseph Seffi Naor, “Approximating Steiner k-Cuts,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2719, 2003.
- [6] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest and Clifford Stein. *Introduction to Algorithms*, Third Edition. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2009.
- [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] 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.
- [9] 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.
- [10] Anupam Gupta, Viswanath Nagarajan, R. Ravi, “An improved approximation algorithm for requirement cut,” *Operations Research Letters*, vol. 38, issue 4, July 2010, pp. 322–325.
- [11] Harri Holma and Antti Toskala, *WCDMA for UMTS : radio access for third generation mobile communications*, Third Edition. Chichester, England: Wiley, 2004.
- [12] ITR-RESCUE, “Robust Networking and In-formation Collection Project,” <http://www.itr-rescue.org/research/networking.php>, retrieved Feb. 2010.
- [13] Richard E. Krock, “Lack of Emergency Recovery Planning Is a Disaster Waiting to Happen,” *IEEE Communications Magazine*, Jan. 2011.

- [14] Yao-Nan Lien, Li-Cheng Chi and Yuh-Sheng Shaw, “A Walkie-Talkie-Like Emergency Communication System for Catastrophic Natural Disasters”, *Proc. of ISPAN09*, Dec., 2009.
- [15] Yao-Nan Lien, Hung-Chin Jang, and Tzu-Chieh Tsai, “A MANET Based Emergency Communication and Information System for Catastrophic Natural Disasters,” *Proc. of IEEE Workshop on Specialized Ad Hoc Networks and Systems*, Montreal, Canada, June 26, 2009.
- [16] Overview of The Universal Mobile Telecommunication System, <http://www.umtsworld.com/technology/overview.htm>, retrieved Aug. 2011.
- [17] 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.
- [18] Huzur Saran and Vijay V. Vazirani, “Finding  $k$  Cuts within Twice the Optimal,” *SIAM Journal on Computing*, vol. 24, issue 1, 1995, pp. 101-108.
- [19] Stephan Seufert, Srikanta Bedathur, Julian Mestre, Gerhard Weikum, “Bonsai: Growing Interesting Small Trees,” *2010 IEEE International Conference on Data Mining*, 2010, pp.1013-1018.
- [20] Steven S. Skiena. *The algorithm design manual*. London: Springer-Verlag London, 2008.
- [21] 日本地震氣象廳, <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/11c/201103111620.html>, retrieved Aug. 2011.
- [22] 日本警察廳, <http://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo.pdf>, retrieved Aug. 2011.
- [23] 孫玉, “應急通信技術總體框架討論,” 人民郵電出版社, ISBN : 7115208328, 2009.
- [24] 連耀南, 黃智賢, “大型自然災害下規模救災緊急通訊系統方案,” *National Symposium on Telecommunications(NST) 2010*, Dec. 3-4, 2010.
- [25] 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.