

應急蜂巢式行動通訊網路

Contingency Cellular Network

連耀南 Yao-Nan Lien
國立政治大學 資訊科學系

黃智賢 Jyh-Shyan Huang
國立政治大學 資訊科學系

黃冠傑 Guan-Jie Huang
國立政治大學 資訊科學系

黃郁翔 Yu-Hsiang Huang
國立政治大學 資訊科學系

摘要

大型災害發生時，天拆地裂，必須動員一切力量投入災區、救死扶傷、搶救受困民眾、搶修維生系統。救災效率之高下，決定了許多人的生死。但災區通訊網路基礎設施常因災害而嚴重受損，無法正常運作。在缺乏通訊系統的支援下，大大提高救援的困難度。本研究分析歸納應急通訊系統的七大技術需求，並提出一個低成本可快建構的應急通訊網路，應急蜂巢式行動通訊網路(Contingency Cellular Network)。應急蜂巢式行動通訊網路利用無線電將災區倖存但服務中斷的行動電話基地台彼此互連快速建置而成，具有低成本、建置速度快、使用門檻低等多項特點，災區內擁有行動電話的使用者，可利用本網路作為救災通訊之用。

關鍵詞：救災防災，應急通訊，緊急通訊，行動通訊

一、前言

1. 影響救災效率之因素

大型災害來臨時，天拆地裂，災區一片兵荒馬亂，其場景吋筆難以盡述。救災行動刻不容緩，分秒必爭，救災效率之高下，決定了許多人的生死。我們綜合 921 集集地震 [10]、莫拉克颱風/88 水災、汶川地震 [6] 及海地地震的經驗，歸納出大型天災中影響救災效率的幾個重大因素 [13]：

- **災區交通癱瘓：**災區內部及聯外道路常因災受損，倖存者亦被大量志願救災車輛塞爆，造成災區交通全面癱瘓，空中交通亦可能受天候或其他因素之影響而中斷，(海地地震中太子港機場雖然未受損，但因地面交通癱瘓，無法提供返航油料而關閉數天之久)。
- **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。
- **專業救災人員嚴重不足：**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。
- **行政指揮系統失靈：**各級行政指揮系統可能受損，導致既有通聯組織癱瘓。例如 88 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，完全外界失聯達數天之久；海地地震中，中央高官全部都失聯，僅餘總統一人獨撐大局。

2. 行動通訊系統癱瘓之原因

通訊系統對救災行動極其重要，但在大型災害來臨的時候，這些平常看似穩定可靠的公眾通訊網路，卻幾乎全面癱瘓。在莫拉克颱風/88水災及921集集大地震中我們赫然發現，原以為比固網電話更能應付緊急情況的行動電話竟然不堪一擊。電信機房通常非常堅固，不易受天災影響，但基地台之服務卻常在天災中中斷服務，常見原因為：(1) 基地台遭強震或洪水摧毀；(2) 電力供應中斷（備用電源僅能支持一至二小時，而88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）；(3) 基地台連接後端固定網路線路（backhaul）損毀。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。

基地台後端必須有固網連線(backhaul)連到控制器或交換機，從圖1行動通訊系統的基本架構可以清楚看出，即使基地台本身完好無缺，但只要後端連線中斷，即無法維持正常運轉。以莫拉克風災/88水災為例，許多基地台因建在高處免於洪水淹沒，結構完整。但因隨著道路及橋樑鋪設的通訊線路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backhaul線路成為行動通訊網路的弱點(單門)。除此之外，在我們發表的文獻中，還有許多其他因素導致通訊系統癱瘓，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，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，無法保證通訊系統之可用度(Availability)。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，但因建置成本高昂之故，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[3,5]。

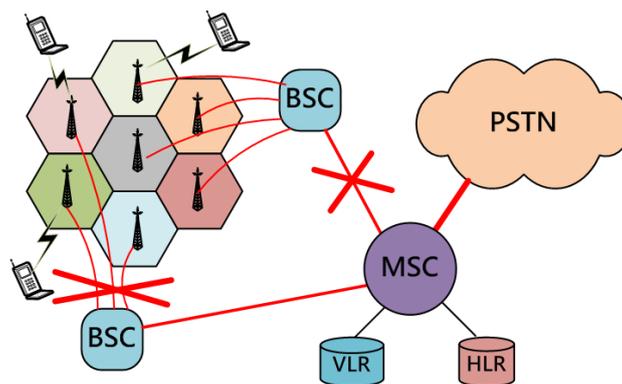


圖 1 行動通訊網路基本架構及脆弱點

3. 通訊設備修復困難

以921地震為例，中華電信耗費15天，才搶通災區電信網路。在88水災中，斷訊基地台總數達3300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，大量的行動電話網路將陷於癱瘓，無法及時修復。

二、應急通訊系統之需求分析

由於時間與資源之限制，災區應急通訊網的建置面對了許多挑戰與特殊需求。在嚴格的時間限制和極端的環境條件之下，應急通訊系統的建置與一般的通訊系統完全不同。我們根據親身經歷和觀察，將需求歸納成七個面向如表1所示。普及性和可用性是

終端使用者需求。而實際可行性、負載能力、持續性、可調性和維運性則是用來滿足網路管理者的需求。

表 1、應急通訊網建置需求

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

1. 終端使用者需求

- **普及性 (Popularity)**：由於缺少終端設備，許多常見的應急通訊系統，例如衛星通訊系統，群集無線電系統和業餘無線電系統只能用在特殊的小群組。大多數的受災者和志願救災團隊通常無法利用這些通訊系統進行通話。使用者在使用群集無線電系統和業餘無線電系統時，需要經過特殊訓練才能使用，群集無線電系統和業餘無線電系統的普遍性是有限的。易於使用的終端設備的普及性成為一個應急通訊系統的重要需求。其要件有二(a)易於使用(b)可方便及低價的普及於災區使用者。
- **可用性 (Usability)**：由於在災區的極端條件之下，應急通訊系統必須妥善處理所有使用者的各種通訊需求，為了滿足可用性，應急通訊系統應該提供任務導向的通訊服務，並且可以支援移動性和擁有良好的通訊品質。此外，終端設備的待機時間最好能長於一天，避免頻繁的充電。

2. 網路管理者需求

- **實際可行性 (Practicability)**：實際可行性是應急通訊系統中的最基本也最首要的需求。首先要考慮的是建置與操作應急通訊網路的可行性。需要符合以下三大特點：低開發及建置成本，建構速度快，設備容易取得（重型設備可能因道路中斷或地形阻隔而無法運入災區）。
- **負載能力 (Capacity)**：災區內的通訊需求量與實際承載能力可能存有極大差異，必須有適當的允入控制機制。以汶川地震為例，災區內部通話量為平時的 10 倍；外界至災區為平時的 5 至 6 倍；北京至災區則為平時的 80 倍。應急通訊網路能負荷的通話量遠較正常時期之公眾網路小，難以容納如此大量的通話量，再者應急通訊網路不應支援與救災無關的通話。因此，應急通訊網路應具有適當的拒絕服務請求以及根據輕重緩急提供服務的能力，以免爆量的通訊呼叫造成網路擁塞。

- **持續性 (Sustainability)**：既有的通訊網路之搶修通常需時數天至數星期之久，因此應急通訊網路需在一般的公眾網路恢復之前穩定的運轉一段時間。
- **可調性 (Adaptability)**：災區中受災情況往往變化莫測，應急通訊系統應具備可調整的能力，在有限的資源下，盡力提供災區通訊服務，避免通訊資源的不當配置影響救災效率。調適方式可為手動或自動，視開發資源而定。
- **維運性 (Operability)**：運轉、營運、管理和維護功能稱為 OAM 功能。當應急通訊網路因為各種原因損壞時，OAM 必須協助儘快找出原因、排除故障，恢復運轉。

三、常見應急通訊介紹與比較

- **防救災通訊系統**：中央災害應變中心佈建的應急通訊網，在災前預先佈建強固機房並於管制點佈建衛星等無線通訊設備，以確保政府救災體系緊急通訊順暢[9]。
- **無線對講機 (Walkie-Talkie)**：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，極具便利性和可靠性，是非常理想的系統。但因擁有無線對講機的民眾不普遍（在 88 水災中，政府花了 7/14 天從各國廠商借得 240/1052 支無線對講機，太少也太慢），無法廣泛使用於一般志願救災民眾中。
- **業餘無線電 (Amateur Radio)**：與無線對講機類似，但通訊的距離較遠且不具行動力，且需高專業技術才能操作，數量也太少。
- **專業用緊急通訊系統 (Trunking Radio)**：如美規的 Project 25 及歐規的 TETRA 設備[8]，需專業人員架設，具架設速度快、涵蓋範圍廣、可靠性高等多項優點。但一般未經訓練的民眾不會使用，而且價格高昂，數量不可能太多，因此，主要使用者為軍方或專業救難團隊。
- **移動式基地台 (Cell on Wheel)**：裝載在具有衛星通訊設備的車輛上，可支援一般民眾所擁有的行動電話。但因造價高昂數量不足，無法大量部署。如遇交通系統癱瘓，因體積、重量過大無法空投，不易運送至災區。
- **MANET (Mobile Adhoc Network)**：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 WiFi 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。在沒有連接 Internet、沒有伺服器的情況下利用 VoIP 支援緊急的通訊與資訊運用。此種系統仍有未足之處。一是可以支援的人數僅限於擁有筆記型電腦的人，與擁有行動電話手機的人數相比數量遠遠不足；二是系統仍須一定的專業知識才能安裝並操作本系統；三是待機時間太短；四是通訊品質不高，且 WiFi 的有效通訊距離極短。用 MANET 建構應急通訊系統的可行性有待驗證。

上述的應急通訊系統各有其限制。除移動式基地台可支援一般行動電話使用者外，其餘系統的使用者，因受限於成本或特殊終端設備，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有限，只能使用於特定地點，難以應付大量災區通訊的需求。因此為了加速救災行動的進行，極需研發新的救災應急通訊系統，以支援大量的災區民眾，提升救災效率 [1,2,3,6,13]。

四、應急蜂巢式行動通訊網路 (CCN)

1. CCN 設計理念

根據歷年來對各種災害的研究，我們發現大部份中斷服務的行動電話基地台都因電力中斷及連接後端的固網線路中斷而停止運轉，而基地台本身並未受損。CCN 利用長

距離 WiFi 連線(或其他可用的無線電技術),連通倖存但服務中斷的基地台建構災害應急通訊系統(如圖 2 所示),讓災區內的行動電話使用者可以利用斷訊的手機作為救災的通訊聯絡之用。(註:一般的行動通訊基地台彼此之間並未互連。)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。

CCN 的主要設備為「應急修復包」(Contingency Recovery Package, CRP),內含發電機、燃油、無線通訊設備以及 CCN 的核心設備—EC Module,平時儲備於國家防救災中心或行動電話公司。災害發生時利用空投或直昇機等方式空運至災區(基地台常處於交通不便之高處),基地台可利用無線通訊設備互連,以跳接方式,回復與核心網路之間的連線,恢復部分通訊功能,支援災區內行動電話用戶。本系統之優點如下:(1)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;(2)原有蜂巢式網路之拓樸均經精心設計且都位於高處,極易以無線電互相連接;(3)手機非常普及不需改裝即可投入使用,不需投入大量金錢購置手機;(4)不需訓練,人人會用;(5)災害來臨時,民眾逃離家園或不幸受困時極有可能隨身攜帶手機。

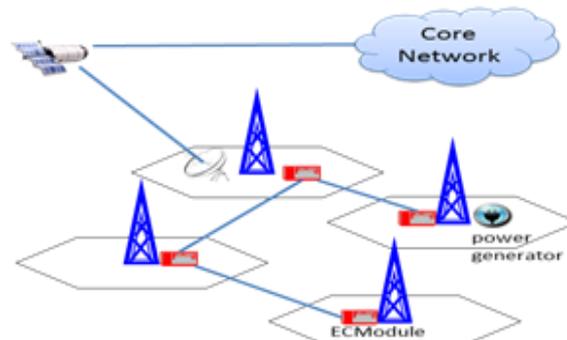


圖 2 應急蜂巢式行動通訊網路

2. CCN 架構

如圖 2,應急蜂巢式行動通訊網(Contingency Cellular Network)簡稱 CCN,由原有的行動電話基地台改裝而成。倖存之行動電話基地台,依其對外連線能力定義如下:

- **連網台**:與後端核心網路連線正常,可持續提供服務之基地台。
- **孤立台**:結構完好但與後端核心網路連線中斷,無法提供服務之基地台。

當兩基地台彼此相鄰,可用無線電建立連線,交換資料。則這兩基地台互為彼此的鄰台。

CCN 之建構須在各基地台附加額外設備,平時包裝成「應急修復包 (Contingency Recovery Package)」,儲存於國家救災單位,於災害發生時運送至災區建構 CCN。應急修復包內含元件如下:

- **Power Module**:包括小型輕便發電機及燃油。
- **Emulated Controller Module (EC Module)**:為 CCN 網路之核心控制元件,其主要功能包含恢復基地台與後端網路之連線能力、資料轉送路徑控制、基地台頻寬分配控制與通話允入控制,Intranet 呼叫處理(call processing)等功能。EC Module 功能雖然複雜,但在一部高性能的 PC 或筆電即可承擔,因此造價便宜,可大量佈建。
- **Inter-Cell Communication Module (ICC Module)**:各孤立台必須透過鄰台以多重跳接方式連接到連網台。而「孤立台—孤立台」以及「孤立台—連網台」間的連接,均須仰賴 ICC Module 建立無線鏈結。孤立台藉由此無線電鏈路相連,彼此協助轉送信號及資料,最後與後端核心網路相連,進而恢復連外能力(如圖 3 所示)。電信信令(signaling)和資料(data)都是經由與鄰台的無線電鏈路傳輸。

- **衛星通訊設備 (選配, Optional)**：用以協助孤立台恢復與後端核心網路連線能力而成為連網台。但因衛星通訊設備昂貴，僅有少數孤立台可配置。其它孤立台便可透過該基地台獲得連網能力(如圖 2 所示)。

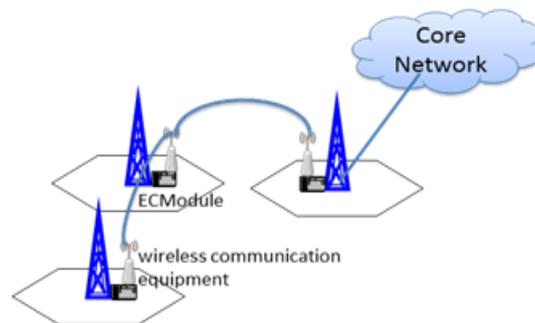


圖 3 孤立台恢復連線方式

3. 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：

(1) 損害評估期

由國家救災單位蒐集災情並評估災損。而基地台若事先佈建有 CCN 元件，則倖存之孤立基地台需嘗試自主建構與鄰台之間的無線電鏈路、找出訊息轉送路徑、重建與後端核心網路之間的連線，回覆損害原因至控制中心並繼續提供通話服務，直到備用電力耗盡為止(約可維持 1 至數小時不等)。

(2) 緊急維修規劃期

選定修復區域與基地台。依基地台回覆之資訊及從各方面搜集之災情擬訂維修計劃，包含規劃最佳之無線連線網路拓樸、排定基地台修復次序、規劃修復路徑、妥善分配頻寬、以及依輕重緩急訂定允入政策等。

(3) 緊急維修執行期

依據第二階段規劃之結果，進行 CCN 網路之佈建。

(4) 緊急服務運轉期

依所分配頻寬及訂定之允入政策，提供允許開放的服務、決定是否接受新的服務請求、並確保緊急通話可優先取得服務。

4. 重要研究議題與未來研究方向

為提供應急通訊所需之功能，如允入控制、Intranet 建構、自動化建構等功能，需整合入現有基地台之運作流程才可實現。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，成本和技術門檻較高，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。

新一代的行動通訊系統，如 LTE，已將應急通訊納入系統設計的考量[11]，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功能，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。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後端核心網路。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。
- **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 所須的 CRP 資源。由於各個地方受災情況不盡相同，CCN 的建構順序也須辨明輕重緩急依序建構，如何在網路拓樸已知情況下決定 CCN 建構排程，以達到最大的救災效益，即為建構排程之目標。
- **頻寬分配：**CCN 頻寬有限且各基地台除本地流量外，尚須轉送鄰台流量，因此每個基地台可接受的使用者數量須作合理分配，避免分配失衡，達到最大救災效益。
- **Intranet 建構：**一般的語音通話均須連接到後端核心網路的交換機進行連接，連網台的連外頻寬需與各孤立台分享，因此各基地台必有閒置之內部通話頻寬。建構 Intranet 可讓同屬同一基地台的手機之間利用閒置頻道彼此互通，而不需佔用基地台連之外頻寬。
- **基地台介面整合：**原有行動通訊網路的基地台設備，其通訊協定相當複雜，EC Module 必須與其介接是一大挑戰。
- **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，確保重要性與急迫性高的請求可以優先使用。
- **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)，於災害來臨時自動建構 CCN 減少通訊服務空窗期，這樣就可以爭取更多寶貴的時間。
- **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倖存基地台，順利建成 CCN 的機會將大幅增加。

五、結語

在許多大型災難中，制式的救災設備往往因交通斷絕無法在第一時間投入於所有受災區。災區內的志願及編制內救災人員在災變發生初期必須自力救濟，以無組織的方式投入救災，不但外援薄弱且救援行動常是一片兵荒馬亂。不幸的是，通訊系統常因各種原因而癱瘓，造成防災救災指揮協調的極大障礙，因此緊急建構一個通訊系統以及救災相關資訊系統提供大量專業及志願救災人員使用成為一個最緊急的救災任務之一。本研究分析歸納應急通訊系統的七大技術需求，並提出應急蜂巢式行動通訊網路之架構與設計，期待能對災區的救災工作做出重大貢獻，多救一些寶貴的生命。

參考文獻

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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 2009.
- [4] Kelly T. Morrison, AT&T, "*Rapidly Recovering from the Catastrophic Loss of a Major Telecommunications Office*", IEEE Communications Magazine Jan. 2011.
- [5] J. Chris Oberg, Andrew G. Whitt, Robert M. Mills, "*Disasters Will Happen - Are You Ready?*", IEEE Communications Magazine Jan. 2011.
- [6] Yang Ran, "*Considerations and Suggestions on Improvement of Communication Network Disaster Countermeasures after the Wenchuan Earthquake*", IEEE Communications Magazine Jan. 2011.
- [7] Sarah Underwood, "*Improving Disaster Management*," Comm. of ACM, vol. 53, no. 2, Feb. 2010, pp. 18-20
- [8] *Association of Public-Safety Communications Officials International*, Project 25, <http://www.apointl.org/frequency/project25/>, retrieved May 2010.
- [9] *Natural Disasters Prediction and Protection Committee R.O.C.*, <http://www.ndppc.nat.gov.tw/>, retrieved Apr. 2011.
- [10] Weimin Dong, et al., Chi-Chi, *Taiwan Earthquake Event Report, Risk Management Solutions, Inc.*, https://www.rms.com/Publications/Taiwan_Event.pdf, retrieved Mar. 2010.
- [11] *3GPP, TS 23.401, "General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access"* version 11.0.0
- [12] 姚國章, "應急管理信息化建設", 北京大學出版社, ISBN : 9787301155806, 2009.09
- [13] 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", 全國電信研討會, Dec. 2010.