

考慮資源運輸路徑之應急蜂巢式行動通訊網路建置排程

黃智賢、高采衣、連耀南
國立政治大學資訊科學系

摘要 一發生大規模的地震或強烈的颱風等重大天然災害時，通訊系統常常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的，然而有效運作的通訊系統卻是災情傳遞、資源調度及救災是否順利的關鍵因素。

本文所探討的應急通訊系統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)。由於各地災情狀況不完全相同，CCN的建構順序必須考慮災區的輕重緩急、時間的急迫等因素依序建構。因此當CCN拓樸規劃完成後，根據CCN拓樸、各地災情嚴重程度以及拓樸中基地台間的相對距離進行基地台建構排程規劃，以達到最大的總救災效益。

本論文考慮基地台間的相對距離、時間與基地台救災效益，提出兩個適合CCN拓樸樹狀結構的考慮資源運輸路徑之最佳化排程模型CCNDS-AC和CCNDS-UC。但當發生突發性大型天然災害時，時間相當急迫，可容許的計算時間相當短暫，因此我們提出了兩個快速的啟發式演算法DS-ACG與DS-UCB，在短時間內求出一組相當逼近於最佳解的建構排程順序。¹

一、簡介

1.1 大型災害的影響

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[3]、莫拉克颱風/88水災、汶川地震[12]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[4,5]：

- **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。

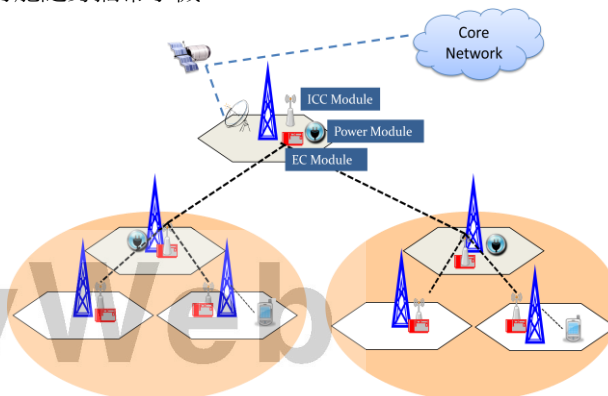
¹ 本研究由國科會贊助，計畫編號 NSC 101-2420-H-004-006-MY3

- **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。

1.2 應急蜂巢式行動通訊網路 (CCN)

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。應急蜂巢式行動通訊網路 (Contingency Cellular Network, CCN) [1,5]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(如圖一所示)，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。



圖一：應急蜂巢式行動通訊網路

1.3 CCN 建置排程

當大型天然災難發生後，造成各地區不同的災害程度，進而啟動 CCN 應急蜂巢式行動網路系統。當 CCN 拓樸規劃完善後[5,7]，緊接著就是快速建構 CCN 拓樸。建構 CCN 拓樸時，由於運送交通工具以及建置工程人員數量相當有限，所需資源無法一次到位，需多次直升機、車輛、人力輪流運送，才可完成 CCN 應急蜂巢式行動網路拓樸的建置。如何根據各個基地台服務地區的受災嚴重程度訂定一個修復排程的順序，即基地台的建構次序，使得救災總效益為最大。而修復一基地台所帶來的效益是一個時間函數，由救災指揮中心定義的，隨時間推移而改變，基地台越早修復投入救災，效益就越高。我們假設 CCN 的拓樸在排程之前已經確定，而且是一個樹狀拓樸，稱為樹狀轉送拓樸(Forwarding Tree)[7]，因此修復排程問題可簡單描述為：在有限時間內針對給定的轉送拓樸，找出一組基地台修復順序，使所有基地台效益總和最大化[2,6,8,10]。

二、考慮資源運輸路徑之 CCN 建置排程

本研究提出了兩個問題模型，第一個問題模型為 CCN Deployment Scheduling Antecessor Constrained (CCNDS-AC)，由連網台出發，依據 CCN 樹狀轉送拓樸結構，優先建構父節點，某一基地台建構完成的瞬間，即可立刻投入服務。第二個問題模型為 CCN Deployment Scheduling Unconstrained (CCNDS-UC)，撇除樹狀轉送拓樸結構之限制條件進行基地台建構排程，考慮更多建構排程的可能性。但由於不固定由父節點開始建構的因素，若某基地台之父節點以上任一基地台尚未被排入建構，可能產生此基地台建構完成的瞬間，無法立刻投入服務，但當其父節點搶修完成，可以投入服務後，即可隨之投入服務。

2.1 CCNDS-AC 問題模型

CCNDS-AC 的要旨是從連網台出發，依據 CCN 拓樸樹狀結構、路網等相關資訊，遵循優先建構父節點之規則建構，若節點之父節點尚未建構，則不在考慮的候選節點清單範圍內，單一基地台建構完成的瞬間，即可立刻服務基地台涵蓋災區，意即救災總效益在建構完成瞬間獲得。CCNDS-AC 問題模型描述如下：

Given a forwarding tree $T(V, E)$, D , P , S where

● $V = \{v_i | i=1, 2, \dots, n\}$ is the set of survival base stations and isolated base stations.

■ v_1 is the root node that has an external link (survival base station).

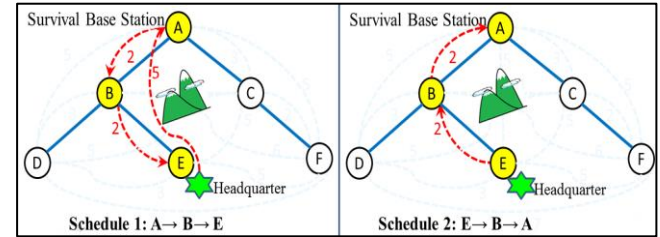
- $E = \{e_{ij} | e_{ij}$ is the link of (v_i, v_j) and $v_i, v_j \in V\}$
- $D = \{d_{ij} | d_{ij}$ is the traveling time of (v_i, v_j) and $v_i, v_j \in V\}$
- $S = \{s_k | s_k$ is a permutation of V , $k=1, \dots, n!\}$ is the set of CCN construction schedules.
- $C = \{c_i(s_k) | c_i(s_k)$ is the time at which node v_i has been repaired in the schedule s_k and $v_i \in V, s_k \in S\}$
- $P = \{p_i(t) | i=1, \dots, n, t \in \mathbb{Z}^+\}$, $p_i(t)$ is the profit of v_i , if node v_i is constructed at time t , $t = c_i(s_k)$ and $s_k \in S$.

The CCN deployment scheduling antecessor constrained problem is to find $s_k \in S$, such that Maximize $\sum v_i(t) = \sum v_i p(C_i(s_k))$

Subject to v_i must be constructed before v_j , if v_i is the antecessor of v_j .

2.2 CCNDS-UC 問題模型

CCNDS-AC 為了從連網台出發，並且遵循父節點優先建構之限制條件，可能會導致建構排程過程中，動線太過於重複，花費更多時間導致救災效益的損失。如圖二所示，Schedule 1 為了優先建構父節點，由救災總部 (Headquarter) 往連網台出發，花費了 5 個時間成本，再依序建構了 B 與 E，總花費時間為 9 個時間成本；而 Schedule 2 則由靠近救災總部 (Headquarter) 的 E 點出發，依序往連網台建構 B 與 A，總花費時間為 4 個時間成本，由此例可輕易地看出，同樣建構了 A、B 與 E，CCNDS-AC 的限制卻花費了更多的建構時間，也浪費了運載工具資源，亦可能影響總救災效益。



圖二：父節點優先建構與否範例說明

因此我們提出 CCNDS-UC，希望能改善上述之問題而獲得更大的救災效益。此問題模型因為不強制由上而下的順序建構，撇除樹狀結構之限制條件，雖單一基地台建構完成的瞬間不一定能立刻投入服務，但可在父節點投入服務的瞬間即可投入服務，節省了許多運送時間，期盼在拓樸建構完成後，能為整體達到最大救災效益。

CCNDS-UC 問題模型描述如下：

Given a forwarding tree $T(V, E)$, D , P , S where

● $V = \{v_i | i=0, 1, 2, \dots, n\}$ is the set of survival base stations and isolated base stations.

■ v_1 is the root node that has an external link (survival base station).

■ v_0 is the CCN headquarter

- $E = \{e_{ij} | e_{ij}$ is the link of (v_i, v_j) and $v_i, v_j \in V\}$
- $D = \{d_{ij} | d_{ij}$ is the traveling time of (v_i, v_j) and $v_i, v_j \in V\}$
- $S = \{s_k | s_k$ is a permutation of V , $k=1, \dots, n!\}$ is the set of CCN construction schedules.
- $C = \{c_i(s_k) | c_i(s_k)$ is the time at which node v_i has been repaired in the schedule s_k and $v_i \in V, s_k \in S\}$
- $P = \{p_i(t) | i=1, \dots, n, t \in \mathbb{Z}^+\}$, $p_i(t)$ is the profit of v_i , if node v_i is constructed at time t , $t = c_i(s_k)$ and $s_k \in S$.

The CCN deployment scheduling antecessor constrained problem is to find $s_k \in S$, such that Maximize $\sum v_i(t) = \sum v_i p(C_i(s_k))$

三、演算法設計

CCNDS-AC 與 CCNDS-UC 皆為 NP-Hard 問題，但又因為救災的進行急迫，時間相當寶貴，當災區範圍大而須建構基地台數量多的時候，無法在限定時間內找出一組最佳解。因此我們為這兩個問題模型設計了快速的啟發式演算法。可在短時間內計算出一個接近最佳解的 CCN 建構排程。

3.1 DS-ACG 演算法

Deployment Scheduling Antecessor Constrained Greedy Algorithm (DS-ACG) 是針對第一個問題模型

CCNDS-AC 所設計的演算法，在父節點優先建構的條件下，尋找單位時間獲得最大救災效益的節點為下一修復節點，直到 CCN 拓樸中的所有節點皆被修復為止。DS-ACG 演算法 pseudo code 請參考圖三。

```

DS-ACG Pseudo code:
Input CCN Topology
SL=null /*the Scheduling List*/
CL={} /*the Set of Candidate nodes*/
CL.add(Survival BS);
while (size of CL !=0) do
    for each node in CL do
        calculate the node's profit and time
        if (profit/time) > (maxProfit/maxTime)
            maxProfit = profit
            maxTime = time
            maxPtofitNode = node
        end if
    end for
    SL=SL+ maxPtofitNode /*update Scheduling List*/
    totalProfit=totalProfit+maxProfit /*update total Profit*/
    totalTime=totalTime+maxTime /*update total Time*/
    CL.remove(maxPtofitNode)
    for each node in maxPtofitNode's childList do
        CL.add(node)
    end for
end while
    
```

圖三：DS-ACG 演算法 pseudo code

3.2 DS-UCB演算法

Deployment Scheduling Unconstrained Backtrack Algorithm (DS-UCB)是針對第二個問題模型 CCNDS-UC 所設計的演算法，捨棄父節點優先建構的限制條件，將鄰近的節點一併修復建構以節省更多的時間與運載資源，由於在此問題模型下，若單純使用貪婪演算法，可能遭遇無法獲得救災效益而不選擇鄰近節點之狀況，因此設計出不同於貪婪演算法的啟發式演算法並且搭配 Backtracking 機制，進一步考慮鄰近節點之路途與救災效益狀況，改變排程，直到 CCN 拓樸中的所有節點皆被修復為止。DS-UCB 演算法 pseudo code 請參考圖四。

```

DS-UCB Pseudo code:
Input CCN Topology
SL=null /*the Scheduling List*/
CL={} /*the Set of Candidate nodes*/
startNode=the closest node of Headquarter
while(SL.length!=node Number of CCN topology) do
    SL.add(startNode)
    if(startNode don't have profit) do
        /*initial path from start node to SBS*/
        while(startNode don't have profit) do
            temp_Sch.add(parentNode)
            startNode=parentNode
        end while
        backtrack_Sch=Backtrack(temp_Sch);
        max_Sch=temp_Sch
        if(profit(temp_Sch) < profit(backtrack_Sch) do
            max_Sch=backtrack_Sch
        end if
        totalProfit=totalProfit+ profit(max_Sch) /*update total Profit*/
        totalTime=totalTime+ time(max_Sch) /*update total Time*/
        SL.add(max_Sch)
        startNode=last node of SL
    else
        totalProfit=totalProfit+ profit(startNode) /*update total Profit*/
        totalTime=totalTime+ time(startNode) /*update total Time*/
    end if
    startNode=the closest node of startNode
end while

Backtrack(temp_Sch) do
    Check temp_Sch neighbor and generate finite schedules
    Compare schedules' total profit
    Choose the schedule with largest total profit as the backtrack_Sch
    return backtrack_Sch
end Backtrack
    
```

圖四：DS-UCB 演算法 pseudo code

四、實驗結果

我們利用隨機的方式產生大量CCN拓樸，並分別針對小規模實驗及大規模實驗進行DS-ACG、DS-UCB及[6]

所提出的演算法DS-G與暴力法運算，以求取CCN的建置排程。

實驗中我們將進行大規模案例之實驗，但當基地台個數過多時，最佳解無法在短時間內計算出結果，因次改而採用1000萬個解中的最佳解與最差解，作為準最佳解(pseudo optimal solution)與準最差解(pseudo worst solution)，來評估DS-UCB、DS-ACG及DS-G在大規模實驗下之總救災效益與總救災時間。實驗結果以以下之評估指標進行評估：

- **Total Profit**：演算法修復節點之當下獲得效益之加總。

- **Total Time**：修復完成整個CCN拓樸後，所花費的總建構排程時間。

- **Original Deviation**：與最佳解比較總效益之誤差，如公式1所示。

$$\text{Original Deviation} = \frac{\text{Algorithm solution}}{\text{Pseudo optimal solution}} - 1 \dots\dots (1)$$

- **Normalize Deviation**：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2所示。

$$\text{Normalize Deviation} = \frac{\text{Algorithm solution} - \text{Pseudo optimal solution}}{\text{Pseudo optimal solution} - \text{Pseudo worst solution}} \dots\dots(2)$$

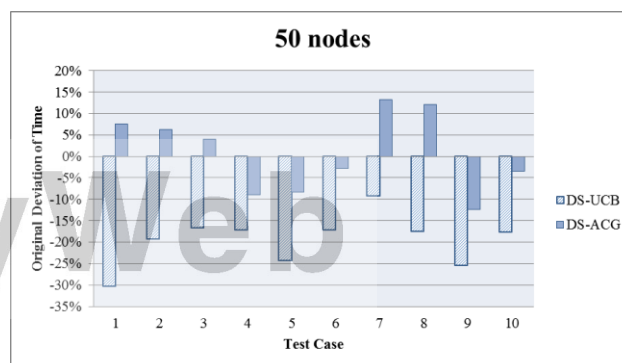
4.1 實驗結果

表 I:實驗參數

Parameters	Range of values
Initial Profit	Uniform(30, 120)
Traveling Time	Uniform (0.5, 10) hr
Forwarding Tree Size	50
Slope S ₁	Uniform (-1, 0)
Slope S ₂	Uniform (-1, 0)
Turning Point	Uniform (50, 100) hr

本論文根據[6]所提出之救災排程並參考較貼近實際狀況之因素提出演算法 DS-ACG 與 DS-UCB。由實驗結果可知，[6]所提出的演算法 DS-G 沒有考慮基地台間的相對距離，使得總救災時間皆高於本論文所提出的 DS-ACG 與 DS-UCB，總救災效益亦低於 DS-ACG 與 DS-UCB。

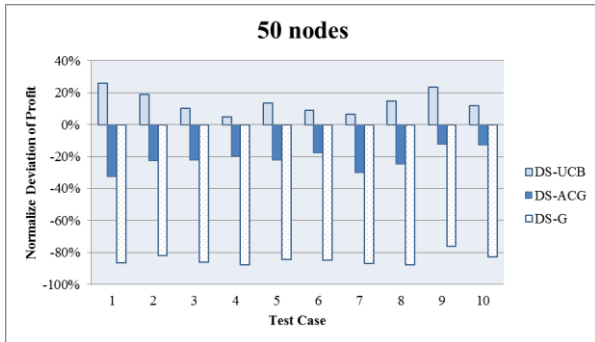
演算法 DS-UCB 發揮其優勢，鄰近且救災效益高的節點一併建構，使得總救災時間節省許多，平均約節省了19.4%的總救災時間(請參圖五)。



圖五：Original Deviation of Time (50 nodes)

也因此總救災效益有不錯的表現，平均效能提升約16.66%。

而 DS-ACG 因受限於父節點優先建構，需建構排程的節點數增加，使其所得之總救災效益較差，但卻能比 DS-G 更逼近於 pseudo optimal solution，DS-ACG 的總救災效益平均 Normalize Deviation of Profit 較 DS-G 超出52.67%(請參圖六)。



圖六：Normalize Deviation of Profit (50 nodes)

五、結論與未來展望

當大型自然災害發生時，造成傷亡慘重，通訊系統常會癱瘓無法使用，使得救災的進行受到阻礙。然而有效運作的通訊系統卻是災情傳遞、資源調度及救災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)，由於各地災情狀況不完全相同，CCN 的建構順序必須考慮災區的輕重緩急、時間的急迫等因素依序建構。因此當 CCN 拓樸規劃完成後，根據 CCN 拓樸、各地災情嚴重程度以及拓樸中基地台間的相對距離進行基地台建構排程規劃，以達到最大的總救災效益。

本論文根據[6]進行改良，考慮基地台間的相對距離、時間與基地台救災效益，提出兩個適合 CCN 拓樸樹狀結構的考慮資源運輸路徑之最佳化排程模型，進而求取總救災效益的最大化。這些模型可供救災指揮單位系統化的解決 CCN 建構排程問題。各基地台建構完成可獲之救災效益由救災單位根據各災區之災情自行定義，本論文所提出之考慮資源運輸路徑之建構排程模型與建構排程演算法可決定 CCN 拓樸中基地台的建構優先順序。

考慮資源運輸路徑之 CCN 建置排程問題是更為複雜的 Single Machine Scheduling Problem，本論文證明該問題屬於 NP-Hard 問題。但當發生突發性大型天然災害時，時間相當急迫，可容許的計算時間相當短暫，因此我們提出了兩個快速的啟發式演算法 DS-ACG 與 DS-UCB，在短時間內求出一組相當逼近於最佳解的建構排程順序。DS-ACG 演算法根據 CCN 拓樸、基地台建置完成所獲得之救災效益以及基地台間相對距離時間，以父節點優先於子節點建構的考量下，找出最大化總救災效益的建構排程順序；為了改善父節點優先於子節點建構所衍生之

運載資源浪費、時間的延宕導致救災效益下降等問題，提出了 DS-UCB 演算法，撤除了父節點優先建構的限制，將鄰近且救災效益高的節點一併加入建置排程，以節省更多運載資源，降低總救災時間，並且提升總救災效益。結果顯示我們所提出之演算法 DS-ACG 與 DS-UCB 皆優於 DS-G，實驗中 DS-UCB 發揮其優勢，鄰近且救災效益高的節點一併建構，使得總救災時間節省許多，以 Original Deviation 評估指標來看，相較於 pseudo optimal solution，平均節省了約 19.4% 的總救災時間，總救災效益平均效能提升約 16.66%。

本論文所提出之模型尚有改善的空間，例如：多組建構團隊所運行之建構排程順序、運載工具負載 CRP 數量有限之分群問題、考慮各種不同的演算法(基因演算法、旅行家問題相關演算法)進行改良。此外，當 CCN 拓樸有多個連網台時，意即不再只是單純的樹狀結構時，多組建構團隊運行的建構排程之順序抑是一項重要之研究課題。在有限的時間內，盡快地規劃且完成 CCN 拓樸建置，發揮 CCN 對救災之通訊協助，期以搶救更多生命。

參考文獻

- [1] Y. Bai, W. Du, Z. Ma, C. Shen, Y. Zhou, and B. Chen, "Emergency communication system by heterogeneous wireless networking," in Proc. of IEEE Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS), June 2010.
- [2] Ling-Yeu Chung, Ta-Yuan Chou and Chung-Chieh Lee, "Multiobjective Dynamic Length Genetic Algorithm to Solve the Emergency Logistic Problem", International Conference on Advanced Mechatronics, July 2012
- [3] 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.
- [4] Jyh-Shyan Huang and Y.N. Lien, "Challenges of Emergency Communication Network for Disaster Response", in Proc of IEEE International Conference on Communication Systems, Nov. 2012, Singapore.
- [5] Jyh-Shyan Huang, Y.N. Lien, C.L. Hu, "Desing of Contingency Cellular Network," Proc. of APNOMS2012, Sep. 2012, Korea.
- [6] Jyh-Shyan Huang, Y.S. Wang, Y.N. Lien, "Deployment Scheduling of Contingency Cellular Network for Disaster Relief Operations", Proc. of APNOMS2013, Sep. 2013, Japan.
- [7] Jyh-Shyan Huang, Y.N. Lien and Y.C. Huang, "Network Topology Planning for Contingency Cellular Network", *Proceedings of 17th Mobile Computong Workshop*, Aug. 2012, Taiwan,
- [8] Yunjun Han and Leyuan Shi, " Optimization Based Method for Supply Location Selection and Rounting in Large-Scale Emergency Material Delivery", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, VOL. 8, No. 4, Oct. 2011
- [9] 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.
- [10] Zheng Lu and Luo Sihui, "Emergency Supplies' Two Transport Scheduling Model", International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE), Dec. 2011
- [11] Zhenhong Shao; Yongxiang Liu; Yi Wu; Lianfeng Shen, "A Rapid and Reliable Disaster Emergency Mobile Communication System via Aerial Ad Hoc BS Networks," in Proc of IEEE Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), Sept., 2011.
- [12] Yang Ran, "Considerations and Suggestions on Improvement of Communication Network Disaster Countermeasures after the Wenchuan Earthquake", IEEE Communications Magazine Jan. 2011.