

# 무선 전술 데이터 네트워크에서 소형 무인항공기를 이용한 연결성 약화 지역 탐색 기법

준회원 이진\*, 종신회원 송주빈\*

## (A Searching Technique of the Weak Connectivity Boundary using Small Unmanned Aerial Vehicle in Wireless Tactical Data Networks)

Jin Li\* *Regular Member*, Ju Bin Song\* *Lifelong Member*

요 약

최근에 전술 무기의 첨단화, 무인화 및 네트워크화에 따라서 무선 전술 데이터 네트워크의 생존성은 매우 중요하다. 본 논문에서는 무선 전술 데이터 네트워크에서 저고도 소형 무인항공기를 이용한 네트워크의 연결성 약화지역을 탐색하는 기법을 제안하였다. 본 논문에서는 간단한 polling 접속 기능을 갖는 소형 무인항공기를 사용하여 무선 전술 데이터 네트워크의 노드들과 접속을 통하여 네트워크의 형태를 파악하고, 파악된 네트워크 그래프를 라플라스 매트릭스로 변환한다. 변환된 라플라스 매트릭스의 eigenvalue를 찾아내는 방법에 기초하여 서브 네트워크를 정의하고 약화된 eigenvalue의 집합을 통하여 네트워크의 연결성 약화지역을 탐색하는 알고리즘을 제안하였다. 하나의 UAV를 사용한 경우 좁은 네트워크 및 광범위 네트워크의 연결성 약화지역을 제안 알고리즘을 사용하여 탐색 가능하였다. 제안된 알고리즘으로 탐색된 약화지역의 노드에 UAV 링크로 중계 기능을 한 경우, 성형 네트워크 및 MST(Minimum Spanning Tree) 알고리즘에 의한 네트워크와 비교하여 스루풋 성능이 우수함을 검증하였다. 본 기법은 무선 전술 네트워크의 연결성을 보장하는 기법에 적용 될 수 있을 것으로 기대된다.

**Key Words** : 무선 전술 데이터 네트워크, 연결성 약화지역 탐색기법, 라플라스 매트릭스, 전술 데이터통신 생존성, UAV

ABSTRACT

Since tactical robots are going to be grown and tactical data communications will be more network-centric, the reliability of wireless tactical data networks is going to be very important in the future. However, the connectivity of such wireless tactical data networks can be extremely uncertain in practical circumstances. In this paper, we propose a searching technique to find out the weak boundary area of the network connectivity using a small UAV(unmanned aerial vehicle) which has a simple polling access function to wireless nodes on the ground in wireless tactical data networks. The UAV calculates the network topology of the wireless tactical data networks and converts it to the Laplacian matrix. In the proposed algorithm, we iteratively search the eigenvalues and find a minimum cut in the network resulting in finding the weak boundary of the connectivity for the wireless tactical data networks. If a UAV works as a relay nodes for the weak area, we evaluate that the throughput performance of the proposed algorithm outperforms star connection method and MST(minimum Spanning Tree) connection method. The proposed algorithm can be applied for recovering the connectivity of wireless tactical data networks.

\* 경희대학교 전자전파공학과 통신연구실(jsong@khu.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-11-524, 접수일자 : 2011년 11월 15일, 최종논문접수일자 : 2012년 1월 18일

## I. 서 론

최근에 전술 무기의 첨단화, 무인화 및 네트워크화에 따라서 센서네트워크를 포함한 이동 능력을 갖춘 무선 전술 데이터 네트워크의 중요성이 더욱 증가하고 있다<sup>[1-5]</sup>. 무선 전술 데이터 네트워크는 전술 운용에서 생존성이 매우 중요한 요소이다. 전술 네트워크의 가장 중요한 특징은 궁극적으로 전장의 생생한 상황을 동영상으로 지휘자에게 실시간으로 전송하여 지휘자가 정확한 전술적 판단을 가능하게 하는 것이다. 따라서 무선 전술 데이터 네트워크의 연결성을 확보하는 것이 매우 중요한 요소이다. 그러나 실제로 무선 전술 데이터 네트워크는 동적 전술 환경에서 노드들의 이동, 지형적인 환경, 간섭 등 여러 요인에 따라서 그 연결성이 취약할 수 밖에 없다. 따라서 전술 데이터 네트워크의 연결성을 확보하는 기술은 전술 운용에서 매우 중요하다<sup>[1-5]</sup>.

무선센서 네트워크와 같은 네트워크의 연결성이 취약한 응용에서 연결성을 강화하는 기존의 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[6-8]</sup>. [6]은 네트워크의 연결성을 강화하기 위하여 협력통신 기법을 제안하였으며 이를 통하여 다중 홉 릴레이 기법보다 효율적인 성능 향상이 가능함을 보였다. [7]은 네트워크를 동적으로 감시하고 유지 보수하는 방법으로 연결성을 확보하는 방법을 제안하였다. [8]은 센서 노드들의 중복 커버리지, 노드들의 오류 패턴 등을 고려하여 네트워크 형태를 만들고 이를 통하여 연결성을 최대화 하지만 최소한의 추가 노드를 투입하는 기법을 제안하였다. [9]는 센서 네트워크의 응용을 위한 연결성 해석의 한 예를 제시하였다. 그러나 저자들의 판단에 의하면 [13]과 같이 일부 UAV의 네트워크 연결성에 대한 연구 결과는 있지만, 광범위한 무선 전술 데이터 네트워크와 같은 응용을 위한 연결성 취약 지역 탐색이나 연결성 강화를 위한 기술은 아직 제안되지 않았다.

따라서, 본 논문에서는 (그림 1)과 같이 무선 전술 데이터 네트워크의 무선 노드들과 간단히 통신할 수 있는 기능을 갖춘 소형 무인항공기<sup>[10-12]</sup> (UAV: Unmanned Aerial Vehicle)을 이용하여 무선 전술 데이터 네트워크의 연결성을 탐색하는 기법을 제안하였다. 본 논문에서는 UAV를 이용하여 지상 노드와 polling 방식의 주기적인 파일럿 신호를 교환하여 지상 노드들의 위치를 파악하고, 전체 무선 전술 데이터 네트워크의 형태를 실시간으로

탐색하여 무선 전술 데이터 네트워크의 연결성 약화지역을 탐색하는 기법을 제안하였다. 이렇게 연결성 약화지역이 파악되면 실시간으로 UAV가 중계 기능을 수행하거나 대용량 UAV 중계기 또는 지상 이동중계기를 취약지역에 배치하여 무선 전술 데이터 네트워크의 연결성과 생존성을 극대화할 수 있게 된다.

본 논문이 기여한 점은 다음과 같이 요약된다.

1) 본 논문에서는 UAV와 무선 전술 데이터 네트워크의 노드들 간에 간단한 MAC(media access control) 접속을 통하여 연결성 약화지역을 탐색하는 기법을 제안하였다.

2) 본 논문에서는 기존의 MCT(minimum cut tree) 기법을 응용한 [13]의 기법을 사용하여 네트워크의 약화지역 검색 결과를 분석을 하였다.

3) 본 논문에서는 네트워크의 연결성 약화지역 탐색 알고리즘을 제안하고 알고리즘의 복잡성을 해석하였다.

4) 본 논문에서는 연결성 약화 지역을 탐색하고 연결성을 강화하는 기법으로 약화지역에 UAV가 노드들과의 연결을 통하여 연결성을 강화할 경우 네트워크의 스루풋 성능을 검증하였으며 이를 성형 네트워크 및 기존의 Minimum Spaning Tree(MST) 기법과 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 제안한 시스템 모델을 설명한다. III장에서는 본 논문에서 제안한 기법을 위한 문제를 해석한다. IV장에서는 III장에서 설명된 이론을 기반으로 하여 알고리즘을 제안하고 V장에서는 이에 따른 실험 및 결과를 기술한다. 마지막으로 VI에서는 결론을 기술한다.

## II. 제안 시스템 모델

본 절에서는 (그림 1)과 같이 하나의 UAV를 이용하여 고정된 고도에서 프로그램 방식으로 항행하면서 무선 노드들의 위치와 전력을 암호화된 polling-ACK pilot 방식으로 수집한다고 정의한다. 이와 같은 방법은 실제로 간단한 MAC 방식으로 가능하다. UAV는 이러한 정보를 바탕으로 지상의 모든 무선 노드  $(\bar{x}, \bar{y})$ 들의 위치 정보로부터 두 노드들 간의 거리를  $D_{ij} = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2}$  구할 수 있다. UAV는 이러한 정보를 실시간으로 지휘통제국에 전송하면 무선 전술 데이터 네트워크의 형태(topology)

를 실시간으로 계산할 수 있다. 본 논문에서 제안한 시스템 모델을 기반으로 하여 네트워크 그래프  $G(V, E)$ 가 계산된다. 여기서 네트워크  $G$ 는  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 은  $N$  노드와  $E$  링크 에지 (edge)  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_E\}$ 로 이루어진다. 본 논문에서는 UAV를 이용하여 무선 전송 데이터 네트워크의 약화지역을 탐색하는 방법을 제안한다.

또한 네트워크의 연결성 약화 지역이 탐색되면 UAV는 약화지역의 인접 노드들과 데이터 링크를 형성하고 중계기의 역할을 수행하는 방식을 제안하여 본 논문의 제안 기법의 성능을 검증한다.

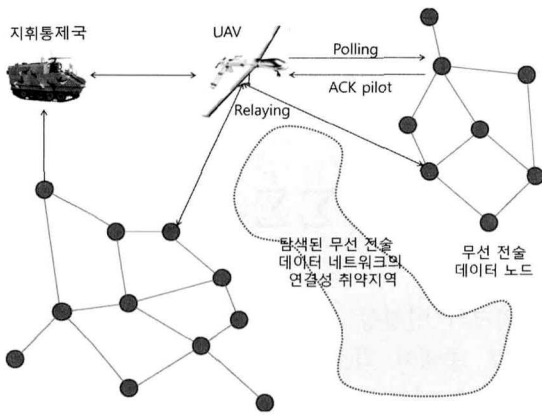


그림 1. 무선 전송 데이터 네트워크의 연결성 약화지역의 탐색을 위한 제안 시스템 모델.

다음 장에서는 UAV를 이용한 전송 데이터 네트워크의 연결성 탐색 기법을 다음 절에서 설명한다.

### III. UAV를 이용한 무선전송 데이터 네트워크 연결성 탐색기법

본 논문에서는 계산된  $G(V, E)$  네트워크 그래프와 일치된 라플라스 매트릭스를 사용하여 공식화하고 이를 이용하여 네트워크의 약화지역을 탐색하는 기법을 제안한다. 본 절에서는 본 논문에서 제안하는 네트워크 약화지역의 탐색을 위한 기법의 설명을 위하여 먼저 네트워크 연결성을 정의한다. 본 논문에서 네트워크의 연결성의 이분법을 이용하여 네트워크의 약화지역을 탐색하는 기법을 제안한다.

#### 3.1. 무선전송 네트워크의 연결성

두 노드  $i, j$ 들 간에 무선채널의 이득은  $G_{ij}, i \neq j$ 으로 정의한다. 노드  $i$ 는 송신전력  $P_i$ 로 송신하고 수

신할 경우  $\sigma_j^2$ 의 평균 잡음전력을 갖는다.  $i$ 번째 노드가 신호를 송신하고  $j$ 번째 노드가 수신할 때 수신된 신호대잡음비(SNR: signal-to-noise ratio)  $\Gamma_{ij}$ 는 다음과 같다.

$$\Gamma_{ij} = \frac{P_i G_{ij}}{\sigma_j^2} \quad (1)$$

레이리 채널모델을 사용하면, 채널이득  $G_{ij}$ 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G_{ij} = \frac{C_{ij} |h_{ij}|^2}{(D_{ij})^\alpha} \quad (2)$$

여기서  $C_{ij}$ 는 안테나 이득, 전파 손실 등을 포함한 상수이고,  $h_{ij}$ 는 다중경로 페이딩이고,  $\alpha$ 는 전송손실 인자이다. 무선 네트워크에서는 노드간 링크의 연결을 위하여 최소한의 QoS(quality of service)를 보장하기 위한 SNR이 요구된다. 이 SNR을 만족하지 않으면 두 노드는 연결되지 않는다. 이러한 연결성 보장을 위한 기준 SNR 값을  $\gamma$ 라고 하자. 만약 채널이 고속페이딩 채널이라고 하면 식(1)과 (2)에서  $h_{ij}$ 는 평균이 0이고 분산이 1인 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는다고 할 수 있다. 따라서, 노드  $i$ 와  $j$ 간의 연결성이 성공될 확률  $P_r^{ij}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$P_r^{ij}(\Gamma_{ij} \geq \gamma) = \exp\left(-\frac{\sigma_j^2 \gamma (D_{ij})^\alpha}{C_{ij} P_i}\right) \quad (3)$$

본 논문에서는 UAV가 초기에 네트워크를 학습하는 단계에서 식(3)의 확률계산을 통하여 네트워크 그래프  $G(V, E)$ 을 계산한다. 계산을 원활하게 하기 위하여 본 논문에서는  $G(V, E)$ 를 연결성 매트릭스로  $\bar{A}$ 로 변환한다. 즉,

$$[\bar{A}]_{ij} = \begin{cases} 1, & P_r^{ij} \geq \delta \\ 0, & \text{그외} \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $\delta$ 는 식(3)의 기준치를 나타낸다.

다음 절에서는 정의된 연결성을 이용하여 라플라

스 매트릭스로 변환하여 이분법을 이용한 네트워크의 약화지역 탐색 기법을 설명한다.

3.2. 네트워크 연결성 이분법을 이용한 약화지역 탐색

네트워크의 연결성 이분법은 네트워크를 두 그룹으로 나누는 것이다. 즉, 라플라스 매트릭스의 eigenvalue를 이용하면 쉽게 네트워크를 이분할 수 있다. 식(4)에서 네트워크 그래프  $G$ 를  $A = A(G)$  연결성 매트릭스로 변환하였는데, 이를 라플라스 매트릭스로 변환 가능하다. 식(4)에서  $P_{ij} = w_{ij}$ 로 변화한다. 여기서  $w_{ij}$ 는 연결성의 강도를 표현하도록 한다. 본 논문에서 네트워크 그래프  $G(V, E)$ 의 변환된 라플라스 매트릭스  $\bar{L}(G(V, E)) = \bar{D} - \bar{A}$ 로 정의한다. 여기서  $\bar{D} = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 로서  $V \times V$  diagonal 매트릭스이다.  $\bar{L}$  매트릭스는 각 노드에 대하여 다음과 같은 값을 갖는다.

$$[\bar{L}]_{ij} = \begin{cases} \sum_{v=1}^V w_{iv}, & \text{if } i = j \\ -w_{ij}, & \text{if } i \neq j, \exists \text{ edge}(i, j) \\ 0, & \text{그외} \end{cases} \quad (5)$$

식(5)와 라플라스 매트릭스  $\bar{L}$ 을 통하여 네트워크의 연결성을 계산적으로 구할 수 있다. 라플라스 매트릭스  $\bar{L}$ 은 양수의 semidefinite 특성을 갖는다. 따라서, 라플라스 매트릭스  $\bar{L}$ 의 최소 eigenvalue는 항상 0 값을 갖고 eigenvector는  $1/\sqrt{V}$ 이다 [13]. 이때 Fiedler 값과 Fiedler 벡터는 라플라스 매트릭스  $\bar{L}$ 에서 두 번째 작은 값과 일치하는 eigenvalue와 eigenvector이다. 본 논문에서 해석한 이분법을 이용한 네트워크의 약화지역 탐색은 기본적으로 클러스터링을 위한 MCT 기법을 기반으로 한다 [13]. MCT는 그래프 혹은 네트워크에서 정규화한 weight의 합을 최소화하는 지점을 이분하는 방법이다. 즉, 최소화 정규 weight 합을 나타내는 링크들의 집합을 제거하면 하나의 네트워크가 두 개의 서브네트워크(subnetwork)로 이분된다. 만약, 하나의 네트워크  $G$ 를 두 개의 서브네트워크  $(\Theta, \underline{\Theta})$ 로 분리한다면 이 분리를 위한 비용을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\psi(\Theta) = \frac{\sum_{i \in \Theta, j \in \underline{\Theta}} w_{ij}}{\min\{|\Theta|, |\underline{\Theta}|\}} \quad (6)$$

여기서  $|\Theta|, |\underline{\Theta}|$  는 각각 두 서브네트워크에 속한 노드의 수를 의미한다. 본 논문에서는 네트워크에서 가능한 모든 이분 방법 중에서 최소의 비용을 나타내는 이분을 네트워크의 이분이라고 정의하고 이를 탐색함으로써 네트워크의 약화지역을 탐색한다.  $q_i \in \{1, -1\}$ 은 노드  $i$ 가 각각  $\Theta$  또는  $\underline{\Theta}$  서브네트워크에 속하는지를 나타내는 인자라고 정의하면  $\min\{|\Theta|, |\underline{\Theta}|\} = (\frac{1}{2})(V - |\sum_i q_i|)$  이다.  $w_{ij} = P_r^{ij}$ 을 대입하면, 식 (6)의 분자는 다음과 같이 표현된다.

$$\sum_{i \in \Theta, j \in \underline{\Theta}} w_{ij} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^V \sum_{j=1}^V (q_i - q_j)^2 P_r^{ij}. \quad (7)$$

네트워크의 연결성 이분은 다음과 같이 모든 가능한 이분 중에서 최소값을 갖는 에지들의 집합으로 계산할 수 있다.

$$S^b = - \min_{q_i \in \{-1, 1\}} \frac{\sum_{i,j} (q_i - q_j)^2 P_r^{ij}}{4(V - |\sum_i q_i|)} \quad (8)$$

여기서 - 값을 가능한 작은 값을 찾겠다는 의미이다. 식 (8)의 해를 구하기 위한 문제는 NP-hard이다. 문제의 복잡성을 낮추기 위하여  $\bar{q} = \{q_1, q_2, \dots, q_V\}$ 로 완화하면  $q$ 는 실수로 변환되며 이때  $\bar{q}^T \bar{q} = V$  이다. 두 서브네트워크의 크기의 차를  $\epsilon = \sum_i q_i = |\Theta| - |\underline{\Theta}|$  로 정의하자. 식 (8)의 완화된 표현 식은 다음과 같다1).

$$\hat{S}^b = - \min_{\bar{q} \in R^V} \frac{\bar{q}^T \bar{L} \bar{q}}{2(V - \epsilon)} \quad (9)$$

s.t.  $\bar{q}^T \bar{q} = V, |\bar{q}^T \mathbf{1}| \leq \epsilon$

1) 식 (9)의 증명은 [13]를 참고한다.

$\epsilon$ 의 값이 변하지 않는 경우 식 (9)는 다음과 같은  $\bar{q}$  값에 따라서 해를 할 수 있다.

$$\bar{q} = \frac{\epsilon}{V}1 + \sqrt{V - \frac{\epsilon^2}{V}w_2} \quad (10)$$

여기서  $\bar{w}_2$ 는 식 (5)의 변화된 라플라스 매트릭스의 Fiedler 벡터이다. 따라서, 식 (9)의 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \widehat{S}^b &= -\frac{\frac{\epsilon^2}{V^2}\lambda_1 + \frac{V^2 - \epsilon^2}{V}\lambda_2}{2(V - \epsilon)} = -\frac{\lambda_2(K + \epsilon)}{2K} \\ &= -\frac{\lambda_2}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 구해진 완화된 네트워크 연결성 이분 해는 식 (8)의 최소영역(lower bound)이 된다. 식 (11)의 해를 구하는 것은 NP-hard 최적화 문제이다. 다음 절에서는 이를 위한 알고리즘을 제안하였으며 이 알고리즘을 이용하여 무선 전술 데이터 네트워크의 약화지역을 탐색한다.

### 3.3. 제안 알고리즘

본 논문에서는 UAV를 이용한 네트워크 탐색에서 얻어진 네트워크의 형태를 기반으로 하여 라플라스 매트릭스를 계산하고, 반복 연결성 이분법 알고리즘을 이용하여, 광범위한 무선 전술 데이터 네트워크의 약화지역을 탐색하는 기법을 제안하였다.

알고리즘은 [표 1]에 보였다. 먼저 UAV는 네트워크를 탐색하여 무선 전술 네트워크의 형태 정보를 획득한다. 이때 GPS(global positioning system)를 이용하여 UAV의 위치와 지상 노드들과의 polling-ACK pilot 접속을 통하여 지상 노드들의 위치를 계산한다. 탐색을 위한 전체 네트워크에 대한 정보를 획득하면, 식 (5)의 라플라스 매트릭스를 계산한다. 식 (8)의 해를 구하면  $\widehat{S}^b$ 를 구할 수 있다. 이는 네트워크의 연결성의 값의 해이며  $\widehat{S}^b$ 의 에지 값의 집합을 구하면 연결성이 약화된 네트워크의 이분된 서브네트워크  $\Theta$ 과  $\underline{\Theta}$ 를 구할 수 있다. 계산된  $\Theta$ 과  $\underline{\Theta}$ 를 이용하여 최종적으로 전체 네트워크의 영역을 탐색하여 연결성이 약화된 지역을 정의할 수 있다. 이러한 네트워크의 연결성 약

화지역 탐색은 네트워크의 형태가 변화하는 동적인 환경에서는 반복적인 계산을 통하여 탐색이 가능하다. 본 제안 알고리즘은 실시간으로 전술 데이터 네트워크의 약화지역을 탐색하고 보완함으로써 전술적 가치를 높게 할 수 있다. 식 (8)은 NP-hard 최적화 문제이다.

표 1. 제안 알고리즘의 수도 코드

1:	<b>Initialize</b> location (0,0), $L$ , $\Theta$ , $S$ , and start searching for the network topology
2:	<b>If</b> $V \neq N \times N$ <b>then</b>
3:	keep search nodes
4:	<b>If</b> $V = N \times N$ <b>then</b>
5:	Calculate $\bar{L}$
6:	Solve $S^b$ using (8)
7:	Define $\widehat{S}^b$
8:	Define $\Theta$ and $\underline{\Theta}$ using (6)
9:	<b>end if</b>
10:	<b>foreach</b> search the highest $\lambda_2$ over all network topology <b>do</b>
11:	Find the weak connectivity boundary
12:	<b>end</b>
13:	<b>end if</b>

본 논문에서는 최적화 문제의 계산 복잡도를 줄이기 위하여  $\bar{q}$ 를 완화하여 [표 1]과 같이 polynomial-time 복잡도를 갖는 알고리즘을 제안하였다. 초기화 후에  $\bar{L}$ 를 계산하기 위하여  $N(N+1)$  스텝의 계산이 필요하다. 두 노드에 대한  $D_{ij}$ 를 계산하기 위하여 링크의 수와 동일한  $C_{N+1}^2$  스텝의 계산이 요구된다. 매트릭스  $A$ 를 계산하기 위하여  $\text{Pr}^{ij}$ 의 수와 동일한  $C_{N+1}^2$  스텝의 계산이 요구된다. 식 (6)과 식 (8)의 해를 구하는 알고리즘은 polynomial-time의 복잡도를 갖는다. 따라서, 본 논문에서 제안한 알고리즘은 전체적으로 polynomial-time 복잡도를 갖게 된다.

## IV. 실험 결과

본 논문에서는 제안된 알고리즘의 유용성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 하나의 UAV를 사용하여 무선 노드들과 접속을 통하여 얻어진 네트워크 형태를 가정하고 이를 기본으로 하여 식 (5)의 연결성을 정의하는 라플라스 매트릭스를 계산

한다. 이를 통하여 식 (6)~(11)의 해를 도출함으로써 연결성의 약화지역을 탐색하였다.

(그림 2)는  $1 \times 1 \text{ km}^2$  지역의 무선 전송 데이터 네트워크 영역 내에 8개의 무선 노드가 분포하는 경우, 네트워크의 약화지역을 탐색할 결과를 보인 것이다. 송신 전력은  $300 \text{ dBm}$ 이고 수신기에서  $\sigma^2 = 10^{-10} \text{ dBm}$  값을 사용하였다. 각 링크의 연결성을 위하여 요구되는 SNR 값은  $\gamma = 10 \text{ dB}$ 이다. 전송 손실 인자 값은  $\alpha = 3$ 이다. 최소 링크 성공 확률은  $\delta = 0.5$ 를 가정하였다.

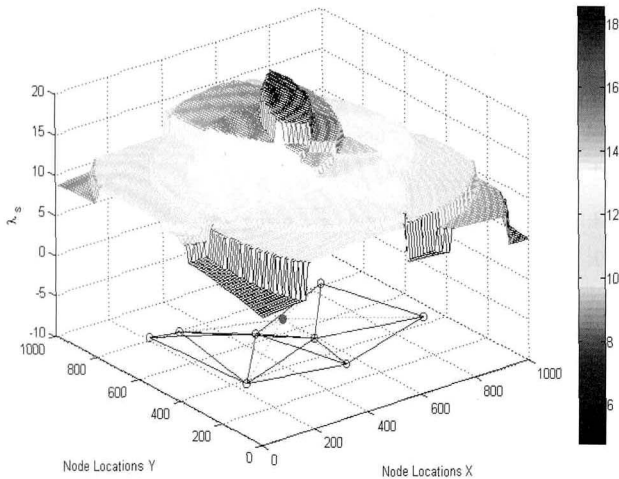


그림 2. 무선 전송 데이터 네트워크의 연결성 약화지역의 탐색을 위한  $\lambda_2$ 의 3차원 결과 값.

(그림 2)에서 무선 전송 데이터 네트워크에서 계산된  $\lambda_2$ 의 값을 3 차원 그래프로 보였다. 연결성 약화지역은 (그림 2)에서 보인바와 같이 두 서브네트워크의 중간 지점에서  $\lambda_2$ 의 값이 최대가 되는 지점을 관찰할 수 있다. 그 외 지역은  $\lambda_2 = 0$ 로서 네트워크의 연결성이 우수한 지역임을 보인다. 따라서 두 서브네트워크의 중간 지점이 연결성이 약화된 영역으로 탐색되어 연결성의 보완이 요구됨을 알 수 있다.

(그림 3)은 (그림 2)의 결과와 동일한 파라미터 값을 적용하여 무선 전송 네트워크의 연결성 약화지역을 제안 알고리즘을 적용하여 최종적으로 탐색한 결과이다. (그림 3)에서 짙은 색깔을 이용하여 네트워크의 연결성 약화지역을 표시한 것이다.

(그림 4)는 네트워크의 이분 서브네트워크를 위한  $\lambda_2$  값을 네트워크의 연결성 기준인 최소 링크 성공 확률  $P_r^{ij}(I_{ij} \geq \gamma) = \delta$  값에 대하여 해석한 것이

다. 즉, 네트워크의 연결성 기준이 강화되면 네트워크에서 연결성 약화지역이 증가한다는 것을 알 수 있다. 무선 노드의 수가 랜덤하게 증가하면 네트워크의 연결성은 더욱 약화됨을 볼 수 있다.

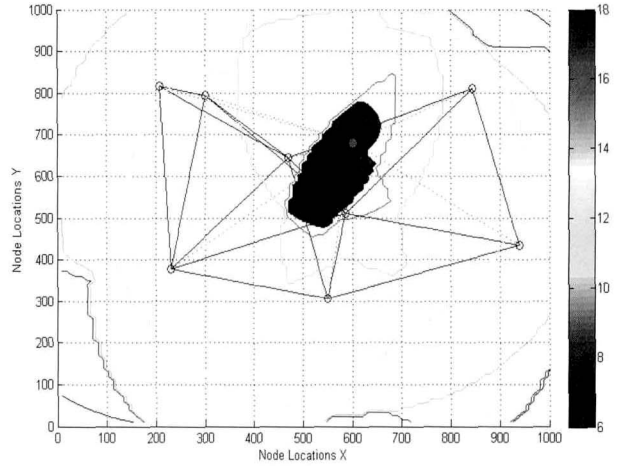


그림 3.  $1000 \times 1000 \text{ m}^2$  영역에서 탐색된 네트워크 연결성 약화지역 (600, 680) 지역의 짙은 색이 연결성이 가장 약화된 지역이다.)

(그림 5)는 광범위한 지역에서 탐색된 연결성 약화지역의 결과를 보인 것이다.  $10 \times 10 \text{ km}^2$  지역에서 100개의 무선 데이터 노드가 랜덤하게 분포되어 있다고 가정한다. (그림 5)에서 지역적으로 노드들이 분산되어 클러스터링되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 파라미터의 값은 (그림 2)의 시뮬레이션에서 사용한 것과 동일하게 사용하였다. UAV가 일정 고도에서 간단히 일정 지역을 비행하면서 이 네트워크의 형태를 파악할 수 있다. (그림 5)에서 일부 지역적으로 연결성이 약화된 지역이 있지만, “•” 점이 있는 지역이 전체 네트워크의 연결성이 약화된 지역으로 탐색 결과 나타난다. 이 지역의 인접 노드를 UAV가 중계하기 위하여 접속하면 전체 네트워크의 생존성과 신뢰성을 향상할 수 있다 [14].

본 논문에서 제안한 네트워크의 연결성 약화 지역 탐색 기법을 이용하여 탐색된 약화지역의 노드들을 UAV가 접속하는 시나리오를 적용하여 제안한 알고리즘의 성능을 평가하였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여, 일반적인 성형 네트워크와 MST 알고리즘에 의한 네트워크 접속의 경우와 비교하여 스루풋 성능 측면에서 검증하기 위하여 NS-2 네트워크 시뮬레이터를 이용하였다. 성형 네트워크의 구조는 UAV가 전체적으로 지상의

모든 네트워크와 성형으로 접속된 가장 간단한 연결 기법을 적용하였다. MST에 의한 연결성 네트워크는 {13}에서 적용된 MST 알고리즘에 의한 네트워크를 적용하였다.

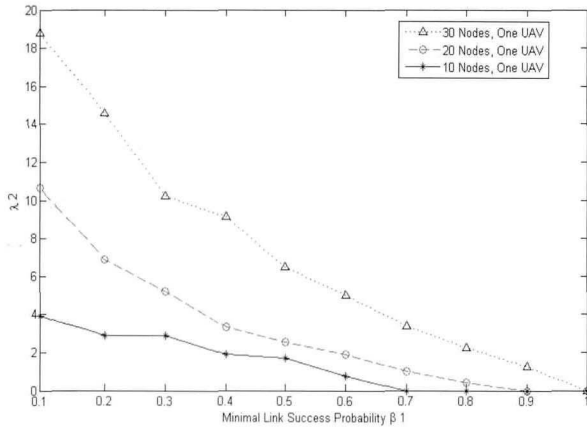


그림 4. 네트워크의 노드 수와 연결성 기준 값  $\delta$  확률에 따른 eigenvalue 값  $\lambda_2$  변화

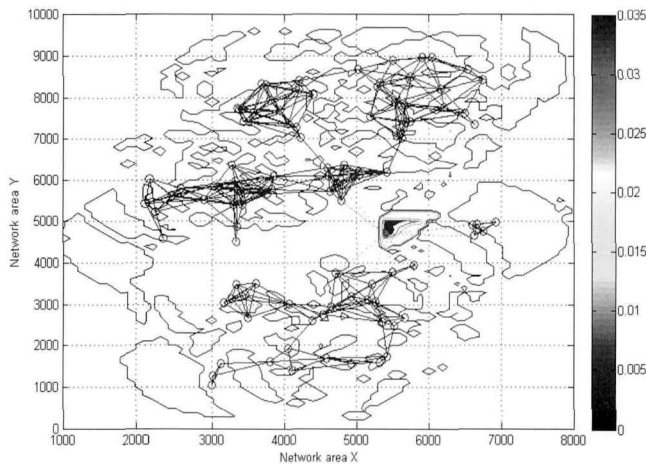


그림 5.  $10 \times 10 \text{ km}^2$  광범위 지역의 무선 전송 데이터 네트워크에서 연결성 약화지역의 탐색 결과. (•점이 있는 지역이 연결성이 가장 약화된 지역이다.)

NS-2 시뮬레이션에서는 IEEE802.11의 MAC 프로토콜을 적용하였다. 무선 접속은 각 링크에 하나의 접속을 가정하였다. 각 링크의 용량은 1Mbps로 가정하였으며 10개의 노드가  $500 \times 500 \text{ m}^2$  지역에 분포된 네트워크를 가정하였다. 소스 노드와 목적지 노드의 3쌍을 임의로 선정하고 3쌍의 flow를 동시에 보낼 경우에 각 연결 방식에 따른 스루풋 성능을 (그림 6)에 비교하였다.

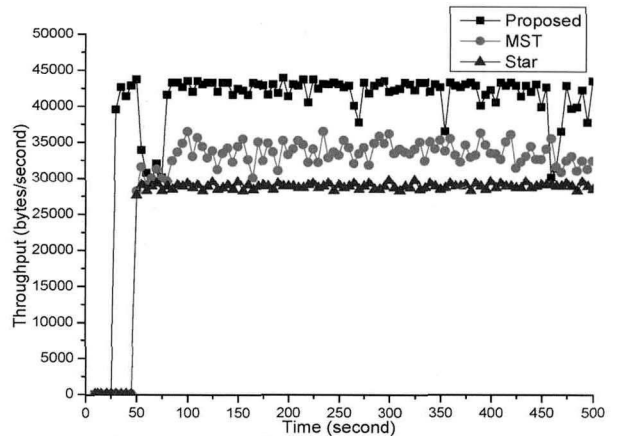


그림 6. 순시적 스루풋 성능 비교 결과(3 동시 flow 전송의 경우)

(그림 6)에서 보인 바와 같이 본 논문에서 제안한 연결성 약화 지역 탐색 방법에 의한 결과를 적용하여 가장 약화된 지역에 UAV를 중계기로 적용하였을 경우의 스루풋 성능은 성형 네트워크와 MST 알고리즘에 의한 연결 네트워크 방식과 비교하여 우수한 성능을 보이는 것으로 검증된다.

## V. 결론

본 논문에서는 지상의 전송 무선 데이터 네트워크와 간단한 MAC 접속 기능을 갖는 UAV의 항행으로 전체 무선 전송 네트워크의 형태를 파악하고 이를 통하여 네트워크의 약화지역을 탐색하는 알고리즘을 제안하였다. 라플라스 매트릭스로 네트워크 그래프를 변환하고 eigenvalue 값을 구한다. 반복적인 알고리즘을 수행하면 eigenvector를 구할 수 있다. 이를 이용하여 네트워크의 이분법적으로 연결성의 약화지역을 탐색할 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 하나의 UAV가 항행하는 경우를 가정하여 좁은 지역 네트워크와 광범위 지역 네트워크에서 네트워크의 연결성 약화 지역을 탐색할 수 있었다. 또한 본 논문에서는 연결성을 강화하는 기법으로서 UAV와 연결성 약화지역의 노드 간에 중계 방법으로 연결성을 강화할 경우, 기존의 성형 연결 및 MST 연결 기법에 대하여 우수한 네트워크의 스루풋 성능을 향상할 수 있음을 보였다. 이 결과는 향후 네트워크의 연결성 강화를 위한 중계 노드의 설치 위치를 확정하는데 적용될 수 있으며, 동적 네트워크 환경에서 무기 체계간의 간섭회피를 위한 기술로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 백호기, 정승명, 임재성, "네트워크 중심 작전을 위한 전술 데이터링크 기술동향", 정보과학회지, 28(7), pp. 59-69, 7월 2010년.

[2] 김한동, 최대봉, "전술데이터링크 기술 표준화 동향", 한국통신학회지, 정보와통신(국방전술통신), 24(10), pp.7-14, 10월 2007년.

[3] 안광호, 이주형, 조준영, 오준혁, "전술데이터링크 네트워크에서 노드 이탈 관리 기법" 한국통신학회 논문지, 36(4), 4월, 2011년.

[4] 김종철, 정종관, 노병희, "전술통신 네트워크와 QoS 기술", 전자공학회지, 35(10), pp. 40-52, 10월 2008년.

[5] 홍민기, 강경란, 조영중, "무선 전술 네트워크에서 단말의 협력을 통한 전염 기변의 신뢰성 있는 멀티캐스트", 한국통신학회논문지, 33(10), pp. 865-875, 10월 2008년.

[6] A. Krohn, M.Beigl, C. Decker, T. Riedel, T. Zimmer, and D. Varona, "Increasing connectivity in wireless sensor network using cooperative transmission", Proc. of International Conference on Networked Sensing Systems, pp. 1-6, May 31 - June 2, 2006.

[7] B. Khelifa1, H. Haffaf, M. Madjid, and D. Llewellyn-Jones, "Monitoring connectivity in wireless sensor networks", International Journal of Future Generation Communication and Networking, vol. 2, No. 2, pp. 1-10, June, 2009

[8] H. M. Almasaeid and A. Kamal, "On the minimum k-connectivity repair in wireless sensor networks," Proc. of IEEE International Conference on Communications, pp. 1-5, 2009.

[9] P. Z. Wang, M. Sun, C. Vuran, M. Mehmet, A. Al-Rodhaan, Al-Dhelaan, and I. Akyildiz, "On network connectivity of wireless sensor networks for sandstorm monitoring," Computer Networks vol.55, no.5, pp. 1150-1157, 2011.

[10] 하영석, 정영철, 임용환, "공중중계용 UAV 개발에 관한 연구", 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 859-862, 4월 2008년.

[11] 육군교육사, "UAV를 활용한 무선 통신중계 방안", 2006년.

[12] D. W. Casbeer, D. B. Kingston, R. W. mclain, S. Li, and M. Mehra, "Cooperative forecast

fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles", *Int. J. Syst. Sci.*, vol.37, no.6, pp. 351-360, May 2006.

[13] Z. Han, A. L. Swindlehurst, and K. J. R. Liu, "Optimization of MANET connectivity via smart deployment/ movement of unmanned air vehicles", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 58, no.7, pp. 3533-3546, Sep. 2009.

[14] O. Burdakov, P. Doherty, K. Holmberg, and P. Olssen, "Optimal placement of UV-based communications relay nodes", *Journal of Global Optimization*, vol. 4, no.48, pp. 511-531, 2010.

이 진 (Jin Li)

준회원



2010년 8월 중국 PLA대학교  
정보공학과 졸업  
2010년 9월~현재 경희대학교  
전자전파공학과 석사과정  
<관심분야> 무선통신 및 네트  
워크 자원 최적화

송 주 빈 (Ju Bin Song)

종신회원



2003년 3월~ 현재 경희대학교  
전자전파공학과 교수  
2009년~2010년 미국 University  
of Houston 전기공학과 객원교  
수  
2001년~2003년 국립한밭대학 교  
정보통신공학부 교수  
2001년 12월 University of  
London (UCL) 전자전기공학과 졸업(박사)  
1992년~1997년 한국전자통신연구원 (ETRI)  
선임연구원 (통신시스템)  
<관심분야> 통신 및 네트워크, 자원할당 최적화 기  
술, 게임이론의 통신응용 기술, Cooperative  
Communications, 검출 및 추정, 등