

논문 2010-5-28

이진 Clustering을 이용한 Ad Hoc 망의 이동성 해석 측도

Mobility Analysis Metric for Ad Hoc Network Using Pairwise Clustering

안홍영*

Hong-Young Ahn

요 약 본 논문에서는 Ad Hoc 망의 동적인 연결 상태를 측정하는 도구로서 두 노드 사이의 최대 클러스터간 거리가 전파반경을 넘어서는 시간, 즉 경로 붕괴시간 T_i 들의 합 $\sum_i T_i$ 를 측도로 사용할 것을 제안한다. 경로 붕괴시간 T_i 는 모빌리티 모델로부터 노드들의 위치를 시간 샘플링한 후 이진 Clustering을 통해 최대 Cluster 거리를 시간의 함수로 구하고, 이로부터 전파반경을 넘어서는 시간구간을 찾아서 구한다. 본 논문에서 제안하는 측도는 개별 연결에 대한 측도로서 뿐만 아니라, 평균을 취함으로써 시스템 전체의 특성을 규정짓는 측도로서도 사용할 수 있다.

Abstract In this paper, we propose a new metric to measure the dynamic connection states of Ad Hoc network. The new metric measures the total path break up time $\sum_i T_i$, where T_i is the time period during which maximum cluster distance exceeds the radio range. T_i can be calculated from the maximum cluster distance function of time, which can be computed from the node position samples of mobility model. The proposed metric can be used as a total system metric as well as an individual connection metric.

Key Words : Ad Hoc 망, 이동성, 망 성능 평가, 링크 붕괴, 시뮬레이션

1. 서 론

최근의 다양하고 비교적 저렴한 무선 접속 기술들의 비약적인 발전은 언제 어디서나 멀티미디어 정보에 대한 접근을 용이하게 해주고 있다. 대표적으로 IEEE 802.11, 3G/4G, WiMax, Sensor 망 등에서의 기술은 눈부시게 발전했으며, 이들 망들의 궁극적 통합 운영에 대한 관심이 증대되고 있다.

이동 Ad Hoc망(MANET)은 라우터와 종단 기능을 동시에 수행하는 모바일 노드들이 무선링크로 연결된 자

율시스템이다. 이러한 망은 통신기반 설비의 설치가 필요 없는 재빠르고 손쉬운 망 구성, 중앙통제가 필요없는 자율적 구성, 전력 및 전송 조건 변화에 대한 적응성, 부하의 적절한 분배 등의 장점으로 말미암아 미래의 통신 망으로 많은 주목을 받고 있다. 이 같은 장점에도 불구하고 이동성으로 말미암아 MANET에서의 통신경로는 안정도와 가용성이 시간에 따라 급변하는 문제점을 안고 있다. 노드들이 이동하는 상황에서도 망이 좋은 성능을 내기 위해서는 기존의 프로토콜 스택들의 전면적인 재설계가 필요하다. 언제 어디서나 이동 중에도 끊임없이 인터넷에 접속하기 위해서는 망이 이동성을 지원해주어야 하며, Mobile IP V4 /V6 등이 대표적 이동성 지원 프로토콜이다.

*정회원, 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과
접수일자 2010.9.25 수정일자 2010.10.9
게재확정일자 2010.10.15

Ad Hoc망을 포함한 무선 데이터망에서 이동성에 대한 검증하는 요구는 다양한 이동성 관리 정책과 표준을 필요로 하며 IETF의 *Network Mobility Basic Support Protocol (NEMOBSP)*^[1]가 대표적인 예이다.

MANET에서 노드들간의 네트워크 연결성은 망의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소중 하나이며 지난 10여년간 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되어왔다. Gupta^[3]는 노드수가 증가함에 따라 연결확률이 1이 되기위한 송신 파워를 결정하는 문제를 다루었다. Miller^[4]는 2홉 이내로 연결될 확률을 계산하였다. Xue^[5]는 2차원에서 랜덤하게 배치한 K 노드 시스템에서, 각 노드가 $0.0741 \log K$ 이하의 이웃과 연결되면 K 가 증가함에 따라 망은 끊어질 확률이 점근적으로 1 임을 보였다. 반대로 각 노드가 $5.1744 \log K$ 이상의 이웃과 연결되어 있으면 K 가 증가함에 따라 망은 어떤 노드와도 연결될 확률이 점근적으로 1이 된다. Bettstetter^[6], Zhang^[7] 등은 노드 밀도가 주어졌을 때 점근적 k -연결성을 유지하기 위한 일계 파워를 식으로 유도하였다.

이러한 시도들은 노드들이 정적인 상태에서의 연결성 문제를 다루었지 노드들이 이동하는 동적인 상태에서의 연결상태에 대한 정보를 제공해 주지 못한다.

본 논문에서는 Ad Hoc 망의 동적인 연결 상태를 측정하는 도구로서 두 노드 사이의 최대 클러스터간 거리가 전과반경을 넘어서는 시간, 즉 경로 붕괴시간(링크 붕괴 시간) T_i 들의 합 $\sum_i T_i$ 를 측도로 사용할 것을 제안한

다. 경로 붕괴시간 T_i 는 모빌리티 모델로부터 노드들의 위치를 시간 샘플링한 후 이진 Clustering을 통해 최대 Cluster 거리를 시간의 함수로 구하고, 이로부터 전과반경을 넘어서는 시간구간을 찾아서 구한다. 본 논문에서 제안하는 측도는 개별 연결에 대한 측도로서 뿐만 아니라, 평균을 취함으로써 시스템 전체의 특성을 규정짓는 측도로서도 사용할 수 있다.

이동성이 Ad Hoc망의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 네트워크 시뮬레이션 도구를 사용할 수 밖에 없다. 네트워크 시뮬레이션은 망의 수많은 확률적 파라미터들 변화가 망의 성능을 어떻게 변화시키는가를 보는 본질상 Monte Carlo 방법의 적용이다. 시뮬레이션 결과가 통계적 의미를 가지기 위해서는 많은 회수나 긴 시간의 시뮬레이션이 필요하다. 또한 여러 가지 파라미터들이 동시에 작용하므로 한 파라미터의 영향만을 분리해

서 평가하기도 쉽지 않다.

본 논문에서 제안하는 방법은 이동성이 야기하는 망 경로들의 붕괴를 사전에 오프라인으로 계산함으로써 시뮬레이션 결과를 정확히 해석할 수 있고 이동성이 망의 성능에 미치는 영향을 분리해 낼 수 있다는 장점도 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 이진 클러스터링에 대해, 3장에서는 최대 클러스터간 거리를 구하는 방법에 대해 논한다. 4장에서는 제안한 방법의 실험 및 결과에 대해, 5장에서는 결론을 맺는다.

II. Pairwise Clustering

AD Hoc 망에서 통신을 하고자 하는 두 노드는 직접 통신 가능한 거리(전과반경) 내에 있거나 다른 노드들의 중계에 의해 연결되어 질 수 있어야 한다.

따라서 소스 노드(S)에서 목적지 노드(D)까지의 경로 상에 있는 링크들의 거리가 통신가능성과 패킷 손실율, 지연 등에 직접적인 영향을 미친다.

모든 노드들이 이동성 모델에 따라 이동하므로 S 와 D 사이의 경로 P_{SD} 는 시간에 따라 동적으로 변하는 링크들의 합으로 표현할 수 있으며 다음과 같이 주어진다.

$$P_{SD}(t) = \sum_i I_i^{SD}(t) \quad (1)$$

경로상의 모든 링크가 전과반경 내에 있어야만 통신이 가능하다. 따라서 경로상에 전과 반경을 넘어서는 링크의 존재유무가 통신 가능성과 패킷손실과 지연 등을 결정한다.

이 문제를 일반화 하면 다음과 같이 생각할 수 있다. $D_X m \times D_Y m$ 의 지역에 N 개의 노드가 주어진 *Mobility Model*에 따라 움직인다고 가정하자.

임의의 두 노드가 언제든 통신가능한지의 여부를 판정하기 위해서는 모든 노드사이의 통신 연결 경로를 조사해야 한다. 주어진 시간 t 에서 $\frac{N(N-1)}{2}$ 개의 통신 연결이 존재하며 각 연결의 경로에 대해서 전과반경을 넘어서는 링크를 조사하면 그 경로 상에서 발생하는 링크 붕괴를 알 수 있고, 이에따라 패킷손실, 중단간 지연, 처리율 등의 네트워크 성능 변수들을 알 수 있다.

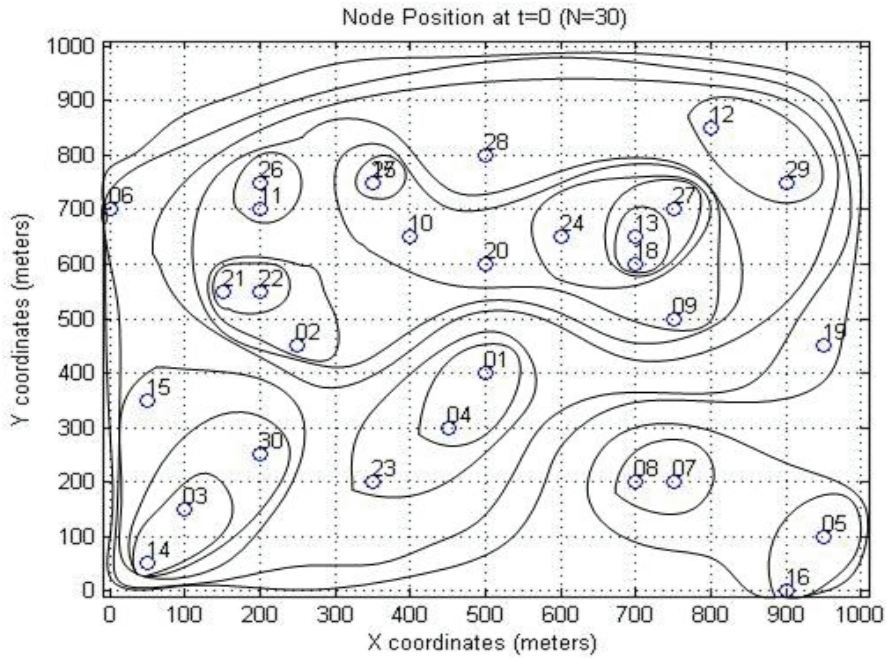


그림 1. 초기 노드 위치(t=0)와 Clustering 결과
 Fig 1. Initial Node Position and Pairwise Clustering Result

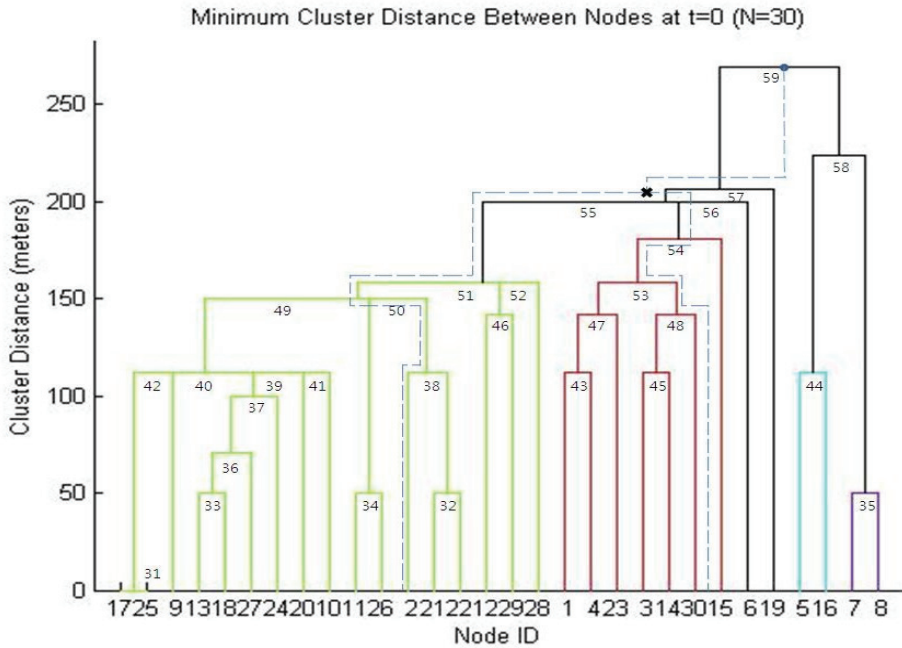


그림 2. 이진 Clustering 후의 Dendrogram(수지도)
 Fig 2. Dendrogram after Pairwise Clustering

전파반경을 넘어선 링크는 다음과 같이 찾는다. 모든 노드 쌍에 대해 *Euclidean Distance*를 계산해서 적절하게 배열한다. 노드 X_i 와 X_j 사이의 거리를 $d_u(X_i, X_j)$ 라고 하면 모든 노드 쌍 간의 거리는 행벡터

$$Y = (d_u(X_1, X_2), d_u(X_1, X_3), \dots, d_u(X_1, X_N), d_u(X_2, X_3), \dots, d_u(X_2, X_N) \dots, d_u(X_{N-1}, X_N))$$

으로 배열된다. 이 행 벡터는 clustering이나 다차원 스케일링 문제에서는 유사성 *matrix*로 활용된다. 행 벡터 Y 로부터 최단거리 계층적 이진 cluster tree를 다음과 같이 만든다. 최단거리 계층적 이진 cluster tree는 nearest neighbor cluster tree라고도 한다.

두 클러스터 r, s 간 최소거리는 다음과 같이 주어진다.

$$d_u(r, s) = \min(d_u(x_{ri}, x_{sj})), \quad \forall i \in (1, \dots, n_r), \forall j \in (1, \dots, n_s)$$

즉 두 클러스터에 속한 노드들 간의 모든 거리 중 최단거리를 말한다.

- ① 모든 노드는 자기 자신이 속한 한 개의 멤버를 가진 싱글 cluster를 형성하며, *Node ID*와 같은 cluster *ID*를 가진다.
- ② 노드 쌍간의 거리 행벡터 Y 중에서 가장 작은 거리의 두 클러스터(노드)를 결합하여 새로운 cluster를 형성하고 next cluster *ID*를 부여한다.
- ③ 새로운 클러스터를 포함한 클러스터 배열에서 클러스터간 거리가 최소인 클러스터 둘을 결합하여 새로운 클러스터를 형성하고 next cluster *ID*를 부여한다.
- ④ ③의과정을 모든 cluster가 결합하여 하나의 클러스터를 형성할 때까지 반복한다.

이렇게 형성된 cluster들은 원 노드들을 leaf 노드로 하는 이진 cluster tree를 형성하게 되고 클러스터간 최대거리 정보를 제공해 준다. 클러스터간 최대거리는 두 노드 사이의 경로에 존재하는 최대거리 링크 l_i 이다.

$$\text{Maximum Cluster Distance} = \max (l_i)$$

III. Maximum Cluster Distance

그림 1.은 30개의 이동 노드들($N=30$) *Manhattan (City Block) Mobility Model*에 따라 배치한 $t = 0$ 에서의 초기위치와 이진 clustering 결과를 보여준다.

$1000m \times 1000m$ 정사각형 지역에 도로가 $50m$ 간격으로 가로와 세로로 놓여져 있다.

그림 2는 이진 clustering 결과를 dendrogram(수지도)으로 나타내었다. 수지도는 생물공학에서 사용하는 분류군들 간의 유연관계, 파생관계, 진화의 역사를 나타내는 계통도의 일종이다.

dendrogram은 이진 클러스터가 형성되는 순서와 클러스터간의 거리를 트리의 높이로 그래픽을 사용하여 일목요연하게 보여준다.

임의의 두 노드 사이의 최대 클러스터 거리를 구하기 위해서는 dendrogram의 대응되는 leaf 노드들로부터 출발하여 루트까지의 경로를 각각 찾는다.

두 leaf노드로부터 루트까지의 경로는 반드시 중간 조상노드에서(그림에서 \times 표) 만나게 되는데 공통의 첫 조상 노드가 두 클러스터를 포함하는 새로운 클러스터이며 그 높이가 두 클러스터간 거리가 된다.

예를 들면 2번 노드와 30번 노드가 통신할 경우, 2번 노드의 루트까지 가는 경로의(왼쪽 점선으로 표시한 부분) cluster *ID*들은 (38, 50, 51, 52, 55, 56, 57, 59)가 되며, 30번 노드의 루트까지 가는 경로의(오른쪽 점선으로 표시한 부분) cluster *ID*들은 (48, 53, 54, 55, 56, 57, 59)이다. 루트까지 가는 공통경로는 (55, 56, 57, 59)이며 공통경로의 첫 cluster *ID* 55번이(\times 표 표시) 두 클러스터가 소속된 직속 상위의 cluster *ID*이다.

55번 클러스터의 높이가(200m) 바로 두 클러스터 간 거리이며 2번 노드와 30번 노드가 통신할 경우 2번에서 30번까지의 경로상에서 거리가 200m인 링크가 반드시 존재한다는 것을 나타낸다. 따라서 전방향 안테나를 사용할 경우 전파반경이 최소한 200m는 되어야 2번 Node와 30번 노드가 통신이 가능함을 보여준다.

따라서 주어진 전파반경 값을 Y 축에서 찾아 X 축에 평행하게 그었을 때 이 값보다 큰 크기의 클러스터 간 거리를 가진 클러스터들은 통신을 할 수 없음을 나타낸다.

예를 들어 전파반경이 190m라면 클러스터 55번의 left subtree 에 있는 모든 노드들과 나머지 노드들 간의 통신은 불가능함을 보여주며 통신이 진행중이라면 패킷들이 유실되거나 출력링크 큐가 충분히 크다면 패킷유실 대신 지연이 길어진다.

dendrogram에서 루트의 높이가 전파반경보다 작을때만 시스템 내의 임의의 두 노드간의 통신이 가능하게 된다.

IV. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 방법을 MATLAB, Qualnet Network Simulator를 사용하여 모의 실험하였다. 본 실험에서 사용한 이동성 모델은 Manhattan 모델이다. 이동 노드들은 초기에 도로의 교차점에 2차원 균일분포로 랜덤하게 배치되며 노드 ID를 할당받는다. 각 노드들은 다음 목적지 교차로를 또한 2차원 균일분포에서 선택하여 V_{min} 과 V_{max} 사이에서 랜덤하게 선택한 일정한 속도로 목적지로 이동한다. 이동은 반드시 도로를 따라서 최단거리로 이동해야만 하며 따라서 출발지와 목적지를 빗변으로 하는 이등변삼각형의 직각을 이루는 두 변을 따라 이동하는 형태가 된다.

목적지에 도착한 노드는 P_{min} 과 P_{max} 사이의 균일 분포 랜덤값을 택하여 그 시간동안 정지한다. 정지시간이 끝난 이동노드는 위와 같은 방법으로 다음 목적지를 택하고 이동하고 쉬고의 과정을 Simulation이 끝날 때까지 계속한다.

Simulation을 위한 Qualnet 환경설정은 표 1과 같다.

표 1. Qualnet 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Qualnet Simulation Parameters

Simulation Area	1000m×1000m
총 Simulation Time	300 second
Routing Protocol	AODV(default param.)
Tx Power	15dbm
Traffic	3CBR Connections
Transport	UDP

시뮬레이션이 통계적으로 의미가 있도록 노드수, 스피드 각각의 파라미터 변화에 대해 100회씩의 시뮬레이션을 하여 평균을 구하였다.

CBR Traffic은 20packets/sec, 400byte/packet 으로 64Kbps의 음성통화를 나타낸다.

이동성으로 야기된 패킷 손실만을 고려하고 충돌 등으로 인한 패킷 손실을 최소화하기 위해 CBR Traffic은 0.02초 간격으로 떨어져서 발생하도록 하였다.

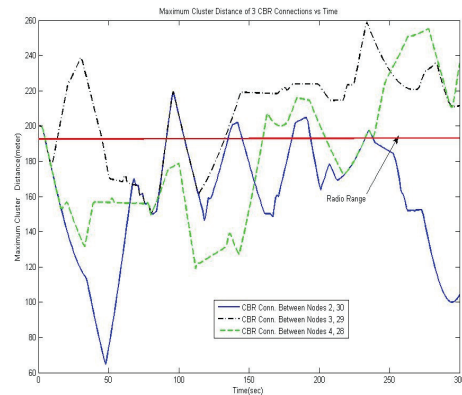


그림 3. 3개의 CBR에 대한 최대 Cluster 거리의 변화
Fig. 3. Maximum Cluster Distance of 3 CBR over Time

그림 3은 30개의 노드가 Manhattan Mobility의 한 패턴에 의해 simulation시간(300초)동안 움직일 때 노드들의 위치를 1초마다 샘플링하여 3개의 CBR Connection 경로에 대한 Maximum Cluster Distance를 시간에 따라 계산한 것이다.

이 그림은 붉은색으로 표시한 Radio Range가 주어졌을 때, 최대 클러스터간 거리가 전파반경을 넘어서는 구간들, 즉 링크 붕괴시간 T_i 들을 정확하게 보여준다. 3개의 CBR Traffic에 대해 통신링크가 언제 얼마동안 경로 상에서 붕괴되는지를 정확하게 보여준다.

표 2는 세 연결의 링크 붕괴시간 T_i 들의 합 $\sum_i T_i$ 를 구한 것이다.

표 2. 세 연결에 대한 총 링크 붕괴시간
Table 2. Total Link Break Time for 3 Connections

연결	총 링크 붕괴시간(초)	경로의 붕괴율
Node 2, 30	24.15	0.0805
Node 3, 29	201.15	0.6705
Node 4, 28	98.73	0.3291

본 논문에서는 경로의 분리율과 경로의 연결율을 다음과 같이 정의한다.

$$\text{경로의 붕괴율} = \frac{\text{총 경로 붕괴시간}}{\text{총 시뮬레이션 시간}}$$

$$\text{경로의 연결율} = (1 - \text{경로의 붕괴율})$$

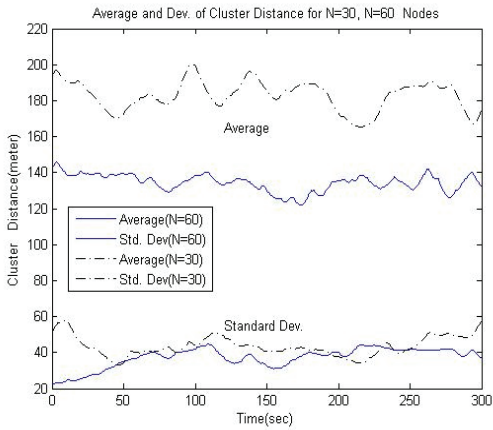


그림 7. 전체 시스템의 최대 클러스터 거리 평균, 표준편차
Fig. 4. Avg. and Std. of Max Cluster Dist. of a System

그림 4는 주어진 이동성 패턴에서 시스템에 있는 모든 통신연결(N개의 노드가 있는 경우 $N \cdot (N-1)/2$ 개의 연결)들의 최대 Cluster 거리의 평균과 표준편차를 시간의 함수로 표시한 것이다. $N=30$, $N=60$, 노드들의 speed=10 km/h 인 시스템이다. $N=60$ 인 시스템의 노드 밀도가 높으므로 최대 클러스터 평균거리가 작을 것임을 정성적으로 유추할 수 있다. 그림에서 보듯이 $N=60$ 인 시스템의 최대 클러스터 평균거리는 $N=30$ 인 시스템보다 훨씬 우수함을 보여주며, 그것을 수치로 측정해 보여주고 있다. 이 예에서 보듯이 본 논문에서 제안한 측도는 개별 연결의 측도 뿐 아니라 시스템 전체 연결의 측도로 사용될 수 있음을 보여준다.

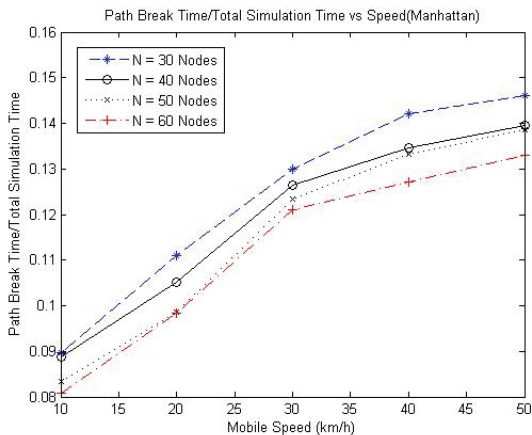


그림 5. 경로 붕괴율
Fig. 5 Path Break Ratio

그림 5는 Manhattan Mobility에서 노드의 속도에 따른 경로 붕괴율을 보여준다. 노드수가 주어졌을 때 노드의 속도가 증가함에 따라 링크의 평균 붕괴시간은 증가함을 알 수 있고 이는 노드의 역동성으로 인하여 링크의 잦은 붕괴와 붕괴시간의 증가를 의미한다. 또한 노드의 속도가 주어졌을 때 노드수가 증가함에 따라 평균 붕괴시간은 감소하는데 이는 노드 밀도가 높아짐에 따라 새로운 링크를 통한 경로 발견 확률이 높아짐을 의미한다. 이러한 사실들은 노드의 속도와 밀도에 따라 우리가 정성적으로 추론할 수 있는 사실과 일치한다. 이 그림은 그런 정성적 사실을 본 논문에서 제안한 측도를 사용하여 정량적 수치로 나타낼 수 있음을 보여준다.

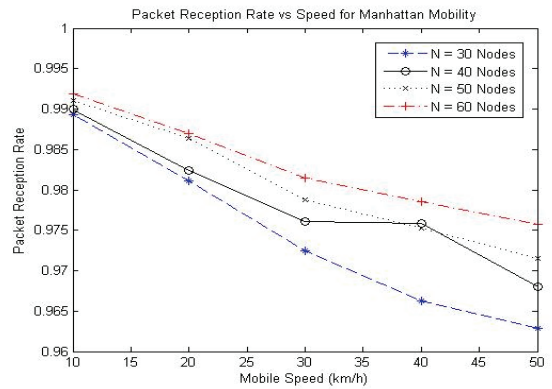


그림 6. 패킷 수신율
Fig. 6 Packet Reception Rate

그림 6은 동일한 이동성 패턴에서 노드의 속도에 따른 패킷 수신율을 보여준다. 위의 링크 붕괴 시간과 반비례하여 주어진 노드수에서 노드의 속도가 증가함에 따라 패킷 수신율이 떨어지고, 또한 주어진 속도에서 노드수가 증가함에 따라 패킷 수신율이 증가함을 알 수 있다. 패킷 수신율이 경로의 연결을 보다 조금은 큰데 이는 링크 붕괴가 일어나더라도 AODV는 출력링크 큐에 버퍼링을 하기 때문에 링크붕괴가 곧 바로 패킷 손실로 이어지는 않는다.

그림 7은 중단간의 지연을 보여준다. 중단간의 지연은 패킷 수신율 보다는 링크 붕괴율과 더 직접적인 연관성을 가진다. 주어진 노드수에 대해 속도의 증가는 링크의 붕괴 가능성을 높이고 이는 패킷들이 큐에 머무는 시간이 길어지므로 지연의 증가로 나타난다. 또한 주어진 속도에서 노드수의 증가는 평균지연의 감소로 이어진다.

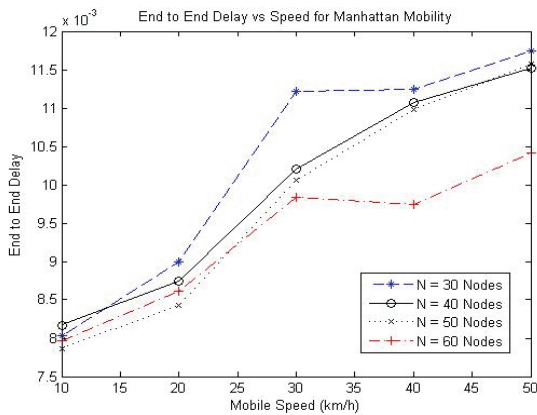


그림 7. 종단간 지연
Fig. 7 End to End delay

V. 결론

본 논문에서는 Ad Hoc 망의 동적인 연결 상태를 측정하는 도구로서 두 노드 사이의 최대 클러스터간 거리가 전파반경을 넘어서는 시간, 즉 링크 붕괴시간 T_i 들의 합 $\sum_i T_i$ 를 척도로 사용할 것을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 척도의 성능을 확인했으며 개별 연결에 대한 척도로서 뿐만 아니라, 평균을 취함으로써 시스템 전체의 특성을 규정짓는 척도로서도 사용할 수 있음을 보였다.

참고 문헌

[1] V. Devarapalli, R. Wakikawa, A. Petrescu, and P. Thubert, "NETwork MOBility (NEMO) basic support protocol," RFC 3963, Jan 2005.

[2] M. Penrose, "On k-connectivity for a geometric random graph", Random Structures and Algorithms. vol. 15, pp.145-164, 1999.

[3] P. Gupta and P. R. Kumar, "Critical power for asymptotic connectivity", in *Proc. IEEE Conf. Decision Control*, Tampa, FL, Dec. 1998, pp. 1106-1110.

[4] L. E. Miller, "Probability of a two-hop connection in a random mobile network," in

Proc. 35th Conf. Inf. Sci. Syst., Baltimore, MD, Mar. 2001.

[5] F. Xue and P. R. Kumar, "The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks," *ACM J. Wireless Netw.*, vol. 10, no. 2, pp. 169-181, Mar. 2004.

[6] C. Bettstetter, "On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network," in *Proc. ACM Int. Symp. MobiHoc*, Lausanne, Switzerland, Jun. 2002, pp. 80-91.

[7] H. Zhang and J. C. Hou, "On the critical total power for asymptotic k-connectivity in wireless networks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, Miami, FL, Mar. 2005, pp. 466-476.

[8] G. W. Flake, R. E. Tarjan, and K. Tsoutsoulouklis, "Minimum cut tree clustering," in *Proc. 1st WAW*, Vancouver, BC, Canada, 2002.

[9] O. Dousse, P. Thiran, and M. Hasler, "Connectivity in ad-hoc and hybrid networks," in *Proc. INFOCOM*, New York, Jun. 2002, pp. 1079-1088.

[10] P. Santi, "Topology control in wireless ad hoc and sensor network", *ACM Computing Surveys*. vol. 37, pp.164-194, 2005.

저자 소개

안 홍 영(정회원)



- 1975년: 서울대학교 전자공학과 (BS)
- 1986년: University of Florida (MS), Department of Electrical and Computer Engineering
- 1991년: University of Florida (Ph.D.), Department of Electrical and Computer Engineering

- 1975년-1984년: 국방과학연구소(ADD) 선임연구원
- 1984년-1991년: Research Assistant, University of Florida, USA
- 1991년-현재: 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과 교수

<관심분야> Wireless Networks, Ad-hoc Networks, Sensor Networks, Wireless Internet, VoIP, 4세대 이동통신, MIMO, OFDM