

무선 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 명시적 분리형 다중경로 라우팅 방법

정회원 오 현 우*, 장 종 현*, 문 경 덕*, 종신회원 김 상 하**

An Energy Efficient Explicit Disjoint Multipath Routing in Wireless Sensor Networks

Hyun-Woo Oh*, Jong-Hyun Jang*, Kyeong-Deok Moon* *Regular Members,*
Sang-Ha Kim** *Lifelong Member*

요 약

기존의 다중경로 설정 방법은 소스로부터 목적지까지 명확하게 분리된 다중경로를 보장하지 못할 뿐만 아니라, 다중경로의 라우팅 정보를 설정하고 유지하기 위한 오버헤드가 많다. 본 논문에서는 다중경로를 설정하는 과정에서 플러딩 방식을 제거하고, 트래픽 부하를 분산시키며, 경로 갱신에 참여하는 노드의 수를 최소화함으로써, 에너지 효율적인 EDM(Explicit Disjoint Multipath) 방식을 제안한다. EDM은 논리적으로 다중경로가 구성될 수 있는 논리적인 파이프라인을 구성하고, 물리적으로 파이프라인을 통해 목적지까지 경유지 기반 지오그래픽 라우팅을 수행한다. EDM은 네트워크 트래픽 부하를 분산시키고, 에너지 소모를 균등화할 수 있으며, 네트워크 생명주기를 연장시킬 수 있다.

Key Words : explicit disjoint multipath routing, anchor, geographic routing, wireless sensor networks

ABSTRACT

Existing multipath routing mechanism has much overhead to maintain the state of nodes on the multipath route and does not guarantees completely disjoint multipath construction from source to destination. In this paper, we propose an Explicit Disjoint Multipath (EDM) routing algorithm to enhance energy efficiency through removing the flooding mechanism for route discovery process, minimizing the number of nodes participating in route update and balancing the traffic load for entire network. EDM constructs logical pipelines which can create disjoint multipaths in logical way. Then it physically performs anchor node based geographic routing along the logical pipeline in order to build multipath to the destination. EDM can provide the distribution effect of traffic load over the network, help to balance the energy consumption and therefore extend the network lifetime.

1. 서 론

무선 센서 네트워크(WSN)는 제한된 배터리를 내

장한 무수히 많은 센서들로 구성되며 특정한 임무를 수행하기 위해 구축된다. WSN에서 다중경로 라우팅은 센싱된 데이터를 목적지까지 신뢰성 있는 데이터

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 IT신성장동력핵심기술개발 사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-010-04, SMMD 기반 유비쿼터스홈 미디어 서비스 시스템 개발]

* 한국전자통신연구원 융합기술연구부분 그린컴퓨팅연구부(hyunwoo@etri.re.kr), ** 충남대학교 컴퓨터공학과
논문번호 : KICS2010-08-420, 접수일자 : 2010년 08월 30일, 최종논문접수일자 : 2010년 11월 26일

전송과 데이터 트래픽 부하의 분산을 위해 많이 사용한다¹⁻³⁾.

그런데, 다중경로가 증척되거나 교차하게 되면 특정 노드의 실패는 다중 경로의 실패로 직결될 수 있다. 또한, 일정 구간의 경로를 다중경로가 중복 사용하게 되면 중복된 경로에 있는 노드들의 에너지 소모가 심화되어 에너지 고갈을 겪는 노드가 발생하게 되고, 이는 전체 네트워크의 생명주기를 줄이는 치명적인 문제가 된다. 그래서 WSN에서 신뢰성 있는 데이터 전송과 데이터 트래픽 부하의 분산을 위해 명확하게 분리된 다중경로 라우팅이 중요하다^{4,5)}.

기존의 분리형 다중경로 라우팅 방법에 관한 연구는 크게 두 가지 유형이 있다. 하나는 다중 경로를 구성하기 위해 전체 네트워크를 대상으로 플러딩(flooding)을 하는 방법이다. 또 다른 방법은 플러딩을 하지 않고 다중경로를 구성하는 방식이다. 플러딩 메커니즘을 사용하는 다중경로 라우팅 방식은 소스 플러딩 방식과 목적지 플러딩 방식으로 세분화 된다. 소스 플러딩 방식은 소스가 방송한 플러딩 메시지를 수신한 목적지가 플러딩 메시지에 기록된 라우팅 경로를 분석하여 분리형 다중경로 설정이 가능한 경로를 찾아 응답 메시지를 전송함으로써 다중경로를 구성한다⁶⁻⁸⁾. 향상된 소스 플러딩 방식은 두 개의 다중경로가 간섭이 되지 않도록 전파 반경 R 만큼의 이격거리를 두고 플러딩 영역을 계산하여 제한된 영역에만 플러딩을 통해 다중경로를 구성한다⁵⁾.

목적지 플러딩 방식은 플러딩을 통해 모든 노드들이 목적지에 이르는 비용을 계산한다. 소스는 목적지까지 이르는 비용을 만족하는 확률적인 기대치를 가지고 다중경로를 통해 데이터를 전송한다^{9,10)}. 또 다른 목적지 플러딩 방식은 목적지를 근원으로 하는 트리를 구성한다. 이 방식은 라우팅을 위한 모든 트리 정보가 관리된다^{11,12)}.

플러딩 메커니즘을 사용하지 않는 다중경로 설정 방식은 소스가 목적지까지 이르는 최단거리를 최초 경로로 찾는다. 소스는 최초 경로 상에 있는 노드들의 이웃한 노드들로 구성되는 다중경로 후보군 영역을 구성하고 후보군 영역에서 최단 거리 경로를 이차적인 다중경로로 선정한다. 이차적인 경로는 최초 경로에 실패가 발생할 때 실패를 복구하기 위한 목적으로 사용된다¹³⁾. 이차 경로는 빠른 실패 복구를 위해 경로를 유지하기 위한 시그널링 오버헤드를 갖는다^{14,16)}.

또 다른 비플러딩 다중경로 설정 방식은 방향성 안테나를 사용하여 다중경로 간에 일정한 이격거리를 유지하면서 목적지까지 다중경로를 설정하는 방식이

다. 이 방법은 방향성 안테나를 이용하여 빔포밍을 형성하고 이들 간의 이격거리를 유지하기 위한 시그널링 오버헤드를 갖는다¹⁷⁾.

지금까지 살펴본 기존의 분리형 다중경로 라우팅 방식에는 몇 가지 문제점들이 있다. 플러딩 방식은 노드의 수가 적은 WSN에서는 실현이 가능할 수 있다. 하지만 통상적으로 WSN은 넓은 영역에 신뢰성 없는 하드웨어 센서 노드를 밀집시켜 구성하기 때문에 플러딩 방식은 센서 구성 밀도가 높을수록 수학적인 복잡도가 급속히 높아지는 NP-Complete 문제에 해당한다. 그럼에도 불구하고 플러딩 메커니즘을 이용하는 이유는 완벽하게 분리형 다중경로를 만들기 위함이다. 하지만 플러딩 방식은 밀집한 WSN에 대해 충분히 고려하지 않았고, 플러딩 전파 속도가 랜덤하기 때문에 완벽하게 분리형 다중 경로 구성을 보장하지 못한다. 또한 다중경로 영역을 제한하여 플러딩 하는 방식은 제한 영역을 계산하고 영역내 플러딩을 완료하기 위한 시그널링 오버헤드를 갖기 때문에 에너지 비용이 많이 드는 문제점이 있다.

비플러딩 다중경로 설정 방식은 어플리케이션에서 요구하는 다중경로를 모두 생성하기까지 지연이 발생하고 부차적인 다중경로를 유지하기 위한 시그널링 오버헤드가 많다.

기존의 분리형 다중경로 라우팅 방식은 완벽하게 분리형 다중경로를 구성할 수 없을 뿐만 아니라, 완벽하게 분리형 다중경로를 구성할 수 있다 하더라도 시그널링 오버헤드에 따른 에너지 비용이 많이 소요되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 휴리스틱 접근 방법에 기반한 명시적 분리형 다중경로(EDM: Explicit Disjoint Multipath) 라우팅 방식을 제안한다. EDM은 논리적으로 명백히 구분되는 다중경로를 구성할 수 있는 논리적인 파이프라인을 구성한다. 그리고 EDM은 물리적으로 논리적인 파이프라인을 따라 목적지까지 다중경로를 설정하기 위해 다중 경유지 기반 지오그래픽 라우팅을 수행한다.

EDM은 논리적으로 명확한 분리형 다중경로 파이프라인을 구성하고 물리적으로 명확한 분리형 다중경로가 설정되도록 소스 측면, 매개 노드 측면, 경유 노드 측면, 목적지 측면에서 차기 포워딩 노드를 결정한다. EDM은 기본적으로 플러딩 메커니즘을 사용하지 않으며, 지역적으로 경로 설정 정보를 교환하여 분산된 다중경로를 결정한다. 이로써, EDM은 명확하게 분리형 다중경로를 구축할 수 있을 뿐만 아니라, 트래픽 부하를 분산시키고, 시그널링 오버헤드를 줄임으로

써, 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다. 본 논문의 구성은 제 2장에서는 제한된 EDM에 대한 논리적인 다중경로 설정 방법을 다룬다. 제 3장에서는 물리적으로 분리형 다중경로를 구축하는 방법을 다룬다. 제 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 방식의 성능을 분석한다. 제 5장에서는 결론을 통해 정리한다.

II. 논리적인 EDM 구성 방법

2.1 EDM의 개념

WSN은 제한된 영역에 미리 정해진 수의 센서 노드를 분포시킴으로써 생성된다. 만일 WSN이 분포 밀도 ρ 를 갖는 수학적 분포함수를 따른다고 가정하면, 임의의 특정 영역 α^2 내에 존재하는 센서의 수 또한 분포함수를 따르게 된다. 본 논문에서 우리는 WSN이 제한된 영역에 센서를 흩어 뿌림으로써 구성된다는 전제 하에 이차원 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 이차원 가우시안 분포는 센서 구현 모델로써 많이 연구되고 있다^[18-20]. Pedersen [18]은 흩어 뿌림 분포를 모델링함에 있어서, 유니폼 분포보다 가우시안 분포가 더 적합한 것을 보였다. Wang [19]는 무작위로 구성되는 무선 센서 네트워크에서 타겟 감지 모델에 대해 포아송 분포보다 가우시안 분포가 더 유리함을 보였다. 우리는 모든 센서가 자신의 위치 정보를 알고 있으며 목적지의 위치를 안다고 가정한다. 또한, WSN은 광범위한 영역을 대상으로 하며 밀집하게 구성된다고 가정한다.

그림 1은 EDM 방식의 개념을 나타낸다.

본 논문에서 우리는 지오그래픽 라우팅 기반 휴리스틱 접근 방법을 이용한다. 만일 소스가 명확하게 분리된 경우 노드를 경유하여 목적지에 도달하도록 다중 경유지를 설정할 수 있다면, 소스는 다중 경유지를 경유하여 목적지에 이르는 명확하게 분리형 다중경로를 구성할 수 있다. 하지만 실제 상황에서 WSN은 센서 노드가 무작위로 흩어 뿌려지기 때문에 일부 영역

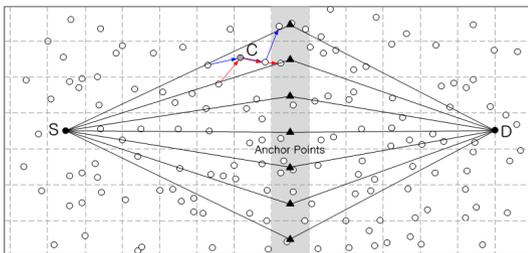


그림 1. 명시적 분리형 다중경로 방식의 개념

에 노드가 존재하지 않는 홀(hole)이 발생할 수도 있고, 포워딩 링크의 실패가 발생할 수도 있으며, 그림 1에서 노드 C와 같이 두 개의 다중경로가 교차되는 노드도 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 논리적인 접근과 물리적인 접근 방법을 이용한다.

2.2 논리적인 EDM 구성 방법

논리적인 EDM 방법은 논리적으로 다중경로가 형성될 수 있는 다중경로 파이프라인을 구성하고, 해당 파이프라인 내에서 하나의 경로가 구성될 수 있도록 유도한다. 논리적인 다중경로 파이프라인 구축을 위해 휴리스틱 접근 방법은 소스와 목적지 사이의 공간을 동일한 정사각형의 격자로 나누어서 행렬로 연결되는 격자들을 모아 하나의 경로가 생성될 수 있는 파이프라인으로 구성한다. 휴리스틱 접근 방법은 각 다중경로가 공통 노드 또는 중첩 경로를 갖지 않는 명시적 분리형 다중경로가 생성될 수 있도록 한다.

그림 2는 논리적인 분리형 다중경로 구성 방법을 나타낸다. 우리는 임의의 크기 α 를 한 번의 길이로 하는 정사각형 영역을 고려한다. 만일 논리적인 EDM이 α^2 의 영역에 적어도 하나 이상의 센서 노드가 존재하도록 α^2 의 영역을 잡을 수 있다면, 소스에서 목적지까지 α^2 의 영역으로 연속되는 파이프라인을 형성할 수 있다. 여기서 α 에 대한 값은 WSN을 구성할 때 오프라인 상에서 계산하여 정한다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 논리적인 EDM은 α^2 영역의 연속체를 소스와 목적지까지 연장함으로써 P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 와 같은 파이프라인을 구성할 수 있다. 이들 파이프라인은 소스에서 목적지까지 적어도 하나의 경로가 구성될 수 있는 다중경로 파이프라인이 된다.

그림 2는 어플리케이션에서 요구하는 다중경로가 5개인 경우이다. 논리적으로 구성되는 경로 P_1 은 소스와 목적지간 최단거리 경로를 구성할 수 있다. 이 경우 소스는 목적지를 향하여 지오그래픽 라우팅을 통해 라우팅 경로를 구성한다. 논리적인 EDM은 최단거리 P_1 경로를 첫째다 다중경로 파이프라인이라 한다.

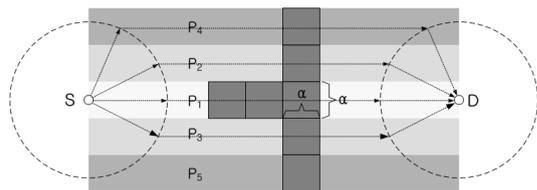


그림 2. 논리적인 분리형 다중경로 구성 방법

P_2 와 P_3 은 최단거리 경로로부터 α 거리만큼 떨어진 영역에서 구성이 되며 이를 둘째단 다중경로 파이프라인이라 한다. 둘째단 다중경로 P_2, P_3 을 구성할 때, 소스는 둘째단 다중경로 파이프라인에 이르는 방향에서 차기 포워딩 노드를 결정한다. 포워딩 과정은 일단 해당하는 단의 다중경로 파이프라인에 접근하게 되면 이후부터는 다중경로 파이프라인 내에서 경로를 구성하며 목적지까지 데이터 패킷을 전달하게 된다. 목적지 측면에서도 몇째단 다중경로 파이프라인 인지에 따라 목적지로 향하는 방향성을 결정할 수 있다. 다중경로 파이프라인에서 목적지로 향하는 진입각은 소스 측면에서 다중경로 파이프라인으로 향하는 배출각을 이용한다.

논리적인 EDM 구성 방법의 도전적인 이슈는 다중경로를 구성할 수 있는 논리적인 다중경로 파이프라인을 구분하기 위한 최소 단위 α 를 구하는 것이다. 우리는 수학적 접근 방법을 이용하여 적어도 하나의 센서가 존재하게 될 α 의 최소값을 구한다. WSN은 수학적 접근을 위해 이차원 가우시안 분포함수를 따른다고 가정한다. 기존 논문에서는 유니폼 분포를 가정하는 경우가 많으나, 센서 노드를 흩어 뿌리는 경우에는 이차원 가우시안 분포함수를 따른다고 가정하는 것이 합리적이다. 우리는 WSN에서 임의의 α^2 영역을 선택한다. 선택한 α^2 영역은 센서 노드의 밀집도 ρ 를 갖는 가우시안 분포의 확률 밀도 함수(pdf: probability density function)를 따른다. 이차원 가우시안 분포의 확률 밀도 함수는 수식 (1)과 같이 주어진다.

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_X\sigma_Y\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\left(\frac{x-\bar{X}}{\sigma_X}\right)^2 - 2\rho\frac{(x-\bar{X})(y-\bar{Y})}{\sigma_X\sigma_Y} + \left(\frac{y-\bar{Y}}{\sigma_Y}\right)^2\right]\right\} \quad (1)$$

수식(1)에서 σ 는 표준편차이고, ρ 는 밀집도이며 \bar{X} 와 \bar{Y} 는 평균을 나타낸다. 이차원 가우시안 분포는 좌표계의 원점을 기준으로 하며, 센터 (\bar{X}, \bar{Y}) 는 $(0, 0)$ 이 된다. 이들 값들은 WSN를 구축하기 위한 디자인 단계에서 주어지는 값이며, Wang [20]은 노드수 400과 표준편차 40을 주었다. 만일 어플리케이션에서 요구하는 다중경로의 수 K 가 홀수라고 하자. 첫째단 파이프라인은 소스와 목적지간 최단거리를 구성할 수 있는 다중경로 P_1 파이프라인이 된다. 그림 3은 P_1 파이프라인에 대한 수학적 접근을 나타낸다.

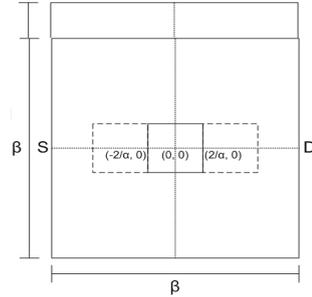


그림 3. P_1 파이프라인 영역매핑

전체 WSN 영역을 $\beta \times \beta$ 라고 가정하고, 소스와 목적지를 잇는 선분의 중심을 $(0, 0)$ 좌표에 매핑하자. 그리고 $(0, 0)$ 를 중심으로 하는 α^2 영역을 $A_{(0, 0)}$ 라고 하자. 그러면 $A_{(0, 0)}$ 영역에 센서 노드가 존재할 확률 $P_{A_{(0, 0)}}$ 은 수식 (2)와 같다.

$$P_{A_{(0, 0)}} = \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} \int_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} f(x, y) dx dy \quad (2)$$

따라서 전체 노드수 N 에 대해 $A_{(0, 0)}$ α^2 영역에 적어도 하나 이상의 센서 노드가 존재하게 될 α 의 기대치는 수식 (3)과 같다.

$$N \cdot P_{A_{(0, 0)}} \geq 1 \quad (3)$$

우리는 WSN 영역의 한 변의 길이 β 는 α^2 영역의 연속체로 구성되도록 하기 위해 수식 (4)과 같이 α 의 배수라고 가정한다.

$$\beta = (2n + 1)\alpha, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

우리는 $A_{(0, 0)}$ 영역에 센서 노드가 존재할 확률 $P_{A_{(0, 0)}}$ 에 대한 수식을 모든 α^2 영역에 센서 노드가 존재하게 될 확률로 일반화 한다. 수식의 전개를 간략화 하기 위해 수식 (5)과 같은 새로운 기호를 사용한다.

$$\prod_{i=-n}^n A_{\alpha_i} = A_{\alpha_1} \times A_{\alpha_2} \times \dots \times A_{\alpha_n} \quad (5)$$

전체 α^2 영역에 대한 센서 존재 확률은 각 α^2 영역의 센서 존재 확률의 곱으로 표현된다. WSN 네트워크의 모든 α^2 영역에 센서 노드가 존재하게 될 확률 P_{AT} 은 수식 (6)과 같다.

$$P_{AT} = \prod_{i=-n}^n \prod_{j=-n}^n \int_{(i-\frac{1}{2})\alpha}^{(i+\frac{1}{2})\alpha} \int_{(j-\frac{1}{2})\alpha}^{(j+\frac{1}{2})\alpha} f(x, y) dx dy \quad (6)$$

모든 α^2 영역은 상호간에 독립적이다. 모든 α^2 영역에 센서가 존재할 확률을 기반으로 모든 α^2 영역에 적어도 하나 이상의 센서가 존재하게 될 α 의 최소 기대치는 각 α^2 영역마다 다를 수 있다. 동적인 α 의 최소 기대치는 추후 연구 과제이다. 본 논문에서는 모든 α^2 영역에서 적어도 하나 이상의 센서가 존재하게 될 α 의 최소 기대치를 통계적인 접근방식으로 95% 신뢰도에 표준오차 5%의 오차범위 내에서 α 의 값을 계산한다. α 의 최소 기대치는 WSN를 구성할 때 외부적으로 계산을 하여 주어질 수 있기 때문에 센서들에게 컴퓨팅 오버헤드를 요구하지 않는다.

그림 2에서 소스로부터 목적지까지 최단거리의 파이프라인 P_1 은 적어도 하나 이상의 센서 노드가 존재하는 α^2 영역의 연속체이다. 따라서, $P_k(k=2,3,\dots, K)$ 파이프라인은 소스로부터 목적지까지 적어도 하나의 다중경로를 구축할 수 있다. 그러므로 소스는 이격거리 α 를 갖는 가상의 경유지를 지정하고, 소스로부터 다중경로를 구성할 때 가상의 경유지를 경유하여 목적지에 이르도록 하면, 소스로부터 목적지까지 명시적 분리형 다중경로를 구축할 수 있다.

그림 4는 가상 경유지를 경유하여 구성되는 다중경로 라우팅을 나타낸다. 만일 소스가 어플리케이션으로부터 3개의 다중경로를 이용하여 데이터 전송을 요구받는다면, 소스는 목적지까지의 위치 정보를 기반으로 S와 D간의 중간 지점에서 α 간격의 가상 경유지 V_{ap1} , V_{ap2} , V_{ap3} 을 잡는다. V_{ap1} , V_{ap2} , V_{ap3} 가상 경유지는 P_1 , P_2 , P_3 경로를 명확하게 분리형 다중경로로 구축하기 위한 기준점이 된다. 소스는 어플리케이션에서 요구되는 다중경로의 수가 홀수인지 짝수인지를 구별하여 가상 경유지를 계산한다. 만일 다중경로의 수가 홀수이면 소스는 수식 (7)과 같이 가상 경유지를 결정한다.

$$V_{ap1} = location[d(S:D)/2]$$

$$V_{ap2} = location\left\{d\left[V_{ap1} : (V_{ap1} + \alpha)^{+Orthogonal\perp(S:D)}\right]\right\} \quad (7)$$

$$V_{ap3} = location\left\{d\left[V_{ap1} : (V_{ap1} + \alpha)^{-Orthogonal\perp(S:D)}\right]\right\}$$

단, $d(S:D) = \sqrt{(x_D - x_S)^2 + (y_D - y_S)^2}$

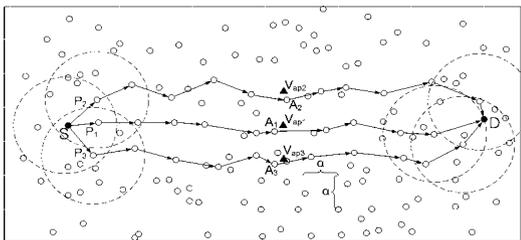


그림 4. 가상 경유지를 통한 다중경로 라우팅

수식 (7)에서 $d(S:D)$ 는 소스로부터 목적지까지 거리를 나타낸다. 만일 다중경로 K 의 값이 짝수이면 소스와 목적지를 잇는 선분을 기준으로 $\alpha/2$ 만큼 이격거리를 두고 V_{ap1} 과 V_{ap2} 를 결정한다. 소스는 전송하는 데이터 패킷 헤더에 자신의 위치, 목적지 위치, 그리고 가상 경유지 위치를 기록하여 3개의 다중경로로 포워딩 한다. 포워딩 과정에서, 매개 노드는 가상 경유지를 목적지로 하여 지오그래픽 라우팅을 수행한다. 소스가 정한 가상 경유지는 이론적으로 결정한 위치이기 때문에 가상 경유지에 센서 노드가 존재할 수도 있고 존재하지 않을 수도 있다. 하지만 가상 경유지를 중심으로 α^2 영역은 적어도 하나 이상의 센서 노드를 갖는다. 따라서 가상 경유지까지 도달한 포워딩 과정은 가상 경유지 α^2 영역내에 존재하는 임의의 센서 노드를 경유 노드로 결정한다. 그림 4에서 A_1 , A_2 , A_3 는 P_1 , P_2 , P_3 의 경유 노드이다. 경유 노드는 데이터 패킷 헤더에서 가상 경유지 위치를 제거하고 목적지를 향하여 데이터를 포워딩 한다. 논리적인 EDM 구성 방법은 이격거리를 갖는 가상 경유지를 경유하여 다중경로를 구성함으로써, 명확한 분리형 다중경로를 구축하고, 다중경로를 검색하기 위한 플러딩 오버헤드를 제거한다.

III. 물리적인 EDM 구성 방법

3.1 소스측면 물리적인 EDM 구성 방법

우리는 앞 장에서 논리적으로 명확한 분리형 다중경로 구성 방법에 대하여 설명하였다. 그런데 논리적으로 명확한 분리형 다중경로는 소스와 목적지에서 다중경로가 모이지거나 중첩될 수 있다. 이러한 문제를 해결하고 소스로부터 목적지까지 완벽하게 분리형 다중경로를 구축하기 위해, 물리적인 EDM 구성 방법은 소스측면, 매개 노드 측면, 경유 노드측면 그리고 목적지 측면에서 명확한 분리형 다중경로를 구축한다.

그림 5는 소스 측면에서 물리적으로 명확한 분리형 다중경로를 구성하는 방법을 나타낸다. 소스 S가 다중경로 구축을 위해 가상 경유지를 결정할 때 다중경로



그림 5. 소스측면 물리적으로 명확한 분리형 다중경로 구성 방법

간의 이격 거리가 매우 큰 α 를 잡을 수 있다. 하지만 이런 경우 명확하게 분리형 다중경로를 구성할 수는 있지만 패킷 전송 지연이 증가하는 문제가 발생한다. EDM은 명확하게 분리형 다중경로를 구축할 뿐만 아니라, 패킷 전송 지연을 최소화한다.

소스 S는 어플리케이션에서 요구한 다중경로 수만큼 가상 경유지를 결정한다. 가상 경유지는 S와 D간 거리의 중간 지점에 위치하며, 다중경로 가상 경유지 간에 이격 거리는 α 가 된다. 소스는 단일홉 내에서 다중경로 수를 고려하여 섹터를 나눈다. 소스는 반지름 R과 현의 길이가 α 가 되는 θ 값을 정한다. θ 값은 소스의 통신 전파 영역내에서 K개의 다중경로를 구성하기 위한 섹터 범위를 구별한다. 반지름 R과 중심각 θ 로 이루어지는 부채꼴의 면적을 S_{mp_zone} 이라고 할 때 $S_{mp_zone} \geq \alpha^2$ 를 만족하는 S_{mp_zone} 영역은 적어도 하나 이상의 센서 노드를 갖는다. 소스는 중심각 θ 로 분리되는 영역 단위로 다중경로를 구축한다.

소스는 최초 다중경로를 최단 경로로 P_1 을 선택하여 데이터를 포워딩 한다. 다중경로 P_1 은 첫째단 다중경로이다. 두 번째단부터 다중경로 영역을 계산하기 위해 우리는 S와 D를 잇는 선분을 직교좌표계에 매핑한다. S와 D를 잇는 선분은 $y=ax+b$ 의 수식을 따르게 된다. S와 D를 잇는 선분은 첫째단 다중경로의 가상 최단 거리가 된다. 소스는 첫째단 다중경로 영역을 제외한 $\lceil (k+1)/2 \rceil$ 번째단 다중경로 영역을 통해 다중경로를 구축할 때에는 P_k 에 대한 논리적인 파이프라인에 도달할 때까지 θ 값을 갖는 S_{mp_zone} 을 유지하며 데이터 포워딩을 수행한다. 만일 K 값이 홀수인 경우 $\lceil (k+1)/2 \rceil$ 번째 단 다중경로 영역에 도달하기 까지 θ 값을 갖는 S_{mp_zone} 을 유지해야 하는 판단은 수식 (8)을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{y_D - y_S}{x_D - x_S} X - (i+1)\alpha \sqrt{\left(\frac{y_D - y_S}{x_D - x_S}\right)^2 + 1} \\ & \leq P_{odd}^{\lceil (i+1)/2 \rceil \text{ th - Tier Mltipath Zone}} \quad (8) \\ & \leq \frac{y_D - y_S}{x_D - x_S} X - i\alpha \sqrt{\left(\frac{y_D - y_S}{x_D - x_S}\right)^2 + 1} \end{aligned}$$

소스는 $\lceil (k+1)/2 \rceil$ 번째단 다중경로 영역을 통해 다중경로를 구축하는 과정에서 차기 포워딩 노드를 지정하고 논리적인 파이프라인에 도달하지 않았다면 S_{mp_zone} 를 유지하도록 권고한다. P_k 에 대한 논리적인 파이프라인에 도달한 매개 노드는 S_{mp_zone} 를 더 이

Anchor	Destination	Source
Path ID	Angle	Reinforcement
Payload		

그림 6. 데이터 패킷 포맷

상 유지하지 않고 가상 경유지를 향하여 지오그래픽 라우팅을 수행한다.

그림 6은 소스가 전송하는 데이터 패킷 헤더 포맷을 나타낸다. 기존의 다중경로 라우팅을 수행하는 소스는 기본적으로 다중경로를 인식하기 위한 다중경로 ID, 자신과 목적지에 대한 위치 정보, 차기 포워딩 노드의 위치정보 그리고 소스에서 목적지까지 다중경로 루트 정보를 패킷에 포함하여 포워딩한다. 이와는 달리 제안된 EDM에 의한 소스는 차기 포워딩 노드 대신에 가상 경유지 정보를 포함하고 다중경로 루트 정보 대신에 다중경로 부채꼴 영역을 구별하기 위한 중심각 값과 S_{mp_zone} 영역을 유지하기 위한 플래그를 포함한다. 중심각 값과 보강(reinforcement) 필드는 상수 값과 플래그 비트로써, 위치 정보나 루트 정보에 비해 상대적으로 매우 작다. 따라서 기존의 다중경로 라우팅 방식에서 사용하는 패킷 헤더보다 작은 사이즈의 패킷 헤더를 구성할 수 있다.

소스는 $\lceil (k+1)/2 \rceil$ 번째단 다중경로 영역을 통해 다중경로를 구축할 때, 보강 플래그 비트를 설정하여 패킷을 전송한다. 소스가 전송한 다중경로 라우팅 패킷을 수신한 매개 노드는 패킷 헤더에서 보강 플래그 비트를 체크한다. 만일, 보강 플래그 비트가 설정되어 있으면, 매개 노드는 자신이 P_k 에 대한 논리적인 파이프라인 위치에 있는지 여부를 체크한다. 만일, 자신의 위치가 P_k 에 대한 논리적인 파이프라인에 있으면, 매개 노드는 보강 플래그 비트를 해제하고 가상 경유지를 향하여 지오그래픽 라우팅을 수행한다. 반면 자신의 위치가 P_k 에 대한 논리적인 파이프라인에 있지 않으면, 매개 노드는 중심각 θ 값을 이용하여 S_{mp_zone} 를 유지하며 차기 포워딩 노드를 결정한다. 만일 보강 플래그 비트가 해제되어 있으면, 매개 노드는 전형적인 지오그래픽 라우팅을 수행한다.

3.2 매개노드 측면 물리적인 EDM 구성 방법

물리적인 EDM 구성 방법은 이론적으로 분리된 영역을 따라 지오그래픽 라우팅을 수행하기 때문에 물리적으로도 분리형 다중경로가 구성되어야 한다. 하지만 실제 환경에서 센서 노드는 랜덤하게 위치하고, 지

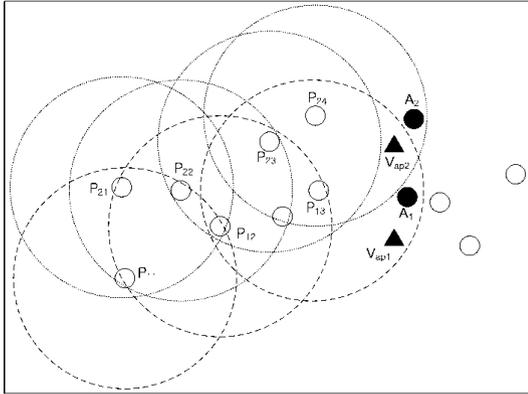


그림 7. 물리적인 분리형 다중경로 구성을 위한 마킹 방법

오그래픽 라우팅 특성에 따라 특정 센서 노드는 다중의 다중경로에 의해 차기 포워딩 노드로 공유될 수 있다. 왜냐하면, 지오그래픽 라우팅은 목적지로부터 최단 거리에 있는 노드를 차기 포워딩 노드로 선택하기 때문이다. EDM은 지오그래픽 라우팅 과정에서 다중 경로 상에 공유되는 노드가 존재하지 않는 명확하게 분리형 다중경로를 구성하기 위해 마킹 기법을 이용한다. 그림 7은 물리적인 분리형 다중경로 구성을 위한 마킹 방법을 나타낸다.

$P_{ij}(i=1,2,3,\dots, k; j=1, 2, 3, \dots, n)$ 는 i 번째 다중경로 상에 j 번째 포워딩 노드를 의미한다. V_{ap1} 은 P_1 에 의해 정해진 가상 경유지이며 V_{ap2} 는 P_2 에 의해 결정된 가상 경유지이다. P_{11} 은 소스로부터 P_1 다중경로를 구성하는 첫번째 차기 포워딩 노드이다. P_{11} 은 지오그래픽 라우팅을 수행하며 V_{ap1} 로부터 최단거리에 있는 P_{12} 를 P_1 다중경로에 의한 차기 포워딩 노드로 선택한다. P_{12} 노드는 자신을 P_1 다중경로 루트 상에 존재하는 노드로 마킹한다. P_{21} 은 P_2 다중경로를 구성하는 첫번째 포워딩 노드이다. P_{21} 은 V_{ap2} 를 목적지로 지오그래픽 라우팅을 수행하여 P_{12} 를 차기 포워딩 노드로 검토한다. P_{12} 노드는 P_{21} 노드에게 자신이 P_1 다중경로에 의해 마킹 되었음을 매우 짧은 패킷을 통해 통보한다. P_{21} 은 P_{12} 가 다른 다중경로 루트 상에 마킹 되었음을 알게 되고 P_{22} 를 차기 포워딩 노드로 선택한다. 동일한 방법에 의해 P_{12} 는 P_{13} 을 P_1 다중경로 루트 상의 노드로 마킹한다. 따라서 P_2 에 의한 다중경로는 $P_{21}, P_{22}, P_{23}, P_{24}$ 를 마킹하며 구성된다.

3.3 경유노드 측면 물리적인 EDM 구성 방법

그림 7에서 P_{13} 은 P_1 다중경로 상에서 가상 경유지 V_{ap1} 에 도달하기 직전의 노드이다. P_{13} 은 논리적인 가상 경유지에 노드가 있다고 가정했다. 하지만 가상 경

유지에 물리적으로 경유 노드가 없을 수 있다. 그렇지만 V_{ap1} 을 중심으로 α^2 영역내에는 적어도 하나 이상의 센서 노드가 존재한다. P_{13} 은 P_1 다중경로 루트 상의 경유 노드를 결정함에 있어서 가상 경유지 V_{ap1} 에서 α^2 영역내에 존재하는 노드 중에 배터리 파워가 가장 센 노드를 경유 노드로 선택한다. P_{13} 은 P_1 다중경로에 대한 경유 노드로서 A_1 노드를 선택하고 P_{24} 는 P_2 다중경로에 대한 경유 노드로서 A_2 를 결정한다.

A_1 과 A_2 경유 노드는 패킷 헤더에서 가상 경유지 정보를 제거하고 목적지를 향해 지오그래픽 라우팅을 수행한다. 지오그래픽 라우팅은 목적지에서 소스에서와 마찬가지로 다중경로가 모이지거나 중첩될 수 있다. EDM은 목적지 측면에서도 분리형 다중경로를 보장하기 위해 소스에서 중심각 θ 를 갖는 부채꼴의 S_{mp_zone} 를 고려한 것처럼 목적지에서도 역방향 부채꼴의 S_{mp_zone} 를 기반으로 분리형 다중경로를 구축한다.

이를 위해 경유노드 $A_i(i=1,2,3,\dots, k)$ 는 패킷 헤더의 중심각 θ 값을 기반으로 목적지를 중심점으로 하고 경로 ID를 고려한 중심각을 갖는 부채꼴의 연장선이 P_i 의 논리적인 파이프라인 정점에 도달하는 가상의 지점을 가상 목적지로 계산한다. A_i 는 패킷 헤더의 가상 경유지 필드에 가상 경유지 정보를 제거하는 대신 가상 목적지를 추가한다. 이후로부터 A_i 를 비롯한 목적지까지 이르는 다중경로 상의 매개 노드는 가상 목적지를 향하여 지오그래픽 라우팅을 수행한다.

3.4 목적지 측면 물리적인 EDM 구성 방법

그림 8은 목적지 측면에서의 분리형 다중경로 구성 방법을 나타낸다. 경유 노드는 가상 목적지까지 지오그래픽 라우팅이 수행한다. 가상 목적지 V_{dpi} 는 i 번째 다중경로가 분리형 다중경로를 만족하도록 하는 가상 목적지이다. V_{dpi} 를 중심으로 하는 α^2 영역내에는 적어도 하나 이상의 센서 노드가 존재한다. V_{dpi} 에 도달하기 직전의 매개 노드는 V_{dpi} 중심의 α^2 영역에 존재하는 센서 중 배터리 전력이 가장 많이 남은 센서를 가상 목적지 노드로 선택한다. 가상 목적지 노드는 패킷 헤더에서 가상 목적지 정보를 제거하고 실제 목적지



그림 8. 목적지 측면 EDM 구성 방법

를 향해 중심자 θ 의 역방향 S_{mp_zone} 를 유지하며 포위당 한다.

이로써, 물리적인 EDM 구성 방법은 소스 측면, 매개 노드 측면, 경유 노드 측면, 목적지 측면에서 명확하게 분리형 다중경로를 구축한다. EDM은 소스로부터 목적지까지 분리형 다중경로를 구성함에 있어서, 명시적으로 분리형 다중경로를 구축할 수 있을 뿐만 아니라, 지역적이고 분산적인 정보 교환을 이용하여 명확하게 분리형 다중경로를 구축한다. 또한, EDM은 센싱된 데이터를 포위당하면서 동시에 분리형 다중경로를 구성하는 이점이 있다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 EDM은 논리적으로 명확한 분리형 다중경로를 제시함으로써, 소스로부터 목적지까지 완벽하게 명시적인 분리형 다중경로를 구축할 수 있다. 우리는 시뮬레이션을 통해 EDM의 성능을 입증한다. WSN은 전쟁터에서 적군을 감지하기 위해 일정 영역에 센서 노드를 흩어 뿌려서 구축한다. 흩어 뿌리는 방식은 특정 영역의 중심지점을 중심으로 분포하게 되며 일반적으로 이차원 가우시안 분포함수를 따르게 된다. WSN은 밀집도 ρ 를 갖는 이차원 가우시안 분포함수를 따른다. 데이터 전송을 위한 다중경로는 소스로부터 목적지까지 범위가 유효하다. 시뮬레이션을 위해 WSN은 소스와 목적지를 양끝 단으로 하고, 소스와 목적지를 잇는 선분이 대칭 구도의 기준선이 되는 직사각형 구조를 가정한다. WSN은 $1 \times 1\text{Km}$ 영역에 구축되며 센서 노드는 50개부터 1,000개까지 가변적인 값으로 한다. 시뮬레이션은 Qualnet를 이용하였으며 노드의 통신 가능 영역 R 은 어플리케이션에서 요구하는 다중경로의 수를 구분할 수 있을 만큼의 센서 노드를 포함할 수 있도록 잡았다.

그림 9는 시그널링 오버헤드를 나타낸다. EDM은 WSN이 밀집하면 밀집할수록 다중의 가상 경유지 간의 이격 거리를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 지오그래픽 라우팅 기반의 다중경로 구성에 이용되는 노드의 수도 줄어들 수 있다. 반면 기존 방식들은 플러딩을 기반으로 하기 때문에 WSN의 노드 수가 많아질수록 다중경로를 생성하기 위한 시그널링 오버헤드와 복잡도가 늘어나게 된다.

그림 10은 전체적인 에너지 소모를 나타낸다. 전체적인 에너지 소모는 특정 자국을 센싱한 소스가 다중경로 검색 과정을 통하여 생성된 다중 경로를 이용하여 센싱 데이터를 전송하기까지 센서 노드에서 소모

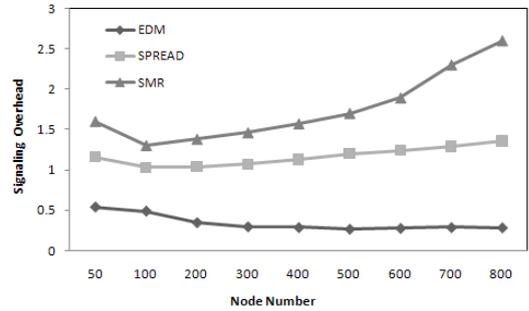


그림 9. 시그널링 오버헤드

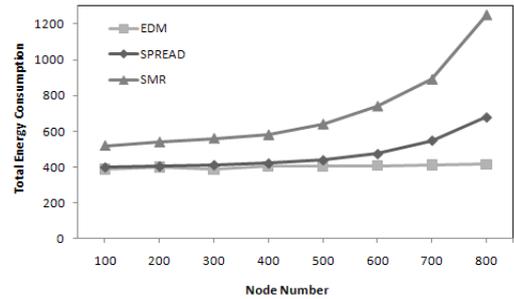


그림 10. 전체적인 에너지 소모

되는 전체 에너지 소모를 나타낸다. EDM은 센서 노드가 많을수록 다중경로의 구성이 쉽고 다중경로의 경로가 짧아질 수 있기 때문에 소모되는 전체 에너지는 일정한 값으로 수렴한다.

그림 11은 전체적인 다중경로 데이터 전송 시간을 나타낸다. 이것은 WSN의 노드의 수를 300개로 고정한 상태에서 어플리케이션에서 요구되는 다중경로의 개수에 따라 다중경로를 구축하고 센싱 데이터를 전송하여 목적지에 수신되기까지 걸리는 시간을 의미한다. EDM은 명시적으로 다중경로를 제시하기 때문에 다중경로 검색을 위한 시그널링 및 다중경로 결정 시간이 기존 연구에 비해 현저히 줄어든다. 반면 기존

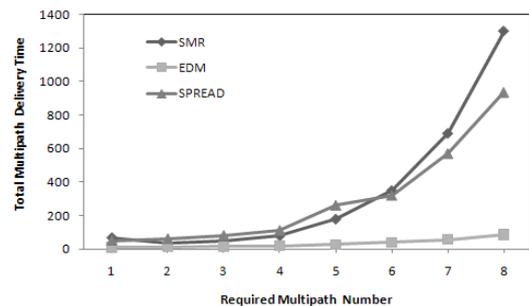


그림 11. 전체적인 다중경로 데이터 전송시간

SMR은 플러딩을 이용하여 어플리케이션에서 요구되는 다중경로를 목적지에서 찾는 시간과 소스까지 다중경로를 선택하는 시간이 소모된다. SPREAD는 최초 최단거리 경로를 찾고 어플리케이션에서 요구하는 다중경로를 구성하기까지 소모되는 시간이 많다.

그림 12는 각 노드에서 소요되는 평균 전송 데이터 패킷의 수를 나타낸다. 평균 전달 패킷의 수는 WSN에 발생하는 다중경로 패킷이 많아짐에 따라 다중경로 라우팅에 이용되는 노드가 평균적으로 전달하는 패킷의 수를 나타낸다. 기존 방식은 다중경로를 구성하기 위한 시그널링 패킷과 센싱 데이터를 전송하는 패킷의 수의 합을 나타낸다. EDM은 센싱데이터를 전송함과 동시에 다중경로를 구성하기 때문에 별도의 시그널링 패킷에 의한 패킷 증가가 없다.

그림 13은 분리형 다중경로의 정확도를 나타낸다. 우리는 기존의 다중경로 라우팅 성능을 보다 좋게 함과 동시에 얼마나 분리형 다중경로를 잘 구성하였는가를 보여준다. 분리형 다중경로의 정확도는 WSN에 실패가 발생하는 비율에 따라 실패가 발생한 다중경로를 재구성하여 전송 중에 있던 데이터 패킷을 목적지까지 전송하는 비율을 나타낸다. EDM은 다중경로 상에서 전송 중에 실패가 발견되면, 실패를 인식한 노

드를 가상의 소스 노드로 삼고 EDM의 논리적으로 분리형 다중경로 구성 방법과 물리적으로 분리형 다중경로 구성 방법을 적용하여 다중경로를 복구한다. 이때 재구성되는 다중경로는 트래픽 부하를 분산시키기 위해 이전 다중경로에서 최대한 멀리 떨어진 위치에서 대체 다중경로를 구성하여 실패가 발생한 다중경로 보다 더 우회하게 된다.

그림 14는 다중경로 라우팅의 성능을 나타낸다. 다중경로 라우팅 성능은 시뮬레이션을 수행하는 시간에 따라 다중경로 3개를 구성하고 센싱 데이터를 목적지까지 성공적으로 데이터를 전송하는 성능 비율을 나타낸다.

그림 15는 데이터 패킷의 전송률을 나타낸다. 데이터 패킷 전송률은 WSN에 발생하는 링크 손실률에 따른 다중경로 패킷을 목적지까지 전송하는 비율을 나타낸다. EDM은 WSN의 링크 손실률이 50%이하에서 데이터 전송률이 97%이상을 보장한다.

시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있듯이 EDM은 명시적으로 다중경로를 제시함으로써 다중경로 검색 과정에서 발생하는 플러딩 오버헤드를 제거하고, 철저하게 지역적으로 라우팅 정보를 교환하고, 분산된 다중경로 결정을 수행하여 다중경로를 구성함으로써, 다중경로 라우팅에 대한 성능뿐만 아니라 에너지 소모를

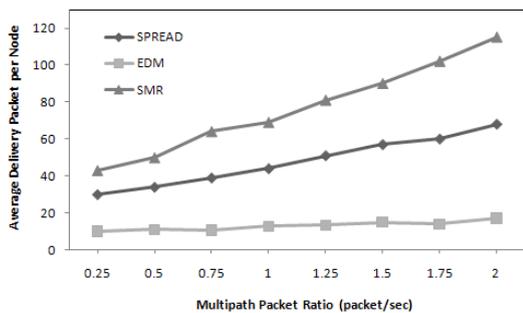


그림 12. 노드당 평균 전송 패킷 수

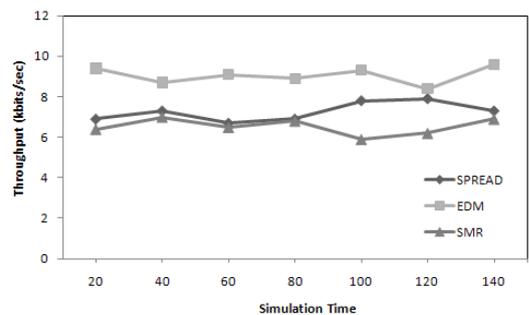


그림 14. 다중경로 라우팅 성능

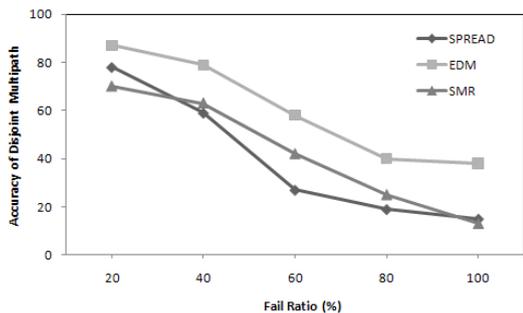


그림 13. 분리형 다중경로 정확도

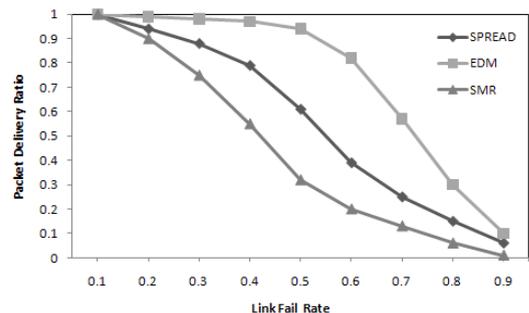


그림 15. 데이터 패킷 전송률

줄이고, 최종적으로는 전체 네트워크의 생명주기를 연장시키는 성능의 향상을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서, 우리는 기존의 분리형 다중경로 구성 방법에서 몇 가지 문제점을 도출했다. 기존 방식의 문제점을 정리하면 오버헤드가 많고 다중경로를 효율적으로 구성할 수 없으며, 명확하게 분리형 다중경로 구성을 보장하지 못하고, 에너지 소모가 많다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 우리는 소스로부터 목적지까지 명확하게 분리형 다중경로 구성 방법(EDM)을 제안한다. EDM은 논리적으로 가상 경유지를 정함으로써 명시적인 다중경로가 구성될 수 있는 통로를 제공함으로써 플리딩 오버헤드를 제거한다. EDM은 지오그래픽 라우팅을 기반으로 지역화된 정보 교환을 이용한다. EDM은 어플리케이션에서 요구하는 K개의 다중경로에 대해 분산화된 다중경로 결정 방식을 수용한다. EDM은 다중경로를 센싱 데이터를 전송하는 단계에서 구축하기 때문에 K개의 다중경로를 구축하고 데이터를 전송하기까지 지연시간이 현저히 짧다.

이와 같은 특징을 갖는 EDM은 명확하게 분리형 다중경로를 제공하면서 다중경로 라우팅의 효율성을 향상시킬 뿐만 아니라 각 노드에서 소모되는 에너지를 줄임으로써 전체 네트워크의 생명주기를 연장시킨다. 우리는 시뮬레이션을 통해 EDM의 성능을 입증하였으며 기존 분리형 다중경로 라우팅 방법에 비해 20~30%의 성능 개선이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] S. Waharte and R. Boutaba, "Totally Disjoint Multipath Routing in Multihop. Wireless Networks", IEEE ICC, pp.5576-5581, June 2006.

[2] D. Ganesan, R. Govindan, S. Shenker and D. Estrin, "Highly-Resilient, Energy-Efficient Multipath Routing in Wireless Sensor Networks", Mobile Computing and Communications Review, Vol. 1, No. 2, 2001.

[3] E. P. C. Jones, M. Karsten and P. A. S. Ward, "Multipath Load Balancing in Multi-hop Wireless Networks", IEEE WiMob, pp.158-166, October 2005.

[4] A. Srinivas and E. Modiano, "Finding Minimum Energy Disjoint Paths in Wireless Ad-Hoc Networks", Wireless Networks, pp.401-417, 2005.

[5] Z. Wang, E. Bulut and B. K. Szymanski, "Energy Efficient Collision Aware Multipath Routing for Wireless Sensor Networks", IEEE ICC, June 2009.

[6] S. J. Lee and M. Geria, "Split Multipath with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks, IEEE ICC, pp.3201-3205, 2001.

[7] X. Li and L. Cuthbert, "A Reliable Node-Disjoint Multipath Routing with Low Overhead in Wireless Ad hoc Networks", ACM MSWiM, pp.230-233, October 2004.

[8] R. Xiuli and Y. Haibin, "A Novel Multipath Disjoint Routing to Support ad Hoc Wireless Sensor Networks", IEEE ISORC, April 2006.

[9] F. Ye, G. Zhong, S. Lu and L. Zhang, "GRADient Broadcast: A Robust Data Delivery Protocol for Large Scale Sensor Networks", Wireless Networks, pp.285-298, 2005.

[10] P. Huang, H. Chen, G. Xing and Y. Tan, "SGF: A State-Free Gradient-Based Forwarding Protocol for Wireless Sensor Networks", ACM Tans. on Sensor Networks, Vol. 5, No. 2, Article 14, pp.1-25, March 2009.

[11] W. Lou, W. Liu, Y. Fang, "SPREAD: Enhancing Data Confidentiality in Mobile Ad Hoc Networks", IEEE INFOCOM, pp.2404-2413, 2004.

[12] W. Lou, "An Efficient N-to-1 Multipath Routing Protocol in Wireless Sensor Networks", IEEE MASS, November 2005.

[13] H. Alwan and A. Agarwal, "A Survey on Fault Tolerant Routing Techniques in Wireless Sensor Networks", Proc. of 3th International Conference on Sensor Technologies and Applications, pp.366-371, 2009.

[14] M. Maimour, "Maximally Radio-Disjoint Multipath Routing for Wireless Multimedia Sensor Networks", ACM WMuNeP, pp.26-31, October 2008.

[15] J. Y. Teo, Y. Ha and C. K. Tham, "Interference-Minimized Multipath Routing with

Congestion Control in Wireless Sensor Network for High-Rate Streaming”, IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol.7, Issue9, pp.1124-1137, Sept. 2008.

- [16] S. J. Baek and G. Veciana, “Spatial Energy Balancing Through Proactive Multipath Routing in Wireless Multihop Networks”, IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol.15, pp.93-104, February 2007.
- [17] T. Ueda, S. Tanaka, B. Komiyama, S. Roy and D. Saha, “ACR: An Adaptive Communication-Aware Routing through Maximally Zone-Disjoint Shortest Paths in Ad Hoc Wireless Networks with Directional Antenna”, Wireless Communications and Mobile Computing, Vol.6, Issue2, pp.191-199, March 2006.
- [18] K. I. Pedersen, P. E. Mogensen and B. H. Fleury, “A Stochastic Model of the Temporal and Azimuthal Dispersion Seen at the Base Station in Outdoor Propagation Environments”, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.49, Issue2, pp.437-447, March 2000.
- [19] Y. Wang, W. Fu and D. P. Agrawal, “Intrusion Detection in Gaussian Distributed Wireless Sensor Networks”, IEEE MASS, pp.313-321, October 2009.
- [20] D. Wang, B. Xie and D. P. Agrawal, “Coverage and Lifetime Optimization of Wireless Sensor Networks with Gaussian Distribution”, IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol.7, Issue 12, pp.1444-1458, December 2008.

오 현 우 (Hyun-Woo Oh) 정회원



1999년 2월 아주대학교 정보 및 컴퓨터공학부 학사
 2001년 2월 아주대학교 컴퓨터 공학과 석사
 2001년 1월~현재 한국전자통신연구원 선임연구원
 2006년 3월~현재 충남대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<관심분야> 컴퓨터통신네트워크, 홈네트워킹 시스템, 이동 Ad Hoc 네트워크, 무선센서네트워크

장 중 현 (Jong-Hyun Jang) 정회원



2000년 2월 충남대학교 컴퓨터 공학과 석사
 2004년 2월 한국외국어대학교 박사
 1994년~현재 한국전자통신연구원 실감플랫폼연구팀 팀장
 <관심분야> 전자통신 실시간 미들웨어, 홈네트워킹 시스템, 실감 미디어 시스템

문 경 덕 (Kyeong-Deok Moon) 정회원



1990년 2월 한양대학교 전산학과 학사
 1992년 2월 한양대학교 전산학과 석사
 1992년 8월~1997년 2월 시스템공학연구소 연구원
 1997년 3월~현재 한국전자통신연구원 그린컴퓨팅연구부 부장

<관심분야> 홈네트워킹 미들웨어, 액티브 네트워크, Pervasive Computing, 스마트그리드

김 상 하 (Sang-Ha Kim) 종신회원



1980년 2월 서울대학교 화학과 학사
 1984년 U. of Houston 화학과 석사
 1989년 U. of Houston 전산학과 박사
 1989년 HNSX Supercomputers Inc. 자문위원

1990년~1991년 시스템공학연구소 선임연구원
 1992년~현재 충남대학교 컴퓨터공학과 교수
 <관심분야> 컴퓨터 네트워크, 이동통신, 무선인터넷, 무선센서네트워크