

논문 2005-42TC-6-4

애드혹 네트워크에서의 보조 경로를 이용한 에너지 인식 라우팅 알고리즘

(Energy-Aware Routing Algorithm using Backup Route for Ad hoc Network)

정 세 원*, 이 채 우**

(Se-Won Jung and Chae-Woo Lee)

요 약

본 논문에서는 에너지 제약적인 애드 혹 네트워크를 위해서 보조 경로 기법을 사용하여 네트워크의 에너지를 고르게 사용함으로써 네트워크 수명을 증가시키는 새로운 알고리즘을 제안한다. 최근 네트워크의 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 On-Demanding 방식 기반의 다양한 알고리즘들이 제안되었다. 그 중 PSR(Power-aware Source Routing)은 경로 탐색 동안에 선택된 하나의 경로만을 지속적으로 사용하는 DSR(Dynamic Source Routing)의 단점을 극복하기 위해 에너지 사용량에 따라 경로를 주기적으로 교체함으로써 네트워크 수명을 늘린다. 그러나 이는 경로 교체 동안 발생하는 잦은 플러딩(Flooding)으로 인해 라우팅 오버헤드가 증가하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 경로 탐색 동안 설정된 보조 경로(Backup Route)를 사용해 플러딩의 발생 없이 경로를 변경시키는 HPSR(Hierarchical Power-aware Source Routing)을 제안한다. HPSR은 보조 경로를 사용한 잦은 경로 변경 통해 네트워크 수명을 증가시키면서도 플러딩의 감소로 라우팅 오버헤드를 감소시킨다. 또한, 본 논문에서는 OPNET을 사용한 시뮬레이션을 통해 HPSR의 성능을 검증한다.

Abstract

This paper proposes a new algorithm for the energy constraint ad-hoc network which efficiently spread the energy usage over the network through the backup route scheme in order to increase the network lifetime. Recently, the various energy-efficient routing algorithms based on On-demanding method are proposed. Among them, PSR(Power-aware Source Routing) increased the network lifetime through the periodical route alternation depended on the use of the battery while DSR(Dynamice Source Routing) uses only the route selected during the route discovery phase. But PSR has a problem that it increases the route overhead because of the frequent flooding for the route alternation. For solving this problem, we propose HPSR(Hierarchical Power-aware Source Routing) which uses the backup route set during the route discovery in order to alternation the route without the flooding. HPSR increases the network lifetime due to the frequent route alternation using backup route while it decreases the routing overhead due to the reduced flooding. In this paper, we also prove the performance of HPSR through the simulation using OPNET.

Keywords: 애드혹 네트워크, 애드혹 라우팅 알고리즘, 에너지 효율적 라우팅 알고리즘, 보조 경로

I. 서 론

무선 애드혹 네트워크는 대부분 배터리에 의해 동작하는 모바일 장치들로 구성되어 있다. 현재 사용되는

배터리의 용량은 애드혹 네트워크를 긴 시간 동안 사용하기에는 제약이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 제한된 배터리 용량을 사용하여 애드혹 네트워크를 최대한 효율적으로 동작시키기 위한 에너지 효율적 라우팅 알고리즘이 이슈가 되고 있다. 이에 관한 연구는 CPU, 사용자 인터페이스, 저장 장치 등의 단말기 내부에서 소비되는 에너지를 줄이려는 기존 연구들과는 달리 애드혹 네트워크의 특성을 이용하여 배터리 수명을 늘리는 것을 목표로 하고 있다. 본 논문에서는

* 학생회원, ** 정회원, 아주대학교 전자공학부
(Department of Electrical and Computer
Engineering Ajou University)

※ 본 논문은 한국과학재단에서 지원하는 연구지원사업(R01-2003-000-10724-0)의 연구 결과입니다.
접수일자: 2005년3월15일, 수정완료일: 2005년6월17일

제안된 에너지 효율적 라우팅 알고리즘을 살펴본 후, 배터리 수명을 효율적으로 연장시킬 수 있는 새로운 알고리즘을 제안한다.

에드혹 라우팅 프로토콜은 On-Demanding 방식, Table-Driven 방식, 그리고 둘을 혼합한 Hybrid 방식으로 나뉜다^[1]. Table-Driven 방식은 항상 네트워크의 모든 노드에 대한 라우팅 정보를 유지하는 방식으로 보낼 데이터가 생기면 유지하고 있던 라우팅 정보를 이용해서 바로 보낼 수 있기 때문에 On-Demanding 방식에 비해 전송 지연이 적다. 하지만 네트워크의 크기가 클 경우, 이 방식은 많은 라우팅 정보의 교환을 필요로 하기 때문에 많은 라우팅 오버헤드가 문제가 된다. 반면, On-Demanding 방식은 전송할 데이터가 발생할 때에만, 경로를 찾아서 이를 이용하는 방식으로 라우팅 정보의 교환이 적어 노드의 수가 많은 에드혹 네트워크에 적합한 라우팅 방식이다. 하지만 이 방식 또한 몇 가지 문제를 가진다. 그 중 하나가 전송 지연이 크다는 점이다. Table-Driven과는 달리 이 방식은 라우팅 정보를 데이터 전송을 하지 않을 경우에는 유지하고 있지 않기 때문에 데이터 발생시 플러딩(Flooding)에 의해 목적지까지의 경로를 찾는데 시간이 걸리게 된다. 또 다른 문제점은 잦은 플러딩의 발생으로 인해 오버헤드가 커질 수 있다는 점이다. On-demanding 방식은 플러딩을 통해 경로를 찾는데 이 때 발생하는 라우팅 패킷의 양은 상당하다. 하지만 새로운 경로를 찾는 경우 뿐만 아니라 사용하던 경로 상에 링크의 단절이 발생한 경우에도 플러딩은 발생한다. 그렇기 때문에 노드의 이동이나 에너지 고갈로 인해 네트워크가 빈번히 변화하는 환경에서 On-Demanding 방식은 잦은 플러딩의 발생으로 인해 라우팅 오버헤드가 증가하게 된다.

On-Demanding 방식에서의 잦은 플러딩으로 인한 오버헤드와 전송 지연 증가 문제를 해결하기 위해서 다중 경로 기법을 도입한 CHAMP(Caching and Multipath Routing Protocol)가 소개되었다^[2]. CHAMP는 On-Demanding 방식에서 경로 탐색 과정 중 선택된 경로 이외에 보조 경로(Backup Route)를 추가로 설정하여 보다 안정적인 데이터 전송이 가능하게 한다. 이외에도 보조 경로를 사용하는 다양한 알고리즘이 제안되었다^{[3][4][5][6]}. 또한, On-Demanding 방식의 문제점을 극복하기 위해 Hybrid 방식으로써 ZRP(Zone Routing Protocol)가 제안되기도 하였다^[7].

On-Demanding 기반의 에너지 효율적 라우팅 알고리즘으로 네트워크 수명을 증가시키기 위해 경로를 주

기적으로 변경하는 PSR(Power-aware Source Routing)이 제안되었다^[8]. DSR(Dynamic Source Routing)에서는 세션(Session)의 길이에 상관없이 경로 탐색 과정 중에 획득한 단일 경로만을 사용하여 데이터를 전송한다^[9]. 그렇기 때문에 세션의 길이가 길 경우에는 일부 노드의 에너지만을 집중적으로 사용하여 특정 노드의 빠른 에너지 고갈을 초래한다. PSR은 이러한 에너지 고갈을 방지하기 위해 경로를 주기적으로 변경 시킴으로써 국부적인 에너지 사용을 방지하고 네트워크를 전체적으로 사용하고자 한다. 하지만 PSR은 주기적으로 경로를 변경하기 위해 많은 라우팅 트래픽이 부가적으로 요구된다.

네트워크 내 단말기의 이동성이 높을 경우, DSR은 잦은 플러딩으로 인해 라우팅 오버헤드가 증가하게 된다. 이와 달리 PSR은 네트워크가 변동하지 않더라도 고정적인 경로 사용을 방지하기 위해 스스로 경로를 변경하기 때문에 플러딩으로 인해 라우팅 오버헤드가 증가한다. 하지만 PSR에 잦은 플러딩을 방지하기 위해 제안된 보조 경로 기법을 적용한다면 경로 변경으로 인한 오버헤드를 감소시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 PSR과 보조 경로 라우팅 기법을 혼합한 HPSR(Hierarchical Power-aware Source Routing) 알고리즘을 제안한다. HPSR은 PSR에 비해 적은 라우팅 오버헤드를 발생시킬 뿐만 아니라 경로 변경을 자주 실행할 수 있기 때문에 네트워크 수명을 더욱 향상시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. HPSR의 이해를 돕기 위해 II장에서 기존 라우팅 프로토콜에 대해 살펴본 후, III장에서 HPSR의 동작 및 특성에 관해 자세히 살펴본다. 그리고 IV장에서는 성능 검증을 위하여 OPNET 10.0을 사용하여 HPSR에서의 네트워크 수명 및 라우팅 오버헤드를 DSR 및 PSR과 비교한다. 그리고 마지막으로 결론을 맺는다.

II. 기존 라우팅 알고리즘

HPSR은 On-Demanding 방식인 DSR(Dynamic Source Routing)을 기반으로 한다. 하지만 HPSR은 Hybrid 방식인 ZRP(Zone Routing Protocol)에도 적용이 가능하다. HPSR은 DSR을 기반으로 한 보조 경로 기법을 이용한다. 보조 경로 기법은 DSR에서의 링크 단절에 의한 경로 재설정을 부분적으로 해결한다. 보조 경로 기법과 마찬가지로 ZRP도 부분적 경로 변경을 지원하기 때문에 향후 HPSR의 적용이 가능하다. 이번 절

에는 HPSR과 이의 적용 범위에 대한 이해를 돕기 위해 기본 알고리즘인 DSR과 ZRP를 살펴본 후, 최근 이슈가 되고 있는 에너지 효율적 라우팅 알고리즘(Energy Efficient Routing Algorithm)에 대해 정리한다.

1. DSR (Dynamic Source Routing)

DSR은 간단하면서도 오버헤드가 적은 대표적인 On-Demanding 방식으로, 소스가 목적지를 향하는 경로 상에 있는 모든 노드의 주소를 패킷에 포함함으로써 패킷을 목적지까지 전달하는 라우팅 알고리즘이다^[6]. DSR의 동작은 데이터를 전송하기 이전에 목적지로의 경로를 알기 위한 경로 탐색 단계(Route Discovery Phase)와 경로 탐색 단계를 통해 알게 된 경로가 끊김 없이 유지되고 있는지를 감시하는 경로 유지 단계(Route Maintenance Phase)로 나눌 수 있다.

DSR에서 각각의 이동 노드는 찾은 경로를 저장하기 위해 경로 캐쉬(Route Cache)를 유지한다. 한 이동 노드가 다른 이동 노드로 데이터를 보낼 때, 소스 노드는 우선 목적지를 향하는 경로가 경로 캐쉬 안에 존재하는지 검사한다. 만약 경로가 발견되지 않을 경우, 목적지에 도달하는 경로를 찾는 단계를 경로 탐색 단계(Route Discovery Phase)라고 한다. 소스 노드는 RREQ(Route Request) 메시지를 브로드캐스트(Broadcast)함으로써 경로 탐색 단계를 시작한다. RREQ는 플러딩을 통해 목적지로 전달된다. 이 때 RREQ는 전달된 경로 정보를 저장하는 소스 경로 필드(Source Route Field)를 포함하기 때문에 플러딩 과정에서 전달되어 온 노드들의 주소가 하나씩 소스 경로 필드에 추가된다. 만약 RREQ를 받은 노드가 목적지까지의 경로를 경로 캐쉬에 가지고 있으면, 이 경로를 RREQ의 소스 경로 필드에 추가하고 RREP(Route Reply)에 이 정보를 실어서 소스로 보냄으로써 목적지까지의 경로를 소스에 알려주게 된다. 만약 RREQ를 받은 노드가 목적지라면, 마찬가지로 RREP를 소스로 보내어 목적지까지의 경로를 알려준다. 소스는 이 과정을 통해 얻어진 경로 정보를 데이터 패킷의 소스 경로 필드에 삽입하여 목적지까지 패킷을 전달할 수 있다.

애드혹 네트워크는 이동 노드의 이동 패턴, 링크 품질 또는 전력 여유 등에 따라 토폴로지가 수시로 변하므로, 경로 탐색 단계를 통해 경로를 찾은 후에도 단절된 링크가 없는지 수시로 경로를 모니터링하고 단절이 발생한 경우 경로를 복구해주어야 한다. 이처럼 경로 탐색을 통해 수집된 경로가 계속해서 사용 가능한지 관

찰하고 단절된 경로를 복구하는 단계를 경로 유지 단계(Route Maintenance Phase)라고 한다. 예를 들어 노드의 이동에 의해 링크가 단절된다면 이를 포함하는 경로는 더 이상 사용될 수 없다. 그렇기 때문에 DSR에서 각 노드는 링크의 단절 여부를 주기적으로 확인하고, 이 과정 동안 링크의 단절이 발견되면 경로를 재설정해 주어야 한다. 링크 검사 및 경로 재설정의 세부 과정은 다음과 같다.

각 노드가 응답 요청(Ack Request) 메시지를 전송하면 이를 받은 노드가 응답(Acknowledgement) 메시지로 응답함으로써 링크가 잘 동작함을 이전 노드에게 알려준다. 만약 응답 메시지가 오지 않는다면, 링크가 단절된 것으로 판단하여 소스 노드로 RERR(Route Error) 메시지를 보내어 다른 경로를 사용하도록 한다. 만약 소스 노드의 경로 캐쉬에 다른 소스 경로가 존재하지 않는다면 경로 찾기 단계를 다시 수행하게 된다. 이런 이유로 빠르게 변화하는 네트워크에서 DSR은 경로 찾기 단계의 잦은 수행으로 인해 오버헤드(Overhead)가 증가하게 되는 문제점이 있다.

2. ZRP (Zone Routing Protocol)

On-Demanding 방식은 Table-Driven 방식에 비해 적은 라우팅 트래픽을 요구하기 때문에 애드혹 네트워크에 적합하지만, 전송 지연의 발생과 잦은 플러딩에 의한 오버헤드 증가의 우려가 있다. 이러한 문제를 해결하고 두 방식의 장점을 살리기 위해 On-Demanding 방식과 Table-Driven 방식을 혼합한 Hybrid 방식으로 ZRP가 제안되었다^[7]. 이 프로토콜은 정해진 지역(Routing Zone) 내에서는 프로액티브(Proactive) 라우팅 프로토콜인 IARP(Intrazone Routing Protocol)를 사용하고 그 지역 밖에서는 리액티브(Reactive) 라우팅 프로토콜인 IERP(Interzone Routing Protocol)를 사용한다. 여기서, 프로액티브 방식은 항상 라우팅 테이블을 유지하는 Table-Driven 방식을 말하고, 리액티브 방식은 데이터 전송 시에만 경로를 찾아 사용하는 On-Demanding 방식을 말한다. ZRP에서는 IARP에 의해 Routing Zone 안의 모든 노드가 항상 라우팅 정보를 유지하고 있기 때문에 링크 단절이 발생하더라도 분산적으로 경로를 복구하기 때문에 소스에서부터 경로 탐색 단계를 다시 수행할 필요가 없다. 그렇기 때문에 변화하는 네트워크에서도 ZRP는 경로 탐색 단계에 의한 플러딩 발생을 줄임으로써 라우팅 트래픽의 증가와 전송 지연 문제를 어느 정도 해결할 수 있다.

3. 에너지 효율적 라우팅 알고리즘

에너지가 제한된 에드 혹 네트워크에서 어떤 노드의 에너지가 고갈되면 네트워크가 기능을 못하게 될 수 있다. 따라서 에너지가 고갈되는 노드가 발생하지 않도록 라우팅을 전개하는 것이 바람직하다. 이러한 네트워크 단절을 방지하기 위하여 각 노드의 에너지 잔량이나 전력 소모를 고려하는 다양한 에너지 효율적 라우팅 알고리즘이 제안되고 있다.

에너지 효율적 라우팅에서 새로운 네트워크 성능 평가의 기준으로 네트워크 수명(Network Lifetime)과 네트워크 용량(Network Capacity)이 제시되었다^[10]. 여기서 네트워크 수명은 네트워크에서 첫 번째 에너지 고갈이 발생되기까지의 시간으로 정의되며, 네트워크 용량은 네트워크에서 성공적으로 전송된 데이터의 총량으로 정의된다. 에드 혹 네트워크에서 목적지로의 경로는 다양하기 때문에 이 중 최적의 경로를 선택하기 위한 기준이 필요하다. 이 때, 기준으로 사용되는 값이 라우팅 비용(Routing Cost)이다. 기존 논문에서는 라우팅 비용을 결정하기 위해서 다양한 파라미터와 방식을 사용하고, 이를 통해 알고리즘에 적합한 최적의 경로를 선택하게 된다. 예를 들면 기존 논문에서는 홵(Hop) 수, 무선 링크 용량, 연결성(Associativity)^[11], 그리고 이웃 노드의 수^[12] 등이 라우팅 비용으로 사용되었다. 하지만 네트워크 수명 및 네트워크 용량 증가시키기 위해 몇몇 에너지 효율적 라우팅 알고리즘은 에너지 잔량을 라우팅 비용으로 사용한다^{[8][10][13][14]}. 앞서 설명한 에너지 효율적 라우팅 알고리즘은 각 노드의 에너지 잔량에 의해 결정된 라우팅 비용에 따라 경로를 선택함으로써 에너지가 보다 많은 노드를 이용하는 방법이다. 이 때 경로를 선택하는 기준으로써 다양한 방법이 사용되고 있다. 예를 들면 MBCR(Minimum Battery Cost Routing)은 배터리 전력을 고려한 비용(Cost)을 사용하며 비용을 에너지 잔량의 역수로 정의하고 있다^[13]. 따라서 에너지 잔량이 적을수록 노드 비용이 증가하기 때문에 MBCR은 경로에 따른 노드 비용의 합이 최소인 경로를 선택한다. 이처럼 MBCR은 노드 비용의 합을 라우팅 비용으로 정의하여 각 노드의 에너지보다는 경로 전체의 에너지에 중점을 둔다. 반면 MMBCR(Min-Max Battery Cost Routing)은 경로 상의 최대 노드 비용이 최소인 경로를 선택한다^[14].

앞서 설명한 방법은 에너지가 적은 노드의 사용을 피하는 방법이다. 이와는 달리 데이터 전송에 대한 에너지 소모량이 최소가 되도록 경로를 설정함으로써 네트

워크 수명을 늘리는 방법 또한 제안되었다^[15]. 수신 강도는 거리의 제곱에 비례해서 감소한다. 각 노드는 이를 고려해 송신 강도를 조절함으로써 불필요한 전력 소모를 방지한다. 또한 이를 이용하여 소스 노드에서 목적지 노드까지의 경로 상에서 소모되는 총 전력소모가 최소가 되는 경로를 선택하기 때문에 네트워크 상의 에너지 소모를 최소화할 수 있다.

Table-Driven 방식에서는 항상 네트워크에 존재하는 라우팅 비용 정보를 유지하기 때문에 에너지 잔량을 라우팅 비용으로 사용하는 것은 간단하다. 하지만 DSR과 같은 On-Demanding 방식의 경우, 라우팅 비용의 교환이 경로 탐색 과정 이후에는 이루어지지 않기 때문에 각 노드의 에너지 잔량 정보를 효율적으로 이용하기 어렵다. 이에 각 노드의 에너지 사용량에 따라서 경로를 변경하는 PSR(Power-Aware Source Routing)이 소개되었다^[8]. PSR은 한 경로를 통해서 일정량 이상의 에너지를 사용할 경우 경로를 변경함으로써 특정 노드의 오랜 사용으로 인한 에너지 고갈을 방지한다. PSR의 경로 변경에 관해서는 HPSR의 경로 변경과 함께 다음 절에서 자세히 살펴본다.

III. 계층적 경로 변경 라우팅 알고리즘

앞서 살펴본 PSR은 주기적으로 경로를 변경함으로써 노드의 에너지 고갈을 방지하는 알고리즘이다. PSR에서 경로 변경 주기가 너무 길면 DSR과의 차별성이 없기 때문에 알고리즘이 효율성이 떨어진다. 반면, 경로 변경 주기가 너무 짧으면 경로 재설정 오버헤드가 문제가 된다. 그렇기 때문에 적당한 경로 변경 주기의 설정이 요구된다. 하지만 적당한 값을 결정하는 일은 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 오버헤드에 의한 문제점을 해결함과 동시에 알고리즘의 효율성을 높이고자 보조 경로 라우팅 기법을 이용하여 계층적으로 경로를 변경하는 HPSR (Hierarchical Power-aware Source Routing)을 제안한다.

HPSR은 경로 탐색에 의한 주기적 경로 변경과 보조 경로를 사용한 주기적 경로 변경을 동시에 사용한다. 경로 탐색을 통한 경로 변경에 비해 보조 경로를 사용한 경로 변경이 더 적은 오버헤드를 발생시킨다. 하지만 경로 탐색 이후로 장시간 동안 경로 재탐색이 수행되지 않을 경우, 보조 경로는 네트워크 변화에 따른 최적의 경로와 일치하지 않을 수 있다. 따라서 플러딩의 발생에도 불구하고 경로 탐색을 통한 경로 변경을 보조

경로를 사용한 경로 변경과 함께 수행하여 변화된 네트워크에 적합한 경로를 사용하도록 해주어야 한다. 단, 두 가지 경로 변경에 사용되는 경로 변경 주기는 다르다. HPSR에서 보조 경로에 의한 부분적 경로 변경은 자주 수행하고 전체적인 경로 변경은 드물게 수행하여 PSR보다 적은 오버헤드만으로 네트워크의 에너지를 고르게 사용한다.

이번 절에서는 HPSR의 동작을 다음과 같이 세 단계로 나누어 설명한다. 우선, 주요 경로와 보조 경로를 동시에 찾기 위해 개선된 경로 탐색 단계를 살펴보고, 에너지 잔량이 많은 경로를 선택하기 위한 라우팅 비용을 정의한 후, 마지막으로 에너지 사용에 따른 경로 변경 방식을 설명한다.

1. 경로 탐색 단계

PSR의 경우, 주기적인 경로 재탐색에 의해서 라우팅 오버헤드가 증가할 우려가 있다. 이를 방지하기 위해서 HPSR은 경로 탐색 단계시 부분적인 경로를 변경이 가능하기 위하여 보조 경로 저장 기법(Backup Route Caching, BRC)을 사용한다. BRC은 경로 탐색 단계에서 주요 경로 외에 추가적인 경로를 미리 찾아서 캐쉬에 저장해두는 방법이다. 따라서 주요 경로가 단절되더라도 사전에 수집되어 있는 보조 경로를 사용하여 경로 재탐색 없이 지속적인 데이터 전송이 가능하다. 이러한 보조 경로 저장 기법으로써 다양한 방법들이 제안되었다^{[3][5][6]}. 하지만 HPSR은 기존 방식과는 달리 에너지 효율적 라우팅을 목표로 하기 때문에, 보조 경로 기법에 약간의 수정을 필요로 한다. HPSR에서의 경로 탐색 단계는 다음과 같다.

DSR에서의 경로 탐색 단계는 RREQ와 RREP의 두 가지 제어 신호의 교환을 통해 진행된다. 하지만 BRC에서는 보조 경로를 확보하기 위해 RRREP(Redundant Route Reply)를 추가적으로 사용한다. 우선, HPSR에서 RREQ와 RREP의 교환 방식은 DSR과 동일하다. 그림 1-(a)와 그림1-(b)에서와 같이 RREQ가 소스 노드로부터 플러딩되어 목적지까지 도달하면 목적지는 RREP로 이에 응답함으로써 찾은 경로를 소스 노드에게 알려준다. 이와 마찬가지로 보조 경로가 존재할 경우, RREP의 전달과 동시에 그림1-(b)에서 보듯이 RRREP를 추가로 전송함으로써 보조 경로를 인근 노드에게 알려준다.

RREP를 수신한 노드는 RREP를 포워딩(Forwarding)한 후 자신의 경로 캐쉬를 통해 보조 경로의 유무를 판단하여 RRREP를 전송 여부를 결정한다. 플러딩 과정

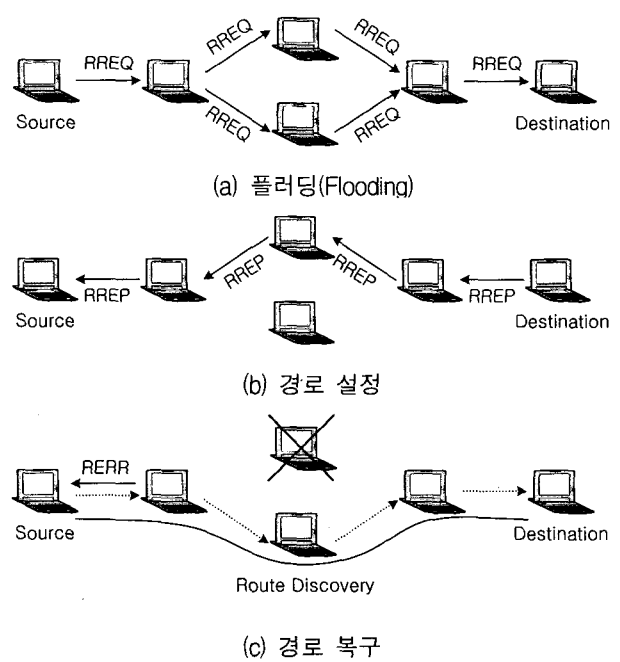


그림 1. DSR의 경로 탐색 및 경로 복구
Fig. 1. Route discovery and route recovery in DSR.

에서 각 노드는 RREQ를 수신시 RREQ가 지나온 경로 정보를 경로 캐쉬에 저장한다. 그렇기 때문에 각 노드는 RREP를 수신했을 때 경로 캐쉬를 검색함으로써 가능한 보조 경로를 판단할 수 있다. 경로 캐쉬 검색시 보조 경로를 판단하는 방법은 다음과 같다. 우선, 동일한 소스 노드로부터의 중복된 RREQ를 수신한 경우, 보조 경로가 존재한다고 판단할 수 있다. 하지만 보조 경로의 홉 수가 주요 경로의 홉 수보다 클 경우, 효율성이 떨어지기 때문에 보조 경로의 홉 수가 주요 경로의 홉 수와 동일한 경우에만 보조 경로가 존재하는 것으로 가정한다.

앞에서 설명한 경로 탐색 단계를 통해 보조 경로를 알게 된 노드는 주 경로 상에서의 통신 단절이 발생할 경우, 그림 1-(c)에서와 같이 RERR(Route Error)를 사용해 보조 경로를 소스 노드에 알림으로써 소스 노드는 경로 탐색 단계를 재수행하지 않고 보조 경로를 사용하여 통신을 지속할 수 있다.

2. 경로 선택

소스 노드는 경로 탐색 과정을 통해서 다수의 경로를 찾아낼 수 있다. 이 중 데이터를 전송할 경로를 선택하는 기준은 홉 수, 링크의 대역폭, 그리고 링크의 안정성 등 다양하다. 본 논문에서는 네트워크 수명을 증가시키기 위해 노드의 에너지 잔량을 경로 선택 기준으로 사용한다. 본 논문에서 고려하는 경로 비용은 다음과 같

이 정의된다.

$$Cost_i(t) = \frac{F_i}{R_i(t)} \quad (1)$$

$$Route\ Cost = \sum_{\text{all } i \text{ in a route}} Cost_i \quad (2)$$

식(1)에서와 같이 각 노드는 에너지 잔량에 따라 노드 비용을 계산하고, 식(2)에서와 같이 경로 상의 노드 비용을 합한 총비용을 경로 비용으로 고려한다. 식(1)에서 $Cost_i$ 는 노드 i 의 노드 비용을 의미하고, F_i 는 배터리가 가득 찼을 때의 에너지이며, 그리고 $R_i(t)$ 는 시간 t 일 때의 에너지 잔량을 의미한다.

경로 비용을 알아내는 방법은 기존 알고리즘과 동일하다. 플러딩 과정 동안 중간(Intermediate) 노드는 자신의 주소를 RREQ의 소스 경로 필드에 추가시킴과 동시에 자신의 노드 비용을 RREQ에 함께 실어 전달한다. 또한 소스 경로 필드가 RREP를 통해서 소스 노드로 전달되듯이 노드 비용 또한 RREP에 포함시켜 전달한다. 이를 통해 소스 노드는 각 노드 비용을 합하여 경로 비용을 계산하고 가장 작은 경로 비용을 가지는 경로를 사용하여 데이터를 전송하게 된다. 또한, RRREP에도 RREP와 동일하게 노드 비용을 포함시켜 보조 경로에 대한 비용도 고려할 수 있도록 한다.

3. 주기적 경로 변경

가. PSR의 경로 변경

세션의 길이가 길 경우, 한 경로를 계속해서 사용하면 네트워크에서의 에너지 사용이 편중되고 이는 네트워크 분할(Network Partition)의 발생을 앞당길 것이다. 따라서 PSR에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 각 노드에서의 에너지 사용량에 따른 주기적인 경로 변경 방법을 제안하였다. PSR에서 제안하는 경로 변경의 주기는 다음과 같이 표현될 수 있다^[8].

$$Cost_i(t) - Cost_i(t_0) > \delta \quad (3)$$

식(3)에서 $Cost_i(t)$ 는 현재 시간 t 에 해당하는 노드 i 의 노드 비용을 의미하고, $Cost_i(t_0)$ 는 경로 탐색 시간에 해당하는 노드 i 의 노드 비용을 의미하며, δ 는 경로 변경 주기에 대한 기준값으로 정의한다. $Cost_i(t)$ 는 에너지가 사용됨에 따라서 증가하기 때문에 노드가 사용 될수록 $Cost_i(t) - Cost_i(t_0)$ 값은

증가한다. 노드는 경로 설정 이후에 위의 값이 δ 보다 증가하게 되면 소스 노드로 RERR를 보냄으로써 경로를 재탐색하도록 한다.

나. HPSR의 경로 변경

PSR에서는 위와 같은 방식으로 네트워크 수명을 연장할 수 있었다. 하지만 δ 값이 작게 설정될 경우, PSR은 잦은 경로 재설정으로 인한 라우팅 오버헤드의 증가를 초래한다. PSR은 비용 증가량이 δ 값에 도달할 때마다 RERR 메시지가 전송되고 경로 탐색 과정의 재수행으로 인한 RREQ의 플러딩이 발생하기 때문이다. 반면 δ 값이 크게 설정될 경우, 경로 변경이 너무 늦게 발생하여 PSR의 성능은 DSR에 비해 크게 향상되지 않는다. 이를 해결하기 위해 HPSR에서는 보조 경로를 이용한 경로 변경을 경로 재탐색과 함께 사용하여 경로 재탐색에 의한 오버헤드의 증가를 방지한다. 즉, HPSR은 PSR과 달리 δ_L 와 δ_S 의 두 가지 δ 값을 사용하여 오버헤드의 감소와 알고리즘의 효율성을 동시에 만족시킨다. HPSR은 경로 탐색 단계에서 BRC를 사용해 보조 경로를 설정하기 때문에, 이를 이용하여 적은 오버헤드를 발생시키면서 빠르게 경로를 변경할 수 있다. 그러나 보조 경로를 통한 경로 변경만을 사용한다면 네트워크의 변화에 최적화되지 않은 경로를 사용할 우려가 있다. 따라서 HPSR은 경로 재탐색을 통한 경로 변경(δ_L)과 보조 경로를 이용한 경로 변경(δ_S) 모두 수행하여 적은 오버헤드에도 최적화된 경로를 사용한다.

(1) 경로 재탐색을 통한 경로 변경

δ_L 은 경로 재탐색을 통한 경로 변경 주기로 정의된다. δ_L 에 의한 경로 변경은 그림2-(a)에서와 같이 기존의 PSR과 동일하게 동작한다. δ_L 에 도달할 때마다 소스 노드로 RERR 메시지가 전송되고 이를 수신한 소스 노드는 사용 중이던 경로 정보를 캐쉬로부터 삭제한다. 따라서 소스 노드는 데이터 전송을 계속하기 위해 경로 탐색 과정을 다시 수행하게 된다.

(2) 보조 경로를 이용한 경로 변경

δ_S 은 보조 경로를 이용한 경로 변경 주기로 정의된다. 그림2-(b)에서와 같이 데이터를 전송하던 중간(Intermediate) 노드는 노드 비용의 증가량이 δ_S 에 도달하게 되면 이전 홉으로 자신의 에너지 정보를 포함하는

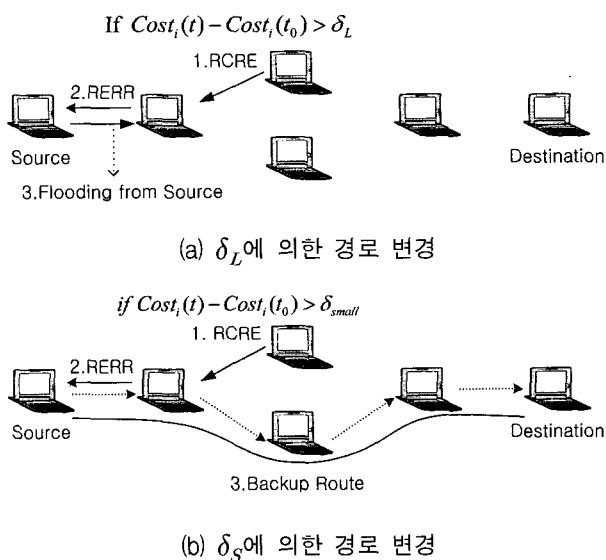


그림 2. 주기적 경로 변경
Fig. 2. Periodical route alternation.

경로 변경 요청(Route Change Request, RCRE) 메시지를 전송한다. 이를 받은 이전 홉의 노드는 자신의 캐쉬에 목적지로의 보조 경로를 가지고 있을 경우, 보조 경로를 RERR 메시지에 포함하여 소스 노드로 전송한다. 반면 이전 홉의 노드가 보조 경로를 가지고 있지 않을 경우, RCRE를 다시 이전 홉으로 전달한다. 하지만 이를 소스 노드까지 계속 전달할 경우, δ_L 에 의한 경로 변경과 동일한 라우팅 오버헤드를 초래하게 된다. 따라서 RCRE가 소스 이전 홉 혹은 정해진 홉까지만 전달되어야 한다. 본 논문에서는 RCRE의 전달 범위를 3홉 이내로 제한한다. 만약 RCRE의 최대 전달 범위까지 보조 경로가 존재하지 않을 경우, RCRE는 무시된다. 또한, 현재 사용 중인 노드의 에너지 잔량보다 더 적은 에너지를 가지는 보조 경로의 사용을 방지하기 위해 보조 경로의 총 라우팅 비용이 현재 경로의 총 라우팅 비용보다 적을 때에만 RERR를 전송한다. 중간 노드가 RCRE에 자신의 에너지 정보를 포함시켜 전송하기 때문에 이를 수신한 이전 홉의 노드는 현재 사용되는 경로의 에너지가 보조 경로의 에너지보다 작아지는 순간에 경로를 변경할 수 있다. 마지막으로 RERR을 수신한 소스 노드는 기존의 경로 정보를 캐쉬에서 삭제하고 새로운 경로 정보를 캐쉬에 저장하여 경로 탐색 과정의 재수행없이 경로를 변경하여 데이터 전송을 지속할 수 있다.

(3) δ_L 와 δ_S 의 설정

δ_S 값은 δ_L 값보다 작게 설정된다. δ_S 값은 오버헤드가

적은 부분적 경로 변경을 위한 값이기 때문에 작게 설정하여 네트워크 수명을 연장시키기 위해 작은 경로 변경이 가능토록 한다. 하지만 δ_S 에 의한 경로 변경만을 사용하면 지역적으로 에너지 사용이 편중되기 때문에 세션이 오래 지속될 경우 전반적으로 경로 탐색 과정을 재수행하는 것이 바람직하다. 따라서 δ_L 값을 크게 설정하여 경로 탐색에 의한 부담없이 네트워크 전반적으로 에너지가 사용되도록 한다.

IV. 모의실험 및 성능 분석

본 논문에서는 성능 검증을 위해 OPNET 10.0^[16]에 구현된 DSR을 기반으로 PSR과 HPSR을 구현하고 이를 사용하여 DSR, PSR 및 HPSR의 성능을 비교하였다. 기존의 DSR 및 네트워크 수명의 연장을 위한 PSR과의 비교를 통해 HPSR의 에너지 사용에 대한 효율성을 검증하였다. 또한, 다양한 환경에서 HPSR의 성능을 검증하기 위해 여러 가지 노드의 수 및 네트워크 밀도에 따른 네트워크 수명과 라우팅 오버헤드를 비교하였다. 이번 절에서는 시뮬레이션 환경 설정을 먼저 살펴본 후, 결과를 분석하고자 한다.

1. 시뮬레이션 환경

데이터링크 계층은 IEEE802.11b Wireless LAN으로 가정한다. 여기서 각각의 노드의 전송 범위는 200미터로 가정하고 채널 용량은 1Mbps로 가정한다. 또한, 이웃 노드와의 링크 상태를 확인하기 위해 각각의 노드가 주기적으로 이웃에게 헬로우(Hello) 메시지를 보내는 것으로 가정한다.

본 논문에서는 노드의 수 및 네트워크 밀도에 따른 성능을 비교하고자 한다. 여기서 네트워크 밀도는 단위

표 1. 시나리오 (노드의 수에 따른 성능 비교)
Table 1. Scenario (performance comparison depended on the number of nodes.

노드의 수	네트워크 면적(m^2)	네트워크 밀도(노드의 수/네트워크 면적)	세션 발생 분포
50개	$56000 m^2$	8.93×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,8000)
100개	$112000 m^2$	8.93×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,16000)
150개	$168000 m^2$	8.93×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,24000)
200개	$224000 m^2$	8.93×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,32000)

표 2. 시나리오 (네트워크 밀도에 따른 성능 비교)
Table 2. Scenario (performance comparison depended on the network density.

노드의 수	네트워크 면적(m^2)	네트워크 밀도(노드의 수/네트워크 면적)	세션 발생 분포
50개	$56000 m^2$	8.93×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,8000)
100개	$56000 m^2$	17.86×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,16000)
150개	$56000 m^2$	26.79×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,24000)
200개	$56000 m^2$	35.72×10^{-4} (개/ m^2)	uniform (0,32000)

면적당 노드의 개수로 정의한다. 노드의 수에 따른 성능 비교의 경우, 표1에서 보듯이 네트워크 밀도가 동일하도록 노드의 수에 비례하게 노드의 분포 지역을 넓힌다. 또한 네트워크 밀도에 따른 성능 비교의 경우, 표2에서 보듯이 노드의 분포 지역은 동일하게 유지한 채 노드의 수를 변경시킴으로써 네트워크 밀도를 달리한다. 또한, 각각의 세션은 소스 노드에서 유니폼 분포 (Uniform Distribution)에 따라 결정된 시간에 발생하여 랜덤하게 선택된 목적지 노드로 500초 동안 1packet/sec의 속도로 전송을 한다. 여기서 한 패킷의 크기는 128byte이다. 이 때, 표1과 표2의 세션 발생 분포에서 보듯이 노드의 수에 비례하게 세션 발생 분포를 설정하였기 때문에 네트워크 상에서 발생하는 평균 데이터 전송 속도는 노드의 수나 네트워크 밀도와 상관없이 항상 동일하다.

각 노드의 에너지 소모량은 WaveLAN의 스펙을 따른다^[17]. 스펙에 따르면 송신 전류량은 284mA, 수신 전류량은 190mA, 그리고 전압은 4.74V이다. 따라서 본 논문에서는 송신 전력 소모량은 $284mA * 4.74V$ 인 1.346Watt로 설정하고 수신 전력 소모량은 $190mA * 4.74V$ 인 0.901Watt로 설정하였다. 또한, PSR에서 사용되는 δ 는 5로 가정하고, HPSR에서 사용되는 δ_S 과 δ_L 는 각각 0.5와 5로 가정한다.

2. 결과 분석

본 논문에서는 DSR, PSR, 그리고 HPSR의 네트워크 수명과 오버헤드를 비교한다. 또한, DSR의 성능은 경로 선택 기준에 따라 달라지기 때문에 두 가지 경우에 따라 비교한다. 그림 3에서 DSR(hop)은 최소 홉을 가지는 경로를 사용했을 때의 결과를 의미하며, DSR(energy)는 식(1)에서와 같이 에너지를 라우팅 비용으로 고려했

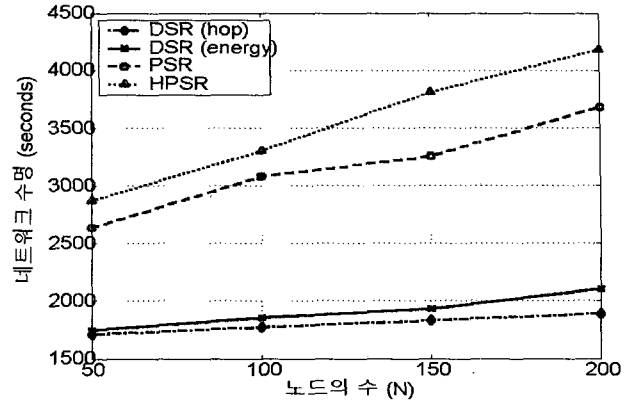


그림 3. 노드의 수에 따른 네트워크 수명
Fig. 3. Network lifetime vs the number of nodes.

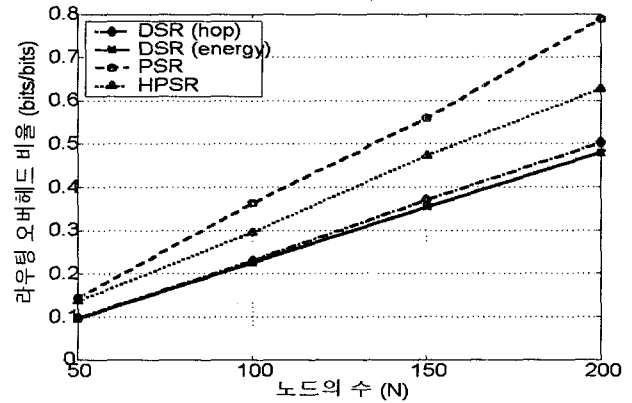


그림 4. 노드의 수에 따른 라우팅 오버헤드
Fig. 4. Routing overhead vs the number of nodes.

을 때의 결과를 의미한다.

그림 3에서는 노드의 수에 따른 각 알고리즘의 네트워크 수명을 비교한다. DSR과는 달리 PSR과 HPSR은 에너지 사용에 따라 경로를 주기적으로 변경한다. 또한 노드의 수가 증가할수록 소스 노드에서 목적지 노드까지의 평균 홉 수와 선택 가능한 경로의 수가 많아지게 된다. 그렇기 때문에 네트워크 수명이 노드의 수에 크게 영향 받지 않는 DSR과는 달리 PSR과 HPSR의 경우 노드의 수가 증가함에 따라서 네트워크 수명도 함께 증가한다. 그림 3에서 보듯이 HPSR은 PSR에 비해 보조 경로를 이용해 더 자주 경로를 변경하기 때문에 네트워크 수명이 더 높게 나타난다. 또한, DSR(energy)은 노드의 에너지를 전혀 고려하지 않는 DSR(hop)에 비해 네트워크 수명이 약간 더 높게 나타나지만 선택된 경로를 변경하지 않고 계속 사용하는 단점으로 인해 PSR 및 HPSR에 비해 낮게 나타난다.

그림 4에서는 노드의 수에 따른 경로 탐색 과정 및 경로 변경을 위해 사용된 라우팅 오버헤드를 비교한다. 여기서 라우팅 오버헤드란 수신된 라우팅 트래픽의 총

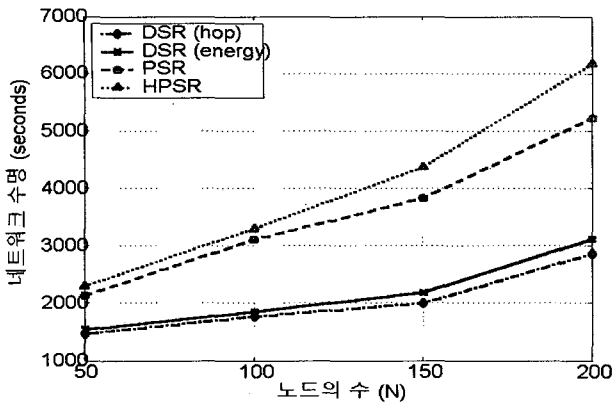


그림 5. 네트워크 밀도에 따른 네트워크 수명
Fig. 5. Network lifetime vs network density.

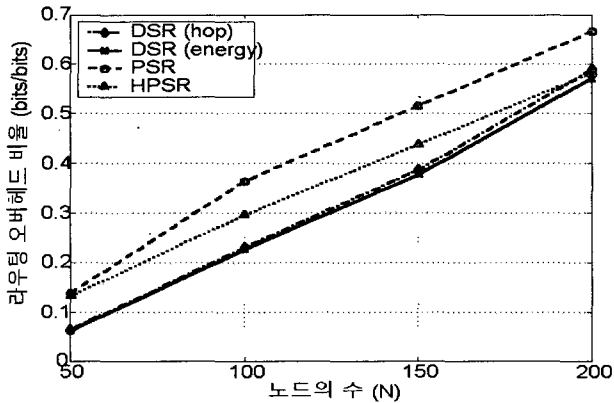


그림 6. 네트워크 밀도에 따른 라우팅 오버헤드
Fig. 6. Routing overhead vs network density.

량 / 수신된 데이터의 총량으로 정의하였다. 시뮬레이션은 첫 번째 에너지 고갈이 발생할 때까지 수행되기 때문에 발생한 라우팅 트래픽의 양만으로는 절대적인 성능 비교가 불가능하다. 따라서 수신된 데이터량을 고려하여 라우팅 오버헤드를 정의한다. 그림4에서 노드의 수가 증가할수록 소스 노드로부터 목적지 노드까지의 평균 홉 수가 증가하기 때문에 라우팅 트래픽이 증가하는 것을 볼 수 있다. DSR의 경우, 주기적인 경로 재탐색 과정이 수행되지 않기 때문에 라우팅 오버헤드는 비교적 적게 증가한다. DSR과는 달리 PSR의 경우, 주기적인 경로 재탐색 과정이 수행되기 때문에 라우팅 오버헤드가 DSR에 비해 크게 증가한다. 하지만 HPSR은 보조 경로의 사용으로 인해 재탐색 과정이 PSR에 비해 적게 발생하여 경로 탐색에 의한 라우팅 오버헤드가 PSR보다 적게 나타난다.

그림 5는 네트워크 밀도에 따른 네트워크 수명을 보여준다. 네트워크 밀도가 높을수록 가능한 경로가 많아진다. 따라서 네트워크 밀도가 높을수록 경로 변경의 기회가 증가한다. 결과적으로 그림에서 보듯이 PSR과

HPSR 모두 네트워크 수명이 증가하고 보조 경로의 사용 기회가 증가하기 때문에 HPSR의 네트워크 수명이 더 많이 증가한다.

그림 6는 네트워크 밀도에 따른 라우팅 오버헤드를 보여준다. 그림 6에서도 네트워크 밀도가 높을수록 경로 변경의 기회가 증가하여 PSR과 HPSR의 라우팅 오버헤드가 증가한다. 또한 HPSR은 보조 경로의 사용 기회가 증가하기 때문에 PSR에 비해 더 적은 라우팅 오버헤드만이 발생한다.

시뮬레이션 결과를 통해서 HPSR이 PSR을 능가하는 네트워크 수명을 유지하면서도 라우팅 트래픽을 감소시키는 것을 검증하였다. 하지만 HPSR은 주기적 경로 변경의 사용으로 DSR에 비해 라우팅 오버헤드가 더 크게 나타난다. 본 논문에서는 이동성(Mobility)을 고려하지 않고 모든 노드들이 움직이지 않는다고 가정한다. 하지만 HPSR의 경우, BRC를 사용하기 때문에 이동성이 큰 네트워크 환경에서 더 좋은 성능을 보일 것이다^[2].

V. 결 론

본 논문에서는 에너지 효율적 라우팅 알고리즘을 살펴보고, 그 중 네트워크 수명을 늘리기 위한 PSR의 단점을 보완한 HPSR을 제안하였다. 또한 OPNET을 사용하여 HPSR이 PSR보다 네트워크 수명 및 라우팅 오버헤드 측면에서 더 좋은 성능을 가짐을 검증하였다.

PSR은 기존 에너지 효율적 라우팅 알고리즘들과는 달리 네트워크 상의 링크 비용(Link Cost) 정보의 교환이 어려운 DSR의 단점을 극복하기 위하여 경로를 주기적으로 변경시켜줌으로써 네트워크 수명을 증가시킨 효율적인 알고리즘이다. 하지만 PSR은 네트워크 수명을 늘리기 위해 라우팅 오버헤드가 크게 증가하는 문제가 있다. 이에 반해 HPSR은 주기적 경로 변경을 효율적으로 수행함으로써 라우팅 오버헤드를 감소시켰다.

HPSR은 네트워크 수명을 늘리면서도 PSR보다도 더 오버헤드가 발생한다. 본 논문에서 이동성은 고려하지 않았기 때문에 시뮬레이션 결과 HPSR의 오버헤드가 DSR의 오버헤드와 차이가 있었다. 하지만 이동성이 높은 상황에서는 BRC를 사용하는 HPSR이 더 좋은 성능을 보일 것이다. 또한 HPSR은 DSR과 같은 On-Demanding 방식뿐만 아니라 ZRP에도 적용될 수 있을 것이다. 본 논문에서는 DSR에 BRC를 적용한 HPSR을 제시하였다. 반면 ZRP도 IARP를 통해 지역적 경로 복구 기능을 지원하기 때문에 HPSR에서의 보조

경로를 사용한 빠른 경로 변경으로 인해 네트워크 수명을 높일 수 있을 것이다. 하지만 HPSR을 적용하기 위해서는 ZRP에 대한 보다 세밀한 분석이 요구된다.

참고 문헌

- [1] C.K. Toh, Ad Hoc Mobile Wireless Networks, Prentice Hall, 2002.
- [2] Alvin Valera, Winston Seah, S.V. Rao, "Cooperative Packet Caching and Shortest Multipath Routing In Mobile Ad hoc Networks," IEEE INFOCOM '03, pp. 260-269, 2003.
- [3] Marcelo Spohn, J.J.Garsia-Luna-Aceves, "Neighborhood Aware Source Routing," Proc. of ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, October 2001.
- [4] Shinji Motegi, Hiroki Horiuchi, "AODV-Based Multipath Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," IEICE Trans. Commun., vol. e87-b, no. 9, pp. 2477-2483, September 2004.
- [5] Sangkyung Kim, Wonjong Noh, Sunshin An, "Multi-path Ad Hoc Routing Considering Path Redundancy," IEEE ISCC '03, vol.1, pp. 45-50, 2003.
- [6] C. M. Chung, Ying-Hong Wang, Chih-Chieh Chuang, "Probabilistic Analysis of Routes on Mobile Ad Hoc Networks," Proc. of 15th International Conference on Information Networking, pp. 933-937, 2001.
- [7] Zygmunt J. Haas, "A Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Network," ICUPC '97, vol. 2, pp. 565-566, October 1997.
- [8] M. Maleki, K. Dantu, M. Pedram, "Power-aware Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," ISLPED '02, pp. 72-75, 2002.
- [9] D. Johnson, D. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," in Mobile Computing, T. Imielinski and H. Korth, Eds., pp. 153-181, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Mass., 1996.
- [10] K. Kar, M. Kodialam, T.V. Lakshman, L. Tassiulas, "Routing for Network Capacity Maximization in Energy-constrained Ad-hoc Networks," Proc. of Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, vol. 1, pp.673-681, 2003.
- [11] C. K. Toh, "Associativity-Based Routing For Ad-Hoc Mobile Networks," IPCCC '96, 1996.
- [12] K. Tsudaka, M. Kawahara, A. Matsumoto, H. Okada, "Power Control Routing for Multi Hop Wireless Hop Wireless Ad-hoc Network," IEEE GLOBECOM '01, pp. 2819-2824, November 2001.
- [13] C.K. Toh, "Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless ad-hoc networks," IEEE Communications Magazine, vol. 39, no. 6, pp. 138-147, June 2001.
- [14] S. Singh, M.woo, C. S Raghavendra, "Power aware routing in mobile ad-hoc networks," Proc. of ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 181-190, 1998.
- [15] Sheetakumar Doshi, Shweta Bhandare, Timothy X Brown, "An On-demand Minimum Energy Routing Protocol for a Wireless Ad Hoc Network," ACM Mobile Computing and Communications Review, vol. 6, no. 3, July 2002.
- [16] OPNET Modeler 10.0, OPNET Technologies, Inc.
- [17] Laura Maria Feeney, Martin Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," IEEE INFOCOM '01, pp. 1548-1557, April 2001.

저자 소개



정세원(학생회원)
2003년 8월 아주대학교
전자공학과 학사 졸업
2003년 9월~현재 아주대학교
대학원 전자공학과
석사 과정

<주관심분야 : 유비쿼터스 네트워크, 802.11 WLAN, 에드 혹 네트워크>



이채우(정회원)
1985년 서울대학교 제어계측
학사 졸업.
1988년 한국과학기술원
전자공학과 석사 졸업.
1995년 University of Iowa
박사 졸업.

1985년 1월~1985년 12월 (주)금성통신 연구원.
1988년 9월~1999년 3월 한국통신 선임연구원.
1999년 3월~2001년 9월 Lucent Technologies
Korea 이사.

2001년 9월~2002년 2월 한양대학교 겸임교수.
2002년 3월~현재 아주대학교 전자공학과 조교수.
<주관심분야 : 광대역 통신망, Ubiquitous
networking, Traffic Engineering>