

# 광역 무선 메쉬 네트워크에서 포텐셜 필드 기반 애니캐스트 라우팅: 유한 차분법 응용 분산 알고리즘 (Potential-Field-Based Anycast Routing in Large-Scale Wireless Mesh Networks: A Distributed Algorithm based on Finite Difference Method)

정 상 수 <sup>†</sup>                      크세라위 말라즈 <sup>\*\*</sup>  
(Sangsu Jung)                      (Malaz Kserawi)

이 준 구 <sup>\*\*\*</sup>  
(June-Koo Kevin Rhee)

**요약** 본 논문은 광역 무선 메쉬 네트워크에서 1홉 이웃 노드들의 정보만을 이용하는 애니캐스트 라우팅 기법을 제안한다. 제안 프로토콜은 물리계 장 이론에 기반하여 설계되었으며 일정량의 제어 패킷만으로 메쉬 게이트웨이의 부하를 분산한다. 분산 알고리즘 구현을 위하여 유한 차분법을 응용한다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제안 프로토콜의 특성을 검증한다.

· 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가기관의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음(2009-F-057-01, Network coding을 이용한 광대역 무선-PON 결합 기술 개발)

· 이 논문은 제36회 추계학술발표회에서 '무선 메쉬 네트워크를 위한 유한 차분법 응용 필드 기반 애니캐스트 라우팅 기법'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

<sup>†</sup> 학생회원 : KAIST 정보통신공학과  
s.jung@kaist.ac.kr

<sup>\*\*</sup> 비회원 : KAIST 전기및전자공학과  
malaz@kaist.ac.kr

<sup>\*\*\*</sup> 비회원 : KAIST 전기및전자공학과 교수  
rhee.jk@kaist.ac.kr

논문접수 : 2009년 12월 24일

심사완료 : 2010년 3월 2일

Copyright©2010 한국정보과학회: 개인 목적이나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제16권 제6호(2010.6)

**키워드** : 무선 메쉬 네트워크, 애니캐스트, 부하 분산, 라우팅, 유한차분법

**Abstract** In this paper, we propose an anycast routing scheme for large-scale wireless mesh networks, which requires only one-hop local information with no flooding overhead. We develop an analytical model for anycast mesh networks based on an electrostatic theory. A finite difference method contributes to achieving gateway load balancing with constant control overheads. We verify the performance of the proposed scheme by simulations.

**Key words** : Wireless Mesh Networks, Anycast, Load Balancing, Routing, Finite Difference Method

## 1. 서론

최근 무선 메쉬 네트워크(wireless mesh networks)가 공중 인터넷을 제공하기 위한 백홀(backhaul)로서 사업자망에 활발히 구축되고 있는 추세이다. 무선 메쉬 네트워크의 트래픽 방향은 무선 메쉬 노드에서 무선 메쉬 게이트웨이, 또는 무선 메쉬 게이트웨이에서 무선 메쉬 노드라는 점에서 기존 애드혹 네트워크와 차별된다. 이러한 환경에서, 애니캐스트(anycast)[1]라는 특별한 통신 구조를 이용할 수 있게 된다. 즉, 소스 노드와 불특정 다수의 게이트웨이 중 하나와의 통신만 이루어지면 서비스 제공이 가능하기 때문에 이러한 특성을 최대한 이용한다는 것이다.

기존 유니캐스트 기반의 애니캐스트 라우팅 프로토콜[2,3]을 소규모 네트워크에는 활용할 수 있지만, 확장성이 요구되는 광역 네트워크에서는 소스 노드와 게이트웨이 각각에 대한 경로 설정을 위한 링크 상태 벡터 플러딩(link-state vector flooding) 오버헤드 때문에 확장성이 제약된다. 또한, 네트워크 혼잡이나 노드 실패(node failure) 상황에 대해 신속하게 대처하지 못하는 단점도 있다.

본 논문에서는 트래픽 부하에 적응적인 경량화된 애니캐스트 라우팅 프로토콜을 제안한다. 물리계 장이론인, 포아송 방정식(Poisson's equation)[4]을 적용하여 무선 메쉬 네트워크의 애니캐스트 특화 환경에 적합하도록 설계한 방식이다. 본 논문에서 제안하는 프로토콜은 필드 라우팅에 속한다. 필드 라우팅[5-8]이란 모든 노드들이 특정 스칼라 값(scalar)을 가지고 있는 상황에서 노드가 패킷을 가장 낮은 스칼라 값을 가지는 이웃 노드에게 패킷을 전송하는 것을 뜻한다. 한편, 분산 알고리즘 구현을 위해 제안 프로토콜은 수치해석기법인 유한 차분법(finite difference method)[4]을 응용한다.

유한 차분법은 편미분 방정식을 차분방정식으로 근사시켜 격자 구조에 대해 수치해석을 하는 기법이다. 제안 프로토콜은 트래픽 부하 정도를 경로 설정에 반영한다는 측면에서 기존의 라플라스 방정식(Laplace's equation) 기반 라우팅[5]과 차별화되며, 메쉬 게이트웨이 및 메쉬 노드들 간에 대한 자율적 부하 분산 기능, 노드 실패에 대한 강건성(robustness), 확장성(scalability)을 동시에 제공한다.

## 2. 관련 연구

필드 라우팅은 인터넷에서의 유니캐스트를 위해 최초로 소개되었다[6]. 여기서는 큐의 길이와 대역폭을 이용하여 스칼라 값인 포텐셜(potential)을 결정한 후, 이에 기반하여 필드를 구성하였다. 패킷들은 포텐셜 정보의 도움을 받아 혼잡 링크를 피하면서 목적지에 도달하게 된다. 목적은 제안 프로토콜과 유사하지만, 대상 네트워크가 애니캐스트 기반의 무선 메쉬 네트워크가 아니고, 유니캐스트 기반의 유선 네트워크이기 때문에 구조 설계 측면에서 차이점을 보인다. 또한, 각 노드는 단순히 자신의 큐 길이만을 이용하고 이웃 노드들의 큐 길이를 라우팅에 반영하지 않기 때문에 네트워크 전체의 안정성에 대해 한계를 가진다.

애니캐스트 측면의 연구로 V. Lenders et al.[7]이 목적지에 대한 접근성(proximity)과 노드 밀도를 통해 애드혹 네트워크에서의 포텐셜 장을 형성하는 방법을 제시하였다. 시뮬레이션을 통해 역동적인 이동 네트워크에서는 노드 밀도에 기반한 라우팅이 목적지에 대한 접근성에 기반한 라우팅보다 우수함을 검증하였다. 하지만, 정적인 환경의 무선 메쉬 네트워크에서는 노드 밀도가 클수록 패킷 전송 실패율이 증가하기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

한편, R. Baumann et al.[8]은 무선 메쉬 네트워크를 온도에 기반한 스칼라 필드로 모델링한 후 온도의 높낮이에 따라 라우팅을 하는 기법을 제시하였다. 라우팅 메트릭(metric)으로 사용되는 온도는 노드에서 게이트웨이까지의 거리와 경로의 강건성을 반영하여 결정된다. 역시 트래픽에 대한 정보는 고려 사항이 아니기 때문에 본 연구의 제안 프로토콜과는 차이를 보인다. 본 연구와 유사한 접근 방식으로 V. Lenders와 R. Baumann[5]은 무선 애드혹 네트워크를 온도에 기반한 스칼라 필드에 대응시켜 라우팅하기 위해 유한차분법을 사용하였다. 하지만, 유니캐스트만을 고려하고, 트래픽에 대한 정보를 반영하지 않기 때문에 혼잡 상황 및 게이트웨이의 부하 분산에 취약한 특성을 지닌다.

## 3. 애니캐스트 필드 라우팅

본 절에서는 분산 처리 프로토콜인 포텐셜 필드 기반 애니캐스트 라우팅(potential-field-based anycast routing, 이하 FAR)을 제안한다. 제안 동기는 포아송 방정식 (1)으로 서술되는 물리적 시스템의 특성에 기인한다.

$$\nabla_{xy}^2 \phi = -\frac{1}{\epsilon^*} \sigma \quad (1)$$

여기서  $\phi$  는 전위(V),  $\epsilon^*$  는 2차원 공간에서의 유전율(C/V)이며  $\sigma$  는 면전하밀도(C/m<sup>2</sup>)를 나타낸다. 포아송 방정식은 수세기 동안 물리학, 반도체 소자, 그 외 자연계 시스템에서 안정화된 상태를 서술하기 위해 사용되어 왔다.

식 (1)의 개념을 네트워크 라우팅 모델 정립에 사용하기 위해 표 1과 같이 네트워크 요소를 전자장 요소에 대해 대응할 수 있다.

표 1 전자장 요소와 네트워크 요소의 대응 관계

부호	전자기(단위)	무선 메쉬 네트워크
$(x, y)$	위치(m)	노드의 위치
$\phi$	전위(V)	라우팅 메트릭
$\sigma$	면전하 밀도(C/m <sup>2</sup> )	-
$\epsilon^*$	2차원에서의 유전율(C/V)	큐의 영향력에 대한 라우팅 민감도의 역수
$q$	전하량(C)	큐 길이

각 노드에 적절한 전위  $\phi$  를 할당하기 위해 본 연구에서는 유한 차분법을 응용한다. 유한 차분법에 의해 식 (1)을 만족하는 자신과  $h$  간격의 1홉 이웃 노드들 전위 간의 관계를 도출하면 식 (2)와 같다.

$$\phi_{i,j} = \eta q_{i,j} + \frac{\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1}}{4} \quad (2)$$

즉,  $(i, j)$  에 위치한 메쉬 노드 전위  $\phi$  는 노드 자신의 큐길이( $q$ )와 1홉 이웃 노드들의 평균 전위값의 조합으로 표현된다. 여기서 각 노드의 전하는  $h^2$  의 넓이를 갖는 사각형에 고르게 분포한다고 식 (3)과 같이 가정하였다.

$$\sigma = q/h \quad (3)$$

여기서, 큐길이에 대한 민감도,  $\eta(=1/4\epsilon^*)$ 의 선택을 통해 라우팅의 트래픽 반영률을 조절할 수 있다.

### 3.1 초기 장 형성

네트워크 초기 설정단계에서 내부 경계 조건(inner boundary condition)(4)과 외부 경계 조건(outer boundary condition)(5)가 정의된다.

$$\phi(a) = -1 \quad (4)$$

$$\phi(b) = 0 \quad (5)$$

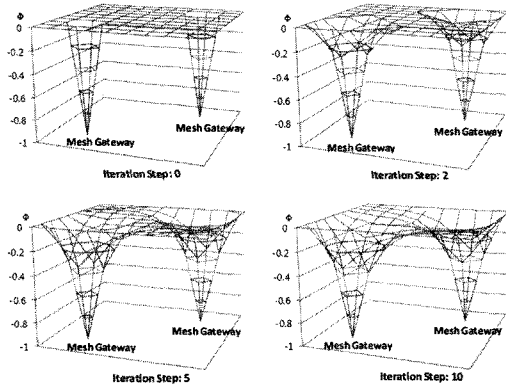


그림 1 두 메쉬 게이트웨이로 구성된 네트워크의 장 형성 과정

$d \in D$  는 메쉬 게이트웨이를 뜻하고,  $b \in B$  는 네트워크에서 가장 가장자리에 위치한 노드들을 일컫는다. 그리고 경계 노드를 제외한 메쉬 노드들은 초기 전위값으로 0을 할당받게 된다. 이후, 각 메쉬 노드들은 식 (2)를 통해 수번 정도만의 1홉 이웃 노드들과의 정보 교환 과정을 거치면서 수렴되어 가는 자신의 전위를 찾게 된다. 결국 모든 노드들은 식 (1)을 만족하는 전위를 그림 1과 같이 가지게 된다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 5번 정도의 반복 계산만으로도 평균제곱오차의 제곱근(root-of-mean-squared-error)으로 정의되는 수렴 척도(6)가 1% 이내를 만족하는 것을 검증하였다.

$$R(i) = \sqrt{\frac{1}{|N|} \sum_{n \in N} \left( \frac{\phi_i(n) - \phi_{i-1}(n)}{\phi_i(n)} \right)^2} \quad (6)$$

### 3.2 라우팅 알고리즘

형성된 장을 기반으로 FAR는 전위가 높은 노드에서 전위가 낮은 노드로 패킷을 전송하게 되는데, 이 때 각 노드,  $n$  은 식 (7)과 같이 자신의 1홉 이웃 노드들,  $p(n) \in P(n)$  중 가장 전위가 낮은 노드를 선택하여 패킷을 보낸다.

$$\arg \min_{p(n) \in P(n)} \phi(p(n)) \quad (7)$$

전체 네트워크에서 메쉬 게이트웨이가 가장 낮은 전위를 가지기 때문에 패킷은 결국 게이트웨이로 향하게 된다. 식 (2)에서 나타나듯이, 큐 길이를 경로 선택에 반영하기 때문에 혼잡 지역이 발생할 경우, 그 주위의 노드들은 높은 전위를 가지므로 경로로 사용될 확률이 낮아진다. 결국, 1홉 정보의 교환만으로 메쉬 노드들 간의 부하 분산, 더 나아가 메쉬 게이트웨이들 간의 부하 분산이 자율적으로 이루어지게 되어 불필요한 오버헤드 없이 가용한 네트워크 자원을 최대한 사용할 수 있게

된다. FAR는 지역적 라우팅 단계의 혼잡 제어로 전체 네트워크 혼잡 상태를 제어할 수 있다는 측면에서 상당히 고무적이라 할 수 있다. 또한, 1홉 이웃 노드들의 정보만을 이용하기 때문에 전체 경로 유지에 대한 비용을 감소할 수 있으며, 이러한 특징은 노드 실패의 경우에 신속하게 대안 노드를 찾을 수 있도록 한다.

한편, 형성된 장은 상향 링크(uplink) 트래픽을 위한 것으로 게이트웨이로부터 메쉬 노드들간의 하향 링크(downlink)에 대해서는 소스 기반 포워딩(source based forwarding)으로 패킷을 전송하게 된다. 즉, 각 노드들은 포워딩 정보 베이스(forwarding information base, 이하 FIB)에 각 패킷의 소스 주소(source address)와 이전 노드 주소(previous hop address)를 저장하게 된다. 그리고 각 노드는 하향 링크 트래픽을 처리할 경우, FIB를 참고하여 목적지 주소(destination address)를 소스 주소에 참조하고 이전 노드 주소를 다음 노드 주소(next hop address)로 정의하여 라우팅을 하게 된다. 만약 IPTV와 같이 하향으로만 단방향 트래픽이 존재할 경우에는 각 노드들은 경로 구성을 위한 업데이트 패킷을 주기적으로 하나씩 임의의 게이트웨이로 보냄으로써, 부하 분산이 적절히 이루어지도록 하향 경로를 재구성한다.

## 4. 성능 평가

본 절에서는 FAR의 성능 검증을 위해 NS-2[9]를 통한 시뮬레이션 결과를 제시한다. FAR의 파라미터인  $\eta$  에 따른 프로토콜의 특성을 파악하고, 기존 프로토콜들과의 비교 분석 또한 수행한다.

### 4.1 시뮬레이션 환경

IEEE 802.11 PHY/MAC 모델을 사용하였고, 비교 대상 프로토콜로 필드 기반 라우팅인 FDMR[5]과 대표적인 유니캐스트 라우팅 프로토콜인 AODV-UU[10]를 선택하였다. 상기 프로토콜들은 무선 메쉬 네트워크의 애니캐스트 특성을 활용할 수 있도록 수정하였다. 즉, 경로를 결정하기 전, 각 노드들은 자신에게 가장 가까운 메쉬 게이트웨이를 목적지로 선택하게 하는 알고리즘을 추가하였다[1]. 본 시뮬레이션에서는 2000m×2000m의 격자 구조의 네트워크에 98개의 메쉬 노드와 2개의 메쉬 게이트웨이를 설정하였다. 각 노드들의 거리는 200m 이고, 전송 범위는 250m, 간섭 범위는 550m로 설정하였다. 시뮬레이션은 총 400초 동안 수행하였으며, 전이 효과를 방지하기 위해 초기 100초 동안의 데이터는 폐기하였다. 메쉬 게이트웨이 1(Gateway 1)에 가깝도록 총 9개의 소스 노드들을 선정한 후, UDP(512 bytes) 패킷을 0.05초 간격으로 발생시켰다.

### 4.2 $\eta$ 에 따른 FAR의 성능 변화

FAR는 식 (2)에서 보듯이, 초기 설정 변수인  $\eta$ 에 따

라 성능이 좌우된다.  $\eta$ 가 0일 경우에 FAR는 큐에 대해 영향을 받지 않고, 중간값 정리(mean value theorem)[4]에 의해 게이트웨이에 대한 지리적 근접성만을 반영하게 된다. 한편,  $\eta$ 가 아주 큰 값을 가질 경우에는 큐에 대한 정보만을 라우팅에 반영하게 되어 궁극적으로는 트래픽 인지 라우팅(traffic-aware routing)과 같은 특성을 가지게 되는 것으로 해석할 수 있다. 그림 2와 그림 3은  $\eta$ 를 0에서 100까지 변화시켜가며 측정된 지연시간(delay) 및 수율(throughput)이다. 비교적  $\eta$ 가 0.05~0.10 부근일 경우에 최적의 성능을 나타내는 것을 알 수 있다.  $\eta$ 가 0일 때와 비교해서 지연 시간은 0.287초에서 약 0.090초로 감소하였고, 수율은 0.51Mbit/s에서 약 0.66Mbit/s로 증가하였다.  $\eta$ 가 0에 가까운 경우, 트래픽의 변화율에 대한 민감도가 감소하여, 라우팅 경로가 지리정보 기반의 라우팅의 경우와 유사하게 된다. 즉, 트래픽 소스에 가까운 Gateway 1이 서비스 게이트웨이로 선택되는 확률이 높아지는 것이다. 한편,  $\eta$ 가 0.1 이상일 때 값의 증가에 따른 성능 변화폭이 점점 감소하는 경향을 보인다. 이것은 네트워크 트래픽 부하가 한 계이

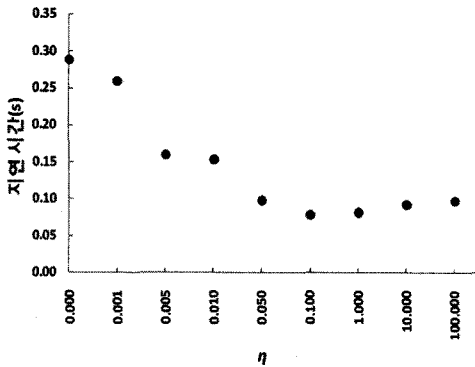


그림 2  $\eta$ 에 따른 지연 시간

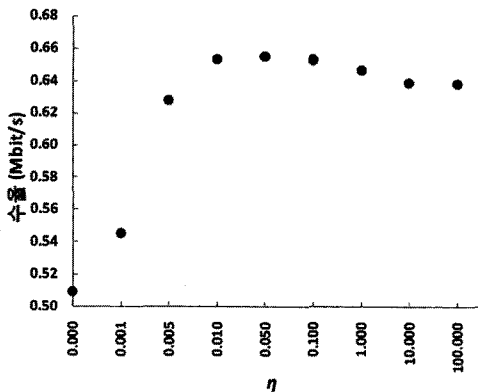


그림 3  $\eta$ 에 따른 수율

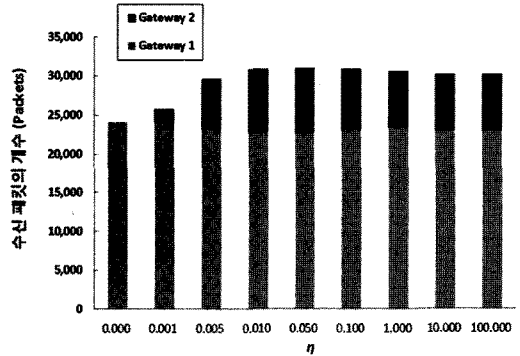


그림 4  $\eta$ 에 따른 게이트웨이 수신 패킷의 개수

표 2 각 프로토콜의 성능 비교

성능 척도	FAR	FDMR	AODV-UU
Gateway 1 수신 패킷 개수(Packets)	22,595	24,043	16,443
Gateway 2 수신 패킷 개수(Packets)	8,310	0	0
패킷 전송률(%)	93.4	72.7	50.0
수율(Mbit/s)	0.66	0.51	0.34
지연 시간(s)	0.097	0.287	1.035

트웨이의 자원 100%를 소진할 정도는 되지만, 두 게이트웨이의 자원 100%를 소진할 정도까진 미치지 못하기 때문이다. 그림 4에서와 같이 각 게이트웨이가 처리하는 패킷의 양을 살펴보면 위의 해석이 가능함을 알 수 있다.

4.3 기존 프로토콜들과의 성능 비교

FAR의 우수성 검증을 위해 기존 프로토콜인 FDMR과 AODV-UU의 성능 비교를 수행하였다. 여기서 제시된 FAR의 결과는  $\eta$ 가 0.05일 때를 측정된 것이다. 표 2에서 보듯이, FAR는 두 게이트웨이를 모두 사용하는 반면, FDMR과 AODV-UU는 게이트웨이 하나만을 사용하였다. 두 프로토콜과 마찬가지로 FAR에는 게이트웨이간의 협력 통신 제어에 대한 기능이 없음에도 불구하고, Gateway 2가 Gateway 1의 트래픽을 수용했다는 사실은 상당히 고무적이라 할 수 있다. 1홉 정보 교환만을 통해 형성된 장이 트래픽 부하 정도를 반영하여 게이트웨이 간의 부하 분산을 유도하는 특징은 플러딩 기반 프로토콜에 비해 네트워크 자원을 보다 효율적으로 사용할 수 있다는 장점이 있는 것이다. FAR는 부하 분산을 통해 패킷 충돌 빈도를 감소시켜 높은 패킷전송률을 보인다. 이는 또한, 네트워크 전체 수율을 증가시키고, 지연 시간을 감소시킨다.

5. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 물리적 장이론에서 착안하여, 플러딩

오버헤드를 수반하지 않는 무선 메쉬 네트워크에 적합한 애니캐스트 필드 라우팅 기법(FAR)을 제안하였다. 포아송 방정식에 기반하여 격자 구조 형태의 네트워크 메쉬 노드에 포텐셜 값을 할당하여 포텐셜이 높은 노드에서 낮은 노드로 패킷을 보내는 라우팅 기법이다. 분산 처리 방식으로 트래픽의 변화를 동적으로 라우팅 메트릭에 반영하기 위해 수치해석기법인 유한 차분법(FDM)을 사용하였다. FAR의 라우팅 메트릭은 게이트웨이까지의 거리와 혼잡 상황을 동시에 반영하는데, 이 때 단순히 1홉 이웃 노드들에 대한 정보만을 이용한다는 장점을 가진다. FDM은 격자 구조에 국한되어 사용되지만, 유한요소법(FEM)을 이용하여 랜덤한 구조의 토폴로지에서도 적용 가능한 라우팅 기법을 제시할 수 있다.

향후 연구로 FAR가 사용될 수 있는 격자 메쉬 구조의 도로 감시 시스템, LTE-Advanced 기반 메쉬 네트워크 등에서의 실제 응용 모델 정립이 가능하다.

### 참 고 문 헌

- [1] C. Mets, "IP Anycast Point-to-(Any) Point Communication," *IEEE Internet Computing*, vol.6, no.2, pp.94-98, 2002.
- [2] J. Wang, Y. Zheng, and W. Jia, "An AODV-Based Anycast Protocol in Mobile Ad hoc Network," in *Proceedings of IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, pp.221-225, 2003.
- [3] U. C. Kozat and L. Tassiulas, "Network Layer Support for Service Discovery in Mobile Ad hoc Networks," in *Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pp.1965-1975, 2003.
- [4] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 3rd edition, Prentice Hall, 1998.
- [5] V. Lenders and R. Baumann, "Link-Diversity Routing: a Robust Routing Paradigm for Mobile Ad hoc Networks," in *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.2585-2590, 2008.
- [6] A. Basu, A. Lin, and S. Ramanathan, "Routing Using Potentials: a Dynamic Traffic-Aware Routing Algorithm," in *Proceedings of the ACM annual conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, pp.37-48, 2003.
- [7] V. Lenders, M. May, and B. Plattner, "Density-Based Anycast: a Robust Routing Strategy for Wireless Ad hoc Networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol.16, no.4, pp.852-863, 2008.
- [8] R. Baumann, S. Heimlicher, and B. Plattner, "Routing in Large-Scale Wireless Mesh Networks Using Temperature Fields," *IEEE Network*, vol.22, no.1, pp.25-31, 2008.
- [9] NS-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [10] C. E. Perkins et al., "Performance Comparison of Two on-Demand Routing Protocols for Ad hoc Networks," *IEEE Personal Communications*, vol.8, no.1, pp.16-28, 2001.