

논문 2009-46TC-8-6

에러율이 높은 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시키기 위한 라우팅 기법

(A Routing Mechanism to Prolong the Lifetime of Error-Prone Wireless Sensor Networks)

최 재 원*, 이 광 휘*

(Jaewon Choi and Kwang-Hui Lee)

요 약

본 논문에서는 에러율이 높은 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시키기 위한 라우팅 알고리즘을 제안한다. 제안하는 기법은 무선 링크의 품질을 기반으로 하여 패킷을 송수신한 이후의 잔여 에너지를 미리 추정하고, 그 때의 에너지가 가장 많이 남아 있을 것으로 예상되는 경로로 데이터를 전송한다. 제안하는 기법은 에러율을 고려하기 때문에 불필요한 재전송에 따른 에너지 소비를 줄이고 트래픽도 골고루 분산시킨다. 그리고 송수신 이후의 잔여 에너지양들 중에서 최소값이 가장 클 것으로 예상되는 경로를 선택함으로써 노드의 에너지 고갈을 최대한으로 지연시킨다. 다른 방식들에 비하여 제안하는 기법이 네트워크의 수명을 더욱 연장시킨다는 사실을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents a routing mechanism to prolong the lifetime of error-prone wireless sensor networks. The proposed mechanism estimates the amount of energy consumption for communications and the expected residual energy in advance, which is based on the qualities of wireless links. Then, the proposed mechanism selects a path that is expected to have the most residual energy, and sends sensory data along the path. This mechanism reduces energy consumption caused by unnecessary retransmissions and distributes traffic evenly over the network owing to taking error rates into consideration, and extends energy depletion by selecting a path with the maximum of the minimal expected residual energy amounts. The experiment results show that the proposed mechanism prolongs network lifetime, compared to the existing methods.

Keywords : WSNs, Routing, Network Lifetime, Energy

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 온도, 조도, 습도 등의 물리적인 현상을 감시하기 위한 목적으로 많은 개수의 센서 노드들로 구성된다. 이러한 센서 노드들은 특정한 환경

에 노출되고 협업을 통하여 주어진 임무에 맞는 정보를 수집한 후 싱크 노드로 전송한다. 센서 노드가 배치되는 지리적인 특성으로 인하여 일정한 지역 내에 무작위로 배치되는 경우가 일반적이며, 이러한 이유로 인하여 무선 센서 네트워크는 자가 구성(self-organization) 능력이 요구된다. 또한, 센서 노드들은 접근하거나 관리되기 어려운 경우가 많으므로, 센서 노드들의 배터리가 고갈되면 충전하거나 교체하기 어렵기 때문에 네트워크는 더 이상 데이터 수집 기능을 수행할 수 없게 된다. 따라서, 무선 센서 네트워크의 프로토콜들은 에너지를 가능한 한 효율적으로 사용해야 한다^[1]. 이러한 배경에

* 정희원, 창원대학교 컴퓨터공학과
(Dept. of Computer Engineering, Changwon National University)

※ 이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.
(KRF-2007-357-D00208)

접수일자: 2009년4월30일, 수정완료일: 2009년8월5일

근거하여, 무선 센서 네트워크와 관련된 많은 연구들은 에너지 효율성과 네트워크 수명에 초점이 맞추어져 있다^[2-3].

무선 센서 네트워크에서 에너지 소비를 줄이기 위한 방안으로는 다음과 같은 것들이 있다^[4]. 먼저, 하나의 긴 홉으로 전달하는 것보다는 여러 개의 짧은 홉들을 거쳐서 전송하는 것이 통신에 소비되는 에너지가 적으므로, 무선 센서 네트워크는 기본적으로 멀티 홉(multi-hop) 전송 기법을 사용한다^[5]. 다음으로, 무선 센서 네트워크는 동일한 데이터의 중복성이 높으므로 통합(aggregation)과 퓨전(fusion)과 같은 네트워크 내부에서의 처리(in-network processing)를 통하여 데이터를 결합(combination)시킴으로써 전송 데이터의 양을 축소시키는 방법이 있다. 이는 내부 연산에 의해 소비되는 에너지는 통신에 의해 소비되는 에너지보다 적기 때문이다^[6]. 또 다른 하나의 방법은 저전력 수면 모드(low-power sleep mode)를 사용하는 것이다. 데이터를 감지하거나 전송하지 않을 때에는 노드의 운용에 필요한 최소한의 전력만 사용함으로써 노드의 에너지 소비를 최소화시키는 것이다. 마지막으로, 라우팅 방식에 의하여 에너지 소비를 골고루 분산시킴으로써 특정한 노드에 에너지 소비가 집중되는 것을 방지하여 네트워크의 사용 시간을 연장시키는 방법이 있다.

본 논문은 경로 선정 기법에 의하여 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시키고자 한다. 라우팅에 의하여 트래픽을 분산시키는 기법들은 대부분 노드의 잔여 에너지에 의존한다. 즉, 에너지가 더욱 많이 남아 있는 노드들을 통하여 데이터를 전송함으로써 노드들의 에너지 고갈을 최대한 지연시키는 방법으로 수명을 늘이는 것이다. 하지만, 기존의 기법들은 현재의 잔여 에너지만을 기반으로 할 뿐이며, 앞으로 데이터를 전송함으로써 소비하게 될 에너지양은 예측하지 못한다. 현재의 잔여 에너지는 다른 노드들보다 많지만, 이후에는 데이터 송수신을 위하여 더 많은 에너지를 소비할 가능성도 배제할 수 없다. 왜냐 하면, 해당 노드의 링크 신뢰성이 낮아 패킷 손실과 재전송이 다른 노드들에서보다 더욱 자주 발생할 수도 있기 때문이다. 이에 대한 원인은 다른 네트워크들에 비하여 비교적 에러율이 높은 무선 매체의 특성과 전파에 영향을 미치는 열악한 환경에서 찾을 수 있다. 따라서, 본 논문은 무선 링크의 품질을 기반으로 하여 패킷을 송수신한 이후의 잔여 에너지를 미리 추정하고, 그 때의 최소 에너지양이 가장 많을 것으로

예측되는 경로로 데이터를 전송하고자 하는 것이다. 이러한 방법으로 노드의 에너지 고갈을 최대한 지연시킴으로써 네트워크의 수명을 연장시키고자 하는 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 에너지 효율성 및 네트워크 수명과 관련된 기존의 라우팅 기법들을 고찰한다. III장에서는 링크 에러율과 잔여 에너지 예측을 통하여 에너지 효율적인 경로를 선택하는 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 실험을 통하여 기존의 라우팅 기법과 제안 알고리즘의 네트워크 수명을 비교 및 분석한다. 마지막으로, V장에서 결론을 맺고 향후 연구 과제를 언급한다.

II. 관련 연구

본 장에서는 센서 노드들의 에너지 효율성을 높이고 네트워크의 수명을 연장시키기 위한 기존의 라우팅 기법들을 고찰해 본다.

플러딩(flooding)^[7]은 데이터나 메시지 패킷을 수신하는 각 노드가 자신의 모든 이웃 노드들로 데이터를 브로드캐스트하는 것이다. 상태 정보를 유지할 필요가 없으므로, 토폴로지를 유지하기 위한 비용과 경로 발견을 위한 복잡한 알고리즘을 요구하지 않는다. 또한, 정보를 빠르게 전파한다는 장점이 있다. 그러나, 내파(implosion)와 겹침(overlapping), 그리고 자원 무분별(resource blindness)의 문제가 있다. 자원 무분별이란 노드의 이용 가능한 에너지를 전혀 고려하지 않는다는 것이다. 가시평(gossiping)^[7]은 플러딩의 고전적인 대안으로서 에너지 효율성을 성취하기 위한 것이다. 수신되는 패킷을 브로드캐스트하지 않고 임의의 노드를 선택하여 전달한다. 임의의 노드로 하나의 데이터 사본을 전송하기 때문에 내파 문제가 발생하지는 않는다. 하지만, 모든 노드들로 메시지를 전파하는데 시간이 오래 소요되며, 모든 노드들로 데이터가 전달된다는 것을 보장할 수 없다. SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation)^[8-9]은 플러딩과 가시평의 단점을 보완하기 위해 제안된 것으로서 메타 데이터를 이용한 협상을 통하여 데이터를 전송한다. 또한, LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)^[10]와 같은 계층적인 방식들도 제안되었는데, 이는 대표 노드(cluster head)만이 제어와 데이터 전송에 참여함으로써 데이터의 전파 범위를 제한시키고 에너지 소비를 균등하게 분산시키기 위한 것이다.

이외에도, Directed Diffusion(DD)^[11~13]이라는 데이터 중심적 라우팅 기법도 제안되었다. DD는 질의에 해당하는 Interest 패킷의 전파 과정을 통하여 경사들(Gradients)을 설정하고, 이들 중에서 선호하는 경사(경로)를 선택하여 데이터를 전송하는 메커니즘이다. 기존의 DD가 선택하는 경사는 Interest 패킷의 전파 지연시간이 가장 짧은 것이다. DD는 선택된 경사 방향으로만 데이터를 전송함으로써 센싱 데이터의 전송량을 줄였지만, Interest 패킷의 전파와 경사 설정 과정에는 에너지에 대한 고려가 전혀 없다. EDDD(Energy-Efficient Differentiated Directed Diffusion)^[14]는 DD를 기반으로 한 것으로서, 실시간 트래픽의 전송을 위한 RT 필터와 일반 데이터의 전송을 위한 BE 필터가 포함되어 있다. BE 필터는 특별한 QoS(Quality of Service) 요구사항이 없는 데이터 전송에 대하여 네트워크의 수명을 늘이는데 목적이 있다. BE 필터는 Interest 패킷의 전파 과정 동안 경로 상에 있는 노드들의 잔여 에너지 값들 중에서 최소값을 갱신해 나간다. 소스 노드는 Interest 패킷이 수신된 방향의 경사들 중에서 잔여 에너지의 최소값이 가장 큰 경사를 선택한다. 이는 특정한 노드의 에너지 고갈을 최대한으로 지연시킴으로써 네트워크의 수명을 연장시키기 위한 것이다. 이러한 접근법은 네트워크의 자원을 관리하는 분야에서 이미 사용되고 있던 방식으로서 Max-Min 문제라고 불린다.

III. 제안 알고리즘

본 장에서는 에러율이 높은 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시키기 위한 라우팅 기법을 제안한다.

본 논문에서 네트워크의 수명은 데이터 전송을 위하여 더 이상 선택할 경로가 없는 시점으로 정하며, 이는 노드의 잔여 에너지양에 의존적이다. 즉, 노드의 에너지가 고갈되어 통신에 참여할 수 없게 되면, 이 노드가 포함된 경로는 더 이상 사용이 불가능하게 된다. 따라서, 잔여 에너지양이 적은 노드의 사용을 피하는 것은 에너지 고갈을 방지 또는 연장시키는 좋은 수단이 된다. 이와 같은 점에 착안한 것이 EDDD의 BE 필터이다. BE 필터는 여러 경사들의 최소 잔여 에너지양들 중에서 가장 큰 값을 가지는 경사를 선택하여 센싱 데이터를 전송한다. 본 논문에서는 이를 Max-Min DD라고 명명하도록 한다. 하지만, 데이터를 전송하고자 하는 현재 시점에서는 더 많은 양의 에너지를 가졌다고 하더라도,

데이터의 송수신 이후에는 오히려 다른 노드들보다 잔여 에너지의 양이 적을 수 있다. 이는 해당 노드의 링크 품질이 나빠서 패킷 손실과 재전송이 빈번하게 발생되어 더욱 많은 양의 에너지를 소비하게 되는 경우이다. 무선 센서 네트워크는 사용하는 무선 매체의 특성과 열악한 환경적인 요인으로 인하여 다른 네트워크들에 비하여 비교적 에러율이 높다는 점에서 이러한 고려는 타당성이 있다고 할 수 있다^[15~16]. 따라서, 본 논문에서는 링크의 에러율을 기반으로 하여 패킷을 송수신한 이후의 잔여 에너지를 예측하고, 이 값들의 최소값이 가장 큰 경로를 선택함으로써 에너지 고갈을 최대한으로 지연시키고 네트워크의 수명을 늘이고자 하는 것이다.

특정한 노드가 데이터를 송수신한 이후에 기대되는 잔여 에너지양(W_{xpt})은 식 (1)과 같이 현재의 잔여 에너지양(W_{cm})에서 통신에 소요될 에너지양(W_{com})을 감산함으로써 얻을 수 있다. 통신에 소요되는 에너지양은 식 (2)와 같이 수신 에너지양(W_{rcv})과 송신 에너지양(W_{trn})의 합이다. 만약, 패킷 전송 도중에 링크 상에서 손실이 발생되면 신뢰성 있는 데이터 전달을 위하여 재전송이 수행되어야 한다. 각각의 노드는 패킷 손실 또는 재전송 횟수를 카운트할 수 있으며, 패킷 손실 횟수에 대한 성공한 전송 횟수의 비율을 계산하고 그 이력을 유지할 수 있다^[17]. 본 논문에서는 이 비율을 링크 에러율(R_{err})이라고 명명한다. 즉, 링크 에러율은 패킷 손실이 발생할 가능성을 나타내게 된다. 따라서, 성공적인 패킷 전송을 위하여 소비되는 에너지양은 링크 에러율에 비례하고 전송 횟수에 따라 늘어나므로, 식 (2)는 식 (3)으로 표현될 수 있다. 결론적으로, 식 (1)과 식 (3)에 의하여 링크 에러율에 따른 패킷 송수신 이후에 기대되는 잔여 에너지양을 추정할 수 있게 된다.

$$W_{xpt(i)} = W_{crn(i)} - W_{com(i)} \tag{1}$$

$W_{xpt(i)}$: 노드 i 가 통신을 한 이후에 기대되는 잔여 에너지양
 $W_{crn(i)}$: 노드 i 의 현재 잔여 에너지양
 $W_{com(i)}$: 노드 i 가 통신에 소비하는 에너지양

$$W_{com(i)} = W_{rcv(i)} + W_{trn(i)} \tag{2}$$

$W_{com(i)}$: 노드 i 가 통신에 소비하는 에너지양
 $W_{rcv(i)}$: 노드 i 가 수신에 소비하는 에너지양
 $W_{trn(i)}$: 노드 i 가 송신에 소비하는 에너지양

$$W_{com(i)} = W_{rcv(i)} + \frac{1}{1 - R_{err(i)}} \times W_{trn(i)} \tag{3}$$

$R_{err(i)}$: 노드 i 의 링크 에러율

$$NRG_{(i,0)} = \text{Min}_{n=1}^i \{ W_{xpt(n)} \} \quad (4)$$

$NRG_{(i,0)}$: 노드 i 에서 싱크 노드 0까지의 경로 상에 존재하는 모든 노드들의 기대되는 잔여 에너지양들 중에서 최소값

$$NRG_{(i,0)} = \text{Min} \{ NRG_{(i-1,0)}, W_{xpt(i)} \} \quad (5)$$

이상과 같이, 각각의 노드에서 기대되는 잔여 에너지 양은 식 (1)과 식 (3)에 의하여 추정되고, 경로 상의 최소값은 식 (4)에 의하여 선택될 수 있다. 이 때, 경로 상에 존재하는 노드들의 기대되는 잔여 에너지양들 중에서 최소값(NRG)은 DD의 Interest 전파 과정에서 식 (5)에 의하여 간단하게 갱신된다. 어떠한 노드가 수신한 Interest 패킷 내에는 싱크 노드로부터 자기 이전의 노드들까지의 기대되는 잔여 에너지 값들 중에서 최소값($NRT_{(i-1,0)}$)이 들어 있는데, 이 값과 자기 자신의 기대되는 잔여 에너지 값($W_{xpt(i)}$)을 비교하여 더 작은 값으로 대체한다. 그런 다음, 자신이 유지하는 테이블의 경사 정보들을 갱신하고, 다시 이웃하는 노드들로 Interest 패킷을 전파시킨다. Interest 패킷을 수신하는 노드들 중에서 Interest 패킷 내의 질의에 부합하는 데이터를 가진 노드는 소스 노드가 된다. 소스 노드는 여러 경사들 중에서 $NRG_{(i,0)}$ 값이 가장 큰 경사를 선택함으로써 해당되는 경로를 통하여 싱크 노드 방향으로 센싱 데이터를 전달하게 된다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 근본적으로 최소 잔여 에너지가 가장 큰 경로를 선택하기 위한 기법이다. 하지만, 현재의 잔여 에너지양에 기반하는 기존의 방식들과는 달리, 제안한 기법은 패킷을 송수신한 이후의 잔여 에너지양이 얼마나 될 것인가를 에러율에 근거하여 추정하였다. 그리고 그 최소값이 가장 큰 경로를 선택하여 센싱 데이터를 전달함으로써 노드의 에너지 고갈을 최대한으로 지연시키고 네트워크의 수명을 연장시키고자 한 것이다.

IV. 네트워크 수명 분석

본 장에서는 제안하는 기법을 적용했을 때의 네트워크 수명을 분석하고자 한다.

본 알고리즘의 성능을 비교하기 위한 대상은 Interest 패킷의 전파 지연시간이 가장 짧은 경로를 선택하는 Original DD와 현재의 잔여 에너지양의 최소값이 가장

표 1. 실험 파라미터의 설정

Table 1. Configuration of experiment parameters.

Item	Value
Number of nodes	100
Initial energy of each node	1 J
Transmitting power	77.4 mW
Receiving power	55.5 mW
Packet size	1,024 bits
Interarrival time	100 ms
Bandwidth	250 Kbps

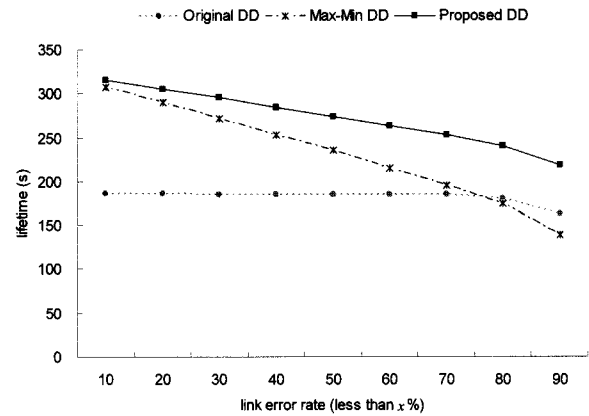


그림 1. 링크 에러율에 따른 네트워크 수명
Fig. 1. Network lifetime under different link error rates.

큰 경로를 선택하는 Max-Min DD이다. 제안 알고리즘 역시 DD 메커니즘에 적용되었다. 본 논문에서 제안하는 DD는 링크 에러율을 기반으로 하여 통신에 사용될 에너지양을 추정하고 패킷 송수신 이후의 잔여 에너지양의 최소값이 가장 큰 경로를 선택한다.

시뮬레이션은 DD의 기본적인 데이터 전파 메커니즘과 각각의 경사 설정 알고리즘들을 구현하여 수행하였다. 본 논문에서의 시뮬레이션 환경과 파라미터의 설정은 표 1과 같다^[18]. 각각의 노드는 자신과 이웃하는 노드들까지의 링크 에러율을 계산 및 유지하는 것으로 가정하였다. 그리고 실제 실험에서 링크 에러율은 특정한 상한값 미만에서 균등한 분포를 가지는 랜덤한 값을 생성하여 각각의 링크에 동적으로 할당하였다. 실험은 각각의 방식에 의하여 선택된 경로 상으로 패킷을 전송하였을 때의 네트워크 수명을 측정하는 것으로 하였다. 실험 결과를 나타내는 각 그래프의 점들은 이와 같은 측정을 100번 수행한 후의 평균값으로 표시한 것이다.

그림 1은 링크 에러율을 변화시켜가면서 네트워크의 수명을 측정한 결과이다. 에러율이 높아질수록 패킷 손실에 따른 재전송이 더욱 빈번하게 발생되어 에너지 소

비가 많기므로 네트워크의 수명은 짧아진다. 하지만, 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼, 제안하는 기법의 네트워크 수명은 항상 다른 방식들보다 길다. Original DD는 에너지를 고려하지 않았기 때문에 네트워크의 수명이 가장 짧다. 하지만, Original DD가 지연시간이 짧은 경로를 선택한다는 것은 상대적으로 링크 에러율이 낮은 경로를 선택한다는 것을 의미한다. 에러율은 패킷 손실을 유발하고 재전송을 수반하기 때문에 에러율이 낮으면 지연시간도 짧아질 가능성이 높다. 또한, 에러율이 낮으면 재전송 횟수도 상대적으로 적기 때문에 소비되는 에너지도 줄어들게 된다. 따라서, Original DD는 에너지를 고려하지 않았지만 간접적으로 에러율이 반영되어 있기 때문에 Original DD의 네트워크 수명은 아주 조금씩 줄어들게 된다. Max-Min DD는 잔여 에너지를 고려하였기 때문에 Original DD보다 네트워크의 수명이 훨씬 길다. 하지만, 에러율은 고려하지 않았기 때문에 에러율이 높아질수록 재전송에 소비되는 에너지의 양도 급격하게 늘어나게 되어 네트워크의 수명은 큰 폭으로 줄어들게 된다. 결국, 에러율이 어느 정도 수준 이상이 되면, 에러율이 간접적으로 반영된 Original DD보다 Max-Min DD의 네트워크 수명은 오히려 짧아진다. 네트워크 토폴로지, 에러율 분포, 전송 주기 등 다양한 요인에 따라 달라질 수 있으나, 본 실험에서는 그림 1에서 보는 것처럼 약 75%의 에러율을 기점으로 하여 Max-Min DD의 네트워크 수명이 Original DD의 네트워크 수명보다 짧아진다. 이에 반하여, 제안하는 DD는 에러율에 따라 예상되는 소비 에너지와 잔여 에너지양

을 모두 고려하였기 때문에 Original DD 및 Max-Min DD 보다 항상 네트워크의 수명이 길다.

라우팅의 측면에서 네트워크의 수명은 전송 횟수와 트래픽 분산에 영향을 받는다. 먼저, 그림 2는 네트워크의 수명이 끝날 때까지 네트워크 내에서 발생한 총 재전송 횟수를 분석한 결과이다. 제안하는 DD는 경사의 설정 과정에 직접적으로 에러율을 반영하였기 때문에 재전송 횟수가 가장 적다. 주목할 점은 그림 1에서 확인한 것처럼 제안하는 DD의 네트워크 수명이 가장 길기 때문에 가장 많은 데이터를 전달하였음에도 불구하고 재전송은 가장 적게 발생했다는 사실이다. Original DD는 전파 지연시간을 기반으로 하지만 에러율이 간접적으로 반영되었으므로 제안하는 DD보다는 많지만 Max-Min DD보다는 적다. Max-Min DD는 현재의 잔여 에너지만 고려하고 에러율과는 무관하기 때문에 재전송이 가장 많이 발생한다.

마지막으로, 트래픽 분산 정도를 살펴보기 위하여 전송 횟수에 대한 표준편차를 분석하였다. 그림 3은 각각의 노드에 의한 패킷 전송 횟수들에 대하여 표준편차를 산출하여 표시한 그래프이다. 표준편차가 작다는 것은 모든 노드들이 비슷한 횟수로 데이터 전달에 참여함으로써 트래픽이 네트워크에 골고루 분산되었다는 것을 의미한다. 그림 3에서 보는 것처럼, 에러율이 높아질수록 표준편차는 모두 작아지는데, 제안하는 DD가 항상 가장 작은 값을 나타낸다. 따라서, 본 알고리즘이 트래픽을 가장 잘 분산시켰다는 것을 확인할 수 있으며, 그 결과로 네트워크의 수명이 연장되었다는 사실도 알 수 있다. Original DD는 전파 지연시간이 짧은 경로를 선

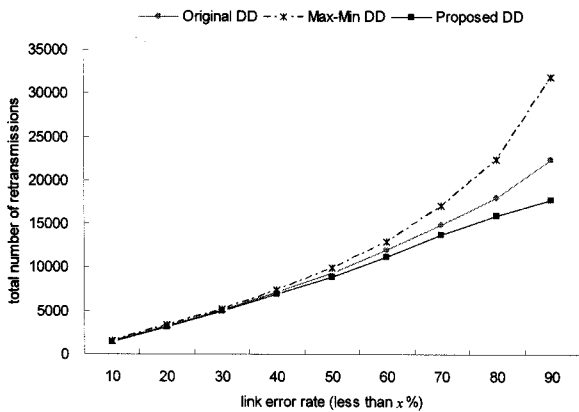


그림 2. 링크 에러율에 따른 네트워크 내에서의 총 재전송 횟수

Fig. 2. Total number of retransmissions in the network under different link error rates.

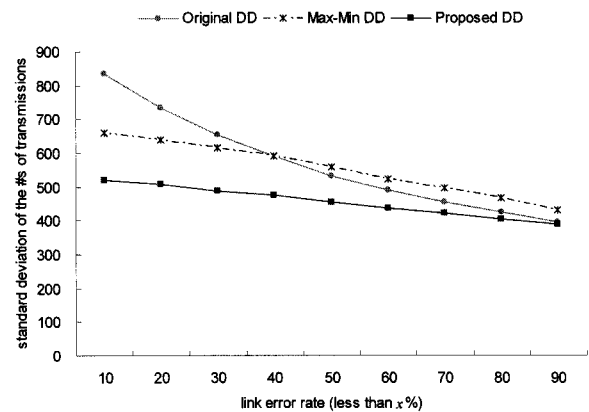


그림 3. 링크 에러율에 따른 전송 횟수의 표준편차

Fig. 3. Standard deviation of the numbers of transmissions.

택하기 때문에 상대적으로 에러율이 낮은 경로를 자주 이용하게 된다. 따라서, 세 가지 방식들 중에서 Original DD의 트래픽 분산 효과가 가장 미미하다. 하지만, 에러율이 높아질수록 더욱 다양한 경로들을 선택하게 됨으로써 트래픽의 분산 정도는 점점 더 커지게 된다. 이에 반하여, Max-Min DD는 현재의 잔여 에너지양에 의존하여 경로를 선택하므로, 이전에 사용한 경로를 연속적으로 사용할 가능성이 적기 때문에 Original DD보다는 트래픽 분산 효과가 크게 나타난다. 하지만, 본 실험 환경에서는 약 40%의 에러율을 기점으로 하여 Original DD의 표준편차가 Max-Min DD의 표준편차보다 작아진다. Original DD는 에러율의 영향을 받아 점점 더 다양한 경로들을 선택하게 됨으로써 표준편차가 큰 폭으로 줄어드는 반면에, Max-Min DD는 에러율에 많은 영향을 받지 않으므로 줄어드는 표준편차의 폭이 작기 때문이다.

이상의 실험 결과들에서 알 수 있는 것처럼, 제안하는 DD는 상대적으로 적은 홉수의 재전송과 효과적인 트래픽 분산에 의하여 네트워크의 수명을 연장시킨다. 따라서, 제안하는 DD는 무선 매체의 특성과 환경적인 요인에 의하여 에러율이 상대적으로 높은 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시키는데 효과적인 알고리즘이다.

V. 결 론

본 논문에서는 에러율이 높은 무선 센서 네트워크의 수명을 연장시키기 위한 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 무선 링크의 품질을 기반으로 하여 패킷을 송수신한 이후의 잔여 에너지를 미리 추정하고, 그 때의 에너지가 가장 많이 남아 있을 것으로 예상되는 경로로 센싱 데이터를 전송하였다. Original DD는 에너지에 대한 고려가 미비하지만 에러율이 간접적으로 반영되어 있다. Max-Min DD는 현재의 잔여 에너지를 기반으로 하지만 에러율을 고려하지 못하였다. 이에, 본 논문에서는 무선 매체의 특성과 환경적인 제약으로 야기될 수 있는 에러율과 데이터 송수신 이후의 잔여 에너지를 모두 고려하고자 한 것이다.

실험을 통하여, 제안하는 DD 기법이 다른 방식들에 비하여 네트워크의 수명을 더욱 연장시킨다는 사실을 확인할 수 있었다. 제안하는 기법은 에러율을 고려하였기 때문에 재전송 홉수가 줄어들었고 트래픽도 다른 방식들보다 골고루 분산시켰다. 그리고 송수신 이후의 잔

여 에너지양들 중에서 최소값이 가장 큰 경로를 선택함으로써 노드의 에너지 고갈을 최대한으로 지연시킬 수 있었다. 향후에는 통신에 소비되는 에너지 외에 노드 상에서의 에너지 소비도 함께 고려하는 알고리즘을 개발하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramanian, and Erdal Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, Aug. 2002.
- [2] Jamal N. Al-Karaki and Ahmed E. Kamal, "Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 11, No. 6, pp. 6-28, Dec. 2004.
- [3] Kemal Akkaya and Mohamed Younis, "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, Vol. 3, No. 3, pp. 325-349, May 2005.
- [4] Jae-Won Choi, "An Application-Specific QoS Routing Mechanism in Wireless Sensor Networks," Ph.D. Dissertation, Changwon Nat'l University, Dec. 2006.
- [5] Gregory J. Pottie and William J. Kaiser, "Embedding the Internet: Wireless Integrated Network Sensors," *Communications of the ACM*, Vol. 43, No. 5, pp. 51-58, May 2000.
- [6] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks," in *Proc. of the Hawaii International Conference System Sciences*, Hawaii, Jan. 2000.
- [7] S. Hedetniemi and A. Liestman, "A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks," *IEEE Networks*, Vol. 18, No. 4, pp. 319-349, 1988.
- [8] W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks," in *Proc. of the 5th Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 1999)*, pp. 174-185, Seattle, Washington, USA, Aug. 15-20, 1999.
- [9] J. Kulik, W. R. Heinzelman, and H. Balakrishnan, "Negotiation-Based Protocols for Disseminating Information in Wireless Sensor Networks," *Wireless Networks*, Vol. 8, pp. 169-185, 2002.

- [10] W. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks," in Proc. of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2000), Jan. 2000.
- [11] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks," in Proc. of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), pp. 56-67, Boston, Massachusetts, USA, Aug. 6-11, 2000.
- [12] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, John Heidemann, and Fabio Silva, "Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking," IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), Vol. 11, No. 1, pp. 2-16, Feb. 2003.
- [13] Fabio Silva, John Heidemann, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin, "Directed Diffusion," USC/ISI Technical Report ISI-TR-2004-586, Feb. 10, 2004.
- [14] Min Chen, Taekyoung Kwon, and Yanghee Choi, "Energy-Efficient Differentiated Directed Diffusion (EDDD) in Wireless Sensor Networks," Computer Communications, Vol. 29, No. 2, pp. 231-245, Jan. 10, 2006.
- [15] Jae-Won Choi and Kwang-Hui Lee, "A Reliable Data Transfer Mechanism Using Directed Diffusion in Wireless Sensor Networks," Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 43-TC, No. 8, pp. 77-83, Aug. 2006.
- [16] Jae-Won Choi and Kwang-Hui Lee, "A Real-Time Data Transfer Mechanism Considering Link Error Rates in Wireless Sensor Networks," Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 44-TC, No. 1, pp. 146-154, Jan. 2007.
- [17] Emad Felemban, Chang-Gun Lee, Eylem Ekici, Ryan Boder, and Serdar Vural, "Probabilistic QoS Guarantee in Reliability and Timeliness Domain in Wireless Sensor Networks," in Proc. of IEEE INFOCOM 2005, Miami, Florida, USA, Mar. 13-17, 2005.
- [18] Texas Instruments, CC2520 Datasheet, <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2520.html>

저 자 소 개



최 재 원(정회원)
 2000년 2월 창원대학교
 컴퓨터공학과 (공학사)
 2002년 2월 창원대학교
 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2007년 2월 창원대학교
 컴퓨터공학과 (공학박사)
 2007년 12월~2008년 11월 미국 미주리대학교
 박사후 연구원
 2009년 2월~현재 창원대학교 컴퓨터공학과
 초빙교수
 <주관심분야: 무선 센서 네트워크, QoS 라우팅,
 네트워크 관리 시스템>



이 광 휘(정회원)
 1983년 2월 고려대학교
 전자공학과 (공학사)
 1985년 2월 고려대학교
 전자공학과 (공학석사)
 1989년 2월 고려대학교
 전자공학과 (공학박사)
 1991년~1992년 영국 Wales 대학(Swansea) 및
 Newbridge Networks 연구원
 1992년~1993년 영국 Reading 대학 연구원
 1997년~1998년 영국 Reading 대학 연구원
 2001년~2002년 영국 UCL 방문연구원
 2007년~2008년 영국 Reading 대학 방문연구원
 1988년~현재 창원대학교 컴퓨터공학과 교수
 <주관심분야: 무선 센서 네트워크, QoS/네트워크
 관리, 멀티캐스팅, 모바일 컴퓨팅>