논문 13-38B-06-04

한국통신학회논문지 '13-06 Vol.38B No.06
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2013.38B.6.446

계층적 센서네트워크에서 에너지 효율성을 위한 최적의 클러스터 비율 분석

김 자 룡•, 김 대 영*, 조 진 성°

An Analysis of Energy Efficient Cluster Ratio for Hierarchical Wireless Sensor Networks

Zilong Jin•, Dae-Young Kim*, Jinsung Cho°

요 약

무선 센서네트워크에서 클러스터링 기법은 네트워크 확장성과 네트워크 수명 연장에 효율적이라고 인정받고 있다. 본 논문에서는 클러스터 기반 센서 네트워크에서 multi-hop to one-hop 전송 환경을 고려하여 에너지 효율성에 최적인 클러스터 비율(cluster ratio, CR)을 분석하는데 초점을 둔다. 본 논문에서는 지정한 클러스터 비율을 통한 시스템 홉 수(hop-count) 최소화와 노드 간 패킷수신율(packet reception ratio, *PRR*) 최대화 사이의 이해득실(trade-off) 관계를 분석하고 이 두 요소를 종합적으로 고려하여 목표함수를 유도한다. 제안한 목표함수를 통하여 얻은 최적의 클러스터 비율은 네트워크에서 패킷 전송에 드는 비용뿐만 아니라 노드 간 재전송 오버헤드를 줄여줌으로써 에너지 효율성을 향상시킨다. 본 논문에서 제안한 기법은 최소 홉 수 클러스터링 방안과 비교되며 시뮬레이션을 통하여 향상된 에너지 효율성을 검증하였다.

Key Words : cluster ratio, energy efficiency, packet reception ratio, hierarchical wireless sensor networks

ABSTRACT

Clustering schemes have been adopted as an efficient solution to prolong network lifetime and improve network scalability. In such clustering schemes cluster ratio is represented by the rate of the number of cluster heads and the number of total nodes, and affects the performance of clustering schemes. In this paper, we mathematically analyze an optimal clustering ratio in wireless sensor networks. We consider a multi-hop to one-hop transmission case and aim to provide the optimal cluster ratio to minimize the system hop-count and maximize packet reception ratio between nodes. We examine its performance through a set of simulations. The simulation results show that the proposed optimal cluster ratio effectively reduce transmission count and enhance energy efficiency in wireless sensor networks.

Ⅰ. 서 론

무선 센서 네트워크는 백본망이나, 인프라 구축 없이 애드 혹(ad-hoc) 기반으로 중앙 집중식, 또는 분산적인 방식으로 네트워크 구축이 가능하다. 센서 네트워크는 센서 디바이스의 센싱 기능을 이용하여

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업 (NIPA-2013-(H0301-13-2001)) 및 교육과학기술부 및 한국과학재단의 중견연구자 사업(No. 2011-0015744)의 지원으로 수행된 연구결과임.
• 주저자 : 경희대학교 컴퓨터공학과 모바일 및 임베디드 시스템 연구실, jinzilong@khu.ac.kr, 학생회원
° 교신저자 : 경희대학교 컴퓨터공학과, chojs@khu.ac.kr, 종신회원
* ㈜ AirPlug, kimdy@airplug.com, 정회원
논문번호 : KICS2013-03-126, 접수일자 : 2013년 3월 7일, 최종논문접수일자 : 2013년 6월 11일

환경 감지, 침입 감지 또는 전장(battlefield)과 같은 인위적인 데이터 수집이 위험하거나 불가능한 영역에서 활용되고 있다. 센서네트워크에서의 기본 구성요소인 센서 노드는 한정된 배터리 용량, CPU 효율 및 복잡한 배치환경과 같은 다양한 제약조건에 직면한다. 이런 응용을 보면 보통 수백, 수천 개의 센서디바이스를 배치하고 근접하기 어려운 환경에 설치하기 때문에 디바이스의 배터리 교환은 대부분 불가능하다. 따라서 한정된 배터리 자원은 센서네트워크의 수명을 좌우하는 가장 중요한 제약요소이며 PHY 계층, MAC 계층과 라우팅 계층에서 에너지 효율성 향상을 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

네트워크 구조상으로 보았을 때 무선 센서 네트워크는 평면적(flat) 구조와 계층적(hierarchical) 구조로 크게 분류된다. 평면적 구조에서 각각의 센서 노드의 책임과 수행하는 임무는 동등하며 직접 싱크 노드와 통신하거나 주변 노드의 중계를 통하여 multi-hop으로 통신한다. 이와 다르게 계층적 구조에서 센서 노드들이 모여 여러 개의 클러스터를 구축하며 각각의 클러스터 내에서는 한 개의 클러스터 헤드(cluster head, CH)와 여러 개의 클러스터 멤버(cluster member, CM)들을 가지게 된다. 클러스터링 기법은 계층적 구조를 이용하여 RF 통신에 드는 전력소비를 효율적으로 감소시켜 네트워크 수명을 연장할 수 있다[1]. 클러스터 내부에서 CM들은 센싱한 데이터를 해당하는 CH에 보내게 되며 CH에서는 수집한 데이터를 외부 싱크에게 one-hop 혹은 multi-hop 방식을 통하여 전송한다. 또한 많은 센서네트워크의 응용사례를 보면 센서 노드가 수집한 데이터 중에 많은 중복성(redundancy)이 존재하므로(온도측정, 습도, 압력 감시 등을 예로 들 수 있다.) CH가 CM으로부터 수집한 데이터를 처리함으로써 데이터 중복성을 줄여주는 역할을 한다. 그러므로 계층적 구조를 가진 클러스터 기반 센서네트워크는 CH의 데이터 결합(aggregation) 기능을 이용하여 각자 센서노드가 싱크노드와 통신하는 통신 오버헤드와 시스템의 전송 패킷수를 줄임으로 시스템 전반의 전력 소모를 크게 감소시킬 수 있다.

클러스터 기반 네트워크 구축으로 얻게 되는 시스템 성능향상은 배치한 클러스터 수에 좌우하게 된다[1-3,6,7]. 클러스터 수는 네트워크 전반에 분포한 CH와 CM의 비율을 의미하는 클러스터 비율이라는 용어로 표현할 수 있다. 한층 더 효율적인 계층적 네트워크 구축과 시스템 성능향상을 위하여 많은 연구들은 다양한 관점에서 최적의 클러스터 비율을 분석하였다. LEACH[2]는 가장 유명한 one-hop 전송상황에서 에너지 효율성을 보장한 클러스터링 알고리즘이다. HEED[3]는 LEACH 기반 클러스터링 알고리즘이며 센서 노드의 잔여 에너지를 고려하여 시스템의 균일한 에너지 소모를 보완하였다. LEACH와 HEED에서는 시스템의 최소 에너지 소모를 목표 함수로 두어 최적의 클러스터 비율(5%)을 제안하였다. 또한 [4-7]에서는 multi-hop 전송상황을 고려하여 시스템 전반의 에너지 효율성을 보장할 수 있는 클러스터링 알고리즘을 제안하였다. [6]에서 저자는 LEACH와 같은 목표함수를 유도하였으며 시뮬레이션을 통하여 최적의 클러스터 비율은 4%와 8%사이에 놓인다는 것을 보여주었으며 [7]에서는 네트워크 전반 홉 수 최소화에 초점을 두어 최적의 CR을 유도하였다. 그러나 이런 논문들에서는 이상적인 채널상황을 가정하여 최적의 클러스터 비율을 분석하였고 클러스터 크기변화로 인한 홉 수 증가, 또한 무선 채널의 불안정으로 인한 패킷의 재전송은 고려되지 않았다.

기존 LEACH와 HEED에서 가정했던 one-hop 전송상황은 실제 IEEE 802.15.4 기반 저전력 근거리통신 모듈로 실현하기 어렵다. 즉 넓은 필드에 계층적 구조를 가진 센서네트워크를 구축하였을 경우 CM와 CH사이의 직접 통신은 많은 에너지를 소모하며 심지어 직접 통신이 불가능할 수도 있다. 또한 단일 multi-hop 전송방식은 싱크와 가까운 CH에 중계해야할 데이터들이 집중됨으로써 심각한 에너지 소모를 초래하는 단점이 있다. 이런 문제점들을 고려하여 본 논문에서는 최적의 CR을 분석함에 있어서 계층적 전송방식을 가정한다. 즉 클러스터 내부에서 센서노드들은 최소의 파워로 multi-hop을 통하여 CH에게 송신하며 CH는 one-hop을 통하여 싱크노드한테 수집된 패킷을 전송한다. 본 논문에서는 근거리 통신에서는 에너지 효율적인 Zigbee를 기반으로 하고, 장거리 통신에서는 저전력 WiFi 혹은 저전력 Bluetooth에 기반 하는 네트워크 환경을 가정한다. 이에 따라 하나의 센서 노드는 다양한 RF 모듈 및 해당 기능을 가져야하며 이에 따른 비용 상승이 불가피 하다. 그러나 클러스터 기반 센서 네트워크의 에너지 효율을 고려한 최적의 구성으로 판단된다. 제안한 최적의 클러스터 비율 기법은 시스템 홉 수 최소화와 전송 신뢰성 최대화를 종합적으로 고려하여 센서 네트워크의 에너지 효율성을 보장한다. 유도된 최적의 클러스터 비율을 통하여

네트워크 전반 홉 수를 최소화함으로써 본질적으로 시스템 전반의 송수신 비용(cost)을 최소화한다. 또한 클러스터 내부에서의 전송 신뢰성 즉 패킷 수신율을 최대화함으로써 불안정적인 채널 상태에서의 노드 간 재전송 오버헤드를 줄여주어 에너지 효율성을 확보한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 관련 연구로서 제안된 one-hop, multi-hop기반 클러스터링 기법을 소개하며, 3절에서 최적의 클러스터 비율에 대한 유도하는 과정을 보여준다. 4절에서 제안된 최적의 클러스터 비율을 기존 네트워크 최소 홉 수를 보장하기 위한 클러스터링 기법과 비교하며 시뮬레이션을 통하여 에너지 효율성을 검증하고, 5절에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 관련 연구

LEACH[2]는 가장 먼저 센서 네트워크에 계층적인 구조를 도입한 프로토콜 중 하나이다. 이런 프로토콜에서는 네트워크 전반을 여러 개의 클러스터로 분할하고 센싱된 데이터를 클러스터 단위로 처리하여 중복성을 줄여주어 에너지 효율성과 네트워크 확장성에서 장점을 보여주고 있다. LEACH는 one-hop 전송에 기반하며 시스템 전반의 에너지 소모를 최소화하는데 초점을 두어 최적의 클러스터 비율(5%)을 유도하였다. CH 선정과정은 분산적으로 진행되며 각각 센서 노드들에서 0과 1사이 랜덤 수를 생성하여 유도된 최적의 클러스터 비율과 비교한 뒤 CH혹은 CM으로 선정된다. 그러나 이와 같은 랜덤 CH 선택 기법은 센서노드의 에너지 잔여량을 고려하지 않아서 네트워크의 균일한 에너지 소모를 보장하지 못한다. 이런 단점들은 HEED[3]에서 보완되었지만 LEACH와 같이 one-hop 전송을 가정하였으므로 넓은 센싱 필드에서의 응용은 불가능하다.

[4-7]에서 multi-hop 전송을 고려하여 에너지 효율성을 위한 클러스터링 기법을 제안하였다. [4]에서는 센서노드사이의 유사성에 기반 하여 클러스터를 구축하는 방안을 제안하였다. 유사성은 데이터 송신율과 노드사이 거리에 의하여 정의되며 유사성이 높은 센서노드들이 모여서 한 클러스터를 구축한다. 이와 같은 클러스터 구축을 통하여 한층 더 효율적인 데이터 중복성 처리와 센서노드의 duty-cycle에 대한 스케줄링도 가능하므로 에너지 효율성을 향상시킬 수 있다. 그러나 multi-hop 전송 방식을 사용함에 있어서 싱크와 가까운 CH에서 중계하여야할 데이터들이 집중되어 심각한 에너지 소모를 초래하는 단점이 있다. 이와 같은 hot-spot 지역에서 발생하는 에너지 소모를 줄이기 위하여 [5]에서는 싱크와의 홉 거리에 따른 클러스터 크기 조절을 통하여 싱크와 가까운 CH의 트래픽 부하를 덜어주는 방안을 제안하였다. 그러나 multi-hop 전송환경에서 에너지 효율성을 위한 최적의 CR에 대한 분석이 부족하였다.

[6]에서는 클러스터 내부를 CH와의 홉 거리에 따라 여러 개의 링으로 분할하므로 최적의 클러스터 비율에 대한 분석을 가능하게 하였다. [6]에서는 기존 정의한 RF 에너지 모델에 기반 하여 링의 레벨과 추산한 넓이에 따라 (LEACH에서의 분석과 같이) 통신에 드는 에너지를 최소화 할 수 있는 최적의 CR을 유도하였다. [7]에서는 CR과 시스템 전반의 홉 수 사이 관계를 분석하면서 최소 홉 수를 보장하기 위한 클러스터링 기법을 제안하였다. 그러나 [6, 7]에서는 이상적인 채널상황을 가정하여 최적의 클러스터 비율을 분석하였지만 클러스터 크기 변화로 인한 홉 수 증가, 또한 무선 채널의 불안정으로 발생하는 패킷의 재전송과 이로 인한 추가 에너지 소모는 고려하지 않았다.

Ⅲ. 제안하는 방안

센서 네트워크의 수명은 제한된 배터리 용량에 좌우된다. 센서 노드는 센싱, 데이터 처리와 데이터 송 수신과정에서 주로 에너지를 소모하며 그 중에서도 RF 모듈을 통한 송수신 과정이 가장 큰 비중을 차지한다[1]. 본 절에서는 클러스터 기반 센서네트워크에서 에너지 효율적인 최적의 CR에 대한 수학적 유도를 위하여 두 가지 방면에서 시스템 에너지 효율성을 확보하려고 한다. 첫 번째로는 시스템 전반의 홉 수를 최소화 하여 이상적인 무선 채널상태에서 시스템의 송수신 비용을 줄여준다. 두 번째로는 불안정적인 채널 상태에서 노드 사이의 신뢰성 있는 데이터 전송 즉 높은 패킷 수신율을 보장하는데 초점을 두어 노드 간 재전송 오버헤드를 줄임으로써 네트워크 수명을 확장하는데 있다.

3.1. 시스템 모델

센서 노드들은 센서 필드에 포아송(Poission) 포인트 프로세서에 의해 랜덤 배치되었으며 nearest-neighbor 메커니즘에 기반 하여 가장 가까운

CH와 클러스터를 구성한다. 클러스터 내부 즉 첫 번째 계층에서 CM들은 CH에게 최소 전송파워로 multi-hop을 통하여 패킷을 전송한다. 두 번째 계층에서 CH는 수집한 데이터의 중복성을 처리한 다음 싱크 노드에게 one-hop으로 전송한다. 본 논문에서는 Voronoi tessellation[8] 기반으로 센서 네트워크의 두 계층을 분석하기 위하여 아래와 같은 가정을 한다.

- 센서 노드는 분포 밀도 λ에 의하여 센싱 필드 안에 포아송 포인트 프로세서에 따라 랜덤 분포된다.
- 클러스터 비율은 $p = N_{CH}/N$이며 CH의 수 N_{CH}가 전체 노드 수 N에서 차지하는 비율을 의미한다.
- CH의 분포 밀도가 λ_{CH}이였을 때 $\lambda_{CH} = (N \times p)/A$ 이며 A는 센서 노드를 분포한 필드의 면적이다.
- CM의 분포 밀도는 $\lambda_{CM} = \lambda \times (1-p)$로 계산한다.
- 클러스터 내에서 CM의 전송반경은 r이다.

본 논문에서 노드 간 통신의 신뢰성 분석을 위하여 실외 LoS (line-of-sight) 환경을 가정하였다. 기타 채널 페이딩에 대한 분석은 본 논문의 범위를 벗어났음으로 여기서 고려하지 않는다. 이와 같은 전제 조건을 두고 무선 신호의 전파모델은 아래 식 (1)에 정의된 경로 손실(path loss)모델[10]로 정의 한다. 아래 식에서 $P_L(d)$는 클러스터 내 CM와 CH 사이 거리가 d일때의 경로손실을 의미하고 k는 경로손실 지수를 의미하며 d_0은 경로손실 측정을 위한 기준거리이다.

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10k\log_{10}(\frac{d}{d_0}), \quad d \geq d_0 \qquad (1)$$

3.2. 최적의 클러스터 비율 분석

한 클러스터 내에서의 노드 수, 링크 길이와 총 홉 수의 랜덤 특징을 분석하기 위하여 [8]에서 정의한 식 (2)를 이용한다. 식 (2)에서 S_f는 함수 $f(x_i)$의 누적 합을 의미하며 $S_f = \sum_{x_i} f(x_i)$ 이다. 여기서 함수 $f(x)$가 클러스터 한 노드로부터 CH까지의 홉 수로 정의된다면, 즉 $f(x) = \lceil l/r \rceil$ (l는 CM와 CH 사이 거리를 의미한다), 아래 식 (3)을 이용하여 한 클러스터 내 총 홉 수의 기대치를 구할 수 있다.

$$E(S_f) = \lambda_{CM} \int f(x) e^{-\lambda_{CH}\pi|x|^2} dx \qquad (2)$$

$$E(H_c) = \lambda_{CM} \int \left\lceil \frac{l}{r} \right\rceil e^{-\lambda_{CH}\pi|x|^2} dx \qquad (3)$$

식 (3)에서 l/r를 정수로 바꾸기 위하여 파라미터 α를 도입하며 $\lceil l/r \rceil = l/r + \alpha$를 얻는다. 다음 한 클러스터 내 전체 홉 수의 기대치를 구하면 아래식과 같다.

$$\begin{aligned} E(H_c) &= \lambda_{CM} \int (\frac{l}{r} + \alpha) e^{-\lambda_{CH}\pi|x|^2} dx \\ &= \frac{(1-p)(1+2r\alpha\sqrt{\lambda p})}{2r\sqrt{\lambda}\, p^{3/2}} \end{aligned} \qquad (4)$$

본 논문에서 CH는 수집한 데이터를 one-hop으로 싱크노드까지 전송한다고 가정하였으므로 두 번째 계층에서의 홉 수는 $p \times N$이다. 네트워크 전반에서 총 홉 수는 모든 클러스터를 포함한 첫 번째와 두 번째 계층에서의 홉 수의 총 합이므로 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(H) &= \frac{(1-p)(1+2r\alpha\sqrt{\lambda p})}{2r\sqrt{\lambda}\, p^{3/2}} Np + Np \\ &= \frac{(1-p) + \alpha(1-p)2r\sqrt{\lambda p}}{2r\sqrt{\lambda p}} N + Np \\ &= \frac{N(1-p)}{2r\sqrt{p\lambda}} + \alpha N(1-p) + Np \end{aligned} \qquad (5)$$

CH가 싱크 까지 신뢰성 있는 one-hop 통신을 보장 할 수 있다고 가정하였음으로 노드 사이 패킷 수신율은 클러스터 내에서 분석한다. 또한 클러스터 내에서 CM는 에너지 효율성을 위하여 최소 전송파워를 사용하여 송신한다. 주변 노드들은 수신된 패킷을 multi-hop을 통하여 CH 까지 중계한다. 그러므로 CM로부터 CH까지 one-hop 링크의 전송신뢰성이 보장되면 전반 클러스터 내 노드 사이 PRR을 보장할 수 있다. PRR에 대한 분석을 위하여 클러스터 내 무선 신호의 경로 손실부터 분석한다. 우선 먼저 식 (2)에 기반 하여 클러스터 내 CM의 수와 CM로부터 CH까지의 링크 길이 총 합을 구하면 각각 $E(N_{CM}) = \frac{\lambda_{CM}}{\lambda_{CH}}$, $E(L_{total}) = \frac{\lambda_{CM}}{2\lambda_{CH}^{3/2}}$ 이다. (이에 대한 유도 과정은 [9]에 자세히 기술되어 있다.) 이 결과를 이용하여 클러스터의 평균 반경은 아래 식으로 얻을 수 있다.

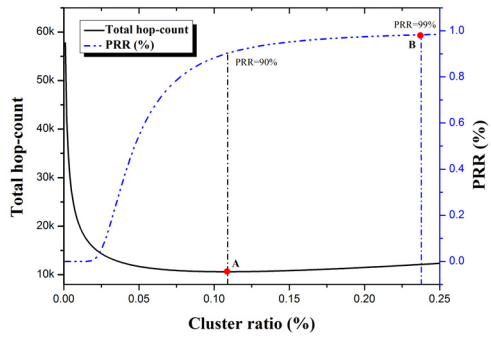

그림 1. 최소 hop-count 방안과 최대 PRR 방안 비교 ($1000\times1000\,\mathrm{m}^2$, node density is 0.03 k=3 and r=10 m)
Fig. 1. Minimum hop-count vs. maximize PRR scheme ($1000\times1000\,\mathrm{m}^2$, node density is 0.03, k=3 and r=10 m)

$$E(L_{avg.}) = \frac{E(L_{total})}{E(N_{CM})} = \frac{1}{\sqrt{4\lambda_{CH}}} = \sqrt{\frac{A}{4Np}} \quad (6)$$

식 (6)을 식(1)에 대입하면 아래와 같이 한 클러스터 내에서의 평균 경로 손실을 얻게 된다. ($P_L(d_0) = 20\log_{20}(\frac{4\pi d_0}{\omega})$이고 ω는 파장이며 $d_0 = 1\,\mathrm{m}$이다.)

$$\overline{P_L(d)} = 20\log_{10}(\frac{4\pi}{\omega}) + 10k\log_{10}(\sqrt{\frac{A}{4Np}}),\ d_0 = 1 \quad (7)$$

다음 CM에서 전송한 패킷은 비트 단위로 전송하므로 Bernoulli 랜덤 변수 $\mathbb{P}$를 정의한다. 패킷이 성공적으로 수신되었으면 $\mathbb{P}=1$이고 아니면 $\mathbb{P}=0$이다. $\mathbb{P}$는 iid 분포를 따르므로 대수 약 법칙(weak law of large number)에 의하여 PRR은 패킷을 성공적으로 수신하는 확률과 근사하므로 아래 식을 통하여 얻을 수 있다.

$$\mathbb{P} = PRR = (1-\mathbb{P}_e)^{8F} \quad (8)$$

식 (8)에서 F는 프레임 크기를 의미하며 단위는 byte이다. 비트 에러 확률 $\mathbb{P}_e$는 각각 모듈레이션 기법의 에러 함수에 의하여 결정된다. 그러므로 아래 분석 과정은 모듈레이션 기법에 무관하기 때문에 여러 모듈레이션 기법에 적용할 수 있다. 본 논문에서는 센서네트워크에서 저 전력 ZigBee 모듈로 많이 사용하고 있는 CC1110을 고려하였음으로써 FSK 모듈레이션 기법을 예로 든다. FSK 모듈레이션 기법에서 $\mathbb{P}_e$는 아래와 같이 정의된다[11].

$$\mathbb{P}_e = \frac{1}{2}e^{-\beta/2} \quad (9)$$

식 (9)에서 $\beta = \frac{E_b}{N_0}$이며 잡음전력밀도(N_0)에 대한 비트에너지의 비율을 의미한다. β와 SNR(signal to noise ratio) 사이 관계는 $SNR = \frac{E_b R}{N_0 B_N}$로 정의할 수 있다. 여기서 R는 데이터 전송 속도를 의미하고 B_N은 잡음 대역폭이다. 따라서 식 (8)은 아래 식으로 다시 표현할 수 있다.

$$PRR = (1-\frac{1}{2}e^{-\frac{B_N SNR}{2R}})^{8F} \quad (10)$$

수신감도 r_{ss}와 잡음플로어 N_{floor}라 할 때 수신자 각도에서 SNR는 $SNR = r_{ss} - N_{floor}$와 같이 얻을 수 있다. 송신된 신호가 전파과정에서 경로 손실을 가지게 되므로 신뢰성 있는 수신을 위하여 등식 $r_{ss} = P_{tx} - P_L$을 만족 시켜야한다. P_{tx}는 송신 파워를 의미하여 P_L는 경로 손실이다. 위에서 유도한 클러스터 내 평균 경로손실을 대입하면 $r_{ss} = P_{tx} - \overline{P_L(d)}$이고 $SNR = P_{tx} - N_{floor} - \overline{P_L(d)}$이다. 이를 식 (10)에 대입하면 아래 식과 같이 패킷 수신율에 대한 클러스터 비율의 함수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} PRR &= (1-\frac{1}{2}e^{-\frac{B_N}{2R}(P_{tx}-N_{floor}-\overline{P_L(d)})})^{8F} \\ &= (1-\frac{1}{2}e^{-\frac{B_N}{2R}(P_{tx}-N_{floor}-20\log_{10}(\frac{4\pi}{\omega})-10k\log_{10}(\sqrt{\frac{A}{4Np}}))})^{8F} \end{aligned} \quad (11)$$

그림 1에서는 식 (5)와 (11)을 이용하여 각각 얻은 최적의 클러스터 비율을 비교하였다(각 파라미터에

표 1. 각 파라미터의 값
Table 1. Parameter definitions

Parameters	Definition
R	19.2 kbps
B_N	30 kHz
N_{floor}	-115 dBm
P_t	-25 dBm
d_0, ω	1, 0.125m
F	50 byte

대한 정의는 표 1에 나와 있다). 그림에서 보여준 것과 같이 최소의 홉 수를 제공해 줄 수 있는 A점에서 PRR은 90%밖에 안 되므로 노드 간 재전송 횟수가 증가된다. 또한 99%의 PRR을 보장하기 위한 최적의 B 점에서는 홉 수가 13%증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 최소 홉 수를 위한 기법만으로 클러스터 내 신뢰성 있는 송수신 환경을 보장하지 못하며, PRR 보장을 위하여 더 작고 많은 클러스터를 구축한다면 패킷 전송하는 오버헤드를 증가시킨다. 이와 같은 이해득실(trade-off) 관계 때문에 각각 식 (5)와 식 (11)에서 얻은 결과를 통하여 에너지 효율성을 보장하기 위한 최적의 클러스터 비율을 얻기 어려우므로 본 논문에서는 아래의 목표 함수(objective function)를 제안한다. 식 (12)에서 정의한 목표함수는 식 (5)로부터 얻을 수 있는 시스템 총 홉 수의 최소화와 식 (11)로부터 얻을 수 있는 클러스터 내에서의 PRR 최대화를 종합적으로 고려하였다. 제안한 목표함수를 만족 시키는 최적의 클러스터 비율은 네트워크에서 패킷전송을 위한 비용을 최소화하고 클러스터 내 불안정한 무선채널 때문에 발생하는 재전송을 최소화 할 수 있으므로 시스템 에너지 효율성을 한층 더 확보할 수 있다.

$$CR_{opt.} = \underset{p\in(0,1)}{\arg\min}\,(intra\,hop\,count \times (2-PRR) + inter\,hop\,count)$$
$$= \underset{p\in(0,1)}{\arg\min}\,\Big(\frac{N(1-p)(1+2r\alpha\sqrt{\lambda p})}{2r\sqrt{\lambda p}} \times \Big(2-\Big(1-\frac{1}{2}e^{-\frac{B_N}{2R}\left(P_{tx}-N_{floor}-20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{\omega}\right)-10k\log_{10}\left(\sqrt{\frac{A}{4Np}}\right)\right)}\Big)^{8F}\Big)+Np\Big) \quad (12)$$

Ⅳ. 시뮬레이션

본 논문에서는 $1000\times1000\,\mathrm{m}^2$필드에 분포밀도 0.03, 0.05, 0.07에 의하여 각각 30000, 50000, 70000 개의 센서노드를 랜덤 분포한다. RF 모듈은 CC1110을 이용하고 915MHz주파수 대역을 사용한다. 클러스터 내에서 센서노드는 최소 전송파워 $-25\,\mathrm{dBm}$을 이용하여 송신한다. 센서 노드들에서는 FSK 모듈레이션 기법을 사용하며 한 프레임 크기는 50byte이다. 경로 손실 모델은 식 (7)에서 정의한 모델을 사용하며 shadow fading과 multi-path fading은 고려되지 않는다. 기타 시뮬레이션에 참조된 파라미터들은 표 1에 나와 있다. 시뮬레이션에서는 본 논문에서 고려한 multi-hop to one-hop 전송 환경을 기반으로 기존 제안했던 최소 홉 수를 보장하기위한 클러스터링 기법[7]과 비교한다. 서로 다른 노드 분포 밀도와 여러 채널 상태를 고려한 다양한 환경에서 비교를 진행하며 제안한 목표함수를 통하여 얻은 최적의 클러스터 비율이 에너지 효율성 면에서의 성능 향상을 보여준다.

그림 2는 모든 센서노드에서 한 개의 패킷을 생성하여 싱크 노드로 전송하려는 상황에 대하여 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 2에서 (a), (b)와 (c)는 각각 센서노드가 분포밀도 0.03, 0.05, 0.07에 의하여 랜덤 분포 되었을 경우의 결과이다. 그림 (a), (b)와 (c)에서 보면 최소 홉 수 클러스터링 기법을 통하여 보장할 수 있는 클러스터 내 평균 PRR은 각각 90%, 95%, 97%이다. 이는 센서 노드의 분포밀도가 작을수록 주변 중계노드와의 거리가 멀어지므로 경로손실이 더 심각하기 때문이다. 기존 최소 홉 수 클러스터링 기법은 시스템 전반의 전송에 수요 되는 홉 수를 최적화 할 수는 있지만 센서노드의 분포밀도에 따라 변화되는 노드 사이 송수신 신뢰성은 보장하지 못한다. 따라서 시스템 전반의 전송 횟수는 본 논문에서 제안한 방안보다 많아지며 전송에 드는 에너지 소모도 증가된다. 센서노드의 랜덤 분포 밀도가 0.03, 0.05, 0.07이였을 때 본 논문에서 제안한 목표함수를 통하여 얻은 최적의 CR은 기존 최소 홉 수 클러스터링 방안보다 효율성이 각각 2%, 0.8%, 0.3% 향상된 것을 볼 수 있다. 이는 제안한 방안이 시스템의 패킷 전송에 드는 홉 수와 노드간 통신의 PRR를 종합적으로 고려함으로써 기존 방안보다 네트워크의 수명 연장에 한층 더 효율적이며 특히 센서 노드의 분포밀도가 작을수록 에너지 소모를 더욱 줄일 수 있다.

그림 3에서는 노드 분포밀도 0.05에서 제안한 방안과 최소 홉 수 클러스터링 기법을 비교하였을 때 얻을 수 있는 에너지 효율성 이득(gain)을 보여준다. 다양한 경로손실 환경을 고려하기 위하여 경로손실 지수를 각각 3.0, 3.5, 4.0, 4.5로 설정하였다. 가장 이상적인 경로손실인 (경로손실 지수가 3.0) 경우 본 논문에서 제안한 최적의 CR 기법은 기존 방안보다 0.1%의 이득을 얻게 되며 경로손실 가장 심각한 (경로손실 지수가 4.5)경우 16.25%의 이득을 얻게 된다. 제안한 방안에서 클러스터 내 PRR 최대화를 목표함수에서 고려하였기 때문에 최적의 클러스터 비율을 통하여 보다 더 많은 에너지 효율성을 얻게 되는 것이다.

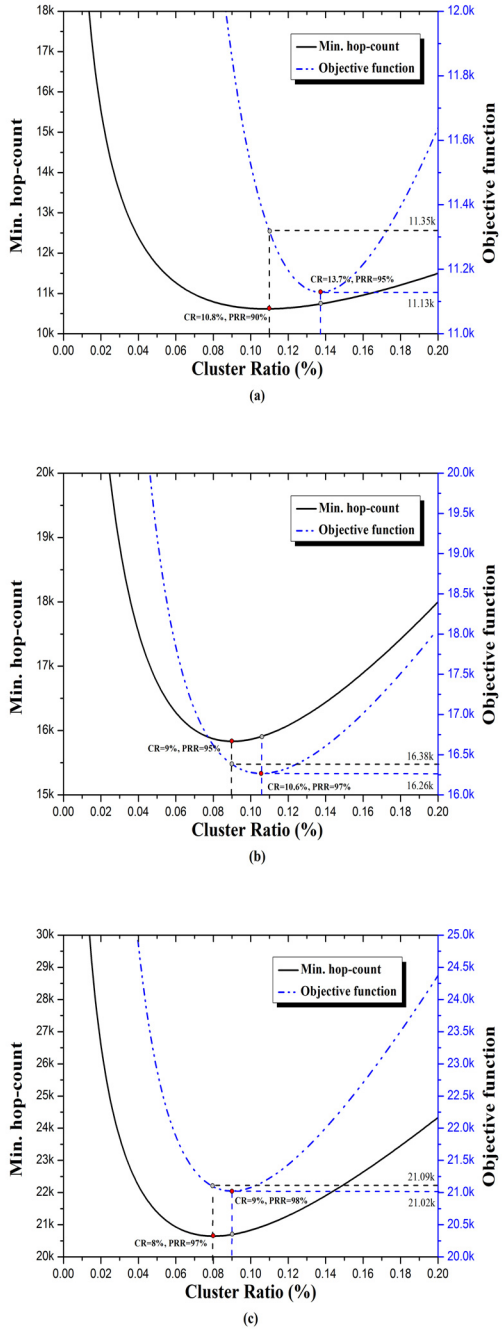

그림 2. 최소화 hop-count 방안과 제안한 방안의 비교 (Various density: a is 0.03, b is 0.05 and c is 0.07)
Fig. 2. Compare minimum hop-count scheme with the proposed one (Various density: (a) is 0.03, (b) is 0.05 and (c) is 0.07)

V. 결 론

본 논문에서는 클러스터 기반 네트워크에서 multi-hop to one-hop 전송 환경을 고려하여 에너지 효율성에 최적인 클러스터 비율을 분석하는데 초점을 두었다. 최적의 클러스터 비율을 유도함에 있어서 기존 방안들과 달리 본 논문에서는 시스템 최소 홉 수와 노드 사이 *PRR* 최대화를 종합적으로 고려하여 패킷 전송에 드는 비용과 재전송 오버헤드를 줄여주어 시스템의 에너지 효율성을 한층 더 보장한다. 논문에서 제안한 기법의 에너지 효율성은 시뮬레이션을 통하여 검증되었다. 시뮬레이션 결과에 의하면 제안한 방안은 기존 최소 홉 수를 보장하기 위한 클러스터링 방안보다 에너지 소모를 더 많이 줄일 수 있으며 센서노드의 분포밀도가 작은 상황, 또한 경로손실이 심각할수록 더욱 많은 에너지 효율성 이득을 얻는 것을 알 수 있다. 앞으로의 연구에서 다양한 RF모델에서의 에너지 효율성 분석과 제안한 분석모델의 정확성 검증이 계속적으로 연구되어야 할 것이다.

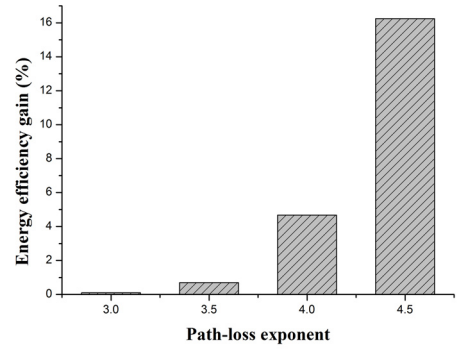

그림 3. 에너지 효율성 이득
Fig. 3. Energy efficiency gain

References

[1] J. Zheng and A. Jamalipour, *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*, John Wiley and Sons, pp. 173-209, 2009.

[2] M. J. Handy, M. Haase, and D. Timmermann, "Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection," in *Proc. 4th Int. Workshop Mobile Wireless Commun. Networks*, pp. 368-372, Stockholm, Sweden, Sep. 2002.

[3] O. Younis and S, Fahmy, "HEED: a hybrid, energy efficient distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks," *IEEE Trans.*

Mobile Comput., vol. 3, no. 4, pp. 366-379, Oct.-Dec. 2004.

[4] S. V. Manisekaran and R. Venkatesan, "An adaptive distributed power efficient clustering algorithm for wireless sensor networks," *Amer. J. Sci. Research*, vol. 10, pp. 50-63, 2010.

[5] D. Wei, Y. Jin, S. Vural, K. Moessner, and R. Tafazolli, "An energy-efficient clustering solution for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 11, pp. 3973-3983, Nov. 2011.

[6] C. S. Nam, Y. S. Han, and D. R. Shin, "Multi-hop routing-based optimization of the number of cluster-heads in wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2875-2884, Jan. 2011.

[7] D. Y. Kim, J. S. Cho, and B. S. Jeong, "Practical data transmission in cluster-based sensor networks," *KSII Trans. Internet Inform. Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 224-242, June 2010.

[8] S. G. Foss and S. A. Zuyev, "On a Voronoi aggregative process with Voronoi clustering," *Advances in Appl. Probability*. vol. 28, no. 4, pp. 965-981, 1996.

[9] Z. L. Jin and J. Cho, "An analytic model for the optimal number of relay stations in IEEE 802.16j cooperative networks," *J. KICS*, vol. 36, no. 9, pp. 758-766, Sep. 2011.

[10] S. Rao, "Estimating the ZigBee transmission - range ISM band," *Electron. Design News*, pp. 67-72, 2007.

[11] M. Zuniga and B. Krishnamachari, "Analyzing the transitional region in low power wireless link," in *Proc. IEEE Commun. Soc. Conf. Sensor Ad Hoc Commun. Networks*, pp. 517-526, Santa Clara, U.S.A., Oct. 2004.

김 자 룡 (Zilong Jin)

2009년 7월 Harbin University of Science and Technology 컴퓨터 공학과 학사

2011년 7월 경희대학교 컴퓨터 공학과 석사

2011년 9월~현재 경희대학교 컴퓨터 공학과 박사과정

<관심분야> 모바일 네트워크, 센서 네트워크.

김 대 영 (Dae-young Kim)

2004년 2월 경희대학교 전자공학과 학사

2006년 2월 경희대학교 컴퓨터 공학과 석사

2010년 8월 경희대학교 컴퓨터 공학과 박사

2010년 8~2013년 4월 LIG 넥스원 통신연구센터 선임연구원

2013년 4월~현재 ㈜ AirPlug 선임연구원

<관심분야> 모바일 네트워크, 센서 네트워크.

조 진 성 (Jinsung Cho)

1992년 서울대학교 컴퓨터공학과 학사

1994년 서울대학교 대학원 컴퓨터 공학과 석사

2000년 서울대학교 대학원 컴퓨터 공학과 박사

1998년 IBM T.J. Watson Research Center Visiting Researcher

1999년 9월~2003년 삼성전자 책임 연구원

2003년~현재 경희대학교 컴퓨터 공학과 부교수

<관심분야> 모바일 네트워크, 임베디드 시스템.