모바일 싱크를 가진 센서 네트워크에서 클러스터 형성 방법

황재룡*, 우희경**, 김종권*
*서울대학교 전기• 컴퓨터 공학부
**상명대학교 소프트웨어 학부
e-mail : *jrhwang, ckim@popeye.snu.ac.kr, **woohk@smu.ac.kr

Clustering in Wireless Sensor Networks with Mobile Sinks

Jae Ryong Hwang*, Hee Kyoung Woo**, Jong Kwon Kim*
*School of Electrical Engineering & Computer Science, Seoul National University
**College of Computer Software and Media Technology, Sangmyung University

요 약

본 논문에서는 센서 네트워크에서 수명을 연장하기 위해 이동하는 모바일 싱크를 사용할 때 싱크가 이동함에 따라 늘어난 전체 네트워크 트래픽 량을 줄여 더욱더 수명을 연장하기 위해서 클러스터를 도입한다. 고정된 위치에서 싱크가 데이터를 수집할 경우 싱크 한 홉 내에 있는 노드들이 에너지를 빨리 소모하여 네트워크 파티션이 일어나기 쉽기 때문에 모바일 싱크를 사용하여 네트워크 수명을 연장하는 방법이 연구되었다. 이에 우리는 모바일 싱크가 이동하는 패턴이 주어지고 센서들로부터 매 T 마다 데이터를 받는다고 할 때 모바일 싱크와 클러스터를 함께 사용하였을 경우 네트워크 성능을 분석하고 에너지 효율적인 클러스터 형성 방법에 대해서 제안한다.

1. 서 론

무선 센서 네트워크는 가격이 싼 무선 노드들이 조밀하게 특정 지역에 뿌려져 네트워크를 형성한다. 뿌려진 센서들은 특정 현상(화재, 소리, 표적 추적 등)을 감지한 정보나 혹은 주기적으로 감지한 데이터를 자세히 분석하기 위해서 중앙 스테이션으로 보내진다. 이러한 구조의 센서 네트워크는 군사적 목적 뿐만 아니라 비 군사적 목적으로 많이 응용 할 수 있다. 중앙 스테이션으로 데이터를 전송하기 위해서는 케이트웨이 즉, 싱크를 통해서 전달이 되며 각 센서들은 싱크와 단일 홉 또는 다중 홉을 통해서 통신을 한다. 이러한 센서 네트워크에서는 싱크가 상대적으로 센서에 비해 많은 파워를 사용하고 처리 능력 및 메모리 능력이 큰 반면에, 각각의 센서는 배터리에 의해 한정된 파워를 사용하며 처리 능력과 메모리 능력이 제한을 받는다.

위에서 언급한 센서의 제약사항을 극복하기 위해 지금까지 무선 센서 네트워크에서는 에너지 절약을 목적으로 많은 통신 프로토콜들이 제안되어 왔다. 이러한 것들은 에너지 효율적인 매체 접근 제어, 라우팅, 토폴로지 제어 등이 있다. 제안된 프로토콜들이 특정한 조건에서 그들의 목표를 달성했지만, 그들은 항상 센서 노드에 초점을 맞추었다[1]. 하지만 최근에 싱크에 초점을 맞추어 네트워크의 수명을 연장하려는 연구들이 진행되고 있다.([1],[2]). 이들의 기본적인 아이디어는 센서 네트워크에서 수명을 늘리기 위해 고정된 위치에서 데이터를 수집하는 것이 아니라 모바일 싱크를 사용하여 이동을 하면서 데이터를 수집하는 방법이다.

센서 네트워크의 수명을 네트워크 파티션이 일어나서 더 이상 데이터를 수집하지 못하는 시점까지라고 정의를 했을 때 고정된 위치에서 데이터를 수집하게 되면 모든 노드는 생성한 정보를 고정된 한 곳으로만 데이터를 보낸다. 이에 따라 싱크 주위의 노드들이 겪는 부하는 싱크로부터 멀리

떨어진 노드들이 겪는 부하보다 상대적으로 커지게 되고, 수명이 상대적으로 빨리 단축된다. 이런 문제점을 해결하기 위해서, [1]에서는 싱크 주위의 노드들의 부하를 줄여 네트워크 수명을 늘리기 위해 이동하는 싱크를 제안을 하였다. 하지만 여기서 제안한 방법과 같이 모바일 싱크가 토폴로지의 주변을 따라서 움직이게 되면 네트워크에서 트래픽 양이 많아져 전체 에너지 소비량은 싱크가 센터로부터 멀어짐에 따라 지수승으로 증가를 하게 된다. 본 논문에서는 전체 에너지 소비량을 줄이기 위해 모바일 싱크를 사용한 센서 네트워크에서 클러스터 기법을 도입하였을 때의 성능을 분석하고자 한다. 이를 위해 싱크가 주변을 움직이는 환경에서 클러스터를 사용하지 않았을 때와 클러스터를 사용했을 때 네트워크에서 전체 사용된 에너지를 비교한다. 그리고 모바일 싱크를 사용한 센서 네트워크에서 에너지 효율적인 클러스터 방법을 제안하고자 한다.

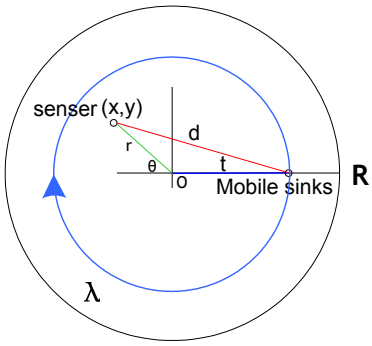
본 논문의 나머지는 다음과 같은 구성을 따른다. 2 장에서는 관련 연구를 요약하고, 3 장에서는 네트워크 모델을 제시한다. 4 장에서는 위의 방법으로 분석을 하고 5 장에서 모바일 싱크가 있을 때 에너지 효율적인 클러스터 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 6 장에서 결론을 맺는다.

2. 관련연구

기존의 논문에서는 사용되는 에너지를 줄이기 위해 이동하는 싱크를 사용한다. Shah et al.[2]은 감지한 데이터를 모으기 위해서 랜덤하게 움직이는 'Data Mules'을 제안하였다. 이와는 달리 예측가능하고 제어가 가능한 이동 패턴을 가지는 모바일 싱크가 [1],[3]에서 제안되었다. 여기에서 모바일 싱크는 분리된 혹은 연속적인 이동으로 데이터를 수집하는데, 분리된 움직임의 경우, 모바일 싱크는 미리 예정된 곳에서 데이터를 받으면서 움직이기 때문에 각 지점에서 최적의 머무르는 시간 스케줄을 찾아야 하는 선형계획문제가 주어진다. [3]에서는 지리적 트래픽 부하 모델을 통해 싱크 주위 노드들의 부하를 줄여 전체 네트워크 수명을 늘리기 위한 최적의 경로를 제안하였다. 이에 따라 모바일 싱크는 네트워크 주변을 따라 움직이고, 센서들은 싱크의 연속적인 위치를 추적하여 다중 홉을 통해 싱크로 패킷을 전달한다. 그러나 이렇게 연속적으로 움직이는 모바일 싱크의 경우 데이터가 다중 홉으로 전송되는 동안에도 위치는 계속적으로 변하므로 라우팅에 있어 비효율성이 발생하며, 각 노드들이 전역적 시간 동시성을 가져 싱크의 움직이는 패턴을 추적하는 것이 현실적으로 불가능 하다.

3. 네트워크 모델 및 문제정의

우리는 그림.1.과 같이 반지름이 R 인 원에 조밀한 밀도 λ 로 푸아송 포인터 프로세서에 따라 분포된



(그림 1) 네트워크 모델

n 개의 고정된 센서 노드들과 1 개의 모바일 싱크로 구성된 네트워크를 가정한다. 각각의 노드는 센터로부터 거리가 t 인 모바일 싱크에게 주기적으로 데이터를 전송한다. 모든 센서의 최초 에너지는 E 로 동일하며, 각각의 노드가 일하지 않는 동안 사용되는 에너지는 에너지 사용을 간단히 하기 위해서 무시할 때 노드는 데이터를 송• 수신하고 감지하기 위해 에너지를 사용한다. 더욱더 간단한 에너지 모델을 위해서 각 센서는 대부분의 에너지를 데이터 전송을 위해 사용한다고 가정할 때 한 단위의 데이터를 송• 수신하기 위해서 사용하는 에너지는 상수 ε 이다. 이때 모든 노드 및 싱크의 전송거리 및 감지 거리는 r 로 동일하며 r≪R 이다.

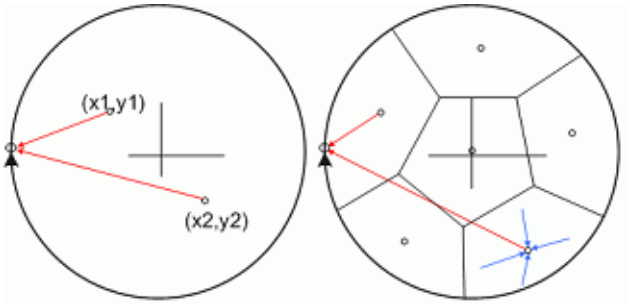
모바일 싱크는 [1]에서와 같이 토폴로지의 주변을 따라 주기적으로 움직이는 패턴을 갖는다. 그리고 각 노드가 모바일 싱크에게 데이터를 전송할 때는 로드를 줄이는 최단거리 라우팅을 한다고 가정한다.

이러한 네트워크 모델에서 수명을 늘리기 위해서 토폴로지 주변을 따라 이동하는 모바일 싱크가 사용된 조건에서 모바일 싱크가 센터로부터 멀어질수록 전체 네트워크의 트래픽 양이 많아진다. 이에 따라 노드 사이 데이터 전송에 있어 충돌이나 에러가 많아져 다중 홉 통신에 있어 시간지연이 길어진다. 결국 전체 트랙픽 양이 많아지면 네트워크에서 사용하는 에너지 소비량이 많아진다. 이를 해결하기 위해서 모바일 싱크를 사용함에 따라 늘어난 수명을 보장하면서 전체 네트워크 트래픽 양을 줄이기 위해 클러스터 기법을 도입하고 성능을 평가한다. 더불어 모바일 싱크를 사용할 때 에너지 효율적인 클러스터 방법을 제안한다.

4. 클러스터의 성능 분석

이 장에서는 위에서 제시한 네트워크 모델에 따라 모바일 싱크의 이동경로가 주어질 때 클러스터를 사용했을 때와 사용하지 않았을 때 네트워크 전체 에너지 소비량을 비교한다.

그림 1 과 같이 모바일 싱크가 센터 O 에서 t 만큼의 거리를 유지하면서 주기적으로 이동할 때, 위치가 (x,y)인 임의의 한 센서에서 모바일 싱크까지



(그림 2) 클러스터 사용 여부에 따른 데이터 수집 방법 비교

거리는 $d=\sqrt{(x-t)^2+y^2}$ 이고, 이때 조밀한 네트워크를 가정하기 때문에 싱크까지의 홉수는 d/r 이다. 그래서 한 단위의 데이터를 모바일 싱크까지 전송하기 위해 필요한 에너지는 e= ε *d/r 이다.

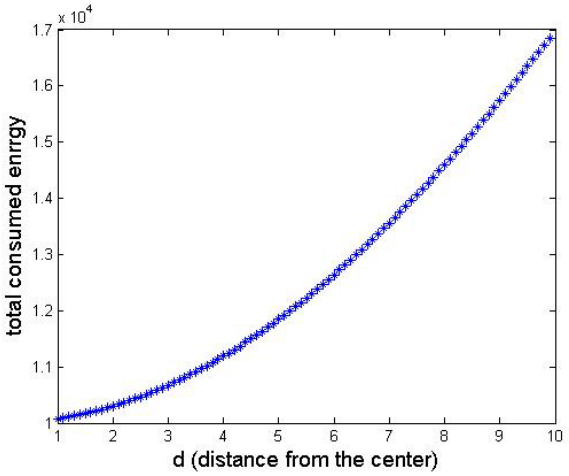
먼저 그림.2. 왼쪽과 같이 클러스터를 사용하지 않았을 때 토폴로지 내의 있는 전체 노드들로부터 데이터를 받기 위해 사용되는 에너지는

$$E=\frac{\varepsilon}{r}\int_y\int_x\sqrt{(x-t)^2+y^2}\,\lambda dxdy$$

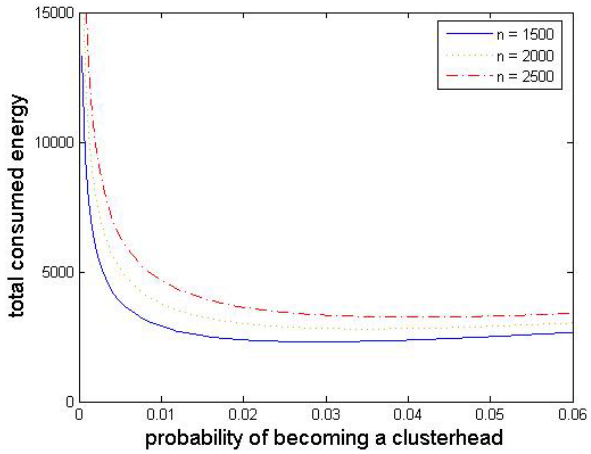
$$=\frac{\varepsilon}{r}\int_0^{2\pi}\int_0^R\sqrt{r^2+t^2-2tr\cos\theta}\,\lambda r dr d\theta$$ 이다.

모바일 싱크를 사용하고 클러스터를 사용했을 때 에너지 소비량을 계산하기 위해서 먼저 간단한 클러스터 알고리즘을 가정한다. [4]에서와 같이 모든 노드는 확률 p 로 클러스터 헤더(CH)가 되며, CH 를 중심으로 보로노이 다이어그램이 만들어 진다. 센서 노드 및 CH 는 멀티 홉 통신을 하며, CH 노드들은 자신의 셀 내에 있는 노드들로부터 데이터를 받아 한 단위의 데이터로 압축하여 이동하는 싱크에게 전달한다. 네트워크에서 CH 의 밀도는 λ_1 이고, $\lambda_1=\lambda p$ 이다. 그리고 센서 노드들의 밀도는 λ_0 이고, $\lambda_0=(1-p)\lambda$ 이다.

그림.2.의 오른쪽에서 볼 수 있듯이 클러스터를 사용했을 경우 사용되는 전체 에너지는 각 셀들에서 데이터를 모으는데 사용한 에너지와 CH 들이 모바일 싱크에게 압축한 데이터를 전송하는데 사용한 에너지의 합이다. 한 셀에서 CH 까지 데이터를 모으기 위해 사용한 에너지는 $E_{CH}=\frac{\varepsilon}{r}\frac{\lambda^0}{2\lambda_1^{3/2}}$ 이고[4], CH 에서 모바일 싱크에게 압축된 데이터를 전송하는데 사용되는 에너지는 $E_{MA}=\frac{\varepsilon}{r}\int_0^{2\pi}\int_0^R\sqrt{r^2+t^2-2tr\cos\theta}\,\lambda_1 r\,dr d\theta$ 이 된다. 그러므로 전체 사용한 에너지는 $E=E_{CH}\times np+E_{MA}$ 가 되고, 이때 np 는 클러스터의 개수가 된다.



(그림 3) 모바일 싱크가 센터에서 멀어짐에 따른 전체 에너지 사용량 R=10, λ=15/π, ε=1, r=1, n=1500



(그림 4) 모바일 싱크가 있고 클러스터를 사용했을 때 전체 에너지 사용량 R=10, λ=15/π, ε=1, r=1

그림.3.은 모바일 싱크가 센터로부터 거리 t 를 따라 이동을 할 때, 싱크가 센터로부터 멀어짐에 따라 전체 사용되는 에너지 량이 증가함을 볼 수 있다. 즉, 모바일 싱크가 센터에서 멀어질수록 트래픽 양이 증가한다. 늘어난 트래픽 양에 따라 센서간 통신에 있어 충돌이나 전송 시간 지연이 클 것이다.

그림.4.는 모바일 싱크가 네트워크 트래픽이 가장 많은 t=10 인 원의 가장 바깥으로 이동을 할 때 클러스터를 사용하였을 경우 전체 사용된 에너지를 보여주고 있다. 클러스터가 될 확률이 커짐에 따라 클러스터의 개수가 많아지고, 이때 전체 사용된 에너지는 클러스터를 사용하지 않았을 경우와 비교해서 최대 약 5 배까지 에너지가 감소됨을 볼 수 있다.

이제까지 우리는 모바일 싱크가 있는 환경에서 클러스터를 사용함으로써 네트워크 수명을 보장하면서 전체 네트워크에서 트래픽 양을 줄여 기존의 방법보다 더욱 증가된 수명을 제공할 수 있음을 확인하였다. 다음 장에서 우리는 싱크의 이동 경로가 주어졌을 때 전체 에너지 소비를 줄일 수 있는 에너지 효율적인 클러스터를 만드는 방법에

대해서 알아보고자 한다.

5. 모바일 싱크를 사용할 때 클러스터 형성 방법

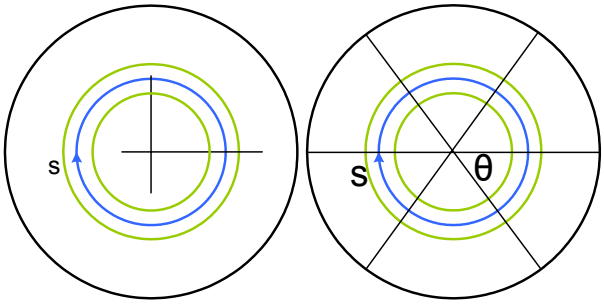
모바일 싱크가 네트워크 수명을 연장하기 위해서 이동을 할 때 에너지 효율적인 클러스터를 만들기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 모바일 싱크의 이동 패턴이 주어진다.
- 각 노드의 감지정보는 매 T 마다 싱크에게 전달되어야 한다.

이러한 가정 하에서 모든 노드가 특정한 클러스터를 만드는 전략을(LEACH, HEED 등) 가지고 클러스터를 형성하게 되면 CH 와 모바일 싱크 사이의 통신에 있어 효율성이 떨어질 수 있다. 클러스터를 사용함으로써 각 노드들이 데이터를 보낼 때 네트워크 트래픽을 줄일 수 는 있었지만, 조밀한 센서 네트워크에서 모든 노드들이 전역적인 시간 싱크를 맞추는 것은 불가능하기 때문에 모바일 싱크가 이동함에 따라 싱크의 위치를 알려주어야 하고, CH 에서 싱크까지 멀티 홉으로 전달해야 하는 오버헤드가 여전히 남아있다.

위의 가정 하에서 모바일 싱크는 T 마다 데이터를 받으면 되기 때문에 이동을 하면서 모든 CH 로부터 데이터를 받을 필요가 없이 각 셀에서 해당 CH 로부터만 데이터를 받으면서 이동할 수가 있다. 이러한 조건에서 에너지 효율적인 클러스터 형성 기법은 그림.5. 왼쪽과 같이 싱크로부터 비컨을 들을 수 있는 노드들의 분포 즉, S 내에 있는 노드들이 CH 가 되는 것이다. CH 가 방송메시지를 전송하여 보로노이 셀을 형성하면 그림.5 의 오른쪽 그림과 같이 Θ를 가진 원뿔모양의 클러스터가 형성이 된다.이렇게 클러스터를 형성할 경우 모바일 싱크의 이동 경로 상에 CH 가 있게 되어 CH 는 싱크의 위치를 알 필요가 없이 싱크가 지나가면서 뿌리는 비컨 메시지를 듣고 싱크에게 데이터를 전송하면 된다. 또한 싱크와 CH 사이에서 멀티 홉으로 데이터를 전송하는 오버헤드를 줄일 수 있다.

더욱더 에너지를 효율적으로 하기 위하여 각 셀의 CH 는 데이터 생산률에 따라 데이터를 수집할 필요 없이 모바일 싱크가 자신의 셀에 들어왔을 때 셀 내의 노드들로부터 데이터를 수집하면 된다. 왜냐하면 노드에서 사용되는 에너지는 데이터의 전송횟수에 지배되기 때문이다. 여기에서 각 클러스터의 크기는 시간 T 와 셀내의 노드수의 함수로 표시되며, 다음식을 만족해야 한다. $T \geq t_m + t_g$, t_m 은 모바일 싱크가 경로를 따라 이동하는 시간이고 t_g 는 셀에서 데이터를 모으는데 사용되는 시간이다. 이에 따라 클러스터의 개수가 정해진다.



(그림 5) 클러스터 형성 방법

6. 결론

우리는 네트워크 수명을 연장하기 위해 모바일 싱크를 사용할 때 네트워크에서 사용되는 전체 트래픽이 증가되어 전체 에너지 사용량이 증가함을 살펴보았고, 본 논문의 주요 기여도인 모바일 싱크와 클러스터 방법을 같이 사용함으로써 네트워크 수명을 유지하면서 전체 에너지 소비량을 줄일 수 있음을 확인 하였다. 이와 함께 모바일 싱크가 있을 때 에너지 효율적인 클러스터 형성 방법을 제안하여 네크워크에서 사용되는 전체 에너지를 줄일 뿐만 아니라 수명을 더욱더 연장 할 수 있었다. 앞으로 우리는 제안한 방법을 실험을 통하여 검증하고자 한다.

참고 문헌

[1] Jun Luo, Jean-Piere Hubaux "Joint Mobility and Routing for Lifetime Elongation in Wireless Sensor Networks", in Proceedings of IEEE INFOCOM, 2005.

[2] R. Shah, S. Roy, S. Jain, and W. Brunette, "Data mules: Modeling a three-tier architecture for sparse sensor networks", in Proceedings of the IEEE Workshop on Sensor Network Protocol and Applications(SNPA), 2003.

[3] Z. M. Wang, S. Basagni, E. Melachrinoudis, and C. Petrioli, "Exploiting sink mobility for maximizing sensor networks lifetimes" in Proceeding of the 38th Hawaii International Conference on System Sciences(HICSS), 2005.

[4] Seema Bandyopadhyay and Edward J. Coyle, "An Energy Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks", in Proceedings of IEEE INFOCOM, 2003.