무선 센서 네트워크를 위한 개선된 저전력형 데이터 확산 프로토콜 설계

최낙선* · 김현태* · 김형진** · 나인호*

*군산대학교 전자정보공학부

**익산대학 정보통신과

A Design of Enhanced Lower-Power Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks

Nak-sun Choi* · Hyun-tae Kim* · Hyoung-jin Kim** · In-ho Ra*

*School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

**Department of Information and Communication Engineering, Iksan National College

E-mail : {kcnsk, camelk, ihra}@kunsan.ac.kr, hjkim@iksan.ac.kr

본 연구는 정보통신부의 IT기초기술연구지원사업(정보통신연구진흥원)으로 수행한 연구결과물입니다.

요 약

무선 센서 네트워크는 실세계에서 발생하는 현상에 대한 다양한 응용 요구의 정보를 수집하기 위해 조밀하게 배치된 센서 노드들로 구성된다. 각 센서 노드들은 감지한 정보를 그들 간의 연산, 통신 등 협업 작업을 통하여 최종 사용자에게 전달한다. 일반적으로, 센서 노드들은 배터리 전력에 의존하기 때문에 정보를 수집하고 최종 사용자에게 전달하기 위한 전력 소비는 무선 센서 네트워크의 전체 수명 기간을 좌우한다. 그러므로 각 센서의 에너지 수준을 고려한 최적의 라우팅 알고리즘은 전체 시스템의 수명을 증대시킬 수 있다. 본 논문에서는 기존에 제안된 방향성 확산, SPIN 등과는 다르게 각 센서 노드의 에너지 수준과 최단 홉 경로 정보를 이용하여 무선 센서 네트워크의 전체 수명 시간을 효율적으로 최대한 보장할 수 있는 저전력형 데이터 확산 프로토콜을 제안하였다. 이 기법은 질의 유포 과정에서 홉과 에너지 정보를 이용하여 데이터 전송 경로를 확립하고, 이벤트 발생 지역의 이웃 노드들로부터 수집된 정보는 동일한 데이터를 병합하여 최단의 전송 경로를 통하여 사용자에게 전송한다.

ABSTRACT

Wireless sensor network consists of sensor nodes which are disseminated closely to each other to collect informations for the various requests of a sensor application applied for sensing phenomenons in real world. Each sensor node delivers sensing informations to an end user by conducting cooperative works such as processing and communicating between sensor nodes. In general, the power supply of a sensor node is depends on a battery so that the power consumption of a sensor node decides the entire life time of a sensor network. To resolve the problem, optimal routing algorithm can be used for prolong the entire life time of a sensor network based on the information on the energy level of each sensor node. In this paper, different from the existing Directed Diffusion and SPTN method, we presents a data dissemination protocol based on lower-power consumption that effectively maximizes the whole life time of a sensor network using the informations on the energy level of a sensor node and shortest-path hops. With the proposed method, a data transfer path is established using the informations on the energy levels and hops, and the collected sensing information from neighboring nodes in the event-occurring area is merged with others and delivered to users through the shortest path.

키워드

wireless sensor networks, data-centric routing, data dissemination, data aggregation, directed diffusion

Ⅰ. 서 론

무선 센서 네트워크는 실세계에서 발생하는 다양한 현상을 응용 요구에 적합한 형태로 정보를 제공하기 위해서 조밀하게 배치된 센서 노드들로 구성되어 있다. 일반적으로 사람이 접근할 수 없는 지역의 감시 및 이동 개체에 대한 추적과 같은 응용에서 센서 노드의 네트워크 구성은 동적인 특징을 갖는다[1][2]. 이러한 동적 네트워킹 환경에서 각 센서들은 임의적으로 분산·배치되어 있고, 사용자의 질의에 부합하는 데이터를 수집하여 싱크 노드에게 전달한다. 각 센서 노드는 배터리 전력에 의존적이기 때문에 수집된 정보를 최종 사용자까지 전달하는데 필요한 전체 전력 소비량은 무선 센서 네트워크의 전체 수명을 좌우한다. 그러므로 무선 센서 네트워크에서 각 센서의 에너지 수준을 고려한 최적 라우팅 알고리즘을 제공함으로써 전체 응용 시스템의 수명을 증대시키는 것이 매우 중요하다.

무선 센서 네트워크에서 각 센서의 에너지 수준을 고려한 최적의 라우팅 알고리즘은 다음과 같은 세 가지 조건을 만족시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 첫째, 내부 네트워크(in-network)의 내파문제(implosion problem)를 최소화하여야 한다. 둘째, 둘 이상의 각 센서에서 감지한 데이터의 일부분이 중첩된 데이터를 전송하는 중첩전송문제(Overlap)가 발생하지 않도록 하여야 한다. 셋째, 브로드캐스트와 같은 전송 방식 때문에 발생하는 메시지의 불필요한 전송을 최소화면서 획득된 데이터가 사용자에게 정확히 전달될 수 있는 다중 전송 경로를 구성해야 한다. 이러한 조건들을 충족시키는 라우팅 알고리즘에 의해 각 센서노드는 목적 노드를 파악하여 불필요한 메시지 전송을 줄이고 목적 노드까지의 경로를 지속적으로 유지하면서 최소의 전력으로 사용자에게 데이터를 전달해야 한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 이벤트 발생 지역을 중심으로 각 센서노드가 감지한 데이터를 그들 간의 메시지 협상을 통한 데이터 전송이 이루어지도록 지원하는 저전력 데이터 확산 프로토콜을 제안하였다. 제안된 기법에서는 네트워크 내부의 데이터 증가 및 감지한 데이터의 중복 전송 그리고 과다한 메시지 전송 문제를 이벤트 발생 지역에서의 협상을 통하여 동시에 처리하며, 각 센서 노드의 사용 가능한 배터리 전력을 고려한 데이터 전송 노드를 선택함으로써 전체 센서 네트워크의 수명을 연장시킬 수 있도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 관련 연구에 대해 기술하고, 3장에서는 이벤트 지역 메시지 협상을 통한 저전력형 데이터 확산 프로토콜을 기술한다. 마지막으로 4장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 논의한다.

Ⅱ. 관련 연구

2.1 방향성 확산

방향성 확산(directed diffusion)은 싱크 노드의 질의 방송(interest broadcasting)에 기반을 둔 데이터 중심적 라우팅 프로토콜로서 질의 유포 및 처리과정이 요구되는 응용에 적합하다[3]. 방향성 확산 기법을 적용한 응용에서 질의는 속성과 값의 쌍으로 구성되어 있다. 방향성 확산을 위한 질의 유포단계에서는 먼저 싱크 노드에서 작성된 질의가 네트워크 전체에 유포되고, 그 이후 각 센서 노드들은 질의에 부합하는 데이터를 전송하기 위한 방향(gradient)을 설정한다. 각 센서 노드는 방향을 통하여 자신이 감지한 데이터를 다시 싱크 노드로 전송하기 위해서 다중 경로를 확립하여 이것을 통해 데이터를 전송할 수 있다. 방향성 확산을 위한 데이터 수집 및 전송 단계에서는 이벤트가 발생한 지역의 센서 노드가 플러딩(flooding)에 의한 과다한 전송 트래픽 양을 줄이기 위해 방향으로 설정된 전송 가능 경로들 중에서 전송 품질이 높은 경로를 강화(reinforcement)하고 그 강화 경로를 통하여 감지된 데이터를 싱크 노드에 전달하는 방식을 사용하고 있다[4].

방향성 확산을 위한 이와 같은 정보 검색 과정은 사용자가 일정한 기간 동안 지속적으로 질의에 부합하는 데이터를 요구하는 응용에 적합하며, 동적 네트워크 환경에서 감지한 데이터를 싱크 노드에게 정확히 전송할 수 있는 다중 경로를 제공하는 장점이 있다. 그러나 질의에 의해 설정된 데이터 전송 경로가 일시적으로 필요한 경우 방향성 확산의 다중 경로 확보는 불필요하며, 수집된 데이터를 싱크 노드에게 보내는 과정에서 중간 노드는 인접 노드에서 전달된 데이터가 중복될 가능성이 높으며, 비슷한 데이터를 각기 다른 경로를 통하여 싱크 노드에 전달될 가능성이 높다. 이러한 중복된 데이터의 전달이나 다른 경로를 통한 동일 데이터의 전달은 전체 센서 네트워크의 비효율적 에너지 소비를 유발하는 문제점을 지니고 있다.

2.2 SPIN

SPIN(Sensor Protocols for Information via Negotiation) 프로토콜은 이벤트 발생 지역에 위치한 각 센서에게 협상과 적응적인 자원 사용이라는 방식을 적용하여 기존 데이터 확산 프로토콜이 지닌 문제점들의 일부를 보완하기 위해 제안되었다[5]. SPIN의 협상기법은 메타 데이터를 이용하여 네트워크 내부에서 발생하는 데이터 증가 현상과 감지 데이터의 중복 전송 문제를 개선하였고 노드가 보유한 에너지 자원을 기반으로 네트워크를 관리하여 자원이 효율적으로 활용될 수 있도록 하였다. SPIN 프로토콜을 사용하면 협상과정의 복잡성, 에너지 소비, 연산 및 통신

등의 평가측면에서 볼 때 전체적인 비용은 줄어들면서 성능은 높아진다고 보고된 바 있다. 그러나 이 프로토콜은 이동 노드에 관한 문제를 고려하지 않고 있으며, 노드의 트리 구조가 깊은 경우에는 데이터의 양이 증가되어 전체 네트워크 관리가 어렵다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 데이터 확산 프로토콜로 잘 알려진 방향성 확산과 SPIN과 같은 프로토콜의 장단점을 분석하여 에너지 소비를 최소화하면서 정확한 데이터를 지속적으로 요구하는 응용에 적합한 저전력형 데이터 확산 프로토콜을 설계하였다.

III. 저전력형 데이터 확산 프로토콜

무선 센서 네트워크는 일반적으로 수많은 센서 노드들이 특별한 형태 없이 분산·배치되고 이벤트 발생 지역에 근접한 각 노드들은 유사한 정보를 수집하고 특정 경로를 통하여 싱크 노드에 수집된 정보를 전달할 수 있도록 구성된다.

본 논문은 각 센서의 홉 정보와 에너지 정보를 이용한 최단의 경로 선정 기법을 통하여 안정적인 센싱 데이터의 전달을 보장하고, 이벤트를 감지한 센서들의 중복 및 중첩(implosion & overlap)의 가능성을 제거하기 위해 그들 간의 메시지 협상을 통한 단일 메시지 전송으로 불필요한 에너지 낭비를 제거할 수 있는 저전력형 데이터 확산 프로토콜을 설계하였다. 설계된 프로토콜에서는 질의 유포 단계와 감지 데이터 전송 단계 모두에서 에너지의 효율성을 최대화하는데 역점을 두었다.

일반적으로 데이터 확산 프로토콜은 싱크 노드의 질의 유포, 각 센서 노드의 홉 및 에너지 정보 설정, 전송 경로 유지와 같은 질의 유포 단계와 이벤트 획득, 데이터 공지 및 협상, 전송 경로 선정 및 데이터 전달 등과 같은 병합 및 데이터 전송 단계로 구분된다.

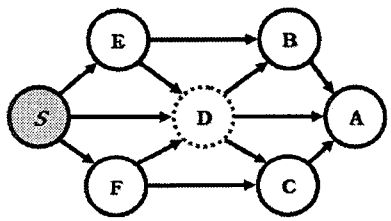
3.1 싱크 노드의 질의 유포

사용자는 WSNs를 통해 수집할 데이터에 관한 질의를 가장 먼저 작성한다. 작성된 질의는 싱크 노드를 통해서 각 센서 노드에게 질의를 유포하고, 질의에 관련된 데이터를 가진 각 센서들은 다시 싱크 노드에 전달함으로써 사용자가 요구한 데이터를 제공한다.

이러한 과정에 있어 사용자가 작성한 질의를 싱크 노드에서 유포시킬 때 질의 메시지에 센서 노드에 관한 홉 정보와 에너지 정보 속성들을 추가하면 병합 및 데이터 전송 단계에서 효율적인 전송 경로를 제공할 수 있다. 질의 유포 단계에서 설정된 홉 정보는 데이터 병합 및 전송단계에서 최단의 홉 경로를 설정하는데 이용한다. 또한, 에너지 정보를 이용하여 센서 노드의 에너지 수준에 따라 해당 경로가 전송 경로로 사용될 수 있는지에 대한 참여 여부를 결정할 수 있기 때문에 무선 센서 네트워크 응용의 전체 수명을 증가시키고 전송 중에 에너지 고갈 문제로 전송 경로를 재설정하는 오버헤드를 줄일 수 있다.

3.1.1 홉 및 에너지 정보 설정

사용자의 질의는 그림 1-(a)와 같이 네트워크 내의 모든 센서 노드들에게 플러딩된다. 이러한 유포 과정에서 질의를 수신한 센서 노드는 방향(gradient) 설정과 함께 홉 정보와 에너지 정보를 그림 1-(b)에 나타낸 바와 같이 질의를 전달한 이웃 노드들에 관한 정보로 저장한다. 이 두 정보는 획득 데이터를 싱크 노드에게 전달할 때 최단의 라우팅 정보로 사용된다. 그림 1-(c)는 이벤트가 발생한 주변의 센서 노드로부터 획득된 데이터를 병합하여 싱크 노드로 전송하는 과정을 보인 것이다.

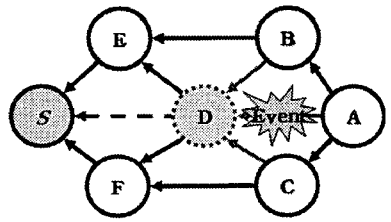


(a) 질의 유포 단계

Type	Vehicle
Rect	10,20,20,15
interval	15ms
Gradient	S

Gradient	Hop	Energy
S	1	3
B	2	5
F	2	3

(b) D 노드의 방향 홉 및 에너지 정보



(c) 메시지 협상 및 데이터 전송 과정

그림 1. 홉과 에너지 정보를 이용한 데이터 확산 과정

어떤 질의가 싱크 노드 S로부터 각 센서 노드에 플러딩 될 때 D 노드의 방향 정보로 홉 정보만을 사용하지만 그림 1-(b)의 방향 정보 테이블에 홉 정보와 에너지 정보를 추가함으로써 강화경로를 설정할 때 우선순위가 S, E, F의 순서로 네트워크 상태에 따라 데이터가 다중 전송 경로로 전달될 수 있도록 하였다. 각 센서 노드는 이러한 방향 정보 테이블을 유지하고 관리함으로써 최단의 홉을 통한 전송 지연시간 절감효과와 에

너지 소비의 균등화를 통한 네트워크 수명시간 연장 효과를 동시에 얻을 수 있다. 저전력 에너지 소비 기반의 효율적 전송 경로 결정과정은 가장 먼저 센서의 에너지 상태를 검사하여 이것이 어떤 기준치 이하이면 전송 경로에서 배제하며, 만약 홉 수가 동일한 두 개의 경로가 있다면 에너지 수준이 높은 노드가 포함된 경로를 선택한다. 즉, 홉과 에너지 수준을 순차적으로 적용한 전송 경로의 결정은 전체 네트워크의 전력 소비를 줄이고 지연시간을 단축시킴으로써 에너지 소비의 효율성을 제공하는 데이터 확산 프로토콜로 사용될 수 있다.

3.1.2 우선순위를 적용한 다중 경로 결정

이벤트를 획득한 각 센서 노드들은 방향 정보를 유지하고 있으며 획득된 데이터를 병합 및 전송하기 위해서 최적의 강화 경로를 싱크 노드에 전달한다. 최적의 강화 경로는 홉과 에너지 정보에 관한 우선순위에 따라 결정된다.

싱크 노드에서 유포되는 질의는 전송 노드간의 홉 정보와 각 센서 노드마다의 에너지 정보에 관한 속성들이 기록 및 갱신되어 전체 센서 네트워크에 유포된다. 전송 경로의 다중성을 높이기 위해 홉과 에너지 속성과 같은 다차원적인 결정요인을 사용하는 것은 다음과 같은 장점을 제공한다. 첫째, 홉 정보는 데이터를 전송경로의 단축으로 네트워크 전체에 전력 소비량을 줄이고 응용의 응답시간을 줄인다. 둘째, 에너지 정보는 네트워크 전체의 에너지 소비를 균등하게 분배하고 특정 노드의 고장으로 네트워크의 성능이 저하되는 것을 방지하며, 결과적으로 전체 네트워크의 수명시간이 증가되는 효과를 얻는다.

3.2 데이터 병합 및 데이터 전송

무선 센서 네트워크의 모든 센서들은 질의 유포 과정을 통하여 방향 정보를 설정한다. 이러한 방향 정보는 각 센서가 획득한 데이터를 싱크 노드에게 전달할 때 라우팅 정보로 사용된다. 무선 센서 네트워크에서 이벤트가 발생하면 그 이벤트 발생 지역 주변의 센서 노드들이 데이터를 수집 및 병합하고 라우팅 정보를 이용하여 싱크 노드에 전달한다.

만약 어떤 지역에서 이벤트가 발생하면 그 지역 주변의 센서들은 이벤트를 획득하여 싱크 노드에게 전달하여야 하는데 이 과정에서 이벤트를 획득한 각각의 센서 노드들은 동일한 이벤트에 대한 획득 작업을 수행하였기 때문에 서로 비슷한 데이터를 전달하게 된다. 따라서 각 센서 노드들이 어떤 문제해결 절차를 거치지 않고 서로 비슷한 데이터를 싱크 노드로 전달한다면 전체 네트워크의 에너지 소비가 증가하여 결국에는 네트워크의 수명이 단축된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 데이터 병합 및 데이터 전송 단계는 이벤트 발생 지역에 근접한 노드들이 획득한 데이터를 싱크 노드로 전송하기 전에 이벤트 발생 지역을 중심으로 메시지 협상을 통하여 중복 및 중첩된 데이터를 병합하도록 하였다. 이렇게 병합된 데이터는 질의 유포 단계에서 설정한 라우팅 정보에 따라 병합 메시지 형식으로 전송하여 네트워크의 전체 수명 시간을 증가시킬 수 있도록 하였다.

센서 노드들 간의 데이터 병합을 위한 협상 과정은 메시지 공지, 전송 노드 선정 및 공지, 데이터 병합, 전송 등과 같은 단계로 수행된다.

3.2.1 메시지 공지

센서 노드들이 질의와 일치하는 데이터를 획득하였다면 각 센서 노드들은 획득 데이터에 대한 공지 메시지를 작성하여 이웃 노드들에게 알린다. 공지 메시지는 표 1과 같이 데이터 및 전송 경로에 관한 간단한 테이블 형태로 구성한다. 공지 메시지를 받은 각 센서 노드들은 자신의 데이터와 일치하면 자신의 전송 경로와 비교한다.

표 1. 데이터 공지 메시지 형식

식별자	데이터 형식
NodeID	N000021
DataType	temperature
hop	2
EnergyLevel	0.75

3.2.2 데이터 전송 노드 선정 및 공지

공지 메시지를 통하여 이웃 노들간의 전송 노드가 선정되면 전송노드는 이웃 노드들에게 선정 내용을 공지하고 데이터를 요청한다. 전송 노드로 설정되었을지라도, 다른 이웃 노드의 홉 수가 짧으면 자신의 데이터를 전송하고 이웃 노드들에게 그 사실을 공지하여 새로운 전송 노드로 데이터가 전송되도록 한다.

전송 노드는 홉 정보와 에너지 정보를 기준으로 결정한다. 이벤트를 획득한 각 센서 노드들은 공지 메시지의 홉 및 에너지 정보와 자신의 정보와 비교하여 전송 여부를 판단한다. 전송 노드 선정은 다음 조건에 의해 수행된다.

- 조건 1. 홉 정보를 이용한 전송 노드 선정
  각 센서 노드는 자신의 캐시에 저장된 홉 정보와 공지 메시지의 홉 정보를 비교한다. 이벤트 발생 영역의 각 센서 노드들은 홉 정보의 비교를 통해 최단의 홉을 가진 노드를 결정한다. 최단의 홉 수를 가진 노드가 전송 노드가 결정되면 이웃 노드들에 획득 데이터를 요청하여 데이터를 병합하고 싱크 노드에 전달한다.

- 조건 2. 에너지 정보를 이용한 전송 노드 선정
  만약 조건 1의 홉 정보가 동일하면 에너지 정보를 비교하여 에너지 수준이 높은 노드가 전송 노드로 결정된다.

3.2.3 데이터 병합 및 전송

최종 선정된 전송 노드는 이웃노드들에게 데이터를 요청하여 특정 이벤트에 대한 데이터를 병합하고 싱크 노드로 전송한다. 전송 노드의 병합 작업은 무선 센서 네트워크용 특정 응용에 의존적으로 수행된다. 이렇게 병합된 단일 데이터는 각 노드의 라우팅 정보에 따라 최종 사용자에게 전달된다.

```
DATAS:
   hop H            // 노드의 홉 정보
   energy E         // 노드의 에너지 정보
EVENTS:
   interest I       // 사용자 질의
   event e          // 검출 데이터
   notice N         // 데이터 공지
   transmission T   // 전송 노드 공지
CONSTANTS:
   threshold C      // 데이터 전송에 참여할 수
    있는 노드의 에너지 한계
PROTOCOL:
task dissemination I : // interest 유포
   receive I
   if( E > C )
      H = +1
      E = I->E
      Sort( H, E )
      Update( I )
      dissemination I;
task detect e :     // 노드의 이벤트 검출
   Create( N )
   Notice( N )
task receive N :    // 공지 메시지 수신
   if( N )
      Confirm( N )
task receive T :    // 전송 노드 공지
   if( T )
      Confirm( N )
Module Confirm( N ) { // 전송 노드 선정
      if( H > N->H )
         Set( N->NodeID )
         Notice( N->NodeID )
      if( H == N->H )
         if( E > N->E )
            Set( N->NodeID )
            Notice( N->NodeID )
}
```

그림 2. 저전력형 데이터 확산 알고리즘

그림 2는 제안된 프로토콜의 질의 유포 단계 그리고 조건 1과 2에 따라 홉 정보와 에너지 정보를 순차적으로 적용하여 최종 전송 노드를 결정하는 협상 과정, 싱크 노드로 획득 데이터를 전송하는 전체 과정에 관한 알고리즘이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크에서 질의 유포와 데이터 전송 과정에서 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 저전력형 데이터 확산 프로토콜을 설계하였다. 이 프로토콜은 질의 유포 과정에서 홉과 에너지 정보를 이용하여 데이터 전송 경로를 확립하고, 이벤트 발생 지역의 이웃 노드들 간의 협상을 통하여 전송 노드를 결정하고 병합하여 최단의 전송 경로로 단일의 병합 데이터를 최종 사용자에게 전달하도록 하였다. 이러한 방식의 데이터 확산 기법을 사용하면 획득된 데이터의 중첩 및 중복을 제거하여 협상을 통한 통합된 단일 메시지 형태로 전송하기 때문에 데이터의 정확성을 높이고 전송 횟수를 최소화할 수 있고, 이로 인하여 전체 네트워크 에너지 소비를 균등하게 분배하며 네트워크의 수명 기간을 증가시키는 장점을 얻을 수 있다.

제안된 기법을 실제 무선 센서 네트워크 응용에 사용하기 위해서는 본 논문에서 제안한 이벤트 발생 지역에서 수행하는 이웃 노드들 간의 협상과 연결성에 따른 데이터 병합 처리와 같은 기법이 여러 종류의 센서 네트워크 응용에 적합한 형태로 사용될 수 있도록 하는 활용 방법에 대한 추가 연구가 필요하며, 향후 연구를 통해 제안된 저전력 데이터 확산 프로토콜을 다양한 환경에서 실험 및 구현하여 그 성능을 검증할 것이다.

참고문헌

[1] A. Bharathidasas, V. Anand, "Sensor Networks: An Overview", Technical Report, Dept. of Computer Science University of California at Davis, 2002.

[2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, "A Survey on Sensor Networks", IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp. 102-114, August 2002.

[3] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, "Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks", In Proc. of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 56-67, August 2000.

[4] J. Heidemann, F. Silva, D. Estrin, "Matching Data Dissemination Algorithms to Application Requirements", In Proc. of the ACM SenSys Conference, pp. 218-229, November 2003.

[5] W. Heinzelman, J. Kulik, H. Balakrishnan, "Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks", In Proc. of the 5th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 1999), pp. 174-185, 1999.