

정적 애드혹 센서망에서의 멀티캐스트의 에너지 효율성

김중태^{1,0}, 모상만², 정일용¹
조선대학교 {전자계산학과¹, 인터넷소프트웨어공학과²}
kjtsy@hanmail.net, {smmoh, iyc}@chosun.ac.kr

Energy Efficiency in Multicast on Static Ad Hoc Sensor Networks

Jung-Tae Kim¹, Sangman Moh², Il-Yong Chung¹
{¹Dept. of Computer Science, ²Dept. of Internet Eng.}, Chosun University

요약

무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율은, 네트워크 및 노드의 운용시간에 직접 영향을 미치므로, 지연 시간과 같은 일반 성능척도 이상으로 중요하다. 본 논문에서는 에너지 소모의 관점에서 정적 애드혹 센서 네트워크에서의 멀티캐스트 프로토콜들을 재평가하고, 멀티캐스트에서의 에너지 소모의 분석적 모델을 제안한다. 멀티캐스트 프로토콜은 멀티캐스트 패킷이 다수의 수신자들에게 전달되는 네트워크 구조에 따라, 크게 트리기반(tree-based) 멀티캐스트와 메쉬기반(mesh-based) 멀티캐스트로 분류된다. 메쉬기반 프로토콜은 링크 장애에 강하여 높은 신뢰성을 갖는 반면에, 트리기반 멀티캐스트는 높은 에너지 효율을 나타낸다. 그 이유는 메쉬기반 프로토콜은 메쉬 내에서 플러딩(flooding)에 의존하고 메쉬 내의 노드는 모든 멀티캐스트 패킷을 수신해야 하기 때문이다. 본 논문에서 제안한 에너지 소모의 분석적 모델에 의하면, 메쉬기반 멀티캐스트는 메쉬 내의 브로드캐스트기반 플러딩으로 인하여 트리기반 멀티캐스트에 비하여 약 $(f + 1)/2$ 배의 에너지를 더 소모한다. 여기서 f 는 평균 노드 연결도를 나타낸다.

1. 서론

무선 애드혹 네트워크[1]은 저렴한 무선 네트워크 솔루션[2, 3]의 출현으로 많은 관심을 끌고 있다. 일반적으로 무선 센서 네트워크는 센서, 작동장치(actuator), 프로세서 등이 내장된 형태로 연결된 무선 애드혹 네트워크이다[4, 5]. 무선 센서 네트워크의 수명을 결정하는 에너지 소모는 센싱, 데이터 처리, 통신 등에서 발생하며, 통신에서의 소모가 가장 크다[5]. 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율성은 가장 중요한 설계기준 중의 하나이다[6]. 무선 통신에 의한 에너지 소모가 전체 시스템 에너지 소모의 절반을 넘기 때문에[7], 에너지 효율성의 열쇠는 에너지를 고려한 네트워크 프로토콜에 있다.

멀티캐스팅은 그룹 통신 및 협력을 요구하는 다양한 응용의 기초가 되기 때문에, 애드혹 네트워크에서의 멀티캐스트에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다[8, 9, 10, 11]. 멀티캐스트 패킷은 멀티캐스트 트리나 멀티캐스트 메쉬와 같은 네트워크 구조를 기반으로 다수의 수신자(그룹 멤버)에게 전송된다. 정적 애드혹 네트워크는 모바일 애드혹 네트워크에서 노드의 이동성이 영(0)인 경우에 해당하기 때문에, 모바일 애드혹 네트워크용으로 설계된 멀티캐스트 프로토콜은 정적 애드혹 네트워크에도 사용될 수 있다. 메쉬기반 프로토콜은 트리기반 프로토콜보다 우수한 이동성과 높은 패킷 전송률을 제공한다[9]. 이는 멀티캐스트 메쉬는 여분의 경로를 제공하기 위해 메쉬 내에서 브로드캐스트기반 플러딩(flooding)을 사용하기 때문이다.

본 논문에서는 에너지 소모 관점에서 멀티캐스트 프로토콜을 재평가하고 분석적 모델을 제안한다. 에너지 절감의 일반적인 방법은 패킷을 송수신하지 않는 한 무선 노드를 수면 상태(sleep mode)로 전환하는 것이다[3]. 메쉬기반 프로토콜은 메

쉬 내의 플러딩에 의존하기 때문에, 메쉬의 모든 노드는 수면 상태로 전환되지 않은 상태에서 항상 패킷을 받을 준비를 하고 있어야 한다. 멀티캐스트 트리를 통한 멀티캐스트 패킷 전송은 지정된 수신자만이 전송 데이터를 수신하는 점에서 멀티캐스트 메쉬에서의 의도적인 브로드캐스트와는 다르다. 트리기반 프로토콜에서 노드는 지정된 수신자가 아니면 에너지 보존을 위해 수면상태로 전환될 수 있다. 제안한 에너지 소모의 분석적 모델에 의하면, 메쉬기반 멀티캐스트는 트리기반 멀티캐스트에 비하여 약 $(f + 1)/2$ 배의 에너지를 더 소모한다. 여기서 f 는 평균 노드 연결도를 나타낸다.

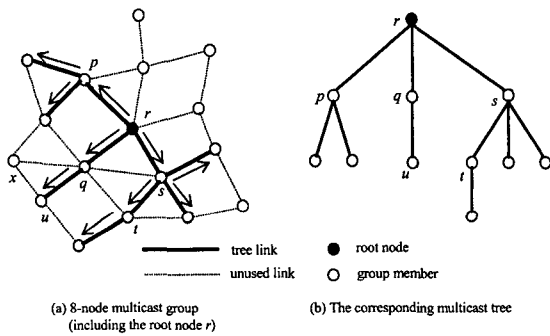
본 논문의 2절에서는 기존의 애드혹 네트워크 멀티캐스트 프로토콜을 간략히 기술한다. 제 3절에서는 기본적인 에너지 모델을 기술하고, 제 4절에서는 임의의 토폴로지를 갖는 네트워크에서의 멀티캐스트 프로토콜의 에너지 분석 결과를 기술한다. 마지막 5절에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

2. 애드혹 네트워크의 멀티캐스트 프로토콜

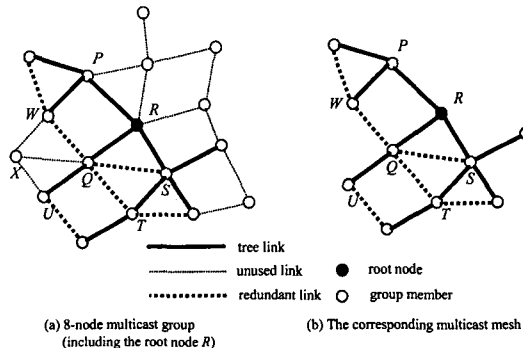
<그림 1>은 멀티캐스트 트리의 예를 나타낸다. 이 트리는 1개의 루트노드(r), 3개의 중간노드(p, s, t), 7개의 멀티캐스트 멤버노드, 그리고 10개의 트리링크로 구성되어 있다. 멀티캐스트 패킷은 루트노드(r)에서 7개의 그룹 멤버로 전송된다. 예를 들어, 수신노드 u 의 경우에 패킷 전송은 r 에서 q 로 그리고 q 에서 u 로 2개의 트리링크를 통해 중계된다. 여기서 2개의 송신과 2개의 수신이 필요하다. 노드 q 에서 u 로 전송되는 과정에서, q 의 전송 범위에 있는 모든 노드들에 멀티캐스트 패킷이 도달하지만, 수신자로 지정된 노드 u 만 패킷을 받는다[2,3].

<그림 2>는 메쉬기반 멀티캐스트의 예를 나타내는데, 10개

의 트리링크에 더하여 6개의 여분링크가 추가되어 있다. 멀티캐스트 패킷은 멀티캐스트 메쉬 내에서 브로드캐스트된다. 따라서, R에서 U로 패킷을 전송하면 3개의 송신(R, Q, U)과 14개의 수신(R의 5개 이웃노드, Q의 6개 이웃노드, U의 3개 이웃노드)이 발생한다. 예를 들어, 노드 Q로부터의 전송은 U 뿐만 아니라 이웃노드인 R, S, T, W, X에 의해서도 수신된다. P에서 W로 연결된 경로가 고장나면, Q에서 W로 연결된 여분링크가 사용될 수 있다. 이 여분링크는 트리링크 고장 시에 유용하게 사용되지만, 사용 여부와 무관하게 추가적인 에너지 소모를 유발한다. 예를 들어, Q에서 W로의 전송은 X가 멤버 뿐만 아니라 중간노드도 아니기 때문에 어떠한 경우에도 사용되지 않지만 에너지를 소모한다. X 노드는 패킷을 수신하면서 에너지 소모하지만 결국에는 이 패킷을 버린다. 요약하면, 브로드캐스트 포워딩은 여분링크를 생성하여 패킷 전송률을 향상시키지만, 트리 기반 멀티캐스트보다 많은 에너지를 소모한다.



<그림 1> 트리 기반 멀티캐스트의 예



<그림 2> 메쉬 기반 멀티캐스트의 예

3. 기본 에너지 모델

단위 멀티캐스트 메시지 당 총 에너지 소모를 E 로 표현하기로 한다. E 에는 송신 및 수신에 필요한 에너지가 포함되어 있다. 본 논문에서는 에너지 소모 분석을 위해 데이터 패킷만을 고려한다. 1차 무선 모델(first-order radio model)[12]에 의하면, $E = E_{TX} + E_{RX} = N_{TX} \cdot e_{TX} + N_{RX} \cdot e_{RX}$ 로 정의된다. N_{TX} 와 N_{RX} 는 각각 송신과 수신 횟수이고, e_{TX} 와 e_{RX} 는 각각 무

선링크를 통해 단위 멀티캐스트 메시지를 송수신하는데 소모되는 에너지이다. 만약 e_{TX} 와 e_{RX} 를 같다고 가정하고(예를 들어, Lucent사의 IEEE 802.11 호환 WaveLAN-II[2]에서는 e_{TX} 는 300 mA이고 e_{RX} 는 250 mA이다.) e 로 표현하면, 총 에너지 소모는 $E = (N_{TX} + N_{RX}) \cdot e$ 로 표현된다.

멀티캐스트 트리에서 N_{TX} 는 단말(leaf) 수신노드를 제외한 트리노드(루트노드, 중간노드)의 수이며, N_{RX} 는 트리링크의 수이다. 멀티캐스트 메쉬에서 N_{TX} 는 전체 트리노드(루트노드, 중간노드, 수신노드)의 수이며, N_{RX} 는 (트리링크 수 + 여분링크 수) · 2 + 폐기링크 수이다. <그림 2>의 예에 나타난 바처럼, 트리링크나 여분링크에서는 하나의 멀티캐스트 동안 2개의 수신이 발생한다. 즉, 노드 T는 노드 S로부터 멀티캐스트 패킷을 수신하고, 노드 S는 같은 트리링크를 통하여 노드 T로부터 멀티캐스트 패킷을 수신한다.

4. 임의의 네트워크에서의 멀티캐스트의 에너지 효율성 분석

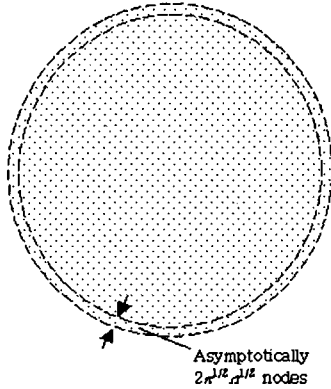
본 절에서는 임의의 토폴로지를 갖는 정적 애드혹 센서 네트워크에서의 멀티캐스트 트리와 멀티캐스트 메쉬의 총 에너지 소모를 정량적으로 분석한다. 이 정적 애드혹 센서 네트워크는 평균 노드 연결도가 f 이고 근사원 지역에 놓인 n 개의 노드로 구성된다. 에너지 소모의 상한치는 네트워크의 모든 노드들이 멤버노드인 완전 멀티캐스트(complete multicast)에 초점을 맞추어 분석한다. 에너지 소모의 하한치는 멀티캐스트 트리나 메쉬가 인접한 멤버노드로만 구성되는 최적의 경우를 분석한다.

다음의 두 정리는 임의의 토폴로지를 갖는 정적 애드혹 센서 네트워크 상의 멀티캐스트에서의 에너지 소모의 상한치와 하한치를 해석적으로 분석한 것이다. [정리 1]은 트리 기반 멀티캐스트를 분석한 것이고, [정리 2]는 메쉬 기반 멀티캐스트를 분석한 것이다.

[정리 1] 평균 노드 연결도가 f 이고 근사원 지역에 놓인 n 개의 노드들로 구성된 정적 애드혹 센서 네트워크 상에서, 트리 기반 멀티캐스트에서 하나의 멀티캐스트 메시지를 전송하는데 소모되는 총 에너지 E_{tree} 는 $(2m - O(m^{1/2}))e \leq E_{tree} \leq (2n - O(n^{1/2}))e$ 의 범위를 갖는다. 여기서 m 은 멤버노드 수이고, e 는 하나의 링크를 통하여 하나의 멀티캐스트 메시지를 송수신하는데 소모되는 에너지이다.

[증명] 평균 노드 연결도가 f 이고 근사원 지역에 놓인 n 개의 노드들로 구성된 정적 애드혹 센서 네트워크 상에서, 완전 멀티캐스트에 대한 트리 기반 멀티캐스트의 총 에너지 소모는 상한치로 간주될 수 있다. 완전 멀티캐스트에서 $N_{TX} = n - O(n^{1/2})$ 인데, 여기서 $O(n^{1/2})$ 는 f 보다 작은 노드 연결도를 갖는 외곽 노드들에 의한 것이다. 또한, $N_{RX} = n - 1$ 인데, 이는 n 개의 노드를 갖는 트리의 링크 수는 $n - 1$ 이기 때문이다. <그림 3>에서와 같은 n 개의 노드로 구성된 근사원 지역에서, 외곽 노드의 수는 점근적으로 $2\pi^{1/2}n^{1/2}$ 이며 결과적으로 $O(n^{1/2})$ 이다. 따라서 $E_{tree} \leq (N_{TX} + N_{RX})e \leq (2n - O(n^{1/2}))e$ 이다. 멀티캐스트 트리가 인접한 멤버노드로만 구성된 최적의 경우에는, $N_{TX} = m - O(n^{1/2})$ 이고 $N_{RX} = m - 1$ 이다. 이 경우에 멀티캐스트 트리는 멤버가 아닌 중간노드가 전혀 없이 오직 인접한 멤버노드들만으로 구성되기 때문에 멤버노드들이 자연스럽게 근사원을 형성한다. 따라서 $E_{tree} \geq (2m - O(m^{1/2}))e$ 이다.

참고 문헌



<그림 3> 정적인 n 개의 노드로 구성된 근사원 지역

[정리 2] 평균 노드 연결도가 f 이고 근사원 지역에 놓인 n 개의 노드들로 구성된 정적 애드혹 센서 네트워크 상에서, 메쉬 기반 멀티캐스트 안에서의 하나의 멀티캐스트 메시지를 전송하는데 소모되는 총 에너지 E_{mesh} 는 $((f + 1)m - O(m^{1/2}))e \leq E_{mesh} \leq ((f + 1)n - O(n^{1/2}))e$ 의 범위를 갖는다. 여기서 m 은 멤버노드 수이고, e 는 하나의 링크를 통하여 하나의 멀티캐스트 메시지를 송수신하는데 소모되는 에너지이다.

[증명] 생략

[정리 1]과 [정리 2]에 따르면, 최악의 경우와 최적의 경우 모두에서 $E_{mesh}/E_{tree} \approx (f + 1)/2$ 이다. 네트워크 분할이 발생하지 않도록 하기 위하여, 평균 노드 연결도 f 는 보통 2보다 훨씬 크다. 결론적으로, 메쉬기반 멀티캐스트는 트리기반 멀티캐스트에 비하여 약 $(f + 1)/2$ 배의 에너지를 더 소모한다.

5. 결 론

본 논문에서는, 전체 네트워크 수명뿐만 아니라 각 무선 노드의 수명을 제한하는 중대한 설계 요소인 에너지 소모의 관점에서, 정적인 애드혹 센서 네트워크에서의 멀티캐스트 프로토콜을 재평가하고 멀티캐스트 프로토콜에서의 에너지 소모의 분석적 모델을 제안하였다. 에너지 절감 기법을 사용할 경우, 통상적으로 멀티캐스트 트리가 멀티캐스트 메쉬보다 에너지 효율성이 우수하다. 이는 메쉬기반 프로토콜은 메쉬 내의 풀링에 의존하기 때문에, 메쉬의 모든 노드는 수면 상태로 전환되지 않은 상태에서 멀티캐스트 통신 동안에 항상 패킷을 받을 준비를 하고 있어야 하기 때문이다. 제안한 에너지 소모의 분석적 모델에 의하면, 메쉬기반 멀티캐스트는 트리기반 멀티캐스트에 비하여 약 $(f + 1)/2$ 배의 에너지를 더 소모한다. 여기서 f 는 평균 노드 연결도를 나타낸다($f \gg 2$).

향후 광범위한 시뮬레이션을 통하여 제안한 분석적 모델을 검증(validation)할 예정이며, 이동성과 시간 영역 분석을 통하여 제안한 에너지 소모의 분석적 모델을 이동 센서를 갖는 이동 애드혹 센서 네트워크에 확장하여 적용하는 연구를 진행할 예정이다.

[1] C. E. Perkins, *Ad Hoc Networking*, Addison-Wesley Pub. Co., 2001.

[2] A. Kamerman and L. Monteban, "WaveLAN-II: A High- Performance Wireless LAN for the Unlicensed Band," *Bell Labs Technical Journal*, pp.118-133, Summer 1997.

[3] H. Woesner, J. Ebert, M. Schlager, and A. Wolisz, "Power-Saving Mechanisms in Emerging Standards for Wireless LANs: The MAC Level Perspective," *IEEE Personal Communications*, Vol. 5, Issue 3, pp. 40-48, Jun. 1998.

[4] G. J. Pottie and W. J. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors," *Communications of the ACM*, Vol. 43, No. 5, pp. 51-58, May 2000.

[5] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G. J. Pottie, "Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network," *IEEE Personal Communications*, Vol. 7, No. 5, pp. 16-27, Oct. 2000.

[6] C. E. Jones, K. M. Sivalingam, P. Agrawal, and J. C. Chen, "A Survey of Energy Efficient Network Protocols for Wireless Networks," *Wireless Networks*, Vol. 7, No. 4, pp. 343-358, Aug. 2001.

[7] R. Kravets and P. Krishnan, "Power Management Techniques for Mobile Communication," *Proc. of Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom '98)*, pp. 157-168, Oct. 1998.

[8] J. E. Wieselthier, G. D. Nguyen, and A. Ephremides, "Algorithms for Energy-Efficient Multicasting in Ad Hoc Wireless Networks," *Proc. of Military Communication Conference*, Vol. 2, pp. 1414-1418, Nov. 1999.

[9] S.-J. Lee, W. Su, J. Hsu, M. Gerla, and R. Bagrodia, "A Performance Comparison Study of Ad Hoc Wireless Multicast Protocols," *Proc. of the IEEE Infocom 2000*, Vol. 2, pp. 565-574, Mar. 2000.

[10] P.-J. Wan, G. Calinescu, X.-Y. Li, and O. Frieder, "Minimum-Energy Broadcast Routing in Static Ad Hoc Wireless Networks," *Proc. of the IEEE Infocom 2001*, Vol. 2, pp. 1162-1171, Apr. 2001.

[11] S. Moh, C. Yu, B. Lee, and H. Y. Youn, "Energy Efficient and Robust Multicast Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," *Proc. of 2002 Pacific Rim Int. Symp. on Dependable Computing (PRDC-2002)*, pp. 145-152, Dec. 2002.

[12] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "Energy-Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks," *Proc. of the Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, pp. 3005-3014, Jan. 2000.