논문 2007-44CI-3-6

전송전력 최적화를 통한 센서네트워크의 효율적인 에너지관리에 대한 연구

(Study of Efficient Energy Management for Ubiquitous Sensor Networks with Optimization of the RF power)

엄 흥 식*, 김 건 욱**

(Heungsik Eom and Keonwook Kim)

요 약

본 논문에서는 무선채널의 신호감쇄특성으로 인하여 멀티홉을 통한 센서네트워크의 에너지소비를 최소화하려는 기존의 연구를 재해석하고 무선채널의 특성과 하드웨어의 전력소비를 동시에 고려하여 센서네트워크의 에너지소비를 모델링하였다. 또한 센서네트워크 하드웨어 플랫폼에 주로 사용되고 있는 RF모듈인 Chipcon사의 CC2420을 대상으로 최대 전송전력과 최소의 홉을 통한 데이터 전송이 네트워크의 에너지효율에 미치는 영향을 다양한 상황의 시뮬레이션을 통해 검증한다. 최대 전송전력으로 최소의 홉을 통하여 전송했을 경우, 낮은 전송전력으로 여러 홉을 거쳐 데이터를 전송하는 것보다 네트워크의 에너지소비가 적게 발생하는 것으로 관찰된다. 높은 전송전력에 따라 증가하는 재전송을 고려한 결과 또한 최대 전송전력으로 전송했을 경우 최대 33.1%의 에너지효율을 얻을 수 있다.

Abstract

This paper reconsiders established power conservation models for ubiquitous sensor networks that use relay nodes instead of direct communication and proposes novel network power consumption model with consideration of the channel level and radio chip level simultaneously. We estimate the effect of minimum hop-count policy in terms of network power consumption through simulation of various situations for low power RF module CC2420. It is observed that maximum RF power and minimum hop-count results in lower energy consumption relatively. Also, in total network energy consumption, which is included re-transmission, minimum hop count policy presents decrease by 33.1% of energy consumption in compare with the conventional model.

Keywords : Multi-hop network, Network energy efficiency, Minimum hop-count policy, RF power, Re-transmission

I. 서 론

센서네트워크는 네트워크의 구성과 확장에 있어 인간의 간섭을 최소화할 수 있다는 장점으로 인하여 근래에 관심과 연구가 지속되고 있다. 또한 라우팅 알고리즘, 에너지 효율적인 MAC 프로토콜, 저 전력 하드웨어 개발 등에 있어 폭 넓은 연구 분야를 제공한다. 더욱이 센서네트워크는 배터리 기반의 특성을 지니고 있기 때문에 시스템의 효율적인 에너지 관리에 대한 연구가 필수적이다. 센서네트워크의 효율적인 에너지관리는 데이터 전송 시 전송전력의 제어와 네트워크 시스템을 구성하는 노드의 활성화, 비활성화를 통한 전력소모 관리를 통하여 이루어 질 수 있다.

본 논문에서는 전송전력의 최적화 측면에서 멀티홉을 통하여 네트워크의 효율적인 에너지 관리를 꾀한 기존의 연구에 대하여 재해석하고 최대 전송전력과 최소 홉으로 네트워크의 에너지소비를 최소화하는 새로운 가능성을 제시한다. 센서네트워크의 효율적인 에너지소비

* 학생회원, ** 정회원, 동국대학교 전자공학과
(Department of Electronics Engineering, Dongguk University)
접수일자: 2007년3월22일, 수정완료일: 2007년5월4일

모델을 위해 채널레벨의 신호감쇄특성만을 고려한 기존의 연구는 하드웨어레벨의 전력소모에 대한 배제로 정확성이 결여되어 있다. 채널레벨에서 무선네트워크의 신뢰성 있는 통신을 위한 전송전력은 전송거리에 대하여 채널상태에 따라 급격한 증가를 보이지만 이를 위한 하드웨어의 전력소비는 선형적 증가를 나타내는 것으로 본 논문에서는 관찰된다. 이는 최대 전송전력과 최소 홉을 통하여 데이터를 전송하였을 경우 보다 효율적인 네트워크 에너지관리가 가능하다는 것을 입증할 수 있다는 점에서 의미있는 결과이다. 또한 이러한 결과의 정당성은 수백, 수천 개의 노드로 구성되는 센서네트워크의 효율적인 에너지 관리는 하나의 노드가 아닌 전체 네트워크의 에너지소비를 최적화시켜야 한다는 점에서 찾을 수 있다.

본 연구에서는 센서네트워크 하드웨어 플랫폼에 주로 사용되고 있는 RF모듈인 Chipcon사의 CC2420을 대상으로 전송전력과 거리에 따른 전류소모를 산출하였다. 또한 전송전력의 세기와 통신가능범위가 커짐에 따라 증가하는 데이터 충돌에 따른 재전송률을 고려한 전체네트워크의 에너지소모를 예측하였다. 본 연구를 통하여 최대 전송전력과 최소 홉이 보다 높은 네트워크 에너지효율을 보인다는 결론을 얻을 수 있다.

Ⅱ. 관 련 연 구

배터리를 기반으로 운영되는 센서네트워크는 네트워크의 생존성 극대화라는 과제가 대두되면서 효율적인 네트워크 에너지소모에 대한 연구가 지적으로 전개되고 있다. 앞서 말한바와 같이 센서네트워크의 효율적인 에너지소모는 크게 두 가지 방법으로 나뉠 수 있다. 첫째로, 네트워크를 구성하고 있는 노드의 효율적인 수면모드 관리에서 비롯된다. S-MAC 프로토콜은 노드의 주기적인 활성, 비활성 기간을 보장함으로써 네트워크의 에너지소비를 최소화하였다.[1] T-MAC은 S-MAC의 주기적인 활성, 비활성 기간을 데이터의 길이에 따라 적응적으로 변화시킴으로써 보다 효율적인 에너지소모의 관리에 대한 연구를 진행하였다.[2] 또한 저 전력 수신모드(Low Power Listening)와 비사용 채널 평가(Clear Channel Assessment)로 대표되는 적응적인 preamble sampling이 B-MAC에서 도입되었다.[3]

네트워크의 효율적인 에너지소모를 위한 또 다른 연구방향인 전송전력 제어는 신호의 세기가 무선 채널의 감쇄특성이 신호의 세기에 미치는 영향을 줄여 평균 송신전력을 최소화하려는 방법이다. 센서네트워크에서 노드간의 신뢰성 있는 통신을 위한 전송전력은 전송거리에 대하여 감쇄지수의 지승에 비례하여야 한다. 이와 같은 특성으로 인해 보다 낮은 전송전력으로 많은 중간 경유노드를 거치는 데이터의 송수신으로 전체네트워크의 낮은 에너지소모를 도모하는 연구가 진행되었다.[4][5] 특히, Rayleigh와 Ricean fading 채널환경에 대한 멀티홉 관련 연구가 활발히 진행되었다.[6] 또한 전체 네트워크가 연결가능한 최저의 공통 전송전력을 설정, DSR, DSDV와 같은 라우팅 알고리즘과 연동될 수 있는 프로토콜에 대한 연구가 이루어지고 있다.[7]

Ⅲ. 센서네트워크의 전송전력과 에너지소모의 특성

1. 무선 채널의 신호감쇄 특성

센서네트워크를 비롯하여 대부분의 무선통신에서는 채널의 신호감쇄특성으로 인하여 전송전력이 송수신거리에 대하여 2차 이상의 상당한 증가를 보인다. 동일한 채널에서 송수신 신호의 세기는 안테나 이득, 신호의 파장, 회로레벨의 시스템 손실 등이 함께 고려되어야하나 이는 외부 영향과 무관하게 상수값을 유지하기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않고 식(1)과 같이 간단히 표현한다.

$$P_{tx} = k \times P_{rx} \times d^{\alpha} \quad (1)$$

P_{tx}와 P_{rx}는 각각 무선채널내의 송수신 전력을 d와 α는 전송거리와 신호감쇄지수를 나타낸다. 채널의 상태에 따라 신호감쇄지수 α는 2에서 6까지 변화한다. 거리 d에 대한 송신전력과 이에 따른 노드의 소모전류를 알아보기 위해 그림 1과 같은 상황을 가정한다.

그림 1. 센서네트워크의 선형적인 노드배치
Fig. 1. Linear configuration of sensor nodes.

센서네트워크 노드 n_i가 n_j에 임의의 데이터를 전송하기 위한 전송전력을 P_{ij}라 할 때 P_{12}와 P_{14}는 식(1)에 의하여 3^{α}배가 차이남을 알 수 있다. 이와 관련된 무선모듈이 소모하는 전류의 차이는 다음 절에서 언급한다.

2. 전송전력에 따른 무선모듈의 전류소모

앞 절에서 임의의 무선채널에서 전송거리에 따른 전송전력의 차이를 알아보았다. 보다 정확한 소모전력을

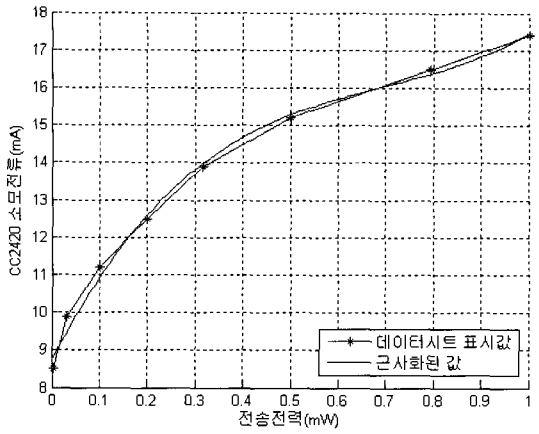


그림 2. CC2420 전송전력에 따른 소모전류 및 근사화 그래프

Fig. 2. Current consumption of CC2420 and approximation graph.

측정하기 위해서는 전송전력에 따른 무선모듈이 소모하는 전류의 차이를 고려해야 한다. 본 논문은 Chipcon사의 CC2420을 대상으로 전송전력에 따른 소비전류의 변화를 시뮬레이션한다. CC2420은 2.4GHz IEEE 802.15.4 기반의 무선송수신모듈로써 250kbps의 데이터 전송률을 가지고 있다.[8] 또한 CC2420은 데이터 송신 시 전송전력의 설정에 따라 최소 8.5mA에서 최대 17.4mA의 전류를 소모한다.

무선모듈이 소모하는 전류가 차이나는 원인은 주파수 합성기, 필터와 같은 회로의 물리적 요소도 있으나 그림 2와 같이 전송전력의 변화가 소모전류에 가장 큰 영향을 미친다. CC2420이 설정할 수 있는 전송전력의 세기 이외 전송전력에 대한 소모전류의 전반적 흐름을 수학적으로 분석하기 위해 Least Mean Square(LMS) 방법을 통하여 근사화 된 데이터를 얻었다. 그 결과 3차식일 경우 가장 작은 에러로 무선모듈의 소모전류를 근사화 할 수 있었다.

2. 전송거리에 따른 무선모듈의 소모전류 모델

센서네트워크에서 신뢰성있는 통신을 위한 적정 크기 이상의 전송전력은 불필요한 네트워크의 에너지소모를 야기할 수 있다. 그러므로 무선채널 내에서의 연결상태를 가늠할 수 있는 기준이 필요하다. 본 논문에서는 10^{-3}의 비트에러발생확률을 통하여 채널의 안정성을 가정한다. 비트에러발생확률은 신호변조방식에 따라 달라지는데 O-QPSK의 변조방식을 사용하는 CC2420의 비트에러발생확률은 식(2)와 같이 표현될 수 있다.[9]

$$\Pr_{O-QPSK} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{2\times P_{tx}\times(1/d)^{\alpha}\times T_b}{N_0}}\right) \quad (2)$$

전송거리에 따라 소모되는 전류의 변화를 알기 위해 식(2)를 통해 얻은 식(3)과 표 1의 값을 이용하였다.

$$P_{tx}(d) = \frac{\left\{Q^{-1}(\Pr_{O-QPSK})\right\}^2 \times N_0 \times d^{\alpha}}{2\times T_b} \quad (3)$$

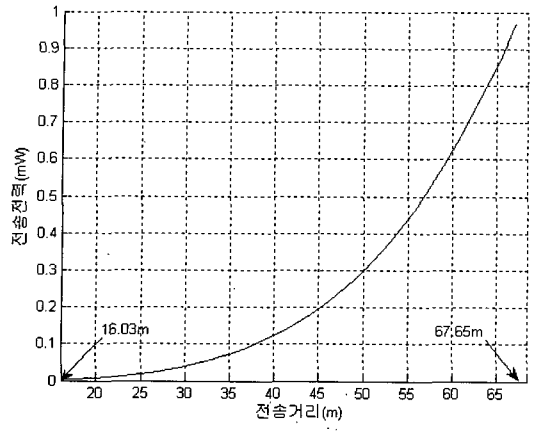
스펙트럼 분석기(MS2668C, Anritsu Corp.,)를 통한 본 연구실의 일반적인 노이즈세기는 약 -80dBm로 측정이 되었고 CC2420의 비트당 전송시간은 4μs이다. 또한 신호감쇄지수 α는 일반적인 채널상태를 나타내는 4로 설정한다. 표 1에서 가정한 비트에러확률 10^{-3}을 만족하며 CC2420을 통하여 설정되어질 수 있는 최소전송전력인 -25dBm로 전송할 수 있는 최대 거리인 16.03m부터 최대전송전력인 0dBm으로 전송할 수 있는 최대거리 67.65m까지의 전송거리 변화에 대한 전송전력과 이에 따른 무선모듈의 소모전류는 그림 3과 같다.

그림 3(a)에서와 같이 무선채널의 신호감쇄특성으로 인하여 전송거리가 멀어질수록 전송전력을 급격한 증가를 보인다. 예를 들어, 60m의 전송거리를 중간경유노드를 거치지 않고 직접 전송할 경우 약 0.62mW의 전송전력이 필요하다. 한 개 이상의 경유노드를 거쳐 2, 3홉으로 전송하는 경우에는 각각 0.0778mW, 0.0231mW가 소모되어 경유노드가 많은 멀티홉일수록 필요한 전송전력이 감소되는 것을 알 수 있다. 네트워크의 에너지소모를 예측하기 위해서는 중간경유노드를 거치지 않고 직접 전송할 경우와 2, 3홉을 통하여 전송할 경우 각각에 대하여 무선모듈이 소모하는 전류량을 알아보아야 한다. 전송거리에 따른 소모전류를 나타내는 그림 3(b)는 그림 2에 그림 3(a)를 대입함으로써 얻을 수 있다. 그림 3(b)에서는 그림 3(a)와 달리 전송거리가 증가함에 따라 무선모듈이 소모하는 전류량은 대략 선형적 증가를 보

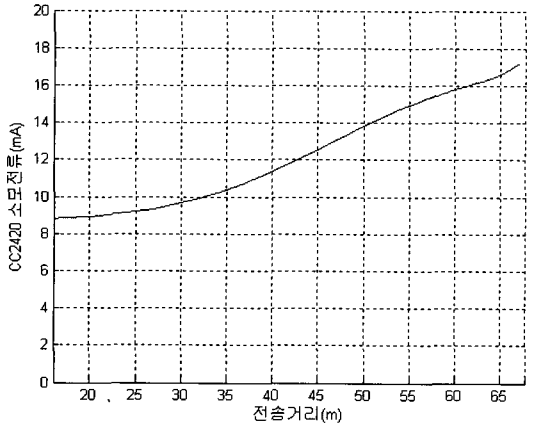
표 1. 식(3)을 위한 파라메터

Table 1. Parameters for Eq(3).

파라메터	값
Pr_{O-QPSK}	10^{-3}
N_0	4×10^{-14}mW/Hz
$T_b(1/bps)$	4μs
a	4



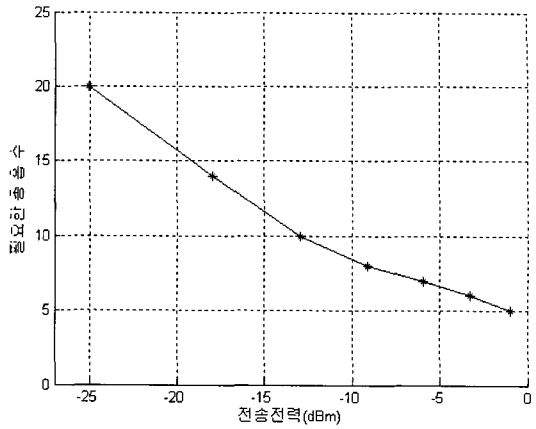
(a)



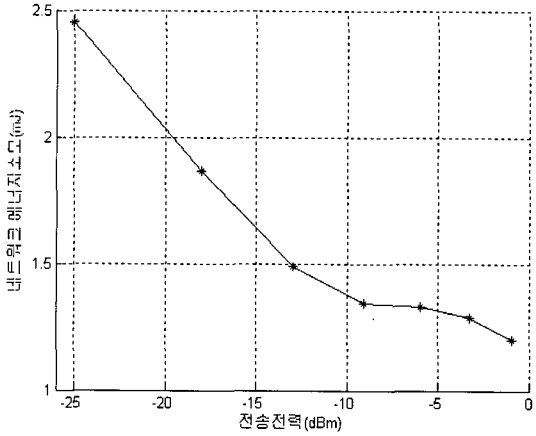
(b)

그림 3. 전송거리에 따라 요구되는 CC2420의 (a)전송전력, (b)소모전류

Fig. 3. (a)RF power, (b)current consumption of CC2420 for given communication distance.



(a)



(b)

그림 4. 전송전력에 따른 (a)필요한 홉 수의 변화 및 (b)네트워크 에너지소모

Fig. 4. (a)Required Hop-count, (b)total network energy consumption for various RF power.

인다. 60m의 전송거리에 직접 전송할 경우 약 17.496㎃의 전류가 소모되고 2, 3홉의 경우에는 각각 19.32㎃, 27.89㎃의 전류가 소모되는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 멀티홉이 더 적은 에너지를 소모한다는 연구와는 상반되는 결과이다. 위의 결과를 바탕으로 가능한 최대의 전송전력을 통하여 최대의 전송거리까지 어떠한 중간노드의 경유 없이 직접 전송하는 것이 네트워크의 효율적인 에너지관리에 유리하다는 결론을 얻을 수 있다.

Ⅳ. 네트워크 에너지소모에 대한 모델링

1. 전송전력의 변화에 따른 에너지소모 예측

노드의 이동성이 적은 센서네트워크에서 전송전력세기의 변화는 통신범위 즉, 데이터 전송 시 경유되어야 하는 노드 수의 변화를 의미한다. 최대 전송전력과 최소 홉을 통한 데이터 전송이 네트워크의 에너지소모를 감소시키는 정도를 알아보기 위해 320m의 고정된 범위에 40개의 노드가 일렬로 분포되어 있는 상황을 가정한다. 이 때 패킷 하나의 길이와 각 노드의 구동전압은 150byte와 3V로 한다. 가장 끝단에 위치한 노드가 다른 한 끝에 있는 노드에게 임의의 데이터를 다양한 전송전력으로 전송하려고 할 때 변화되는 홉 수와 네트워크의 에너지소모는 그림 4와 같다.

전송전력 세기의 증가에 따라 총 320m의 전송거리에 임의의 데이터를 전송하기 위해 필요한 홉 수가 20에서 5로, 네트워크 에너지소모가 2.45mJ에서 1.19mJ로 약 48%정도로 감소되는 것을 그림 4(a), (b)에서 확인할 수 있다. 이는 송신전력만을 고려한 것으로 전송전력의 세기와 무관하게 일정한 수신에너지소모까지 고려한다면 감소되는 네트워크 에너지소모는 더욱 클 것으로 예상된다.

V. 재전송에 의한 네트워크 에너지소모

높은 전송전력은 보다 넓은 전송가능지역을 보장하나 수신노드에서의 데이터충돌을 발생시키는 노드수의 증가를 초래한다. 이는 데이터의 재전송과 네트워크의 추가에너지소모를 발생시킨다. 본 절에서는 전송전력의 세기에 따른 재전송발생 확률과 네트워크의 추가에너지 소모를 예측하였다.

그림 5는 200m×200m지역에 총 150개의 노드를 무작위로 배치한 후 CC2420의 최대전송전력인 1㎽로 데이터를 전송할 때, 발생 가능한 경로와 각 경유노드의 전송가능범위를 나타낸다. 이를 위해 최초송신노드와 최종수신노드는 각각 (0,0)과 (200,200)로 가정한다.

또한 최소경로라우팅 알고리즘을 사용하여 불필요한 hop의 증가를 차단하였고 Constant Bit Rate(CBR)를 이용하여 각 노드의 트래픽 발생 확률을 일정하게 가정하였다. 일정한 트래픽 발생 확률을 보장하기 위해 각 노드에 일정범위의 수를 균일확률분포로 발생시켜 고유 ID를 부여하였다. 그 후 특정범위에 속한 ID의 노드에 한하여 데이터 전송이 가능하도록 하여 트래픽 발생확률을 조절한다. 또한 노드간의 트래픽 발생 확률분포는 독립적이다. 본 논문에서는 위의 방법으로 10%의 트래픽 발생확률을 가정한다.

그림 6(a)에서는 전송전력과 재전송확률이 비례함을 보이고 있다. 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 무선 RF 모듈의 높은 전송전력은 보다 넓은 전송가능지역과 함께 충돌가능 노드수의 증가를 의미하기 때문이다. 높은

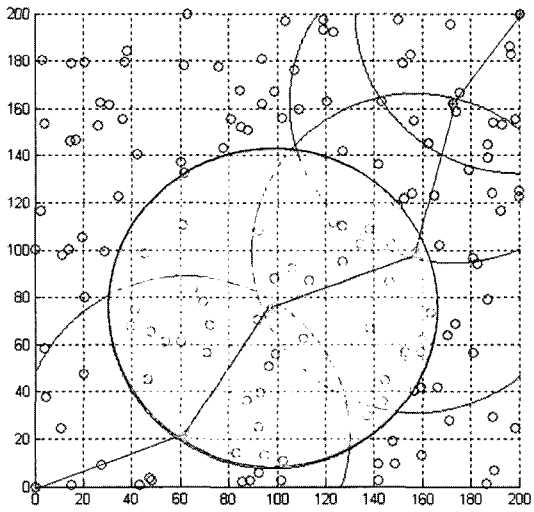
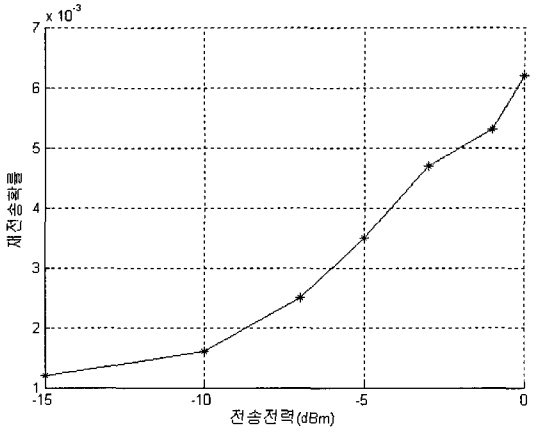
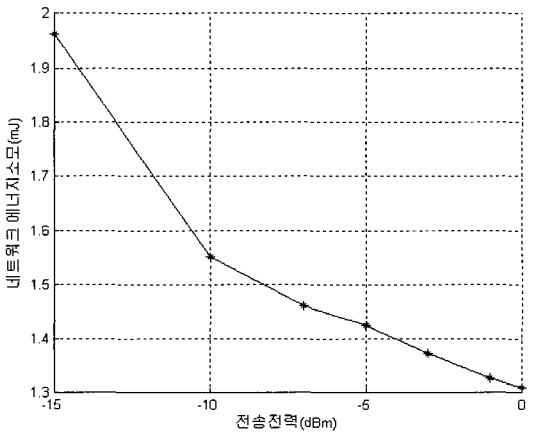


그림 5. CC2420의 전송전력에 따른 전송가능범위
Fig. 5. The communication range for RF power of the CC2420.



(a)



(b)

그림 6. CC2420의 전송전력에 따른 (a) 재전송확률과 (b) 네트워크 에너지소모
Fig. 6. (a) Re-transmission, (b) network energy consumption for RF power of CC2420.

전송전력은 정상적인 데이터의 전송을 위해선 보다 높은 재전송확률을 요구하고 추가적인 네트워크 에너지소모를 초래한다.

그림 6(b)에서는 재전송시 발생하는 추가에너지소모를 고려한 전체네트워크 에너지소모를 나타낸다. -15dBm의 전송전력으로 데이터를 전송하였을 경우 1.96mJ의 에너지를 소모하나 0dBm일 경우에는 1.31mJ의 에너지를 소모하여 약 33.1%의 에너지 효율을 보인다. 본 논문에서 가정한 것과 같이 낮은 트래픽일 경우 높은 전송전력은 상대적으로 높은 재전송확률을 초래하지만 이로 인한 추가적인 에너지소모는 홉 수의 감소에서 얻어지는 에너지이득에 비해 크지 않음을 알 수 있다. 위의 결과는 네트워크의 에너지소모를 예측할 때 채널레벨의 신호감쇄 뿐 아니라 하드웨어 레벨의 소모전류를 동시에 고려한 점에 원인을 둔다.

VI. 결 론

본 논문은 보다 많은 멀티홉을 통하여 효율적으로 네트워크의 에너지소모를 줄이려고 했던 기존의 연구를 재해석하고 최대 전송전력과 최소 홉을 통하여 네트워크의 에너지소모를 최소화하였다. 시뮬레이션 결과 최대 전송전력과 최소 홉을 통한 통신은 낮은 전송전력으로 멀티홉을 이용할 경우보다 네트워크의 에너지소모를 48%로 감소시킨다. 높은 전송전력에 따라 증가하는 재전송확률을 고려한 결과 또한 최대 전송전력으로 데이터를 전송하였을 경우 약 33.1% 낮은 에너지소모를 보였다.

본 연구의 이점은 최대 전송전력과 최소 홉을 통한 네트워크의 구성은 기존의 라우팅 알고리즘, MAC 프로토콜과 쉽게 결합하여 에너지관리에서 추가적인 효율을 얻을 수 있다는데 있다. 향후 위의 결과를 기존의 라우팅 알고리즘과 MAC 프로토콜에 적용하여 보다 효율적인 네트워크 에너지관리에 대한 연구가 필요하다. 더불어 최대 전송전력을 통한 데이터의 송수신시 발생이 예상되는 신호간섭을 최소화할 수 있는 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. "Medium Access Control With Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", IEEE / ACM Trans. on Networking, pp. 493-506, 2004.

[2] Tijs van Dam, Koen Langendoen, "An adaptive Energy Efficient MAC Protocl for Wireless Sensor Networks", in Proc. The ACM Sensys Conf. 2003.

[3] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", in Proc. The ACM Sensys Conf., Baltimore, Maryland 2004.

[4] Jeffrey P. Monks, Jean-Pierre Ebert, Adam Wolisz, Wen-mei W.Hwu, "A Study of the Energy Saving and Capacity Improvement Potential of Power Control in Multi-hop Wireless Networks", in Proc. of Local Computer Networks 26th Annual IEEE Conference. pp. 550-559, 2001.

[5] Katja Schwieger, Gerhard Fettweis, "Power and Energy Consumption for Multi-Hop Protocols : A Sensor Network Point of View", in International Workshop in Wireless Ad-Hoc Networks, London, 2005.

[6] Bernard Sklar, "Digital communication fundamental and applications", 2nd edition. Prentice Hall, 2001.

[7] Swetha Narayanaswamy, Vikas Kawadia, R. S. Sreenivas and P. R. Kumar, "Power Control in Ad-Hoc Networks : Theory, Achitecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol", in Proc. Eur. Wireless Conf. pp. 156-162, 2002.

[8] Chipcon 2.4GHz 802.15.4 / ZigBee-ready RF transceiver CC2420 Datasheet.

[9] Rappaport, Theodore S, "Wireless Communications Priciple and Practice", 2nd edition, Prentice Hall, 2005.

저 자 소 개

엄 흥 식(학생회원)
2006년 동국대학교 전자공학과 학사
2006년 동국대학교 전자공학과 석사과정
<주관심분야 : 컴퓨터 구조, 센서 네트워크>

김 건 욱(정회원)-교신저자
1995년 동국대학교 전자공학과 학사
1997년 University of Florida 석사
2001년 University of Florida 박사
2001년~2003년 UF HCS 연구소 연구원
2003년~현재 동국대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 어레이 신호처리, 병렬 신호처리 시스템 설계, 센서 네트워크 응용>