

무선 센서 네트워크 채널 분석

정 경 권*, 최 우 승**

Channel Analysis of Wireless Sensor Networks

Kyung Kwon Jung*, Woo-Seung Choi**

요 약

무선 센서 네트워크의 응용범위가 늘어남에 따라 정확한 무선 채널의 정보를 필요로 한다. 실내 또는 실외의 무선 센서 네트워크의 경우 페이딩에 의한 다중 경로 전파가 문제를 일으키고 있다. 본 논문에서는 실내 2.4 GHz 채널에 대한 log-normal path loss 모델링을 살펴본다. 송신기와 수신기 사이의 거리를 1에서 30 m까지 변화시키면서 수신 신호 강도 변화를 측정하고, 채널의 감쇄지수와 표준편차를 계산하였다. 계산한 모델의 패킷 수신율을 이용하여 무선 센서 채널을 연결 영역과 차단 영역으로 정의하고, 시뮬레이션과 실험 결과를 통해서 무선 채널의 특징을 비교하였다. 실험결과 실내에서의 연결 영역은 24 m, 실외에서의 연결 영역은 14 m로 측정되었다.

Abstract

In proportion as the growth of the wireless sensor network applications, we need for more accuracy wireless channel information. In the case of indoor or outdoor wireless sensor networks, multipath propagation causes severe problems in terms of fading. Therefore, a path-loss model for multipath environment is required to optimize communication systems. This paper deals with log-normal path loss modeling of the indoor 2.4 GHz channel. We measured variation of the received signal strength between the sender and receiver of which separation was increased from 1 to 30 m. The path-loss exponent and the standard deviation of wireless channel were determined by fitting of the measured data. By using the PRR(Packet Reception Rate) of this model, Wireless sensor channel is defined CR (Connect Region), DR(Disconnected Region). In order to verify the characteristics of wireless channel, we performed simulations and experiments. We demonstrated that connection ranges are 24 m in indoor, and 14 m in outdoor.

▶ Keyword : 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Networks), 채널 모델링(channel modeling), Log-normal path loss model, 연결 영역(Connect Region), 차단 영역(Disconnected Region)

• 제1저자 : 정경권 교신저자 : 최우승

• 접수일 : 2008. 5. 28, 심사일 : 2008. 8. 9, 심사완료일 : 2008. 9. 25.

* 한림대학교 전자공학과 전임강사 ** 경원대학교 교양대학 교수

I. 서론

무선 센서 네트워크(WSN, Wireless Sensor Network)는 방대한 지역에 임의로 뿌려진 센서 노드에 의해 물리적 정보를 분석, 수집하기 위해 개발되었다. 무선 센서 노드는 정보의 수집을 위한 다양한 센서, 수집된 정보의 처리를 위한 MPU(Micro Processor Unit)와 수 KB 크기의 RAM, 무선 통신을 위한 RF 통신 모듈로 구성된다. 무선 센서 노드는 독립된 전원으로 동작하는 기기로서 한번 배치된 노드에 추가적인 전원공급이 불가하기 때문에 전원 관리가 반드시 필요하다. 무선 센서 네트워크는 위의 특징을 지닌 다수의 센서 노드들이 multi-hop 통신 방식으로 광범위한 통신망의 형성하여 정보를 수집하게 된다[1,2].

무선 센서 네트워크의 응용분야가 인류의 생활과 근접하게 되면서 보다 정확한 정보의 전달을 필요로 한다. 또한 넓은 지역의 무선채널과 다른 특성을 갖는 실내 환경의 무선 채널 특성에 대한 분석이 필요하다. 무선 채널은 주변의 환경에 민감한 변화를 가져오며 특히 실내나 건물들로 둘러싸인 환경에서는 페이딩 현상에 의해 전파의 왜곡이 발생하고 전송되는 정보의 손실이 발생하게 된다. 또한 저전력의 RF 통신으로 인한 낮은 출력은 거리의 증가에 따라 급격한 정보의 손실을 발생하게 된다.

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 채널 환경을 수학적 방법으로 분석하고 시뮬레이션과 실제 실험 결과를 비교하여 저전력으로 전송거리 향상이나 위치 추적 등에 이용할 수 있는 파라미터를 결정한다. 또한 분석된 채널에서 데이터를 수집하여 오류 발생 확률을 비교 분석하고 PRR(Packet Reception Rate)을 이용하여 연결 영역(Connect Region), 차단 영역(Disconnected Region)을 확인한다. 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성되어진다. 2장에서 센서 네트워크와 채널 모델링에 대한 관련 연구를 소개하고 3장에서는 센서 네트워크를 이용한 채널 모델링을 설명한다. 4장에서는 실험 및 분석을 하고 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

물리적 정보를 획득하고 처리, 전송하는 무선 센서 네트워크는 CSMA-CA(Carrier Sensing Multiple Access - Collision Avoidance)방식을 기반으로 하여 AD-hoc 네트워크를 형성한다. 무선 센서 네트워크는 광범위한 지역에 임

의로 노드를 배치하고 multi-hop 통신 방식을 이용하여 정보를 송·수신하게 된다. 주변의 노드들로부터 정보를 전송 받은 sink node는 응용분야에 따라 다양한 기존의 네트워크 인프라를 이용하여 정보를 전송하게 된다. 응용분야에 따라 sink node로부터 정보를 전송받을 수 있는 기기로는 인터넷을 이용한 PC 기반의 장치들과 PDA, 이동전화 등의 모바일 장치들이 대표적이다.

무선 센서 네트워크의 응용분야는 초기에 환경감시, 생태 파악 등의 분야로 한정되어 있었다. 유비쿼터스 컴퓨팅의 개념이 도입되면서 능동적으로 정보를 처리하고 전송할 수 있는 무선 센서 네트워크는 차세대 컴퓨팅에 필요한 조건을 갖춘 기기로 부상하고 있다. 이러한 무선 센서 네트워크를 인류의 생활에 접목시키기 위한 연구가 다양한 방면에서 진행되고 있다[3].

2.1 무선 센서 노드의 하드웨어 구성

무선 센서 노드는 단일기기로서 정보의 수집, 분석 전송이 가능한 차세대 컴퓨팅기기이다. 이러한 무선 센서 노드는 저전력 프로세서와 정보 수집을 위한 센서, 저전력 통신을 위한 RF 부분으로 구성된다. [그림1]은 일반적인 무선 센서 노드의 구성을 보여준다.

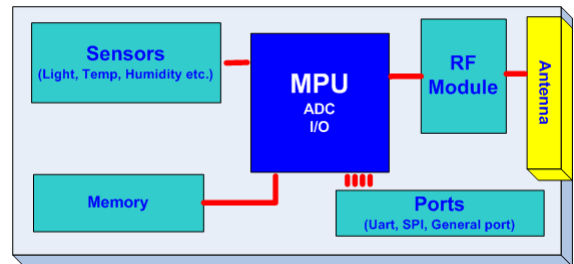


그림 1. 무선 센서 노드의 하드웨어 구성
Fig 1. Hardware configuration of wireless sensor node

무선 센서 노드에 사용되는 프로세서는 저전력의 프로세서를 사용한다. 프로세서를 통해 처리되는 정보의 양이 작고, 내장된 배터리를 이용한 노드의 수명유지가 중요하기 때문에 뛰어난 성능보다 전력소모를 줄일 수 있는 프로세서가 요구된다. 이로 인해 무선 센서 노드에 사용되는 마이크로프로세서들은 active 상태와 sleep 상태로 동작할 수 있는 특징을 갖는다.

[표1]은 현재 개발되어 있는 센서 노드들의 프로세서 종류와 전력 소모량을 나타내고 있다[4]. Active 상태에서 프로세서의 전력소모는 Mica2를 제외하고 15 mW를 넘지 않으며

표 1. 센서 노드의 종류
Table 1. The family of motes

센서 노드	WeC	Rene	Rene2	Dot	Mica	Mica2Dot	Mica2	Telos
MPU type	AT90LS8535		ATmega163		ATmega128			MSP430
Program memory(KB)	8		16		128			48
RAM(KB)	0.5		1		4			10
Active power(mW)	15		15		8		33	3
Sleep Power(μ W)	45		45		75		75	15
Wake up time(μ s)	1000		36		180		180	6

MSP430을 사용하는 Telos는 3mW의 가장 작은 전력으로 동작한다.

논문에서는 무선 센서 노드로 [그림2]와 같은 TIP50CM을 사용하였다. TI (Texas Instruments)사의 MSP430 프로세서를 사용하며, 무선 통신 칩은 TI사의 CC2420으로 2.4~2.483GHz 대역을 사용한다. MSP430은 각 instruction을 1 클럭에 처리할 수 있도록 설계되어 있으며 active 모드에서의 3mW의 매우 작은 양의 전력으로 동작한다. sleep 상태에서 전력소모 역시 Telos가 15 μ W로 가장 작고 ATmega128을 사용하는 Mica 시리즈가 가장 큰 75 μ W의 전력을 사용한다. 256KByte의 메모리를 이용해 다양한 응용프로그램이 가능하며 보다 많은 정보의 저장이 가능하다. 최대 정보 전송률 250Kbps를 갖는 CC2420은 Offset-QPSK의 변·복조 방식을 사용할 수 있다. 또한 CC2420은 송신 시 35mW, 수신시 38mW의 전력을 사용하여 낮은 전력으로 무선 통신을 가능하게 한다. TIP50CM의 사양은 [표2]와 같다.

표 2. TIP50CM 사양
Table 2. Specification of TIP50CM

Item	Description
Processor	MSP430(16bit RISC, 8MHz)
Program Memory	256KByte
Operating System	TinyOS
Radio	2.4GHz
Data Rate	250Kbyte
Sensor	Temperature, Humidity and Light
Network	Multi-hop and Ad hoc
Interface	USB(UART)
Power	3.0~3.3V



그림 2. TIP50CM 센서 노드
Fig 2. TIP50CM sensor nodes

2.2 채널 모델링

무선 채널은 주변의 환경에 민감한 변화를 가져오며 특히 실내나 건물들로 둘러싸인 환경에서는 페이딩 현상에 의해 전파의 왜곡이 발생하고 전송되는 정보의 손실이 발생하게 된다. 또한 저전력의 RF 통신으로 인한 낮은 RF 출력은 전송 거리의 증가에 따라 급격한 정보의 손실을 발생하게 된다. 이러한 문제를 미리 예측하는 방법으로 통신 채널의 특성을 모델링함으로써 센서 네트워크의 성능을 향상시키는 연구가 진행되고 있다.

다양한 채널 모델 중에서 채널 모델링은 log-normal path loss 모델이 적용되고 있으며, Sawant 등은 433MHz

대역의 채널을 모델링하였고, Darbari 등은 2.4GHz 대역에서 10cm이내 근거리에서 채널 모델 실험하고 link budget 과 BER에 이용하였다. Zhao는 채널 모델 알고리즘을 구성하여 센서 배치에 활용하였다[5,6,7].

III. 센서 네트워크를 이용한 채널 모델링

Log-normal path loss 모델은 송신 전력과 수신 전력 간의 관계로 정의된다. 센서 노드 송신 전력을 P_t 라하고 수신된 전력을 P_r , 송·수신단 사이의 거리에 따른 신호의 감쇄를 $PL(d)$ 라 하면 수신된 전력 P_r 은

$$P_r = P_t - PL(d) \dots\dots\dots (1)$$

이 된다.

자유공간에서 송신부로부터 전송된 신호의 거리에 따른 수신 전력의 세기 P_r 은 Friis의 transmitting 공식에 의해 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = \left(\frac{1}{4\pi d^2} \right) \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot P_t \dots\dots\dots (2)$$

$\lambda = c/f$ 로 표현될 수 있으며 $c = 3 \times 10^8$, f 는 전송 주파수가 된다. 또한 P_t 를 거리 d 와 SNR(Signal to Noise Ratio)의 관계에 의해 정의하면

$$P_t = SNR \cdot N \cdot \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{R}{B} \cdot KTB \cdot \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

으로 표현 할 수 있다. 여기서 E_b 는 1bit 전송하는데 필요한 에너지, N_0 는 noise power spectral density, K 는 Boltzmann constant, T 는 절대온도를 나타내며, R 은 bit rate, B 는 signal bandwidth를 나타낸다.

식 (2)와 (3)을 이용하면

$$PL(d) = \frac{P_r(d)}{P_t} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

로 나타 낼 수 있고 식 (4)을 log-scale로 표현하면

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \dots\dots\dots (5)$$

와 같이 표현 될 수 있다.

식 (5)에서 d 는 송·수신단 사이의 거리, d_0 는 reference 거리(1m), n 은 path loss exponent, X_σ 는 표준 편차 시그마를 갖는 가우시안 랜덤 변수가 된다[8,9].

IV. 실험 및 분석

실내 환경에서 무선 센서 노드의 전송 전력을 측정하기 위하여 [그림 3]과 같은 실험 환경을 구축하여, 건물 복도에서 거리를 변화시키면서 전송 전력을 측정한다. 센서 노드의 송신 전력은 무선 모듈이 최대 출력할 수 있는 전력인 0dBm(1mW)으로 설정하였다.

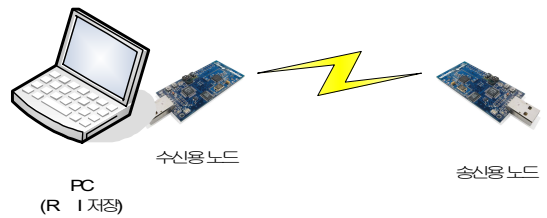


그림 3. 수신 전력 측정
Fig 3. Measurement of received power

4.1 채널 모델링

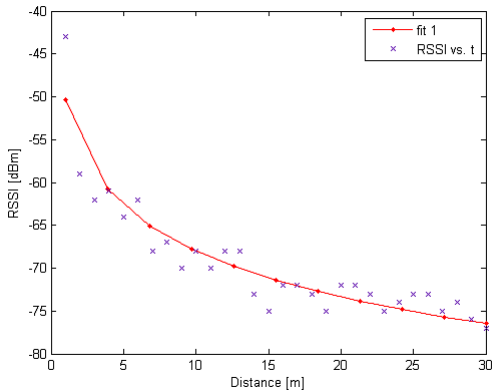
Pass loss model을 위한 실험은 실내와 실외의 채널 환경에 대해 분석한다. 실내는 경원대학교 기술관 1층 복도에서 실험을 진행하였으며, 실외는 경원대학교 대운동장에서 진행하였다.

노이즈 레벨 N_0 는 스펙트럼 분석기를 이용하여 실내와 실외의 노이즈 레벨을 측정하였다. 기술관의 노이즈 레벨은 -79dBm이며, 운동장의 노이즈 레벨은 -80dBm이다.

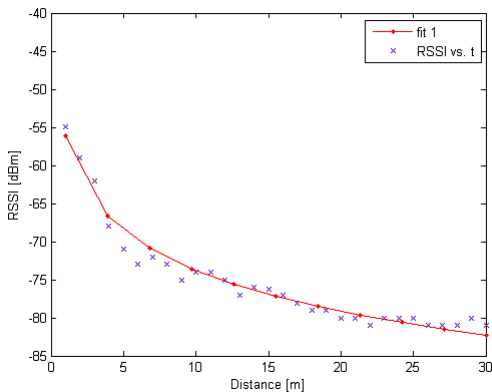
실험에서는 TIP50CM의 최대 전송 파워 0dBm을 이용하였다. 송신단과 수신단 사이의 거리를 1m씩 증가시키며 각 위치의 수신 신호의 강도를 측정하고 이를 이용해 무선 채널을 분석하였다. 수신 전력의 측정은 TIP50CM 센서 노드에 구현되어 있는 RSSI(Received Signal Strength Indicator)를 이용하였다. RSSI 값은 TIP50CM 노드에 장착된 RF 통신

모듈인 CC2420에 내장되어 있으며 RSSI_VAL register를 이용해 8bit 디지털 값을 읽어 온다.

위에서 얻어진 RSSI값을 이용하여 채널을 모델링한 결과는 [그림4]와 같다.



(a) 실내



(b) 실외

그림 4. RF 수신 전력 및 채널 모델링 결과

Fig 4. RF received power and channel modeling results (a) indoor (b) outdoor

[그림4]에서 점의 분포는 각 거리마다 100번씩 측정된 RSSI의 평균값을 나타내고 실선은 Matlab을 이용한 curve fitting 결과이다.

식(5)에 의해 두 공간의 감쇄지수 n 과 수신된 신호 세기의 표준 편차 X_σ 를 [표3]과 같이 얻을 수 있다.

표 3. 실내/실외 Log-normal path loss 모델 파라미터
Table 3. Indoor/outdoor log-normal path loss model parameters

	$PL(d_0)$ (dBm)	Path loss exponent n	X_σ (dB)
실내	-43	1.769	4.62~13.07
실외	-55	1.87	-1.58~2.71

4.2 전송 영역

무선 채널에서 신호의 전송 가능 거리와 연결이 끊어지는 거리를 분석하는 것은 매우 중요한 일이다. 이에 따라 센서 노드의 송·수신 전력을 조절하여 불필요한 에너지 소모를 막을 수 있으며, 노드 배치될 최적의 위치와 노드 개수를 구할 수 있다. 또한 원활한 신호의 전송을 위해 인위적 배치가 반드시 필요한 지역에 효율적인 노드 배치를 통해 전송률, 안정성, 커버리지 등의 측면에서 네트워크의 성능 향상을 기대할 수 있다.

Log-normal path loss 모델을 통해 분석된 센서 노드 채널에서 전송된 신호는 변·복조 방식과 전송 패킷의 크기에 따라 수신기의 정확도와 전송 거리에 변화를 갖는다. 채널 모델링에서 얻어진 결과를 바탕으로 무선 센서 노드에서 사용되는 변·복조 방식과 전송 패킷의 길이를 이용하여 주어진 환경에서 안정적으로 전송 가능한 거리와 천이가 발생하는 거리, 연결이 끊어지는 거리를 분석한다. CC2420의 변·복조 방식은 Offset-QPSK를 사용하였고, 인코딩은 Manchester coding 방식으로 하였다.

전송 영역의 분석을 위해 log-normal path loss 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 각 1m 마다 얻어진 PRR(Packet Reception Rate)을 이용해 비교 분석하였다.

각 거리마다 패킷을 매초 1회씩 전송하여 10분 동안 600개의 패킷을 수집하였다. 실험과 시뮬레이션에서 완벽한 수신이 이루어지는 연결 영역은 10^{-3} 의 BER(Bit Error Rate)을 보장할 수 있는 지역으로 정의한다. 이를 위해 Packet의 BER과 PRR과의 관계를 확률식을 이용하여 정의할 수 있다. Offset-QPSK의 경우 여러 발생확률은 잘 알려진 BPSK 변조방식과 같다. 이를 이용하여 식(6)과 같이 나타 낼 수 있다.

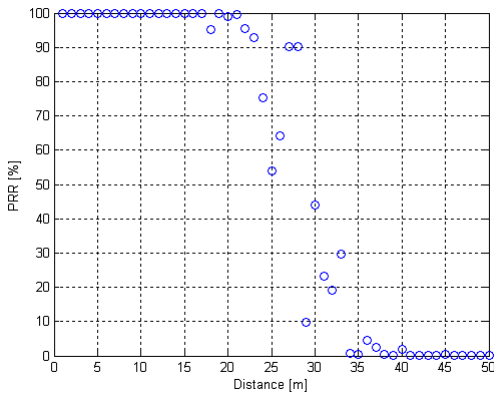
$$BER = Q \sqrt{\frac{2E_B}{N_0}} \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)를 통해 얻어진 BER을 이용해 PRR은 식 (7)과 같이 정의 할 수 있다.

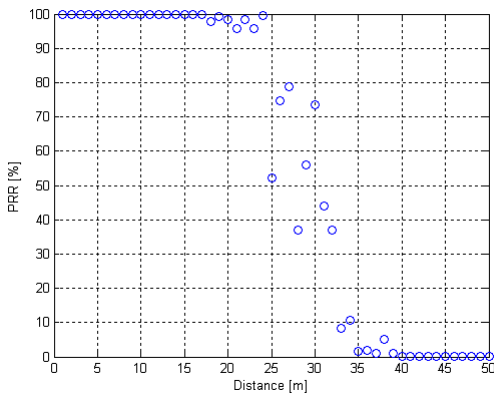
$$PRR = (1 - BER)^N \dots\dots\dots (7)$$

N 은 패킷의 길이(bit)를 나타낸다.

위의 식을 이용하여 Matlab으로 시뮬레이션을 진행하였고 실제 실험을 통해 얻은 데이터를 이용해 천이 영역을 분석하였다. [그림5]는 실내 환경의 결과이고, [그림6]은 실외 환경의 시뮬레이션 및 실험 결과이다.



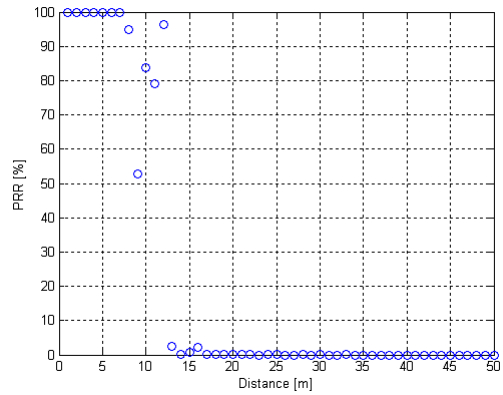
(a) 시뮬레이션 결과



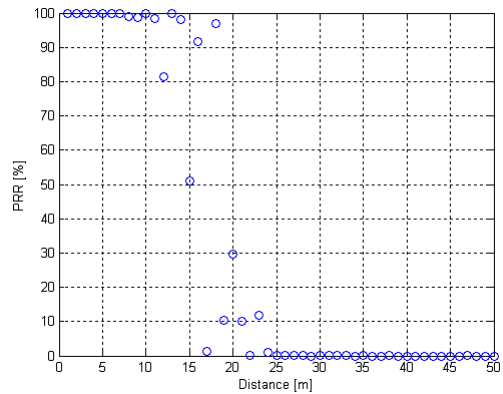
(b) 실험결과

그림 5. 실내 실험 결과

Fig 5. Experimental results of indoor
(a) simulation result (b) experimental result



(a) 시뮬레이션 결과



(b) 실험결과

그림 6. 실외 실험 결과

Fig 6. Experimental results of outdoor
(a) simulation result (b) experimental result

[그림5]와 [그림6]에서 90% 이상의 PRR을 유지하는 지역을 연결 영역(Connected Region), 10% 이하로 패킷이 수신되는 지역을 차단 영역(Disconnected Region)이라 정의 한다.

[그림5(a)]의 시뮬레이션 결과는 연결 영역은 20m 까지이며, 35m이상에서 연결이 끊기는 것을 볼 수 있다. [그림 5(b)]의 실내 실험을 통해 확인한 결과는 24m 이하의 연결 영역과 35m 이상의 차단 영역에서는 신호가 수신되지 않음을 확인 하였다. [그림6(a)]의 실외 환경 시뮬레이션 결과에서 연결 영역은 8m까지이며, 13m이상이 차단 영역이다. [그림6(b)]의 실외에서의 실험을 통해 확인한 결과는 14m 이하의 연결 영역과 20m 이상의 연결 영역으로 나뉘어진다.

따라서 실내에서는 24m 이내에, 실외에서는 14m 이내에 센서 노드를 설치한다면 센서 노드 사이에 원활한 통신을 수행할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크의 채널을 실내 환경에서 채널의 특성을 분석하였다. 실내에서 최대 파워 0dBm으로 정보를 전송할 경우 RSSI를 측정하여 실내 환경의 log-normal path loss 모델 파라미터를 결정하였다. 결정한 모델 파라미터를 이용하여 거리에 따른 PRR을 통해서 전송 거리에 대해 연결 영역, 차단 영역으로 나누어 분석하였다. 상용 센서노드 TIP50CM을 이용하여 패킷 송수신 실험을 통해서 시뮬레이션 결과와 전송 거리 및 연결 영역을 비교하였다. 실내에서의 전송 거리는 24m 이며, 실외에서의 전송 거리는 14m 이내로 측정되었다.

향후 센서 네트워크의 응용분야의 발전에 따라 보다 정확한 정보의 전송과 보다 긴 전송거리가 요구되기 때문에 본 논문을 기반으로 배터리로 동작하는 무선 센서 네트워크에서 전력소모를 최소화 하면서 데이터를 전송하는 연구가 진행되어야 하며, 채널 모델을 이용한 실내 위치인식에 적용이 가능할 것이다.

참고문헌

- [1] Xiaojiang Du, Fengjing Lin, "Improving sensor network performance by deploying mobile sensors," IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, pp. 67~71, 2005.
- [2] Yihan Li, Panwar S.S, Shiwen Mao, Burugupalli S, Jong ha Lee, "A mobile ad hoc bio-sensor network," 2005 IEEE International Conference on Communications, Vol. 2, pp. 1241~1245, 2005.
- [3] Chuan-Ming Liu, Chuang-Hsiu Lee, "Power efficient communication protocols for data gathering on mobile sensor networks," Vehicular Technology Conference, 2004. Vol. 7, pp. 4635~4639, 2004.
- [4] J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, "Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research," 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp. 364~369, 2005.
- [5] Rahul P. Sawant, Qilian Liang, Dan O. Popa, Frank L. Lewis, "Experimental Path Loss Models for Wireless Sensor Networks," IEEE Military Communications Conference, pp. 1~7, 2007.
- [6] F. Darbari, I.A. Glover, R.W. Stewart, "Channel and Interference Analysis for Wireless Sensor Networks," IEEE International Conference on Communications 2007, pp. 3289~3294, 2007.
- [7] Xuefeng Zhao, L. Razouniov, L.J. Greenstein, "Path loss estimation algorithms and results for RF sensor networks," IEEE 60th Vehicular Technology Conference 2004. Vol. 7, pp. 4593~4596 Vol. 7, 2004.
- [8] Bernard Sklar, Digital Communications: Fundamentals and Applications, Prentice Hall, 2001.
- [9] Leon W. Couch, Digital and Analog Communication Systems, Prentice Hall, 2001.

저 자 소 개



정 경 권

1998년 2월 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사)
2000년 2월 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
2003년 8월 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
2005년 3월~2008년 2월 동국대학교 밀리미터파신기술연구센터 연구원
2008년 3월~현재 한림대학교 전자공학과 전임강사
<관심분야> 센서 네트워크, 임베디드 시스템, 인공지능



최 우 승

1977년 2월 동국대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1981년 2월 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
1994년 2월 동국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
1981년~2008년 현재 경원대학교 교양대학 교수
1998년~2000년 한국컴퓨터정보학회 학회장
2000년~2008 현재 한국컴퓨터정보학회 고문
<관심분야> 비지도학습 신경회로망, 퍼지논리 시스템, 패턴인식, 센서 네트워크