

무선 유비쿼터스 네트워크를 위한 에너지 효율적인 MAC Layer ARQ 프로토콜에 대한 연구

A Study on the Energy Efficient MAC Layer ARQ Protocol for Wireless Ubiquitous Networks

노재성*, 김완태**

Jae-Sung Roh*, Wan-Tae Kim**

요 약

무선 센서 네트워크의 발전은 다양한 응용 사례에 의하여 기인하고 있다. 하지만 이러한 응용 사례는 네트워크 수명의 증가, 높은 처리율, 낮은 지연시간과 같은 에너지 효율적인 무선 센서 네트워크를 요구하고 있다. 무선 시스템과 네트워크 분야에서 네트워크 수명의 증가에 대한 무선 센서 네트워크의 설계에 많은 연구가 주목되고 있다. 모바일 애드 혹 네트워크와 달리 무선 센서 네트워크의 설계는 데이터 처리율의 최대화나 지연의 최소화보다는 각 노드의 생존에 관심이 집중되어 있다. 본 논문에서는 OSI 모델에서 데이터 링크, 즉 매체 접근 제어 계층을 다룬다. 에너지를 자각하는 MAC 프로토콜의 개발은 물리계층의 무선 분야를 제어하기 때문에 전체적인 에너지 소모와 노드의 수명에 큰 영향을 준다. 본 논문에서 에너지 소모를 줄이기 위한 분석적인 방법을 적용하여 MAC Layer ARQ 관리에 따른 효율적인 에너지 소모를 통한 네트워크 종단간 데이터 도착 확률의 증가를 보였다.

Abstract

The development of wireless sensor networks (WSN) can be motivated by several types of applications. However, these applications demand an energy-efficient WSN that can prolong the network lifetime and can provide high throughput, low latency and delay. Designing wireless sensor networks with the capability of prolonging network lifetime catch the attention of many researchers in wireless system and network field. Contrasts with Mobile Ad Hoc Network system, Wireless Sensor Networks designs focused more on survivability of each node in the network instead of maximizing data throughput or minimizing end-to-end delay. In this paper, we will study part of data link layer in Open Systems Interconnection (OSI) model, called medium access control (MAC) layer. Since the MAC development of energy aware MAC Protocol for wireless sensor layer controls the physical radio part, it has a large impact on the overall energy consumption and the lifetime of a node. This paper proposes a analytical approach that tries to reduce idle energy consumption, and shows the increasement of network end-to-end arrival rate due to efficiency in energy consumption from time slot management.

Key words : WSN(Wireless Sensor Network), MAC Layer, ARQ, BPSK/BFSK

I. 서 론

센서 장치들을 무선으로 연결하여 네트워크를 형성하는 무선 센서 네트워크 기술은 사람을 중심으로

* 서울대학 정보통신과

** 한국항공대학교 대학원 정보통신공학과

· 제1저자 (First Author) : 노재성

· 투고일자 : 2010년 12월 15일

· 심사(수정)일자 : 2010년 12월 16일 (수정일자 : 2011년 2월 10일)

· 게재일자 : 2011년 2월 28일

하던 정보 운용 형태를 확장하여 사람과 사물뿐만 아니라 사물 간의 정보 공유를 언제 어디서든 가능하게 하는 유비쿼터스 환경으로의 패러다임 구현에 초석을 마련해 나가고 있다 [1]-[3]. 현재 무선 센서네트워크 관련 표준기술은 무선 근거리 개인 통신망(WPAN : Wireless Personal Area Network) 전송 규격을 위한 IEEE802.15 표준 규격과 이를 기반으로 상위 계층 규격을 정하여 관련 산업에 적용하려는 ZigBee 규격이다. 그림 1은 지그비 무선 프로토콜의 전체 구조를 나타낸다.

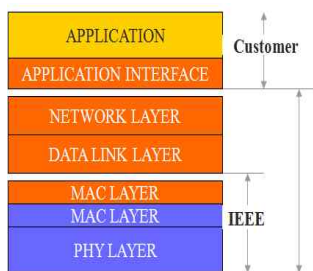


그림 1. 지그비 무선 프로토콜의 구조
Fig. 1. Structure of ZigBee wireless protocol.

이러한 표준기술은 대상이 되는 통신 계층 혹은 서비스 목적에 따라 표준 규격 작업이 진행되고 있으며, 각 단계가 목적으로 하는 서비스 영역을 기반으로 시장에서의 기술 선점을 위해 표준 작업을 진행해 나가고 있다. 이들 표준 기술 중 최근에 유비쿼터스 환경을 실현하는 기술로써 다양한 센서 장치와 무선 통신 모뎀을 활용하여 필요한 정보를 원격지에서 수집, 분석, 처리하는 무선 센서 네트워크 기술인 IEEE802.15.4는 작은 패킷 사이즈를 갖는 온/습도, 미터링 데이터를 수집하기 위한 저전력의 단순 모니터링 서비스를 고려하여 표준화가 진행되었으며, 다양한 용도의 응용에 부합하는 네트워크 계층 규격과 애플리케이션 프로파일을 정의하여 시장에 관련 제품 등을 선보이고 있다. 하지만 기존 IEEE802.15.4 MAC 기술은 네트워크 트래픽의 증가에 따라 발생하는 빈번한 재전송에 의한 심각한 성능 저하와 시간제한을 갖는 센싱 정보 전달의 요구 품질을 만족할 수 없다는 제약 사항을 갖는다.

무선 채널 환경의 측정에 의하면 무선 채널의 평균 BER(Bit Error Rate)은 약 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 으로 평가

되고 있으나 오류 방지나 복구 방법을 채택하지 않는 경우에는 대부분의 패킷들은 전파 오류에 의해 손실된다. 또한 동종 혹은 이종의 무선 기기의 간섭에 의한 수신 신호의 품질 저하는 무선 근거리 개인 통신망으로서의 제 기능을 발휘할 수 없다는 문제점을 유발하여 관련 시장의 활성화에 한계를 보이고 있다. 따라서 IEEE802.15.4 MAC 규격에서는 WPAN 내에서의 제한된 기기 접속 수에 따른 확장성 문제나 네트워크 토폴로지 제한에 따른 망 안정성, 특정 PAN 동작 모드에서 전력 소비 문제 등으로 WPAN의 요구 사항으로는 부족한 실정이다. 현재는 IEEE802.15.4 MAC 표준기술과의 호환성을 유지하는 한편 기능상의 한계를 극복하고 산업계의 기술적 요구사항과 보다 넓은 서비스 영역을 확보하여 WPAN 시장의 활성화에 기여하는 표준화 작업이 진행 중이며 개선된 MAC 기능은 산업 응용 서비스들에 무선 센서 네트워크 기술을 적용하는 데 있어 기폭제 역할을 할 것으로 기대된다 [4]-[7].

본 연구에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 MAC Layer ARQ 프로토콜을 적용한 다수의 센서노드 사이의 중단간 네트워크 도착 확률을 송신기 MAC 레벨 재시도 횟수, 변조방식, 채널 오류, 다중흡에 따라서 정량적으로 분석하였다.

II. 무선 센서 네트워크 프로토콜

무선 센서 네트워크 구현을 위한 IEEE 802.15.4는 물리 계층인 PHY 계층과 미디어 접근 계층인 MAC 계층으로 구성된다. 이들 계층은 OSI(Open System Interconnection) 7계층의 참조 모델 중에서 가장 낮은 2가지 계층에 해당된다. IEEE 802.15.4의 PHY 계층은 868/915 MHz 대역에서 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조 혹은 O-QPSK(Offset-Quadrature Phase Shift Keying) 변조 후 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 방식으로 신호를 확산하는 방식을 사용한다. 또한, 2.45 GHz 대역에서는 O-QPSK 변조 후 DSSS 확산 방식을 적용한다. 868/915 MHz 대역은 각각 유럽 및 북미에서 주로 사용하는 주파수 대역으로 2.45 GHz 대역보다는 상대적으로 간섭 신호 특성이

좋다고 할 수 있다. 그림 2는 IEEE 802.15.4 물리계층의 주파수/채널 배열을 나타낸다.

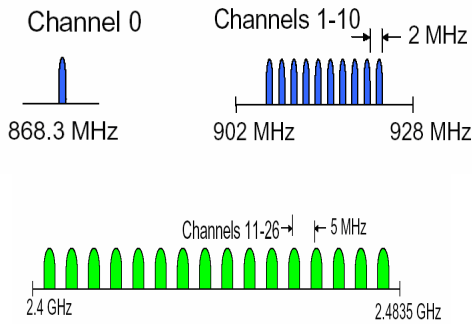


그림 2. IEEE 802.15.4 주파수/채널 배열
Fig. 2. Allocation of IEEE 802.15.4 frequency/channel.

IEEE 802.15.4의 MAC 계층은 다양한 응용의 지원과 네트워크 형태 지원을 위해 유연한 구조를 가지며 쉬운 관리를 위해 데이터 서비스와 MAC 관리 서비스를 지원한다. MAC 프레임은 MPDU(MAC Protocol Data Unit)라 부르며 MHR(MAC Header), MSDU(MAC Service Data Unit) 및 MFR(MAC Footer)로 구성된다. MPDU의 MAC 헤더의 프레임 제어 필드에서는 전송되는 프레임의 형태를 나타내며, 주소 필드 포맷을 규정하고 정의하고 있다.

MAC 프레임은 4가지 종류를 가지고 있으며 비컨 프레임, 데이터 프레임, 확인 프레임, MAC 명령 프레임이다. 4가지의 MAC 프레임 중 데이터 프레임과 비컨 프레임만 상위계층에 전달되고, 확인 프레임과 MAC 명령 프레임은 MAC 계층 간의 제어를 위해 사용된다. 그림 3에서 MAC 프레임의 순번(Sequence number) 필드와 프레임 순서 확인(Frame check sequence) 필드는 데이터 전송에서 에러 검출과 제어에 사용된다. 또한, IEEE 802.15.4e는 기존 IEEE 802.15.4에서와 같이 하나의 MAC 기술 규격에 의해 PAN을 구성하기 보다는 서비스 영역에 따라 복수의 동작 모드를 두어 사용자가 목적에 따라 MAC 모드를 선택해 네트워크를 운용할 수 있도록 하고 있다.

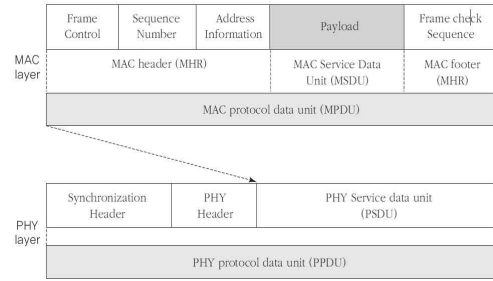


그림 3. IEEE 802.15.4 MAC/PHY 프레임 포맷
Fig. 3. Frame format of IEEE 802.15.4 MAC/PHY.

III. 센서노드의 MAC Layer 재전송 성능

무선 센서 네트워크에서 통신 프로토콜은 가벼워야 하고 연결하면 작동되는 Plug and Play 형의 간편한 설치 기능이 요구되며 서로 간에 상호 협력적 네트워크를 구성하기 위한 확장성도 요구된다. 또한, 무선 센서 네트워크는 이동성과 휴대가 가능한 기기도 고려해야 하므로 저전력 특성과 산업적인 측면에서 저가격이 요구된다. 무선 센서 네트워크 환경에서 소모되는 전력을 줄이기 위한 여러 MAC 프로토콜들이 제안되었다. 무선 센서 네트워크 환경에서의 MAC 프로토콜들은 중요 설계 관점에 따라 물리 계층에서 사용되는 채널의 수, 경쟁 또는 비경쟁 기반 채널 접속 방식, 관련 노드의 조직(organization) 등에 따라서 분류될 수 있다.

예를 들어, 무선 센서 네트워크 환경에서 주로 사용되는 Sensor-MAC (S-MAC)프로토콜은 무선 센서 네트워크를 위해 특별히 고안된 방법으로 슬롯(slotted) 개념을 사용하는 MAC 프로토콜이다. 그림 4는 S-MAC을 위한 주기적인 활성/수면 상태를 나타낸다. S-MAC 프로토콜은 단일 채널을 사용하는 경쟁기반 프로토콜로 시간을 프레임 단위로 나누고, 이 프레임을 활성 구간과 수면 구간으로 나눈다. 수면 구간에서는 노드가 무선 통신을 위한 부분의 전원을 끄고 에너지 소모를 거의 하지 않는 상태로 활성 구간의 duty cycle을 줄임으로써 전력 소모를 줄이는 방법을 사용하고 있다.

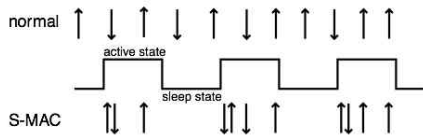


그림 4. S-MAC을 위한 주기적인 활성/수면 상태
Fig. 4. Periodic active/sleep state for S-MAC.

무선 유비쿼터스 네트워크 계층은 그림 5와 같이 멀티 홉 네트워크 구조를 형성하며 여러 종류의 통신 노드 및 중계노드를 거쳐 종단 시스템끼리 정보를 주고받을 수 있도록 기능을 제공하는 기능을 수행한다. 전송 계층 및 응용 계층은 네트워크 계층의 상위 계층으로 데이터 연결 계층이나 물리 계층을 신경 쓰지 않고서 종단간 (End-to-End) 프로토콜로 통신이 가능하다.

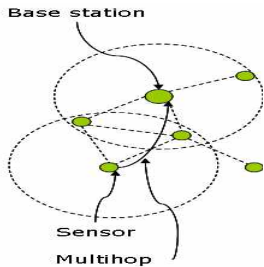


그림 5. 멀티 홉 네트워크 구조
Fig. 5. Multi-hop Network Structure.

무선 센서 네트워크를 구성하는 기기는 기능에 따라 코디네이터, 라우터와 종단기기(센서노드)로 구분할 수 있다. 코디네이터는 무선 센서 네트워크마다 단 하나만 존재하는 네트워크 관리자로 전기능기기 (Full Function Device)이고 네트워크가 형성되면 라우터로도 작동할 수 있다. 라우터는 옵션(Optional) 네트워크 구성 성분으로 코디네이터나 다른 라우터, 종단 기기와 연계된다. 전기능 기기와 멀티 홉(Multi-hop) 라우팅 처리가 가능하다. 종단기기는 옵션 네트워크 구성 성분으로 코디네이터 또는 라우터와만 연계되고 라우팅 기능은 없다.

다음은 무선 채널에서 동기식 PSK와 FSK 변조방식의 비트 당 오류율을 나타낸다 [8],[9].

$$P_b^{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{E_b/N_o} \right) \quad (1)$$

$$P_b^{BFSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b/N_o}{2}} \right) \quad (2)$$

여기서, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 는 에리 보함수를 의미하며 E_b/N_o 는 비트당 신호 전력대 잡음 전력비를 나타내며 다음과 같다.

$$E_b/N_o = \frac{P_{Tx}(1/d)^\alpha T_b}{N_o} \quad (3)$$

여기서, P_{Tx} 는 송신전력, d 는 통신거리, α 는 신호감쇄지수, T_b 는 비트당 전송시간을 의미한다.

무선 센서 네트워크 환경에서 센서노드의 데이터 전송 방식과 채널상태의 오류 P_b 에 따른 평균 전송수(Average number of transmission)은 다음과 같다.

$$N_T = (1 - P_b) \sum_{i=1}^{\infty} (i+1) P_b^i \quad (4)$$

그리고 선택 재전송 ARQ 방식이 적용된 센서 노드의 데이터 처리 효율(Data throughput efficiency)는 송신된 채널 심볼 당 평균적으로 수신된 정보의 수로써 다음과 같다.

$$\eta = \frac{1}{(1 - P_b) \sum_{i=1}^{\infty} (i+1) P_b^i} \quad (5)$$

무선 센서 네트워크 환경에서 MAC Layer ARQ 프로토콜을 적용할 경우에는 센서노드 송신기에서 MAC-Level 재전송의 영향을 분석해야 한다. 2개의 센서노드 사이의 1홉 전송에서 패킷이 성공적으로 도착할 확률을 p 라고 정의하고 MAC-Level 재전송 횟수를 R 이라고 표현하면 MAC Layer ARQ 프로토콜을 적용한 데이터의 성공적인 수신확률은 다음과 같다.

$$P_s = \sum_{i=0}^{R-1} p(1-p)^i \quad (6)$$

만약 다수개의 센서노드 사이의 H 다중 홉 전송에서 MAC Layer ARQ 프로토콜을 적용한 데이터의 성공적인 end-to-end 수신확률은 다음과 같다.

$$P_{etc} = \left[\sum_{i=0}^{R-1} (1-p_b)(1-(1-p_b))^i \right]^H \quad (7)$$

그림 6은 물리계층에서 BPSK 신호를 사용한 2개의 센서노드에서 MAC 레벨 재시도 수의 변화와 잡음환경에서 BPSK 신호의 신호 전력 대 잡음 전력비의 변화에 따른 수신 데이터의 성공적인 도착 확률을 나타낸다. 결과 그림에서 $E_b/N_o = -10[\text{dB}]$ 이상이고 MAC 레벨 재시도 3회 이상부터 수신 데이터의 도착 확률이 95%이상인 신뢰성있는 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다. MAC 레벨 재시도 2회와 MAC 레벨 재시도 1회에서는 각각 $E_b/N_o = -6.5[\text{dB}]$ 와 $E_b/N_o = 2[\text{dB}]$ 이상에서 수신 데이터의 성공적인 도착 확률이 90%이상인 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다. 그림 7은 그림 6과 동일한 환경에서 BFSK 신호를 사용한 2개의 센서노드에서 MAC 레벨 재시도 수의 변화와 잡음환경에서 E_b/N_o 의 변화에 따른 수신 데이터의 성공적인 도착 확률을 나타낸다. 그림 6의 BPSK와는 달리 데이터의 수신 성능이 감소하여 MAC 레벨 재시도 2회와 MAC 레벨 재시도 1회에서는 각각 $E_b/N_o = -3.5[\text{dB}]$ 와 $E_b/N_o = 5[\text{dB}]$ 이상에서 수신 데이터의 도착 확률이 90%이상인 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다. 또한, $E_b/N_o = -10[\text{dB}]$ 이상이고 MAC 레벨 재시도 3회 이상부터 수신 데이터의 성공적인 도착 확률이 93%이상인 신뢰성있는 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다.

그림 8은 센서노드 내부의 다양한 MAC 레벨 재시도 변화에 따른 무선통신 센서 네트워크의 end-to-end 데이터 도착 확률을 나타낸다. 결과 그림에서 무선통신 네트워크 구성을 위해 다수의 센서노드 사이의 홉의 수는 10개로 가정하였다. 결과 그래프로부터 $P_b = 0.1$ 인 무선 전송 환경에서는 홉마다 MAC 레벨 재시도 2회 이상부터 end-to-end 데이터 도착 확률이 90%이상인 신뢰성있는 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다. 하지만 $P_b = 0.4$ 인 무선 전송 환경에서는 홉마다 MAC 레벨 재시도 5회 이상부터 end-to-end 데이터 도착 확률이 90%이상인 신뢰성있는 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다. 그림 9는 그림 8과 동일한 환경에서 무선 센서 네트워크의 end-to-end 데이터 전송을 위한 홉의 수를 5개로 감소시킨 경우를 가정하였다. 결과 그래프로부터

$P_b = 0.1$ 와 $P_b = 0.4$ 인 무선 전송 환경에서 홉마다 MAC 레벨 재시도 2회와 5회 이상부터 end-to-end 데이터 도착 확률이 95%이상인 신뢰성있는 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다. 따라서 무선 센서 네트워크의 end-to-end 노드 규모가 작아짐에 따라서 데이터 전송의 신뢰성이 증가함을 알 수 있었다.

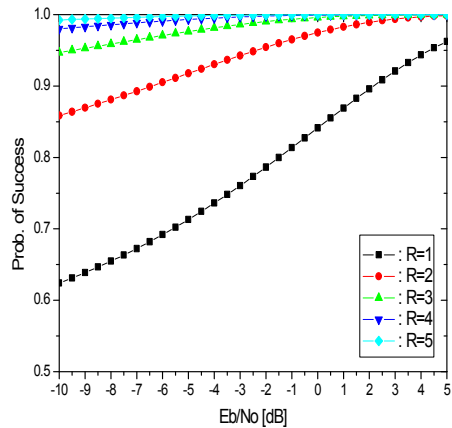


그림 6. MAC 레벨 재시도 수에 따른 성공 도착 확률 (BPSK 신호)

Fig. 6. Probability of success arrival according to the number of MAC-Level Retry (BPSK signal)

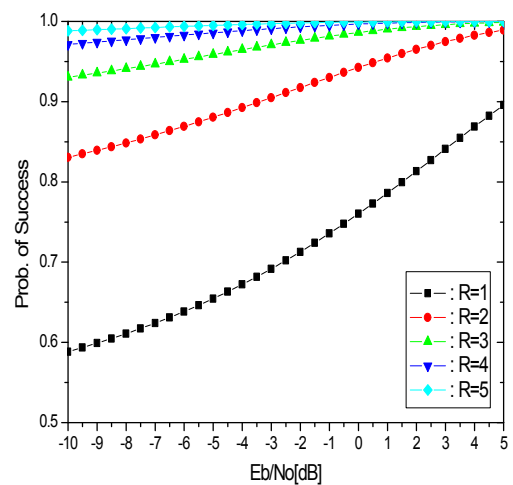


그림 7. MAC 레벨 재시도 수에 따른 성공 도착 확률 (BFSK 신호)

Fig. 7. Probability of success arrival according to the number of MAC-Level Retry (BFSK signal)

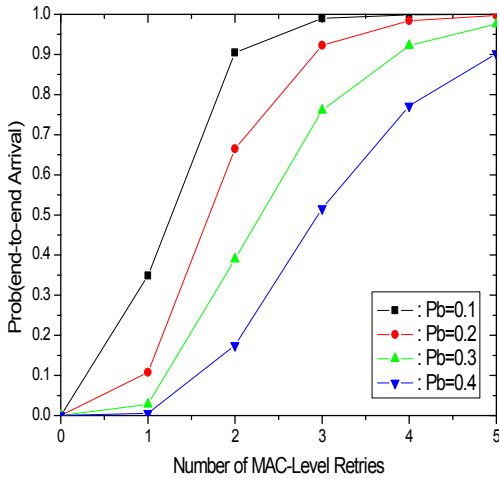


그림 8. MAC 레벨 재시도에 따른 end-to-end 도착 확률 (10개의 홵)

Fig. 8. Probability of end-to-end arrival according to MAC-Level Retry (10-Hop)

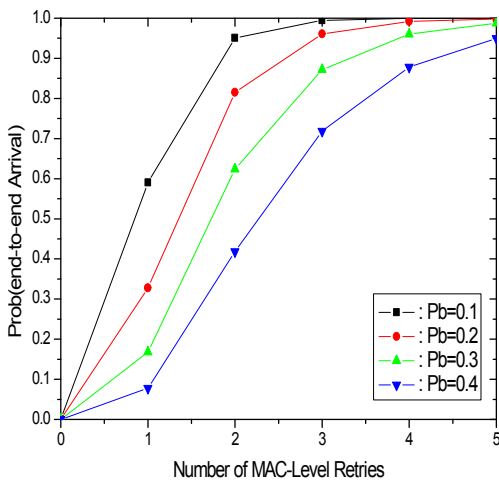


그림 9. MAC 레벨 재시도에 따른 end-to-end 도착 확률 (5개의 홵)

Fig. 9. Probability of end-to-end arrival according to MAC-Level Retry (5-Hop)

IV. 결 론

다양한 센서 장치를 무선으로 연결하여 네트워크를 형성하는 무선 센서 네트워크 기술은 사람을 중심으로 하던 정보 운용 형태를 확장하여 사람과 사물뿐

만 아니라 사물 간의 정보 공유를 언제 어디서든 가능하게 하는 유비쿼터스 환경으로 패러다임이 변화하고 있다. 현재의 MAC 표준기술은 WPAN 내에서의 제한된 기기 접속 수에 따른 확장성 문제, 네트워크 토폴로지 제한에 따른 망 안정성 문제, 특정 PAN 동작 모드에서 전력 소비 문제 등을 가지고 있으나 기능상의 한계를 극복하고 산업계의 기술적 요구사항과 보다 넓은 서비스 영역을 확보하여 WPAN 시장의 활성화에 기여하는 연구가 진행 중이다.

본 연구에서는 무선 센서 네트워크 환경에서 MAC Layer ARQ 프로토콜을 적용한 다수의 센서노드 사이의 종단간 네트워크 도착 확률을 송신기 MAC-Level 재전송 횟수, 변조방식, 채널 오류, 다중홵에 따라서 정량적으로 분석하였다. 분석결과, $P_b = 0.1$ 와 $P_b = 0.4$ 인 무선 환경에서 MAC Level 재전송 2회와 5회 이상부터 end-to-end 데이터 도착 확률이 95%이상인 신뢰성있는 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었으며 무선 센서 네트워크의 end-to-end 노드 규모가 작아짐에 따라서 데이터 전송의 신뢰성이 증가함을 알 수 있었다. 또한, BPSK 신호의 경우에는 MAC 레벨 재시도 2회와 MAC 레벨 재시도 1회에서는 각각 $E_b/N_o = -6.5[\text{dB}]$ 와 $E_b/N_o = 2[\text{dB}]$ 이상에서 수신 데이터의 성공적인 도착 확률이 90%이상인 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었으며, BFSK 신호의 경우에는 BPSK와는 달리 데이터의 수신 성능이 감소하여 MAC 레벨 재시도 2회와 MAC 레벨 재시도 1회에서는 각각 $E_b/N_o = -3.5[\text{dB}]$ 와 $E_b/N_o = 5[\text{dB}]$ 이상에서 수신 데이터의 도착 확률이 90%이상인 데이터 전송이 가능함을 알 수 있었다. 이러한 무선 MAC 관련 연구는 산업 응용 서비스들에 무선 센서 네트워크 기술을 적용하는 데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] 김지은 외 4인, “USN 센서노드 기술 동향,” *ETRI 전자통신동향분석* 제22권 제3호, pp.90~103, 2007년 6월
- [2] 이현정, 허재두, 박광로, “유비쿼터스 홈네트워킹 기술,” *ETRI*, 제21권 제3호, pp.54~65, 2004년 3월
- [3] 이근호, “u 센서 네트워크 기반 M2M 비즈니스 개요와 전망,” *한국전자통신학회지*, 제4권, 2004년 2월
- [4] I. F. Akyildiz, S. Weilian, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102~114, Aug 2002.
- [5] <http://www.ZigBee.org>.
- [6] Y. Sankarasubramaniam, I. F. Akyildiz, and S. W. McLaughlin, “Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks,” *Proceedings of 1st IEEE International Workshop on Sensor Network Protocols and Applications SNPA'03*, 2003.
- [7] R. Min and A. Chandrakasan, “Energy-centric enabling technologies for wireless sensor networks,” *IEEE Wireless Comm.*, vol. 9, no. 4, pp. 28-39, Aug. 2002.
- [8] S. Lin and D. J. C. Jr., *Error control coding: fundamentals and applications*, Prentice-Hall, 1983.
- [9] J. G. Proakis, *Digital Communication*, Fourth Edition, McGraw-Hill, 2001.

노 재 성 (盧在成)



1992년-1997년 : (주)한화정보통신
연구소(W-CDMA기지국개발)
2000년 : 한국항공대학교 정보통신
공학과 (공학박사)
2000~현재 : 서일대학 정보통신과
부교수

관심분야 : 무선 임베디드 시스템, 스마트폰 응용 콘텐츠,
USN/RFID 통신시스템

김 완 태 (金完泰)



2005년 : 한국항공대학교 대학원
정보통신공학과 졸업
2005년 1월~2007년 2월 : (주)모드멘
CDMA 단말기 개발.
2007년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교
대학원 정보통신공학과 박사과정

관심분야 : 휴대인터넷, 무선통신, 이동통신, WiBro,
WPAN