

IEEE 802.15.4 센서 노드에 적용한 메시지인메시지 기법을 통한 에너지 효율적 데이터 전송

강 영 명*

Energy-Efficient Data Transmissions by Employing MessageInMessage on the IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Nodes

Young-Myoung Kang*

요 약

IoT 기기들이 폭발적으로 증가함에 따라 무선랜, 블루투스, WPAN과 같은 무선 연결 기술의 성능 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 향상된 프리앰블 탐지기술인 Message In Message (MIM) 기능을 무선 센서 노드에 적용하여 에너지 효율적인 데이터 전송을 하는 방안을 제시하였다. MIM을 사용하는 센서 노드들은 동시전송 기회를 최대화하여 기존의 IEEE 802.15.4를 기반으로 동작하는 기존 무선 센서 노드들에 비해 전송 대기 시간으로 인해 낭비하는 에너지를 최소화한다. 상용 센서 노드의 설정값을 반영하여 성능을 시뮬레이션 한 결과 MIM 기법을 적용한 무선 센서들이 기존 IEEE 802.15.4 방식의 기존 센서 노드들에 비해 약 30% 수준의 에너지 절약 효과를 보여주었다.

Abstract

With the explosive spread of IoT mobile devices, a plethora of research efforts to improve the performance of wireless connectivity such as WLANs, Buletooth, and WPANs has been widely studied. In this paper, we introduce a method of enhancing the energy-efficient data transmissions in WSNs by employing an advanced preamble detection scheme named Message-In-Message (MIM) in wireless sensor nodes. Sensor devices equipped the MIM feature in the preamble of the frame may have more concurrent transmission opportunities than the legacy IEEE 802.15.4 based devices, resulting in minimizing the energy consumption by eliminating the unnecessary power drains due to the transmission delay. We perform the simulation applying the commercial sensor chipset setting values and the results shows that the energy efficiency of the MIM-aware sensor nodes is up to 30% higher than that of the legacy 802.15.4 devices.

Keywords

wireless sensor network, message-in-message, capture effect, 802.15.4, energy efficient

* 삼성전자 네트워크사업부 책임연구원
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8226-6440>

· Received: Oct. 11, 2020, Revised: Nov. 14, 2020, Accepted: Nov. 17, 2020
· Corresponding Author: Young-Myoung Kang
Staff Researcher, Network Business, Samsung Electronics, Korea,
Tel.: +82-70-7652-7855, Email: kang.youngmyoung@gmail.com

1. 서 론

IoT(Internet of Things)의 영향으로 무선 기기들이 폭발적으로 늘어나고 있는 가운데 무선망의 성능을 향상시키는 연구가 지속적으로 이어지고 있다. 예를 들어, IEEE 802.11 무선랜에서는 다양한 방법으로 무선망의 연결성과 함께 전송자원을 효율적으로 사용하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다 [1][2]. 하나의 AP(Access Point)를 중심으로 여러 개의 클라이언트가 association하여 동작하는 무선랜과 달리 수십에서 수백만에 이르는 대량의 센서 노드들로 구성되는 무선 센서 네트워크에서 각각의 센서 노드들을 연결하고 동시에 데이터를 전송하는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한, 배터리를 기반으로 동작하는 무선 센서들의 에너지 효율적 전송은 센서망의 수명을 향상시킬 수 있는 주요한 지표가 된다. 본 연구에서는 2.4GHz 대역에서 동작하는 무선 센서 네트워크의 전송 효율을 향상시켜 에너지 효율적인 데이터 전송이 가능하도록 하는 방안을 제안한다.

IEEE 802.15.4에 기반한 무선 MAC 프로토콜을 사용하는 센서들은 그림 1과 같이 인접 기기 간 동시 전송으로 인한 패킷 충돌을 방지하기 위해 무선 채널 감지(CCA, Clear Channel Assessment)를 사용하여 다른 노드가 전송 중인지를 확인한 다음 채널에 다른 전송이 없다고 판단할 때 자신의 전송을 시작한다. 이와 비슷한 예로, IEEE 802.11을 사용하는 무선랜의 대표적인 MAC 프로토콜인 DCF(Distributed Coordination Function) 역시 동일한 이유로 전송 간 간섭과 충돌로 인한 전송 실패를 방지하기 위해서 동시전송을 허용하지 않는다. 그러나 무선랜에서 동시 전송된 패킷들도 전송순서와 상대적인 신호세기에 따라 수신이 성공할 수 있다는 연구결과는 동시전송을 최대한 활용하여 무선랜의 시스템 처리량을 증대시킬 수 있다는 근거를 마련해 준다[3][4].

무선 랜카드는 자신이 목적지인 신호(Signal of interest)가 충분한 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)을 가지고 간섭신호(Interference signal)보다 먼저 도착하거나 혹은 간섭신호의 프리앰블(Preamble) 시간 내에 도착하면 물리계층의 캡처 효

과(Physical layer capture effect)를 통해 성공적인 전송이 가능하다[3]-[8]. 한편, 메시지인메시지(MIM, Message In Message)[9] 기능이 구현되어 있는 Qualcomm Atheros사의 칩셋[7]을 사용하는 무선 랜카드의 경우 진보된 프리앰블 탐지기술(Preamble detection)의 효과로 인해 의도한 신호가 충분히 큰 SINR값 (예, 10dB)을 가지는 경우 간섭 신호의 프리앰블 시간 이후에 도착해도 캡처가 될 수 있다 (이를 MIM Capture Effect라고 한다). 그림 2는 앞서 설명한 물리계층의 캡처와 MIM 캡처의 차이를 보여주고 있다. [4]를 통해 MIM 캡처 가능한 임계값을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 향상된 프리앰블 감지 기법인 MIM을 통해 동시전송이 가능하게 했던 IEEE 802.11 무선랜에서의 기존연구[6][8]를 IEEE 802.15.4 프로토콜을 사용하는 무선 센서 네트워크에 접목하여 에너지 효율적인 데이터 전송이 가능하도록 하는 것을 목표로 한다.

CC2531 USB Dongle

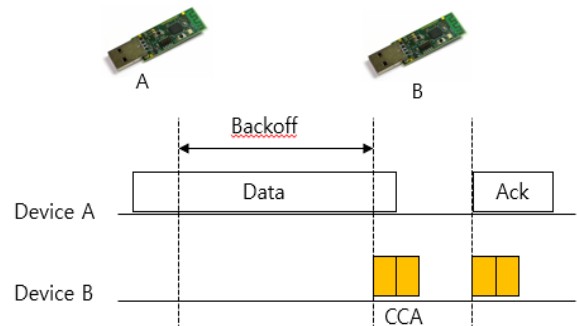
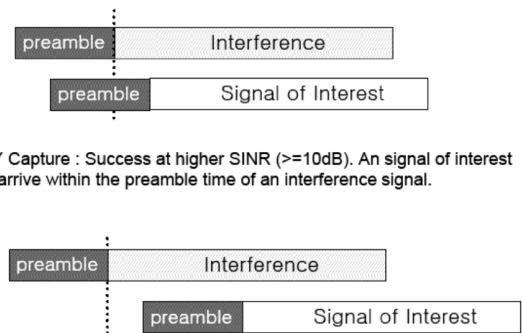


그림 1. IEEE 802.15.4 채널 감지 기능
Fig. 1. IEEE 802.15.4 CCA



(a) PHY Capture : Success at higher SINR ($\geq 10\text{dB}$). An signal of interest should arrive within the preamble time of an interference signal.

(b) MIM : Success at higher SINR ($\geq 10\text{dB}$). An signal of interest can be decoded even if it arrives after the preamble time of an interference signal.

그림 2. 물리계층 캡처 및 MIM 캡처
Fig. 2. PHY capture vs. MIM capture

무선 센서망의 성능 향상을 위해 제안된 최신 연구에서도 동시전송 측면에서 MIM 적용에 대한 논의를 하고 있으나 에너지 효율 측면에서의 접근은 찾아보기 힘들다[10][11]. 따라서, 본 연구에서 MIM을 IEEE 802.15.4에 적용할 경우 얻을 수 있는 에너지 소모 측면의 이득을 확인하기 위해 시스템 모델을 통한 분석을 진행하고 시뮬레이션을 통해 성능 평가를 진행하는 것에 의미가 있다고 할 수 있다.

Python으로 구현한 모의실험 결과 MIM-aware 프리앰블을 구현한 무선 센서 노드들이 CCA 기간 동안 동시전송이 가능하여 기존 IEEE 802.15.4의 전송 방식에 비해 약 30% 수준의 에너지 절감 효과를 보여줌을 확인하였다. 한편으로 데이터 전송 지연 시간도 평균적으로 폴링(Polling) 시간의 절반 수준으로 줄어드는 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 802.11 무선랜의 MIM 프리앰블 기법을 무선 센서 네트워크에 적용하는 방법을 논한다. 3장에서는 에너지 효율에 대한 시스템 모델을 제시하고, 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능을 평가한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. MIM 프리앰블 탐지 기법

2.1 무선랜의 향상된 프리앰블 탐지 기법

MIM 기능을 이해하기 위해서는 IEEE 802.11 프레임 수신 절차에 대한 이해가 필요하다. 그림 3을 통해서 802.11 MAC 프레임 수신 절차를 설명한다. 수신자 입장에서는 프레임을 정상적으로 수신하기 위해서 라디오를 통해 들어오는 프리앰블을 탐지해야 한다. 프리앰블은 프레임의 시작을 알려주고 시간 동기화를 위해서 사용된다. 다음으로는 물리 계층(Physical layer) 헤더 정보를 읽어서 비트레이트(bit rate) 및 프레임의 길이(Frame length) 등에 대한 정보를 얻고, 패리티비트(Parity bit)에 문제가 없다면 데이터를 수신하기 위해서 라디오의 상태를 수신 모드(Receiving state)로 고정시킨다. 이 상태가 되면 기존의 랜카드는 더 이상의 프리앰블을 탐지하지 않는다. 이를 프리앰블 Lock On 상태라고 말한다.

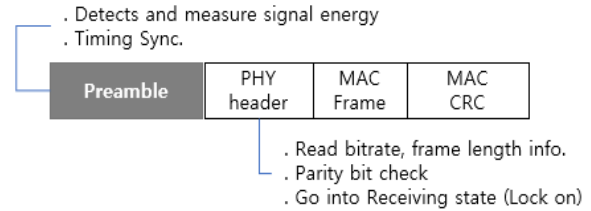


그림 3. IEEE 802.11 무선랜 프레임 구조
Fig. 3. IEEE 802.11 WLAN frame structure

따라서 하나의 프레임을 수신하기 시작하면 새로운 강한 프레임이 오더라도 새로운 프레임을 무시하게 된다. 반면 MIM 기능을 구현한 랜카드는 라디오 상태가 수신 상태가 되어도 계속해서 새로운 프리앰블을 탐지할 수 있다. 그러므로 자신이 목적지가 아닌 프레임을 수신하는 도중에 새로운 강한 프레임을 탐지할 경우 수신중인 프레임을 버리고 새로운 프레임에 재동기화하여 수신을 시작할 수 있다.

2.2 IEEE 802.15.4 프레임 구조 및 MIM 적용

그림 4는 무선 센서 노드에 기본으로 사용되는 802.15.4 프레임 구조를 보여주고 있다. 센서 노드들도 신호의 시작을 탐지하고 동기화를 하기 위해서 802.11 방식과 동일하게 프리앰블을 사용한다. 따라서 802.15.4 프레임의 프리앰블을 그림 5와 같이 변경하여 CCA를 통한 채널의 상태를 기준으로 판단하여 동시전송이 가능하게 할 수 있다. 즉, MIM의 동시전송 기능을 적용할 수 있다. 프리앰블은 특정 비트 스트림의 순서(Bit stream sequence)로 구성되어 특정 패턴이 감지되면 상관관계 계수값(Correlation coefficient)의 순간적인 변화를 통해 탐지할 수 있는데 한번 프리앰블을 탐지하여도 지속적으로 추가 프리앰블 탐지를 할 수 있도록 프리앰블 구속(Engagement)을 풀어주는 방법으로 구현할 수 있을 것이다. 동시전송에 대한 판단기준은 캡처 효과에 대한 민감도를 나타내는 캡처 임계값과 전송 순서에 대한 타이밍을 결정하는 캡처 윈도우 값에 영향을 받게 된다. MIM을 구현하기 위해서는 캡처 임계값을 설정하고 판단하는 알고리즘이 필요하며 캡처 타이밍을 구분하기 위한 모듈 구현이 필요하다. 이 값들은 하드웨어 변경 없이 MAC 계층 펌웨어 수정만으로 처리될 수 있다.

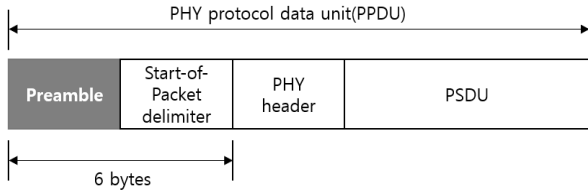


그림 4. IEEE 802.15.4 채널 감지 기능
Fig. 4. IEEE 802.15.4 CCA

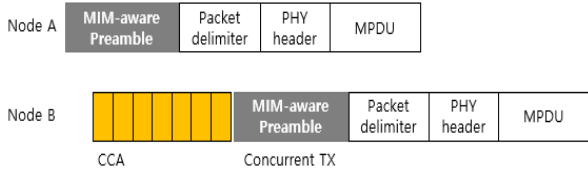


그림 5. IEEE 802.15.4 채널 감지 기능
Fig. 5. IEEE 802.15.4 CCA

본 논문에서는 Python으로 MIM을 구현하여 연속적인 프리앰블 탐지를 가능하게 하였다. [11]을 참고하여 2.4GHz에서 O-QPSK를 기준으로 2~3dB 사이에서 동작하도록 캡처 임계값을 설정하였다. 무선 랜의 경우와 마찬가지로 무선 센서망에서도 캡처 임계값은 시험 환경 영향을 고려하여 튜닝이 필요하다. 한편 전송 순서에 대한 파라미터인 캡처 타임 윈도우는 128us을 적용하였다. 이를 기반으로 수신 중인 패킷이 있더라도 더 좋은 신호의 패킷을 감지하면 기존에 받던 패킷을 버리고 새로운 패킷에 다시 동기화할 수 있도록 패킷 수신 알고리즘을 구현하였다. 다음 장에서는 이 기법으로 얻을 수 있는 에너지 효율측면에서의 이득을 시스템 모델을 통해 분석한다.

III. 브로드캐스트 시스템 모델링

본 장에서는 [12]을 기반으로 에너지 모델을 제시하고 분석한다. N개의 노드로 구성된 무선 센서 네트워크를 가정한다. 각각의 노드는 λ 의 속도로 전송할 패킷을 생성한다. 라디오 상태는 5가지로 정의하고 {transmit, receive, listen, poll, sleep}, 각각의 상태에서 단위 시간당 소모한 에너지는 각각 P_{tx} , P_{rx} , P_{listen} , P_{poll} , P_{sleep} 로 표기한다. 단 센서가 sleep 상태에서는 에너지를 극단적으로 적게 소모하므로 분석에서 제외한다. 각 라디오 상태에 머무른

시간만큼 에너지가 소모되므로 전송 상태(Transmit), 수신 상태(Receive), 그리고 폴링 상태에 머무르는 시간을 각각 T_{tx} , T_{rx} , T_{poll} 로 표기한다. 이 값들은 모두 1초에 대한 시간으로 정규화(Normalized)한다. 분석에 사용한 인자값들은 센서 노드 CC2420[13]의 그림 6의 Data sheet를 참고한다.

symbol	Meaning	CC2420
P_{tx}	Power in transmitting	52.2mW
P_{rx}	Power in receiving	56.4mW
P_{sleep}	Power in sleeping	3 μ W
P_{poll}	Power in channel polling	12.3mW
T_p	Channel polling period	Varying
T_{data}	The time of sending one data packet	varying
T_{apl}	Avg. time to poll channel	2.5ms
T_B	Time to send/receive a byte	32 μ s
T_{xSeg}	The time of sending a short preamble	varying
$T_{xListen}$	The time of receiving a ACK packet	varying
L_{data}	Data packet length	50byte
L_{xSeg}	Short preamble length	20byte

그림 6. CC2420 data sheet
Fig. 6. CC2420 data sheet

하나의 센서 노드가 소모하는 평균적인 에너지는 아래의 식으로 표현된다.

$$E = P_{tx} T_{tx} + P_{rx} T_{rx} + P_{poll} T_{poll} \quad (1)$$

다음으로 수신노드들의 폴링 주기를 T_p 라고 하면 초당 채널 폴링 시간은 아래와 같이 표현된다.

$$T_{poll} = \frac{T_{apl}}{T_p} \quad (2)$$

센서 노드가 송신 상태에 있는 시간은 프리앰블 전송시간과 데이터 전송 시간의 합이므로 아래와 같이 구해진다.

$$T_{tx} = \lambda (T_p + L_{data}) \quad (3)$$

각 노드의 폴링 주기가 단일 분포(Uniform distribution)를 따른다고 하면 수신자는 평균적으로 $T_p/2$ 시간 동안 프리앰블을 받게 된다. 따라서 receive 상태에 머무르는 시간은 다음과 같다.

$$T_{rx} = \lambda N(T_p + T_{data}) \quad (4)$$

식 (2)-(4)를 식 (1)에 대입하면 에너지 소모 총량이 구해진다.

IV. 성능 평가

이 시뮬레이션에서는 $N = 1000$ 으로 고정하였고 패킷 사이즈에 따른 성능 변화를 보기 위해 50 또는 150 bytes 크기의 패킷을 전송하도록 설정하였다. 또한 생성주기를 변화시키면서 802.15.4 방식과 MIM 기능을 탑재한 기기의 에너지 소모량을 비교하였다. 공정한 비교를 위해 전체 전송한 패킷 개수 대비 소모한 에너지를 비교하였다. 왜냐하면 큐(Queue)에 항상 패킷이 있다고 가정하면 MIM 기능으로 인해 동시전송을 통한 더 많은 패킷 전송이 일어나고 에너지 소모가 늘어난 것으로 해석할 수 있기 때문이다. 이 시험을 위해 Python을 이용해 MIM 프리앰블 탐지기법을 구현하고 설정 값은 CC2420 [13]을 사용하였다.

시험 결과는 그림 7을 통해 확인할 수 있다. 패킷 생성 주기가 짧아지면 데이터를 더 많이 보내기 위해 에너지 소모량은 증가한다. 그러나 다른 전송이 있을 경우 다음 전송 주기까지 기다리는 802.15.4 방식에 비해 MIM 적용 센서 노드들은 다른 노드의 프리앰블 시간만큼만 기다리고 바로 전송하기 때문에 전송 대기로 인한 에너지 소모를 줄일 수 있다.

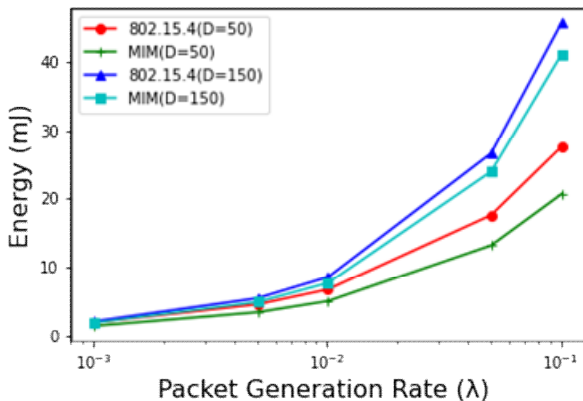


그림 7. 에너지 소모 비교

Fig. 7. Energy consumption comparison

하지만 동시전송은 수신 감도가 충분히 좋다고 판단할 때만 가능하기 때문에 항상 동시전송으로 인한 이득을 얻을 수는 없었다. 이를 감안하여도 전체적으로 30% 정도의 에너지 소모가 줄어드는 것을 관찰할 수 있다.

다음으로 전송하는 데이터 크기가 50에서 150bytes로 늘린 경우에 대해서 설명한다. 데이터 사이즈가 150bytes로 커짐으로 인해 전송 파워를 더 많이 사용해야 하기 때문에 50bytes를 전송할 경우보다 전체적인 에너지 소모량은 더 많아졌음을 알 수 있다. 그러나 150bytes 사이즈를 보낼 때에는 50bytes를 보낼 때에 비해 수신 실패 비율이 조금 더 커져서 802.15.4 방식과 MIM 사이의 차이가 약 10% 정도 수준으로 줄어드는 것을 관찰할 수 있다. 실제 무선 센서 네트워크에서 전송하는 데이터 사이즈는 50 bytes 수준으로 예상되는 것을 감안하면 MIM을 적용할 경우 전체적으로 약 30% 수준의 에너지 소모를 줄일 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 프레임에 진보된 프리앰블 감지 기술인 MIM을 적용하는 방법에 대해서 논하였다. MIM을 적용하면 동시전송 기회가 더 늘어나게 되고 CCA를 통해 Back-off 하는 동안의 에너지 소모를 막을 수 있다는 장점이 있다. Python으로 시험환경을 구현하고 상용 CC2420 칩셋의 설정값을 반영하여 시뮬레이션을 한 결과 MIM 기능을 적용한 센서 노드들의 에너지 소모량이 기존 802.15.4 방식에 비해서 30% 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

References

- [1] H. Lee, J. Kim, C. Joo, and S. Bahk, "BeaconRider: Opportunistic Sharing of Beacon Air-Time in Densely Deployed WLANs", IEEE 27th International Conference on Network Protocols (ICNP), Chicago, IL, USA, pp. 1-11. Oct. 2019.

- [2] J. Choi, "Detection of Misconfigured Wi-Fi Tethering in Managed Networks", *Applied Sciences*, Vol 10, No. 2, pp. 7203, Feb. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10207203>,
- [3] A. Kochut, A. Vasan, A.U. Shankar, and A. Agrawala, "Sniffing out the correct physical layer capture model in 802.11b", in *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Network Protocols*, Berlin, Germany, pp. 252-261, Oct 2004.
- [4] J. Lee, W. Kim, S. J. Lee, and D. Jo., "An experimental study on the capture effect in 802.11a networks", *ACM WinTECH2007*, NY, USA, pp. 19-26, Sept. 2007.
- [5] N. Santhapuri, R. R. Choudhury, J. Manweiler, S. Nelakuduti, S. Sen, and K. Munagala, "Message in message (mim): A case for reordering transmissions in wireless networks", in *HotNets VII*. Jan 2008.
- [6] J. Manweiler, N. Santhapuri, S. Sen, R. R. Choudhury, S. Nelakuditi, and K. Munagala. "Order Matters: Transmission Reordering in Wireless Networks", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 20, pp. 353-366, Sep. 2011.
- [7] Qualcomm Atheros communication. <https://www.qualcomm.com/> [accessed: Oct. 10, 2020]
- [8] Y. Kang, J. Yoo, J. Lee, and C. Kim, "A distributed message in message aware concurrent transmission protocol in IEEE 802.11 WLANs", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2, Article number: 325, Oct. 2012.
- [9] Jan Boer et, al., "Wireless LAN with Enhanced Capture Provision", *US Patent 5987033*, Nov. 16, 1999.
- [10] X. Ma, P. Zhang, O. Theel, and J. Wei, "Gathering data with packet-in-packet in wireless sensor networks", *Journal of Computer Networks*, Vol. 170, 107124, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107124>
- [11] M. Zimmerling, L. Mottola, and S. Santini, "Synchronous Transmissions in Low-Power Wireless: A Survey of Communication Protocols and Network Services", *arXiv:2001.08557*, Jan. 2010,
- [12] Y. Kang, S. Lim, J. Yoo, and C. Kim, "Design, Analysis and Implementation of Energy-efficient Broadcast MAC Protocols for Wireless Sensor Networks", *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, Vol. 5, No. 6, pp. 1113-1132, Jun. 2011.
- [13] CC2420 Spec. <https://www.ti.com/product/CC2420> [accessed: Oct. 10, 2020]

저자소개

강 영 명 (Young-Myoung Kang)



2000년 8월 : 경상대학교
컴퓨터과학과 (이학사)
2003년 2월 : 서울대학교
전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2003년 1월 : LG전자 (연구원)
2013년 2월 : 서울대학교
전기컴퓨터공학과 (공학박사)

2012년 9월 ~ 현재 : 삼성전자 (연구원)

관심분야 : 컴퓨터공학, 데이터 분석, 무선랜, 무선통신