
무선 센서 네트워크에서 성능향상을 위한 수정된 PTW Wakeup 구조

김성철*

A Modified PTW Wakeup Scheme for Performance Enhancement in Wireless Sensor Network

Seong Cheol Kim*

이 논문은 2005년도 상명대학교 교원학술연구비 지원에 의해 연구되었음

요 약

Pipelined Tone Wakeup(PTW) 구조[1]는 패킷 전송에 있어서 비동기 wakeup 파이프라인을 제공을 통하여 wakeup 절차를 중복함으로써 센서 네트워크에서 에너지 절약과 종단간의 지연을 지원하기 위해 제안되었다. 그러나 PTW 구조는 2 개의 radios를 사용하고 에러가 없는 환경을 가정한다. 본 논문에서는 전송 노드와 수신 노드 사이에 주고 받는 패킷의 적은 수정을 통하여 지연 및 에너지 절약을 얻을 수 있는 수정된 PTW 구조를 제안한다.

ABSTRACT

A Pipelined Tone Wakeup(PTW) scheme[1] was proposed to support energy saving and end-to-end delay for sensor networks by providing an asynchronous wakeup pipeline to overlap the wakeup procedures with the packet transmission. But the scheme uses two radios and assumes error-free environments. In this paper, we propose a modified PTW scheme for wireless sensor networks. The proposed scheme is based on the PTW. The difference is that next hop information will be included in the ack packet from receiver node to sender node, So all the other neighbor nodes can stay in sleep mode long enough to save energy. Also we get enhanced delay performance.

키워드

Wireless Sensor Networks(WSN), MAC protocol, Energy Saving

I. 서 론

무선 센서 네트워크는 의료 시스템, 환경 감시, 군사용 등 다양한 분야에 걸친 응용을 가지는 새로운 영역의 연구 분야이다. 이러한 무선 센서 네트워크는 대개 커다란 multi-hop 무선 네트워크로 이루어진다. 일반적으로 무선 네트워크의 노드들은 분산된 센싱 기능을 수행하기 위하

여 무선 매체에 의해 연결된다. WSN에서는 데이터의 전송이 센서 노드들로부터 데이터를 모으는 액세스 포인트(access point: AP)로 흐르지만, 애드 혹 네트워크에서는 임의의 점대점으로 흐른다. WSN의 또 다른 특성으로는 노드들이 제한된 전력 지원을 받는다는 것이다. 즉, 한번 네트워크가 구성되면, 이들 구성 노드들에게 지속적인 전력 공급이 이루어지지 않고 배터리에 의해 한시적으로 제

공된다. 따라서 WSN의 MAC 프로토콜을 설계하는데 있어서 반드시 전력 절약 문제를 고려해야 한다. 그 동안 WSN의 많은 MAC 프로토콜들이 연구되어졌는데, 이들은 서로 다른 에너지 절약 메커니즘을 가진다[1,2,3,4,5,6]. 그 차이점 중 첫 번째가 사용가능한 대역폭을 나누기 위한 다중의 채널을 위하여 radio 신호의 사용 방법이다. 즉, 일부 구조에서는 하나의 radio를 사용하지만, 일부 구조들은 두 개의 radios를 사용한다. 두 개의 radios를 사용하는 구조에 있어서 하나의 radio는 데이터 전송에 사용하고, 또 다른 radio는 제어를 위해 사용되어진다. 매우 낮은 전력의 이 제어용 radio는 데이터를 수신하는 노드들을 깨우고 데이터 패킷을 수신하기 위한 주 radio를 깨우는 신호용으로 사용되어지며 고정된 톤(tone)을 보내는 가능만을 수행한다. 두 번째 설계의 차이점은 네트워크에 있는 노드들이 MAC 계층의 기능을 수행하기 위하여 어떻게 서로 협력하여 동작하느냐 이다. 이 관점에서 현재까지 제안된 메커니즘은 크게 두 가지로 분류되는데, 경쟁 기반 프로토콜과 프레임 기반의 TDMA(Time Division Multiple Access) 프로토콜이다[7,8,9,10,11]. 경쟁 기반 프로토콜의 장점으로는 구현이 간단하고, 에드 혹 특성과 이동하는 노드와 트래픽 변화에 유연하다는 특성을 가진다. 이에 반하여 프레임 기반의 TDMA 프로토콜은 충돌이나 도청 혹은 idle-listening 오버헤드가 적고 에너지 효율적이라는 장점을 가진다. 세 번째 차이점으로는 패킷을 수신하는 수신자가 어떻게 수신할 준비를 하는 가이다. 이에 대한 기존의 연구는 크게 스케줄 기반과 wake-up 기반, 그리고 listening 기반으로 분류될 수 있다. 이 중에서 wake-up 기반 구조는 패킷 전송이 자주 일어나지 않는 WSN에서 에너지 절약에 있어서 커다란 장점을 가진다. 그러나 지금까지 제안되어진 wakeup 구조는 에너지 절약과 지연이라는 커다란 한계점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 에너지 절약과 중단간의 패킷 지연과의 적절한 균등 효과를 가지는 wakeup 구조를 제안한다. 논문에서 제안하는 구조는 [1]에서 제안된 아이디어에 기반 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 WSN에서의 에너지 절약과 관련된 연구에 대해 설명한다. 그리고 [1]에서 제안한 PTW 구조와 수정된 PTW 구조에 대한 설명이 3장에서 이루어지고, 4장에서는 모의실험 환경 및 결과에 대한 분석과 5장에서는 결론이 이루어진다.

II. 관련 연구

WSN의 MAC 프로토콜 설계에서 중요한 목적 중의 하나가 지연을 줄이고 데이터 전송 효율을 높이면서 에너지 소모를 줄이는 것이다. 현재까지 제안된 MAC 프로토콜은 크게 경쟁기반 프로토콜과 TDMA 프로토콜 두 가지로 구분되어진다. IEEE 802.11, PAMAS[9], S-MAC[7], 그리고 T-MAC[4]과 같은 프로토콜이 경쟁기반 프로토콜의 예이다. 이 중에 IEEE 802.11 MAC 프로토콜은 반송자 감지 다중 접근(carrier sensing multiple access: CSMA)과 충돌검출에 기반을 둔다. 어떤 노드가 패킷 전송을 원하면, 먼저 DIFS(Distributed Inter Frame Space)라 불리는 미리 정해진 기간 동안 매체가 idle인지 감지해야 한다. IEEE 802.11 MAC은 sleeping 노드를 위해 데이터를 버퍼링하거나 데이터 전송을 위하여 노드들을 동기화하는 등의 전력 관리를 지원한다. IEEE 802.11 규격서에 의하면 노드는 active 모드와 power-save 모드 중에 하나의 모드에 있다. active 모드에서 노드는 깨어있으면서 언제라도 패킷을 수신할 수 있는 상태에 있다. 그러나 전력-절약 모드에서는 입력되는 패킷을 수신하기 위해 주기적으로 깨어있다.

S-MAC은 하나의 radio를 가지는 에너지 절약 메커니즘이다. S-MAC에서는 in-channel 시그널링과 RTS(Request To Send), CTS(Close To Send) 등을 사용함으로 도청을 막는다. 뿐만 아니라 S-MAC은 모든 노드들로 하여금 공통 프레임 구조를 동기화하기 위하여 가상의 clustering을 제안한다. 이것을 통하여 모든 노드들이 프레임의 시작에서 정기적으로 SYNC(synchronization) 패킷들을 브로드캐스트 한다. 새로운 노드들은 SYNC 패킷을 사용하여 에드 혹 네트워크에 합류할 수 있다. S-MAC에서 이웃 노드들이 전송할 때에 다른 노드들은 sleep 모드로 들어가고, 이 기간에 노드들은 자신의 radio를 끈다. 그러나 S-MAC에서 노드들은 네트워크의 트래픽과 무관하게 고정된 길이의 sleep 기간을 사용한다. sleeping 기간 동안에 전송되어진 패킷들은 버퍼에 저장된다. 모든 패킷들이 active 기간 동안에 전송되어지기 때문에, idle listening 상에서의 에너지 소모가 감소되어질 수 있다.

T-MAC[4]은 S-MAC에 기반을 둔다. 즉, 노드들은 active와 sleep 기간을 가진다. 그러나 이 active와 sleep 기간은 트래픽에 따라 조절되어질 수 있다. 만약 어느 노드가 active 기간 동안에 자신의 이웃으로부터 어떠한 패킷도 수신할 수 없다면 그 노드는 즉각 sleep 모드로 들어간

다. TA라고 불리는 이 시간이 임계값이 된다. 노드가 즉각적으로 sleep 모드로 들어갈 수 있기 때문에 sleep 시간이 증가한다. 따라서 T-MAC 구조가 S-MAC 구조에 비하여 더 많은 에너지를 절약할 수 있다. 그러나 T-MAC에서는 노드가 언제 sleep 모드로부터 깨어나는지에 대해 고려하지 않고, 다만 sleep 모드로 언제 들어가는가에 대해서만 고려한다.

III. PTW 구조

3.1. Pipelined Tone Wakeup Scheme (PTW)

PTW 구조의 목적은 에너지 절약과 종단간의 지연에 대한 균형을 이루는 것이다. 이 구조는 정규 데이터 채널을 가지는 하나의 wakeup tone을 사용한다. 각 센서 노드의 wakeup radio는 주기적으로 wakeup과 sleep을 반복한다. wakeup tone이 수신자의 ID를 포함하지 않을 때, 그 센서 노드의 전송 범위 안에 있는 어느 노드라도 깨어야 한다. 이 wakeup 모듈은 MAC 계층 바로 위에 위치하며, 그 역할은 스케줄을 형성하여 전송 노드와 수신자 사이에 패킷 전송을 가능케 하는 것이다. wakeup 지연이란 패킷이 wakeup 모듈에 도착하여서 받은 패킷을 노드가 MAC 계층으로 보낼 때까지 걸린 시간이라고 정의될 수 있다. PTW 구조의 wakeup 과정이 아래의 그림 1에 보여준다.

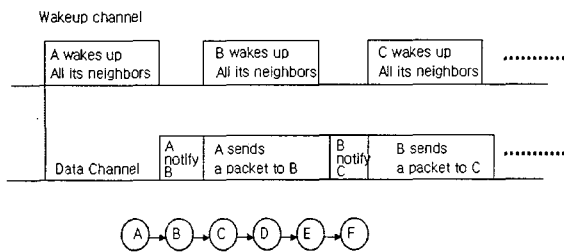


그림 1. Pipelined Tone Wakeup(PTW) 프로토콜
Fig. 1. Pipelined Tone Wakeup(PTW) Protocol

만약 어떤 패킷이 노드 A로부터 노드 B, C, D, E를 거쳐서 목적지 F까지 전달된다고 가정하자. 이 때 노드 A는 이웃 노드들을 깨우기 위하여 wakeup 채널을 통해 신호 (tone)를 보낸다. A의 모든 이웃 노드들은 깨어 있어서 데이터 채널로부터 패킷을 수신할 준비가 되어 있어야 한다. 그 후에 노드 A는 다음에 전송할 노드가 B라는 것을

알리기 위하여 데이터 채널을 통하여 알림 패킷 (notification packet)을 보낸다. B를 제외한 모든 다른 노드들은 sleep 모드로 가서 radio를 끄게 된다. PTW 구조에서 알림 패킷은 두 가지 역할을 담당하는데 첫 번째 역할은 노드 B가 데이터 채널을 통하여 노드 A에게 확인 응답을 하며 자신의 모든 노드들을 깨우는 것이다. 두 번째 목적은 B를 제외한 A의 모든 이웃들이 즉각적으로 자신들의 데이터 radio를 끄게 함으로써 불필요한 wakeup으로 인한 에너지 소모를 줄이는 것이다.

3.2. 수정된 PTW 구조

위에서 설명했듯이 데이터 전송이 데이터 채널을 통하여 이루어지는 동안 wakeup 신호가 다른 노드들을 깨우기 위하여 wakeup 채널을 통하여 전파된다. 따라서 데이터 전송 시간이 wakeup 시간을 절약하기 위하여 오버랩 되어 진다. 그러나 PTW 구조를 통하여 에너지를 절약하면서 얼마나 지연 성능 향상이 이루어지는 지는 확신할 수 없다. 또한 알림 패킷과 ack 패킷이 모두 데이터 채널을 통하여 전송되어지고, 그림 1에서 볼 수 있듯이 수신자 B가 A로부터 성공적으로 패킷을 수신하였을 경우 A에게 확인 응답을 보내야 하기 때문에 얼마나 많은 에너지가 절약되며, 얼마나 지연에서의 개선이 이루어지는지 쉽게 가늠할 수 없다. 더욱이 wakeup을 위해 사용되는 에너지는 데이터 채널에서 데이터 전송에 필요한 에너지보다 훨씬 작다. 이러한 문제점을 좀 더 확실히 해결하고자 하는 것이 본 논문에서 고려하는 주요 내용이다.

노드 B가 성공적인 데이터 수신 후에 송신자 A에게 ack 패킷을 전송하는데, 이 ack 패킷은 다음과 같은 의미를 가질 수 있다. 첫 번째로 이 ack 패킷은 노드 A에게 수신확인 응답의 의미를 가진다. 둘째로 노드 B의 이웃인 노드 C로 하여금 노드 A로부터 노드 B까지의 패킷 전송이 끝났음을 알게 한다. 즉, B가 별도의 노드 C로의 알림 패킷을 전달할 필요가 없다. 노드 B는 다음에 패킷을 전달할 노드가 노드 C임을 알고 있는데, 이것은 WSN에서 데이터의 전송은 주로 한 방향으로 이루어지기 때문이다. 그리고 노드 B의 모든 다른 이웃 노드들은 노드 B가 노드 A로 보내는 ack 패킷을 듣게 된다. 만약 들을 수 없는 노드가 있다면 그 노드는 B의 이웃 노드라고 말할 수 없다. 따라서 노드 B는 노드 A로부터 수신된 패킷에 대한 ack를 보내는 동시에 노드 C에게 다음 패킷 수신자임을 알릴 수 있다. 따라서 소스 노드 A로부터 전송된 패킷은 이와 같

은 절차에 따라 목적지 노드까지 전송되어질 수 있다. 이러한 과정을 통하여 다중 홉 네트워크에서 에너지를 절약할 수 있다. 본 논문에서 제안된 구조의 동작을 요약하면 다음과 같다.

1) 모든 노드들은 새로운 프레임의 시작에서 wakeup 상태에 있어야 한다.

2) 패킷을 전송하려는 송신 노드는 경로 상의 다음 노드에게 알림 패킷을 전송한다. 이 알림 패킷은 자신의 패킷 전송에 필요한 시간을 NAV에 포함하므로 다른 모든 노드들에게 전송 시간을 알린다. 이 시간 동안 다른 노드들은 전송 시도를 하지 않게 된다.

3) 알림 패킷을 수신한 노드는 ack 패킷을 소스 노드에게 전달함으로써 자신의 모든 이웃 노드들에게 다음 패킷 전송시간과 다음 노드를 알리게 된다. 이를 위해 기존의 ack 패킷의 헤더에 약간의 수정이 필요하다. 즉, 앞의 그림 1의 경우와 같이 다음 노드인 C에 대한 필드를 가진다.

4) C를 제외한 B의 모든 다른 노드들은 다음 번까지 자신이 패킷 전송에 포함되지 않는 것을 알기 때문에 오랫동안 자신의 radio를 off 함으로써 더 많은 에너지를 절약할 수 있다. 또한 다른 모든 이웃 노드들은 패킷 전송 시간을 알 수 있기 때문에 sleep 모드로부터 active 모드로 깨어날 수 있다. 또한 불필요하게 다음 노드에 대한 알림 패킷을 전달하지 않아도 앞의 ack 패킷을 사용할 수 있음으로 인하여 지연을 줄일 수 있다.

5) 이러한 과정이 최종 목적지 노드까지 전달될 때까지 노드와 노드사이에 반복되어진다.

이처럼 본 논문에서 제안된 구조의 장점은 다음과 같다. 노드 A가 노드 B로 패킷을 전달하는 동안에 다른 노드들은 언제 패킷 전송이 끝나며, 또한 다음 노드가 어떤 것인지 알고 충분한 시간 동안 sleep 모드에 머물 수 있기 때문에 많은 에너지를 절약할 수 있다. 뿐만 아니라 수신 노드로부터 송신 노드로 보내는 ack를 사용하여 다음 노드를 알릴 수 있기 때문에 패킷 전송 지연 효과도 얻을 수 있다. 이처럼 에너지 절약은 [1]에서 표현된 수식으로 다음과 같이 설명되어진다.

PTW 구조에서 노드 A는 소스 노드로부터의 wakeup tone에 의해 깨어서 T 알림 패킷 수신 때까지 active 상태로 기다린 후에 자신이 다음 노드가 아니라는 것을 확인한 후에 sleep 모드로 들어간다. sleep 모드로 들어간 후에

주기 T 이후에 다음 노드로부터 wakeup tone에 의해 다시 깨어나는 과정을 반복한다. 따라서 노드 A에서 소모되는 에너지는 다음과 같이 표현되어진다[1].

$$E_A = \frac{T_{tone}}{T} \times P + P \times T_{active}$$

여기서 T_{tone}은 전체 주기 T에서 sleep 시간을 뺀 기간이고, P는 active 기간 동안 전력 소모를 나타낸다. 그러나 본 논문에서 제안된 구조에서는 이웃노드 A가 다음 노드의 ack 패킷으로부터 차기 next 노드를 알기 때문에 다음 wakeup 기간 동안에 wakeup할 필요가 없다. 즉, 실제 소모되는 에너지는 다음과 같이 표현되어진다.

$$E_A = \frac{T_{tone}}{T} \times P + P \times (T_{active} - \Delta)$$

여기서 Δ는 양의 작은 값을 가진다. 따라서 제안된 구조에서 더 많은 에너지 절약이 가능하다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서 제안된 구조의 성능을 평가하기 위하여 기존의 PTW 구조와 본 논문에서 제안된 구조와의 비교가 이루어진다. 어떤 노드가 전송하지 않을 때에 그 노드의 radio는 수신 모드에 있다고 가정한다. 이 모델에서 에너지 소모는 실제 노드가 사용하는 에너지의 양에 기반으로 한다. 본 모의실험에서는 [1]에서와 같이 노드가 sleep 모드에 있을 경우에는 0.016 mW, 신호를 전송하는 경우에 14.88 mW, 수신하는 경우에 12.5 mW, idle 인 경우에 12.36 mW의 에너지를 사용한다고 가정한다. 본 논문에서 사용하는 파라미터들의 값은 성능 비교 관점에서 [1]에서 사용한 값을 대부분 사용하였다. 뿐만 아니라 하나의 노드가 목적지 노드까지 한 방향으로 데이터 전송을 위하여 이웃 노드들을 갖도록 radio 전파 범위를 설정하였다. 또한 cluster 시나리오는 [1]에서 사용한 것을 그대로 사용하였다.

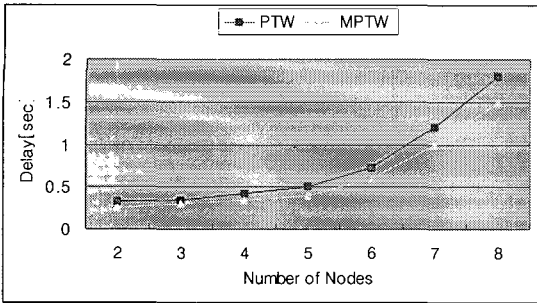


그림 2. 패킷 지연의 비교
Fig. 2. Comparison of packet delay

그림 2는 전송되어지는 패킷의 송신 노드와 수신 노드까지의 지연에 대한 비교를 보여 준다. 그림에서 볼 수 있듯이 전달되어지는 노드의 수가 증가할수록 지연이 늘어나는데, 제안된 구조가 더 나은 지연 성능을 보인다. 이것은 제안된 구조에서는 PTW에서와 같이 불필요한 패킷 전송 및 ack 단계를 피했기 때문이다. 또한 두 구조의 에너지 소모에 대한 비교가 그림 3에서 보여 준다. 제안된 구조에서는 바로 전 단계에서 수신자 노드를 제외한 다른 모든 이웃 노드들이 패킷이 전송되는 충분한 시간 동안 sleep 모드에 머물 수 있기 때문에 더 나은 에너지를 절약할 수 있음을 알 수 있다.

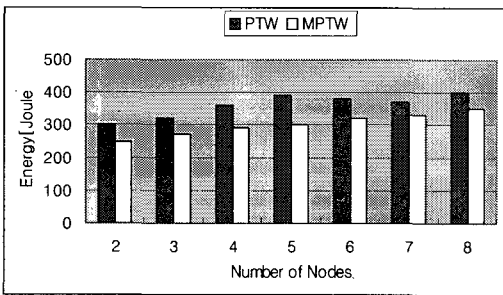


그림 3. 에너지 소비의 비교
Fig. 3. Comparison of Energy consumption

V. 결론

WSNs의 MAC 프로토콜 설계에 있어서 가장 주요한 고려사항은 전송 지연과 데이터의 손실을 줄이면서 동시에 각 센서 노드들의 에너지 소모를 줄이는 것이다. 이것은 다중-홉 무선 센서 네트워크에서 센서 노드들은 일반

적으로 배터리에 의해 전력을 공급 받기 때문이다.

본 논문에서는 기존의 PTW을 수정하여 더 나은 지연과 에너지 절약을 지원하는 새로운 구조를 제안하였다. 제안된 구조에서는 수신 노드가 송신 노드로 보내는 확인 응답 신호 ack 필드를 수정하여 다음 노드가 누구인지를 삽입하여 전송함으로써 다음 노드를 제외함 모든 이웃 노드들로 하여금 충분한 시간 동안 sleep 모드에 머물게 함으로써 에너지 소모를 줄이는 것이다. 뿐만 아니라 다음 노드를 알리는 과정을 단축함으로써 패킷 전송 지연을 줄일 수 있는 또 다른 장점도 가진다. 그러나 사용되어지는 파라미터들에 따라 성능에 많은 영향을 받기 때문에 네트워크 환경에 맞는 최적의 파라미터들을 설정하는 것에 대한 연구가 계속 이루어질 예정이다.

참고문헌

- [1] Xue Yang and Nitin H. Vaidya, "A Wakeup Scheme for Sensor Networks: Achieving Balance between Energy saving and End-to-end Delay," *10th IEEE RTAS 2004*, May 2004.
- [2] R. Kalidindi, L. Ray, R. Kannan, S. Lyengar, "Distributed Energy Aware MAC Layer Protocol For Wireless Sensor Networks," in *International Conference on Wireless Networks*, Las Vegas, Nevada, June 2003.
- [3] C. Schurgers, V. Tsiatsis, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, "Optimizing Sensor Networks in the Energy-Latency-Density Design Space," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol.1, no.1, January-March 2002.
- [4] Tijs van Dam and Koen Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks." *ACM SenSys*, Los Angeles, CA, November, 2003.
- [5] Matthew J. Miller and Nitin Vaidya, "Minimization Energy Consumption in Sensor Networks Using a Wakeup Radio," *WCNC 2004*, March 2004
- [6] Gang Lu, Bhaskar Krishnamachari, Cauligi S. Raghavendra, "An Adaptive Energy-Efficient and Low-Latency MAC for Data Gathering in Wireless Sensor Networks," *Proc. of the 18th International*

Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'04)

- [7] Wei Ye, John Heidemann, Deborah Estin, "An energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *In Proceedings of the IEEE Infocom*, vol. 3, pp. 1567-1576, June 2002.
- [8] Matthew J. Miller and Nitin H. Vaidya, "Power Save Mechanisms for Multi-Hop Wireless Networks," *BroadNets 2004*, October 2004.
- [9] S. Singh and C.S.Raghavendra, "PAMAS: Power Aware Multi-access Protocol With Signaling for Ad Hoc Networks," *ACM Computer Communication Review*, vol.28, no.3, pp.5-26, July 1998.
- [10] K. Arisha, M. Youssef, and M. Younis. "Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks." *In IEEE Workshop on IMPACCT 2002*, NY, NY, May 2002.
- [11] E.-S. Jung and N. Vaidya. "A power control MAC protocol for ad hoc networks." *MobiCom02*, pp. 3647, Atlanta, GA, Sep. 2002

저자소개



김 성 철(Seong-Cheol Kim)

1995. 6 Polytechnic University
(NY) 공학박사(Ph.D)

1994. 6 ~1997. 2

삼성전자(주) 수석연구원
1997.2 ~ 현재: 상명대학교 교수

※ 관심분야: WLAN, 센서네트워크, QoS, 멀티미디어 통신, 유비쿼터스