

논문 2012-49TC-5-10

센서 네트워크기반 협동 릴레이의 에너지 효율성 분석

(Performance Analysis of Energy-Efficiency of Non-Coherent Cooperative Relays for Wireless Sensor Networks)

권은미*, 김정호**

(EunMi Kwon and Jeong-Ho Kim)

요 약

이동성이 있는 센서 노드나 매우 제한된 에너지 량을 사용할 수 있는 배터리 용량을 가진 센서 노드는 채널의 변화나 미세한 이동이 있더라도 정확한 네트워크 구성을 할 수 있어 한다. 본 논문에서는 무선 센서 네트워크 내에서 다수의 협동 릴레이 노드가 존재할 때 선택기준에 따라 SNR(Signal to Noise Ratio)과 릴레이 노드의 신호 증폭률 그리고 단말과 단말 간 직접적으로 통신하는 경우 경로의 이득의 변화에 따른 무선 센서네트워크의 단위 비트를 전송하는데 소모되는 에너지 효율에 대하여 분석하고 이에 따른 영향을 정량적으로 평가하였다. 전송용량의 이득과 에너지 소모에 있어서 이득이 있는 협동 릴레이 노드를 선택하여 직접 경로와 릴레이 경로의 복수의 경로를 사용함으로써 위상 비동기 협동 릴레이를 적용하는 센서네트워크 환경 하에서 직접적으로 통신하는 경우대비 적은 에너지를 사용하여 무선 센서 네트워크 내에서 효율적으로 통신이 이루어 질 수 있음을 분석을 통해 확인하였다.

Abstract

The capacity criteria have been proposed in order to select a cooperative relay node in WSNs, under the environment where direct path has a poor link gain. This process may ensure the efficiency improvement of signal transfer between source and destination and reduction of energy consumption as well. Two criteria are incorporated to select a cooperative relay node. Firstly, calculate the energy gain ratio between the relay path and the direct path. These are defined as the ratio between the energy factors of $1/g$ and $1/B$. Each stands for an inverse of direct path gain and relay path gain. Secondly, investigate the effects of relay node's usage in WSNs through the simulation in terms of energy consumption. In conclusion, using a selected cooperative relay node based on the selected criteria is effective in terms of both energy efficiency and capacity of WSNs especially when direct path gain is relatively low.

Keywords : Energy Efficiency, Wireless Sensor Networks, Non-Coherent, Cooperative Relays

I. 서 론

스마트화에 따라 노드들의 성능이 크게 향상 되었으며 이동성이 큰 노드를 통한 정보 전달 트래픽이 증가함에 따라 시시각각 전달해야 하는 데이터의 량이 더욱

방대해 지고 있다. 따라서 정보 전송이 더욱 정확하고 효율적으로 이루어지는 것이 중요하게 됨에 따라 무선 센서 네트워크의 효율적인 구성이 더욱 중요시 되고 있다. 무선 센서 네트워크는 이러한 노드들의 이동성이 있는 환경에서 사용될 경우 비교적 QoS(quality of service)가 불확실한 통신 네트워크 환경에 대해 고려하며 단과 단 사이에 배치되는 릴레이 노드에 따라 신호 전송률이 크게 개선될 수 있으며 이를 통한 에너지의 효율적으로 사용이 필수적인 요소가 되고 있다. 본 논문의 시뮬레이션 환경인 Ad Hoc 네트워크는 현재 일시적인 Ad Hoc 네트워크의 특징은 크게 네 가지가 있다.

* 학생회원, ** 평생회원, 이화여자대학교 전자공학과 (Dept. of Electronics Engineering, Ewha Womans University)

※ 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2010-0008916)

접수일자: 2012년2월21일 수정완료일: 2012년5월18일

동적인 토폴로지, 제한된 대역폭과 다양한 데이터 전송 용량, 링크, 제한적 에너지를 사용한 운용, 그리고 물리적 보안 측면에서 제한 되어 있는 특징이 있다^[1].

실질적으로 무선 센서 네트워크를 구성 할 때 네트워크의 생명시간을 연장하기 위하여 네트워크를 구성할 때 관련하여 릴레이 노드가 물리적으로 사용될 수 없는 경우가 있다. 최근의 Yang과 Fang^[5]이 수행한 연구는 현실적으로 릴레이 노드를 사용할 수 없을 때 최소한의 릴레이 노드를 사용하여 우회 네트워크를 구성한다. 하지만 모든 경우를 고려할 수 없기 때문에 어느 정도 제한 된 환경에서 노드를 거쳐 우회로 가는 릴레이 노드를 최소한으로 사용하도록 하고 있다. 또한 Malaney와 Yuan^[2]이 수행한 연구에서는 직접 경로(Direct Path)의 용량이 충분한 경우 만약의 경우를 대비한 릴레이 노드의 후보를 선정해 두는데 이 때 후보 릴레이 노드를 선택하는 방법은 신호전송 오류로 인해 재전송이 자주 일어날 수 있다.

본 논문에서는 위의 여러 가지 방법들이 제시한 문제를 최소화하면서 에너지 소비에 있어서 이득을 얻을 수 있는 비동기 식 결합 방식(Non-Coherent Combining)의 통신환경을 고려하였다. 이는 DF (Decode-and-Forward) 방식^[3]과 달리 릴레이 노드에서 Decoding과 관련된 처리가 필요 없기 때문에 낮은 연산능력과 저 에너지 소모로 정보전달이 가능하기 때문이다^[4-7]. 본 논문의 II장에서는 릴레이 노드 선정방안을 기술하고 III장에서는 시뮬레이션을 통해 직접 경로 이득(Direct Path Gain)이 매우 낮은 경우 릴레이 노드를 사용함에 따라 직접 경로 이득이 높을 때 쓰이는 에너지와 같거나 그 보다 적은 에너지를 릴레이 노드에서 소모하며 개선된 통신 효율을 낼 수 있음을 보인다. IV장에서는 시뮬레이션에서 고려한 파라미터와 효과 및 결론에 대하여 기술하였다.

II. 협동 릴레이 시스템의 구성

무선 센서 네트워크 환경에서 릴레이 노드를 사용하여 신호전송하는 과정을 모델링하기 위해서 노드 i 에서 노드 $i+1$ 을 거쳐서 가는 직접 경로와 노드 i 에서 여러 후보 릴레이 노드 중 하나인 c 노드를 선택하는 방법에 대한 기준의 설정이 필요한데 먼저 신호를 데이터의 발생지(Source)에서 목적지(Destination)까지 전송할 때 직접 경로인 경우 노드 i 와 노드 $i+1$ 을 거쳐 가는 경

우로 이 때의 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 기존의 주요 수식 유도과정^[8]을 적용하여 직접 경로를 적용한 경우의 용량과 릴레이 경로를 결합했을 경우의 용량을 유도할 수 있다. 즉, 직접 경로의 용량은 다음과 같이 주어진다.

$$C_{i,i+1}^D = W \cdot \log_2(1 + g_{i,i+1} \cdot SNR) \quad (1)$$

릴레이 노드 c 를 사용하는 경우는 신호가 발생지에서 출발하여 노드 i 를 거쳐 릴레이 노드 c 를 거치고 노드 $i+1$ 을 지나 목적지로 전송되는 경우로 수신된 신호가 비 위상동기식 결합(non-coherent combining)이 이루어지는 경우의 신호전송용량을 표현한 식은 다음과 같다.

$$C_{i,i+1}^C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{(g_{i,i+1} + \beta \cdot g_{c,i+1} \cdot g_{i,c}) \cdot P_i}{(\beta \cdot g_{c,i+1} + 2)N_0W} \right) \quad (2)$$

여기서, $SNR = \frac{P_i}{N_0W}$ 로 나타낼 수 있다. 증폭률 β 는 릴레이 노드에서 노드 i 의 신호를 전달 받았을 때 신호를 증폭하는 증폭률이며 항상 1보다 큰 값을 갖는다. $g_{i,i+1}$ 는 직접 경로의 이득으로 0과 1사이의 값을 가지며 0에 가까울수록 좀 더 낮은 이득으로 $g_{i,i+1}$ 값이 작을수록 릴레이 노드의 필요성이 커질 것이다.

$$C = W \cdot \log_2(1 + g \cdot SNR) \quad (3)$$

$$(C/W)_D = \log_2(1 + g_{i,i+1} \cdot SNR) \quad (4)$$

$$(C/W)_C = \log_2 \left(1 + \frac{(g_{i,i+1} + \beta \cdot g_{c,i+1} \cdot g_{i,c}) \cdot SNR}{\beta \cdot g_{c,i+1} + 2} \right) \quad (5)$$

$$(C/W)_C > (C/W)_D + \delta \quad (6)$$

여기서 $\delta = \log_2(\delta')$ 이다.

$$g_{i,i+1} \leq \left\{ \frac{\delta' - 1 - \frac{\beta \cdot g_{c,i+1} \cdot g_{i,c}}{\beta \cdot g_{c,i+1} + 2} \cdot SNR}{\left(\frac{1}{\beta \cdot g_{c,i+1} + 2} - \delta' \right) \cdot SNR} \right\} \equiv g' \quad (7)$$

여기서 g' 값은 직접 경로와 릴레이 경로(Relay

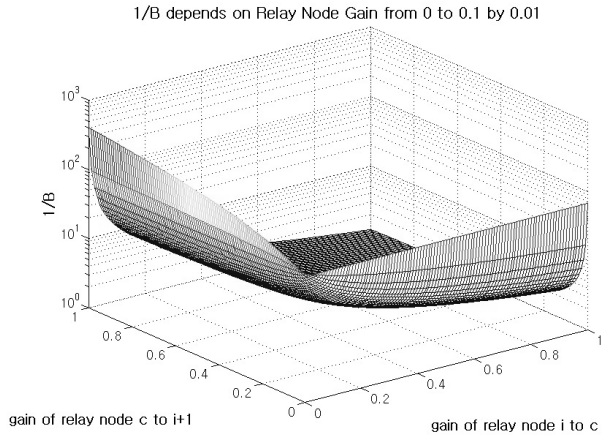


그림 1. 릴레이 노드의 이득이 변화할 때 $1/B$ 값의 변화

Fig. 1. $1/B$ of Relay Node Gain from 0 to 1 by 0.01

Path)의 신호전송비율을 나타낸 값으로서 이 비율이 직접 경로 이득보다 크거나 같을 때만이 릴레이 노드를 사용하여야 협동 릴레이를 적용할 때 용량측면에서 이득이 발생하게 된다. 그렇지 않으면 위상 비동기 방식을 적용할 때 용량측면의 이득은 없으면서 시스템의 에너지 사용량과 복잡도만 증가시킬 뿐 다른 이득은 존재하지 않게 된다. 먼저 직접 경로의 E_b 를 표현하는 식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$E_b/N_0 = \frac{S}{N} \cdot \frac{W}{R} \quad (8)$$

여기서 고려하는 시스템은 $W=R$ 인 경우를 고려하였다. 그러면, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$2^{\frac{C}{W}} - 1 = g \cdot E_b/N_0 \quad (9)$$

$$E_b = \frac{1}{g} (2^{\frac{C}{W}} - 1) N_0 \quad (10)$$

여기서 한 가지의 예제로 $W=10kHz$ 이고 $C=1Kbyte/sec$ 인 경우를 고려하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E_b = \frac{1}{g} (2^{\frac{8 \times 10^3}{10^4}} - 1) N_0 \quad (11)$$

$$N_0 = kT = (1.38 \times 10^{-23}) \times 290^\circ \quad (12)$$

$$E_b = \frac{1}{g} (2^{0.8} - 1) \cdot 4 \times 10^{-21} \quad (13)$$

여기서 $1/g$ 값의 g 는 직접 경로의 에너지 팩터 (Energy Factor)로서 $g = g_{i,i+1}$ 이다.

Relay Path에 대한 데이터 전송 소비 에너지 E_b 는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$C = W \cdot \log_2(1 + \beta \cdot SNR) \quad (14)$$

$$(2^{\frac{C}{W}} - 1) \frac{1}{B} = \frac{E_b}{N_0} \quad (15)$$

$$B = \frac{g_{i,i+1} + \beta \cdot g_{c,i+1} \cdot g_{i,c}}{\beta \cdot g_{c,i+1} + 2} \quad (16)$$

$$E_b = \frac{1}{B} (2^{\frac{C}{W}} - 1) N_0 \quad (17)$$

마찬가지로 $W=10kHz$ 이고 $C=1Kbyte/sec$ 인 경우를 고려하면 단위 비트를 전송하는데 필요한 에너지는 다음과 같이 얻어진다.

$$E_b = \frac{1}{B} (2^{\frac{C}{W}} - 1) N_0 = \frac{1}{B} (2^{0.8} - 1) N_0 \quad (18)$$

여기서 $1/B$ 는 릴레이 경로의 에너지 팩터로서 릴레이 노드를 사용한 경로에서의 이득(B)의 역수이다. 즉, 직접 경로와 릴레이 경로의 데이터 전송 소비에너지 값에 따른 Criterion값과 g' 을 사용하여 적절한 릴레이 노드를 선별하고, 데이터 전송 용량 값이 같더라도 데이터 전송 전력 값, E_b 가 다르면 릴레이 노드를 사용한다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 해석

본 절에서는 앞서 제시하였던 효율적인 에너지 사용을 위한 무선 센서 네트워크에서 직접 경로에서 릴레이 노드의 사용에 따라 변화하는 데이터 전송 용량을 관찰하고, 시뮬레이션에서는 직접 경로 이득, SNR, 릴레이 경로에서 쓰이는 릴레이 노드에서 신호 증폭 값 β 의 변화에 따른 효율적인 에너지 사용을 위한 무선 센서 네트워크의 데이터 전송 용량 값의 변화에 대하여 주로 고찰 하였다. 이에 따라 또한 효율적인 에너지 사용을 위한 무선 센서 네트워크의 릴레이 노드선택 시 고려하는 직접 경로 이득과 릴레이 경로의 에너지 팩터와 E_b 간의 관계를 통한 릴레이 경로의 효율이 높은 구간의

위치를 파악하고 데이터 전송 용량과 에너지 절약 정도를 시뮬레이션을 통해 좀 더 자세히 확인해 본다. 그림 1을 통해 에너지 팩터 $1/B$ 이 릴레이 경로 이득이 (0.0 ~ 0.2구간)일 때 다른 구간 보다도 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 협동 릴레이 노드의 이득 값이 줄어들수록 이에 상응하는 에너지 팩터의 값이 매우 커짐을 알 수 있다. 이는 릴레이 경로의 이득이 작음에 따라 실제 전송해야 하는 에너지가 늘어남을 의미하며 직접 경로 이득이 줄어들수록 전반적인 단위 비트 전송에 따른 에너지 소모가 증가함을 의미한다.

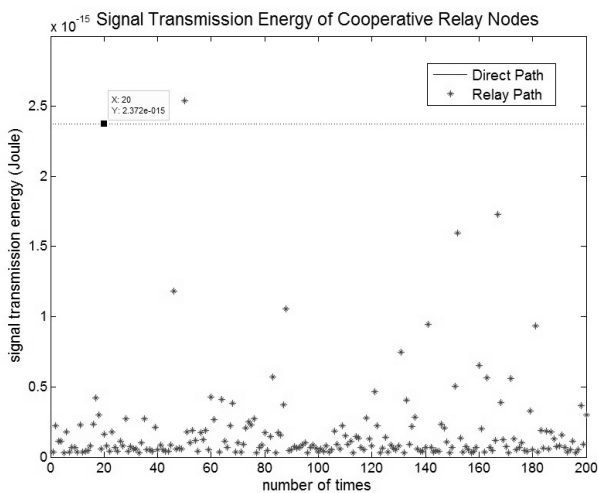


그림 2. 직접 경로이득이 0.01일 때 협동 무선 네트워크의 전송 에너지와 성공적 릴레이 노드
 Fig. 2. Transmission Energy and successful relays of Cooperative Wireless Network when $g=0.01$.

협동 릴레이를 사용함에 따라 직접 경로의 이득 값이나 협동 릴레이 간의 이득 값에 따라서 전송용량이나 단위 비트를 전송하는데 사용되는 에너지 측면에서 이득이 발생하거나 오히려 이득이 없는 경우도 발생됨을 알 수 있다. 그림 2는 직접 경로 이득 값 $g=0.01$ 일 때 유니폼하게 발생된 릴레이 경로 E_b 값 200개 표본에 대한 결과를 보여준다. 그림에서 살펴보는 바와 같이 대부분의 경우에 직접 전송에 소모되는 에너지대비 협동 릴레이를 이용하는 경우에 소모되는 에너지가 적음을 알 수 있다. 그러나 일부 경우에는 직접 경로 전송에 의한 단위 비트당의 에너지가 소모량이 협력 릴레이 경로를 사용한 경우의 단위 비트당 에너지 소모량보다 작은 경우가 발생한다. 이를 통하여 협력 릴레이의 선택기준이 있어야만 전송 에너지 측면에서의 이득을 활용할 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 경우에 대해 구체적으로 살펴보기 위해서 협동 릴레이 노드의 전력이득의 영역에 대해 임의의 전력이득을 갖는 경우 단위 비트를 전송하는데 전송용량의 이득이 발생하는 경우에 대하여 살펴보고자 하는데 직접 경로를 통한 정보전송용량과 비교하여 이득이 발생하는 경우를 살펴보았다.

이때 그림 3에서 살펴볼 수 있는 바와 같이 직접 경로 이득이 낮은 경우 릴레이 경로의 소비 에너지 평균은 직접 경로 이득이 우수할 때의 직접 경로 에너지 값과 비슷하여 직접 경로의 이득이 0.5이하에서는 릴레이 노드의 사용을 통한 소모에너지 측면에서의 전송효율이 더욱 개선되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

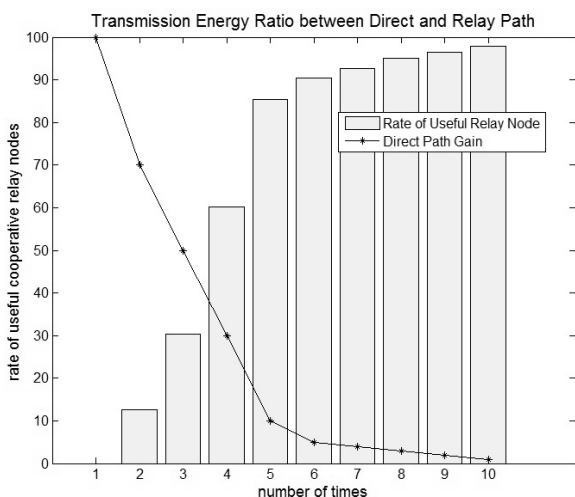


그림 3. 직접 경로 이득대비 협동 릴레이 노드 전송용량 이득 및 전송 에너지 이득이 발생하는 비율
 Fig. 3. Useful Relay Node Rate of Relay Nodes with Direct Path Gain.

V. 결 론

본 논문에서 다룬 무선 센서 네트워크에서 협동 릴레이 노드를 선택하는 경우 두 가지 측면에서 장점을 가지고 있다. 첫째로 E2E(단대단)간에 경로의 재설정이 없이 신속하게 용량의 저하로 인한 해당링크의 복구가 가능하게 되며 둘째로 직접 경로의 이득이 작은 경우 발생하게 되는 정보전송에 의한 과도한 에너지의 사용으로 인해 네트워크 노드의 수명이 단축됨을 막을 수 있다는 점이다. 이는 협동 릴레이를 선택함으로써 네트워크의 정보전송에 따른 에너지 소모를 최소화할 수 있다는 점에서 큰 이득을 얻을 수 있다는 점이다. 본 논문에서는 이와 같은 관점에서 협동릴레이를 적용했을 때 얻는 에너지 이득을 분석하고 정량적 측면에서 얻을 수

있는 잇점에 대해 다루었다. 무선 센서 네트워크의 용량과 릴레이 노드의 증폭률, 직접 경로 이득, 그리고 SNR과의 관계를 살펴본 결과 무선 센서 네트워크의 용량에 가장 큰 영향을 미치는 직접 경로 이득과 릴레이 노드를 포함한 링크의 이득을 고려한 에너지 팩터 ($g', 1/g, 1/B$)를 설정하고 g' 이 직접 경로 이득보다 큰 경우의 릴레이 노드를 선택하는 것이 전송 에너지와 전송용량측면에서 이득을 얻게 된다는 점을 제시하였다. 에너지 팩터 $1/g, 1/B$ 를 설정하였으며 이 에너지 팩터를 계수로 한 데이터 전송 에너지(E_b) 식을 토대로 무선 센서 네트워크의 용량의 변화를 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이는 직접 경로 이득이 줄어들더라도 릴레이 노드를 사용하게 되면 무선 센서 네트워크에서 여전히 효율적인 통신이 이루어 질 수 있다는 것이다. 이러한 측면에서 직접 경로 이득 값이 감소하더라도 릴레이 노드 데이터 전송 에너지가 감소하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이상과 같은 연구결과는 센서 네트워크를 구성하는데 있어서 단대단간의 정보 전송경로 설정에 있어서 용량의 제한과 전송에너지 소모가 클 것으로 예상되는 링크에서 협력 릴레이 노드를 적용함에 따라 전송용량의 이득과 소모에너지 감소에 따른 이득을 적절하게 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Misra, S., Seung Don Hong, Guoliang Xue, Jian Tang, "Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks: Formulation and Approximations" IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.18, issue 2, pp. 434-447, April 2010.
- [2] Chakrapani, A. Malaney, R. Jinhong Yuan, "Energy Efficient Cooperative Communications using Location based Relaying" Communications Theory Workshop, pp. 105-109, 2009.
- [3] Ha Nguyen Vu, Hyung-Yun Kong, "Adaptive Decode-and-Forward Cooperative Networks with Multiple Relay Nodes" Journal of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 11, no. 1, MAR. 2011.
- [4] Dejun Yang, Misra, S., Xi Fang, Guoliang Xue, Junshan Zhang, "Two-Tiered Constrained Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks: Efficient Approximations" IEEE Communications Society Conference, vol.7, pp. 1-9, June 2010.
- [5] Rahman, M.A., Anwar, F., Naeem, J., Abedin, M.S.M., "A simulation based performance comparison of routing protocol on Mobile Ad-hoc Network (proactive, reactive and hybrid)" International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), pp.1-5, 2010.
- [6] Xiaofeng Han, Xiang Cao, Lloyd, E.L., Chien-Chung Shen, "Fault-Tolerant Relay Node Placement in Heterogeneous Wireless Sensor Networks" IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, issue 5, pp. 643-656, 2010.
- [7] Chakrapani, A. Malaney, R. Jinhong Yuan, "Energy Efficient Cooperative Communications using Location based Relaying" Communications Theory Workshop, pp. 105-109, 2009.
- [8] EunMi Kwon and Jeong-Ho Kim, "Performance Comparison and Analysis of Non-coherent Cooperative Relays ofr Wireless Sensor Networks," Journal of IEEK, vol. 49, No. 5, 2012.

— 저 자 소 개 —



권 은 미(학생회원)
 2010년 충북대학교 정보통신학과
 학사 졸업
 2012년 이화여자대학교
 전자공학과 석사 졸업
 2012년 (주) MS Korea 인턴쉽

<주관심분야 : 무선통신, 이동통신, Green Computing>



김 정 호(평생회원)
 1991년 한국 과학기술원 전기 및
 전자공학과 학사
 1993년 한국 과학기술원 전기 및
 전자공학과 석사
 1999년 한국 과학기술원 전기 및
 전자공학과 박사

1995년 LG전자 멀티미디어 연구소
 1999년~2000년 LG정보통신 중앙연구소
 선임연구원
 2000년, 2009년 Virginia Tech. MPRG (Mobile
 Radio Research Group) Visiting
 Scholar and Visiting Professor
 2001년~2002년 8월 LG전자 UMTS시스템
 연구소 책임연구원
 2002년 9월~현재 이화여자대학교 공과대학
 전자공학과 부교수
 <주관심분야 : 인지 네트워킹, 인지 라디오 네트
 워크, 인지기반 QoS제어, SDR Hardware 플랫폼
 설계>