

무선 셀룰라 시스템에서 에너지 효율적인 마이크로 기지국 배치 방안

An Energy-Efficient Deployment Strategy for Micro Base Station in Wireless Cellular Systems

오 은 성*

Eunsung Oh*

Abstract

In this paper, we study the energy-efficient deployment strategy for micro base station (BS) in wireless cellular systems. Firstly, we formulate a general problem pertaining to total energy consumption minimization with the requirement of area spectral efficiency (ASE). We start from an observation about the correlation between the area covered by an additional micro BS and the increment of ASE. Under such an observation, we propose an efficient greedy micro BS deployment algorithm. Simulations show that the proposed deployment algorithm can deploy micro BSs with a slight performance reduction comparing with the optimal solution.

요 약

본 논문은 셀룰러 시스템에서 에너지 효율적인 마이크로 기지국 배치 방안에 관한 것이다. 먼저 기지국 배치는 영역에 대한 고려가 필요하기 때문에 공간 스펙트럼 효율(ASE)을 제한조건으로 하여, 제한조건을 만족하면서 에너지 사용을 최소로 하는 최적화 문제를 제시한다. 최적화 문제의 계산 복잡도를 감소시키기 위하여 마이크로 기지국 배치에 따른 기지국 서비스 영역과 ASE간의 관계를 기반으로 하는 마이크로 기지국 배치 방안을 제안한다. 모의실험을 통하여 제한된 알고리즘이 일정 범위 안에서 최적해의 성능을 만족시킴을 보인다.

Key words : energy-efficient, base station deployment, greedy algorithm, cellular system

1. 서론

정보통신분야의 에너지 소비는 멀티미디어와 무선 인터넷 트래픽의 증가로 인하여 계속적으로 증가하고 있으며, 이 중 60-80%의 에너지가 기지국 유지/운영에 사용되고 있다^[1]. 특히 기지국이 사용하는 에너지의 대부분이 쿨링 등 기지국 유지를 위하여 소모되고 있어, 전송할 데이터 트래픽이 없는 경우에도 많은 에너지를 소모하게 되는 문제를 발생시킨다.

이를 극복하기 위하여 트래픽 전송이 없는 경우에

기지국을 스위칭 오프 시키는 기지국 운영에 대한 연구가 이루어지고 있다. Chiaraviglio 등은 트래픽의 시간적 특성에 따라서, 트래픽이 낮은 시간대에 기지국을 스위칭 오프시킴으로써 에너지 효율이 증가할 수 있음을 보였으며^[2], Marsan 등은 이에 대한 기초적인 수학적 모델을 연구하였다^[3]. 이외에도 네트워크의 다양한 특성을 고려하여 기지국을 운영함으로써 에너지 효율화를 이룰 수 있는 다양한 방법들이 제안되고 있다^[4]. 그러나 이러한 대부분의 연구들은 트래픽의 시간적 특성을 고려하여 기지국을 스위칭 온 또는 오프 함으로써 에너지 소비를 감소시키는, 기지국 운영에 목적을 두고 있다.

기지국 운영은 기지국 배치가 고정된 경우를 가정하기 때문에, 기지국 운영에 따른 에너지 효율화는 기지국 배치에 따라 제한된다. 따라서 에너지 효율을 증대

*Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University
(e-mail: esoh@konkuk.ac.kr, tel: +82-2-458-4778)
Manuscript received Sep. 28, 2012; revised Oct. 31, 2012; accepted Nov 6, 2012.

시키기 위해서는 기지국 배치에 관한 연구가 필요하다.

마이크로 기지국은 높은 데이터 트래픽이 요구되는 상황에서 매크로 기지국과 계층적으로 존재하면서 전송되는 데이터 트래픽을 증대시키기 위한 방안으로 제안되고 있으며^[5], 기지국 운영에 소모되는 에너지가 매크로 기지국에 비하여 적기 때문에 에너지 효율을 증대시킬 수 있다^[6].

본 논문에서는 매크로 기지국이 존재하는 셀룰러 시스템에서 마이크로 기지국 배치를 통하여 에너지 효율을 증대시키는 방안에 대한 연구를 수행한다. 먼저 기지국 배치는 기지국의 서비스 영역과 관련이 있기 때문에 공간 스펙트럼 효율 (ASE, Area Spectral Efficiency)을 기반으로 하는 최적화 문제를 제시한다. 최적화 문제를 기반으로 하는 기지국 배치는 요구되는 ASE에 따라 재계산되어야 하기 때문에 높은 계산 복잡도를 요구하기 때문에, 본 논문에서는 이를 해결하기 위하여 요구되는 ASE의 증가에 따라 연속적으로 동작하는 단순화된 기지국 배치 방안을 제안한다. 모의실험에서는 최적화 배치 방안과의 비교를 통하여 제안된 기지국 배치 방안의 성능을 검증한다.

II. 시스템 모델 및 최적화 문제

1. 시스템 모델

가. 링크 모델

본 논문에서는 의 영역 안에 매크로 기지국과 마이크로 기지국 B 이 존재하는 환경에서, 기지국으로부터 사용자로 데이터 트래픽이 전송되는 하향 링크를 고려한다.

사용자는 수신되는 신호 세기가 가장 큰 기지국으로부터 서비스를 받게 된다. 기지국의 전송 파워를 p_i , 기지국 i 와 x 에 위치한 사용자 사이의 채널 이득을 $g_b(x)$ 라고 하면 서비스 기지국 b 는

$$b = \operatorname{argmax}_{i \in B} g_i(x) \cdot p_i, \quad (1)$$

로 결정되며, 이때 $B = B_M \cup B_m$ 을 의미한다.

수식 (1)과 Shannon 캐패시티를 가정하여 위치 x 에서의 스펙트럼 효율은

$$C(x, B) = \log_2(1 + I(x, B)), \quad (2)$$

[bits/sec/Hz]이며, 잡음 전력이 일 때 신호 대 간섭 및 잡음비, $I(x, B)$, (SINR, signal to interference and noise ration)는 다음과 같다.

$$I(x, B) = \frac{g_b(x) \cdot p_b}{\sum_{i \in B/b} g_i(x) \cdot p_i + \sigma^2}. \quad (3)$$

나. 공간 스펙트럼 효율

기지국 배치는 공간적 개념이 포함되어야 하므로, 본 논문에서는 성능 지표로 ASE^[7]를 사용한다.

ASE은 다음과 같이 정의되며,

$$B) \in \frac{C(x, B) \cdot \Pr(x)}{|A|}, \quad (4)$$

Table 1. Transmission and operational powers for macro and micro base stations^[6].

표 1. 전송 전력에 따른 기지국 운영 전력^[6]

	Macro	Micro 1	Micro 2	Micro 3
전송 전력 (p_b)	20W	10W	2W	1W
운영 전력 (P_b)	865W	638W	43W	38W

[bit/sec/Hz/m²], $|A|$ 는 A 의 크기, $\Pr(x)$ 는 사용자가 위치 x 에 존재할 확률, X 는 $\Pr(x) > 0$ 인 영역을 의미한다. 수식 (4)에서 보는 것과 같이 ASE은 관찰영역에 있어서 단위 영역 당 스펙트럼 효율을 의미한다.

2. 최적화 문제

본 연구의 목적은 에너지 효율적인 기지국 배치에 관한 것이다. 따라서 목적함수는 다음과 같이 구성된다.

$$U(B) = P_M \cdot |B_M| + \sum_{i \in N} P_m \cdot |B_{m_i}|. \quad (5)$$

이때 N 은 마이크로 기지국 종류를 나타낸다. P_b 는 b 기지국이 사용하는 에너지를 나타내며, 각각의 기지국은 전송 전력에 따라서 표 1과 같은 에너지 사용량을 갖는다^[6].

성능 지표인 ASE에 대한 제한조건으로, 매크로 기지국만을 사용한 경우 ($B = B_M$)를 기준으로,

$$S_0 = S(B_M), \quad (6)$$

마이크로 기지국 배치로 인하여 조정 변수 ζ 이상의 공간 스펙트럼 증가가 이루어진다고 가정한다.

$$S(B = B_M \cup B_m) \geq \zeta \cdot S_0. \quad (7)$$

수식 (5)와 수식 (7)을 이용하여 에너지 효율적인 기지국 배치에 대한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min_B \quad & U(B) \\ \text{s.t.} \quad & S(B) \geq \zeta S_0. \end{aligned} \quad (8)$$

목적함수와 제한조건에서 알 수 있는 것과 같이 수식 (8)의 최적화 문제가 의미하는 것은, 매크로 기지국을 설치하였을 때보다 ζ 배 만큼의 ASE 증대가 요구되는 경우, 에너지 소모량이 최소가 되도록 기지국 B 를 결정하는 문제이다.

수식 (8)의 최소화 문제에서 제한조건은 로그 함수 형태이고 목적함수는 선형 함수의 조합임으로 convex

최적화 문제가 되며, simplex method 또는 interior point method를 통하여 최적해를 구할 수 있다.^[8]

III. 에너지 효율적 기지국 배치 방안

앞서 언급한 것과 같이 에너지 효율적 기지국 배치에 관한 문제는 simplex method 또는 interior point method를 통하여 최적해를 구할 수 있다. 그러나 참

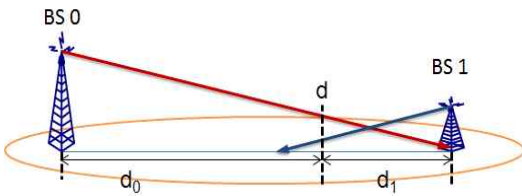


Fig. 1. Base station coverage area model considering distance and received signal strength

그림 1. 거리와 수신 신호 세기에 대한 기지국 서비스 영역 모델

고문헌 [4]에서 보는 것과 같이 데이터 트래픽은 시간에 따라 변화하는 값이다. 이와 관련하여 조정 변수가 바뀌게 되면, 결국 수식 (8)에 관한 최적화 문제를 새롭게 계산하여야 하는 문제가 발생한다.

따라서 본 장에서는 데이터 트래픽 요구량 변화, 즉 ζ 의 변화에 대하여 연속성을 갖으며, 계산량을 줄일 수 있는 간략화 된 기지국 배치 방안을 제안한다.

기지국 배치 방안을 제안하기에 앞서 마이크로 기지국 배치와 ASE와의 관계를 고찰한다.

정리 1 일정한 서비스 영역을 갖는 마이크로 기지국의 배치는 ASE를 증대시킨다.

증명: 그림 1과 같이 기지국 0와 $d + d_1$ 의 거리에 마이크로 기지국 1이 배치되었다고 한다면, 기지국 1의 서비스 영역 d 는 다음과 같이 결정된다.

$$g_0(d) \cdot p_0 \approx g_1(d) \cdot p_1 + \epsilon. \quad (9)$$

마이크로 기지국 배치에 따라 ASE가 증가하기 위한 조건으로, 기지국 1의 경계 영역에서의 마이크로 기지국 배치 이전과 이후의 스펙트럼 효율을 비교가 필요하다.

ASE 증가에 대한 SINR 관계식은 다음과 같다.

$$g_0(d) \cdot p_0 \leq g_1(d) \cdot p_1 + \sum_{i \in B/0} g_i(d) \cdot p_i \quad (10)$$

(318)

수식 (10) 우측 항, 마이크로 기지국이 배치된 경우의 수신 신호에서 살펴보면, 기지국 2의 신호가 가장 크고 기지국 1의 신호가 두 번째 크기를 갖기 때문에 다른 간섭에 비하여 지배적이다. $g_i(x) \approx d_i^{-\alpha}$ 라고 가정하여 수식 (9)를 수식 (10)에 적용하여 정리하면

$$d_1 \geq \left[\frac{p_1 K_1}{\sigma^2} \right]^{1/\alpha} \geq \left[\frac{p_1 K_1}{\sum_{i \in B/0} g_i(x) \cdot p_i} \right]^{1/\alpha}, \quad (11)$$

가 되며, 이를 통하여 마이크로 기지국이 일정 서비스 영역 이상을 갖는다면 ASE가 증대됨을 알 수 있다.

정리 2 마이크로 기지국의 서비스 영역 d 가 최대가 되는 경우에, ASE 증가가 최대가 된다.

증명: 마이크로 기지국 1과 2가 각각 배치되었을 때 $> d_2$ 인 서비스 영역을 갖게 된다고 가정하면, 관찰 영역은 $d \cup A_{b_2} = A$ 로 나누어진다. 이때 A_{b_2} 는 A_{d_2} 이외의 영역을 나타낸다.

d_1 이 정리 1을 만족한다고 하면 A_{b_2} 영역에서 캐패시티의 합($\sum_{x \in B} C(x, B)$)은 항상 마이크로 기지국이 설치되지 않은 경우보다 크게 됨으로, 마이크로 기지국 1이 설치된 경우가 기지국 2가 설치된 경우에 비하여 큰 값을 갖는다.

A_{b_2} 영역의 위치 x 에 대해서는, 두 개의 마이크로 기지국으로부터의 수신 신호 $g_1(x) \cdot p_1 = g_2(x) \cdot p_2$ 는 같은 상황에서 마이크로 기지국 2의 서비스 영역이 기지국 1의 서비스 영역에 비하여 작다는 것은 마이크로 기지국 2의 간섭이 기지국 1에 비하여 크다는 것을 의미하므로, 결국 A_{b_2} 영역에서의 캐패시티 합($\sum_{x \in B} C(x, B)$)은 마이크로 기지국 1이 설치된 경우가 기지국 2가 설치된 경우에 비하여 큰 값을 갖는다.

위 두 가지 결과로 인하여 마이크로 기지국의 서비스 영역이 큰 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여, 큰 ASE 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

정리 1과 정리 2를 이용하여 마이크로 기지국 배치를 위한 기지국의 위치를 결정할 수 있다. 이때 마이크로 기지국 종류에 따라 전송 전력 및 운영 에너지가 달라지기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 즉, 아래와 같은 운영 에너지에 대한 표준화를 통하여 단위 에너지별 서비스 영역을 최대화 하는 위치와 기지국 종류를 선택하여야 한다.

$$\max_{x,b} \frac{A_b}{P_b} \quad (12)$$

수식 (12)를 기반으로 하는 마이크로 기지국 배치 알고리즘은 다음과 같다.

[서비스 영역 기반 마이크로 기지국 배치 방안]

- 초기상태: $B = B, S(B) \geq \zeta_0 \cdot S_0$
- $\zeta > \zeta_0$ 인 경우,
 - While ($S(B) \leq \zeta \cdot S_0$)
 - 수식 (12)를 기반으로 ζ 와 b 를 결정,
 - $U\{b\} \rightarrow B$
 - end
- $\zeta < \zeta_0$ 인 경우,
 - While ($S(B) \geq \zeta \cdot S_0$)
 - 가장 나중에 배치된 기지국을 제거
 - end

제안된 알고리즘은 그리드(greedy) 방식을 기반으로 기지국을 한 개씩 추가 또는 제거하는 방식이기 때문에 조정 변수 ζ 가 바뀌더라도 연속적인 기지국 위상을 갖게 되어, 최적화 문제를 풀기 위하여 각각의 조정 변수 ζ 마다 새롭게 해를 구하는 방식에 비하여 낮은 계산 복잡도를 갖는다.

또한, 알고리즘의 동작을 위한 서비스 영역 $|A|$ 은 수식 (9)에서 보는 것과 같이 주변 기지국에서부터 수신되는 신호 세기에 따라서 결정됨으로, 수식 (12)의 서비스 영역 계산을 대신하여 다음과 같이 주변 기지국과의 신호 세기 비교로 근사화 할 수 있다.

$$|A_b| \rightarrow \max_{i \in \mathcal{N}} g_i(x) \cdot p_i \quad (13)$$

수식 (12)의 서비스 영역 $|A_b|$ 에 대한 계산 대신에 수식 (13)을 이용하는 경우 추가적인 계산 복잡도 감소를 이룰 수 있다.

IV. 모의실험

모의실험은 $5Km \times 5Km$ 의 관찰영역에 10개의 매크로 기지국이 배치되어 있는 경우를 가정하며, 사용된 파라미터는 표 2에서 정리된 것과 같다. 기술되지 않은 파라미터는 참고문헌 [9]에 정리되어 있는 매크로 및 마이크로 기지국에 대한 도심 환경 파라미터를 고려하였으며, 기지국 전송 전력과 운영 에너지는 표 1에 정리되어 있는 값을 사용하였다.

제안된 알고리즘의 성능 검증에 앞서 알고리즘 설계의 타당성을 확인하기 위하여 다양한 마이크로 기지국 종류에 있어서 마이크로 기지국 배치에 따른

ASE 증가량 변화를 관찰하였다.

그림 2은 매크로 기지국을 설치하는 경우와 다양한 종류의 마이크로 기지국을 설치하는 경우에 따른 ASE 변화량이다. 결과에서 나타난 것과 같이 마이크로 기지국이 배치됨에 따라 ASE가 단조 증가를 보이며, 배치되는 기지국 개수가 늘어남에 따라 ASE 증가량이 줄어든다. 이러한 특성을 갖는 함수는 증감 부변조 함수로 정의되며, 증감 부변조 함수를 기반으로 하는 그리드 방식의 선택 알고리즘과 최적 선택

Table 2. Simulation parameters

표 2. 모의실험 파라미터

파라미터	값
안테나 모델	전방향 안테나 (12dBi)
경로 감소 모델	Modified COST 231 Hata model
페이딩 모델	로그 정규 분포 모델 (std = 8dB)
잡음 모델	정규 분포 모델 ($\sigma^2 = -176\text{dBm/Hz}$)

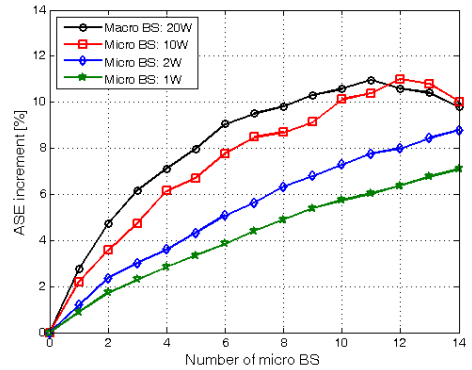


Fig. 2. ASE increment according to the micro base station deployment

그림 2. 마이크로 기지국 배치에 따른 ASE 증가량 비교

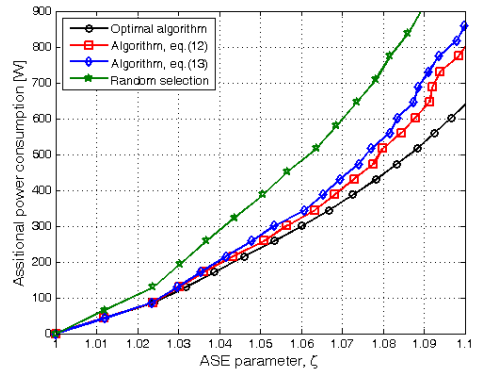


Fig. 3. Energy consumption according to the micro base station deployment

그림 3. 마이크로 기지국 배치에 따른 에너지 사용량 비교

알고리즘 간의 성능 차이는 항상 $-1/e \approx 0.63$ 의 범위 안에서 보장된다^[10]. 즉, 같은 수의 마이크로 기지국을 배치하는 경우 제안된 알고리즘을 통하여 얻어지는 ASE는 수식 (8)의 최적화 문제를 통한 최적해를 통하여 얻어지는 ASE의 63%이상 만족시킬 수 있음이 항상 보장된다. 이를 통하여 제안되는 알고리즘은 최적해에 대하여 항상 일정한 성능 이상을 만족시키게 된다.

또한 그림 2에서 전송 전력이 10W인 마이크로 기지국과 매크로 기지국을 사용하여 배치하는 경우 각각 12개와 11개 이상의 기지국이 배치되면 ASE가 감소하는 형태가 나타난다. 이는 기지국 밀도가 높아짐에 따라 정리 1의 기본이 되는 수식 (11)을 만족하지 못하기 때문에 나타나는 현상이다. 같은 조건에서 수식 (11)의 분모항인 전송 전력이 큰 경우 더 넓은 서비스 영역을 요구하게 된다. 따라서 가장 전송 전력이 큰 매크로 기지국을 사용하여 기지국 배치를 하는 경우, 가장 적은 기지국 개수에서 ASE 감소가 발생한다.

그림 3은 조정 변수 ζ 가 변화함에 따라서 마이크로 기지국 배치를 통한 에너지 소모량 변화를 나타낸다. 원 기호로 표시된 검은색 선은 수식 (8)의 최적화 문제를 통하여 도출된 최적해를 나타내며, 사각형 기호의 붉은색 선은 제안된 알고리즘을, 마름모 기호의 파란색 선은 제안된 알고리즘에서 서비스 영역의 계산을 대신하여 주변 기지국과의 신호 세기 비교로 근사화 수식 (13)을 사용한 경우를 의미한다. 그림에서 조정 변수 ζ 가 증가함에 따라 사용되는 에너지가 증가하는 것은, 기지국이 배치됨에 따라 간섭량이 증가하고 이에 따라 서비스 영역이 좁아지기 때문에 단위 ASE 증가를 위해서 더 많은 기지국 배치가 필요하기 때문에 나타나는 현상이다. 또한 결과에서 보는 것과 같이 마이크로 기지국 배치를 위하여 동일한 에너지가 사용되는 경우(그림 3의 동일한 y축 값)에 대하여, 제안된 알고리즘은 랜덤 한 기지국 배치에 대하여 60%이상의 에너지 사용량 절감을 이루며, 최적해에 대하여서도 70%이상의 성능을 보장함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 매크로와 마이크로 기지국이 운영되는 환경에서 에너지 효율적인 마이크로 기지국 배치 방안을 제안하고 있다. 먼저 ASE를 성능 지표로 하는 에너지 최소화에 대한 최적화 문제를 제시하였으며, ASE 변화에 따른 계산 복잡도를 줄이기 위하여 그리드 방식을 기반으로 하는 마이크로 기지국 배치

방안을 제안하였다. 모의실험을 통한 성능 검증을 통하여 제안된 알고리즘이 랜덤 알고리즘에 대하여 60%이상의 성능개선을 보이며, 최적해에 대하여 70% 이상의 성능을 보장할 수 있음을 확인하였다.

제안된 방법은 다양한 기지국 종류를 고려하고 있으며 그리드 방법을 기반으로 하고 있기 때문에, 기존에 기지국 설치되어 있는 환경에서도 수정 없이 적용이 가능하다. 따라서 제안된 알고리즘을 통하여 새로운 기지국 설치 시 셀룰러 시스템의 에너지 효율을 증대시킬 수 있다.

References

- [1] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks," in *Proc. of IEEE GreenComm*, Jun. 2009.
- [2] L. Chiaraviglio, D. Ciullo, M. Meo, and M. A. Marsan, "Energy-aware UMTS access networks," in *Proc. of IEEE WPMC*, Sep. 2008.
- [3] M. A. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks," in *Proc. of IEEE GreenComm*, Jun. 2009.
- [4] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu, and Z. Niu, "Towards dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 56 - 61, Jun. 2011.
- [5] Y. Kim, T. Kwon, and D. Hong, "Area Spectral Efficiency of Shared Spectrum Hierarchical Cell Structure Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 8, pp. 4145 - 4151, Oct. 2010.
- [6] A. J. Fehske, F. Richter, and G. P. Fettweis, "Energy efficiency improvements through micro sites in cellular mobile radio networks," in *Proc. of IEEE GreenComm*, Dec. 2009.
- [7] M. S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Area spectral efficiency of cellular mobile radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, no. 4, pp. 1047 - 1066, Jul. 1999.
- [8] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. : Cambridge University Press, 2004.
- [9] "IEEE 802.16m evaluation methodology document (EMD)," IEEE 802.16m-08/004r5, Sep. 2009.
- [10] G. Nemhauser, L. Wolsey, and M. Fisher, "An analysis of the approximations for maximizing submodular set functions-I," *Mathematical Programming*, vol. 14, no. 1, pp. 265 - 294, Dec. 1978.

BIOGRAPHY

Eunsung Oh (Member)

2003 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

2006 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

2009 : Ph.D degree in Electronic Engineering, Yonsei University.

2009~2011: Post doctoral research fellow, University of Southern California.

2011~2012: Senior researcher, Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning.

2012~Current: Research professor, Konkuk University.