

# 도심 환경에서 전파 특성 모의 해석을 위한 신호 독립 부트리 방법에 대한 연구

## Source Independent Subtree Ray Tracing Method for Wave Propagation Simulation in Urban Environment

권세웅 · 문현욱\* · 오재림\* · 윤영중\*

Sewoong Kwon · Hyun Wook Moon\* · Jae Rim Oh\* · Young Joong Yoon\*

### 요 약

본 논문에서는 도심과 같이 전기적으로 큰 환경에서 광선 추적법의 광선 추적을 통한 트리 구성 및 부트리 사용에 있어서 부트리 재사용을 통한 트리 생성 효율을 높이기 위해 신호원 독립 부트리 방법을 제안하였다. 신호원 독립 부트리 방법의 적용 결과, 피코셀 및 마이크로셀에서의 노드 개수가 트리 깊이 6에서 100배 감소하는 것을 확인하였으며, 노드 재사용 효율 분석을 통해 송신 위치가 변해도 전체 노드 중 88~98 %가 재사용 되는 것을 확인하였다. 그러므로 제안된 신호원 독립 부트리 적용을 통해 광선 추적법 성능 개선은 물론 다중 안테나 또는 기지국 최적화와 같은 다중 송신기 사용 시 노드 재사용으로 인한 성능 개선에 유용하다.

### Abstract

In this paper, a SIT(Source Independent Tree) method for ray tracing is proposed to enhance the efficiency of tree construction with reuse of sub tree in urban environment, As the SIT method is applied, the decrease of the number of nodes for picocell and microcell simulations is 100 times. And 88~98 % of the total nodes are reused with change of location of signal source from an analysis of node reuse efficiency. Therefore the proposed SIT method is useful in performance enhancement of ray tracing, especially, for multiple antenna simulation like as MIMO system and cell planning.

Key words : Ray Tracing, SIT, Wave Propagation, Urban Environment

### I. 서 론

광선 추적 이론은 다양한 물리적 해석 방법과 연결되어 파동의 전파를 모의하는 다양한 분야에 적용되고 있으며<sup>[1]-[4]</sup>, 이동 통신의 발달과 더불어 도심 지역과 같은 복잡한 환경의 해석 수요가 늘어감에 따라 GO/UTD와 결합한 광선 추적법을 이용하여 도심 환경에서의 전파 특성을 모의하는 연구가 많이

이루어져 왔다<sup>[5]-[7]</sup>.

이러한 전파 특성 모의를 위한 광선 추적법에서는 광선의 최단 경로를 결정해야 하며, 최단 경로를 찾는 방법으로는 크게 단방향(unidirectional) 추적과 양방향(bidirectional) 추적 방법이 있다. 단방향 추적 방법은 신호원로부터 관찰점까지 순방향(forward)으로 추적하거나 관찰점에서 신호원까지 역방향(backward)으로 한 번만 추적하는 방법이며, 양방향 추

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다(계약번호 UD070054AD).」  
LIG넥스원 용인연구소 ISR연구센터(ISR R&D Lab. LIG Nex1. Co. Ltd.)

\*연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· 논 문 번 호 : 20091207-147

· 교 신 저 자 : 윤영중(e-mail : yjyoon@yonsei.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 1월 18일

적 방법은 순방향 또는 역방향 추적을 수행하여 근사 경로를 구하고, 이 근사 경로를 이용해 정확한 경로를 결정하는 방법이다<sup>[8]</sup>. 단방향 추적 방식으로는 광선 발사 방법(ray launching)이 잘 알려져 있으며, 양방향 추적 방법은 영상법(image theory) 기반 방법과 관성 튜브법(ray tube)이 잘 알려져 있다<sup>[9]~[13]</sup>.

단방향 추적 방법은 양방향 추적 방법보다 계산량이 적어 과거에 많이 사용되어 왔다<sup>[9]</sup>. 단방향 추적 방법은 계산량이 적은 장점이 있으나, 신호원(signal source)과 관찰점(observation point) 사이에 근사화된 경로를 찾으려, 수신점에서는 수신구(receiving sphere) 개념을 도입하여 수신 여부를 검사한다. 근사화된 경로에 광선의 물리적 특성을 적용하기 때문에 위상 오차가 발생하여 정확한 전자기학적 해를 구하기는 어려운 단점이 있다<sup>[11]</sup>.

양방향 추적법은 신호원에서 특정 체적(volume)을 갖는 광선의 가시 트리를 생성한다<sup>[15]</sup>. 관찰점이 알려지고 그 관찰점이 광선 트리 내의 특정 광선 체적(ray volume) 내에 위치하고 다른 장애물에 의해 가려지지 않는다면, 최적화 과정을 거쳐 페르마 이론(Fermat principle)을 만족시키는 최단 광선 경로가 확보되고, 전자기학적 방법을 적용하여 크기와 위상을 정확히 고려한 전자기적 해를 구할 수 있다. 그러나 이 방법은 단방향 방법에 비해 계산량이 많은 편이다.

최근 연구에서는 양방향 추적 방법이 광선 추적법의 경로 추적 방법으로 많이 사용되고 있다. 그러나 일반적으로 사용하는 무선 통신 채널 모델과 비교할 때 채널 응답을 얻기 위해 많은 시간을 소모하는 단점이 있다. 또한 순방향 탐색을 위해 체적 광선의 트리를 구성해야 하기 때문에 큰 영역을 해석하기 위해서는 많은 체적 광선 노드를 생성해야 하고, 이 때 많은 기억 장치와 계산 장치를 소모하는 것으로 알려져 있다<sup>[10],[11]</sup>. 따라서 이 문제를 해결하기 위한 많은 방법이 제시되었다<sup>[14]~[16]</sup>. 이 중에서 Nix는 회절 부트리 재사용(diffraction subtree reuse) 기법을 제안하였다<sup>[15]</sup>. 제안된 방법은 회절 썬기(diffraction wedge)는 고유의 부 트리를 구성하고 신호원이 실제로 회절 썬기에 입사하는 경우에 트리 간에 가상의 연결고리를 만들어 실제 트리처럼 사용하는 방법이

다. 유사한 방법이 Fontan에 의해서도 제안되었으며 부분 가시 그래프(partial visibility graph)라고 소개되었다<sup>[16]</sup>.

그러나 두 논문에서 트리의 구체적인 구성 방법이 제안되지 않아 실제로 구현된 기법을 알 수 없으며 역방향 추적 방법이 제시되지 않아 최적화된 경로를 얻을 때는 어떤 방법을 사용하는지에 대해 제시되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 신호원 독립 부트리 방법을 통해 두 논문에서 제시되지 않은 구현 방법에 대해 구체적인 방법을 제시하고, 중복성을 갖는 과정을 최소화하는 경로 추적 방법을 제안한다. 또한 두 가지 가상 환경을 설정하고, 가상 환경에서 체적 광선 트리의 노드 특성을 비교하여 제안된 방법의 성능 개선 효과를 확인한다.

## II. 신호원 독립 부트리 방법

### 2-1 트리 구성 및 부트리 방법

광선 추적법을 이용한 전파 환경 모의 해석은 송신기로부터 반사 및 회절을 거쳐 수신기로 입사되는 전파 경로들의 집합 및 그에 대한 정보들로부터 얻어진다. 이 때 그림 1과 같이 전파 경로들의 집합을 트리로 구성하게 되며, 반사점 및 회절점이 트리를 구성하는 노드가 된다.

광선 추적법을 이용하여 도심 환경과 같이 전기적으로 큰 환경을 해석하고자 할 때는 기억 장치의 물리적 제한으로 인해 전체 환경에 대한 트리를 구성하기 매우 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 부트리 방법을 사용하게 되는데, 부트리 방법은 그림 2와 같이 전체 트리 내에 부트리를 설정하고 각 부트리별로 처리한 후 이를 상위 부트리 및 전체 트리에 연결하여 기억 장치의 물리적 제한을 극복하는 방법이다. 이러한 부트리 방법을 사용하면 각 부트리별로 처리한 후 전체 트리를 구성하게 되기 때문에 실제 기억 장치에 적재되는 트리의 크기는 그림 1과 같은 전체 환경에 대한 트리 크기에 비해 매우 작아 기억 장치의 물리적 제한에 상관없이 트리 구성이 가능할 뿐 아니라 부트리 단위의 병렬 처리 방법을 통해 광선 추적법의 속도 개선에도 이용될 수 있다.

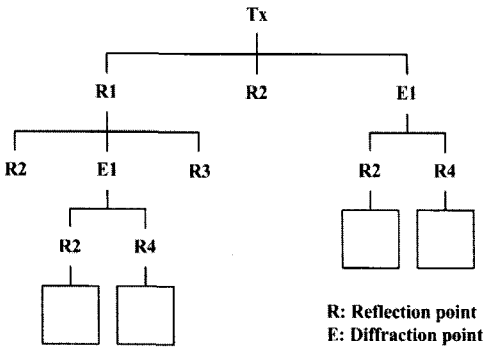


그림 1. 트리 구성  
Fig. 1. A tree construction.

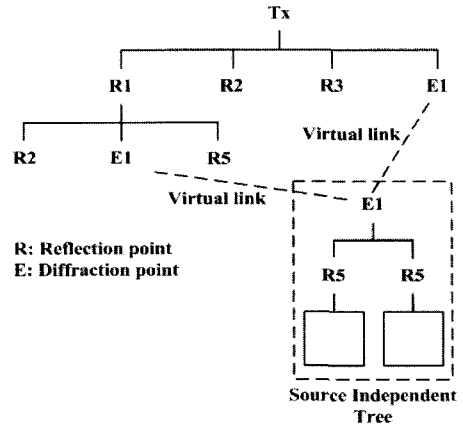


그림 3. 신호원 독립 부트리 방법  
Fig. 3. A source independent tree(SIT) method.

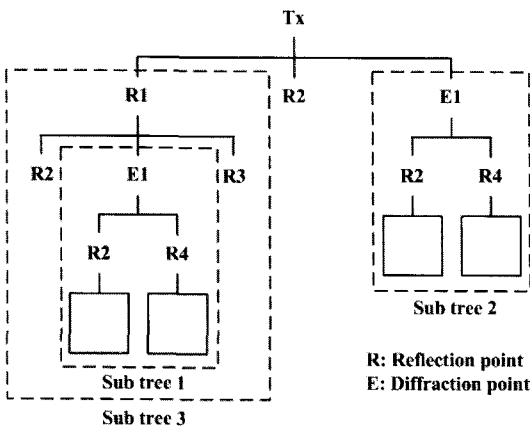


그림 2. 부트리 방법  
Fig. 2. A sub tree method.

### 2-2 신호원 독립 부트리(SIT) 방법

기존의 광선 추적법은 트리 구성 시 부트리가 신호원에 종속적으로 생성되는 신호원 종속 부트리를 사용하여왔다<sup>[10],[11]</sup>. 즉, 그림 2에서와 같이 동일한 회절 노드 E1에 대한 부트리 1(sub tree 1)과 부트리 2(sub tree 2)가 동일한 부트리임에도 불구하고 각각 생성되기 때문에 전체 트리 크기 자체는 변하지 않아 트리 생성 시간 및 탐색 시간을 감소시킬 수 없다. 따라서 본 논문에서는 회절 노드에 의한 부트리를 신호원과 관계없이 독립적으로 생성하고 이를 트리 구성 시 가상적으로 연결하여 사용함으로써 트리 생성 시간을 감소시킬 수 있는 신호원 독립 부트리 방법을 제안하였다. 회절 노드에 대해 신호원 독립 부트리 방법을 사용하면 그림 3과 같이 신호원 또는 이전 노드에 상관없이 이미 생성되어 있는 회절 노

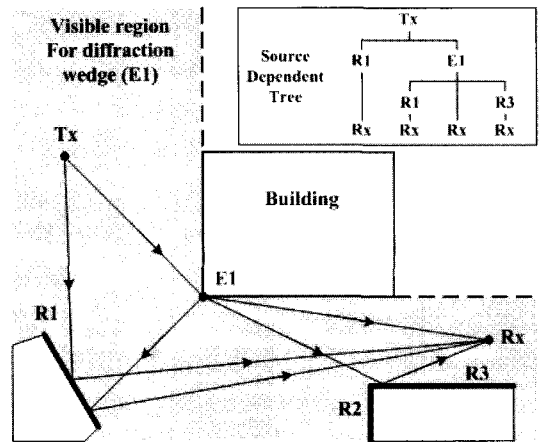


그림 4. 회절 노드에 대한 신호원 종속 부트리 방법의 적용  
Fig. 4. An application of source dependent tree method for diffraction node.

드에 대한 부트리 정보를 공유 또는 재사용하므로 중복성을 갖는 과정을 최소화하여 트리 생성 및 탐색 시간을 단축시킬 수 있다.

### 2-3 회절 노드에 대한 신호원 독립 부트리 적용 방법

광선 추적법을 이용한 전파 특성 모의 시 회절 노드에 대해 신호원 독립 부트리 방법을 적용하기 위해서는 회절 노드에 대한 가시 영역(visible region)에 대한 부트리를 미리 계산하여 저장해 놓을 필요가 있다. 기존의 신호원 종속 부트리 방법에서는 그림 4와 같이 신호원( $T_x$ )에 따라 트리를 구성하게 되며,

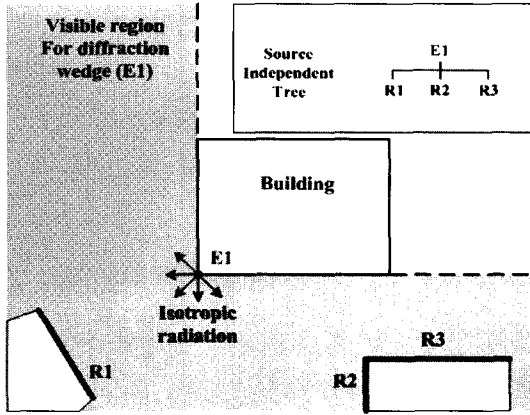


그림 5. 회절 노드에 대한 신호원 독립 부트리 방법의 적용

Fig. 5. An application of source independent tree method for diffraction node.

따라서 신호원 위치가 변경되면 새로운 트리를 재생성해야 한다. 그에 비해 그림 5와 같이 신호원 독립 부트리 방법에서는 회절 노드  $E_1$ 에 대한 가지 영역에 있는 다음 노드들에 대한 정보를 미리 계산하여 저장한다. 그리고 신호원에 따라 그 중 필요한 정보만을 사용하게 된다. 즉, 만약 그림 4와 같은 경우에 회절 노드  $E_1$ 에 대한 정보를 미리 가지고 있다가  $T_x$ 에 따라 그 중 반사 노드  $R_1$ 과  $R_3$ 에 대한 정보만을 공유 및 재사용함으로써 회절 노드에 대한 부트리를 새로 생성할 필요없이 사용할 수 있으며, 도심 환경과 같이 복잡하고 전기적으로 큰 환경에서는 이러한 부트리의 재사용을 통해 광선 추적법 모의 시간을 단축시키고 효율을 높일 수 있다.

### III. 결 과

신호원 독립 부트리 방법의 성능을 확인하기 위해 일반 도심 환경에 대한 피코셀 전파 환경과 마이크로셀 전파 환경을 설정하여 그 노드 특성을 분석하였다. 그림 6은 실외 피코셀 환경으로 200개의 삼각형 셀(cell)로 이루어진 환경이며, 그림 7은 실외 마이크로셀 환경으로 3,501개의 삼각형 셀로 이루어진 환경이다.

그림 8은 신호원 독립 부트리 방법의 적용 유무에 따른 노드 개수 특성을 나타낸다. 이 때 트리 깊이 (tree depth)는 트리 구성 시 반사 및 회절 횟수를 나

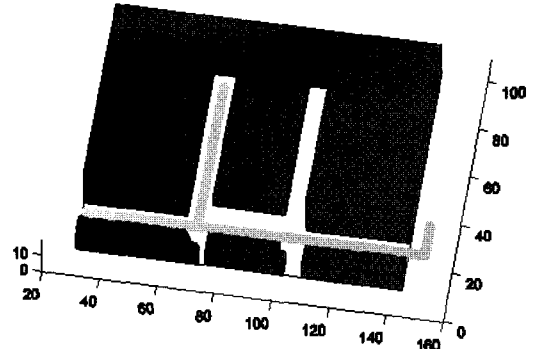


그림 6. 실외 피코셀 환경

Fig. 6. A picocell environment.

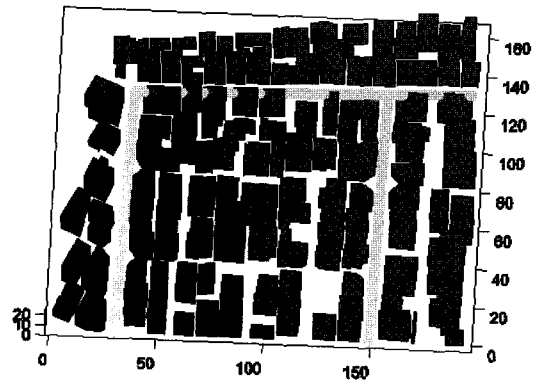


그림 7. 실외 마이크로셀 환경

Fig. 7. A example scenario of microcell.

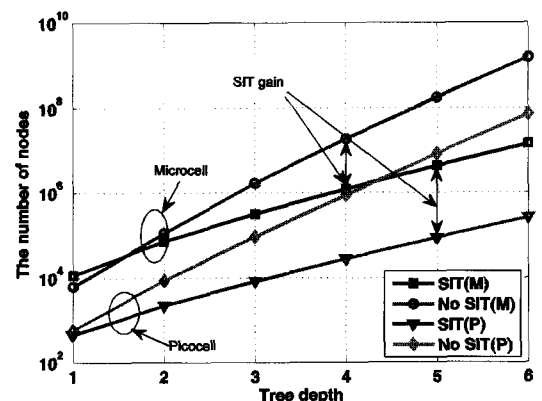


그림 8. 신호 독립 부트리 방법의 노드 개수 특성

Fig. 8. The number of nodes characteristic of SIT.

타내며, 트리 깊이가 3인 경우 신호원에서 수신점까지 3번의 반사 또는 회절을 거쳐 수신됨을 나타낸다. 그림 8에서 보듯이 신호원 독립 부트리 방법을 적용

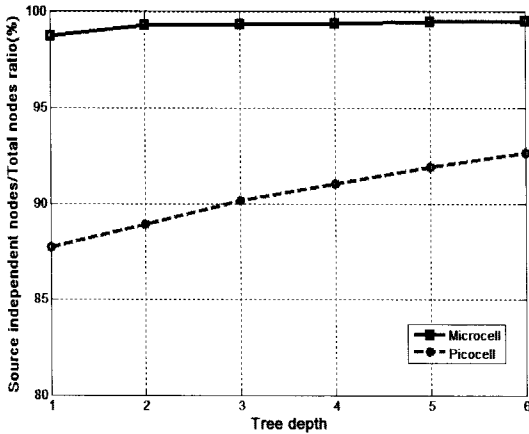


그림 9. 전체 노드 수중 신호 독립 노드 수의 비율  
Fig. 9. The ratio of source independent nodes and total nodes.

할 경우, 신호원 독립 부트리 방법을 적용하지 않은 경우에 비해 노드의 재사용으로 인해 생성해야 하는 노드 개수가 감소함을 확인할 수 있으며, 트리 깊이가 낮은 경우 재사용 빈도가 낮아 그 효율이 낮으나, 트리 깊이가 깊어질수록 재사용 빈도가 높아져 그 효율이 증가하며, 트리 깊이 6에서는 적용 유무에 따라 노드 개수가 약 100배 차이가 남을 확인할 수 있다.

그림 9는 노드 재사용 특성으로 신호원에 독립적인 노드 수/전체 총 노드 수로 정의하였으며, 높을수록 신호원의 위치가 바뀌더라도 전체 노드 중 일부만 재생성하면 사용 가능하다는 것을 의미한다. 그 결과, 재송신 위치가 변해도 전체 노드 중 88~98%가 재사용되는 결과를 보이고 있다. 따라서 다중 안테나 또는 기지국 최적화와 같은 다중송신기 사용 시 노드 재사용으로 인해 성능 개선이 기대된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 도심과 같이 전기적으로 큰 환경에서 광선 추적법의 광선 추적을 통한 트리 구성 및 부트리 사용에 있어서 부트리 재사용을 통한 트리 생성 효율을 높이기 위해 회절 노드에서 신호원과 관계없이 부트리를 생성하여 재사용하도록 하는 신호원 독립 부트리 방법의 실제 구현 방법을 제안하였다. 신호원 독립 부트리 방법의 적용 결과, 피코셀

및 마이크로셀에서의 노드 개수가 트리 깊이 6에서 100배 감소하는 것을 확인하였으며, 노드 재사용 효율 분석을 통해 송신 위치가 변해도 전체 노드 중 88~98%가 재사용되는 것을 확인하였다.

이로부터 제안된 신호원 독립 부트리 적용을 통해 광선 추적법 성능 개선은 물론, 다중 안테나 또는 기지국 최적화와 같은 다중 송신기 사용 시 노드 재사용으로 인한 성능 개선에 유용할 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Kay, J. Kajiya, "Ray tracing complex scenes", *Proc. Siggraph '86, Computer Graphics*, vol. 20, no. 4, pp. 269-278, Aug. 1986.
- [2] Robert R. Shannon, *The Art and Science of Lens Design*, Cambridge University Press, 1997.
- [3] 신승철, 문현욱, 권세웅, 김영규, 박정수, 윤영중, "수중 센서 네트워크에서의 지연시간 특성 연구", 한국음향학회 제23회 수중음향학 학술발표회 논문집, pp. 39-42, 2008년 8월.
- [4] J. R. Wait, "The ancient and modern history of EM ground-wave propagation", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 5, pp. 7-24, Oct. 1998.
- [5] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi, and M. Ume-hira, "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 8, pp. 822-829, Aug. 1984.
- [6] G. D. Galdo, M. Haardt, *Geometry-based Channel Modeling for Multi-User MIMO Systems and Applications*, Ilmenau, 2007.
- [7] C. Oestges, V. Erceg, and A. J. Paulraj, "Propagation modeling of MIMO multipolarized fixed wireless channel", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 3, pp. 644-654, May 2004.
- [8] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. DegliEsposti, H. Hofstetter, P. Kyosti, D. Laurenson, G. Matz, A. F. Molish, C. Oestges, and H. Özcelik, "Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems", *EURASIP*

*Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, pp. 1-19, 2007.

[9] M. F. Catedra, J. P. Arriaga, *Cell Planning for Wireless Communications*, Artech House, 1999.

[10] M. G. SBnchez, L. de Haro, A. G. Pino, and M. Calvo, "Exhaustive ray tracing algorithm for microcellular propagation prediction models", *Electronics Letters*, vol. 32, no. 7, pp. 624-625, Mar. 1996.

[11] 손해원, 명노훈, "마이크로셀 전파전파 모델을 위한 결정적인 ray tube 방법", *한국통신학회논문지*, 23(9), pp. 2637-2646, 1998년 9월.

[12] S. Y. Tan, H. S. Tan, "Improved three-dimensional ray tracing technique for microcellular propagation models", *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 17, pp. 1503-1505, 1995.

[13] 권세웅, 문현욱, 오재림, 임재우, 배석희, 김영규, 박정수, 윤영중, "가속 방법을 이용하는 전

파 광선 추적법에 관한 연구", *한국전자과학회 논문지*, 20(5), pp. 471-479, 2009년 5월.

[14] A. Formella, F. A. Agelet, and J. M. H. Rabanos, "Acceleration techniques for ray-path searching in urban and suburban environments to implement efficient radio propagation simulators", *COST255-CP-61b02*, 1999.

[15] K. H. Ng, E. K. Tameh, A. Doufexi, R. M. Hunukumbuk, and A. R. Nix, "Efficient multielement ray tracing with site-specific comparisons using measnukd MIMO cte-specdata", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 3, pp. 1019-1032, May 2007.

[16] F. A. Agelet, J. M. Hernando-Rabanos, F. I. de Vicente, and F. P. Fontan, "Efficient ray-tracing acceleration techniques for radio propagation modeling", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2089-2104, Jun. 2000.

## 권 세 웅

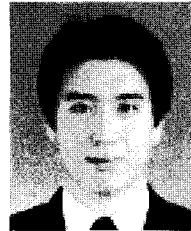


1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)  
 2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
 2009년 7월~현재: LIG넥스원 ISR

연구센터 선임연구원

[주 관심분야] 안테나, 레이더, 전파전파 등

## 오 재 림



2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)  
 2009년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 안테나, 전파전파

## 문 현 욱



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)  
 2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
 2007년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 안테나, 전파전파

## 윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)  
 1993년~현재: 연세대학교 전기전자

공학과 교수

[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파 등