

# 전자 빔 조향 기생 배열 안테나를 사용한 빔 다이버시티 수신기

안 창 영\*, 이 승 환\*, 유 흥 균<sup>o</sup>

## Beam Diversity Receiver Using 7-Element ESPAR Antenna

Changyoung An\*, Seung Hwan Lee\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

요 약

본 논문에서는 ESPAR 안테나를 사용하여 다이버시티 이득을 얻기 위한 수신기를 제안한다. 수신 신호의 방향이 추정될 경우 추정된 신호의 각에 근접하는 빔을 OFDM 심볼 주기 동안 순차적으로 형성하여 수신함으로써 다이버시티 이득을 얻는다. 제안하는 수신기는 다이버시티 이득을 얻기 위해 단 1개의 RF 체인을 사용한다. 그러나 이러한 방법으로 빔의 방향을 바꾸면서 신호를 수신 할 경우 신호의 스펙트럼이 확장되어 ICI(inter-channel interference)가 발생된다. 이러한 ICI는 주파수 영역의 등화기를 이용하여 등화 할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 추정된 DoA가 60°, 120°일 때 OFDM 심볼 주기 동안 60°의 빔과 120°의 빔을 순차적으로 형성하여 신호를 수신한 결과 다이버시티 성능을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

**Key Words** : ESPAR, beam diversity, OFDM, single RF chain, beam pattern

### ABSTRACT

In this paper, we propose receiver using ESPAR antenna for diversity gain. The proposed receiver receive signal by changing direction of beam pattern alternately in the OFDM symbol time period when DoA is estimated. In this way, the proposed receiver obtains diversity gain. The proposed receiver has single RF chain. If beam direction is changed alternately then it causes spectrum spread. And then, ICI occur because of spectrum spread. This interference can be equalized at the frequency domain equalizer such as ZF, MMSE and ML. In simulation, the proposed system receive signal using beam pattern of 60° and beam pattern of 120° alternately in OFDM symbol time period when it is assumed that DoA is 60° and 120°. The performance results confirm that it is possible that the proposed receiver obtains diversity gain.

### I. 서 론

OFDM 시스템은 최근 많이 사용하는 무선 LAN 및 LTE 환경에서 사용되고 있다. OFDM 시스템은 여러개의 부반송파를 이용하여 신호를 보내는 방법으로

다중 안테나 기술과 접목하여 현대 통신 시스템에서 매우 중요한 기술로 인정받고 있다<sup>[1]</sup>.

이러한 OFDM 시스템은 다중 안테나의 신호를 결합하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 그 중 최적의 방법으로 MRC(maximum ratio combining)방법이

※ “이 논문은 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음 (단말 안테나 고집적화를 위한 Compact MIMO 기술 개발).”

♦ First Author : 충북대학교 전자공학과, acy890217@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : 충북대학교 전자공학과, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

\* 한국전자통신연구원, lsh@etri.re.kr

논문번호 : KICS2013-10-440, 접수일자 : 2013년 10월 11일, 심사일자 : 2013년 12월 13일, 최종논문접수일자 : 2013년 12월 23일

잘 알려져 있다<sup>2)</sup>. 그러나 이러한 다이버시티 이득을 얻기 위한 방법은 추가적인 안테나를 필요로 하며 그에 따른 다수의 RF 체인 및 ADC 그리고 FFT 블록이 필요하게 된다. 이러한 방법은 시스템의 복잡도를 크게 증가시키게 된다.

다이버시티 이득을 얻기 위하여 다수의 안테나를 사용하는 대신 1개의 RF 체인을 갖는 ESPAR (electronically steerable parasitic array radiators) 안테나를 사용하여 다수의 RF 체인 및 ADC 그리고 FFT블록을 사용하는 문제점을 해결할 수 있다<sup>3)</sup>. ESPAR 안테나는 단일 RF 체인이 연결되는 1개의 능동 소자와 그 주변에 여러개의 기생 소자가 배치되어 있는 구조의 안테나이다. 주변의 기생소자에는 리액턴스 값이 인가되어 송신기에서 출력되는 신호의 빔을 형성 할 수 있다. 즉 원하는 방향으로 빔을 형성하여 신호를 집중 시킬 수 있다<sup>4)</sup>.

본 논문에서는 7소자 ESPAR 안테나를 사용하여 다이버시티 이득을 얻기 위한 수신기를 제안한다. 제안하는 수신기는 다이버시티 이득을 얻기 위하여 MUSIC(multiple signal classification)이나 ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques)에 의해 수신 신호의 방향이 추정될 경우 추정된 신호의 각에 근접하는 빔을 OFDM 심볼 주기 동안 순차적으로 형성하여 순차적으로 수신함으로써 다이버시티 이득을 얻는다. 제안하는 수신기는 다이버시티 이득을 얻기 위해 단 1개의 RF 체인을 사용한다. 그러나 이러한 방법으로 빔의 방향을 바꾸면서 신호를 수신 할 경우 신호의 스펙트럼이 확장되어 ICI(inter-channel interference)가 발생된다. 이러한 ICI는 주파수 영역의 등화기를 이용하여 등화 할 수 있다.

본 논문에서는 I장의 서론에 이어 II장에서 ESPAR 안테나에 대한 기본 적인 구조와 특성을 설명한다. III장에서는 제안하는 수신기를 설명하고 IV장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안하는 수신기의 성능을 확인한다. 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 전자 빔 조향 기생 배열 안테나

ESPAR 안테나는 단일 RF 체인을 갖는 안테나이다. M소자 ESPAR 안테나는 1개의 능동 소자와 M-1 개의 기생 소자로 구성되어 있다. 예를 들어 3소자 ESPAR 안테나는 1개의 능동 소자와 2개의 기생 소자로 구성되어 있다. 오직 1개의 RF 체인이 능동 소자에 연결된다. 각각의 기생 소자에는 리액턴스가 인

가된다. 이 리액턴스를 조절하여 빔 방향을 변화시킬 수 있다<sup>5)</sup>.

7소자 ESPAR 안테나는 1개의 능동 소자와 6개의 기생 소자로 구성되어 있다. 각 소자에 인가되는 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{i} = \mathbf{v}_s (\mathbf{Y}^{-1} + \mathbf{X})^{-1} \mathbf{u} \quad (1)$$

여기에서  $\mathbf{Y}$ 는  $M \times M$  행렬이며  $Y_{ij}$ 의 원소로 구성되어 있다. 각각의 원소는  $i$ 번째와  $j$ 번째 소자의 상호 어드미턴스를 나타낸다.

$$\mathbf{X} = \text{diag}[50 \quad jx_1 \quad \cdots \quad jx_{M-1}] \quad (2)$$

$\mathbf{X}$  행렬에서 첫 번째 인자 50은 능동 소자의 부하를 나타내며 그 뒤의 인자들은 각 소자에 인가되는 리액턴스 값으로 구성되어 있다.  $\mathbf{X}$  행렬의 리액턴스 값을 가변시켜서 빔 방향을 조절할 수 있다.

$\mathbf{v}_s$ 는 능동 소자에 인가되는 복소 전압을 나타낸다.  $\mathbf{u}$ 는 M개의 원소를 가지는 벡터로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{u} = [1_1 \quad 0_2 \quad \cdots \quad 0_M]^T \quad (3)$$

다음 그림 1은 7소자 ESPAR 안테나의 구조이다.

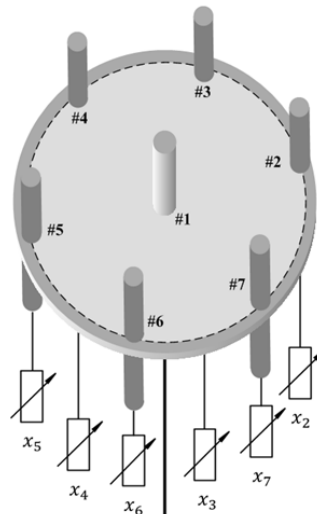


그림 1. 7소자 ESPAR 안테나  
Fig. 1. 7-element ESPAR antenna

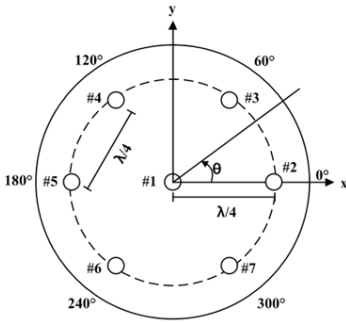


그림 2. 7소자 ESPAR 안테나의 구조  
Fig. 2. Structure of 7-element ESPAR antenna

ESPAR 안테나의 방사 패턴  $G(\theta)$ 는 다음과 같다<sup>6)</sup>.

$$G(\theta) = \mathbf{i}^T \mathbf{s}(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} i_m s_m(\theta) \quad (4)$$

여기에서  $\mathbf{i}$ 는 전류 벡터이다.  $\mathbf{s}(\theta)$ 는 조향 벡터로 다음과 같이 구성된다.

$$\mathbf{s}(\theta) = [s_0(\theta) \ \dots \ s_{M-1}(\theta)]^T \quad (5)$$

7소자 ESPAR 안테나의 조향 벡터는 다음과 같다<sup>7)</sup>.

$$\mathbf{s}(\theta) = [1 \ e^{jA\cos(\theta-0\pi/3)} \ \dots \ e^{jA\cos(\theta-5\pi/3)}]^T \quad (6)$$

여기서  $A$ 는  $2\pi d/\lambda$ 이다.  $d$ 는 각 소자간 거리이다.

### III. 제안하는 수신기

#### 3.1. 시스템 모델

그림 3은 제안하는 수신기의 블록도를 나타낸다. 제안하는 수신기는 7소자 ESPAR 안테나를 사용한다. 능동 소자에는 1개의 RF 체인이 연결된다. 신호는 OFDM을 사용한다. 수신된 신호는 단일 RF 체인을 통과한다. 그리고 ADC, FFT를 거쳐 등화를 하고 채널 복호화정을 거친다.

제안하는 수신기는 먼저 MUSIC이나 ESPRIT을 통하여 DoA(direction of arrival)을 추정한다. 본 논문에서는 DoA가 추정되었다고 가정한다. DoA가 추정되어진 후에 OFDM 신호의 심볼 주기 동안 순차적

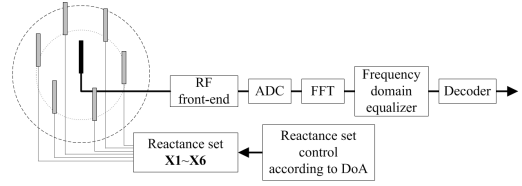


그림 3. 제안하는 수신기의 블록도  
Fig. 3. Block diagram of proposed receiver

으로 추정된 DoA와 근접한 방향의 패턴을 형성하여 신호를 수신한다. 만약 DoA가 60°와 120°라면 리액턴스 집합  $\mathbf{X}_2$ ,  $\mathbf{X}_3$ 를 순차적으로 인가하여 60°의 빔을 형성하여 OFDM 심볼 주기의 절반을 수신하고 120°의 빔을 형성하여 나머지 OFDM 심볼 주기의 절반을 수신하게 된다. 즉, DoA가 60°, 120°일 경우, 그림 4의 빔 패턴과 그림 5의 빔 패턴 모양으로 OFDM 심볼 주기 동안 순차적으로 변화시키면서 신호를 수신하게 된다.

표 1은 빔 패턴을 형성하기 위한 각 방향에 따른 리액턴스 값의 집합을 나타낸다<sup>8)</sup>.

다중 경로 채널에서 OFDM 신호들 중에 몇몇 부분

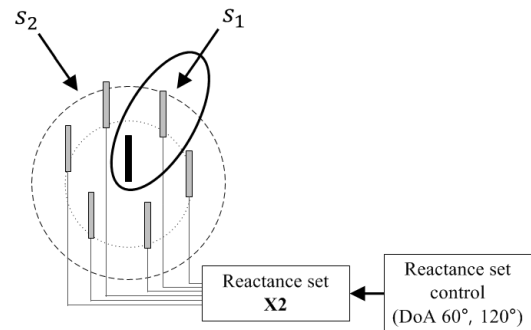


그림 4. 60도 방향의 신호를 수신할 경우의 빔 패턴  
Fig. 4. Beam pattern to receive 60° signal

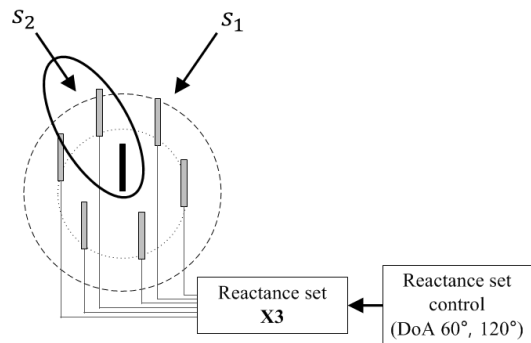


그림 5. 120도 방향의 신호를 수신하기 위한 빔 패턴  
Fig. 5. Beam pattern to receive 120° signal

표 1. 빔 패턴을 위한 리액턴스 값  
Table 1. Reactance values for beam patterns

directions	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
$0^\circ$ ( $\mathbf{X}_1$ )	-300	-300	300	300	300	-300
$60^\circ$ ( $\mathbf{X}_2$ )	-300	-300	-300	300	300	300
$120^\circ$ ( $\mathbf{X}_3$ )	300	-300	-300	-300	300	300
$180^\circ$ ( $\mathbf{X}_4$ )	300	300	-300	-300	-300	300
$240^\circ$ ( $\mathbf{X}_5$ )	300	300	300	-300	-300	-300
$300^\circ$ ( $\mathbf{X}_6$ )	-300	300	300	300	-300	-300

송파는 페이딩 된다. 일반적으로 다중 경로 페이딩 효과는 방향에 따라 다르게 나타나게 된다.

그림 6은 서로 다른 방향의 다중 경로 페이딩 채널을 통과한 신호의 스펙트럼을 나타낸다<sup>[3]</sup>. 그림 6과 같이 다른 방향으로 수신기에 도달하는 신호를 순차적으로 빔 방향을 변경하면서 수신한다. 이러한 방식으로 수신을 하면 두 방향 신호의 평균 신호를 수신하는 효과를 얻을 수 있다. 제안하는 방법을 사용할 경우 다중 경로 페이딩 된 부반송파를 복원할 수 있다. 그림 7은 빔 방향을 변경하면서 수신하였을 때 수신된 신호의 스펙트럼을 나타낸다. 빔 방향을 순차적으로 바꾸면서 신호를 수신할 경우 수신 신호의 스펙트럼이 확장된다. 이러한 스펙트럼의 확장은 인접 부반송파 간의 간섭을 일으킬 수 있다. 그러나 이러한 간섭은 주파수 영역 등화기를 사용하면 등화 할 수 있다. 능동 소자로 수신된 신호는 단일 RF 체인을 통과한 후 ADC, FFT과정을 순서대로 거치게 된다. 수신된 신호를 FFT할 경우 ESPAR 안테나의 빔 방향을 빠르게 바꾸면서 수신한 것 때문에 ICI가 발생하게 된다. 이러한 ICI는 채널 응답 추정 및 주파수 영역 등화를 사용해서 등화 한다.

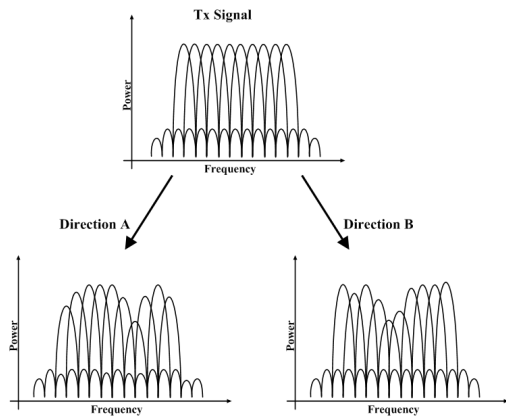


그림 6. 다중 경로 페이딩에 의해 변한 스펙트럼  
Fig. 6. Spectrum changed by multipath fading

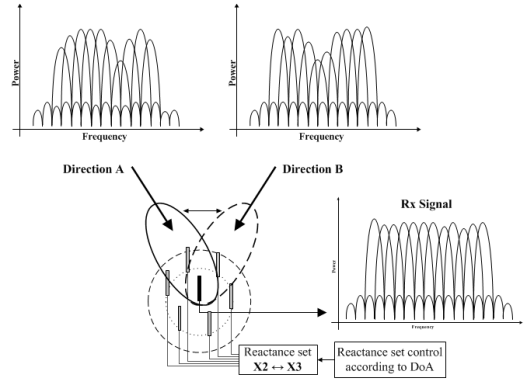


그림 7. 빔 방향을 변경하면서 수신한 신호의 스펙트럼  
Fig. 7. Spectrum of received signal when beam direction is changed sequentially

### 3.2. 채널 추정 및 보상

채널 응답을 추정하기 위해 파일럿 심볼을 사용한다. 파일럿 심볼은 채널을 통과하고 채널의 특성을 가지고 있다. 파일럿 심볼은 부반송파의 개수와 같은 인자를 갖는 벡터로 구성되어 있다. 수신된 파일럿 심볼은 다중경로 페이딩 채널을 통과한다. FFT과정 후의 수신된 파일럿 심볼은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}_m \mathbf{p} + \mathbf{n} \quad (7)$$

$\mathbf{H}_m$ 은 다중경로 페이딩 채널을 나타낸다.  $\mathbf{p}$ 는 파일럿 신호이다.  $\mathbf{n}$ 은 잡음을 나타낸다.

이 수신 받은 신호에서  $\mathbf{p}$ 를 알고 있기 때문에  $\mathbf{H}_m$ 를 추정할 수 있다. ZF(zero-forcing) 알고리즘으로 등화하기 위해 추정된  $\mathbf{H}_m$ 의 역행렬 값  $\mathbf{H}_m^{-1}$ 을 구해서 수신 받은 신호에 곱해줌으로서 데이터 신호  $\mathbf{d}$ 를 복원할 수 있다.

$$\mathbf{d} = \mathbf{H}_m^{-1} \mathbf{r} \quad (8)$$

이러한 주파수 영역의 등화 알고리즘은 ZF 뿐만 아니라 MMSE와 ML 방식을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 ZF 등화 알고리즘을 사용하고 그에 따른 시스템의 성능을 분석한다.

## IV. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서는 제안하는 7소자 ESPAR 안테나를 사용한 수신기의 성능을 확인하기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션 환경을 고려하였다. OFDM의 FFT 크

표 2. 시뮬레이션 환경  
Table 2. Simulation parameters

parameters	value
OFDM FFT size	64
Number of data subcarriers	48
Modulation type of subcarriers	QPSK
Path model	Two rays Rayleigh fading
Channel code	LDPC
Parity check matrix size	180 x 720
Distance of antennas	$\lambda/4$
Direction of arrival	60°, 120°
Equalization algorithm	ZF

기는 64를 고려하였으며 48개의 부반송파를 사용하였다. 각 부반송파에 할당되는 심볼은 QPSK로 변조된 심볼을 사용하였다. ESPAR 안테나는 6개의 기생 소자를 갖는 7소자 ESPAR 안테나를 사용하였다. 본 논문의 시뮬레이션에서 LDPC 복호의 반복은 1번으로 동일한 조건을 사용하였다.

그림 8은 표 1의 리액턴스 값에 대한 빔 패턴을 시뮬레이션을 통해 구한 것이다.  $X_1$ 의 리액턴스 집합을 인가하였을 경우 0°에서 가장 큰 빔이 형성되는 것을 볼 수 있으며 60°간격으로 각각의 리액턴스 집합에 따라 빔이 형성되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9는 표 1의 리액턴스 집합  $X_2, X_3$ 를 사용하였을 경우의 빔 패턴을 나타낸다. 본 논문에서는 수신 신호가 60°와 120°방향에서 도달한다고 가정하였기 때문에 60°와 120°의 빔 패턴을 사용한다. 신호의 도달 방향 DoA는 MUSIC이나 ESPRIT에 의해 추정되었다고 가정한다.

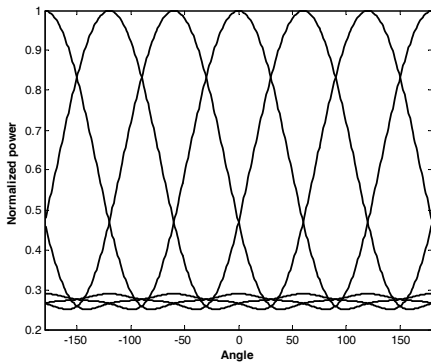


그림 8. 7소자 ESPAR 안테나의 6방향 빔 패턴  
Fig. 8. Six directive beam patterns of 7-element ESPAR antenna

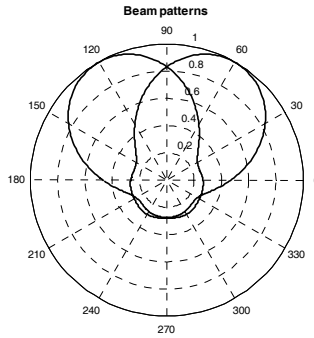


그림 9. 60°와 120°방향의 빔 패턴  
Fig. 9. Beam patterns of 60° and 120°

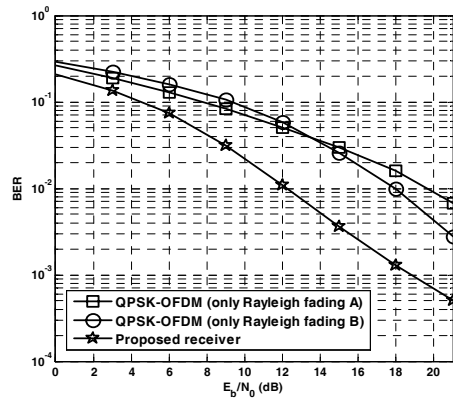


그림 10. 제안하는 수신기의 성능  
Fig. 10. BER performance of proposed receiver

그림 10은 제안하는 수신기의 성능을 나타낸다. Rayleigh fading A 채널을 통과한 신호만을 수신하였을 경우 20dB에서  $10^{-2}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. Rayleigh fading B 채널을 통과한 신호만을 수신하였을 경우 18dB에서  $10^{-2}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 수신기가 Rayleigh fading A, B 채널을 통과한 신호를 OFDM 심볼 주기 동안 번갈아가면서 수신하였을 경우 12dB에서  $10^{-2}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션의 결과에서 제안하는 수신기는 다이버시티 이득을 가지는 것을 확인할 수 있다.

## V. 결론

본 논문은 단일 RF 체인을 사용하는 7소자 ESPAR 안테나를 사용하여 추정된 DoA에 근접하는 방향으로 OFDM 심볼 주기 동안 빔을 순차적으로 형성하여 서로 다른 다중 경로 페이딩이 일어난 OFDM 신호를

수신하는 수신기를 제안하였다. 추정 된 DoA가 60°, 120°일 때 OFDM 심볼 주기 동안 60°의 빔과 120°의 빔을 순차적으로 형성하여 신호를 수신한 결과 다이버시티 성능을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

### References

[1] G. L. Stuber, J. R. Barry, S. W. McLaughlin, Y. Li, M. -A. Ingram, and T. G. Pratt, "Broadband MIMO-OFDM wireless communications," in *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 271-294, Feb. 2004.

[2] E. K. Al-Hussaini and A. Al-Bassiouni, "Performance of MRC diversity systems for the detection of signals with nakagami fading," *IEEE Trans. Communications*, vol. 33, no. 12, pp. 1315-1319, Dec. 1985.

[3] S. Tsukamoto, and M. Okada. "Single-RF diversity Receiver for OFDM system using ESPAR antenna with alternate direction," *Science 1* (2011): 1-2.

[4] K. Gyoda and T. Ohira, "Design of electronically steerable passive array radiator (ESPAR) antennas," in *Proc. Antennas and Propagation Society Int'l Symp.*, Salt Lake City, UT, USA, vol. 2, pp. 922-925, Jul. 2000.

[5] T. Ohira and K. Gyoda, "Electronically steerable passive array radiator antennas for low-cost analog adaptive beamforming," in *Proc. Phased Array Syst. and Technol.*, Dana Point, CA, USA, May 2000.

[6] C. Sun, H. Akifumi, T. Ohira, N. C. Karmakar, "Fast beamforming of electronically steerable parasitic array radiator antennas: theory and experiment," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 7, pp. 1819-1832, July 2004.

[7] R. Schlub, J. Lu, and T. Ohira, "Seven-element ground skirt monopole ESPAR antenna design from a genetic algorithm and the finite element method," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 11, pp. 3033-3039, Nov. 2003.

[8] Y. Ozaki, J. Ozawa, E. Taillefer, J. Cheng, and Y. Watanabe, "A simple DoA estimator

using adjacent pattern power ratio with switched beam antenna," in *Proc. 2010 Int'l Conf. Wireless Commun. and Signal Processing(WCSP)*, pp. 1-6, 21-23, Oct. 2010.

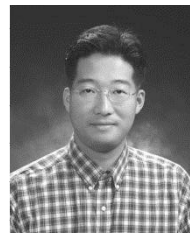
[9] T. H. Yoon, J. T. Pack, and E. K. Joo, "Analysis of Performance according to LDPC Decoding Algorithms," *J. KICS*, vol. 37, no. 11, pp. 972-978, Nov. 2012.

### 안 창 영 (Changyoung An)



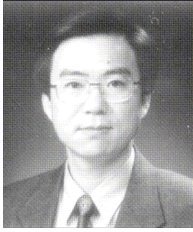
2013년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2013년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신시스템, 신호처리

### 이 승 환 (Seung Hwan Lee)



1995년 2월 : 고려대학교 전자공학과 (공학사)  
 1997년 2월 : 고려대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2007년 2월 : University of Edinburgh (공학박사)  
 2001~현재 : 한국전자통신연구원 무선간섭인지연구팀팀장  
 2010년~현재 과학기술연합대학원대학교 교수  
 <관심분야> Small cell networks, Compact MIMO, Cognitive Radio

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자  
공학과 교수

2002년 3월~2004년 2월 : 충북  
대학교 컴퓨터정보통신연구  
소 소장

1996년~현재 : IEEE, IET 논문  
심사위원

2002년 : 한국전자과학회 학술상 수상

2008년 : ICWMC 2008 국제학술대회 “Best Paper  
Award” 수상

2009년 : SPACOMM 2009 국제학술대회 “Best  
Paper Award” 수상

<관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이  
동통신시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리