

어레이 안테나 시스템에서의 와이브로/와이맥스 시스템을 위한 레인징 알고리즘

정회원 김재환*, 종신회원 최승원**

A Novel Ranging Algorithm for WiBro/WiMAX in Array Antenna System

Jaehwan Kim* *Regular Member*, Seungwon Choi** *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 와이브로 시스템을 위한 빠르고 정확한 레인징 알고리즘에 대해 소개한다. 제안된 알고리즘은 PRBS(Pseudo Random Binary Sequence)의 상관 특성과 DFT의 circular shift 특성을 이용하여 수신된 레인징 코드를 결정하고 전파 지연을 추정한다. 제안된 레인징 알고리즘을 어레이 안테나 시스템에 적용하여, 단일 안테나 시스템과 비교해 어떻게 레인징 성능을 향상시킬 수 있는지를 알아본다.

Key Words : Ranging, OFDM, WiBro, FFT

ABSTRACT

This paper presents a fast and accurate ranging algorithm for the WiBro system. The proposed algorithm detects a received ranging code and estimates its propagation delay using the correlation characteristics of the PRBS (Pseudo Random Binary Sequence) and the circular shift property of the discrete Fourier transform operator. The proposed ranging algorithm was applied to array antenna systems to show how it could improve the ranging performance of an array antenna system compared to a conventional base station system, which uses only a single antenna.

1. 서론

와이브로 시스템에서는 여러 명의 유저들이 각각의 부채널을 할당 받아 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 한 후 심볼을 형성하여 송신하게 된다. 그러면 기지국에서는 수신된 심볼들을 가지고 FFT를 수행하게 된다. 그런데 유저마다 셀 내에서 기지국과 떨어진 거리가 다르므로, 각각의 송신 심볼이 기지국에 도착하는 시간도 달라지게 된다. 이러한 심볼들을 시간 동기화 없이 FFT하게 되면 신

호의 위상이 왜곡되어 시스템의 성능이 크게 저하되게 된다. 따라서 기지국에서는 각 심볼들을 기지국의 FFT(Fast Fourier Transform) 시간에 동기화하는 것이 중요하다.

와이브로 시스템에는 ‘레인징’이라는 과정이 있는데, 특히 이니셜 레인징, 피리오딕 레인징이라는 과정을 통해서 상향링크 심볼들의 시간을 동기화한다. 유저는 랜덤한 레인징 코드를 선택하여 레인징 채널의 위치에 할당한 후, 레인징 심볼을 형성하여 송신하게 된다. 기지국에서는 총 256개 레인징 코드 각각과 상호 상관하여

* 본 연구는 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로써 HY-SDR 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었음

* LG전자 연구원(jaehwankim@lge.com), ** 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (* : 교신저자)

논문번호 : KICS2008-09-409, 접수일자 : 2008년 9월 17일, 최종논문접수일자 : 2009년 6월

단말기에서 어떠한 레인징 코드를 사용하였는지 찾고 심볼 타이밍 오프셋(전파 지연)도 찾게 된다. 기지국 시간 오프셋 정보를 단말기에 알려주고, 단말기는 송신 타이밍을 조절하여 심볼을 기지국에 전송한다^[1]. 최근 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 환경에서의 심볼 시간 동기화에 대한 연구가 많이 연구되어 왔다^[2,3]. 그러나 [2]는 FFT 이전의 OFDM 심볼내의 CP(cyclic prefix)와 CP를 만들기 위해 복사한 샘플의 상관 특성을 이용하여 심볼 시간 동기를 수행하는 방법으로 와이브로 시스템에서 채택하고 있는 OFDMA인 경우에는 적용할 수 없는 문제가 있고, [3]의 경우 가능한 전파 지연에 대한 상관 벡터를 구성하고, 이를 이용하여 레인징 코드를 수신하기 때문에 많은 계산량과 높은 복잡도로 인해 실제 구현에 어려움이 있다.

본 논문에서는 위와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 빠르고, 정확한 레인징 처리 알고리즘을 제안한다. 또, 이를 어레이 안테나 시스템에 적용한 레인징 채널 수신기의 구조를 제시하고, 그 성능을 분석한다.

섹션II에는 신호 모델링을 전개하고, 섹션III에서는 심볼 타이밍 오프셋을 추정하는 방법과 제안된 방법이 주파수 오프셋에 의해 받는 영향에 대해서 살펴본다. 섹션IV에서는 제안된 방법을 사용했을 때, 어레이 안테나 시스템에서 성능을 향상시키는 구조에 대해서 알아 보도록 한다. 섹션 V에서는 제안 구조의 성능을 분석하고, 마지막으로 VI에서 결론을 맺는다.

II. 신호 모델링

레인징 채널은 인접한 6개의 부채널로 구성되어 있다. 레인징 코드 벡터에는 144비트 길이를 갖는 레인징 코드가 256개 있으며, 코드 인덱스는 0~255이다. 각 유저는 랜덤하게 레인징 코드를 선택하여 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조한 후, 상향 프레임내의 레인징 채널에 할당한다^[1]. N개의 부반송파중 처음 N-144개 부반송파는 다른 유저의 데이터 신호이고, 나머지 부반송파들은 레인징 채널이라고 가정한다. 레인징 코드 벡터에 있는 코드 중 m 번째 코드를 선택해서 레인징 채널에 할당하고 IFFT 하면^[4], 송신 신호는 다음과 같다.

$$x_m[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X_m[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, n = 0, 1, \dots, N-1$$

$$X_m[k] = \begin{cases} 1 & \text{or } -1, N-144 \leq k \leq N-1 \\ 0 & , 0 \leq k < N-144 \end{cases} \quad (1)$$

단말기는 식 (1)과 같은 OFDM 심볼을 바탕으로 레인징 심볼을 만들어 전송하게 된다^[1]. 전송된 신호가 기지국까지 도달하는데 걸리는 시간(전파 지연)을 τ 라 하고, AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널을 가정하면 기지국에 수신된 신호는,

$$r[n] = x_m[n-\tau] + x_u[n] + w[n], n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

$x_m[n-\tau]$ 는 m번째 레인징 코드의 송신 신호, $x_u[n]$ 은 다른 유저가 레인징 채널을 제외한 다른 부반송파를 이용해서 전송된 심볼이고, 기지국과 시간동기가 이루어져 있다고 가정한다. $w[n]$ 은 잡음이다.

기지국 수신된 신호 $r[n]$ 을 FFT하면,

$$R[k] = \begin{cases} X_m[k] e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau} + W[k], & N-144 \leq k \leq N-1 \\ X_u[k] + W[k], & , 0 \leq k < N-144 \end{cases} \quad (3)$$

$W[k]$ 는 $w[n]$ 의 FFT 이후 값이고, $X_u[k]$ 는 $x_u[n]$ 의 FFT이후 값을 나타낸다.

III. 제안 레인징 알고리즘

3.1 Propagation Delay Estimation and Code Detection

기지국은 상향링크 프레임 내의 레인징 채널 위치와 모든 레인징 코드를 알고 있으므로, 코드 인덱스 $i = 0 \sim 255$ 에 대해, 식(3)에 $X_i[k]$ 를 곱한 것을 $H_i[k]$ 라 하면,

$$H_i[k] = R[k]X_i[k] \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

$$= \begin{cases} X_m[k]X_i[k] e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau} + W[k]X_i[k], & N-144 \leq k \leq N-1 \\ 0 & , 0 \leq k < N-144 \end{cases} \quad (4)$$

만약 $i = m$ 이면,

$$H_m[k] = R[k]X_m[k] \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

$$= \begin{cases} e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau} + W[k]X_m[k], & N-144 \leq k \leq N-1 \\ 0 & , 0 \leq k < N-144 \end{cases} \quad (5)$$

식(5)를 IFFT 하면,

$$h_m[n] = \frac{1}{N} \frac{1 - e^{j\frac{2\pi}{N}144(n-\tau)}}{1 - e^{j\frac{2\pi}{N}(n-\tau)}} + w[n] * x_m[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

식(6)에서 $n = \tau$ 일 때, $|h_m[n]|^2$ 이 최대값을 갖는다. 따라서, $|h_m[n]|^2$ 의 최대값이 임의의 임계값 보다 크면, 레인징이 시도 되었다는 것으로 판단하고, 전파 지연은 τ 로 결정한다. 이와 동시에 레인징에 사용된 코드를 알 수 있게 된다.

3.2 주파수 오프셋의 영향

주파수 오프셋은 주로 송신기와 수신기의 오실레이터의 차이와 도플러 확산에 의해 발생하게 된다. OFDM 기반 통신에서 주파수 오프셋은 ICI(Inter Carrier Interference)를 발생 시키는 주된 원인이 되므로^[5] 본 절에서는 제안된 알고리즘의 주파수 오프셋에 의한 성능 감소를 수식적으로 분석한다. 수식 전개 편의를 위하여 다른 유저의 신호 $x_n[n]$ 은 없다고 가정한다. 주파수 오프셋이 있을 때의 송신 신호 $x_m[n]$ 은^[6],

$$x_m[n] = \sum_{l=0}^{N-1} X_m[l] e^{j\frac{2\pi}{N}(l+\Delta k)n} \quad |\Delta k| < 1, \quad n = 0, 1, \dots, N-1$$

$$X_m[l] = \begin{cases} 1 & 0 \leq l < N-144 \\ 0 & N-144 \leq l \leq N-1 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, Δk 는 정규화된 주파수 오프셋이다. 전파 지연이 τ 일 때, 수신신호는,

$$r[n] = x_m[n-\tau] + w[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

식(8)을 FFT 하면,

$$\begin{cases} R[k] = \sum_{l=0}^{N-1} X_m[l] e^{-j\frac{2\pi}{N}(l+\Delta k)\tau} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}(l-k+\Delta k)m} + W[k], \quad N-144 \leq k \leq N-1 \\ = X_m[k] e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau} e^{-j\frac{2\pi}{N}\Delta k\tau} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}k m} \\ + \sum_{l=0}^{N-1} X_m[l] e^{-j\frac{2\pi}{N}(l+\Delta k)\tau} \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}(l-k+\Delta k)m} + W[k] \\ R[k] = W[k], \quad 0 \leq k < N-144 \end{cases} \quad (9)$$

식(9) $N-144 \leq k \leq N-1$ 에서, 식(3)과 비교하면, 첫 번째 항은 주파수 오프셋에 의한 신호의 크기

감소와 주파수 오프셋과 전파 지연에 의한 페이즈 쉬프트를 나타낸다. 두 번째 항은 ICI(Inter Carrier Interference)를 나타낸다. 첫 번째 항의 신호 크기 감소와 페이즈 쉬프트 부분을 $C_{\Delta k}$, 두 번째 항의 ICI 부분을 $Z[k]$ 로 표시하면,

$$\begin{cases} R[k] = C_{\Delta k} X_m[k] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}k\tau} + Z[k] + W[k], \quad N-144 \leq k \leq N-1 \\ R[k] = W[k], \quad 0 \leq k < N-144 \end{cases} \quad (10)$$

식(10)을 이용해서 제안된 알고리즘을 거치면 결과적으로 다음 식과 같게 된다.

$$h_m[n] = C_{\Delta k} \frac{1}{N} \frac{1 - e^{j\frac{2\pi}{N}144(n-\tau)}}{1 - e^{j\frac{2\pi}{N}(n-\tau)}} + z[n] * x_m[n] + w[n] * x_m[n] \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

$C_{\Delta k}$ 는 Δk 에 의해 결정되는 상수이므로, Δk 에 의해 $|h_m[n]|^2$ 의 최대값이 변하게 된다. Δk 가 1에 가까울수록 $C_{\Delta k}$ 이 0에 가까워진다. 그러므로 $|h_m[n]|^2$ 이 최대가 되는 n 으로 τ 를 구할 수 없게 된다. 그러나 실제로 주파수 오프셋은 1kHz 미만이다. [1]에서 신호의 전체 대역폭이 10MHz이고, 전체 부반송파 개수가 1024개이면 부반송파 간에 간격이 약 10kHz이다. 결국 Δk 는 0.1미만이 되는데, $\Delta k < 0.1$ 인 경우에는 $C_{\Delta k}$ 크기가 1에 가까우므로, $|h_m[n]|^2$ 이 최대가 되는 n 으로 τ 를 구할 수 있다. 따라서 제안된 알고리즘은 주파수 오프셋에 의해 크게 영향을 받지 않는다.

IV. 어레이 안테나 시스템에서의 레인징 제안 알고리즘

이번 섹션에서는 어레이 안테나 시스템에서 제안된 알고리즘의 성능을 향상시키는 구조에 대해 살펴보기로 한다.

송신 신호가 식(7)일 때, l 번째 안테나로 수신된 신호를 $r^l[n]$ 이라고 하면

$$r^l[n] = x_m[n-\tau] \cdot e^{-j2\pi(d^l/\lambda)\sin\theta_n} + w^l[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

d^l 은 l 번째 안테나와 기준 안테나 사이의 거리,

θ_m 은 DOA(Direction of Arrival), λ_c 는 신호의 캐리어 주파수에서의 파장을 각각 나타낸다. 식(12)의 수신신호를 이용하여 제안된 알고리즘 과정을 통해 나온 $h_m^i[n]$ 는,

$$h_m^i[n] = C_{\Delta k} \frac{1}{N} \frac{1 - e^{\frac{j2\pi}{N}144(n-\tau)}}{1 - e^{\frac{2\pi}{N}(n-\tau)}} \cdot e^{-j2\pi(d^i/\lambda_c)\sin\theta_m} + z^i[n] * x_m[n] + w^i[n] * x_m[n], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (13)$$

θ_m 이 균일 분포라고 가정하면, $h_m^i[n]$ 의 분포는 가우시안이 되고, $|h_m^i[n]|^2$ 의 분포는 자유도 2인 카이 제곱 분포가 된다. 그림 1과 같이 콤바인을 하면 $|h_m[n]|^2$ 은 2L 자유도인 카이 제곱 분포가 되고, 평균과 분산이 안테나 수에 따라서 거의 선형적으로 증가하게 된다. 그러므로 어레이 안테나 시스템에서 단일 안테나 시스템에 비해 성능이 증가하게 된다.

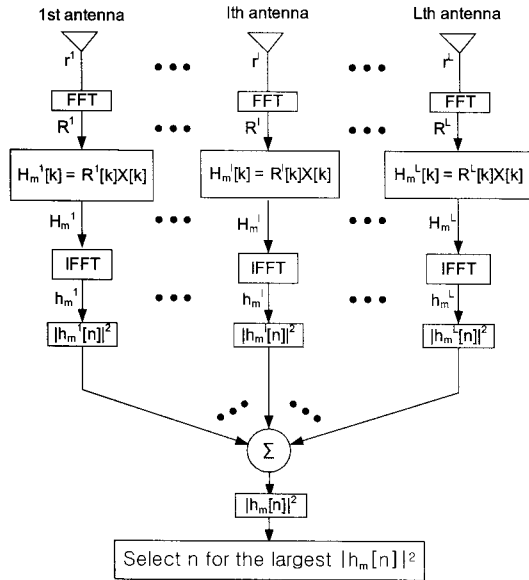


Fig. 1. Array Antenna System Structure on Ranging

V. 성능 분석

시뮬레이션에 사용된 부반송파의 수는 1024이고, CP(Cyclic Prefix) 길이는 256이다. 레인징 채널은 전체 부반송파 중 마지막 144개의 부반송파로 가정한다.

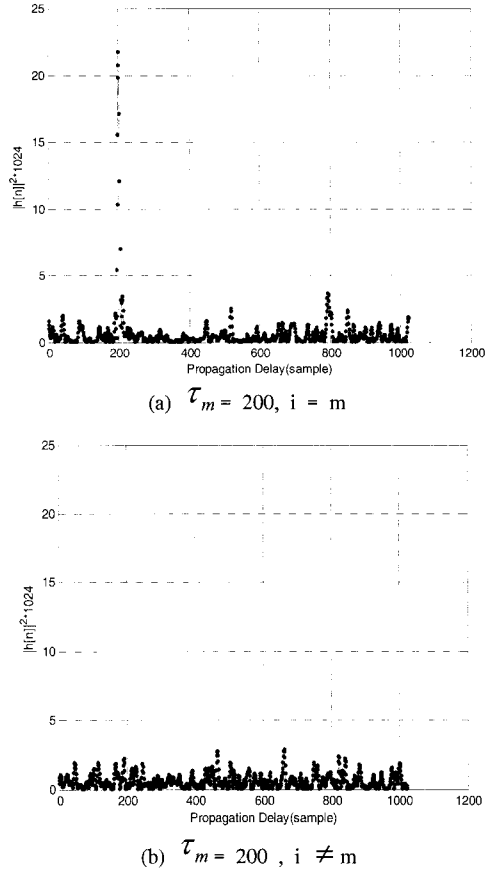


Fig. 2. Propagation Delay Estimation

그림 2(a)는 SNR = -5dB, $\tau_m = 200$ 이고, 송신신호에 사용된 코드와 수신신호에 곱해줄 때 사용된 코드가 같을 때, 즉 $i = m$ 일 때 $|h_m[n]|^2$ 을 나타낸 그림이고, (b)는 송신신호에 사용된 코드 이외의 코드를 사용했을 때 $|h_m[n]|^2$ 을 나타낸 그림이다. 그림 (a)에서 볼 수 있듯이 $|h_m[n]|^2$ 이 최대가 되는 위치가 전파 지연이라는 것을 알 수 있다.

그림 3은 SNR = -13dB일 때, 주파수 오프셋에 따른 Detection/False alarm probability 관계를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, $\Delta k < 0.1$ 인 경우에는 성능에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 확인 할 수 있다.

그림 4는 안테나 개수에 따른 레인징 채널 수신기의 정확한 전파 지연 추정 확률을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 구한 것이다. 전파 지연 추정 성능은 안테나 개수에 비례하여 증가함을 확인할 수 있다.

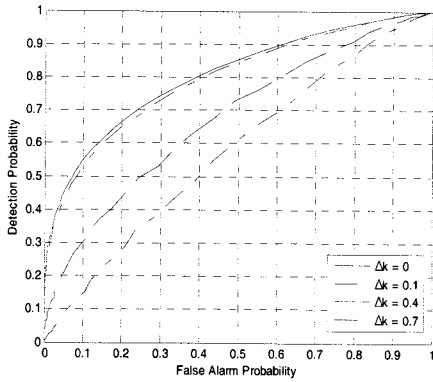


Fig. 3. Effect of frequency offset on proposed ranging algorithm

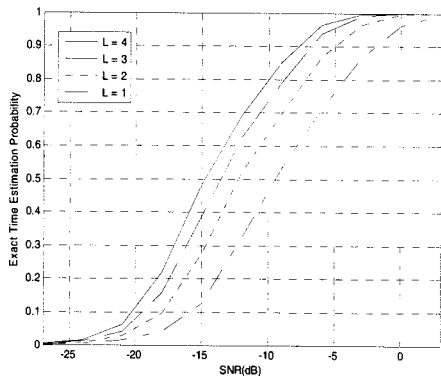


Fig. 4. Exact Time Estimation Probability on array antenna system

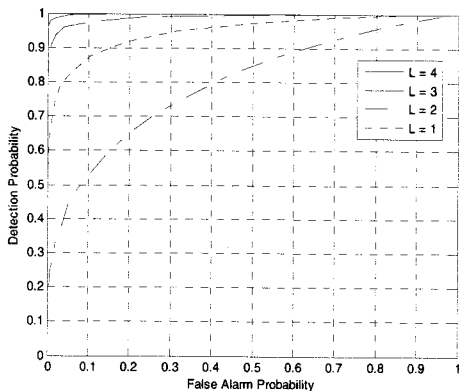


Fig. 5. Detection/False alarm Probability on array antenna system

그림 4를 통해, 어레이 안테나 시스템의 안테나 개수가 4개인 경우 90% 이상의 P_c 의 성능을 보장하기 위해서는 SNR -7.8dB 이상의 채널 환경이 요구된다. 이는 단일 안테나 시스템의 경우에 비해 약 5.8dB의 성능 증가를 의미한다.

그림 5는 SNR -13dB, 주파수 오프셋 0.1의 환경에서 안테나 개수에 따른 오경보 확률 P_f 대 검출확률 P_d 를 나타낸 것이다. 그림에서 안테나 개수의 증가가 ranging channel 수신기의 P_d 가 증가시킨다는 것을 확인할 수 있다.

VI. 결론

이 논문에서는 와이브로 시스템에서 AWGN 환경일 때, 각 유저별로 상향링크 시간동기를 획득하는 알고리즘, 제안된 알고리즘이 주파수 오프셋에 의해 받는 영향 그리고 어레이 안테나 시스템에서 제안된 알고리즘의 성능을 증가시키는 구조에 대해서 알아 보았다. 제안된 알고리즘은 잘 알려진 DFT cyclic shift property^[4]와 레인징 코드들 간에 상관 특성을 이용한 것이다. 제안한 방법은 실제 간단하게 구현될 수 있으며, 주파수 오프셋의 영향에도 강한 특성을 보인다. 또한, 어레이 안테나 시스템에서 제안된 구조가 단일 안테나에 비해 성능을 우수하다는 것을 시뮬레이션으로 확인하였다. 제안한 알고리즘에 대한 향후 연구는 실제 채널 상황인 페이딩 환경에서 제안 알고리즘의 성능이 검증되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] IEEE LAN/MAN Standard Committee, "Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," *IEEE std 802.16TM-2004*.
- [2] J.J. van de Beek, M. Sandell, and P.O.B. Orjesson, "ML estimation of timing and frequency offset in OFDM systems," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.45, pp.1800-1805, Jul. 1997.
- [3] Xiaoyu Fu and Hlaing Minn "Initial Uplink Synchronization and Power control(Ranging Process) for OFDMA Systems," *IEEE Communications Society, Globecom 2004*.
- [4] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer, with John R. Buck, *DISCRETE-TIME SIGNAL PROCESSING* - second edition, Prentice-Hall, Inc., 1999.
- [5] L. HANZO, M. MÜNSTER, B. J. CHOI and T. KELLER, *OFDM and MC-CDMA for*

Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting, John Wiley & Sons, Ltd, 2003.

- [6] P.H Moose, "A Technique for Orthogonal Frequency Division Multiplexing Frequency Offset Correction", IEEE Trans. Communications, Vol.42, No.10, October 1994.

김 재 환 (Jaehwan Kim)

정회원

2004년 2월 한양대학교 전자전
기컴퓨터 공학부 학사

2007년 2월 한양대학교 전자통
신컴퓨터 공학과 석사

2007년 1월~현재 LG 전자 연
구원

<관심분야> OMDM, 신호처리



최 승 원 (Seungwon Choi)

종신회원

1980년 2월 한양대학교 전자공
학과 학사

1982년 2월 서울대학교 전자공
학과 석사

1985년 12월 미국 Syracuse
Univ. 공과대학 석사

1989년 12월 미국 Syracuse
Univ. 공과대학 박사



1992년 9월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과
교수

2002년 7월~현재 HY-SDR 연구센터 센터장

<관심분야> SDR, 스마트 안테나, 신호처리, 이동통신