

상관값 누적 기반 DS-UWB 레이더 시스템

이 영 포*, 윤 석 호*, 이 성 로°

A DS-UWB Radar System Based on Correlation Accumulation

Youngpo Lee*, Seokho Yoon*, Seong Ro Lee°

요 약

본 논문에서는 선박 접안 유도 시스템 등 정밀한 거리 추정을 요하는 안전항해운항, 선박트래픽관리 등의 분야에 알맞은 상관값 누적 기반 직접 수열 초광대역 (direct sequence ultra wideband: DS-UWB) 레이더 시스템을 제안한다. 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템은 상관기 출력들을 누적하여 잡음을 평균냄으로써 잡음 성분의 영향을 줄이며, 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 더 빠른 시간에 신뢰성 있는 거리 추정을 수행한다. 모의실험 결과를 통해 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템이 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 평균 상관 처리 시간이 더 짧을 뿐 아니라, 더 좋은 거리 추정 성능을 보임을 확인한다.

Key Words : DS-UWB, radar, docking guidance system, correlation accumulation

ABSTRACT

In this paper, we propose a direct sequence ultra wideband (DS-UWB) radar system based on correlation accumulation in the fields of the ship traffic control and the safe ship operation including docking guidance systems. The proposed DS-UWB radar system averages out the noise by accumulating correlator outputs, and thus, provides a reliable distance estimation performance with a shorter estimation time compared with conventional DS-UWB radar systems. From numerical results, it is confirmed that the proposed DS-UWB radar system has not only a shorter average correlation processing time, but also a better distance estimation performance.

I. 서 론

직접 수열 초광대역 (direct sequence ultra wideband: DS-UWB) 레이더는 높은 시간 분해능을 가지기에 차량 레이더, 보안 센서 등의 거리 추정 기기에 널리 이용되고 있다^[1,2]. 최근에는 UWB 기반 레이더를 선박 접안 유도 시스템에 적용하는 등 정밀한 거리 추정을 요하는 안전항해운항, 선박트래픽관리 등의 분야에서 이용하는 것에 대한 연구가 활발히 진행

되고 있다^[3]. DS-UWB 레이더에서는 의사잡음 (pseudo noise: PN) 수열을 사용하며, PN 수열의 길이가 길수록 더 높은 상관 이득을 얻을 수 있어 보다 신뢰성 있는 거리 추정을 수행할 수 있다. 그러나 긴 PN 수열을 이용하기 위해서는 긴 상관 처리 시간이 (correlation processing time) 필요하며^[4], 선박과 장애물 간의 충돌을 피하기 위해 빠른 거리 추정을 수행해야 하는 선박 접안 등의 분야에는 적합하지 않다.

최근에는 다양한 길이의 PN 수열들을 이용하는 기

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0301-13-1005)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0029321)

◆ 주저자 : 성균관대학교 정보통신대학, leeyp204@skku.edu, 학생회원

° 교신저자 : 목포대학교 정보전자공학과, srlee@mokpo.ac.kr, 정회원

* 성균관대학교 정보통신대학, syoon@skku.edu, 종신회원

논문번호 : KICS2013-01-025, 접수일자 : 2013년 1월 14일, 최종논문접수일자 : 2013년 3월 8일

법들이 [5]-[6]에서 제안되어 왔으며, 한 개의 긴 길이 PN 수열을 이용하는 대신 여러 개의 다양한 길이 PN 수열들을 거리 추정치의 표준 편차에 따라 선택하는 방식을 채용함으로써 추정 성능은 유지하면서도 상관 처리 시간을 줄였다. 그럼에도 불구하고 기존의 기법들은 낮은 신호 대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 환경에서는 거리 추정치의 표준 편차가 크기에 성능 유지를 위해서는 긴 길이의 PN 수열을 사용해야 하며, 여전히 상관 처리 시간이 길다는 문제가 있다.

본 논문에서는 상관값 누적에 기반한 새로운 DS-UWB 레이더 시스템을 제안한다. 각 상관값의 잡음 성분들은 독립적이라고 가정될 수 있으므로, 누적을 통해 잡음을 평균냄으로써 잡음 성분의 영향을 줄일 수 있으며, 이를 통해 낮은 SNR 환경에서도 긴 길이의 PN 수열을 이용하지 않고, 한 개의 짧은 길이 PN 수열만을 이용하여 상관 처리 시간을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 한 개의 짧은 길이 PN 수열을 채용하여, 상관값을 누적한 후 거리를 추정함으로써 기존 기법들보다 상관 처리 시간이 짧은 DS-UWB 레이더 시스템을 제안하며, 모의실험을 통해 제안한 기법이 기존의 기법들에 비해 상관 처리 시간이 더 짧을 뿐 아니라 누적 횟수를 늘림에 따라 더 좋은 root mean square error (RMSE) 성능을 가짐을 확인한다.

이후 이 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 DS-UWB 레이더 시스템의 구조와 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템을 설명한다. III장에서는 제안한 시스템과 기존의 시스템에 대한 평균 상관 처리 시간 및 RMSE 성능을 모의실험한 결과를 비교하며, 마지막으로 IV장에서 이 논문의 결론을 내린다.

II. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템

DS-UWB 레이더는 UWB 펄스에 의사잡음부호를 곱한 형태의 DS-UWB 신호를 이용하여 거리를 측정한다. 그 시스템의 형태는 그림 1에서 나타내는 바와 같다. DS-UWB 레이더는 하나의 장비에서 신호를 송신하고 물체에 반사되어 들어온 신호와의 시간 차이를 이용하여 물체와의 거리 D 를 측정한다. DS-UWB 신호는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{E_c} \sum_{j=0}^{N-1} p_j g(t - jT_c), \quad (1)$$

여기서 N 과 E_c 는 각각 PN 수열의 주기와 칩 (chip) 에너지를 나타내고, p_j 는 ($p_j \in \{-1, 1\}$) j 번째 칩, T_c 는 칩 구간을 나타내며, $g(t)$ 는 $[0, T_c]$

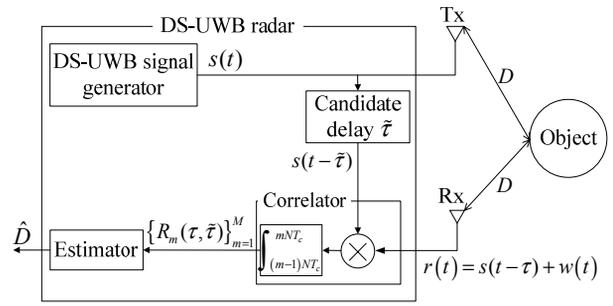


그림 1. DS-UWB 레이더 시스템 블록도
Fig. 1. Block diagram of DS-UWB radar systems.

구간에서 1의 에너지를 갖는 UWB 펄스 파형으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$g(t) = \left[1 - 4\pi \left(\frac{t - T_c/2}{\gamma} \right)^2 \right] \exp \left[-2\pi \left(\frac{t - T_c/2}{\gamma} \right)^2 \right], \quad (2)$$

여기서 γ 는 시간 정규화 인자로서 칩 구간 내에 전체 펄스 에너지의 99.99%가 포함될 수 있도록 설정되었으며 그 값은 $\sqrt{4\pi}/7T_c$ 이다⁷⁾. DS-UWB 신호 $s(t)$ 는 물체에 반사되어 시간 지연 τ 이후 레이더로 돌아오며, 수신 신호 $r(t)$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$r(t) = s(t - \tau) + w(t), \quad (3)$$

여기서 $w(t)$ 는 평균이 0이고 전력 밀도가 $N_0/2$ 인 덧셈꼴 백색 가우스 잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN) 과정이다. 오류 없이 시간 지연 τ 를 추정한다면, 레이더와 물체와의 거리는 $c\tau/2$ 로 계산되며, 여기서 c 는 빛의 속도를 나타낸다. 시간 지연 τ 를 추정하기 위하여 상관기에서는 국소 (local) 신호인 $s(t - \tilde{\tau})$ 와 수신 신호와의 상관을 구한다. 여기서 $\tilde{\tau}$ 는 시간 지연에 대한 후보값으로 $\Delta = \{0, T_c, 2T_c, \dots, (N-1)T_c\}$ 중 하나의 값으로 설정된다. 이를 통해 구한 m 번째 상관값 $R_m(\tau, \tilde{\tau})$ 은 $m = 1, 2, \dots, M$ 에 대하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_m(\tau, \tilde{\tau}) = \int_{(m-1)NT_c}^{mNT_c} r(t)s(t - \tilde{\tau}) dt \quad (4)$$

$$= E_c S(\tau, \tilde{\tau}) + W_m$$

여기서 M 은 상관 개수를 나타내고, $S(\tau, \tilde{\tau})$ 는 $g(t)$

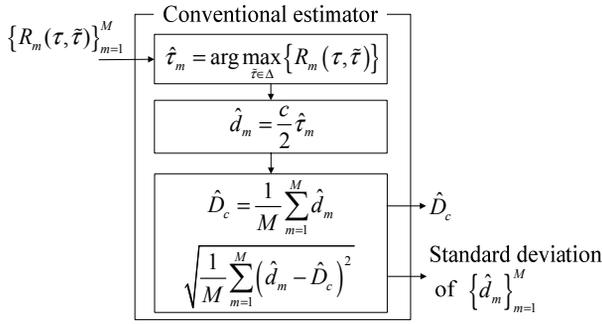


그림 2. 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들의 추정기 구조
Fig. 2. The structure of estimator in conventional DS-UWB radar systems.

의 자기상관함수로서 아래와 같이 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$S(\tau, \tilde{\tau}) = \begin{cases} \left[1 - 4\pi \left(\frac{\tilde{\tau} - \tau}{\gamma} \right)^2 + \frac{4\pi^2}{3} \left(\frac{\tilde{\tau} - \tau}{\gamma} \right)^2 \right] e^{-\pi \left(\frac{\tilde{\tau} - \tau}{\gamma} \right)^2} & \text{for } |\tilde{\tau} - \tau| \leq T_c \\ 1 & \text{for } |\tilde{\tau} - \tau| > T_c \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $\{W_m\}_{m=1}^M$ 은 평균이 0이고 분산이 $NT_c N_0 / 2$ 인 독립적이고 동일한 분포를 가지는 가우시안 랜덤 변수이다. 마지막으로 추정기는 $\{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}_{m=1}^M$ 을 이용하여 거리 추정치 \hat{D} 을 구한다.

그림 2에서는 기존 DS-UWB 레이더 시스템의 추정기 구조를 나타낸다. 기존의 레이더 시스템에서는 $\{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}_{m=1}^M$ 를 개별적으로 사용하여 $\hat{\tau}_m = \arg \max_{\tilde{\tau} \in \Delta} \{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}$ 연산을 통해 시간 지연에 대한 추정치들 $\{\hat{\tau}_m\}_{m=1}^M$ 를 구하고, 이를 이용하여 M 개의 거리 추정치들 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M = \{c\hat{\tau}_m/2\}_{m=1}^M$ 을 구한다. 최종적으로는 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 평균을 취한 후 거리 추정치인 \hat{D}_c 를 구한다. 추가적으로 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 표준 편차를 구하여 PN 수열의 길이를 선택한다.

그림 3은 제안하는 DS-UWB 레이더 시스템의 추정기 구조를 나타낸다. 제안하는 DS-UWB 레이더는 기존의 레이더 시스템들과 달리 상관값들을 누적하여 하나의 시간 지연 추정치 $\hat{\tau}$ 와 하나의 거리 추정치 \hat{D}_p 만을 연산한다. 구체적으로는 M 개의

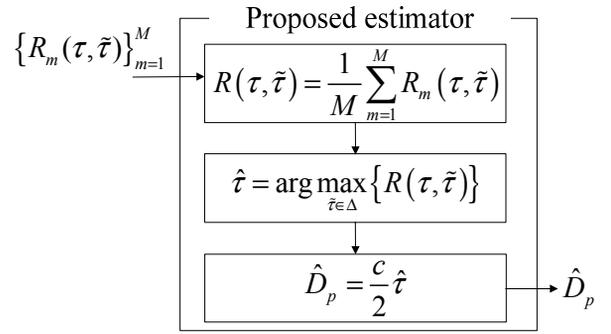


그림 3. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템의 추정기 구조
Fig. 3. The structure of estimator in the proposed DS-UWB radar system.

상관값들 $\{R_m(\tau, \tilde{\tau})\}_{m=1}^M$ 을 아래와 같이 누적하여 누적된 상관함수 $R(\tau, \tilde{\tau})$ 을 생성한다.

$$R(\tau, \tilde{\tau}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M R_m(\tau, \tilde{\tau}). \quad (6)$$

제안한 DS-UWB 레이더 시스템은 $\hat{\tau} = \arg \max_{\tilde{\tau} \in \Delta} \{R(\tau, \tilde{\tau})\}$ 연산을 통해 시간 지연 추정치 $\hat{\tau}$ 를 구한 후, $\hat{D}_p = c\hat{\tau}/2$ 연산을 통해 거리 추정치를 구한다. $R(\tau, \tilde{\tau})$ 은 $R_m(\tau, \tilde{\tau})$ 에 비하여 $1/M$ 의 잡음 분산을 가지며, 이를 통해 동일한 길이의 PN 수열이 적용되는 경우에는 제안한 DS-UWB 레이더 시스템이 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 더 좋은 거리 추정 성능을 가질 것으로 기대할 수 있다. 즉, 기존의 DS-UWB 레이더 시스템은 거리 측정을 위해 개별적인 거리 추정을 반복한 후, 그 평균을 최종 거리 추정치로 사용하기 때문에 개별적인 거리 추정이 어려운 환경에서 거리 측정의 정확도가 떨어지는 문제가 있으나, 제안한 시스템은 상관값의 누적을 통해 이를 극복한다.

III. 모의실험 결과

본 장에서는 기존의 DS-UWB 레이더 시스템과 제안한 DS-UWB 레이더 시스템의 평균 상관 처리 시간 (average correlation processing time: ACPT) 및 RMSE 성능을 비교한다. ACPT는 거리 추정치 \hat{D} 을 구하기 위해 소요되는 평균적인 시간을 의미하고, RMSE는 $\sqrt{E[(D - \hat{D})^2]}$ 이며, 여기서 $E[\cdot]$ 는

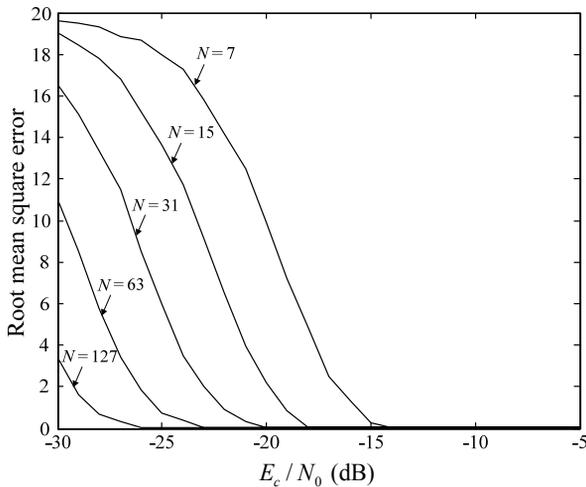


그림 4. PN 수열 길이에 따른 제안한 DS-UWB 레이더 시스템의 RMSE 성능
 Fig. 4. RMSE performances of the proposed DS-UWB radar system with PN sequences with various length

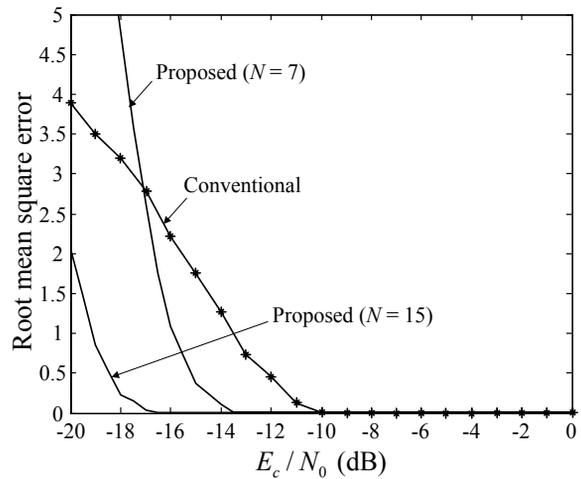


그림 6. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템과 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들의 RMSE 성능
 Fig. 6. RMSE performances of proposed and conventional DS-UWB radar systems

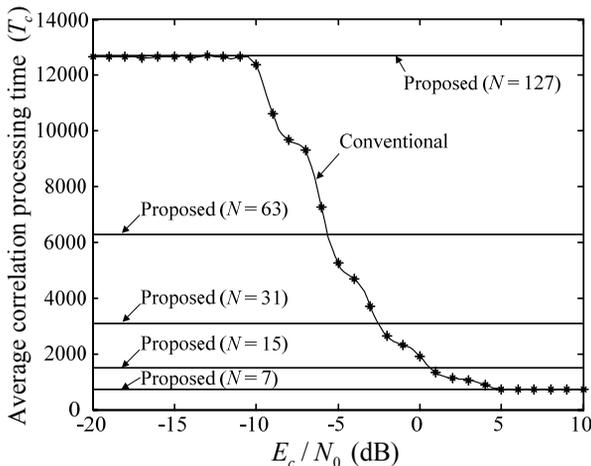


그림 5. 제안한 DS-UWB 레이더 시스템과 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들의 ACPT 성능
 Fig. 5. ACPT performances of proposed and conventional DS-UWB radar systems

통계적 기댓값을 나타낸다. 모의실험을 위해 다음과 같은 파라미터들을 고려한다: $D=30$ meter, $M=100$, $N=7, 15, 31, 63, 127$ chip. 또한, 기존 DS-UWB 레이더의 최적 성능과 성능을 비교하기 위하여 모의실험을 통해 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 표준 편차에 대한 최적 기준값을 구하여 적용하였다.

우선 제안한 DS-UWB 레이더 시스템에 대하여 PN 수열 길이에 따른 RMSE 성능을 그림 4에서 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 사용하는 PN 수열의 길이가 길수록 RMSE 성능이 더욱 향상되는 것을 알 수 있다. 그러나 긴 길이의 PN 수열을 사용할수록 ACPT가 커지기 때문에 적절한 길

이의 PN 수열 길이를 설정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 기존의 DS-UWB 레이더와 RMSE 및 ACPT 성능을 비교하고, 적절한 PN 수열 길이를 설정하는 것에 대한 예시를 제시하였다.

그림 5와 6은 각각 제안한 DS-UWB 시스템과 기존의 DS-UWB 시스템들의 ACPT 및 RMSE 성능을 나타낸다. 기존의 시스템들은 다양한 길이의 PN 수열을 사용하는데 비해 제안한 시스템은 하나의 PN 수열만을 이용하기 때문에 그림 5에서 ACPT 값이 SNR인 E_c/N_0 에 상관없이 상수로 나타난다. 그림 5와 6으로부터 15 칩 길이의 PN 수열을 채용한 제안한 시스템은 관심 SNR 영역인 -20 dB ~ 0 dB E_c/N_0 영역에서 기존의 시스템들에 비해 ACPT가 작을 뿐 아니라, 더욱 우수한 RMSE 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 기존의 시스템은 $\{\hat{d}_m\}_{m=1}^M$ 의 표준 편차가 클 때는 127 칩의 긴 PN 수열을 사용함에도 불구하고 짧은 15 칩 길이의 PN 수열만을 이용하는 제안하는 시스템에 비해 더 나쁜 성능을 보인다. 이러한 성능의 차이는 기존의 시스템들은 각각의 개별 상관값들로부터 거리 추정치를 얻어 평균을 내지만, 제안한 시스템은 상관값들을 누적하여 잡음 성분들의 영향을 줄여 거리 추정치를 얻는 구조적인 차이로부터 기인한다.

IV. 결론

본 논문에서는 짧은 상관 처리 시간을 가지는 DS-UWB 레이더 시스템을 제안하였다. 기존의

DS-UWB 레이더 시스템들은 개별적인 상관기 출력값들을 이용해서 개별적인 거리 추정치들을 획득하였으나, 제안한 DS-UWB 시스템은 상관기 출력들을 누적하여 잡음을 평균냄으로써 잡음 성분의 영향을 줄였다. 모의실험 결과를 통해 제안한 DS-UWB 레이더 시스템은 기존의 DS-UWB 레이더 시스템들에 비해 ACPT가 더 작을 뿐 아니라, 더 좋은 RMSE 성능을 보임을 확인하였다.

References

[1] M. G. M. Hussain, "Ultra-wideband impulse radar: An overview of the principles," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 13, no. 9, pp. 9-14, Sep. 1998.

[2] I. Y. Immoreev, S. Samkov, and T.-H. Tao, "Short-distance ultrawideband radars," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 20, no. 6, pp. 9-14, June 2005.

[3] D. S. Shin, S. R. Lee, I. Oh, and M. A. Jung, "Implementation of testbed of guidance system for docking of ship using location based UWB sensor," *J. KICS*, vol. 35, no. 9, pp. 1314-1321, Sep. 2010.

[4] S. J. Xu, Y. Chen, and P. Zhang, "Integrated radar and communication based on DS-UWB," in *Proc. Int. Conf. Ultrawideband Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*, pp. 142-144, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2006.

[5] Y. Nakayama and R. Kohno, "Novel variable spreading sequence length system for improving the processing speed of DS-UWB radar," in *Proc. Int. Conf. Intell. Transport Syst. Telecommun. (ITST)*, pp. 357-361, Phuket, Thailand, Oct. 2008.

[6] J. Tsuchiya, M. Hayashi, and R. Kohno, "Platoon characteristics of automatic vehicle speed control for vehicles equipped with DS-UWB radar," in *Proc. Int. Symp. Spread Spectrum Techniques Applicat. (ISSSTA)*, pp. 125-130, Taichung, Taiwan, Oct. 2010.

[7] H. Chen, T. A. Gulliver, W. Li, and H. Zhang, "Performance of ultra-wideband communication systems using DS-SS PPM with BCH coding over a fading channel," in

Proc. Military Commun. Conf. (MILCOM), pp. 1-5, Washington, DC, Oct. 2006.

[8] B. Hu and N. C. Beaulieu "Accurate evaluation of multipleaccess performance in TH-PPM and TH-BPSK UWB systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 10, pp. 1758-1766, Oct. 2004.

이 영 포 (Youngpo Lee)



2008년 2월 성균관대학교 정보통신공학부 공학사
 2010년 2월 성균관대학교 휴대폰학과 공학석사
 2010년 3월~현재 성균관대학교 휴대폰학과 박사 과정
 2008년 11월 한국통신학회 하계종합학술발표회 우수논문상 수상

2009년 12월 IEEE Seoul Section Student Paper Contest 대상 수상
 2011년 4월 CTRQ 국제학술대회 Best Paper Award 수상
 2011년 12월 아이디스 전자신문 대학(원)생 과학기술&IT 논문공모 대제전 최우수상 수상
 <관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리

윤 석 호 (Seokho Yoon)



1997년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학사 (최우등)
 1999년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학석사
 2002년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 공학박사
 2002년 3월~2002년 6월 MIT

박사후 연구원
 2002년 7월~2003년 2월 Harvard University 박사후 연구원
 2003년 3월~현재 성균관대학교 정보통신대학 전자전기공학부 전임강사, 조교수, 부교수
 2007년 IEEE 준석학회원
 2009년 한국통신학회 LG 학술상 수상
 2011년 교육과학기술부 우수연구 인종패 수상
 2012년 한국통신학회 우수논문상 수상
 <관심분야> 통신 이론, 이동통신, 통계학적 신호처리

이 성 로 (Seong Ro Lee)



1987년 2월 고려대학교 전자공
학과 공학사

1990년 2월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학석사

1996년 8월 한국과학기술원 전
기및전자공학과 공학박사

1997년 9월~현재 목포대학교

공과대학 정보전자공학과 교수

<관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신시
스템, USN/텔레미틱스응용분야, 임베디드시스템,
생체인식시스템