

레이더 펄스 압축 기술의 Barker Code에 관한 연구

김민수* · 구용서* · 이영철**

A Study on Barker Code of Radar Pulse Compression Technique

Min-Soo Kim* · Ryung-Seo Koo* · Young-Chul Rhee**

요 약

레이더에서 거리분해능은 정확한 목표물 구분을 위해 판단하는 중요한 성능 파라미터이다. 기존의 아날로그 방식의 레이더시스템의 한계를 극복하기 위해, 현대 레이더 시스템 설계 목표는 적은전송전력으로 거리분해능을 향상시키는 것으로 펄스압축기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 수신단에서 목표물 구분을 위해 펄스압축기술에 사용되는 송신신호의 변조방식은 크게 FM방식과 PM방식으로 나뉠 수 있다. 본 논문에서는 PM방식인 Barker Code를 이용하여 펄스압축 신호처리모듈을 구현하고 분석하였다.

ABSTRACT

Range resolution is important performance parameter to distinguish a target accurately. The destination of modern radar systems, to overcome the limitations of existing analog radar systems, is to improve the range resolution of the distance with low transmission power. For that reason, the research on pulse compression techniques is briskly studying. In the Receiver, modulation system of transmitted signal which has used in pulse compression technique is divided PM and FM to distinguish a target. In this paper, We analysed and designed the pulse compression signal processing module using the Baker Code which is the one of PM method's.

키워드

Pulse compression, Barker Code, Sidelobe Suppression, Phase modulation
펄스압축, 바커코드, 부엽 억제, 위상 변조

1. 서 론

일반적으로 아날로그 방식의 펄스-레이더(Pulse-Radar)는 높은 거리 분해능(range resolution)을 얻기 위해 고출력의 협대역 펄스가 사용되나, 협대역 펄스를 사용하면 평균전송전력을 감소시켜 탐지 거리가 짧아지는 단점이 있었다[1-2]. 현대 디지털 레이더 시스템 설계 동향은 적은전송전력으로 거리 분해능을 향상시키고 넓은 탐지거리 영역을 확보하는 것으로,

평균전송전력은 레이더 수신기의 신호대잡음비(SNR)에 직접적으로 연관되기 때문에 충분한 거리분해능을 유지하면서 펄스폭을 증가시켜야 한다[3-4]. 반도체 기술의 발달과 DSP 및 FPGA와의 접목이 가능해짐에 따라 적은전송전력으로 펄스-레이더와 동일한 높은 거리 분해능을 확보할 수 있는 펄스압축기술(Pulse Compression Technique)이 각광받고 있다[5-8]. 펄스압축기술은 그림 1과 같이 송신 시 신호의 변조 과정을 통해 펄스폭을 확장하여 전송하고, 수신시 최

* 경남대학교 정보통신공학과(msigah@naver.com)

접수일자 : 2013. 01. 12

심사(수정)일자 : 2013. 03. 25

게재확정일자 : 2013. 04. 22

적의 SNR을 얻기 위한 정합필터의 상관관계(auto-correlation)을 통해 출력에서 펄스압축 효과를 얻을 수 있는 기술이다.

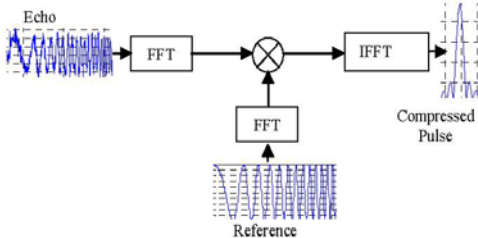


그림 1. 펄스압축기술의 개념
Fig. 1 Concept of pulse compression

펄스압축방식은 변조기법에 따라 크게 FM(Frequency Modulation) 방식과 PM(Phase Modulation)방식으로 나뉜다. FM방식은 주파수를 시간에 따라 증가시켜 도플러효과에 강한 신호수준을 제공하는 반면, 클러터(clutter)의 영향을 많이 받기 때문에 부엽(sidelobe)추가적인 가중치 함수가 필요로 한다. 반면, PM방식은 펄스 내부의 위상을 송신시간에 따라 변화시키는 방식으로 FM방식에 비해 도플러 효과에 민감하나, 부엽특성이 우수하여 속도를 예측하거나 도플러 효과가 적은 목표물을 추적하는데 우수하다[9-10].

본 논문에서는 레이더 시스템의 수신단에 적용하기 위해 추가적인 가중치 함수가 필요 없이 간단히 구현할 수 있는 PM방식 중의 하나인 Barker Code를 이용하여 펄스압축 신호처리모듈을 구현하고 분석하고자 한다.

II. 레이더 신호

아날로그 방식의 펄스-레이더는 그림 2와 같이 펄스를 보내고 반사되어 돌아오는 에코 신호를 분석하여 정보를 얻는다.

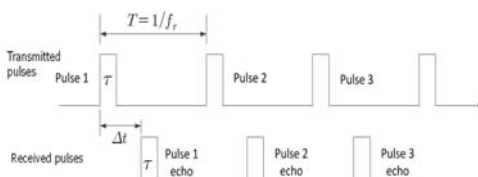


그림 2. 일반적인 아날로그 펄스-레이더
Fig. 2 General analog pulse-radar

일반적인 아날로그 펄스-레이더의 평균 전송전력은 다음과 같다.

$$P_{av} = P_t \times \frac{\tau}{T} \tag{1}$$

여기서 P_t 는 전송 전력, τ 는 펄스폭, T 는 펄스의 한주기이다. 이에 따른 거리 분해능은 다음과 같다.

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{2B} \tag{2}$$

여기서 c 는 빛의 속도를 나타내고 B 는 밴드폭을 나타낸다. 대상의 형태와 크기를 정의하기 위해 레이더는 충분한 분해능을 가져야 한다. 위 수식(2)에서 보이듯이 높은 분해능을 얻기 위해서는 펄스폭이 좁아져야 하며 펄스폭이 좁아지면 더욱 정확한 거리 분해능을 구현할 수 있다. 하지만 수식(1)에서 볼 수 있듯이 펄스의 최고 출력과 시간길이 모두 포함하는 펄스에너지에 비례한 최대거리의 분해능을 향상시키기 위하여 펄스폭이 좁아 졌을 때 평균전송전력이 줄어들어 레이더의 탐지거리가 줄어드는 단점이 있다. 따라서 평균전송전력을 유지하여 탐지거리를 유지하게 되면 분해능이 나빠지고 거리 분해능을 높이기 위하여 펄스폭을 줄여 협대역 펄스를 사용할 경우 분해능은 높아지나 탐지거리의 감소를 가져올 수 있다. 레이더 송신기 기술은 단일펄스의 에너지 혹은 평균 전력에 미치는 영향 보다 최대 전력에 제한되어 있기 때문이다.

레이더의 정확도는 레이더 펄스의 전송되는 에너지에 의하여 결정된다. 정확도는 평균 송신전력의 송신기 듀티 사이클에 의한 최대전력 곱의 형태로 나타낼 수 있다. 비록 최대 송신 전력이 매 100kw 이상 높더라도 대부분의 짧은 레이더 전송 펄스를 가지기 때문에 전송된 평균 전력은 전력값의 1%보다 작게 전달되어 효율이 낮아지게 된다. 넓은 수신기 대역폭은 레이더 수신기를 둔감하게하고, 감지 범위가 줄어들게 된다. 레이더 송신기는 감도를 보상하기 위하여 높은 수준의 첨두전력을 전송하도록 해야 한다. 펄스 압축 레이더는 전송기의 첨두전력 제한 내에 매우 짧은 펄스폭이 가지는 대부분의 장점을 가지기 위해 Barker 코드와 같은 특정 신호 처리 기법을 이용한다. 펄스 압축 레이더에 의해 갖게 되는 짧은 펄스의 장점으로 우수한 분해능과 넓은 탐지 거리를 얻게 된다.

나. 펄스 압축의 개념

그림 4는 펄스 압축처리의 개념을 나타내고 있다. 레이더 시스템에서 짧은 펄스폭과 큰 최대전력을 지닌 파형을 전송하려면 수신단에서는 높은 거리 분해능과 양호한 검파성능을 갖는다. 펄스압축이란 이러한 파형 대신에 긴 펄스폭과 적은 최대 전력을 지닌 파형을 전송하여도 동일한 거리 분해능과 검파성능을 얻게 하는 레이더 방식을 말한다.[5] 펄스 압축 레이더는 긴 펄스를 송신하기 때문에 평균전력을 효과적으로 사용할 수 있고 또 송신기에서 높은 첨두전력을 만들 필요가 없으며, 펄스 반복주파수(PRF : Pulse Repetition Frequency)를 높이거나 레이더의 탐지거리를 감소시키는 일이 없이 평균전력을 높일 수 있다. 펄스 압축을 사용하는 레이더는 긴 펄스를 사용함으로써 도플러(doppler) 분해능도 높일 수 있을 뿐만 아니라 코딩 신호를 사용함으로써 간섭신호에 대한 취약성도 줄일 수 있다. 따라서 펄스 압축 시스템은 전송파형의 대역폭을 증가시키기 위하여 파형을 변조하고, 수신된 파형을 압축하는 시스템이다.[7] 레이더에서 얻어지는 거리 분해능은 다음의 수식을 따른다.

$$\delta = \frac{c}{2B} \tag{6}$$

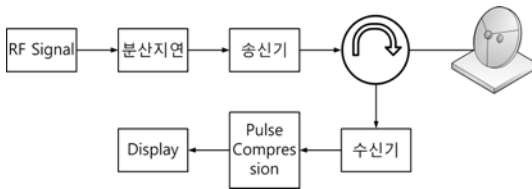


그림 3. 펄스 압축처리 개념 구성
Fig. 3 Pulse compressing concept formation

여기서 c 는 빛의 속도이며, B 는 전송 파형의 대역폭이다. 일반적으로 펄스 레이더에서는 전송파형의 펄스폭이 T 일 때 대역폭 B 는 $1/T$ 가 된다. 펄스압축 레이더는 펄스폭이 T 인 파형을 전송하고 수신단에서 어떠한 장치를 통하여 펄스 폭 τ 인 압축된 파형을 얻음으로써 결국 펄스폭이 τ 인 파형을 전송하는 레이더 시스템과 같은 거리 분해능을 가지게 된다. 펄스폭 τ 에 대한 전송된 파형의 펄스폭 T 의 비를 펄스 압축비(CR : pulse Compression Ratio)라 하며 다음과 같이 표시한다.

$$CR = \frac{T}{\tau} \tag{7}$$

또한 전송파형의 전체 전력은 최대 전력이 P 이고, 펄스폭이 T 일 때, PT 로 주어진다. 각각 동일한 최대 전력을 갖는 파형을 전송하고 수신단에서의 거리 분해능도 같다고 할 때, 펄스 시스템에서 전송되는 전체 전력에 대한 압축 시스템에서 전송되는 총 전력비는 다음과 같다

$$CR = \frac{PT}{P\tau} = \frac{T}{\tau} \tag{8}$$

펄스압축에서 전송파형의 대역폭 B 와 수신기의 유효 펄스 폭 τ 와의 관계는 $\tau = \frac{1}{B}$ 이므로, 펄스 압축비는 다음과 같다.

$$PCR = TB \tag{9}$$

(4)식에 의하여 볼 때, 넓은 의미의 펄스 압축비는 전송파형의 펄스 폭과 대역폭 간의 곱이라고 할 수 있다. 그러므로 펄스 레이더인 경우 PCR 은 1이고, 펄스 압축 레이더인 경우 CR 은 1보다 큰 임의의 값을 가지게 된다. 그림 5는 낮은 전력의 넓은 에너지 구간을 가지는 신호를 펄스 압축을 통하여 높은 전력의 짧은 구간의 전력으로 변환 한 것이다. 레이더 신호를 Barker 코드를 삽입하여 낮은 전력의 넓은 구간으로 신호를 퍼뜨리고, 수신신호에 Barker 코드를 곱하여 펄스 신호를 압축하게 되면 수신된 신호 중 Barker Code는 사라지게 되고, 높은 전력을 갖는 신호만 남게 된다.

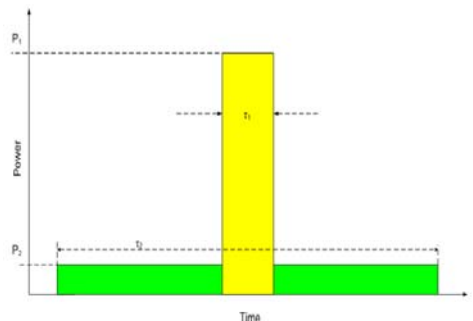


그림 4. 펄스 압축을 사용한 신호의 변형
Fig. 4 Transformation of using pulse compression signal

다. Barker Code

표 1. 바커 코드
Table 1. Barker Code

Length	Codes	
2	+1-1	+1+1
3	+1+1-1	
4	+1+1-1+1	+1+1+1-1
5	+1+1+1-1+1	
7	+1+1+1-1-1+1-1	
11	+1+1+1-1-1-1+1-1+1-1	
13	+1+1+1+1+1-1-1+1+1-1+1-1	

펄스 압축 레이더를 위하여 비주기 상관함수의 침두부엽이 주어진 코드 길이 내에서 가능한 한 최소가 되는 이진 시퀀스를 사용하여야 한다. 자기상관함수 또는 영 도플러 응답의 부엽이 낮게 나타나는 코드가 펄스 압축 레이더에서 요구되는 코드이다.[6] 표 1은 Barker 코드를 나타낸다. Barker 코드는 이진부호를 세분화한 특별한 종류로서 자기상관 함수의 최대값은 N 이고, 최소 침두부엽 크기는 1 이다. 여기서 N 은 부엽의 수 또는 부호의 길이를 의미한다. Barker 코드는 펄스 압축 레이더에서 가장 이상적인 경우로서, 13보다 긴 Barker 부호는 없다. 그리고 이 Barker 부호를 사용하는 펄스 레이더는 최대 펄스 압축비가 13으로 제한되어 있다.

III. 디지털 레이더용 신호처리 모듈 구현

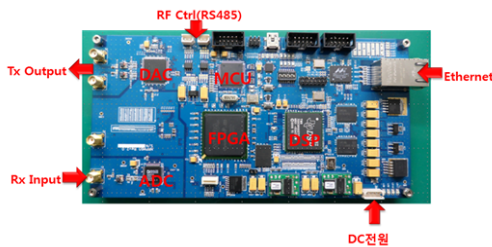


그림 5. 신호처리 모듈
Fig. 5 Signal processing module

본 논문에서 사용한 신호처리 모듈 다음과 같다. FPGA는 Altera 사의 Cyclone III를 사용하였으며, RS485 인터페이스를 사용하여 RF트랜시버와 SSPA제

어 신호를, Tx단에서 레퍼런스 신호를 출력한다. Rx 포트에서 들어오는 신호를 DSP처리하여, MFD신호를 생성하고, Ethernet 단자로 MFD신호를 출력한다.

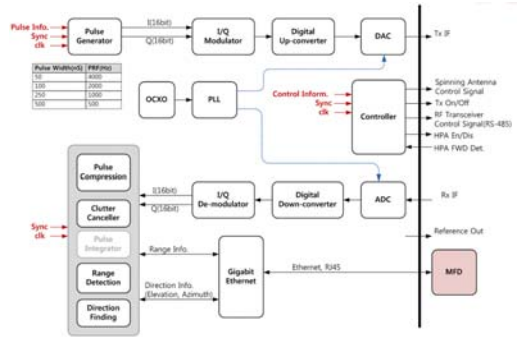


그림 6. 신호처리모듈 구성도
Fig. 6 Signal processing module diagram

신호처리의 구성도는 그림 7과 같다. 펄스 생성기는 수신단의 펄스 압축을 위해 펄스 분산 역할을 하는 Barker 코드를 삽입한다. 펄스 코드의 정보는 MFD로부터의 거리 정보 PRR(Pulse Repetition Rate) 또는 펄스폭에 따라 코드의 길이는 달라진다. I/Q Modulator는 Barker 코드 삽입으로 인해, 실제 정보 신호만 존재한다. Band limit 신호의 생성 및 펄스 압축의 정확도를 위해 Raised cosine filter를 채택하였다. 그림 8의 왼쪽은 Digital Upconversion 후의 DAC 출력으로 시뮬레이션 상의 DAC 출력을 보여준다. 시뮬레이션 상에서 $-\pi/2 \sim +\pi/2$ 로 나타나 주파수가 뒤집혀 있는 것처럼 보인다. 오른쪽 PSA에 찍힌 DAC 출력을 보면 시뮬레이션대로 이루어졌다는 것을 알 수 있다.

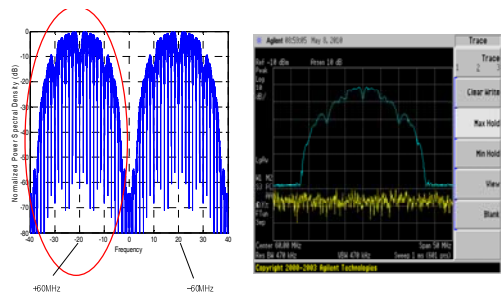


그림 7. DAC 출력
(왼쪽) 시뮬레이션 (오른쪽) 실제 측정
Fig. 7 DAC output
(Left) simulation (Right) Measurement

그림 8은 펄스 압축 후의 신호를 나타낸다. 펄스 압축은 ADC로부터 수신 받은 데이터를 Down conversion, LPF를 거쳐 펄스 압축한 데이터는 신호처리 과정에서 필터링으로 인해 시스템 딜레이가 나타나게 된다.

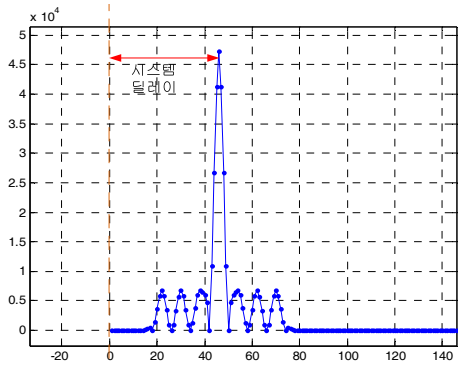


그림 8. 펄스 압축 후의 신호 딜레이
Fig. 8 Signal delay after the pulse compression

IV. 시험 결과

가. 지연측정

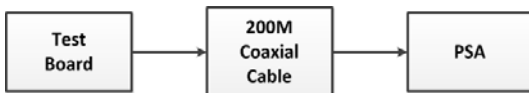


그림 9. 테스트 환경의 구성
Fig. 9 Organization of the test environment

본 논문에서, 디지털 레이더용 DSP의 송수신 딜레이를 측정할 RF장치 및 반사 매개체가 없으므로, 그림 10과 같이 디지털 보드에서 할 수 있는 자체 테스트를 구성하였다. 200미터 동축 케이블을 딜레이로 가정하고, 디지털 보드에서 측정된 딜레이와 NA(Network Analyzer)의 측정값과 비교를 하였다. NA에서 측정된 동축 케이블 딜레이는 812.75us였다. 디지털 보드에서 케이블 딜레이 측정은, 보드 자체의 시스템 딜레이와 케이블 연결하였을 때의 딜레이의 차를 구하여 계산하였다. 그림 11은 FPGA에서 시스템 딜레이 관련한 내부 신호를 보여준다.

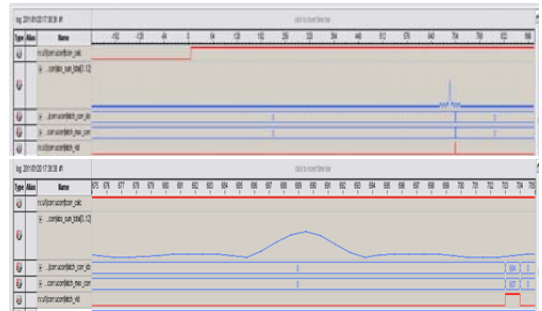


그림 10. FPGA의 신호 내부의 딜레이 신호
Fig. 10 Delay signal of the inside of the signal of FPGA

그림 12는 2번째 신호가 펄스 압축의 최대값이며 3번째 신호가 최대값이 delay를 나타낸다. FPGA 내에서 684 샘플 딜레이로 계산이 나왔고, 시스템 클럭이 80MHz로 동작되므로 $684 * 0.0125us = 8.55us$ 의 시스템 딜레이가 계산되었다. 이를 이용하여 동축 케이블의 지연을 계산하면, $(751-684) * 0.0125us = 0.8375us$ 로 계산이 된다. 이는 NA가 측정한 812.75us와 거의 흡사한 결과를 보여준다.

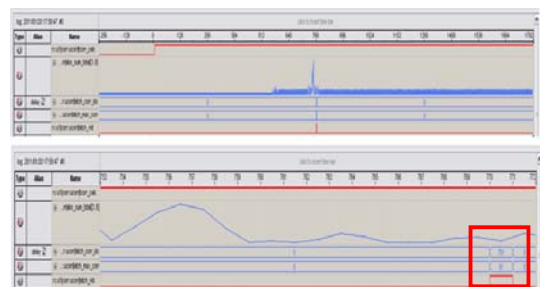


그림 11. 제작한 지연 케이블을 이용한 딜레이 측정 결과
Fig. 11 Delay result of measurement of using the delay cable

V. 결론

본 논문에서는 디지털 레이더에 적용할 수 있는 디지털 신호처리모듈을 구현하였다. 펄스 압축 알고리즘은 PM방식 중 하나인 Barker 코드를 사용하였으며, Matlab을 이용하여 시뮬레이션을 하였으며, 실제 데이터와 측정값을 비교하였다. 송수신 간의 지연시간을

측정을 하기 위하여 RF장치 및 반사 매개체 대신 200m 동축 케이블을 사용하여 테스트를 하였다. 내부 신호를 측정하여, 구현한 디지털 레이더 시스템에 적용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고 문헌

[1] Nadaw Levanon, Eli Mozeson, "radar signals", Wiley. pp. 53-167, 2004.

[2] Jerry. L. Eaves, Edward K. Reedy, Principles of Modern Radar, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 498-499, 1987.

[3] Kretschmer, F.F., Jr, New radar pulse compression waveforms, Radar Conference, 1988., Proceedings of the 1988 IEEE National, pp. 194-199, 20-21, Apr 1988.

[4] Byron Edde, Radar Principles, Technology, Applications, Prentice Hall, pp. 541-548, 1993.

[5] merrill skolnik, "Radae Handbook Third Edition", McGraw-Hill, pp. 8.1-8.44, 2008.

[6] Chen Xiao Hua, A new algorithm to optimize Barker code sidelobe suppression filters, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, pp. 673-677, July 1990.

[7] Hung-Wen Chen, "High-quality pulse-compression of pre-chirped pulses in fiber-amplifiers", Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2012 Conference on, pp. 1-2, 6-11, May, 2012.

[8] Qadir, S.G., Kayani, J.K. Malik S. "Digital Implementation of Pulse Compression Technique for X-band Radar," Applied Sciences & Technology, 2007. IBCAST 2007. International Bhurban Conference on. 10.1109 / IBCAST. 2007. 4379904

[9] Nakagawa, K. Hanado, H. Takahashi, N. Satoh, S. Fukutani, K. Iguchi, T. "Development of a C-band Polarimetric and Pulse Compression Radar in Okinawa, Japan", Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on . July 31 2006-Aug. 4, 2006.

[10] Hafez, A.E.S, "New radar pulse compression codes by particle swarm algorithm", Aerospace Conference, 2012 IEEE, pp. 1-7, 3-10, March, 2012.

[11] Hyunchul Bae. Jaekwon Kim. Jinwook Burm, "The enhancement of Signal-to-Noise Ratio of SAW tags using 5-bit Barker code sequence", Microwave Conference (EuMC), 2010 European, 28-30, Sept. 2010,

[12] Rihaczek, A.W, Range Sidelobe Suppression for Barker Codes, Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, pp. 1087-7082, Nov. 1971.

[13] 장연길, 이영철, "고속 전송선로의 신호 왜곡과 신호 보전에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 7권, 2호, pp. 213-219, 2012.

[14] 김태진, 이영철, 김선호, "도플러 효과를 이용한 마이크로파 센서의 구현", 한국전자통신학회논문지, 4권, 2호, pp. 22-23, 2009.

[15] 김민수, 장연길, 이영철, "선박 레이더용 60W X-band Cascade SSPA 구현", 한국전자통신학회논문지, 7권, 1호, pp. 1-7, 22, 2012.

[16] 황인덕, 김창환, "FMCW 레이더 주파수합성기용 델타-시그마 변조기의 시뮬레이션", 한국전자통신학회논문지, 7권, 4호, pp. 707-714, 2012.

[17] 김민수, 이영철, "로드-폴을 이용한 X-Band GaN HEMT의 최적 임피던스 분석", 한국전자통신학회논문지, 6권, 5호, pp. 621-627, 2011.

[18] 김현태, 이근후, 박장식, 유윤식, "가우시안 혼합 모델과 수학적형태학 처리를 이용한 터널 내에서의 차량검출", 한국전자통신학회논문지, 7권, 5호, pp. 967-974, 2012.

[19] 김규영, 김재호, 박장식, 김현태, 유윤식, "유클리디안 척도를 이용한 차량 추적", 한국전자통신학회논문지, 7권, 6호, pp. 1293-1299, 2012.

저자 소개



김민수(Min-Soo Kim)

2011년 경남대학교 대학원 정보통신공학과 졸업(공학석사)
2011년~현재 경남대학교 대학원 정보통신공학과 박사과정

※ 관심분야 : 전력증폭기, 신호처리, 레이더



구용서(Ryung-Seo Koo)

1985년 조선대학교 전자공학과 졸업
(공학사)

2011년 경남대학교 대학원 정보통신
공학과 졸업(공학석사)

2011년~현재 경남대학교 대학원 정보통신공학과(박
사과정)

1989년~현재 국방기술품질원 연구원

※ 관심분야 : 전력증폭기, 신호처리, 레이더



이영철(Young-Chul Rhee)

1981~현재 경남대학교 정보통신공학
과 교수

※ 관심분야 : 능동소자 설계 및 응용, 반도체 레이더 시
스템