

# 고속통신을 위한 FM-QCSK 카오스 통신 시스템

장은영\*

Design of FM-QCSK Chaotic Communication System for high-speed communication

Eun-Young Jang\*

요 약

FM-QCSK(: Frequency Modulated Quadrature Chaos Shift Keying) 시스템은 여러 가지 카오스 통신 시스템 중에서 효율적인 시스템의 하나이다. 그러나 이 시스템의 문제점 중 하나는 반 비트기간 동안을 카오스 기준 신호를 전송하기 위해 사용하여 결과적으로 에너지 손실을 증가시키고 데이터율을 감소시킨다.

본 논문에서는, 새로운 구조의 FM-QCSK 시스템을 제안하여 성능향상을 확인한다. 제안된 방식은 기존의 FM-QCSK보다 낮은 BER(: Bit Error Rate) 및 작은 에너지 소비와 더 높은 데이터율로 동작 할 수 있을 것이다. 제안된 카오스 변조방법에 의한 FM-QCSK의 변형은 기본적인 동위상 및 직교 위상 채널 모두에서 다중 정보신호들을 전송하기 위해 하나의 카오스 참조 신호를 사용하는 것이다. 결과는 제안된 방법이 AWGN채널에서 전반적으로 BER= $10^{-3}$ 일 때 SNR이 3dB정도 이득이 있는 것을 확인 하였다. 또한 참조 신호당 보낼 수 있는 최적의 정보신호의 수가 8임을 확인하였다.

## ABSTRACT

The FM-QCSK(: Frequency Modulated Quadrature Chaos Shift Keying) system is one of the most efficient systems in chaotic literature. One of the problems in this system is that half the bit duration is used for sending a chaotic reference signal which leads to increase the energy losses and reduces the data rate. In this paper, a novel scheme to enhance the performance of FM-QCSK system has been proposed. With the proposed scheme, FM-QCSK would be able to operate at higher data rates with reduced BER(: Bit Error Rate) and energy consumption. The basic modification introduced by the proposed scheme is the use one reference chaotic signal to transmit multi information signals in both in-phase and quadrature-phase channels. The results showed that the proposed scheme have achieved more than 3 dB gains in SNR for AWGN channels respectively at BER= $10^{-3}$  over the conventional one. The results also showed that the optimum number information signals can be send per reference signal is 8.

## 키워드

Chaos-base communication, DCSK, QCSK, FM-QCSK  
카오스 통신, DCSK, QCSK, FM-QCSK

## 1. 서 론

기존의 통신기술은 성능개선을 위하여 시스템의 선형성을 이용하였으며 비선형 시스템은 선형화하여

\* 교신저자 : 신라대학교 전자공학과  
• 접수일 : 2015. 08. 24  
• 수정완료일 : 2015. 10. 13  
• 게재확정일 : 2015. 10. 23

• Received : Aug. 24, 2015, Revised : Oct. 13, 2015, Accepted : Oct. 23, 2015  
• Corresponding Author : Eun-Young Jang  
Dept. of Electronic Engineering, Silla University,  
Email : electronlab@silla.ac.kr

사용하였다. 그러나 이러한 기술들이 한계에 부딪치게 되면서 비선형 시스템을 연구하기 시작하였으며 그 중 하나가 카오스 시스템이다. 카오스 신호는 보기에는 불규칙적이지만 나름대로의 규칙성을 가지고 있으며 광대역성이고 비주기적이다. 또한 초기 조건에 매우 민감하여 초기조건을 알지 못할 경우 미래의 값을 예측하기 불가능하지만 초기조건을 알고 있다면 미래의 값 또한 예측이 가능하다. 이러한 특성으로 인해 하나의 카오스 신호 발생기에서도 상호 상관성이 낮은 많은 카오스 신호를 생성할 수 있다. 이는 사용자의 신호 감지가 어려워지고 도청확률을 낮춰 보안성이 우수하며, 다중 경로 채널과 전파 방해에 강한 특성을 갖게 한다. 광대역 통신 시스템에 카오스 시스템을 적용하는 방법은 캐리어 신호 대신 카오스 신호를 사용하여 데이터를 변조하는 것이다. 카오스 기반 통신 시스템들은 점점 더 많은 방법으로 여러 영역에서 적용되고 있으며 많은 변조 방법이 제안되고 있다[1-2].

카오스 천이 변조(CSK : Chaos Shift Keying) 신호가 비트 에너지의 추정에 기반한 검출을 할 때 검출기의 임계값은 잡음 레벨에 따라 달라져야 한다. 그렇지 않으면 더 많은 에러가 생길 수 있다. 이 문제를 극복하기 위해서 차동 CSK(Differential CSK) 변조 기법이 제안되었다. DCSK는 일정한 임계값을 갖는 반면, 비트 폭에 대한 샘플수가 증가하기 때문에 SNR은 개선되는 반면 데이터율이 감소하는 현상이 발생한다. DCSK의 잡음 성능을 향상시키기 위해, 주파수 변조를 이용하여 카오스 신호의 캐리어 비트 당 일정한 에너지를 가지는 FM-DCSK 제안되었다[3].

DCSK는 하나의 심볼에 카오스 신호와 1비트의 정보신호를 확산하여 전송하기 때문에 전송 심볼 수가 많아져 데이터율이 낮아진다. 그래서 QCSK(Quadrature CSK)가 제안되었다.

QCSK는 높은 스펙트럼 효율의 DCSK 다차 변조로 CSK의 속도를 향상 시키도록 설계되었으며 각 전송 심볼은 2비트의 정보로 구성된다. 카오스 신호의 비주기적인 신호 때문에 QCSK는 비트당 에너지가 같은 심볼이 송신 되더라도 수신기에서 비트 에너지의 변화를 가지기 때문에 잡음 성능이 좋지 않다. 이 문제를 극복하는 하나의 방법은 카오스

FM 신호를 이용하는 FM-QCSK를 고안했다. 그러나 심볼 구간의 받은 정보를 운반하는데 사용하지 않기 때문에 대역폭의 효율이 낮다. 본 연구에서 제안한 FM-QCSK는 상관 결과를 하나의 기준 카오스 참조신호에 여러 정보신호를 송신하는 아이디어를 이용하여 동 위상과 직교 위상 채널의 잡음 성능을 개선하고 평균화하는 방법을 제안하여 에너지 소비를 줄이고, FM-QCSK의 데이터 속도를 증가시킨다 [4-5].

## II. FM-QCSK 시스템

다중 사용자 통신환경에서는 사용자 수를 증가시키거나 시스템간 간섭을 줄이기 위하여 신호의 대역폭을 한정하고 있다. 사용자의 대역폭이 한정된다는 것은 전송률이 한정되어 고속의 데이터를 전송하는데 제한을 받는다는 것을 의미한다. 이와 같이 변조 방식의 선택에서는 비트오율 성능뿐만 아니라 대역폭 효율도 중요하게 고려해야 한다. 만일 여러 비트를 모아서 한 개의 심볼을 구성하고, 심볼 단위로 신호를 설계하여 전송한다면 심볼에 대응하는 신호의 길이가 길어져서 대역폭을 줄일 수 있게 되므로 대역폭 효율을 높일 수 있게 된다.

직교 반송파를 사용하는 QCSK는 대역폭 증가 없이 데이터율을 두 배로 할 수 있다.

직교 카오스 기저함수  $x(t)$ ,  $y(t)$ 은 힐버트 변환을 통하여 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$C \equiv [c_x(t), c_y(t)] = \left[ \frac{1}{E_b} x(t), \frac{1}{E_b} y(t) \right] \quad (1)$$

$E_b$ 는 샘플 주기[0, T]의 카오스 신호  $x(t)$ 와  $y(t)$  관련된 에너지로 식(2)와 같이 정의 될 수 있다.

$$\int_0^T c_x^2(t) dt = \int_0^T c_y^2(t) dt = 1 \quad (2)$$

$x(t)$ 의 직교 위상 신호는  $y(t)$ 이기 때문에, 다음과 같은 식(3)을 얻을 수 있다.

$$\int_0^T c_x(t)c_y(t) dt = 0 \quad (3)$$

그림 1은 QCSK변조에서 2가지 방법의 성상도이다[6].

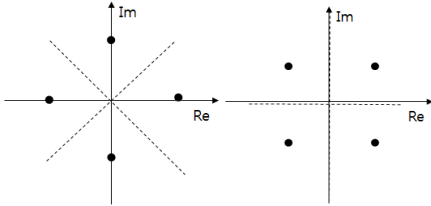


그림 1. 두개의 QCSK 성상도

Fig. 1 Two version of the QCSK constellations

카오스 신호는 비주기적인 신호이기 때문에 QCSK는 비트당 에너지가 같은 심볼이 송신 되더라도 수신기에서 비트 에너지의 변화를 가지기 때문에 잡음 성능이 좋지 않다. 이 문제를 극복하는 하나의 방법은 카오스 FM신호를 이용하는 것이다. 카오스 기저 함수의 생성을 제외하고 변조와 복조방법은 QCSK 기법을 사용하는 것과 동일하다. FM 변조가 된 신호를 카오스 FM신호라고 하고 그 신호를 다시 QCSK 변조하는 방법이다. 카오스 FM 신호가 일정한 진폭을 가짐으로서 FM-QCSK 신호의 모든 비트들은 같은 에너지를 가진다. FM-QCSK시스템에서 카오스 참조신호  $c_x(t)$ 는 FM변조되어 심볼의 반주기동안 전송되고 정보신호  $m_i(t)$ 는 FM변조 후 나머지 반주기에 전송된다. 신호  $m_i(t)$ 는 식(4)와 같이 정의한다.

$$m_i(t) = a_i(t) + b_i(t) \quad (4)$$

$$S_{FM-QCSK}(t) = \begin{cases} \sqrt{E_b} c_x(t) & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ \sqrt{E_b} \left[ a_i c_x(t - \frac{T}{2}) + b_i c_x(t - \frac{T}{2}) \right] & \frac{T}{2} \leq t < T \end{cases} \quad (5)$$

그러므로 심볼주기 T동안의 FM-QCSK의 전송신

호는 식(5)와 같으며  $a_i$ 와  $b_i$ 는 성상도의 신호 심볼의 매핑 좌표이다.  $a_i$ 와  $b_i$ 의 각각의 심볼은 표 1과 같다[7].

표 1. 네 개의 심볼에 대한  $a_i$ 과  $b_i$

Table 1. Corresponding  $a_i$  and  $b_i$  for each quaternary symbol

Symbol	00	01	10	11
QCSK	$1 + 0i$	$0 + 1i$	$0 - 1i$	$-1 + 0i$
QCSK*	$\frac{1+i}{\sqrt{2}}$	$\frac{-1+i}{\sqrt{2}}$	$\frac{1-i}{\sqrt{2}}$	$\frac{-1-i}{\sqrt{2}}$

### III. 제안한 FM-QCSK변조

기존 FM-QCSK 전송신호의 심볼 구간은 그림 2의 상단에 표시된 타임 슬롯이다. 전송된 심볼 구간은 2개의 동일한 시간 슬롯으로 나누어지고  $a_i$  및  $b_i$ 는 각각 동위상 및 직교 위상에 대한 i번째 비트의 정보신호를 나타내고  $R_i$ 는 i번째 비트의 카오스 참조 신호를 나타낸다. 기존의 FM-QCSK의 단점 중 하나는 모든 정보 비트는 두 개의 신호(참조신호와 정보신호)로 전송되는 것이다. 따라서 비트율(및 심볼률)이 반감되어 비트 당 전송 에너지는 모든 샘플 함수의 한 비트를 나타내는 기존의 이진변조 방식에 비해 두 배가된다.

제안한 FM-QCSK 방식의 파형은 그림 2의 아래쪽에 있으며 여기서  $T_s$ 는 하나의 신호의 지속 기간이고  $E_s$ 는 캐리어신호의 에너지이다. 첫 번째 시간 슬롯을 제외하고 정보전달을 위한 N개의 시간 슬롯을 포함하는 N+1개의 시간슬롯 블록임을 확인할 수 있다. 제안한 변조 방식의 장점은 비트 기간 T는  $2T_s$ 에서  $((N+1)/N)T_s$ 로 감소한다. 즉, 데이터율이 증가된다. 그리고 비트 당 송신 에너지  $E_b$ 는  $2E_s$ 에서  $((N+1)/N)E_s$ 로 감소되고 심볼 당 등가 에너지는  $4E_s$ 에서  $2((N+1)/N)E_s$ 로 감소한다.

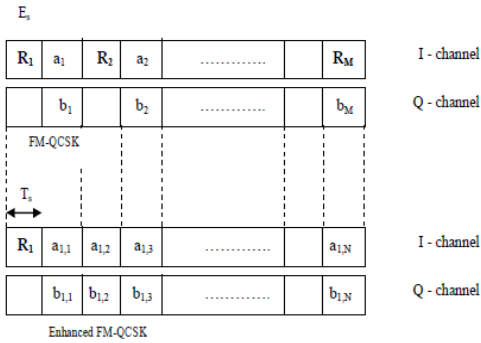


그림 2. FM-QCSK와 제안한 FM-QCSK시스템의 시간슬롯

Fig. 2 Typical time slots of the conventional FM-QCSK and the proposed FM-QCSK systems

그러나 제안한 시스템은 주파수  $1/T_s$ 만큼의 증가 주기성분과 고조파뿐만 아니라, 시스템 복잡성이 증가하는 단점이 있다.

$s_m(t)$ 는 동 위상 채널에 대한  $m$ 번째 시간슬롯  $t \in [mT_s, (m+1)T_s]$ 에서 전송된 신호를 나타낸다. 그리고 첫 번째 시간슬롯은  $s_0(t) = c_x(t)$ 로 참조신호이고,  $s_m(t) = \pm s_0(t - mT_s)$ 은  $D_m$ 비트의 정보 신호이다.  $\tilde{r}_m(t)$  ( $m = 0, 1, \dots, N$ )은  $m$ 번째 시간슬롯의 수신신호를 나타낸다.  $k$ 번째 및  $l$ 번째 칩 사이의 상관관계는 식(6)과 같이 표현한다.

$$z_{k,l} = \tilde{r}_k(t) * \tilde{r}_l(t) \int_0^T \tilde{r}_k(t - \frac{k}{N+1}T) \tilde{r}_l(t - \frac{l}{N+1}T) dt \quad (6)$$

동위상 및 직교 위상 채널들에 대한 수신기의  $m$ 번째 심볼 신호는 식(7), 식(8) 같다.

$$Z_{0,m_I} = \tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{m_I}(t) \quad (7)$$

$$Z_{0,m_Q} = \tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{m_Q}(t) \quad (8)$$

$\tilde{r}_{m_Q}(t)$  신호는 힐버트 변환 후의  $\tilde{r}_m(t)$ 이고,  $\tilde{r}_m(t)$ 과  $\tilde{r}_{m_I}(t)$  신호는 동일하다.

#### IV. 송수신기의 구성

그림 3은 제안한 FM-QCSK변조기의 구성도이다. 첫 번째 카오스 신호는 비트 당 일정한 에너지를 얻기 위해 FM변조 한다. 변조기는  $N$ 개의 지연 탭을 가지고, 각 탭의 출력은 QCSK 변조기에 입력된다.

각  $N$ 개의 심볼들은 기준 카오스 신호  $s_0(t)$  전송 후에 정보신호  $s_m(t)$ 을 전송한다. 이것은 각  $T_s$  시간 순간에 스위치 위치를 변경시킴으로써 이루어진다.

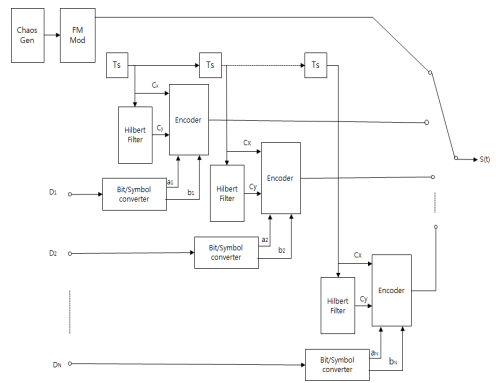


그림 3. 제안한 FM-QCSK 변조기 구성도

Fig. 3 Proposed FM-QCSK modulator configuration

그림 4는 복조기의 블럭도이고  $N$ 개의 지연 및 상관기의 쌍으로 구성된다.

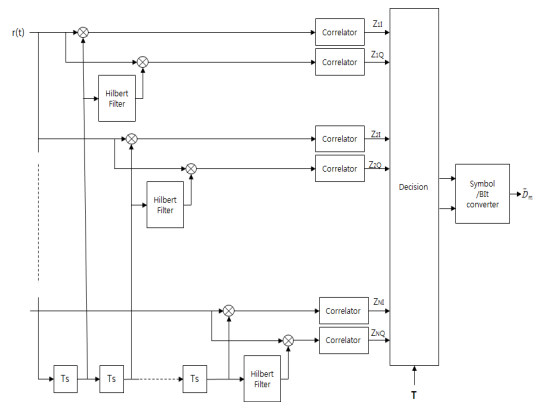


그림 4. 제안한 FM-QCSK 복조기 구성

Fig. 4 Proposed FM-QCSK demodulator configuration

$kT_s$  샘플의 상관기 출력은 동위상 및 직교 위상 채널의 벡터 성분으로 구성된다. 수신된 정보는 참조 신호와 정보 신호 사이의 상대 직교성에 의해 수행된다.

표 2.  $T_s, 2T_s, \dots, (N+1)T_s$  시간의 벡터

Table 2. Elements of Observation Vectors at  $T_s, 2T_s, \dots, (N+1)T_s$  time instants

Time	$Z_1$	$Z_2$	...	$Z_N$
$T_s$	-	-	...	-
$2T_s$	$\tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{1_I}(t)$ $\tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{1_Q}(t)$	-	...	-
$3T_s$	$\tilde{r}_1(t) * \tilde{r}_{2_I}(t)$ $\tilde{r}_1(t) * \tilde{r}_{2_Q}(t)$	$\tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{2_I}(t)$ $\tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{2_Q}(t)$	...	-
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$(N+1)T_s$	$\tilde{r}_{N-1}(t) * \tilde{r}_{N_I}(t)$ $\tilde{r}_{N-1}(t) * \tilde{r}_{N_Q}(t)$	$\tilde{r}_{N-2}(t) * \tilde{r}_{N_I}(t)$ $\tilde{r}_{N-2}(t) * \tilde{r}_{N_Q}(t)$	...	$\tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{N_I}(t)$ $\tilde{r}_0(t) * \tilde{r}_{N_Q}(t)$

표 2에 나타난 바와 같이  $m$ 번째 샘플링 시간의 상관기 출력이  $m$  번째 심볼인  $(m+1)$ 의 정보를 추정하기 위해 사용된다. 추정 정보는 벡터  $\tilde{D}_m = (\tilde{D}_1, \tilde{D}_2, \dots, \tilde{D}_N)$  로 표시되고 심볼/비트 컨버터의 출력으로부터 얻어진다.

### V. 시뮬레이션

카오스 확산 신호는 Hannon map을 사용하고 식 (9)와 같다.

$$x_{n+1} = 1 + gx_n + hx_n^2 \quad (9)$$

여기서  $g = -1.4$ ,  $h = 0.3$ 의 값을 가지는 상수이고 이산신호의 크기는 2로 범위는  $[-1, 1]$ 이다.

그리고 FM변조는 식(10)과 같다[8-9].

$$\phi(t) = A_c \cos[w_c t + K_f \int_{-\infty}^t c(\tau) d\tau] \quad (10)$$

그림 5는 AWGN환경에서 SNR을 가변하면서 여러 가지의 카오스 변조기의 오류 확률을 평가한 결과이다. FM-QCSK보다 제안한 변형된 FM-QCSK가 BER= $10^{-3}$ 일 때 3dB정도 이득이 있는 것을 확인할 수 있다.

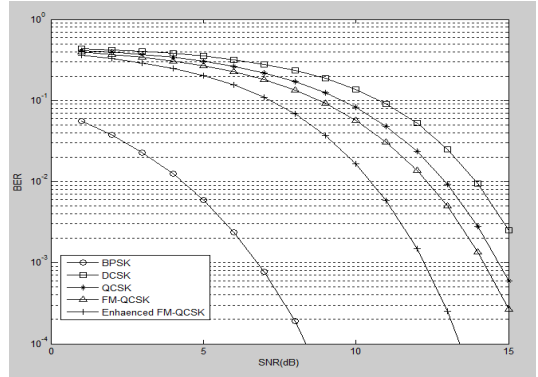


그림 5. AWGN환경에서의 FM-QCSK, 변형된 FM-QCSK, DCSK, QCSK 와 BPSK의 BER비교

Fig. 5 BER performance of FM-QCSK, enhanced FM-QCSK, DCSK, QCSK and BPSK for AWGN channel

그림 6은 변형된 FM-QCSK에서 하나의 참조신호에 사용하는 정보신호의 개수  $N$ 을 변형하였을 때의 BER 특성을 비교한 결과이다.

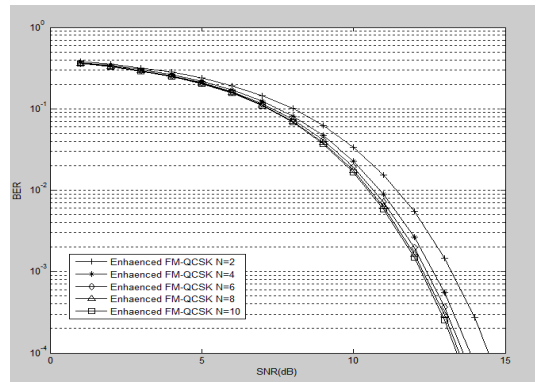


그림 6. 변형된 FM-QCSK의 N값의 변화에 따른 BER비교

Fig. 6 BER performance of enhanced FM-QCSK for different values of N

N의 값을 증가 할수록 오류확률이 좋아지는 것을 확인 하였고 N의 값이 8 이상이 되면 거의 변화가 없음을 확인 하였다.

## VI. 결론

본 논문에서는 데이터의 고속화를 위하여 기존의 FM-QCSK를 개선한 시스템을 제안하고 기존의 카오스 변조 방법들과 BER성능을 평가했다. 그리고 참조신호와 정보신호의 임계값을 확인하였다. 통신 시스템에서 데이터 속도의 증가와 에너지 소비의 감소는 중요한 요구 사항이다. 제안한 카오스 시스템은 데이터 전송속도를 높이기 위하여 FM-QCSK에서 하나의 참조신호에 하나의 정보신호를 전송한 것과 달리 하나의 참조신호에 여러 개의 정보신호를 전송하여 전송속도를 높일 수 있게 했다. 그리고 AWGN 채널에서 FM-QCSK보다 BER= $10^{-3}$ 일 때 SNR이 3dB정도 이득이 있는 것을 확인 하였다. 개선된 FM-QCSK의 성능은 하나의 참조신호에 대한 기준 정보신호의 수가 시스템의 복잡성을 고려하지 않았을 때 특정 임계값(N=8)까지 증가함에 따라 향상된다.

향후 다중사용 환경에서의 시스템 설계와 레일리 채널 환경 등 다양한 채널 환경을 고려한 연구 및 검증된 설계로 FPGA구현과 상관 길이를 변경한 시스템 성능을 분석 할 것이다.

## Reference

- [1] W. M. Tam, F. C. M. Lau, and C. K. Tse, *Digital Communications with Chaos: Multiple Access Techniques and Performance Evaluation*. London: Elsevier, 2007.
- [2] Y. Shon and Y. Bae "Chua's circuit for chaotic Attractors creation by Hardware Implementation" *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 2, May. 2010, pp. 158-163
- [3] H Cho and G. Yim "Encryption Communication Protocol Design Using Unidirectional Synchronization of the

Chaos System," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 10, Oct. 2014, pp. 1125-1130.

- [4] T. J. Wern and T. C. Yang, "Orthogonal Chaotic Vector Shift Keying in Digital Communications," *IET Communications J.*, vol. 4, no. 6, Oct. 2009, pp. 739-753.
- [5] M. P. Kennedy, "Performance evaluation of FM-DQSSK modulation in multipath environment," *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, vol. 47, no. 12, Dec. 2000, pp. 1702-1710.
- [6] Z. Galias and G. M. Maggio, "Quadrature chaos-shift keying: theory and performance analysis," *IEEE Trans. Circuit and Systems. I*, vol. 48, no. 12, Dec. 2001, pp. 1510-1518.
- [7] Y. Zhang, "Design and performance analysis of an FM-QCSK chaotic communication systems," *Int. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, Wuhan, China Sep, 2006.
- [8] S. Hong and E. Jang, "FPGA implementation of digital transceiver using chaotic signal," *J. of Korean Institute of Information Technology*, vol. 8, no. 8, Aug. 2010, pp. 9-15.
- [9] E. Jang, "Design of digital communication systems using DQSSK chaotic modulation," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10. no. 5, May 2015, pp. 565-570.

## 저자 소개

### 장은영(Eun-Young Jang)



1998년 동아대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2000년 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2008년 동아대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

2014년 ~현재 신라대학교 공과대학 전자공학과 조교수

※ 관심분야 : 무선통신시스템, 5G이동통신 시스템