

짧은 참조신호를 이용한 차동 카오스 편이 변조의 성능 최적화

장은영*

Performance of Optimization for Short Reference Differential Chaos Shift Keying Scheme

Eun-Young Jang*

요약

짧은 참조 신호를 이용한 차동 카오스 편이 변조 (SR-DCSK)는 DCSK의 변형으로, 추가적인 복잡성 없이 데이터 전송 속도를 높이고 에너지 효율성을 향상시킨다. 그러나 최적 길이의 기준 신호를 적용해도 기존 DCSK 대비 SR-DCSK의 BER 성능의 장점은 보이지 않는다. 본 논문에서는 기준 신호와 정보를 가진 신호에 각각 두 개의 스케일 계수 (scale coefficient)를 적용하여 SR-DCSK의 성능을 향상시키는 방법을 제안한다. 그리고 제안된 방법의 성능은 가우스 근사법을 사용하여 BER로 분석한다. 그 후 도출한 BER 표현식을 기반으로, 주어진 시스템 파라미터에 대해 BER을 최소화하여 두 계수의 비율을 최적화한다. 제안된 방법의 BER은 두 스케일 계수의 최적 비율을 적용할 때 SR-DCSK 보다 많은 부분 개선되었다는 것을 시뮬레이션 결과로 확인한다.

ABSTRACT

The SR-DCSK (Short Reference Differential Chaos Shift Keying) is a variant of DCSK that improves data transmission speed and energy efficiency without additional complexity. However, even when the reference signal of the optimum length is applied, the BER performance of the SR-DCSK is not better than that of the conventional DCSK. In this paper, we propose a scheme to improve the performance of SR-DCSK by applying two scale factors (scale coefficients) to the reference signal and the information signal, respectively. And the performance of the proposed method is analyzed by BER using Gaussian Approximation. Based on the derived BER expressions, we minimize the BER for a given system parameter to optimize the ratio of the two coefficients. Simulation results confirm that the BER of the proposed method is much improved over the SR-DCSK when we apply the optimal ratio of the two scale factors.

키워드

Chaos Communications, DCSK, SR-DCSK, Performance of Optimization, Gaussian Approximation
카오스 통신, DCSK, SR-DCSK, 성능 최적화, 가우스 근사값

* 교신저자: 신라대학교 전자공학과
• 접수일 : 2019. 03. 26
• 수정완료일 : 2019. 05. 05
• 게재확정일 : 2019. 06. 15

• Received : Mar. 26, 2019, Revised : May. 05, 2019, Accepted : Jun. 15, 2019
• Corresponding Author : Eun-Young Jang
Dept. Electronic Engineering, SILLA University,
Email : electronlab@silla.ac.kr

1. 서 론

카오스 신호를 반송파로 사용하는 디지털 통신 시스템은 스펙트럼 확산 통신, 단거리 통신 및 보안 통신 분야에서 우수한 성능을 가지고 있기 때문에 무선 통신 분야의 뜨거운 화두 중 하나이다[1-2]. 모든 카오스 디지털 변조 중에서, 차동 카오스 편이 변조(DCSK)가 다중 경로 페이딩 또는 시간 변동 채널에 대해 뛰어난 성능을 가지고 있다[3]. DCSK의 저비용 특성은 더 나은 무선 개인 통신망(WPAN), 전력선 통신 시스템, MIMO 및 CS-DCSK/BPSK 공존 통신 시스템을 설계하기 위한 상당한 관심을 불러일으켰다[4-7].

자기상관 수신기를 사용하여 DCSK는 복잡도가 낮은 수신기를 가지며 다중 경로 전송 환경에서도 다중 경로 페이딩에 좋은 성능을 가지고 있다. 그러나 기준 전송방식의 DCSK는 광대역 지연 라인이 필요하며 자신의 심볼 주기 절반을 기준으로 사용하는 단점을 가지고 있다. 긴 광대역 지연 라인은 DCSK 시스템을 현재 CMOS 기술로 구현하는 것을 매우 어렵게 만든다. 절반의 심볼 주기 참조로 인해 기존 DCSK의 데이터 전송 속도와 에너지 효율성이 저하된다. 따라서 DCSK의 문제를 해결하기 위한 많은 제안들이 있다.

기존 DCSK 구현에 있어 긴 지연 라인의 사용을 피하기 위해, 코드-편이 차동 카오스 편이 변조(CS-DCSK) 변조 방식이 제안되었으며, 이 방법은 직교 Walsh 코드를 기준 신호 및 정보 신호에 각각 사용한다. 그리고 높은 스펙트럼 효율의 CS-DCSK 시스템을 제안되었으며, 이 시스템은 CS-DCSK의 Walsh 코드 대신 카오스 시퀀스를 사용한다. 다중-반송파 DCSK(MC-DCSK) 방법은 서로 다른 주파수의 반송파를 기준 신호 및 정보신호로 각각에 사용하여 송신기와 수신기의 지연을 줄여 기존 DCSK의 데이터 전송속도를 높인다. 또한 다중 사용자 다중-반송파 DCSK는 연속-이동성 시나리오를 지원하기 위해 각 기준 신호에 데이터 반송파 신호가 뒤따르는 연속-이동성 차동 카오스 편이 변조 시스템(CM-DCSK)이 제안되었으며 직교 사인파를 반송파로 사용하여 DCSK에서 기준 및 정보를 가진 신호가 동시에 전송되며 이 방법은 기존 DCSK에서 광대역 지연을 피할 수 있다[8-9].

에너지 효율을 향상시키기 위해 Walsh 함수 및 카오스 신호를 결합하여 설정한 직교 신호가 다중 레벨 FM-DCSK 시스템에 적용된다. 데이터 속도를 향상시키기 위해 직교 카오스 편이 변조(QCSK)에 기반하여 MPSK 성장도와 함께 다중-해상도 M-ary DCSK가 제안되었으며, 이 방법은 DCSK의 특성을 유지하면서 BER과 서비스 품질 균형을 맞출 수 있다. 고효율 차동 카오스 편이 변조(HE-DCSK)는 DCSK의 각 기준 샘플을 재활용하여 데이터 속도를 향상시킨다. 기준 신호로 구성된 직교 카오스 신호 세트에서 각 데이터를 가진 신호를 선택하는 다중-레벨 차동 편이 변조와 기존 DCSK에 사용된 지연 회로를 시간 반전 작업으로 대체하여, 데이터 속도를 두 배로 높이고 스펙트럼 효율을 향상시키는 개선된 DCSK가 제안된다. 짧은 레퍼런스 DCSK(SR-DCSK)방법이 최근에 제안되었으며, 기준 신호가 비트 지속 기간의 절반 이하를 차지하도록 기준 신호가 R로 단축된다. 이 체계는 시스템 구조에 추가적인 복잡성을 야기하지 않고 데이터 속도를 높이고 에너지 효율성을 향상시킨다[10-12].

SR-DCSK는 기준 신호의 길이를 절약하지만 BER 성능은 기존 DCSK에 비해 크게 개선되지 않았다[13]. 본 논문에서는 기준 신호와 데이터 신호 각각에 두 개의 스케일 계수를 적용하는 향상된 SR-DCSK 체계를 제안한다. 그리고 가우스 근사값을 사용하여 제안된 방법의 BER 표현식을 도출한다. 제안된 SR-DCSK 방법의 BER을 최소화함으로써, 주어진 신호 대 잡음비, 기준 길이 R 및 확산 스펙트럼 계수에 대한 기준 신호와 데이터 신호 간의 최적 스케일 계수 비율을 찾을 수 있다. 또한 시뮬레이션을 통하여 분석 결과의 정확성을 확인한다. 제안된 방법의 성능을 기존의 SR-DCSK와 최적 스케일 계수비를 비교함으로써 SR-DCSK에 비해 제안된 방법이 성능이 향상된다는 것을 검증하였다. 본 논문은 제안된 시스템 모델을 제시한 후 BER 표현식과 최적 에너지 할당 비율을 구한다. 그리고 시뮬레이션과 결론으로 마무리한다.

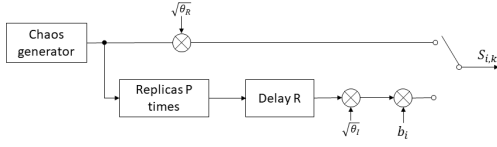
II. 시스템 모델

그림 1은 제안한 시스템의 송신기와 수신기의 블록 다이어그램이다.

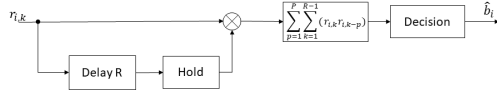
시스템의 베이스 밴드의 송신신호는 식(1)과 같다.

$$s_{i,k} = \begin{cases} \sqrt{\theta_R} x_{i,k} & 0 \leq k < R \\ b_i \sqrt{\theta_I} x_{i,k-R} & R \leq k < (1+P) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $x_{i,k-R} \equiv x_{i,k \bmod(R)}$ 이고, P는 참조신호의 복제 시간이다. 그리고 $b_i \in \{-1, +1\}$ 인 변조된 심볼이며, x_k 는 이산 카오스 신호이다.



(a) Transmitter



(b) Receiver

그림 1. 제안한 SR-DCSK의 송수신기 블록 다이어그램

Fig. 1 Block diagram of proposed SR-DCSK transceiver .

채널 계수가 레일리 분포를 따르는 L개의 독립 경로의 다중 경로 페이딩 채널인 것을 고려하면

$$r_{i,k} = \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i} d_{k-\tau_{l,i}} + n_k \quad (2)$$

여기서 $\alpha_{l,i}$ 와 $\tau_{l,i}$ 는 l번째 경로의 채널 계수와 지연, L은 경로의 수이고 n_k 는 제로 평균과 분산 $N_0/2$ 을 갖는 부가 백색 가우시안 잡음이다.

송신된 데이터는 길이가 R인 주기적인 신호이므로, p번째 상관기의 출력은 식(3)과 같다.

$$Z_{p,i} = T_c \sum_{k=0}^{R-1} \left(\sqrt{\theta_I} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i} x_{k-\tau_{l,i}} b_i + n_{p,R+k} \right) \times \left(\sqrt{\theta_R} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i} x_{k-\tau_{l,i}} + n_{p,k} \right) \quad (3)$$

여기서 T_c 는 카오스 샘플의 간격이다. 참조 길이가 R인 경우 근사 표현식은 식(4)와 같다.

$$\sum_{k=0}^{R-1} x_{k-\tau_l} x_{k-\tau_m} \approx 0, l \neq m \quad (4)$$

따라서 $Z_{p,i}$ 는 식(5)와 같이 더 단순화되고 확장 될 수 있다.

$$Z_{p,i} = T_c \sum_{k=0}^{R-1} \left[\sqrt{\theta_I} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 x_{k-\tau_l}^2 b_i + n_k n_{p,R+k} + n_k \left(\sqrt{\theta_I} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i} x_{k-\tau_l} b_i \right) + n_{p,R+k} \left(\sqrt{\theta_R} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i} x_{k-\tau_l} \right) \right] \quad (5)$$

여기서 $T_c = 1$, 개선 된 SR-DCSK 시스템의 결정 변수는 식(6)와 같이 쓸 수 있다.

$$Z_i = P \sum_{K=0}^{R-1} U + P \sum_{K=0}^{R-1} N_2 + \sum_{p=1}^P \sum_{K=0}^{R-1} (N_1 + N_3) \quad (6)$$

III. 성능 분석 및 최적화

$$E\{Z_i\} = \sqrt{\theta_R \theta_I} P b_i \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 \frac{E_b}{(\theta_R + P \theta_i)} \quad (7)$$

제안된 시스템의 비트 에너지, $E\{\bullet\}$ 는 기대 연산자이다.

랜덤 변수의 독립성으로 인하여, 식(4)에 주어진 결정 변수의 첫번째 간접 성분 I_1 의 분산은 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{Var}\{I_1\} = P^2 \text{Var}\left\{ \sum_{k=0}^{R-1} N_2 \right\} \quad (8)$$

여기서 $\text{Var}\{\bullet\}$ 는 분산 연산자이다.

N_2 의 분산은 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Var}\{N_2\} &= \text{Var}\left\{n_k \left(\sqrt{\theta_I} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i} x_{k-\tau_{l,i}} b_i \right)\right\} \\ &= \theta_i \frac{N_0}{2} E\{x_{k-\tau_{l,i}}^2\} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)에 식 (9)을 대입하면 I_1 의 분산식은 식(10)와 같다.

$$\text{Var}\{I_1\} = P^2 R \theta_i \frac{N_0}{2} E\{x_{k-\tau_{l,i}}^2\} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 \quad (10)$$

유사하게, I_2 의 분산은 식(11)과 같이 계산 될 수 있다.

$$\text{Var}\{I_1\} = PR \frac{N_0^2}{4} + PR \frac{N_0}{2} \theta_R E\{x_{k-\tau_{l,i}}^2\} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 \quad (11)$$

분산 성분의 합산은 결정 변수 Z_i 의 변화를 가져오

$$\begin{aligned} \text{Var}\{Z_i\} &= P^2 R \theta_I \frac{N_0}{2} E\{x_{k-\tau_{l,i}}^2\} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 \\ &+ PR \frac{N_0^2}{4} + PR \frac{N_0}{2} \theta_R E\{x_{k-\tau_{l,i}}^2\} \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

가우시안 근삿값에 따르면, 개선된 SR-DCSK의 BER은 식(13)와 같이 계산 될 수 있다.

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\left[\frac{(1+P\rho)^2 N_0}{P\rho E_b \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2} + \frac{(1+P\rho)^2 R N_0^2}{2P\rho E_b^2 \left(\sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2 \right)^2} \right]^{-0.5} \right) \quad (13)$$

식(13)에서 $\gamma_b = \frac{E_b \sum_{l=1}^L \alpha_{l,i}^2}{N_0}$ 로 두면 BER은 식 (14)과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \text{erfc}([\psi(\gamma_b, \rho)]^{-0.5}) \quad (14)$$

여기서 $\psi(\gamma_b, \rho)$ 은 식(15)이다.

$$\psi(\gamma_b, \rho) = \frac{(1+P\rho)^2}{P\rho\gamma_b} + \frac{(1+P\rho)^2 R}{2P\rho\gamma_b^2} \quad (15)$$

심볼 에너지 E_b 가 θ_i 와 θ_R 의 함수이지만 ρ 변화에 따라 변하지 않는다. 따라서 상수 ρ 로서의 E_b 는 BER을 최소화함으로써 최적화 될 수 있다.

따라서, $\frac{d\psi(\gamma_b, \rho)}{d\rho} = 0$ 일 때, BER이 최소가 된다.

$$\left(P - \frac{1}{P\rho^2} \right) \frac{1}{\gamma_b} + \left(\frac{PR}{2} - \frac{R}{2P\rho^2} \right) \frac{1}{\gamma_b^2} = 0 \quad (16)$$

식 (16)을 풀면 최적의 ρ 를 얻을 수 있다.

$$\rho^* = \sqrt{\frac{R+2\gamma_b}{P^2R+2P^2\gamma_b}} = \frac{1}{P} \quad (17)$$

따라서, 최적비 ρ^* 가 적용될 때, 개선된 SR-DCSK의 BER은 최소가 된다. 식(13)에 최적 비 $\rho^* = 1/P$ 입력하면 최적 BER 식을 식(18)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{BER}_{opti} &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\left[\frac{4}{\gamma_b} + \frac{2f}{(P+1)\gamma_b^2} \right]^{-0.5} \right) \\ &= \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\left[\frac{4}{\gamma_b} + \frac{2R}{\gamma_b^2} \right]^{-0.5} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, $f = (P+1)R$ 인 확산 스펙트럼 계수이다.

IV. 시뮬레이션

개선된 SR-DCSK 방법의 성능을 검증하기 위하여 제안한 방법과 SR-DCSK의 BER를 비교한다. 계산된 BER 표현식과 최적 에너지 할당 계수를 AWGN 및 다중 경로 페이딩 환경에서 시뮬레이션 한 후 결과를

통하여 성능을 검증하였다.

그림 2는 AWGN 채널환경에서 ρ 에 따른 BER을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 주어진 E_b/N_0 , R 및 P에 대해 최소 BER을 얻기 위한 최적의 ρ 가 있음을 알 수 있다. 또한 E_b/N_0 가 서로 다른 값의 P에 대한 최소 BER을 얻기 위한 E_b/N_0 가 거의 같다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 식(17)로 설명할 수 있다.

최적의 BER 표현식인 식(18)은 기준 길이 R과 E_b/N_0 에만 따라 달라진다. 따라서 R과 E_b/N_0 이 동일할 경우 다른 P에 대해 동일한 최소 BER을 달성할 수 있다.

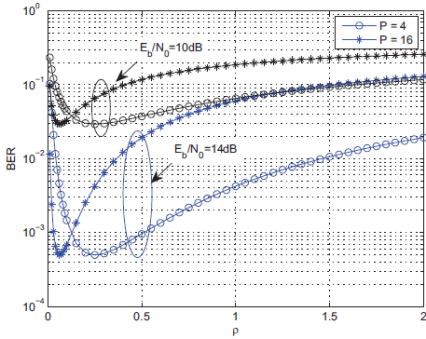


그림 2. AWGN채널에서 ρ 에 따른 BER (P=8)
Fig. 2 BER according to ρ in AWGN channel (P=8)

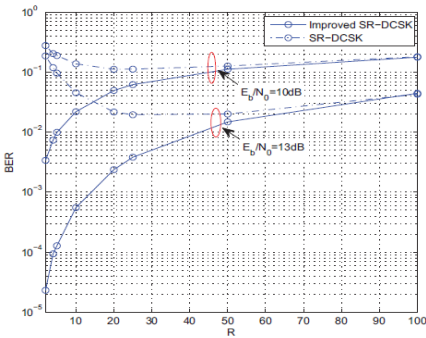


그림 3. AWGN 채널에서 R에 따른 BER ($\beta=100$)
Fig. 3 BER according to R in AWGN channel ($\beta=100$)

그림 3은 길이가 R인 기준 신호가 AWGN 채널환경에서 개선된 SR-DCSK과 기존방법의 성능에 미치는 영향을 비교하였다. 정보를 가진 신호 길이 $\beta=100$ 으로 하고 최적비율 ρ^* 에 대해

시뮬레이션 결과를 얻었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 기준 길이 R이 작을수록 BER은 더 낮으며, 이는 식(18)의 최적 BER 표현식과 일치한다. 이 결과는 R이 상승하면 BER이 처음에 감소했다가 R이 증가하면서 BER이 증가하는 SR-DCSK와 다르다. AWGN 채널에서 제안된 방법과 동일한 기준 길이 $R=50$ 을 가진 SR-DCSK의 성능에 대한 확산 스펙트럼 계수 f 의 영향에 대하여 연구했으며 그 시뮬레이션 결과가 그림4이다. 결과에서 볼 수 있듯이 제안된 체계는 다른 확산 스펙트럼 계수를 가진 고정 기준 길이 R에 대해 동일한 BER을 얻는다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 식 (18)과 일치한다. 이와 반대로 그림 4에서 SR-DCSK의 BER특성은 확산 스펙트럼 계수가 증가할 할수록 증가하는 것을 볼 수 있다.

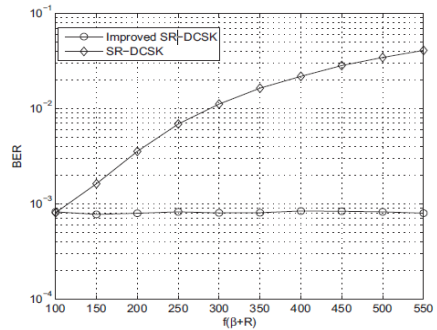


그림 4. AWGN 채널에서 f 에 따른 BER ($\beta=100$, $R=50$)
Fig. 4 BER according to f in AWGN channel ($\beta=100$, $R=50$)

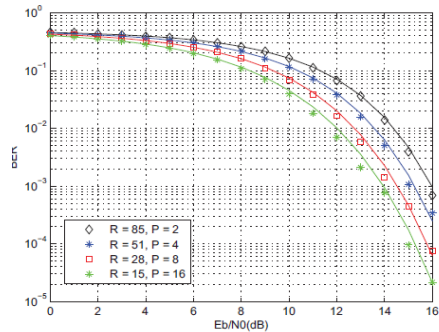


그림 5. 시뮬레이션한 BER 및 분석 BER의 성능비교
Fig. 5 Comparisons of BER performance Simulated BER and analysis BER

최적 비율 ρ^* 에 대한 성능 분석을 검증하기 위해 식(17)의 함수를 사용하여 최적의 BER을 평가한다. 거의 동일한 확산 스펙트럼 계수 f 를 가지고 각기 다른 값의 P와 R에 대해 시뮬레이션한 BER 성능 및 분석 BER 성능이 그림 5이며 시뮬레이션 결과와 분석값의 결과이며 두 결과값의 일치로 정확성을 확인하였으며 실선이 분석값이다. 제안된 방법 및 최적화 접근방식의 장점을 보여주고 설명하기 위해, 개선된 SR-DCSK와 SR-DCSK의 성능 비교가 수행되었다. 그림 6은 AWGN 채널에서 기존의 SR-DCSK와 최적의 비율을 ρ^* 로 설정한 개선된 SR-DCSK의 성능을 비교하였다. 큰 P 값에 대해 개선된 SR-DCSK의 성능이 기존의 SR-DCSK에 비해 크게 개선된 것이 정확히 볼 수 있다. 그리고 P가 클 때 개선된 SR-DCSK가 SR-DCSK에 비해 낮은 BER을 얻는 것을 그림 6에서 볼 수 있다.

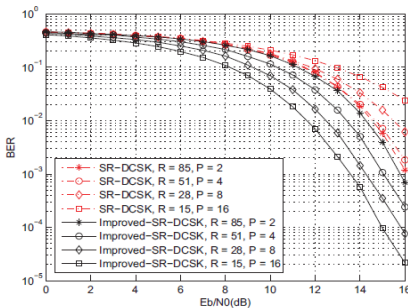


그림 6. 개선된 SR-DCSK과 SR-DCSK의 BER 성능 비교

Fig. 6 BER performance comparison between improved SR-DCSK and SR-DCSK

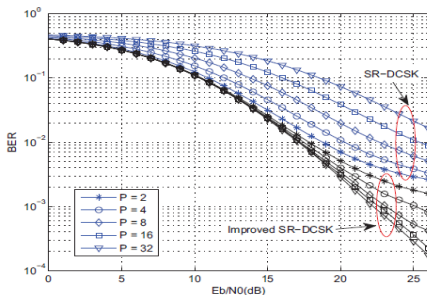


그림 7. Rayleigh 다중 경로 페이딩에 대한 BER 성능 비교(L=3)

Fig. 7 Comparisons of BER performance over Rayleigh multipath fading channel(L=3)

그림 7은 기준 길이 $R = 8, L = 3$ 이고 $P = 2, 4, 8, 16$ 과 32인 다중 경로 레일리 페이딩 환경에서의 BER 성능이다. 다중 채널의 평균 전력 이득은 한 세트의 경로 지연 $\tau_1 = 0, \tau_2 = T_c, \tau_3 = 2T_c$ 에 따라 $E\{\alpha_1^2\} = E\{\alpha_2^2\} = E\{\alpha_3^2\} = 1/3$ 이다. 따라서 AWGN 과 페이딩 채널에 대한 성능 비교 모두는 제안된 시스템이 기존의 SR-DCSK보다 좋은 성능을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 개선된 짧은 레퍼런스 DCSK 시스템을 제안하였다. 기존의 SR-DCSK과는 다르게, 두 개의 스케일 계수가 기준 신호 및 데이터신호에 각각 적용된다. 분석 및 시뮬레이션 결과에 따르면 주어진 시스템 파라미터에 대해 최소 BER을 얻기 위한 두 스케일 계수의 최적 비율이 있는 것을 확인하였다. 단순한 최적화 문제를 해결함으로써 최적의 비율을 얻었다. 수치 결과는 고정된 확산 계수에 대한 복제 시간 P로 성능 이득을 증가시킨다는 것을 보여준다. 마지막으로, 개선된 체계의 성능을 SR-DCSK의 성능과 비교하여 제안된 체계가 기존의 SR-DCSK보다 우수한 성능을 가지는 것을 확인하였다.

References

- [1] X. Min, W. Xu, L. Wang, and G. Chen, "Promising performance of an FM-DCSK UWB system under indoor environments," *IET Commun.*, vol. 4, no. 2, Jan. 2010, pp. 125-134.
- [2] A. Al-Talabani, A. Nallanathan, and X. Nguyen, "Enhancing physical layer security of cognitive radio transceiver via chaotic OFDM," *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK, June. 2015, pp. 4805-4810.
- [3] Y. Xia, C. K. Tse, and F. C. M. Lau, "Performance of differential chaos-shiftkeying digital communication systems over a multipath fading channel with delay spread," *IEEE Trans.*

- Circuits Syst.-II*, vol. 51, no. 12, Dec. 2004, pp. 680-684.
- [4] C. C. Chong and S. K. Yong, "UWB direct chaotic communication technology for low-rate WPAN applications," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 57, no. 3, Mar. 2008, pp. 1527-1536.
- [5] Y. Fang, J. Xu, L. Wang, and G. R. Chen, "Performance of MIMO relay DCSK-CD systems over nakagami fading channels," *IEEE Trans. Circuits and Syst.-I*, vol. 60, no. 3, Mar. 2013, pp. 757-767.
- [6] G. Kaddoum and N. Tadayon, "Differential chaos shift keying: A robust modulation scheme for power-line communications," *IEEE Trans. Circuits Syst.-II*, vol. 63, 2016.
- [7] W. Xu, L. Wang, and G. Chen, "Performance analysis of the CS-DCSK/BPSK communication system," *IEEE Trans. Circuits and Syst.*, vol. 61, no. 9, Sept. 2014, pp. 2624-2633.
- [8] F. Escribano, G. Kaddoum, A. Wagemakers, and P. Giard, "Design of a new differential chaos-shift-keying system for continuous mobility," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 5, May. 2016, pp. 2066-2078.
- [9] H. Yang, G. Jiang, and J. Duan, "Phase-separated DCSK: A simple delay-component-free solution for chaotic communications," *IEEE Trans. Circuits and Syst.-II*, vol. 61, no. 12, Dec. 2014, pp. 967-971.
- [10] E. Jang, "Design of digital communication systems using DCSK chaotic modulation," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 5, May 2015, pp. 565-570.
- [11] E. Jang, "Design of FM-QCSK Chaotic Communication System for high-speed communication," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 10, no. 10, Oct. 2015, pp. 565-570.
- [12] L. Wang, G. Cai, and G. Chen, "Design and performance analysis of a new multiresolution M-ary differential chaos shift keying communication system," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 9, Sept. 2015, pp. 5197-5208.
- [13] G. Kaddoum, E. Soujeri, and Y. Nijssure, "Design of a short reference noncoherent chaos-based communication systems," *IEEE. Trans. Commun.*, vol. 64, no. 2, Jan. 2016, pp. 680-689.

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, 채널코딩, 카오스통신

