

# DCSK 카오스 변조를 이용한 디지털 통신 시스템의 설계

장은영\*

Design of digital communication systems using DCSK chaotic modulation

Eun-Young Jang\*

요 약

확산 스펙트럼 통신은 낮은 도청확률과 작은 잡음 채널의 영향 때문에 많은 시스템에서 사용이 증가하고 있다. 기존의 디지털 확산 스펙트럼 시스템의 한계 중 하나는 동기 코드 확산에 대한 필요성이다. 카오스 통신 시스템은 동기 없이 구현 할 수 있고 보안성도 우수하며 간단한 송수신기 구조로 디지털 확산 스펙트럼 통신에 많이 사용하고 있다. 본 논문에서는 카오스 신호를 디지털 통신시스템에 사용하기 위해 디지털 변복조의 반송과 대신 사용하였으며 여러 가지의 카오스 변조 방식들 중에서 차동 CSK(Differential Chaos Shift Keying) 사용한다. DCSK 복조기는 카오스 신호 위상을 복구 할 필요 없이 데이터를 감지하기 때문에 효율적이다. 또한 Matlab/Simulink를 이용하여 DCSK 변조기 및 복조기의 설계하고 성능을 분석하고 송신신호의 수신 신호를 비교하여 송수신 신호가 같은 것을 확인하고 확산 인자에 따른 BER의 성능을 평가한다.

## ABSTRACT

Spread spectrum communications have increased interest due to their immunity to channel fading and low probability of intercept. One of the limitations of the traditional digital spread spectrum systems is the need for spreading code synchronization. Chaotic communication is the analogue alternative of digital spread spectrum systems beside some extra features like simple transceiver structures. In this paper, This paper was used instead of the digital modulation and demodulation carriers for use in the chaotic signal in a digital communication system among the chaotic modulation schemes, the Differential Chaos Shift Keying(DCSK) is the most efficient one because its demodulator detects the data without the need to chaotic signal phase recovery. Also Implementation of Differential Chaos Shift Keying Communication System Using Matlab/Simulink and the receiver can decode the binary information sent by the transmitter, performance curves of DCSK are given in terms of bit-error probability versus signal to noise ratio with spreading factor as a parameter and we compare it to BPSK modulation.

## 키워드

Chaos-Base Communication, Tent-Map Dcsk, Matlab/Simulink  
카오스 통신, Tent 맵, 차동CSK, Matlab/Simulink

## 1. 서 론

카오스 시스템은 공학, 의학, 생물학 등 여러 분야에서 많이 사용되고 있다. 특히 최근 들어 무선통신

시스템의 보안성을 향상시키기 위하여 카오스 신호를 이용한 여러 가지 변조 기법들이 많이 연구되고 있다. 카오스 신호의 특징은 비주기적이고 광대역성이며 매우 초기조건에 민감하다. 이런 이유로 비선형 예측 시

\* 교신저자(corresponding author) : 신라대학교 전자공학과(electronlab@silla.ac.kr)  
접수일자 : 2015. 04. 15

심사(수정)일자 : 2015. 05. 13

게재확정일자 : 2015. 05. 23

시스템, 난수 발생, 제어, 통신 분야 등 많은 연구가 진행 중이다. 랜덤 신호는 비선형적으로 발생하며 어떤 수단으로도 예측 불가능한 신호이며 현재의 값은 과거의 값과 무관하게 생성된다. 반면에 카오스 신호는 비선형적이지만 예측이 가능하며 과거의 값에 의해 미래의 값을 확실한 방법으로 구해낼 수가 있다. 그리고 임펄스 형태의 자기 상관성을 가지므로 매우 낮은 상호 상관성을 갖는다. 하지만 초기 조건에 민감하게 종속되기 때문에 초기 조건을 정확히 모른다면 미래의 값을 예측할 수 없다. 이러한 특성으로 인해 하나의 카오스 시스템에 다른 초기조건을 적용하여 상호 상관성이 매우 낮은 무한히 많은 카오스 신호를 생성할 수 있다. 이는 다른 사용자의 신호 감지가 어려워 보안성이 우수하고 도청 확률을 낮출 수 있으며, 다중 경로 채널과 전파 방해에 강한 특성을 갖게 한다[1].

카오스 신호의 비주기성, 광대역성, 다른 사용자 신호의 예측 어려움 및 초기조건에 민감하고 간단한 구현이 가능하다는 등의 특성들로 인해 확산통신 시스템에서 넓게 사용되는 의사 랜덤 캐리어 신호를 대체 할 수 있다.

광대역 통신 시스템에 카오스 시스템을 적용하는 방법은 캐리어 신호 대신 카오스 신호를 사용하여 데이터를 변조하는 것이다.

본 논문은 여러 가지의 카오스 신호 발생기 중 Tent map을 이용하여 카오스 신호를 생성하고 Attractor의 궤적을 이용하여 시스템에 사용할  $\alpha$ 를 찾아냈다. 그리고 여러 가지 변조 기술 중 검출기의 잡음레벨 문제를 해결할 수 있는 DCSK(Differential Chaos Shift Keying)를 이용하여 변조기와 복조기를 구성하였으며, 송신기와 수신기를 Matlab/Simulink를 이용하여 구현하였다. 그리고 수신 확산 인자에 따른 BER성능을 분석하였다[2].

## II. DCSK 시스템

CSK(Chaos Shift Keying) 방식은 잡음과 파라미터 부정합에 매우 강한 반면 두 카오스 신호의 attractor가 큰 차이를 갖는 경우에 비밀도가 낮아지는 단점과 수신기에서 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(DCSK) 변조 기법이 제안되었다. 그러나 카오스 신호의 비주기성 때문에 DCSK는 비트당 에너지가 같은 심볼이 송신 되더라도 수신기에서 비트 에너지의 변화를 가지기 때문에 잡음성능이 좋지 않다. 데이터를 전송하기 위해 한 심볼 구간을 두 개의 구간으로 나누어서 전송한다 [3-4].

### 2.1 DCSK 변조기

DCSK 변조에서 각각의 전송된 심볼 구간은 2개의 동일한 시간 슬롯으로 나누어진다. 첫 번째 슬롯은 2 번째 시간 슬롯이 정보 신호를 보내는 동안 카오스 신호를 전송하는데 사용된다. 2번째 시간 슬롯동안에 심볼 "1"이 전송이 되면 카오스 신호는 반복되고 만약 심볼 "0"이 전송이 되면 카오스 신호의 반전이 보내진다.

$$S_{DCSK}(t) = \begin{cases} \sqrt{E_b} c(t) & (l-1)T_b \leq t < (l-1/2)T_b \\ \sqrt{E_b} c(t - T_b/2) & (l-1/2)T_b \leq t < lT_b \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{DCSK}(t) = \begin{cases} \sqrt{E_b} c(t) & (l-1)T_b \leq t < (l-1/2)T_b \\ -\sqrt{E_b} c(t - T_b/2) & (l-1/2)T_b \leq t < lT_b \end{cases} \quad (2)$$

이때  $E_b$ 는 비트당 에너지이다.

그러므로  $l$  번째 심볼이 "1"일 경우 전송신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고 "0"일 경우 식(2)와 같이 나타 낼 수 있으며  $c(t)$ 는 카오스 신호를 의미한다 [5-6].

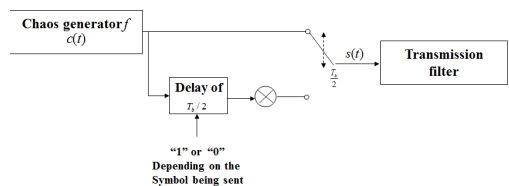


그림 1. DCSK 변조기의 구성도  
Fig. 1 Block diagram of DCSK modulator

그림 1은 DCSK변조기의 구성도이다.

## 2.2 DCSK 복조기

복조기는 사실상 비트 에너지 추정기이다. 수신기에서  $l$ 번째 디지털 심볼은 두 개의 수신된 심볼들 사이의 상관 함수를 계산하여 신호를 추출한다.

$$\begin{aligned}
 y(l T_b) &= \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} c(t) c(t - T/2) dt \\
 &= \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} [c(t) + \xi'(t)] [c(t - T_b/2) + \xi'(t - T_b/2)] dt \\
 &= \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} c(t) c(t - T_b/2) dt + \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} c(t) \xi'(t - T_b/2) dt \\
 &+ \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} \xi'(t) c(t - T_b/2) dt + \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} \xi'(t) \xi'(t - T_b/2) dt
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 y(l T_b) &= \int_{(l-1/2)T_b}^{lT_b} S_{DCSK}(t) S_{DCSK}(t - T_b/2) dt \\
 &= \begin{cases} \int_{(l-1)T_b}^{(l-1/2)T_b} c^2(t) dt & , \text{symbol} = 1 \\ -\int_{(l-1)T_b}^{(l-1/2)T_b} c^2(t) dt & , \text{symbol} = 0 \end{cases}
 \end{aligned} \quad (4)$$

복조기에서 후반기 심볼 구간의 수신된 신호는 후반기 심볼 구간의 신호와 서로 관련되어 있다.  $l$ 번째 심볼 구간 동안 상관기의 출력  $y(l T_b)$ 는 식(3)와 같다. 그리고 잡음이 없는 환경에서의  $y(l T_b)$ 는 식(4)와 같다.

$l$ 번째 심볼이 "1"일 때  $c^2(t) > 0$  이후 상관기의 출력은 양수고  $l$ 번째 심볼이 "0"일 때는 출력은 음수이다. 그러므로 상관기의 출력신호에 기반하여 정확하게 심볼을 찾을 수 있다. 그림 2은 DCSK복조기의 구성도이다.

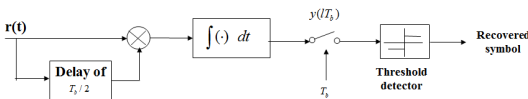


그림 2. DCSK 복조기의 구성도  
Fig. 2 Block diagram of DCSK demodulator

DCSK는 일정한 임계값을 갖는 반면, 비트 폭에 대한 샘플수가 증가하기 때문에 SNR이 개선되지만 데이터율이 감소하는 현상이 발생한다[7-8].

## III. Matlab/Simulink 구현

변조기에서 사용한 카오스 신호 발생기는 여러 논문의 성능평가에서 좋은 결과가 나온 Tent map을 사용하여 Subsystem으로 만들어 회로에 적용하였다.

Tent map의 방정식은 식(5)과 같고 현재 입력으로 이전 출력 값을 사용하는 간단한 비선형 방정식이다.

$$x_{n+1} = \alpha |0.5 - |0.5 - x_n|| \quad (5)$$

$x_n$ 은 이전 출력이다.

그림 3은 식(5)에서  $\alpha$  값을 바꾸어 시뮬레이션한 결과이다. 확인한 결과  $\alpha$ 의 크기가 작으면 Attractor의 궤적은 선형적 특성을 가지며  $\alpha$ 의 크기가 커질수록 Attractor의 궤적이 커지는 것을 확인하였다. 매개변수  $\alpha$ 의 값이 1.01보다 작은 경우 선형적인 특성을 가지며 1.01이상일 경우  $\alpha$ 의 값이 증가할수록 출력 값의 Attractor의 궤적이 더 큰 폭으로 변화하는 것을 확인할 수 있다[9-10].

그림 4는 Tent map 방정식을 Simulink로 구현한 회로이다. 여기서 사용한  $\alpha$ 는 1.3이다. 그림 5는 Simulink를 이용한 DCSK시스템의 구성도이다.

데이터 신호의 생성원으로 베르누이 랜덤 넘버 제너레이터(Bernoulli random number generator)를 사용하였다. 베르누이 랜덤 넘버 제너레이터는 베르누이 분포를 이용하여 임의의 0 또는 1을 생성한다. 즉  $p$ 로 나타내어지는 베르누이 분포는  $p$ 의 확률로 0을 생성하고,  $1-p$ 의 확률로 1을 생성한다. 설계된 모델에서는 동일한 확률의 0과 1을 생성하기 위하여 베르누이 분포를 0.5로 설정하였다. delay블록은 신호가 1이면 카오스 신호 값에 일정 delay만큼 값이 더해지고, 그렇지 않으면 변하지 않는다. 그리고 변조된 카오스 신호는 비교기에 의해 카운터 출력과 비교된다[11].

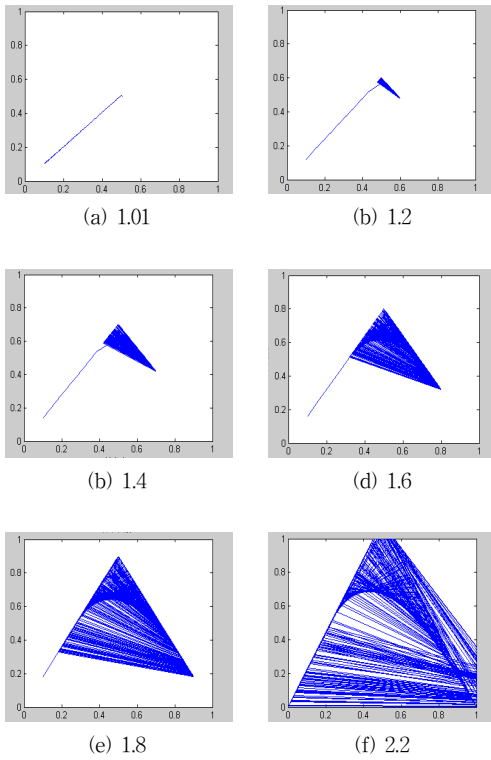


그림 3. Simulink를 이용한 Tent-map Attractor  
Fig. 3 Simulation result of Tent map Attractor using Simulink

채널은 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 환경이다. 수신기는 송신기와 같은 CSG(Chaos signal generator) 블록으로 구성된다. 따라서 송신기의 CSG와 같은 카오스 신호를 만든다.

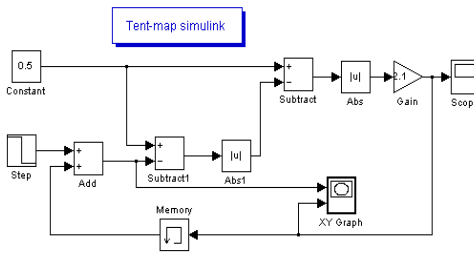


그림 4. Simulink를 이용한 Tent map 구성도  
Fig. 4 Tent map block diagram using Simulink

송신 신호와 CSG 블록이 같은 신호를 만들어 송수신기가 동기된다. Delay detector 블록을 사용함으로써 수신되는 신호에 delay성분을 검출하여 송신기가 보낸 2진 정보 신호를 추출할 수 있다.

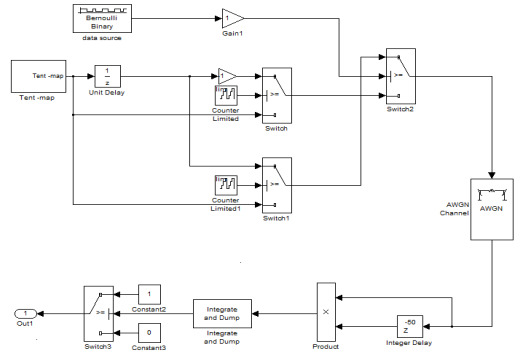


그림 5. Simulink를 이용한 DCSK시스템의 구성도  
Fig. 5 Block diagram of DCSK system using Simulink

#### IV. 시뮬레이션 결과

그림 6는 Simulink를 이용한 DCSK변조의 시뮬레이션 결과이다. 전송신호, 카오스 변조 후의 전송 순이다. 전송심볼이 "1"인 경우 카오스 신호  $c(t)$ 가 송신되고 "0"일 경우 카오스 신호가 반주기 뒤에 반전되어  $-c(t)$ 인 것을 확인할 수 있다.

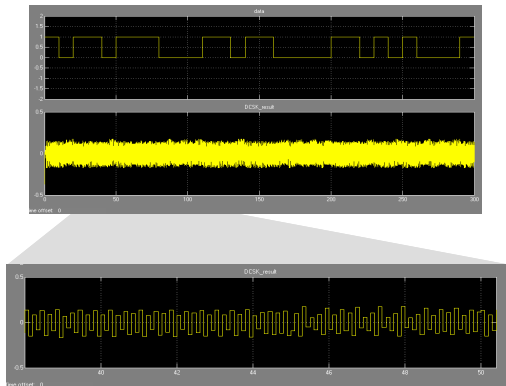


그림 6. DCSK 송신기 출력  
Fig. 6 Simulation result of DCSK transmitter output

그림 6는 Simulink를 이용한 DCSK변조의 시뮬레이션 결과이다. 전송신호, 카오스 변조 후의 전송 신호이다. 전송심볼이 “1”인 경우 카오스 신호  $c(t)$ 가 송신되고 “0”일 경우 카오스 신호가 반주기 뒤에 반전되어  $-c(t)$ 인 것을 확인할 수 있다.

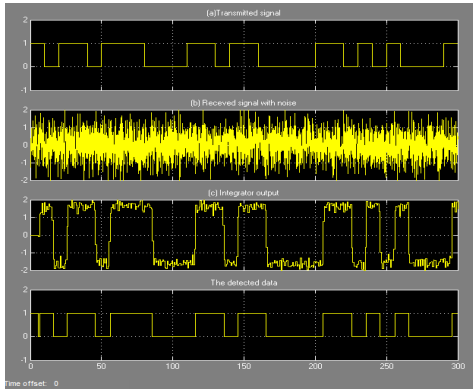


그림 7. DCSK 수신기 출력  
Fig. 7 Simulation result of DCSK receiver output

그림 7의 (a)는 송신기에서 만들어진 신호이고 (b)는 AWGN환경을 통과한 후 DCSK수신기 입력신호이다. 그리고 (c)는 적분기 출력이고 (d)는 수신기의 데이터 출력 신호이다. 이 때 신호대 잡음비는 15dB이며 확산 인자  $\beta$ 는 100으로 하였다. 그리고 그림 7의 (a)와 (d)를 통하여 확인할 수 있듯이 송신신호와 수신신호가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

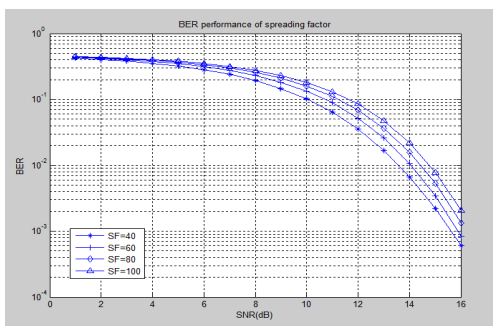


그림 8. 확산 인자에 따른 BER특성  
Fig. 8 BER performance of different values of the spreading factor

그림 8은 AWGN환경에서 DCSK카오스 시스템의 확산 인자값에 따른 BER 성능이다. 확산 인자의 크기가 클수록 BER성능이 열화된다. 확산 인자를 증가 시킴으로써 채널간의 간섭은 줄어들지만  $N_0$ 가 비례적으로 증가하기 때문에 BER의 열화가 일어난다.

## V. 결론

본 논문에서는 여러 가지 카오스 통신 시스템 중에서 비동기 방식의 DCSK변조를 이용한 송수신기의 구성도를 제안하고 Matlab/Simulink를 이용하여 설계하였다. 또한 확산 인자의 선택에 따른 간섭의 영향과 수신 BER 성능의 변화에 대하여 분석하였다. 송신기를 통하여 만든 2진 데이터가 수신기에 정확하게 복조 되는 것을 확인함으로써 설계를 검증하였다. 그리고 확산 인자의 값이 클수록 간섭은 줄어들게 되지만 이득이 감소하여 값이 증가 할수록 시스템의 BER성능이 열화되는 것을 확인하였다. 앞으로 Tent map뿐만이 아닌 다른 카오스 맵을 이용한 시스템을 설계하여 성능을 분석하고 DCSK의 수신기에서의 비트 에너지의 변화로 인한 잡음성능의 문제를 해결하여 다중사용자 환경에서의 카오스 시스템과 검증된 설계로 FPGA구현하여 하드웨어 장치에 액세스 할 수 있으며 레일리 채널환경 다양한 채널환경을 고려한 연구를 해나갈 예정이다.

## References

- [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] F. C. M. Lau and C. K. Tse, *Chaos - Based Digital Communication Systems*. Heidelberg, Germany: Springer, 2003.
- [3] M. A. Farah, A. Kachouri, and M. Samet, "Design of secure digital communication systems using DCSK chaotic modulation," *Design and Test of Integrated Systems in Nanoscale Technology*, Tunis, 2006, pp. 200-204.

- [4] H. Cho and G. Yim "Encryption Communication Protocol Design Using Unidirectional Synchronization of the Chaos System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol 9. no 10, Oct 2014, PP.1125 - 1130.
- [5] Y. Kim, J. Kim, H. Kim, and J. Kang, "Comparison of DCSK Receiver and Enhanced DCSK Receiver with Synchronization Error", *VTC 2006-spring IEEE 63rd*, vol. 5, 2006, pp. 2261-2265.
- [6] J. Lee and H. Ryu "Anti-Jamming Performance of Chaos Communications System Using DCSK and CDSK Modulation Method" *J. of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and science*, vol. 4, no. 24, Apr. 2013, pp. 417-425.
- [7] W. M. Tam and F. C. M. Lau, "Generalized correlation-delay-shift-keying scheme for noncoherent chaos-based communications systems," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.* vol. 53, no. 3, Mar. 2006, pp. 712 - 721.
- [8] S. Hong and E. Jang, "FPGA implementation of digital transceiver using chaotic signal," *J. of Korean Inst. Inform. Technol.*, vol 8. no 8, Aug. 2010, pp. 9-15.
- [9] Y. Bae "Chaotic Phenomena in MEMS with Duffing Equation" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 24, Oct. 2011, pp. 709-716.
- [10] S. Arai and Y. Nishio, "Noncoherent correlation-based communication systems choosing different chaotic maps," *IEEE Int. Symp. Circuits Syst(ISCAS 2007)*, May 2007. pp. 1433 - 1436.
- [11] K. Han and G. Yim "Design of an RFID Authentication Protocol Using Nonlinear Tent-Map" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol 9. no 10, Oct 2014, pp. 1145-1152.

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