

카오스 기저 디지털통신시스템에서의 신호발생과 검출방식

Signal Generation and Detection Schemes of Chaos based Digital Communication Systems

이 정 재*, 정 찬 우*

Jeong-Jae Lee*, Jeong-Chan Woo*

요약

본 논문에서는 통상적인 카오스 부호계열 그리고 한 카오스 부호계열의 FFT의 실수와 허수부로부터 발생하는 새로운 카오스 부호계열의 발생 알고리즘과 발생된 부호계열의 명료도를 측정할 수 있는 시간-주파수 함수 특성을 검토하였다. 그리고 서로 다른 카오스 부호계열을 이용한 시스템과 동일한 카오스 부호계열의 FFT를 이용하는 두 종류의 카오스 기저 QCSK 디지털 통신시스템을 AWGN과 페이딩 통신 채널에서 분석하였다. 분석결과 이러한 카오스 부호계열은 델타함수와 같은 자기상관함수와 영과 같은 상호상관함수 특성을 가지며 카오스 기저 대역확산통신시스템에 적합함을 보였다. Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용한 두 카오스 기저 QCSK 시스템의 성능평가결과 부호계열의 FFT를 이용한 시스템이 서로 다른 카오스 부호계열을 이용한 시스템에 비하여 성능이 개선됨을 보였다.

Abstract

In this paper generating algorithms of the conventional chaos code sequences and a new chaos code sequence derived from the real and imaginary parts of FFT of one chaos code sequence, and the time-frequency function characteristics of generated code sequences to measure the signal resolution, are considered. And two chaos based QCSK digital communication systems—one with two different chaos code sequences, the other with FFT of one chaos code sequence—are analyzed in AWGN and fading communication channels. After analyzing the correlation functions of such sequences, the delta-like autocorrelation and near zero crosscorrelation functions of them are very suitable for chaos based spread spectrum communication systems, is verified. Through evaluating the performance of two chaos based QCSK systems above using Monte-Carlo simulation, the improvement of performance in the latter QCSK system compare favorably with that of the former system, is shown.

Keywords : Chaos code sequence, Time-frequency function, QCSK, Correlation function

I. 서론

무선 음성 가입자와 무선인터넷 수요의 급속한 성장에

대비하기 위하여 다중경로, 페이딩, 그리고 간섭등과 같은 무선채널상의 문제점과 멀티미디어 신호를 위한 넓은 대역폭, 개방된 무선통신에서의 보안성을 만족시키기 위한 통신방식의 하나로 최근 카오스 신호를 이용한 카오스 기반 디지털통신시스템이 소개되고 있다. 카오스 부호계열을 이용하는 통신방식의 하나는 대역확산이며 지금까지는 쉬프트 레지스터를 이용한 PN 부호계열 즉 m-부호계열, Gold 그

*동의대학교 정보통신공학과

논문 번호 : 2007-1-4 접수 일자 : 2007. 1. 9

심사 완료 : 2007. 1. 16

※이 논문은 2004학년도 동의대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음(2004AA151).

리고 Kasami 부호계열 등이 이용되고 있다[1-2]. 그러나 직접확산의 경우 이들 부호는 일반적으로 GF(2)의 유한장 내에서 원소를 갖는 이원부호계열이 대부분으로 부호계열의 발생에 다변화를 기대하기 힘들었다. 그리고 확산부호계열은 여러 이용자의 이용이 가능하도록 발생 군이 커야하며 송수신간의 동기를 위하여 자기상관함수 및 상호상관함수 특성이 좋아야 한다. 한편 카오스 부호계열은 발생함수의 초기조건을 달리함으로써 서로 독립적인 부호계열을 생성할 수 있어 무한히 큰 발생군을 형성할 수 있기 때문에 이용자의 수에 따른 제약은 적게 받으며 매우 우수한 상관함수특성과 부호계열의 비이원성 그리고 랜덤성에 의하여 보안성을 높일 수 있다[3-7].

본 논문에서는 카오스 맵에 의하여 발생하는 카오스부호계열의 상관함수와 시간-주파수함수의 특성을 검토하고 이를 이용한 QCSK(Quadrature Chaos Shift Keying) 시스템의 성능을 AWGN과 페이딩채널 환경에서 비교분석 한다. 이를 위하여 제 II장에서는 부호계열의 상관함수와 시간-주파수 함수에 대하여 살펴보고 제 III장에서는 카오스 부호계열과 카오스 부호계열의 FFT를 이용한 새로운 부호계열 발생 알고리즘을 분석한다. 제 IV장에서는 기존 카오스 부호계열과 FFT로부터 발생하는 부호계열을 이용한 QCSK(Quadrature Chaos Shift keying) 송수신시스템을 구성하고 검토한다. 그리고 제 V장에서는 시뮬레이션을 통하여 카오스부호계열의 발생 및 특성과 AWGN과 페이딩 채널에서 카오스 부호계열 기반 QCSK 시스템의 성능을 분석한다. 마지막으로 제 VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시간-주파수 함수 및 상관함수

신호 $s(t)$ 의 시간-주파수함수는 다음 식 (1)과 같이 정의된다[8].

$$|\chi(\tau;f)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t-\tau)e^{j2\pi f\tau} dt \right|^2 \quad (1)$$

여기서 $s^*(t)$ 는 $s(t)$ 의 공액복소수신호다. 이 함수는 점 $(\tau, f) = (0, 0)$ 에서 가장 큰 값을 갖게 된다. 그리고 신호 $s(t)$ 의 에너지 E 는

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt \quad (2)$$

로 표현된다. 한편 카오스 부호계열에 대한 복소포락선은 다음 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{Nt_1}} \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t-kt_1) \quad (3)$$

여기서

$$s_k(t) = \begin{cases} a(k)\exp(j2\pi f_k t), & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & |t| \geq t_1 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 N 은 부호계열의 길이, $a(k)$ 는 카오스부호계열을 의미한다. 그리고 신호 $s(t)$ 의 자기상관함수와 두 신호 $s_1(t)$

와 $s_2(t)$ 간의 상호상관함수는 각각 다음 식 (5)과 식 (6)으로 정의된다.

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t+\tau)dt \quad (5)$$

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t)s_2^*(t+\tau)dt \quad (6)$$

식 (1)의 시간-주파수함수에서 주파수 $f=0$ 으로 하면 다음 식 (7)과 같이 자기상관함수를 제공한 값과 같게 된다.

$$|\chi(\tau;0)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t-\tau)dt \right|^2 \quad (7)$$

따라서 시간-주파수함수 특성을 비교하면 상관함수 특성의 분석도 가능하게 됨을 알 수 있다.

한편 이산신호 부호계열 $s[n]$ 의 자기상관함수와 두 부호계열 $s_1[n]$ 과 $s_2[n]$ 간의 상호상관함수는 각각 다음 식 (8)과 (9)로 정의된다.

$$R[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n+k]s[n] \quad (8)$$

$$R_{12}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s_1[n+k]s_2[n] \quad (9)$$

III. 카오스 부호계열발생 함수

카오스 부호계열은 비선형으로 발생하는 비주기적, 유사랜덤(random-like) 계열이다. 카오스 부호계열은 앞선 샘플링 순간의 상태변수를 이용하여 샘플링 순간의 값들을 표현하는 아래 식 (10)과 같은 반복함수에 의하여 표현될 수 있다.

$$x_n = f(x_{n-1}, \mu) \quad (10)$$

여기서 x_n 은 n 번째 샘플링 순간에서의 상태변수 벡터, $f(\cdot)$ 는 시스템의 동작을 나타내는 반복함수, 그리고 μ 는 시스템 동작에 영향을 주는 파라미터다. 다음과 같은 카오스 발생 맵(map)을 이용하여 카오스 부호계열을 발생시킬 수 있다[3].

(a) 2차 맵

$$x[k] = 1 - 2x^2[k-1] \quad (11)$$

(b) 3차 맵(cubic map)

$$x[k] = 4x^3[k-1] - 3x[k-1] \quad (12)$$

FFT를 이용한 새로운 카오스 부호계열을 유도하기 위하여 구간 $t \in [0, \tau]$ 에서 정의되고 영 평균을 갖는 신호 $x(t)$ 를 다음 식 (13)과 같이 정의한다.

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k \sin(k\omega t + \psi_k) \quad (13)$$

따라서 $x(t)$ 의 위상을 $\pi/2$ 변화 시킨 신호 $y(t)$ 는 다음 식 (14)로 된다.

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k \cos(k\omega t + \psi_k) \quad (14)$$

신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 는 구간 $t \in [0, \tau]$ 에서

$$\int_0^{\tau} x(t)y(t)dt = 0, \quad (15)$$

$$P_x = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} x^2(t)dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} y^2(t)dt = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} f_k^2 \quad (16)$$

으로 되기 때문에 두 신호는 직교하고 동일 전력을 갖는다. 이 특성을 다음 식 (17)과 같이 표현되는 임의의 카오스 부호계열 x 의 FFT(fast fourier transform)에 이용한다.

$$F[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j2\pi nk/N} \\ = Re\{F[k]\} + jIm\{F[k]\} \quad (17)$$

여기서 $k=0,1,\dots,N-1$. 그리고

$$x_I = Re\{F[k]\} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cos(2\pi nk/N) \\ x_Q = Im\{F[k]\} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \sin(2\pi nk/N) \quad (18)$$

로 정의되는 x_I 와 x_Q 은 서로 직교하는 카오스 부호계열로 이용될 수 있다.

IV. QCSK 송수신시스템

그림 1은 AWGN과 페이딩채널에서 두 종류의 카오스 부호계열을 이용한 송수신시스템의 구조를 보여준다. 발생된 정보 데이터 $d[k]=\pm 1$ 는 직병렬 변환기를 통하여 두 채널 데이터 $d_I[k]$ 와 $d_Q[k]$ 로 나누어지며 직교성을 갖는 두 종류의 카오스 부호계열 $x=(x[1],x[2],\dots,x[N])$ 와 $y=(y[1],y[2],\dots,y[N])$ 에 의하여 곱해지게 된다.

$$s_I = \sum_{n=1}^N d_I[k]x[n], \quad n=1,2,\dots,N \quad (19)$$

$$s_Q = \sum_{n=1}^N d_Q[k]y[n], \quad n=1,2,\dots,N \quad (20)$$

이 과정은 직접대역확산과 같은 역할을 하게 된다. 두 채널에서 발생된 신호 s_I 와 s_Q 는 결합되어 페이딩 채널을 통과하게 되며 이 신호에 가우시안 잡음 n 가 더해지게 된다. 송신신호 s 와 수신된 신호 r 은 다음과 같이 표현된다.

$$s = s_I + s_Q, \\ r = \alpha s + n \quad (21)$$

여기서 α 는 페이딩의 영향을 받는 인자이다. 수신기에서의 완전한 동기를 가정하면 수신된 신호에 송신기에서의 두 카오스 신호 x 와 y 에 의한 상관기 출력 z_I 와 z_Q 를 구하면

$$z_I = \int_0^{\tau} s x dt = \int_0^{\tau} \alpha s_I x dt + n_I \quad (22)$$

$$z_Q = \int_0^{\tau} s y dt = \int_0^{\tau} \alpha s_Q y dt + n_Q \quad (23)$$

여기서 $n_I = \int_0^{\tau} n x dt$, $n_Q = \int_0^{\tau} n y dt$ 이다.

따라서 z_I 와 z_Q 가 각각 평판검출기를 거치게 되며 대응되는 두 출력 신호 \hat{d}_I 와 \hat{d}_Q 는 병렬/직렬 변환기를 거쳐 데이터 $\hat{d}[k]$ 가 검출된다.

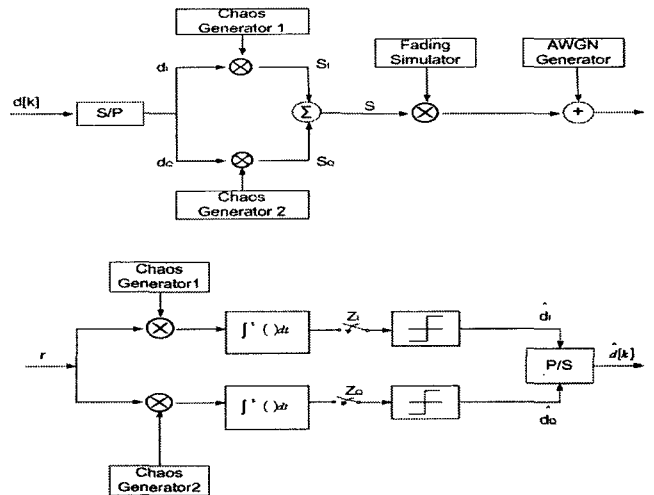


그림 1. 두 종류의 카오스 부호계열을 이용한 QCSK 송수신시스템(AWGN과 페이딩 채널).

Fig.1. QCSK transmitter and receiver systems with two different chaos code sequences in AWGN and fading channel.

그림 2는 AWGN과 페이딩 채널에서 한 종류의 카오스 부호계열의 FFT를 이용한 QCSK 송수신시스템의 구조를 보여준다. 그림 2와 같이 송신시스템에서는 직/병렬 변환기를 통과한 두 채널상의 신호 하나는 카오스 발생기에 의하여 발생된 카오스 부호계열 x 의 FFT 중 실수부 x_I 가 직접 곱해지며 다른 채널에는 허수부 x_Q 에 의하여 직접대역이 확산되게 된다.

$$s_I = \sum_{n=1}^N d_I[k]x_I[n], \quad n=1,2,\dots,N \quad (24)$$

$$s_Q = \sum_{n=1}^N d_Q[k]x_Q[n], \quad n=1,2,\dots,N. \quad (25)$$

이 두 신호는 결합되어 그림 1에서와 동일한 채널을 통과하게 된다. 수신된 신호는 수신기에서 FFT변환 카오스부호계열 x_I 와 x_Q 를 이용한 상관기를 거치게 되며 각각의 출력 z_I 와 z_Q 는 다음과 같이 표현된다.

$$z_I = \int_{-\tau}^{\tau} \alpha s_I x_I dt + n_I, \quad (26)$$

$$z_Q = \int_{-\tau}^{\tau} \alpha s_Q x_Q dt + n_Q \quad (27)$$

여기서 $n_I = \int_{-\tau}^{\tau} n x_I dt$, $n_Q = \int_{-\tau}^{\tau} n x_Q dt$ 이다. 그리고 그림 1에서와 동일한 과정을 거쳐 데이터 $\hat{d}[k]$ 를 검출하게 된다.

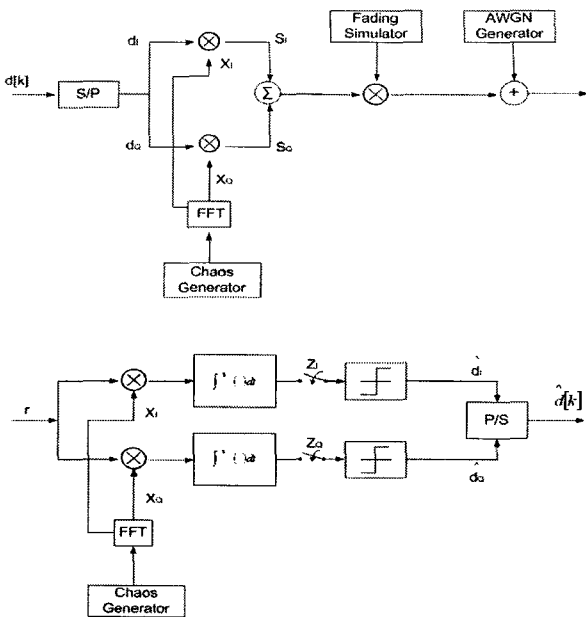


그림 2. 한 종류의 카오스 부호계열의 FFT를 이용한 QCSK 송수신시스템(AWGN과 페이딩 채널).
Fig.2. QCSK transmitter and receiver systems with the real and imaginary parts of FFT of one chaos code sequence in AWGN and fading channel.

V. 시뮬레이션

1. 카오스부호계열의 상관함수 특성

그림 3은 식 (12)의 3차 맵으로부터 초기값 $x[1]=0.289$ 에서 발생된 길이가 10000인 카오스 부호계열에 대한 자기

상관함수를 보여주며 그림 4는 초기값 $x[1]=0.289$ 와 길이가 10000인 3차 맵으로부터 발생된 카오스 부호계열과 식 (11)을 이용하여 초기값 $x[1]=0.289$, 길이 10000으로 발생된 2차 맵 카오스 부호계열과의 상호상관함수 특성을 보여주고 있다. 그림 5는 초기값 $x[1]=0.289$ 에서 3차 맵으로부터 발생된 길이 10000인 카오스 부호계열의 FFT를 이용하여 발생한 식 (18)의 x_I 에 대한 자기상관함수를 보여 주며 그림 6은 x_Q 와의 상호상관함수 특성을 보여준다. 그림 3, 5로부터 발생된 카오스부호계열의 우수한 상관함수 특성을 확인할 수 있으며 그림 4, 6에서 알 수 있는 바와 같이 카오스 부호계열간의 상호상관함수가 거의 0으로 서로 다른 두 부호계열간의 독립성을 확인할 수 있다. 그림 5, 6으로부터 식 (18)로 표현되는 카오스 부호계열의 FFT의 실수부와 허수부를 이용한 부호계열도 카오스 부호계열로 이용이 가능함을 알 수 있다.

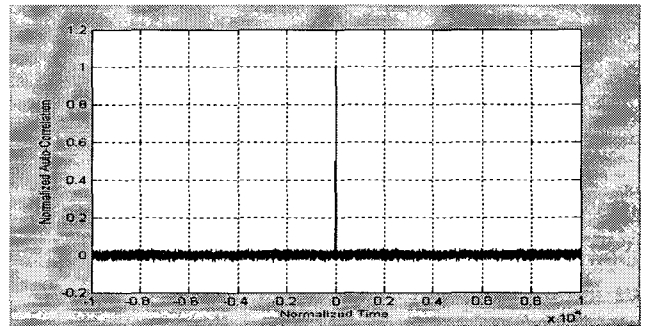


그림 3. 3차 맵에 의하여 발생된 카오스부호계열의 자기상관함수($L_c = 10000, x[1]=0.289$).
Fig.3. The autocorrelation function of chaos code sequence generated by the cubic map($L_c = 10000, x[1] = 0.289$).

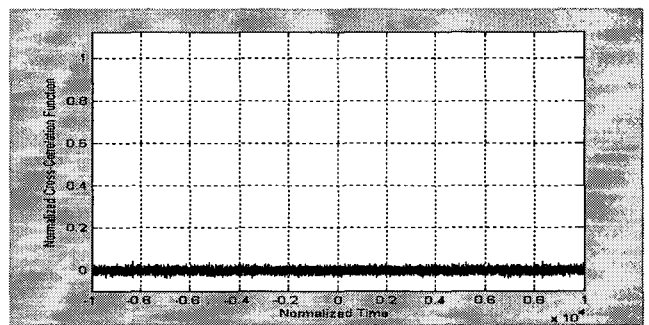


그림 4. 2차 맵과 3차 맵에 의하여 발생된 카오스부호계열간의 상호상관함수($L_c = 10000, x[1]=0.289$).
Fig.4. The crosscorrelation function of chaos code sequences generated by the second order map and cubic map($L_c = 10000, x[1] = 0.289$).

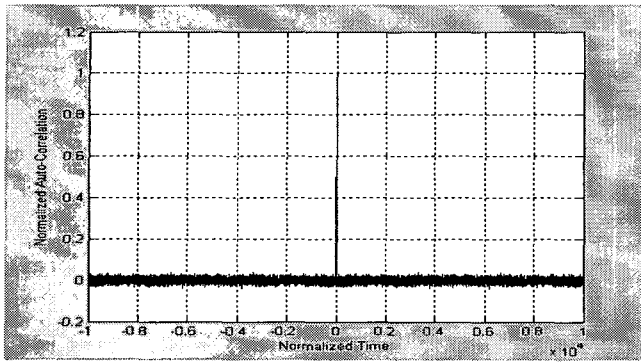


그림 121 3차 맵 카오스 계열 x 의 FFT 실수부 x_r 에 대한 자기상관함수 ($L_c = 10000, x[1] = 0.289$).
Fig.5. The autocorrelation function of the real part x_r of FFT of chaos code sequence generated by the cubic map ($L_c = 10000, x[1] = 0.289$).

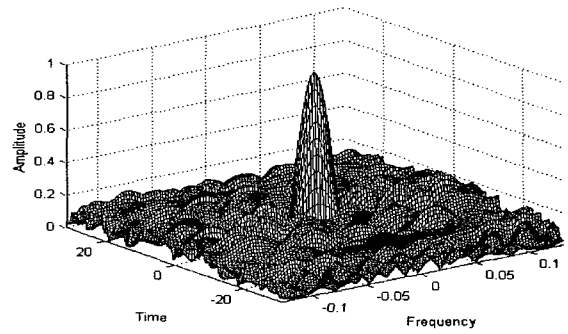


그림 123. 31비트 m-부호계열의 시간-주파수함수특성 Fig.7. The time-frequency function characteristic of m-sequence with 31 bits length.

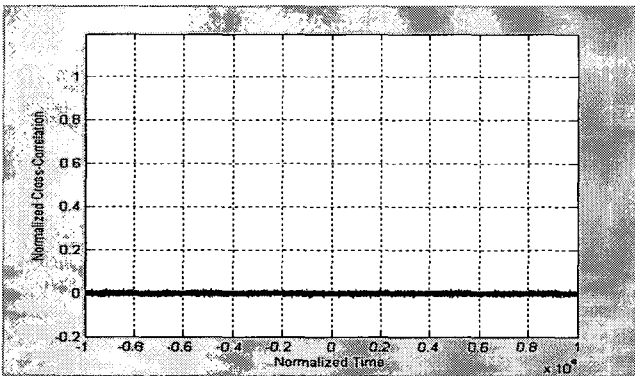


그림 122. 3차 맵 카오스 계열 x 의 FFT 실수부 x_r 와 허수부 x_i 에 대한 상호상관함수 ($L_c = 10000, x[1] = 0.289$).
Fig.6. The crosscorrelation function of the real part x_r and imaginary part x_i of FFT of chaos code sequence generated by the cubic map ($L_c = 10000, x[1] = 0.289$).

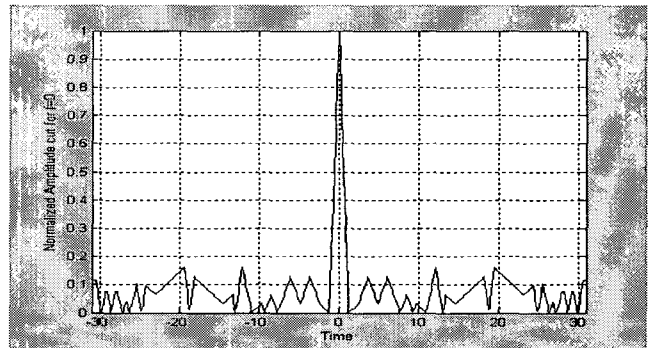


그림 124. 31비트 m-부호계열의 시간-주파수함수의 $f=0$ 에서의 단면 특성.
Fig.8. The section of the time-frequency function characteristic of m-sequence with 31 bits length for $f=0$.

2. 카오스 부호계열의 시간-주파수함수 특성

카오스 부호계열의 시간-주파수 함수 특성을 분석하기 위하여 자기상관함수 특성이 매우 우수한 m-부호계열과 카오스부호계열의 특성을 비교분석한다. 그림 7은 원시다항식 $x^7 + x + 1$ 로부터 발생된 길이 31인 m-부호계열의 시간-주파수 함수특성을 보여준다. 그림 8은 식 (7)로 표현되는 주파수 $f=0$ 에서의 단면 $|x(\tau, 0)|^2$ 을 보여준다. 그리고 그림 9는 초기값 $x[1]=0.289$ 에서 3차 맵에 의하여 발생된 길이 100인 카오스부호계열의 시간-주파수함수 특성을 보여준다. 그리고 그림 10은 그림 8과 같이 주파수 $f=0$ 에서의 단면을 보여준다. 그림 7과 그림 9를 비교하면 길이에 따른 차이를 감안하더라도 카오스 부호계열의 에너지가 보다 좁은 시간-주파수 범위에 집중되어 있음을 알 수 있다. 그리고 그림 8과 그림 10을 비교하면 예상과 같이 카오스 부호계열 주엽 폭이 m-부호계열 보다 좋으며 카오스 부호계열의 부엽 또한 m-부호계열과 유사한 결과를 확인 할 수 있다.

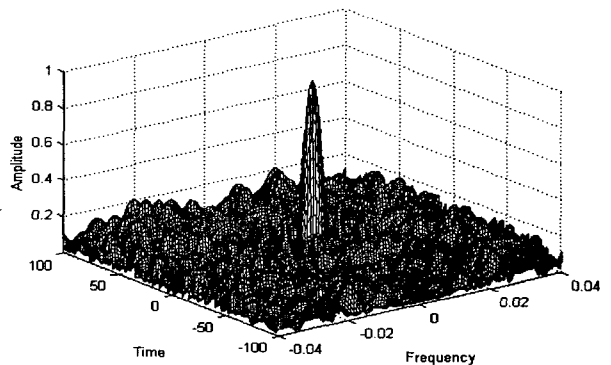


그림 125. 길이 $L_c = 100$ 의 3차 맵 카오스부호계열의 시간-주파수함수 특성.
Fig.9. The time-frequency function characteristic of cubic map chaos code sequence with the length $L_c = 100$.

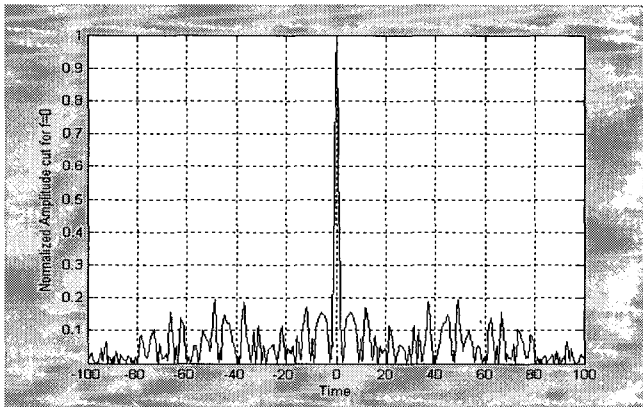


그림 126. 길이 $L_c=100$ 의 3차 맵 카오스부호계열의 시간-주파수함수 $f=0$ 의 단면 특성.

Fig.10. The section of the time-frequency function characteristic of cubic map chaos code sequence with the length $L_c=100$ for $f=0$.

3. 카오스 부호계열 기반 QCSK 시스템 성능

시뮬레이션은 송수신간 동기가 이루어졌다는 가정에서 실행되었고 사용된 모든 카오스 부호계열은 에너지를 정규화하였다. 그리고 데이터 $d[k]$ 의 길이는 10000 비트로 하고 동일 조건에서 100회 수행시켜 평균오율을 구하였다. 페이딩 채널은 칩 간격에서 균일하게 영향을 주고 시간분해도가 $5 \mu\text{sec}$, 단일경로 Rayleigh 페이딩을 발생하기 위한 페이딩의수는 6개, 도플러주파수는 160Hz로 설정하였다[9]. 여기서 부호계열의 길이 $N=10$ 과 $N=100$ 두 종류를 이용하여 Rayleigh 페이딩과 AWGN 채널환경에서 성능을 구하였다.

그림 11은 그림 1에서의 시스템에서 초기조건을 $x[1]=0.2899$ 와 $x[1]=0.28$ 로 달리하여 발생된 두 종류의 3차 맵 카오스 부호계열을 사용한 QCSK 시스템 성능을 나타낸다. 그리고 그림 12는 초기조건 $x[1]=0.2899$ 인 3차 맵 카오스 부호계열의 FFT로부터 발생된 부호계열을 이용한 그림 2의 QCSK 시스템의 성능을 보여준다.

그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 부호계열의 길이에 따른 성능 개선은 페이딩 채널의 경우 오율 10^{-2} 에서 대략 2dB, AWGN환경에서는 대략 1dB정도의 개선 효과를 확인할 수 있다. 그림 12에서와 같이 FFT 변환으로부터 발생된 부호계열을 이용한 시스템의 성능이 그림 11에서의 서로 상이한 3차 맵 카오스 부호계열을 사용한 시스템보다 개선되었음을 알 수 있다.

이러한 결과는 식 (15)에서 보인 완전한 직교성에 기인한 것으로 실제로 동기가 이루어지지 않은 환경에서는 분석결과가 달라 질 수 있다. 본 시뮬레이션 결과는 Matlab을 사용하여 이루어 졌다.

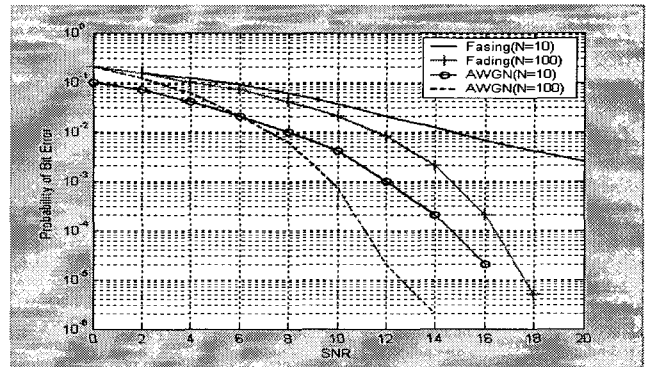


그림 127. 3차 맵에서 초기조건 $x[1]=0.2899$ 와 $x[1]=0.2800$ 에서 발생된 두 종류의 카오스 부호계열을 사용한 QCSK 시스템 성능(Rayleigh 페이딩과 AWGN 채널).

Fig. 11. The performance of QCSK system with two different chaos code sequences generated by cubic map for the initial conditions $x[1]=0.2899$ and $x[1]=0.2800$ in AWGN and Rayleigh fading channel.

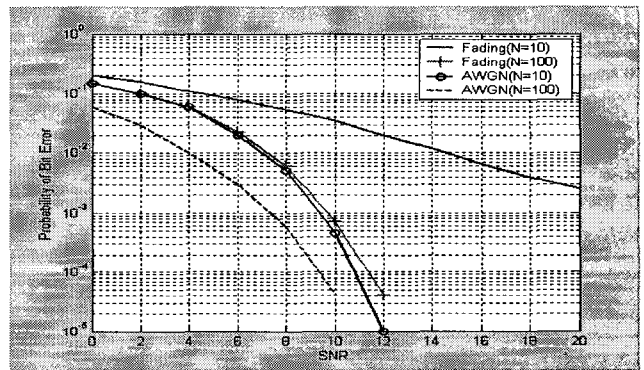


그림 12. 3차 맵과 그 FFT의 카오스 부호계열을 사용한 QCSK 시스템 성능(Rayleigh 페이딩과 AWGN 채널).

Fig.12. The performance of QCSK system with the real and imaginary parts of FFT of the cubic map chaos code sequence in AWGN and fading channel.

VI. 결론

카오스 부호계열에 대한 자기상관함수와 상호상관함수 특성을 분석하고 신호 명료도의 척도가 될 수 있는 시간-주파수 함수특성을 m-부호계열과 비교분석한 결과 그 특성이 우수함을 확인 하였다. 또한 카오스 부호계열의 FFT를 이용하여 발생시킨 새로운 부호계열도 상관함수 특성이 매우 우수하여 카오스 부호계열로 활용될 수 있는 가능성을 보였다. 그리고 두 종류의 카오스 부호계열을 이용한 카오스 기반 QCSK 시스템에 비하여 한 종류의 카오스 부호계열의 FFT를 이용한 카오스 기반 시스템으로 좀 더 개선된 성능을 얻을 수 있었다.

향후 카오스 부호계열을 이용한 시스템은 신호의 마스크, 부호화, 암호화, 대역확산, 그리고 다중접속 통신기술

등 응용범위가 매우 다양하고 폭 넓게 확산될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1]S.W.Golomb, "Shift register sequences," Holden-Day, Inc, San Francisco, 1967
- [2]J.D.Olsen, R.A.Scholtz, and L.R.Welch, "Bent-function sequences," IEEE Trans. Inform. Theory, Vol.IT-28, No.6, pp.858-864, Nov. 1982.
- [3]F.C.M.Lau and C.K.Tse, "Chaos-Based Digital Communication Systems," Springer-Verlag, Berlin Heideberg, 2003.
- [4]C.Williams, "Chaotic Communications Over Radio Channels," IEEE Trans. Circuit and Systems, VOL.48, NO.12, pp.1394-1404, Dec. 2001.
- [5]S..Mandal and S.Banerjee, "Performance of Differential Chaos Shift Keying Communication over Multipath Fading Channels," IEICE Trans. VOL.E85-A, NO.1 pp.1-10, January 2002.
- [6]S..Mandal and S.Banerjee,, "CMOS Implementation of a Chaos-based Communication System," IEEE Trans. Circuit and Systems I: Fundamental Theory and Applications, VOL.49, NO.11 , pp.1-10. Nov.2002.
- [7]T.Munakata, S.Sinha, and W.L.Ditto, "Chaos Computing: Implementation of Fundamental Logical Gates by Chaotic Elements," IEEE Trans. Circuit and Systems I: Fundamental Theory and Applications, VOL.49, NO.11, pp.1629-1633. Nov.2002.
- [8]B.R.Mahafza, A.Z.Elsherbeni, "MatLab Simulations for Radar Systems Design," Chapman & Hall/CRC, New York, 2004.
- [9]M. Patzold, "Mobile Fading Channels," Wiley, New York, 2002



정 찬 우(Chan-Woo Jeong)

1997.3-2004.2 동의대학교 정보통신공학과 (공학사)

2004.3-2006.2 동의대학교 정보통신공학과 (공학석사)

관심분야: 디지털통신시스템, 이동통신, 부호이론



이 정 재(Jeong-Jae Lee)

1969.3-1973.2 서강대학교 전자공학과(공학사)

1981.3-1990.8 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사, 공학박사)

1987.3-현재: 동의대학교 정보통신공학과 교수

관심분야: 디지털통신시스템, 이동통신, 부호이론