

M진 위상 신호 방식에 효과적인 다상 서명 수열

종신회원 박 소 령*, 송 익 호**

Polyphase Signature Sequences for M-ary Phase Signaling

So Ryoung Park*, Ickho Song** *Lifelong Members*

요 약

이 논문에서는, 일반 홀상관 (general odd correlation) 성질이 비동기 (asynchronous) M진 위상 신호 (M-ary phase signal) 방식에 알맞은 다상 (polyphase) 서명 수열 (signature sequence) 집합을 제안하고 상관 성질을 분석한다. 또한, 제안한 수열과 짝상관 (even correlation) 성질이 좋은 기존 다상 수열인 FZC (Frank-Zadoff-Chu) 수열, 짝상관과 홀상관이 같은 EOE (equivalent odd and even correlation) 수열을 최대 절대 상관값을 (the maximum magnitude of correlations) 사용하여 상관 성질을 견주어 본다. M진 위상 신호 방식을 사용한 직접수열 부호분할 다중접속 (direct sequence code division multiple access: DS/CDMA) 시스템에서 제안한 수열과 FZC 수열을 사용할 때를 모의 실험한 결과, 다중 경로 성분이 존재할 때 제안한 수열을 쓴 시스템 성능이 FZC 수열을 쓸 때보다 더 나음을 보인다.

Key Words : Polyphase signature sequence, General odd correlation, M-ary phase signaling, DS/CDMA

ABSTRACT

In this paper, we propose a class of polyphase signature sequences, whose general odd correlation properties are useful for M-ary phase signaling systems. The maximum magnitude of the general odd correlation functions of the proposed sequences are investigated and compared with those of FZC (Frank-Zadoff-Chu) sequences and those of EOE (equivalent odd and even correlation) sequences. The performance of the asynchronous M-ary phase signaling systems using the proposed sequences is simulated and compared with that using FZC sequences in direct sequence code division multiple access (DS/CDMA) systems. The performance of the system using the proposed sequence is shown to be better than that using FZC sequences when the multipath fading is in existence.

1. 서 론

직접수열 부호분할 다중접속 (direct sequence code division multiple access: DS/CDMA) 방식은 근본적으로 여러 사람이 같은 시간에 같은 주파수로 같은 대역을 써서 통신하는 방식으로, 사용자는 자신의 서명 수열만으로 (signature sequence) 구분

되며, 하나의 기지국에 접속하는 사용자가 늘어날수록 다른 사용자의 신호가 일으키는 간섭이 커지므로 성능이 조금씩 떨어진다. 이때, 성능이 떨어지는 정도는 사용자에게 배정되는 서명 수열의 상관 (correlation) 성질에 따라 달라지므로, 직접수열 부호분할 다중접속 시스템이 수용할 수 있는 사용자 수는 그 시스템이 쓰는 서명 수열의 상관 성질에

* 이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업의 지원을 받아 연구한 것입니다. (과제번호: 2004-041-D00472)

* 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 (srpark@catholic.ac.kr)

** 한국과학기술원 전자전산학과 (i.song@ieee.org)

논문번호: KICS2007-10-442, 접수일자: 2007년 10월 2일, 최종논문접수일자: 2007년 10월 9일

크게 좌우된다. 따라서, 서명 수열이 서로 상관관계가 없도록, 또는 최대한 상관이 적도록 설계함으로써, 간섭을 근본적이고도 효과적으로 줄이고 접속 가능한 사용자의 수를 늘이며 주어진 대역을 효율적으로 쓰도록 할 수 있다^[1-3].

두 수열 $c^{(k_1)}$ 와 $c^{(k_2)}$ 가 τ 만큼 어긋나 있을 때의 일반 홀상관 (general odd correlation) 함수 $\theta_{k_1, k_2, \gamma}(\tau)$ 는 다음과 같이 정의된다^[4].

$$\theta_{k_1, k_2, \frac{\gamma}{M}}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-\tau-1} c_n^{(k_1)} [c_{\tau+n}^{(k_2)}]^* + \exp\left[j2\pi\frac{\gamma}{M}\right] \sum_{n=N-\tau}^{N-1} c_n^{(k_1)} [c_{R(n+\tau, N)}^{(k_2)}]^* \quad (1)$$

여기서, γ/M 은 M 진 위상 신호 방식에서 어긋난 수열의 앞뒤 심볼 위상 차로서 $\gamma \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 이고, $c_n^{(k)}$ 는 수열 $c^{(k)}$ 의 n 번째 값, N 은 수열의 길이, $R(n, N)$ 은 n 을 N 으로 나누었을 때의 나머지이다. 식 (1)에서 $\gamma=0$ 이면 주기 (periodic) 상관 또는 짝상관 (even correlation) 함수라고도 부른다.

식 (1)의 값은 DS/CDMA 시스템이 M 진 위상 신호 방식을 쓸 때 발생하는 간섭의 양으로 해석할 수 있다. $k_1 \neq k_2$ 이면 교차상관으로서 (cross-correlation: CC) 다른 사용자의 신호가 일으키는 다중접속 간섭의 (multiple-access interference: MAI) 양이 되고, $k_1 = k_2$ 이면 자기상관으로서 (auto-correlation: AC) 자기 신호가 지연되어 도착하여 발생하는 다중경로 간섭의 (multipath interference: MPI) 양이 된다. 그러므로 교차상관이 모든 τ 에서 크기가 0에 가까울수록, 자기상관이 $\tau \neq 0$ 인 모든 τ 에서 크기가 0에 가까울수록 그 수열의 상관 성질이 좋다고 표현한다.

이제까지의 연구에서는 수열의 짝상관 성질만을 주로 고려하여 서명 수열을 설계하였다^[5-7]. 그러나 특정 수열을 서명 수열로 쓰는 M 진 위상 신호 방식 비동기 (asynchronous) 직접수열 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 완전히 분석하려면, 수열의 짝상관 성질뿐만 아니라 $M-1$ 개의 나머지 일반 홀상관 성질도 충분히 고려해 주어야 한다. 그 까닭은, M 진 위상 신호 방식에서 M 가지 위상이 거의 같은 확률로 나타날 때, 이러한 M 가지 일반 홀상관 성질이 통신 시스템의 성능에 미치는 영향은 동일하기 때문이다. 그러나 일반적으로 수열의 길이가

일정할 때 자기상관과 교차상관의 최대값은 서로 반비례하므로, M 가지의 일반 홀자기상관과 M 가지의 일반 홀교차상관 성질이 모두 좋은 서명 수열 집합을 설계하는 것은 쉽지 않다^[8].

이 논문에서는 M 가지 일반 홀자기상관과 M 가지 일반 홀교차상관 성질을 모두 고려하여 수열의 값이 복소 평면에서 반지름이 1인 원 위에 위치하는 다상 서명 수열 집합을 설계하고 분석한다. I장에서 직접수열 부호분할 다중접속 시스템에서 서명수열의 역할과 M 진 위상 신호 방식에서 서명수열의 상관 성질이 미치는 영향을 살펴보고, II장에서 M 진 위상 신호 방식에 알맞은 서명수열을 제안하여 그 상관 성질을 분석한다. III장에서는 M 진 위상 신호 방식의 직접수열 부호분할 다중접속 시스템에 제안한 서명수열을 적용하였을 때의 성능을 모의 실험으로 살펴보고, IV장에서 결론으로 글을 맺는다.

II. 서명수열의 생성 방법과 상관 성질

k 번째 수열 $c^{(k)}$ 의 n 번째 값 $c_n^{(k)}$ 이 다음과 같은 수열 집합을 생각해 보자.

$$c_n^{(k)} = (-1)^{kn} \exp[j\pi kn^3/N], \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, \frac{N-1}{2}$$

여기서, $j = \sqrt{-1}$ 이고 N 은 소수이다. 이와 같은 수열의 일반 홀상관 함수는 다음과 같다.

$$\theta_{k_1, k_2, \frac{\gamma}{M}}(\tau) = \sum_{n=0}^{N-\tau-1} (-1)^{k_1 n + k_2 (n+\tau)} \times \exp\left[\frac{j2\pi}{2N} R(k_1 n^3 - k_2 (n+\tau)^3, 2N)\right] + \sum_{n=N-\tau}^{N-1} (-1)^{k_1 n + k_2 (n+\tau-N)} \times \exp\left[\frac{j2\pi\gamma}{M} + \frac{j2\pi}{2N} R(k_1 n^3 - k_2 (n+\tau)^3, N)\right] \quad (3)$$

정리 1: 식 (2)로 생성한 수열의 짝자기상관 함수는 다음과 같은 성질을 지닌다.

$$|\theta_{k, k, 0}(\tau)| = \begin{cases} N, & \tau = 0 \\ \sqrt{N}, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

증 명: 식 (3)에 $k_1 = k_2 = k, \gamma = 0$ 을 대입하면

$$\begin{aligned}
 \theta_{k,k,0}(\tau) &= \sum_{n=0}^{N-\tau-1} (-1)^{k(2n+\tau)} \\
 &\quad \times \exp\left[\frac{j2\pi k}{2N} R(n^3 - (n+\tau)^3, 2N)\right] \\
 &\quad + \sum_{n=N-\tau}^{N-1} (-1)^{k(2n+\tau-M)} \\
 &\quad \times \exp\left[\frac{j2\pi k}{2N} R(n^3 - (n+\tau)^3, 2N)\right] \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^{R(k\tau, N)} \\
 &\quad \times \exp\left[\frac{j2\pi k}{2N} R(n^3 - (n+\tau)^3, 2N)\right] \\
 &= (-1)^{R(k\tau, N)} \sum_{n=0}^{N-1} \\
 &\quad \times \exp\left[\frac{j2\pi k}{2N} R(-\tau^3 \right. \\
 &\quad \quad \left. + 3n(n+\tau)(-\tau), 2N)\right] \\
 &= (-1)^{R(k\tau, N)} \exp\left[\frac{j\pi k}{N} (-\tau)^3\right] \\
 &\quad \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[\frac{j2\pi k}{2N} R(3n(n+\tau)(-\tau), 2N)\right]
 \end{aligned} \tag{5}$$

를 얻을 수 있다. 수열의 정의인 식 (2)를 활용하면 식 (5)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \theta_{k,k,0}(\tau) &= [c_\tau^{(k)}]^* \\
 &\quad \times \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[-\frac{j\pi}{N} (3kn^2\tau + 3kn\tau^2)\right]
 \end{aligned} \tag{6}$$

$\tau=0$ 일 때는 $c_0^{(k)} = 1$ 이므로

$$\theta_{k,k,0}(0) = \sum_{n=0}^{N-1} \exp[0] = N \tag{7}$$

임을 바로 알 수 있고, $\tau \neq 0$ 일 때는 $|c_n^{(k)}| = 1$ 과 [9]의 정리 3의 결과인

$$\left| \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left[-\frac{j\pi}{N} (3kn^2\tau + 3kn\tau^2)\right] \right|^2 = N \tag{8}$$

을 이용하면

$$|\theta_{k,k,0}(\tau)| = N^{\frac{1}{2}} \tag{9}$$

을 얻을 수 있다. ■

그 밖의 상관 성질에 대해서는 제안한 수열과 기존의 다른 다상 수열들을 비교한 모의 실험을 통해 살펴본다. 먼저, 편의상 앞으로 M진 위상 신호 방식에서 위상 차가 γ 인 두 수열의 일반 홀상관을 ‘ γ/M -홀상관’이라 부르기로 하자. 제안한 수열과 비교하는 기존의 다상 수열은 FZC (Frank-Zadoff-Chu) 수열^[10,11]과, EOE (equivalent odd and even correlation) 수열^[12]을 사용한다. 제안한 수열이 일반 홀상관 성질을 고려한 다상 수열인 점을 생각하면, 짝상관 (=0/M) 성질이 Welch 한계^[13]를 만족시키는 다상 수열인 FZC 수열과, 이진 의사 잡음 수열을 사용하여 0/2-홀상관과 1/2-홀상관이 같도록 만든 4-위상 수열인 EOE 수열은 비교 대상으로 적절하다. EOE 수열은 바탕이 되는 이진 의사 잡음 수열이 무엇이냐에 따라 종류가 달라지는데, 이 논문에서는 상관 성질이 좋은 이진 의사 잡음 수열로 알려진 Gold 수열^[14]을 바탕으로 한 EOE 수열을 사용하였다.

표 1은 수열의 길이가 $N=127$ 이고 시스템의 상수가 $M=4, 8, 16$ 일 때, 제안한 수열, FZC 수열, EOE 수열의 최대 상관값을 구한 결과이고, 그림 1은 그 중에서 $M=8$ 일 때 γ/M -홀상관의 최대값을 그래프로 얻은 결과이다. 여기서, 최대 상관값이라 함은 한 수열 집합 내의 모든 수열에 대하여 얻은 최대 절대 상관값으로, 수열의 길이로 정규화한 값이다. 곧, 표 1의 최대 교차상관값 θ_c 는

$$\theta_c = \max_{\text{all } \gamma} \theta_{c,\gamma} \tag{10}$$

이고, 여기서 $\theta_{c,\gamma}$ 가 그림 1의 γ/M -홀교차상관의 최대값으로 아래와 같다.

$$\theta_{c,\gamma} = \max_{\text{all } \tau, k_1 \neq k_2} \frac{|\theta_{k_1, k_2, \gamma}(\tau)|}{N} \tag{11}$$

또한, 표 1의 최대 자기상관값 θ_a 는

$$\theta_a = \max_{\text{all } \gamma} \theta_{a,\gamma} \tag{12}$$

이고, 여기서 $\theta_{a,\gamma}$ 가 그림 1의 γ/M -홀자기상관의 최대값으로 아래와 같다.

$$\theta_{a,\gamma} = \max_{\text{all } \gamma, \tau \neq 0, k} \frac{|\theta_{k,k,\gamma}(\tau)|}{N} \tag{13}$$

표 1. $N=127$ 이고 $M=4, 8, 16$ 일 때, 제안한 수열과 FZC, EOE 수열의 최대 상관값

		제안한 수열	FZC 수열	EOE 수열
$M=4,$	θ_a	0.2427	0.6366	0.3543
	θ_c	0.3013	0.2511	0.3543
$M=8,$	θ_a	0.2427	0.6366	0.3543
	θ_c	0.3013	0.2517	0.3543
$M=16,$	θ_a	0.2469	0.6366	0.3543
	θ_c	0.3013	0.2559	0.3543

EOE 수열은 자기상관과 교차상관 모두 3/4-홀상관에서 최대 상관값이 발생하였으므로 (그림 1), M 이 4, 8, 16에서 최대 상관값이 모두 동일하다 (표 1). FZC 수열의 자기상관은 1/2-홀상관에서 항상 최대 상관값이 발생하므로 (그림 1), 표 1의 M 이 4, 8, 16에서 최대 자기상관값이 모두 동일하다 (표 1). 제안한 수열의 교차상관도 1/2-홀상관에서 항상 최대 상관값이 발생하므로 (그림 1), M 이 4, 8, 16에서 최대 교차상관값이 모두 동일하다 (표 1).

FZC 수열의 경우, 최대 교차상관값은 비교한 세 수열 가운데 가장 낮은 값을 가지지만, 최대 자기상관값이 0.6 이상이 되므로 M 진 위상 신호 방식을 쓰는 시스템에서 동기를 맞추거나 다중경로 간섭이 있을 경우의 수신에 상당한 어려움이 예상된다. EOE 수열은 0/2-홀상관과 1/2-홀상관이 같긴 하지만 최대 상관값을 줄이는 역할은 하지 못하므로, 자기상관에서도나 교차상관에서도나 최대 상관값이 제안한 수열보다 크다. 제안한 수열은 모든 M 에서 최대 자기상관값이 비교한 다른 수열들의 것보다 작고, 최대 교차상관값은 EOE 수열의 것보다 작은 성질이 있다.

그림 2는 $M=8$ 일 때 수열의 길이에 따른 θ_a 와 θ_c 의 값을 살펴본 것이다. 제안한 수열과 FZC 수열은 수열의 길이 N 이 소수이므로 31, 67, 127, 257의 길이에서 구한 값이고, Gold 수열을 바탕으로 한 EOE 수열은 수열의 길이 N 이 $2^m - 1$ 이고 m 은 4의 배수를 제외한 정수이므로 31, 63, 127의 길이에서 구한 값이다. 특정 길이에서만 구한 표 1에서의 경향과 마찬가지로, 어느 길이에서나 EOE 수열의 최대 상관값보다 제안한 수열의 최대 상관값이 항상 작고, FZC 수열의 최대 교차상관값보다 제안한 수열의 것이 크지만 최대 자기상관값의 차이는 현저하게 제안한 수열의 것이 작음을 볼 수 있다.

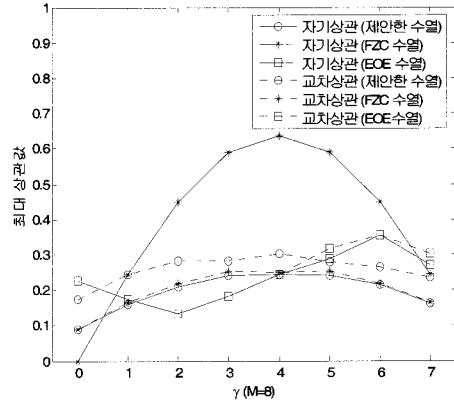


그림 1. $N=127$ 이고 $M=8$ 일 때 γ/M 홀상관의 최대값

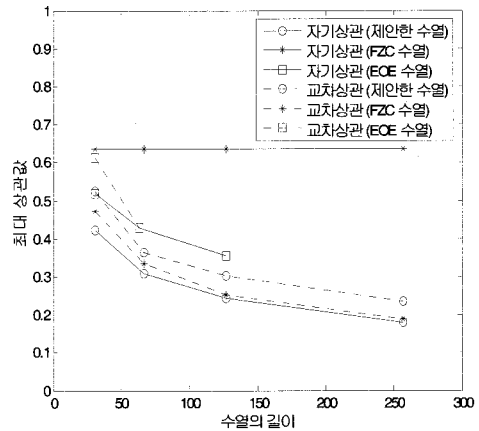


그림 2. $M=8$ 일 때 수열의 길이에 따른 최대 상관값

그림 2에서 두드러지는 한 가지 특징은 제안한 수열과 EOE 수열의 최대 상관값은 수열의 길이가 길어질수록 감소하는 성질을 가지지만, FZC 수열의 최대 자기상관값은 수열의 길이가 변하여도 항상 0.6이 넘는 고정된 값을 가진다는 것이다. 곧, 제안한 수열과 EOE 수열은 수열의 길이를 늘이는 간단한 방법으로 다중경로 간섭의 영향을 원하는 만큼 줄일 수 있으나, FZC 수열은 수열의 길이를 늘이는 방법으로는 다중경로 간섭의 영향을 줄일 수 없다는 뜻이다.

III. 제안한 수열의 성능

II장에서는 제안한 수열의 일반 홀상관 성질을 살펴보았다. III장에서는 그러한 상관 성질을 지닌 수열을 사용한 M 진 위상 신호 방식의 성능을 모의 실험으로 살펴본다.

k 번째 사용자의 서명 파형 $c^{(k)}(t)$ 와 심볼 파형 $a^{(k)}(t)$ 는 각각 아래와 같다.

$$c^{(k)}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{R(n,N)}^{(k)} p_{T_c}(t-nT_c) \quad (14)$$

$$a^{(k)}(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i^{(k)} p_T(t-iT) \quad (15)$$

여기서, $p_A(t)$ 는 단위 사각 펄스로서, $0 \leq t < A$ 일 때 $p_A(t)=1$ 이고 다른 곳에서는 0인 파형이며, T_c 는 칩 구간, T 는 심볼 구간이다. 또한, $a_i^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 i 번째 심볼로서 $a_i^{(k)} = \exp[j2\pi\phi_i^{(k)}]$ 로 나타낼 수 있고, 이때, $\phi_i^{(k)}$ 는 $1/M$ 의 동일한 확률로 $\left\{0, \frac{1}{M}, \frac{2}{M}, \dots, \frac{M-1}{M}\right\}$ 가운데 하나의 값이다. 비트를 심볼로 바꿀 때는 그레이 부호를 (Gray code) 사용하여 배정하였다.

이제, k 번째 사용자의 송신 신호 $s^{(k)}(t)$ 와 수신 신호 $r(t)$ 는 각각 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$s_i^{(k)}(t) = \sqrt{2P} a^{(k)}(t) c^{(k)}(t) e^{j\omega_c t} \quad (16)$$

$$r(t) = \sqrt{2P} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} a^{(k)}(t-\tau_l^{(k)}) \times c^{(k)}(t-\tau_l^{(k)}) \alpha_l^{(k)} e^{j(\omega_c t + \psi_l^{(k)})} + n(t) \quad (17)$$

여기서, P 는 평균 송신 전력, ω_c 는 반송파 주파수, K 는 사용자 수, L 은 경로 수, $n(t)$ 는 덧셈꼴 흰빛 정규 잡음이다 (additive white Gaussian noise: AWGN). 또한, $\tau_l^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 l 번째 경로의 전송 지연으로서 (delay) $\{0, 1, \dots, N-1\}$ 에서 균일한 분포이고, $\alpha_l^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 l 번째 경로의 크기 감쇄로서 (fading amplitude) 레일리 (Rayleigh) 분포이며, $\psi_l^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 l 번째 경로의 위상 감쇄로서 (fading phase) $[0, 2\pi)$ 에서 균일한 분포이다. 크기 감쇄의 제공평균은 $E[\{\alpha_l^{(k)}\}^2] = E[\{\alpha_0^{(k)}\}^2] e^{-\delta l}$ 으로 경로에 따라 지수적으로 감소하며 감소지수 $\delta=0.7$ 을 사용하였다.

수신 방법은 수신 신호 $r(t)$ 가 상관기를 (correlator) 거친 뒤, 상관기 출력의 실수부와 허수부의 비를 \tan^{-1} 함수에 넣어 심볼의 위상 $\hat{\phi}_i^{(k)}$ 를 구하는 일반적인 코히어런트 (coherent) 수신 방법을 사용하여 비트오류율을 구하였다.

그림 3과 4는 $M=8, N=127, K=5, L=2$ 일 때, 각각 제안한 수열과 FZC 수열을 사용한 시스템의 수신 신호 위상 $\hat{\phi}_i^{(k)}$ 를 그린 것이다. 이 모의 실험에서 $E_b/N_0=10$ dB를 사용하였고, 발생시킨 비트는 3000개이다.

먼저, 그림 3을 살펴보면, 제안한 수열을 사용한 시스템에서 얻은 수신 위상 $\hat{\phi}_i^{(k)}$ 가 비교적 영역의 중심에 가까이 있고 경계로 갈수록 적어지는 것을 볼 수 있다. 그림 3에 나타난 수신 위상으로 얻은 비트오류율은 $P_e = 6.67 \times 10^{-4}$ 이다.

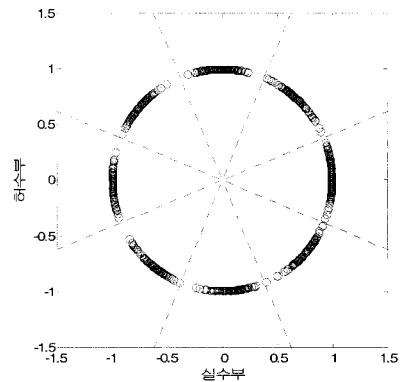


그림 3. $M=8, N=127, K=5, L=2$ 일 때, 제안한 수열을 사용한 시스템의 수신 위상

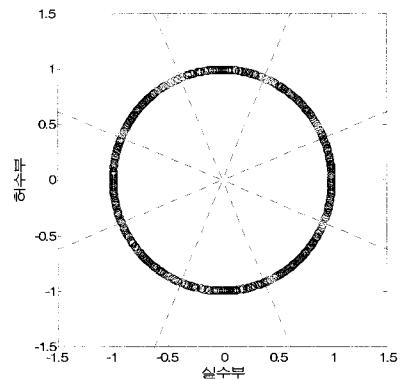


그림 4. $M=8, N=127, K=5, L=2$ 일 때, FZC 수열을 사용한 시스템의 수신 위상

이와 달리, 그림 4의 FZC 수열을 사용한 시스템에서 얻은 수신 위상은 영역의 경계에도 많이 걸쳐져있고, 이에 따라 제안한 수열을 사용할 때보다 심볼 오류가 많이 발생하게 된다. 그림 4에 나타난 수신 위상으로 얻은 비트오류율은 $P_e = 1.9 \times 10^{-2}$ 이다.

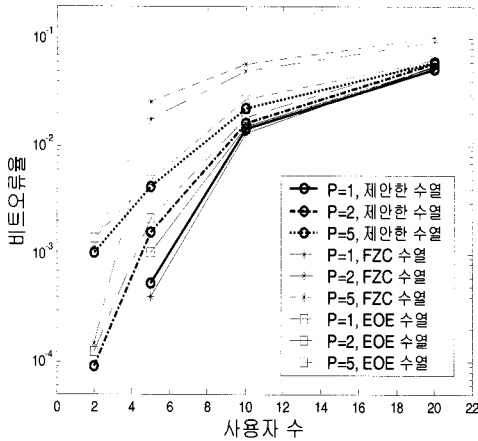


그림 5. $M=8, N=127$ 일 때 제한한 수열, FZC 수열, EOE 수열을 쓴 시스템의 사용자 수에 따른 비트오류율

그림 5는 $M=8, N=127, L=1, 2, 5$ 일 때, 제한한 수열, FZC 수열, EOE 수열을 쓴 시스템의 사용자 수에 따른 비트오류율을 얻은 결과이다. 이 모의 실험에서 $E_b/N_0 = 10$ dB이다. $L=1$ 일 때는 (다중 경로가 없을 때는) 최대 교차상관값이 적은 FZC 수열을 쓴 시스템의 성능이 제한한 수열을 쓴 시스템의 성능보다 조금 낮지만, $L>1$ 로 다중 경로 성분이 존재할 때는 자기상관 성질이 좋은 제한한 수열을 쓴 시스템의 성능이 훨씬 더 낮다는 것을 알 수 있다.

IV. 맺음말

이 논문에서는 일반 홀상관 성질이 비동기 M 진 위상 신호 방식에 알맞은 다상 서명 수열 집합을 제안하고 상관 성질을 살펴보았다. 또한, 제한한 수열과 짝상관 성질이 좋은 기존 다상 수열인 FZC 수열, 짝상관과 홀상관이 같은 EOE 수열을 최대 절대 상관값을 사용하여 상관 성질을 견주어 보았다. 제한한 수열의 자기상관 성질에 대해서는, $0/M$ 홀자기상관의 크기가 동기가 맞을 때 N , 동기가 맞지 않을 때 \sqrt{N} 인 성질이 있고, 기존의 다상 수열인 FZC 수열과 EOE 수열에 비하여 모든 M 에서 일반 홀자기상관의 최대값 θ_a 가 가장 작음을 보였다. 제한한 수열의 일반 홀교차상관의 최대값 θ_c 는 FZC 수열보다 크고 EOE 수열보다 작다. 비록 교차상관이 FZC 수열보다 크지만, FZC 수열의 θ_a 는 수열의 길이가 늘어나도 항상 일정한 값인 성질이

있어서, 비동기 시스템에서 경로가 여럿일 때 다중 경로 간섭이 매우 커지는 단점이 있으므로, 다중 경로 감쇄가 있는 일반적인 이동 통신 환경에서는 제한한 수열을 쓰는 것이 더욱 효과적일 것이다. 이러한 성질을 증명하고자 M 진 위상 신호 방식을 사용한 직접수열 부호분할 다중접속 시스템에서 제한한 수열, FZC 수열, EOE 수열을 사용할 때를 모의 실험한 결과, 다중 경로 성분이 존재할 때 제한한 수열을 쓴 시스템의 수신 위상이 송신 위상에 더욱 근접함을 보였고, 결과적으로 비트오류율 성능도 FZC 수열이나 EOE 수열을 쓸 때보다 더 나음을 보였다.

참고 문헌

- [1] J.S. Cha, S. Kameda, M. Yokoyama, H. Nakase, K. Masu, and K. Tsubouchi, "New binary sequences with zero-correlation duration for approximately synchronized CDMA," *Electronics Letters*, vol. 36, pp. 991-993, May 2000.
- [2] B. Natarajan, Z. Wu, C.R. Nassar, and S. Shattil, "Large set of CI spreading codes for high-capacity MC-CDMA," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, pp. 1862-1866, November 2004.
- [3] S.P. Ponnaluri and T. Guess, "Signature sequence and training design for overloaded CDMA systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, pp. 1337-1345, April 2007.
- [4] M.B. Pursley, "Performance evaluation for phase coded spread-spectrum multiple-access communication - Part I: system analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25, pp. 795-599, August 1977.
- [5] J.S. No and P.V. Kumar "A new family of binary pseudorandom sequences having optimal periodic correlation properties and large linear span," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, pp. 371-379, March 1989
- [6] T. Moriuchi and K. Imamura, "Balanced nonbinary sequences with good periodic correlation properties obtained from modified Kumar-Moreno sequences," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, pp. 572-576, March

1995.

- [7] S. Rahardja, W. Ser, and Z. Lin, "UCHT-based complex sequences for asynchronous CDMA system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 618-626, April 2003.
- [8] K.G. Paterson and P.J.G. Lothian, "Bounds on partial correlations of sequences," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 44, pp. 1164-1175, May 1998.
- [9] D.V. Sarwate, "Bounds on crosscorrelation and autocorrelation of sequences," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 25, pp. 720-724, November 1979.
- [10] D.C. Chu, "Polyphase codes with good periodic correlation properties," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 18, pp. 531-532, July 1972.
- [11] R.L. Frank, "Comments on 'Polyphase codes with good correlation properties'," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 19, p. 244, March 1973.
- [12] H. Fukumasa, R. Kohno, and H. Imai, "Design of psuedonoise sequences with good odd and even correlation properties for DS/CDMA," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, pp. 828-836, June 1994.
- [13] L.R. Welch, "Lower bounds on the maximum cross correlation of signals," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 20, pp. 397-399, May 1974.
- [14] R. Gold, "Maximal recursive sequences with 3-valued cross-correlation functions," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 14, pp. 154-156, November 1968.

박 소 령 (So Ryoung Park)

중신회원

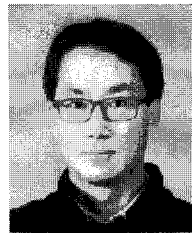


1997년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
 2002년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
 2003년 3월~현재 가톨릭대학교

정보통신전자공학부 전임강사, 조교수
 한국통신학회 평생회원, IEEE 준석학회원
 <관심분야> 이동통신, 다중접속, 통계학적 신호처리

송 익 호 (Iickho Song)

중신회원



1982년 2월, 1984년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학사 (준최우등), 공학석사)
 1985년 8월, 1987년 5월 펜실베이니아대학교 전기공학과 (공학석사, 공학박사)
 1987년 3월~1988년 2월 벨 통신

연구소 연구원

1988년 3월~현재 한국과학기술원 전자전산학과 조교수, 부교수, 교수
 1995년 1월~현재 한국통신학회 논문지 편집위원
 한국통신학회 학술상 (1994, 1996)
 LG 학술상 (1998), 모토롤라 학술상 (2000)
 한국음향학회 우수연구상 (1993)
 대한전자공학회 해동논문상 (1999)
 한국과학기술한림원 젊은 과학자상 (2000)
 대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 평생회원, IET 석학회원, IEEE 준석학회원
 <관심분야> 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호검파와 추정, 이동통신