논문 01-26-5B-5 한국통신학회논문지 '01-5 Vol.26 No.5B

교차상관 성질이 뛰어난 부호분할 다중접속 다상 서명수열

정회원 박 소 령*, 송 익 호*, 배 진 수**, 이 성 로***

A CDMA Polyphase Signature Sequence with Good Crosscorrelation Properties

So Ryoung Park*, Iickho Song*, Jinsoo Bae**, and Sung Ro Lee*** *Regular Members*

요 약

이 논문에서는 직접수열 부호분할 다중접속 계통에 알맞은 다상 서명수열을 제안한다. 제안한 수열은 짝교차상관 값이 언제나 0이고, 수열 길이가 N일 때 최대 홀교차상관 값이 N/π쯤이다. 최대 홀교차상관 값이 크기는 하지만 이 값은 매우 드물게 일어나므로, 직접수열 부호분할 다중접속 계통의 성능에 거의 영향을 미치지 않음을 보인다. 제안한 수열을 서명수열로 쓴 직접수열 부호분할 다중접속 계통의 성능을 살펴보고 다른 수열을 서명수열로 썼을 때의 성능과 견주어, 비동기 정규잡음 채널이 감쇄를 겪을 때나 겪지 않을 때 모두, 제안한 수열이 이제까지의 서명수열보다 훨씬 나은 성능을 낼 수 있음을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, a class of polyphase signature sequences for direct sequence code division multiple access (DS/CDMA) systems is proposed. The proposed class has zero periodic (=even) crosscorrelation and approximate maximum odd crosscorrelation value N/π, where N is the length of sequences. Although the maximum value is relatively large, it is observed that the maximum value has little effect on the performance of the DS/CDMA system, since its frequency of occurrence is very low. The performance of the proposed sequence in DS/CDMA systems is investigated and shown to be better than that of other sequences under various conditions of asynchronous additive white Gaussian noise channel environment with and without Rayleigh multipath fading.

I. 머리말

직접수열 부호분할 다중접속 (direct sequence code division multiple access: DS/CDMA) 방식은 정보 비트에 직접 곱해져 대역을 넓히는 서명수열을(signature sequence) 쓰는이에게 알맞게 배정함으로써, 여러 쓰는이가 같은 시간에 같은 주파수 대역을 쓸 수 있게 하는 것이다. 따라서, 직접수열 부호분할 다중접속 방식에서, 서명수열은 확산과 역확산 뿐만 아니라 여러 쓰는이 가운데에서 바라는 쓰는이를 가려내는 데에 중요한 역할을 한다. 특히, 채널 용량을 줄여 다중접속 계통의 성능을 떨어뜨리는 주 요인 가운데 하나인 다중접속 간섭을(multiple access interference) 줄이는 방법의 하나로, 교차상관(crosscorrelation) 값이 작은 서명수열을 설계하는 것이 본질적이고도 효과적인 방법이라 할 수 있다.

이제까지 여러 사람이 상관 성질이 좋은 수열을

* 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학전공 (isong@ee.kaist.ac.kr, srpark@Sejong.kaist.ac.kr)
** 세종대학교 정보통신공학과 (jay@kunja.sejong.ac.kr)
*** 목포대학교 전자공학과 (srlee@chungkye.mokpo.ac.kr)
접수번호 : 00393-1016, 접수일자 : 2000년 10월 16일

만드는데 많은 관심을 기울여왔으며, 그 결과로 주기 (periodic) 교차상관이 - 곧, 짝교차상관이 (even crosscorrelation) - 좋은 여러 수열들이 제안되었다: 그 대표적인 보기가 카사미 (Kasami)[1], 골드 (Gold)[2], 프랭크-채도프-추 (Frank-Zadoff-Chu: FZC)[3][4], 복소 4-위상 (complex 4-phase)[5], 박-송 (Park-Park-Song-Suehiro: PS)[6] 수열들이다. 특히 [6]에서 제안한 수열은 짝교차상관이 언제나 0이어서, 의사동기 (quasi-synchronous) 직접수열 부호분할 다중접속 계통에서 다중접속 간섭을 완전히 없앨 수 있었다. 따라서, 쓰는이 수가 많아져도 의사동기 직접수열 부호분할 다중접속 계통의 성능이 떨어지지 않았다.

위에서 말한 연구들은 수열의 주기 상관, 곧 짝상관 (even correlation) 성질만을 고려하였다. 그러나, 특정 수열을 서명수열로 쓰는 비동기 직접수열 부호분할 다중접속 계통의 성능을 완전히 분석하려면, 수열의 짝상관 성질 뿐만아니라 홀상관 (odd correlation) 성질도 고려해야 한다[7]. 짝상관 함수는 상관을 얻는 한 정보 심볼 구간 동안 다른 쓰는이의 정보 심볼 값이 바뀌지 않을 때의 상관기 출력을 나타내고, 홀상관 함수는 상관을 얻는 한 정보 심볼 구간 동안 다른 쓰는이의 정보 심볼 값이 바뀔 때의 상관기 출력을 나타낸다. 그러므로, 이진 정보 심볼 1과 -1이 같은 확률로 나타날 때, 짝상관과 홀상관은 통신 계통의 성능분석과 설계에서 그 중요도가 같다고 할 수 있다. [8]에서 보인 것처럼, 홀상관 성질이 좋은 수열을 설계하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 실제로, 홀상관 성질이 알려진 수열은 드물기 때문에, 직접수열 부호분할 다중접속 방식의 서명수열을 고를 때는 최대 짝상관 값이 작은 수열의 집합을 골라 쓰면서 홀상관 성질 또한 나쁘지 않기를 바랄 뿐이다. 홀상관의 분석은 [9]와 [10] 같은 몇몇 연구에서 찾아볼 수 있다.

이 논문에서는 짝교차상관 값이 언제나 0이고 홀교차상관 성질이 꽤 좋아서, 직접수열 부호분할 다중접속 통신 계통에 알맞도록 전체 교차상관 성질이 좋은 다상 서명수열을 제안한다. 수열을 만드는 방법과 그 상관 함수를 II장에서 설명하고, III장에서 제안한 수열의 상관 성질을 다른 수열의 상관 성질과 견주어 볼 것이다. IV장에서는, 덧셈꼴 흰빛 정규 잡음이 있는 채널이 레일리 (Rayleigh) 여러길 감쇄를 (multipath fading) 겪을 때와 겪지 않을 때, 제안한 수열을 쓰는 통신 계통의 성능을 살펴보고 다른 수열을 쓸 때와 견주어 볼 것이다.

II. 제안한 수열

1. 정의

L이 짝수이고, $k \in \{1,2,\cdots,L\}$일 때, 다음과 같이 정의되는 길이가 N인 수열 $c_k=[c_{0,k}\ c_{1,k}\ \cdots\ c_{N-1,k}]$를 생각해보자.

$$c_{l,k} = (-1)^l W_{L+1}^{lk}. \tag{1}$$

여기서, $N=2(L+1)$, $l=0,1,\cdots,N-1$이고, n이 정수일 때 $W_L^l = W_L^{nL+l} = e^{j\frac{2\pi l}{L}}$이다. 이때, 크기가 L인 c_k의 집합 $\{c_1, c_2, \cdots, c_L\}$를 송-박 (Song-Park) 수열이라 부르자.

몇 가지 계산을 거치면 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c_{l,k} = W_N^{p(l,k)}. \tag{2}$$

여기서, $p(l,k)=2lk+(L+1)\cdot\delta(R(l,2)-1)$이고, δ는 크로네커 델타 함수, $R(a,b)$는 a를 b로 나누었을 때의 나머지이다. 보기로, $L=6$이면 $N=14$이고, 다음과 같이 수열을 여섯 개 만들 수 있다.

$$c_1 = [\,W_{14}^0\ W_{14}^9\ W_{14}^4\ W_{14}^{13}\ W_{14}^8\ W_{14}^3\ W_{14}^{12}\ W_{14}^7\ W_{14}^2\ W_{14}^{11}\ W_{14}^6\ W_{14}^1\ W_{14}^{10}\ W_{14}^5\,]^T,$$

$$c_2 = [\,W_{14}^0\ W_{14}^{11}\ W_{14}^8\ W_{14}^5\ W_{14}^2\ W_{14}^{13}\ W_{14}^{10}\ W_{14}^7\ W_{14}^4\ W_{14}^1\ W_{14}^{12}\ W_{14}^9\ W_{14}^6\ W_{14}^3\,]^T,$$

$$c_3 = [\,W_{14}^0\ W_{14}^{13}\ W_{14}^{12}\ W_{14}^{11}\ W_{14}^{10}\ W_{14}^9\ W_{14}^8\ W_{14}^7\ W_{14}^6\ W_{14}^5\ W_{14}^4\ W_{14}^3\ W_{14}^2\ W_{14}^1\,]^T,$$

$$c_4 = [\,W_{14}^0\ W_{14}^1\ W_{14}^2\ W_{14}^3\ W_{14}^4\ W_{14}^5\ W_{14}^6\ W_{14}^7\ W_{14}^8\ W_{14}^9\ W_{14}^{10}\ W_{14}^{11}\ W_{14}^{12}\ W_{14}^{13}\,]^T,$$

$$c_5 = [\,W_{14}^0\ W_{14}^3\ W_{14}^6\ W_{14}^9\ W_{14}^{12}\ W_{14}^1\ W_{14}^4\ W_{14}^7\ W_{14}^{10}\ W_{14}^{13}\ W_{14}^2\ W_{14}^5\ W_{14}^8\ W_{14}^{11}\,]^T,$$

$$c_6 = [\,W_{14}^0\ W_{14}^5\ W_{14}^{10}\ W_{14}^1\ W_{14}^6\ W_{14}^{11}\ W_{14}^2\ W_{14}^7\ W_{14}^{12}\ W_{14}^3\ W_{14}^8\ W_{14}^{13}\ W_{14}^4\ W_{14}^9\,]^T.$$

2. 송-박 수열의 상관 함수

이 절에서는 송-박 수열의 상관 함수들을 살펴볼 것이다. 먼저, 짝교차상관 함수를 생각해 보자.

정리 1 : 송-박 수열의 짝교차상관 함수는 언제나 0 이다.

증명 : 먼저, 다상 수열의 짝교차상관 함수는 다음과 같다[7].

$$\theta_{i,j}(\tau)=C_{i,j}(\tau)+C^{*}_{j,i}(N-\tau). \tag{3}$$

여기서,

$$C_{i,j}(\tau)=\sum_{l=0}^{N-1-\tau} c_{l,k_i}c^{*}_{l+\tau,k_j}, \quad 0\le\tau\le N-1 \tag{4}$$

이고, *는 복소켤레를, k_i와 k_j는 각각 i째와 j째 수열 지표를 나타낸다. 송-박 수열에서 N이 짝수이므로, (4)의 c_{l,k_i}와 c_{l,k_j}에 (1)을 쓰면 다음과 같이 짝교차상관 함수를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\theta_{i,j}(\tau) &= \sum_{l=0}^{N-1-\tau}(-1)^{l}W_{L+1}^{lk_i}(-1)^{l+\tau}W_{L+1}^{-(l+\tau)k_j} \\ &\quad+\sum_{l=0}^{\tau-1}(-1)^{l}W_{L+1}^{-lk_j}(-1)^{l+N-\tau}W_{L+1}^{(l+N-\tau)k_i} \\ &= (-1)^{\tau}\Big[\sum_{l=0}^{N-1-\tau}W_{L+1}^{l\Delta_k-\tau k_j}+\sum_{l=0}^{\tau-1}W_{L+1}^{(l+N-\tau)k_i-lk_j}\Big].\end{aligned} \tag{5}$$

여기서, $\Delta_k=k_i-k_j$이고 $k_i>k_j$로 둔다. $N=2(L+1)$이므로, (5)의 둘째 합 항은

$$\sum_{l=0}^{\tau-1}W_{L+1}^{(l+N-\tau)k_i-lk_j}=\sum_{l=N-\tau}^{N-1}W_{L+1}^{l\Delta_k-\tau k_j} \tag{6}$$

이고, 따라서 송-박 수열의 짝교차상관 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\theta_{i,j}(\tau) &= (-1)^{\tau}\sum_{l=0}^{N-1}W_{L+1}^{l\Delta_k-\tau k_j} \\ &= (-1)^{\tau}W_{L+1}^{-\tau k_j}\sum_{l=0}^{N-1}W_{L+1}^{l\Delta_k}.\end{aligned} \tag{7}$$

$\Delta_k\in\{1,2,\cdots,L-1\}$이므로, $i\neq j$일 때 (7)에 있는 합은 0이다.

다음으로, 송-박 수열의 홀교차상관 함수를 생각하자. 다상 수열의 홀교차상관 함수는

$$\hat{\theta}_{i,j}(\tau)=C_{i,j}(\tau)-C^{*}_{j,i}(N-\tau), \tag{8}$$

이므로, 정리 1의 증명에서와 같은 방법으로 송-박 수열의 홀교차상관 함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{i,j}(\tau) &= \sum_{l=0}^{N-1-\tau}(-1)^{l}W_{L+1}^{lk_i}(-1)^{l+\tau}W_{L+1}^{-(l+\tau)k_j} \\ &\quad-\sum_{l=0}^{\tau-1}(-1)^{l}W_{L+1}^{-lk_j}(-1)^{l+N-\tau}W_{L+1}^{(l+N-\tau)k_i} \\ &= (-1)^{\tau}\Big[\sum_{l=0}^{N-1-\tau}W_{L+1}^{l\Delta_k-\tau k_j}-\sum_{l=0}^{\tau-1}W_{L+1}^{(l+N-\tau)k_i-lk_j}\Big] \\ &= (-1)^{\tau}W_{L+1}^{-\tau k_j}\Big[\sum_{l=0}^{N-1-\tau}W_{L+1}^{l\Delta_k}-\sum_{l=0}^{\tau-1}W_{L+1}^{l\Delta_k}\Big], \\ &\quad 0\le\tau\le N-1.\end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)에서 보듯이, 송-박 수열의 홀교차상관 함수를 바로 설명하기는 쉽지 않으므로, 홀교차상관 함수의 최대 절대값을 살펴보고자 한다.

정리 2: Δ_k를 고정했을 때, 홀교차상관 함수의 최대 절대값 $\hat{\theta}_{i,j}$는

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{i,j} &= \max_{\tau}|\hat{\theta}_{i,j}(\tau)| \\ &= 2\Big|\sum_{l=0}^{N-1-\tau_0}W_{L+1}^{l\Delta_k}\Big| = 2\Big|\sum_{l=0}^{\tau_0-1}W_{L+1}^{l\Delta_k}\Big|\end{aligned} \tag{10}$$

이다. 여기서, $\tau_0=\lfloor L/(4\Delta_k)\rfloor+1$이고, $\lfloor x\rfloor$는 x를 넘지 않는 가장 큰 정수이다.

증명 : 먼저, (9)에서 대괄호 안의 항을 다음과 같이 바꾸어 생각하자.

$$\sum_{l=0}^{N-1-\tau}W_{L+1}^{l\Delta_k}-\sum_{l=0}^{\tau-1}W_{L+1}^{l\Delta_k}=\sum_{l=0}^{N-1-\tau}W_{L+1}^{l\Delta_k}-\sum_{l=N-\tau}^{N-1}W_{L+1}^{l\Delta_k}. \tag{11}$$

l이 0부터 $N-1-\tau$까지, 그 다음 $N-\tau$에서 $N-1$까지 바뀔 때, 점 $\{W_{L+1}^{l\Delta_k}\}$은 복소 평면의 단위원을 $2\Delta_k$번 회전하며 바뀐다. 그러므로, τ가 바뀔 때 (11)의 절대값은, 앞 항이 될 수 있는 대로 많은 반원 위의 점들을 더한 값일 때 가장 크게 된다. 이는 $\tau=\lfloor Li/(2\Delta_k)+L/(4\Delta_k)\rfloor+1$, $i=0,1,\cdots,2\Delta_k-1$ 일 때 일어나므로, $\sum_{l=0}^{N-1-\tau}W_{L+1}^{l\Delta_k}+\sum_{l=N-\tau}^{N-1}W_{L+1}^{l\Delta_k}=0$ 과 $\left|\sum_{l=0}^{N-1-\tau_0}W_L^{l\Delta_k}\right|=\left|-\sum_{l=N-\tau_0}^{N-1}W_L^{l\Delta_k}\right|=\left|\sum_{l=N-\tau_0}^{N-1}W_L^{l\Delta_k}\right|=\left|\sum_{l=0}^{\tau_0-1}W_L^{l\Delta_k}\right|$를 써서 (9)의 최대 절대값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$|\hat{\theta}_{i,j}(\tau)| \le \left|\sum_{l=0}^{N-1-\tau_0} W_L^{l\Delta_k}\right| + \left|\sum_{l=N-\tau_0}^{N-1} W_L^{l\Delta_k}\right| = 2\left|\sum_{l=0}^{\tau_0-1} W_L^{l\Delta_k}\right|. \quad (12)$$

정리 2는 송박 수열 집합에서 어떻게 수열 쌍을 고르냐에 따라 홀교차상관 함수가 달라진다는 것을 보여준다. 곧, 송박 수열은 홀교차상관 값이 바뀌는 범위가 다른 수열들 보다 크다는 것이다.

정리 3 : $\hat{\theta}_{i,j}$의 최대값 $\hat{\theta}_c = \max_{i,j} \hat{\theta}_{i,j}$는 근사적으로 N/π이다.

증명 : $\hat{\theta}_{i,j}$의 최대값 $\hat{\theta}_c$는 $\Delta_k = 1$일 때 얻을 수 있음을 쉽게 알 수 있다.

$$\hat{\theta}_c = \max_{i,j} \hat{\theta}_{i,j} = \hat{\theta}_{i,j}|_{\Delta_k=1} = 2\left|\sum_{l=0}^{\frac{L}{2}} W_L^l\right|. \quad (13)$$

이제, $\sum_{k=0}^{n} \cos kx = \cos(nx/2)\csc(x/2)\sin((n+1)x/2)$와 $\sum_{k=1}^{n} \sin kx = \sin(nx/2)\csc(x/2)\sin((n+1)x/2)$를 써서 [11, p. 30, 식 1.342.1과 1.342.2],

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_c &= 2\left|\sum_{l=0}^{\frac{L}{2}} e^{j\frac{2\pi l}{L+1}}\right| \\ &= 2\left|\sum_{l=0}^{\frac{L}{2}}\left\{\cos\left(\frac{2\pi}{L+1}\right)l + j\sin\left(\frac{2\pi}{L+1}\right)l\right\}\right| \\ &= 2\left|\cos\left(\frac{\pi L}{2(L+1)}\right)\sin\left(\frac{\pi(L+2)}{2(L+1)}\right)\csc\left(\frac{\pi}{L+1}\right)\right. \\ &\quad \left. + j\sin\left(\frac{\pi L}{2(L+1)}\right)\sin\left(\frac{\pi(L+2)}{2(L+1)}\right)\csc\left(\frac{\pi}{L+1}\right)\right| \\ &= 2\left|\frac{\sin\left(\frac{L+2}{L+1}\cdot\frac{\pi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{L+1}\right)}\right| \end{aligned} \quad (14)$$

와 같이 쓸 수 있고, L이 충분히 클 때, $\sin(\pi(L+2)/2(L+1)) \approx 1$이고 $\sin(\pi/(L+1)) \approx \pi/(L+1)$이므로 다음과 같이 최대값을 얻을 수 있다.

$$\hat{\theta}_c \approx \frac{2(L+1)}{\pi} = \frac{N}{\pi}. \quad (15)$$

이제, 송박 수열의 자기상관 함수를 생각해 보자.

정리 4 : 송박 수열의 짝자기상관 함수는 다음과 같다.

$$\theta_{i,i}(\tau) = Nc_{\tau,L-k_i+1}, \quad 0 \le \tau \le N-1. \quad (16)$$

증명 : $i=j$일 때 $\sum_{l=0}^{N-1} W_{L+1}^{l\Delta_k} = N$이므로, (7)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\theta_{i,i}(\tau) &= (-1)^{\tau} N W_{L+1}^{-\tau k_i} \\ &= (-1)^{\tau} N W_{L+1}^{\tau(L-k_i+1)}. \end{aligned} \quad (17)$$

정리 5 : 송박 수열의 홀자기상관 함수는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_{i,i}(\tau) = (N-2\tau)\theta_{i,i}(\tau), \quad 0 \le \tau \le N-1. \quad (18)$$

증명 : $i=j$일 때, (9)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{i,i}(\tau) &= (-1)^{\tau} W_{L+1}^{-\tau k_i}\left[\sum_{l=0}^{N-1-\tau} - \sum_{l=0}^{\tau-1}\right] \\ &= (-1)^{\tau} W_{L+1}^{\tau(L+1-k_i)}(N-2\tau). \end{aligned} \quad (19)$$

Ⅲ. 상관 성질 비교

1. 최대 교차상관 값과 그 분포

그림 1은 길이가 511인 골드, 짝상관과 홀상관이 같은 (equivalent odd and even) 골드 수열, 줄여서 등

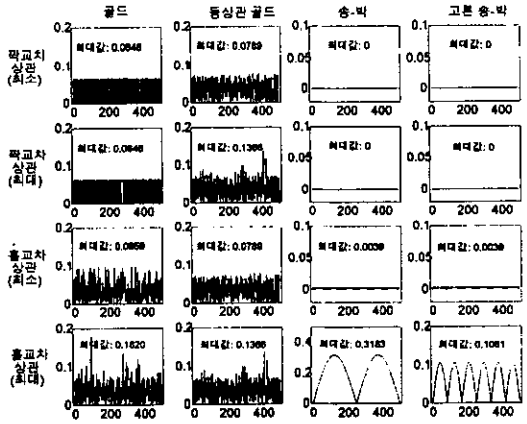

그림 1. 골드와 등상관 골드 (N=511), 송박과 고른 송박 (N=510) 수열의 정규화한 교차상관 함수

상관 골드 수열[8], 길이 510인 송-박, 고른 송-박 수열의 정규화한 짝교차상관과 홀교차상관 함수의 절대값을 보여준다. 등상관 골드 수열은 골드 수열을 바탕으로 짝상관과 홀상관이 같도록 만든 수열이고, 고른 송-박 수열은 송-박 수열 집합에서 θ_c가 $2\sqrt{2N}$보다 작도록 고른 수열이다: 여기서, $2\sqrt{2N}$이란 값은 등상관 골드의 최대 교차상관과 견주어 보고자 고른 값이다. 그림에서 최소와 최대는 수열 길이가 N일 때 $\theta_{i,j}$나 $\theta_{i,j}=\max_\tau|\theta_{i,j}(\tau)|$의 값이 각각 가장 작은 때와 가장 큰 때를 나타낸다.

골드 수열의 θ_c는 $\sqrt{2N}$쯤이고[2] 등상관 골드 수열의 짝상관과 홀상관 함수는 완전히 같다고[8] 알려져 있다: 등상관 골드 수열의 θ_c는 골드 수열보다 작다. 그러나, 골드 수열이나 등상관 골드 수열의 θ_c 값이 얼마나 되는지, 또, 각 수열 집합에서 어느 수열 짝이 θ_c을 일으키는지는 알려지지 않았다. [9]에서 골드 수열의 $\theta_{i,j}$가 $(N+1)/2+\sqrt{N+1}+1$보다 작다는 것을 밝혔으나, 이 상한은 N이 클 때 너무 느슨하다는 것을 그림 1에서 알 수 있다 (N=511일 때, $((N+1)/2+\sqrt{N+1}+1)/N\approx 0.546$이지만 그림에서는 0.1820이다). 그러므로, 그림 1에서 N=511일 때, 골드와 등상관 골드 수열의 근사 θ_c 값을 각각 $3\sqrt{2N}$와 $2\sqrt{2N}$로 두도록 하자.

II.2절에서 보인 대로, 송-박 수열의 짝교차상관 함수가 언제나 0임을 그림 1에서 확인할 수 있다. 송-박 수열의 θ_c가 골드나 등상관 골드 수열보다 크지만, 고른 송-박 수열처럼 송-박 수열에서 알맞게 고른 부집합으로 골드나 등상관 골드의 θ_c보다 작게 만들어 통신 계통의 성능을 훨씬 높일 수 있음을 눈여겨보자. 뿐만 아니라, 송-박 수열을 어떻게 고르더라도 골드나 등상관 골드 수열보다 성능이 낫다는 것을 IV장에서 보일 것이다.

표 1은 송-박 수열 집합에서 임의로 고른 한 수열 짝의 정규화한 $\theta_{i,j}$인 θ_S의 분포를 보여준다. 골드와 등상관 골드 수열과 견주어 보고자 문턱값을 골드와 등상관 골드 수열의 정규화한 $\min_{i,j}\theta_{i,j}$와 θ_c로 두었다. $N\approx 31$일 때, 송-박 수열의 모든 짝에서 θ_S는 θ_{G2}나 θ_{E2}보다 크지 않으며, θ_{G1}이나 θ_{E1}보다 작을 확률이 0.8571이다. $N\approx 511$일 때는, θ_S가 θ_{G2}나 θ_{E2}보다 클 확률이 각각 0.0079와 0.0157이지만, θ_{G1}이나 θ_{E1}보다 작을 확률이 각각 0.9764와 0.9685로 커졌다: 곧, 아무렇게나 송-박 수

표 1. 송-박 수열의 홀교차상관 값 분포

	$N\approx 31$ †	$N\approx 127$ ‡	$N\approx 511$ ★
$P\{\theta_S\le\theta_{G1}\}$	0.8571	0.9677	0.9764
$P\{\theta_{G1}<\theta_S\le\theta_{G2}\}$	0.1429	0.0323	0.0157
$P\{\theta_S>\theta_{G2}\}$	0	0	0.0079
$P\{\theta_S\le\theta_{E1}\}$	0.8571	0.9355	0.9685
$P\{\theta_{E1}<\theta_S\le\theta_{E2}\}$	0.1429	0.0645	0.0236
$P\{\theta_S>\theta_{E2}\}$	0	0	0.0079

† 골드와 등상관 골드 수열에서는 N=31, 송-박 수열에서는 N=30
‡ 골드와 등상관 골드 수열에서는 N=127, 송-박 수열에서는 N=126
★ 골드와 등상관 골드 수열에서는 N=511, 송-박 수열에서는 N=510
θ_S: 송-박 수열의 정규화한 $\theta_{i,j}$
θ_{G1}: 골드 수열의 정규화한 $\min_{i,j}\theta_{i,j}$
θ_{G2}: 골드 수열의 정규화한 θ_c
θ_{E1}: 등상관 골드 수열의 정규화한 $\min_{i,j}\theta_{i,j}$
θ_{E2}: 등상관 골드 수열의 정규화한 θ_c
N=31일 때, θ_{G1}=0.2258, θ_{G2}=0.6129, θ_{E1}=0.2348, θ_{E2}=0.4619
N=127일 때, θ_{G1}=0.1654, θ_{G2}=0.4646, θ_{E1}=0.1471, θ_{E2}=0.3557
N=511일 때, θ_{G1}=0.0959, θ_{G2}=0.1820, θ_{E1}=0.0789, θ_{E2}=0.1366

열을 한 짝 골랐을 때 얻은 $\hat{\theta}_{i,j}$가 골드나 등상관 골드 수열의 $\min_{i,j}\hat{\theta}_{i,j}$보다 작을 확률이 0.97쯤이고, 이 확률은 N이 커질수록 높아진다. 그러므로, 직접수열 부호분할 다중접속 계통의 서명수열로 쓰기에 골드나 등상관 골드 수열보다 송-박 수열의 홀교차상관 함수가 더 알맞다고 할 수 있다. 송-박 수열의 짝교차상관 함수가 언제나 0인 것을 생각하면, 송-박 수열의 교차상관 성질은 골드나 등상관 골드 수열의 교차상관 성질보다 훨씬 뛰어나다고 말할 수 있다.

2. 수열의 개수와 상관 함수

표 2는 수열의 길이가 N일 때, 송-박 수열의 몇 가지 성질을 잘 알려진 다른 수열들과 견주어 본 것이다. 먼저, 송-박 수열의 수는 골드, 프랭크-채도프-추, 복소 4-위상 수열과 견주어 보면 반쯤이다. 그러나, 카사미 수열과 견주어 보면, $N\geq 8$일 때 송-박 수열이 더 많다. 짝교차상관 함수가 언제나 0인 또 다른 수열인 박-송 수열과 견주어 보면, 송-박 수열의 수가 거의 두 배이다.

송-박 수열의 짝교차상관 성질은 이상적이므로, 동기 채널이나 정보 심볼이 상관을 얻는 구간 동안 값이 바뀌지 않을 때 다중접속 간섭을 없앨 수 있다. 송-박 수열의 최대 홀교차상관 값 $\hat{\theta}_c$가 등상관 골드 수열의 그것보다 크기는 하지만, 그 최대값이 아주 드물게 나타남을 III.1절에서 보였고, 송-박 수열 집합에서 알맞게 고른 부집합인 고른 송-박 수열은 짝교차상관과 홀교차상관에서 모두 등상관 골드 수열보다 뛰어난 성질을 가짐을 볼 수 있다.

웰치-사이델니코프 (Welch-Sidelnikov) 한계값을 따르면, 다상 수열의 최대 짝상관 값은 ($\max\{\theta_c, \theta_a\}$) 수열의 개수가 S일 때 $N\sqrt{(S-1)/(SN-1)}$보다 크다고 알려져 있다[9]. 이는 교차상관 성질을 좋게 만들면 자기상관 성질이 나빠진다는 것을 뜻한다. 이와 마찬가지로 교차상관 성질이 좋은 송-박 수열의 자기상관 성질은 그리 좋지 않기 때문에 ($\theta_a=N$, $\hat{\theta}_a=N-2$), 송-박 수열을 서명수열로 쓰는 계통에서는 시간동기 문제가 일어날 수 있다. 그렇지만, 시간동기를 맞추도록 보내는 심볼 구간에는 바커 (Barker) 수열처럼[12] 자기상관 성질이 뛰어난 수열을 씀으로써, 송-박 수열을 서명수열로 쓰는 계통에서도 동기문제를 풀 수 있다.

III장에서는 송-박 수열의 상관 성질을 다른 수열들과 견주어 살펴보았다. 송-박 수열의 뛰어난 교차상관 성질이 실제 직접수열 부호분할 다중접속 계통의 성능 향상에 미치는 영향을 더욱 자세히 살펴보고자, 다음 장에서는 시간동기를 맞추었다고 둘 때 여러 수열을 쓰는 통신 계통의 성능을 수치 결과로 얻을 것이다.

표 2. 길이가 N일 때 몇 가지 수열들의 성질 비교

묶음	수열 이름	수열 개수	θ_c	$\hat{\theta}_c$	θ_a	$\hat{\theta}_a$
(가)	카사미 [1]	$\sqrt{N+1}$	$1+\sqrt{N+1}$	·†	1	·
	골드 [2]	$N+1$	$1+\sqrt{2(N+1)}$	·†	1	·
	프랭크-채도프-추 [3][4]	$N-1$	$\sqrt{N}$	·	0	·
	복소 4-위상 [5]	$N+2$	$1+\sqrt{N}$	·	$1+\sqrt{N}$	·
	박-송 [6]	$N/4$	0	·	N	·
(나)	등상관 골드 [8]	$N+1$	$\approx 2\sqrt{2N}$‡	$\approx 2\sqrt{2N}$‡	·	·
	송-박	$(N-2)/2$	0	N/π	N	$N-2$
	고른 송-박	$\approx\sqrt{20N}$	0	$2\sqrt{2N}$	N	$N-2$

묶음 (가): 짝교차상관만 알려진 수열들

묶음 (나): 짝교차상관과 홀교차상관이 알려진 수열들

† 카사미와 골드 수열에서 $\hat{\theta}_{i,j}$의 최대값은 각각 $(N+1)/2+\sqrt{(N+1)/2}+1$와 $(N+1)/2+\sqrt{N+1}+1$로 얻을 수 있지만, 이 값들은 N이 클 때 너무 느슨하다.

‡ N=511일 때의 근사값들이다.

$\theta_a=\max_{i,j,\tau\geq 1}|\theta_{i,j}(\tau)|$, $\hat{\theta}_a=\max_{i,j,\tau\geq 1}|\hat{\theta}_{i,j}(\tau)|$

Ⅳ. 수치 결과

1. 여러길 감쇄가 없을 때

송신기에서 쓰는이 K명의 신호를 이진 위상 편이 변조하여 고유한 서명수열로 확산한다고 두자. 그러면, k째 쓰는이의 송신신호를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s_k(t) = \sqrt{2P}a_k(t)b_k(t)e^{j\vartheta_k+\omega_c t}. \quad (20)$$

여기서,

$$a_k(t)=\sum_{i=-\infty}^{\infty}c_{i,k}p_{T_c}(t-iT_c), \quad (21)$$

$$b_k(t)=\sum_{i=-\infty}^{\infty}b_{i,k}p_T(t-iT), \quad (22)$$

P는 평균 송신 전력, ω_c는 반송주파수, ϑ_k는 k째 반송파의 위상, T_c는 칩 간격, $T=NT_c$는 심볼 간격이다. 함수 p_A는 $0\le t<A$일 때 1이고 그렇지 않으면 0인 단위 사각 펄스이다. 정보 심볼 $\{b_{i,k}\}_{i=-\infty}^{\infty}$은 $\Pr\{b_{i,k}=1\}=\Pr\{b_{i,k}=-1\}=1/2$이고 분포가 같으며 서로 독립인 확률과정이다.

비동기 채널을 거쳐 수신된 신호는 다음과 같다.

$$r(t)=\sum_{k=1}^{K}\sqrt{2P}a_k(t-\tau_k)b_k(t-\tau_k)e^{j(\phi_k+\omega_c t)}+n(t). \quad (23)$$

여기서, τ_k는 k째 쓰는이의 시간지연이고 $\phi_k=\vartheta_k-\omega_c\tau_k$는 k째 쓰는이의 위상이며, $n(t)$는 두방향 전력밀도가 $\eta_0/2$인 덧셈꼴 흰빛 정규 잡음이다. 바라는 쓰는이를 첫째 쓰는이라 하고 $\tau_1=0$, $\vartheta_1=0$이라 두자. $k\neq1$일 때는 $0\le\tau_k<T$이고 $0\le\vartheta_k<2\pi$이라 두자.

그러면, 위상동기를 맞추어 수신한 출력의 절대값 U는 다음과 같이 쓸 수 있고,

$$U = PT+P\sum_{k=2}^{K}e^{j\vartheta_k}\int_0^T b_k(t-\tau_k)a_k(t-\tau_k)a_1^*(t)\,dt + \sqrt{\frac{P}{2}}\int_0^T n(t)a_1^*(t)e^{-j(\phi_1+\omega_c t)}dt, \quad (24)$$

평균 비트오류율을 다음과 같이 근사화 할 수 있다[7].

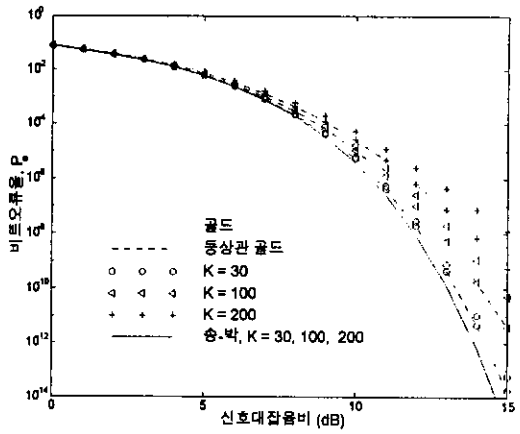

그림 2. 쓰는이가 30, 100, 200명이고 수열 길이가 511 또는 510일 때 여러 수열의 비트오류율

$$P_e = 1-\Phi\left(\left[\frac{1}{6N^3}\sum_{k=2}^{K}r_{k,1}+\frac{\eta_0}{2E}\right]^{-\frac{1}{2}}\right). \quad (25)$$

여기서, $E=PT$는 정보 심볼 하나의 에너지이고, $\Phi(\cdot)$는 표준 정규 누적분포함수이며,

$$r_{k,j} = \sum_{l=0}^{N-1}[2\{C_{k,j}^2(l-N+1)+C_{k,j}^2(l+1)\} + C_{k,j}(l-N)C_{k,j}(l-N+1)+C_{k,j}(l)C_{k,j}(l+1)] \quad (26)$$

이다.

그림 2는 골드, 등상관 골드, 송-박 수열을 썼을 때의 평균 비트오류율을 신호대잡음비 E/η_0의 함수로 나타낸 것으로, 골드, 등상관 골드, 송-박 수열을 K개씩 만들어 다중접속 간섭 항인 $\sum_{k=2}^{K}r_{k,1}$를 계산하여 그렸다. 시간동기를 제대로 맞추었다고 두었고, 쓰는이 수는 30, 100, 200명이며, 송-박 수열의 길이는 510이고 다른 수열들의 길이는 511일 때의 그림이다.

먼저 송-박 수열을 썼을 때의 성능이 네 수열 가운데 가장 좋다는 것을 볼 수 있다. 신호대잡음비가 커질수록, 쓰는이가 많아질수록 송-박 수열이 다른 수열보다 나은 정도가 커진다. 더욱이, 송-박 수열의 비트오류율은 쓰는이가 늘어나도 거의 바뀌지 않는다. 이것은 송-박 수열의 다중접속 간섭 항인 $\sum_{k=2}^{K}r_{k,1}$ 값이 다른 수열들과 견주어 매우 작기 때문이다 (K=100일 때 송-박 수열에서는 10^2 정도의 크기이지만 다른 수열들은 10^5 정도의 크기이

다). K=200일 때 쓰인 송-박 수열 200개는, 전체 수열 254개 가운데 홀교차상관 값이 큰 수열 200개를 고른 것이다. 그러므로 K=30, 100일 때와 200일 때 성능의 차이가 아주 작다는 것은, III장에서 말한 것처럼 송-박 수열의 최대 홀교차상관 값이 성능에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주는 것이다.

2. 여러길 감쇄가 있을 때

이 절에서는 IV.1절에서 고려한 비동기 채널에 주파수 선택적인 레일리 (Rayleigh) 여러길 감쇄가 있고 갈퀴 (rake) 수신기를 쓸 때를 생각해 본다. l째 길에서, $l=0,1,\cdots,L_p-1$, k째 쓰는이의, $k=1,2,\cdots,K$, 감쇄 크기 $a_l^{(k)}$는 다음과 같은 확률밀도함수를 가지는 레일리 확률변수이다.

$$p(a_l^{(k)}) = \frac{2a_l^{(k)}}{\Omega_l^{(k)}} e^{-\frac{(a_l^{(k)})^2}{\Omega_l^{(k)}}}. \tag{27}$$

여기서, $\Omega_l^{(k)}$는 $a_l^{(k)}$의 2차 적률이다. $\Omega_l^{(k)}$는 바라는 쓰는이의 첫째 길의 2차 적률인 $\Omega_0^{(k)}$와 $\Omega_l^{(k)}=\Omega_0^{(k)}e^{-\varepsilon l}$, $\varepsilon\geq 0$인 관계에 있다고 두자. l째 길에서 k째 쓰는이의 감쇄 위상인 $\phi_l^{(k)}$는 $[0,2\pi)$에 걸쳐 고르게 분포하고 서로 독립인 확률변수이다. 그러면, 수신신호는

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K}\sqrt{2P}\sum_{l=0}^{L_p-1} a_k(t-lT_c-\tau_k)b_k(t-lT_c-\tau_k) \cdot a_l^{(k)}e^{j(\varphi_l^{(k)}+\omega_c t)} + n(t) \tag{28}$$

이고, 가지수가 L_r인 갈퀴 수신기의 출력 U는 다음과 같이 나타나며,

$$U = \sum_{n=0}^{L_r-1}\int_{nT_c}^{T+nT_c}\sqrt{\frac{P}{2}}\left| r(t)a_0^*(t-nT_c) \cdot a_n^{(0)}e^{-j\phi_n^{(0)}}e^{-j\omega_c t}\right| dt, \tag{29}$$

근사화한 평균 비트오류율은 다음과 같다[13].

$$P_e = \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}}\frac{(1+\gamma)^{-m}\Gamma(m+\frac{1}{2})}{2\sqrt{\pi}\Gamma(m+1)} \cdot {}_2F_1\left(1, m+\frac{1}{2}; m+1; \frac{1}{1+\gamma}\right). \tag{30}$$

여기서, $\varphi_l^{(k)}=\phi_l^{(k)}+\phi_k$이고 그 밖의 변수들은 다음과 같다.

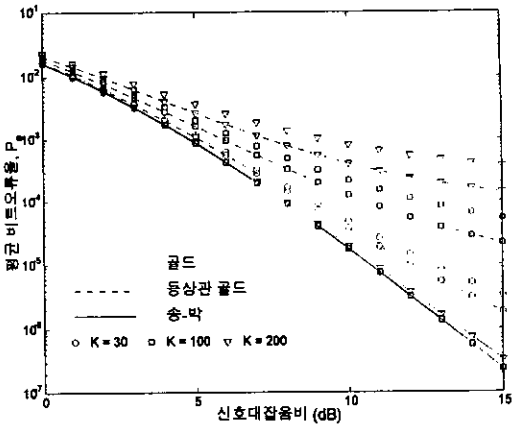

그림 3. 레일리 여러길 감쇄가 일어나고, 쓰는이가 30, 100, 200명, 수열 길이가 511 또는 510, $L_p=L_r=5$, $\varepsilon=0.1$일 때 여러 수열의 비트오류율

$$\gamma = \frac{q(L_r,2\varepsilon)}{2q(L_r,\varepsilon)}\left[\frac{q(L_p,\varepsilon)-1}{6N^3}r_{1,1} + \frac{q(L_p,\varepsilon)\sum_{k=2}^{K}r_{k,1}}{6N^3} + \frac{\eta_0}{2E\Omega_0}\right]^{-1}, \tag{31}$$

$$m = \frac{q^2(L_r,\varepsilon)}{q(L_r,2\varepsilon)}, \tag{32}$$

$${}_2F_1(a,b;c;z) = \sum_{k=0}^{\infty}\frac{(a)_k(b)_k z^k}{(c)_k k!}, \tag{33}$$

$$\Gamma(x)=\int_0^\infty e^{-t}t^{x-1}dt,\ x>0, \tag{34}$$

$$q(L,\varepsilon)=\frac{1-e^{-\varepsilon L}}{1-e^{-\varepsilon}}, \tag{35}$$

$$(a)_k=a(a+1)\cdots(a+k-1),\ (a)_0=1. \tag{27}$$

그림 3에서 골드, 등상관 골드, 송-박 수열을 썼을 때의 평균 비트오류율을 신호대잡음비 $E\Omega_0/\eta_0$의 함수로 나타내었다. 레일리 여러길 감쇄가 있고, $L_p=L_r=5$, $\varepsilon=0.1$, 쓰는이 수는 30, 100, 200명, 송-박 수열의 길이는 510이고 다른 수열들의 길이는 511일 때의 그림이다. IV.1절과 마찬가지로 시간동기를 제대로 맞추었다고 두었고, x째 쓰는이의 다중접

범 위	수열의 개수	확 률
$r_{k,k} \geq 1\times10^{7}$	4	0.0157
$4\times10^{6} \leq r_{k,k} < 1\times10^{7}$	6	0.0236
$1\times10^{6} \leq r_{k,k} < 4\times10^{6}$	32	0.1260
$5\times10^{5} \leq r_{k,k} < 1\times10^{6}$	46	0.1811
$2\times10^{5} \leq r_{k,k} < 5\times10^{5}$ †	166	0.6535

† 골드와 등상관 골드에서 여러길 간섭 항 $r_{k,k}$의 값은 5×10^{5}정도 이다.

표 3: N=510일 때, 송-박 수열에서 $\{r_{k,k}\}_{k=1}^{254}$의 분포

속 간섭 항 $\sum_{k=2}^{K} r_{k,x}$와 여러길 간섭 항 $r_{x,x}$는 수열을 K개 만들어 수치 계산하였다.

표 3에서 볼 수 있듯이, 송-박 수열의 여러길 간섭 항 $r_{x,x}$의 크기는 골드나 등상관 골드 수열보다 폭넓게 바뀐다. 그림 3과 4에서 쓰는이가 30, 100, 200일 때 쓰인 송-박 수열 집합은 각각 $\{c_{[1]}, c_{[2]}, \cdots, c_{[30]}\}$, $\{c_{[1]}, c_{[2]}, \cdots, c_{[100]}\}$, $\{c_{[1]}, c_{[2]}, \cdots, c_{[200]}\}$인데, 여기서 $c_{[i]}$는 여러길 간섭 항의 크기가 $(r_{x,x})_{x=1}^{L}$가운데 i째로 작은 수열을 나타낸다. (그림 3과 4에서는 $K<L$일 때만을 고려했고, $K\approx L$일 때는 그림 5에 보인다).

그림 3에서, 여러길 감쇄가 있을 때에도 송-박 수열을 쓰면 성능이 가장 좋음을 볼 수 있다. 송-박 수열의 비트오류율은 쓰는이가 늘어나도 거의 바뀌지 않으므로, 쓰는이가 늘어날수록 다른 수열들과의 성능차이는 더욱 커진다. 이는 여러길 감쇄의 영향보다 다중접속 간섭의 영향이 더 크고, 송-박 수열은 이러한 다중접속 간섭을 거의 없애지만 다른 수열들은 다중접속 간섭을 줄이지 못하기 때문이다. 보기를 들어, K=30일 때 $P_e=10^{-3}$에 필요한 신호대잡음비의 차이는 0.2 dB쯤이지만, K=200일 때는 그 차이가 골드와 등상관 골드 수열에서 각각 4 dB와 2.5 dB로 늘어남을 볼 수 있다.

그림 4는 쓰는이가 100명일 때, 길 수를 3, 5, 8로 바꾸어가며 비트오류율을 나타낸 것이다. 다른 조건은 그림 3에서와 같다. 송-박 수열에서 최고 성능과 최저 성능은 각각 $c_{[1]}$과 $c_{[100]}$을 바라는 쓰는이로 두었을 때의 성능을 나타낸다. 먼저, 그림에서 길 수 L_p에 관계없이 송-박 수열의 최저 성능이 최고 성능과 거의 같음을 볼 수 있다. 다음으로, $L_p=L_r$일 때 다른 두 수열을 쓸 때보다 송-박 수열을 쓸 때의 통신 계통 성능이 길 수에 관계없이 언제나 나

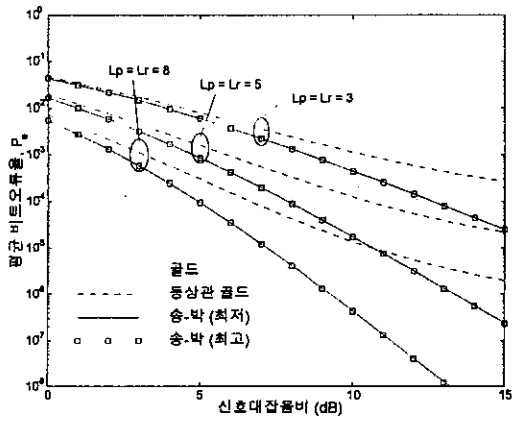

그림 4. 레일리 여러길 감쇄가 일어나고, 쓰는이가 100명, 수열 길이가 511 또는 510, $L_p=L_r=3, 5, 8$, $\varepsilon=0.1$일 때 여러 수열의 비트오류율

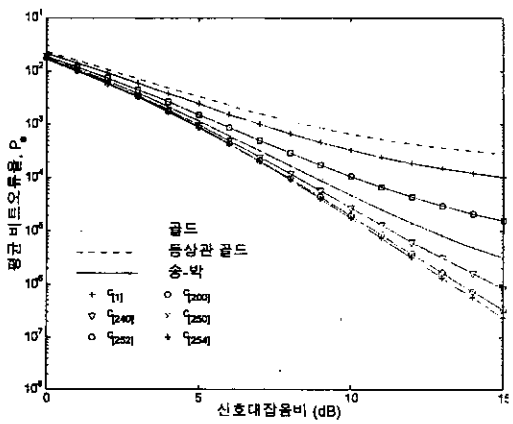

그림 5. 레일리 여러길 감쇄가 일어나고, 쓰는이가 254명, 수열 길이가 511 또는 510, $L_p=L_r=5$, $\varepsilon=0.1$일 때 여러 수열의 비트오류율

음을 볼 수 있다. 이 논문에서 직접 보이지는 않았지만, $L_p > L_r$일 때도 마찬가지이다.

이제, 길이가 N일 때 얻을 수 있는 송-박 수열 $L=(N-2)/2$개를 모두 쓸 때를 ($K \approx L$) 생각해 보자. 표 3으로부터 볼 수 있듯이, 송-박 수열을 썼을 때의 성능은 바라는 쓰는이에 따라 많이 바뀌지만, 골드나 등상관 골드 수열은 교차상관 값이 거의 일정하므로 바라는 쓰는이에 따라 성능이 거의 바뀌지 않는다. 그러나, 송-박 수열의 최저 성능도 다른 두 수열들의 성능보다 나음을 보이고자한다. 그림 5는 쓰는이가 254명이고 다른 조건은 그림 4에서와 같을 때의 비트오류율을 나타낸다. 먼저, 최저의 경우인 $c_{[254]}$를 바라는 쓰는이로 쓸 때의 성능조차도 골드나 등상관 골드 수열의 성능보다 나음을 볼 수 있다: $P_e = 10^{-3}$에 필요한 신호대잡음비가 송-박 수열을 쓰면 7 dB이지만, 골드와 등상관 골드 수열에서는 각각 12와 8.5 dB이다. 더욱이, 송-박 수열 254개 가운데 둘만이 7 dB 정도의 신호대잡음비를 필요로 하고, 나머지 수열 252개는 5-6 dB만을 필요로 함을 볼 수 있다. 이것은 여러길 감쇄 환경에서 성능이 두드러지게 떨어지는 송-박 수열은 아주 적은 수뿐이라는 것을 뜻한다. 그러므로, 이러한 '뒤떨어지는' 수열 몇 개를 뺀 송-박 수열 부집합으로 매우 좋은 성능을 얻을 수 있다.

V. 맺음말

직접수열 부호분할 다중접속 계통에 알맞은 다상 서명수열 집합을 제안하였다. 제안한 수열 집합은 복소평면의 단위원을 등분한 점을 칩 값으로 가지므로 간단한 지표 계산만으로 만들 수 있었다. 제안한 수열의 상관 성질을 분석하였다: 짝교차상관은 언제나 0이고, 최대 홀교차상관 값은 근사적으로 N/π이었다. 이 값은 그리 작지는 않으나 아주 드물게 나타나므로 전체 계통 성능에 큰 영향을 주지 않는다. 더욱이, 수열의 지표에 따른 교차상관 값을 알 수 있으므로 전체 수열 집합에서 바라는 조건을 만족시키도록 부집합을 만들 수 있다. 보기를 들면, $\theta_c = 2\sqrt{2N}$을 만족시키는 제안한 수열의 부집합은 크기가 대략 $\sqrt{20N}$이었다. 제안한 수열의 자기상관 성질은 그다지 좋지 않아서 시간 동기를 맞추는데 문제가 있을 수 있다. 그렇지만, 실제 통신 계통에서 시간 동기를 맞추는 심볼 구간에 바커 수열처럼 자기상관 성질이 뛰어난 수열을 씀으로써 동기 문제를 해결할 수 있을 것이다.

제안한 수열의 뛰어난 교차상관 성질이 실제 직접수열 부호분할 다중접속 계통의 성능 향상에 미치는 영향을 더 자세히 살펴보고자, 시간 동기를 완전히 맞추었다고 두었을 때 여러 수열을 쓰는 계통의 성능을 비트오류율로 나타내어 견주어 보았다. 정규 잡음 채널이 레일리 감쇄를 겪을 때나 겪지 않을 때나, 제안한 수열을 쓸 때의 성능이 다른 수열을 쓸 때의 성능보다 나았으며, 쓰는이가 늘어남에 따라 성능 차이는 더 커짐을 볼 수 있었다. 무엇보다도, 제안한 수열을 쓴 계통의 성능은 수열의 길이에 따른 최대 수열 개수 L이 쓰는이 수 K와 거의 같게 될 때까지, 쓰는이가 늘어나도 거의 일정하였다.

참 고 문 헌

[1] T. Kasami, *Weight Distribution Formula for Same Class of Cyclic Codes*, Technical Report R285, Coordinated Science Laboratories, University of Illinois, USA, 1966.

[2] R. Gold, "Maximal recursive sequences with 3-valued recursive crosscorrelation functions," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 14, pp. 154-156, January 1968.

[3] R.L. Frank and S.A. Zadoff, "Phase shift pulse codes with good periodic correlation properties," *IRE Trans. Inform. Theory*, vol. 8, pp. 381-382, October 1962.

[4] D.C. Chu, "Polyphase codes with good periodec correlation properties," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 18, pp. 531-532, July 1972.

[5] S. Boztas, R. Hammons, and P.V. Kumar, "4-phase sequences with near-optimum correlation properties," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 38, pp. 1101-1113, May 1992.

[6] S.I. Park, S.R. Park, I. Song, and N. Suehiro, "Multiple-access interference reduction for QS-CDMA systems with a novel class of polyphase sequences," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, pp. 1448-1458, July 2000.

[7] 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.

[8] 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.

[9] D.V. Sarwate and M.B. Pursley, "Crosscorrelation properties of pseudo random and related sequences," *Proc. IEEE*, vol. 68, pp. 593-618, May 1980.

[10] 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.

[11] I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, Academic, Orlando, FL, USA, 1980.

[12] S.W. Golomb and R.A. Scholtz, "Generalized Barker sequences," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 11, pp. 533-537, October 1965.

[13] T. Eng and L.B. Milstein "Coherent DS-CDMA Performance in Nakagami Multipath Fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, pp. 1134-1143, February/ March/April 1995.

박 소 령(So Ryoung Park) 정회원

1997년 2월 : 연세대학교 전자공학과 공학사
1999년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사
1999년 3월~현재 : 한국과학기술원 전자전산학과 전기및전자공학 전공 박사과정
<주관심 분야> 이동통신, 통신이론, 통신 신호처리

송 익 호(Iickho Song) 정회원

1982년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사 (준최우등)
1984년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학석사
1985년 8월 : 펜실베니아대학교 전기공학과 공학석사
1987년 5월 : 펜실베니아대학교 전기공학과 공학박사
1987년 3월~1988년 2월 : 벨 통신연구소 연구원
1988년 3월~현재 : 한국과학기술원 전자전산학과 조교수, 부교수, 교수
1995년 1월~현재 : 한국통신학회 논문지 편집위원
1991년 11월, 1996년 11월 : 한국통신학회 학술상 받음
1993년 11월 : 한국음향학회 우수연구상 받음
1998년 11월 : 한국통신학회 LG학술상 받음
1999년 11월 : 대한전자공학회 해동논문상 받음
2000년 3월 : 젊은 과학자상 받음
2000년 11월 : 한국통신학회 모토롤라학술상 받음
대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 평생회원; IEE 석학회원; IEEE 선임회원
<주관심 분야> 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호검파와 추정, 이동통신

배 진 수(Jinsoo Bae) 정회원

1993년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학사 (최우등)
1995년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사
1998년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학박사
1997년 1월~12월 : 동경대학 공학계 연구과 방문연구원
1998년 1월~11월 : 앤더슨컨설팅 (현 엑센츄어) 컨설턴트
1998년 11월~1999년 9월 : 일본 모토롤라 선진기술연구센터 선임연구원
1999년 9월~2000년 2월: LG 텔레콤 전략개발실 과장
2000년 3월~현재 : 세종대학교 정보통신공학과 전임강사
<주관심 분야> 신호검파, 통신이론, 산업지식화

이 성 로(Sung Ro Lee) 정회원

1987년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학사
1990년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사
1996년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학박사
1996년 9월~1997년2월 : 한국과학기술원 정보전자연구소 연구원
1997년 3월~현재 : 목포대학교 전자공학과 전임강사, 조교수
<주관심 분야> 통계학적 신호처리, 배열 신호처리, 스펙트럼 추정