

論文99-36S-11-1

새 수열을 쓴 유사동기 부호분할 다중접속 시스템의 성능

(Performance of QS-CDMA Systems with a Novel Class of Sequences)

朴 聖 日 * , 朴 昭 玲 ** , 宋 翊 鎬 * , 尹 錫 皓 * , 李 柱 植 *

(Seong Ill Park, So Ryoung Park, Ickho Song, Seokho Yoon, and Jooshik Lee)

요 약

이 논문에서는 새로운 다상수열과 그것을 만드는 방법을 제안하고, 그 수열들의 상관성질을 살펴본다. 이 수열은 정수 덧셈과 나머지 셈만으로 쉽게 만들 수 있고, 상관성질도 좋다. 주파수 선택적이고, 시간 선택적이지 않으며, 느리게 바뀌는 나카가미 감쇄채널에서 덧셈 흰빛 정규잡음이 있을 때, 제안한 수열들을 쓴 유사동기 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 분석한다.

Abstract

In this paper, new polyphase sequences and a sequence generation method are suggested. These sequences are found to have good correlation properties. Since the suggested generation method consists only of integer sums and modular techniques, sequence generation is also easy. The performance of the sequences is investigated when used in QS-CDMA systems under frequency selective, time nonselective, slow Nakagami fading channel with additive white Gaussian noise.

I. 서 론

이제까지 직접수열 부호분할 다중접속 시스템에 알맞은 몇 가지 수열들이 제안되었다. m -수열과 골드수열이 그 보기들이다^[1]. 하지만, 이 수열들은 채널사이 간섭을 일으키고, 쓰는데가 많아지면 채널사이 간섭은 시스템의 성능을 뚜렷이 떨어뜨린다. 여러 응용에서 이러한 간섭을 없애는 방법이 연구되었다. 보기를 들면, [2]에서는 두 방향 텀을 쓴 횡단 (transversal) 여파기

를 분석하였으며, [3]-[6]에서는 여러쓰는이 검파를 다루었다. 그러나, 부호수열들이 이미 서로 상관관계가 있어서 간섭을 일으키므로, 쓰는데사이 간섭은 완전히 없앨 수 없다.

한편, [7]에서 한 직교수열이 제안되었는데, 그 수열의 자기상관함수는 일정 주기마다를 빼면 늘 0이어서, 쓰는데사이 간섭을 작게 할 수 있다. 그러나, 이 수열에도 몇 가지 단점이 있다. 그 하나는, 이산푸리에변환을 써야 하기 때문에 수열을 만들기가 매우 복잡하다는 것이다. 또한, 이 수열은 교차상관이 0이 아니라는 것과 정확한 동기 채널에서만 쓰일 수 있다는 단점이 있다. 또 다른 다상 (polyphase) 의사주기 수열을 [8]에서 제안하였다. 이 수열은 주기 교차상관값이 0이어서 채널사이 간섭을 일으키지 않지만, 선택적 감쇄 채널에서나 동기가 정확히 맞지 않을 때에는 쓰기 어렵고, 만들기도 쉽지 않다.

* 正會員, 大宇電子 디지털 情報傳送研究室
(Digital Information Transmission Lab. 3, Daewoo Electronics)

** 正會員, 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
(Dept. of Electrical Engineering, KAIST)

接受日字: 1999年1月8日, 수정완료일: 1999年8月18日

이 논문에서는 새로운 다상수열 집합과 이를 만드는 방법을 제안하고 그 수열의 상관성질을 살펴본다. 제안한 수열들은 다른 수열들보다 뛰어난 몇 가지 장점을 가지고 있는데, 무엇보다도 제안한 수열을 쓴 유사동기 부호분할 다중접속 시스템은 쓰느이사이 간섭이 없어서 시스템의 성능을 크게 높일 수 있다는 것이다. 부호분할 다중접속 시스템에서 이 수열을 쓰려면 쓰느이들의 정보심볼이 거의 동기를 이루기만 하면 되므로, 직접수열 부호분할 다중접속 시스템의 순방향 연결이나 유사동기 부호분할 다중접속 시스템의 순·역방향 연결과 같은 실제 환경에서 쓰일 수 있다. 그 뿐만 아니라, 제안한 수열을 쓰면 쓰느이 수가 바뀔 때에도 시스템의 성능이 그리 바뀌지 않는다.

II. 새 수열과 상관성질

1. 새로운 수열

먼저, $N \times N$ 이산푸리에변환 행렬을 다음과 같이 정의하자.

$$F^{(N, m)} = [W_N^{-kjm}]. \quad (1)$$

여기서, m 은 자연수이고, $k, l = 0, 1, \dots, N-1$, $W_N = e^{2\pi j/N}$, $j = \sqrt{-1}$ 이다. 그리고, 정수 α 와 자연수 β 의 몫함수 Q 와 나머지함수 R 을 다음과 같이 두자.

$$Q(\alpha, \beta) = q, \quad R(\alpha, \beta) = r. \quad (2)$$

여기서, $\alpha = q\beta + r$ 이고, $r = 0, 1, \dots, \beta-1$, q 는 자연수이다. 크기가 모두 같은 (그러나, 서로 다를 필요는 없는) N_b 심볼 β_i , $i = 0, 1, 2, \dots, N_b-1$ 을 바탕 심볼이라 부르자. 이 때, β_i 가 복소평면의 단위원 위에 놓여 있다고 둘 수 있다. 이제, $1 \leq m \leq N_b-1$ 이고, 바탕 심볼이 $\{\beta_i\}$ 일 때, $N_b \times N_b$ 바탕직교수열 행렬 G 를 다음과 같이 정의한다.

$$G = F^{(N_b, -m)} \text{diag}(\{\beta_i\}). \quad (3)$$

다음, 길이 N_b^2 인 바탕직교수열 $\{g_p\}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} g_p &= G_{Q(\beta, N_b), R(\beta, N_b)} \\ &= \beta_{R(\beta, N_b)} W_{N_b}^{Q(\beta, N_b)R(\beta, N_b)m}, \quad p = 0, 1, \dots, N_b^2 - 1. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, G_{ab} 는 G 의 a 째 행, b 째 열 원소를 뜻한다. 바탕직교수열 $\{g_p\}$ 를 써서 $N_s \times K$ 행렬 $H = [h_{i,k}]$ 를 다음과 같이 만든다.

$$h_{i,k} = \sum_{p=0}^{N_s-1} g_p \delta(i-k-pK). \quad (5)$$

여기서, $\delta(\cdot)$ 은 $x=0$ 일 때 1이고 그 밖의 값에서는 0인 함수이고, $N_s = KN_b^2$ 이며, K 는 자연수이다. 이제, $N_s \times K$ 박-송 수열 행렬 C 를 다음과 같이 정의하자.

$$C = \frac{1}{N_b} F^{(N_s, -1)} H = [c_{l,k}] \quad (6)$$

여기서, $c_{l,k}$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} c_{l,k} &= \frac{1}{N_b} \sum_{i=0}^{N_s-1} W_{N_s}^{li} h_{i,k} \\ &= \frac{1}{N_b} \sum_{i=0}^{N_s-1} W_{N_s}^{li} \sum_{p=0}^{N_s-1} g_p \delta(i-k-pK) \\ &= \frac{1}{N_b} \sum_{p=0}^{N_s-1} W_{N_s}^{l(k+pK)} \beta_{R(\beta, N_b)} W_{N_b}^{Q(\beta, N_b)R(\beta, N_b)m}. \end{aligned} \quad (7)$$

이제, $\sum_{i=0}^{N_s-1} W_{N_s}^{ai} = N \delta(R(a, N))$ 이고, $W_{N_s}^i = W_{aN}^{ai}$ 이며, $N_s = KN_b^2$ 이므로, $p = xN_b + y$, $x, y = 0, 1, \dots, N_b-1$ 라고 두면, 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} c_{l,k} &= \frac{1}{N_b} W_{N_s}^{lk} \sum_{y=0}^{N_b-1} W_{N_s}^{lKy} \beta_y \sum_{x=0}^{N_b-1} W_{N_s}^{lKN_b x} W_{N_s}^{mxy} \\ &= W_{N_s}^{lk} \sum_{y=0}^{N_b-1} \beta_y W_{N_s}^{ly} \delta(R(l+my, N_b)). \end{aligned} \quad (8)$$

이 때, 수열 $\{c_{l,k}, l=0, 1, \dots, N_s-1\}$ 을 박-송 수열이라 부른다.

<보기> 먼저, $\{\beta_i\} = \{1, W_3, W_3^2\}$ 이고 $K=2$ 일 때는,

$$\begin{aligned} G &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & W_3 & W_3^2 \\ 1 & W_3^2 & W_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & W_3 & 0 \\ 0 & 0 & W_3^2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & W_3 & W_3^2 \\ 1 & W_3^2 & W_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

이고, $\{g_p\} = \{1, W_3, W_3^2, 1, W_3^2, W_3, 1, 1, 1\}$ 이다. 이 때,

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W_3 & 0 & W_3^2 & 0 & 1 & 0 & W_3^2 & 0 & W_3 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & W_3 & 0 & W_3^2 & 0 & 1 & 0 & W_3^2 & 0 & W_3 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T. \quad (10)$$

그러면, 박-송 수열 행렬 C 는 다음과 같다.

$$C = \frac{1}{3} F_{18,1}^{-1} H$$

$$= \begin{bmatrix} W_{18}^0 & W_{18}^{16} & W_{18}^{10} & W_{18}^4 & W_{18}^{10} & W_{18}^{16} & W_{18}^0 & W_{18}^4 & W_{18}^8 & W_{18}^{14} \\ W_{18}^4 & W_{18}^{12} & W_{18}^6 & W_{18}^0 & W_{18}^{12} & W_{18}^6 & W_{18}^8 & W_{18}^{14} & W_{18}^0 & W_{18}^4 \\ W_{18}^8 & W_{18}^{14} & W_{18}^0 & W_{18}^4 & W_{18}^0 & W_{18}^4 & W_{18}^8 & W_{18}^{14} & W_{18}^0 & W_{18}^4 \\ W_{18}^{12} & W_{18}^6 & W_{18}^4 & W_{18}^0 & W_{18}^4 & W_{18}^0 & W_{18}^{12} & W_{18}^6 & W_{18}^8 & W_{18}^{14} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

그러므로, 박-송 수열들은 다음과 같다.

$$c_{l,0} = \{ W_{18}^0, W_{18}^{16}, W_{18}^{10}, W_{18}^4, W_{18}^{10}, W_{18}^{16}, W_{18}^0, W_{18}^4, W_{18}^8, W_{18}^{14}, W_{18}^4, W_{18}^{12}, W_{18}^6, W_{18}^0, W_{18}^{12}, W_{18}^6, W_{18}^8, W_{18}^{14}, W_{18}^0, W_{18}^4, W_{18}^8, W_{18}^{14} \} \quad (12)$$

$$c_{l,1} = \{ W_{18}^0, W_{18}^{17}, W_{18}^{12}, W_{18}^3, W_{18}^{14}, W_{18}^3, W_{18}^6, W_{18}^{11}, W_{18}^{12}, W_{18}^8, W_{18}^8, W_{18}^{12}, W_{18}^2, W_{18}^{15}, W_{18}^2, W_{18}^3, W_{18}^3 \} \quad (13)$$

<간단히 만들기> 먼저, $\beta_p \in \{ W_{18}^i, i=0,1,\dots,V-1 \}$ 로 둘 수 있음을 쉽게 알 수 있다. 여기서, V 는 자연수이다. $\beta_p = W_{18}^{v_p}$ 일 때 $P(\beta_p) = v_p$ 로 정의되는 함수 P 를 생각하자. 그러면, (8)은

$$c_{l,k} = \sum_{\beta=0}^{N_s-1} W_{N_s}^{k\beta} W_{N_s}^{v_p} W_{N_s}^{i_s} \delta(R(l+mp, N_b))$$

$$= \sum_{\beta} W_{N_s}^{i_s} \quad (14)$$

이 된다. 여기서, $i_s = V(k+K\beta_s) + P(\beta_p)N_s$, $V_s = VN_s$ 이며, \sum_{β} 는 $R(l+mp, N_b) = 0$ 을 만족시키는 모든 정수 β_s 에 걸쳐 더하는 기호이다. (N_b 가 소수이면, 이 식을 만족시키는 정수 β_s 는 많아야 하나이고, 따라서 (14)는 많아야 하나의 항으로 표현된다.)

2. 자기상관과 교차상관

박-송 수열의 자기상관함수는 다음과 같다^[9].

$$A(\tau) = \sum_{l=0}^{N_s-1-\tau} c_{l+\tau,k} c_{l,k}^* + \sum_{l=N_s-\tau}^{N_s-1} c_{l+\tau-N_s,k} c_{l,k}^* \quad (15)$$

$$= N_s W_{N_s}^{i_s} \delta(R(\tau, N_b^2)).$$

다음, 두 박-송 수열을 $\{c_{l,k}^I\}$ 와 $\{c_{l,k}^{II}\}$ 로 나타내자. 그러면, 이들의 교차상관함수는 다음과 같다.

$$C(\tau) = \sum_{l=0}^{N_s-1-\tau} c_{l+\tau,k}^I c_{l,k}^{II*} + \sum_{l=N_s-\tau}^{N_s-1} c_{l+\tau-N_s,k}^I c_{l,k}^{II*} \quad (16)$$

$$= KN_b W_{N_s}^{i_s} \sum_{\beta=0}^{N_b-1} \sum_{q=0}^{N_b-1} \beta_p^I \beta_q^{II*} W_{N_s}^{v_p} \delta(R(\tau+m^I p - m^{II} q, N_b)) \delta(\{k^I - k^{II} + K(p-q)\}).$$

여기서, *는 켈레복소수를 나타내고, k, m, β 위의 첨자 I 과 II 는 두 수열을 구분하고자 쓴 것이다.

정의 1. 박-송 수열 가운데에서 같은 m 과 k 로 만든 수열들의 모임을 m_k -버금 모임이라 부른다.

정의 2. k 가 같은 m_k -버금모임의 모임을 k -모임이라 한다.

정리 1. 박-송 수열의 자기상관함수는 시간늦음이 바탕심볼 수의 제곱의 배수일 때를 빼면 늘 0이다.

정리 2. 서로 다른 k -모임에서 고른 두 박-송 수열은 교차상관이 없다.

정리 3. 한 k -모임의 서로 다른 m_k -버금모임에서 고른 두 박-송 수열의 교차상관의 절대값은 $\sum_{\beta} \beta_p^I \beta_p^{II*} = 0$ 일 때, $\tau=0$ 에서 0이다. 여기서 \sum_{β} 는 $R(l+mp, N_b) = 0$ 을 만족시키는 모든 정수 p 에 걸쳐 더하는 기호이다.

정리 4. $\sum_{\beta=0}^{N_s-1} \beta_p^I \beta_p^{II*} = 0$ 이면, $|\tau| < N_b$ 이고 $iN_b < |\tau| < (i+1)N_b$, $i=1,2,\dots,KN_b-2$ 일때, 같은 m_k -버금모임에서 고른 두 박-송 수열의 교차상관의 절대값은 0이다.

정리 1-4는 (15)와 (16)을 써서 보일 수 있다^[9]. 특히, 교차상관이 전혀 없는 수열들을 K 개 고를 수 있음을 정리 2에서 알 수 있다. 이제, N_b 바탕심볼 $\beta_s, i=0,1,\dots,N_b-1$ 을 복소벡터 $\vec{\beta}$ 로 보면, 복소벡터 공간 C^{N_s} 에 직교벡터가 많아야 N_b 개 존재한다. 이는 m_k -버금모임에서 $\sum_{\beta=0}^{N_s-1} \beta_p^I \beta_p^{II*} = 0$ 을 만족시키는 수열이 N_b 개가 있음을 뜻한다. 그러므로, 정리 2와 4로부터, $|\tau| < N_b$ 일 때 교차상관이 없는 수열을 KN_b 개 고를 수 있다. 그러나, 한편으로, 수열의 자기상관이 바탕심볼의 제곱 길이다 0이 아닌 값을 가지므로, 비동기 채널에서 그대로 쓰면 지연된 자기 신호가 검파한 곳에서 나타나게 된다. m -수열이나 폴드수열과 견주어 볼 때 지연된 자기 신호의 크기가 더 크게 나타나기 때문에, 다음 절에서는 유사동기 채널에서 쓸모있도록 박-송 수열을 바탕으로 한 서명 수열과 역확산 수열을 제안한다.

III. 유사동기 부호분할 다중접속 시스템의 성능

1. 분석적 접근

덧셈 흰빛 정규잡음이 있고, 주파수 선택적이고, 시간 선택적이지 않으며, 느리게 바뀌는 나카가미 감쇄채널을 생각하자. 정보심볼이 M 진 위상변조되고, 갈퀴 수신기를 쓸 때, 동기 검파를 가정한 유사동기 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 살펴보자. 박-송 수열의 상관함수가 주기적이므로, 완전히 동기를 맞추지 못하면 서명 수열로써 박-송 수열을 직접 쓰는 것은 알맞지 않다. 그러므로, 이 논문에서는 쓰는이에게 서명 수열을 배정할 때 덧붙임 방법을 쓸 것을 제안한다: 쓰는이가 K_u 사람일 때, 서로 다른 K_u k -모임에서 K_u 수열을 고른다면, k 째 쓰는이에게 다음과 같은 서명 수열을 배정한다.

$$a_l^{(k)} = c_{R(l+N_s-L, N_s), k}, \quad l=0, 1, \dots, N-1, \quad k=0, 1, \dots, K_u-1. \quad (17)$$

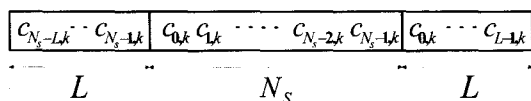


그림 1. 박-송 수열을 덧붙여 서명 수열 만들기
Fig. 1. Composition of the signature sequence by patching.

여기서, L 은 나눌 수 있는 감쇄 길 수와 시간늦음으로 정해지는 자연수이고, $N=N_s+2L$ 은 서명 수열의 길이이다. 이 서명 수열은 그림 1에 보인 것처럼 처음과 끝에 수열 조각을 덧붙인 박-송 수열이다. 이 때, 박-송 수열의 뛰어난 상관성질을 충분히 활용하려면, 다음 조건을 만족시키도록 L 을 골라야 한다.

$$\min \left\{ \left\lfloor \frac{\tau^{(k)}}{T_c} \right\rfloor - L_p^{(k)} \right\} \geq -L, \quad k=0, 1, \dots, K_u-1, \quad (18)$$

$$\max \left\{ \left\lfloor \frac{\tau^{(k)}}{T_c} \right\rfloor + L_p^{(k)} \right\} \leq L, \quad k=0, 1, \dots, K_u-1, \quad (19)$$

$$L < N_s^2. \quad (20)$$

여기서, $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 크지 않은 가장 큰 정수를 나타내고, $\{\tau^{(k)}\}$ 는 $[-aT, aT]$ 에서 고르게 분포하는 k 째 쓰는이의 시간늦음으로, 서로 독립이고 모두 같은 분포를 가진다. 한편, T_c 는 칩구간이고 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 작지 않은 가장 작은 정수를 나타내며, $L_p^{(k)}$ 는 여

러 길 감쇄에서 k 째 쓰는이의 길 수이다. 여기서, $T=NT_c$ 는 심볼주기이고, 유사동기 시스템에서 $a \ll 1$ 이고, 보통 $L_p \approx 4$, $aT/T_c \approx 2$, $L \approx 7$ 이다. 제안한 시스템에서 받은 신호의 보기가 그림 2에 나타나 있다. 받은 신호에서 가운데 있는 길이가 N_s 인 토막은 한 정보 심볼로부터만 나온 칩들로 이루어진다는 것을 쉽게 알 수 있다. 이는 (18)과 (19)를 만족시키도록 L 을 정함으로써 나오는 결과이다. 조건 (20)은 박-송 수열의 상관성질을 활용하려면 필요한 것이다.

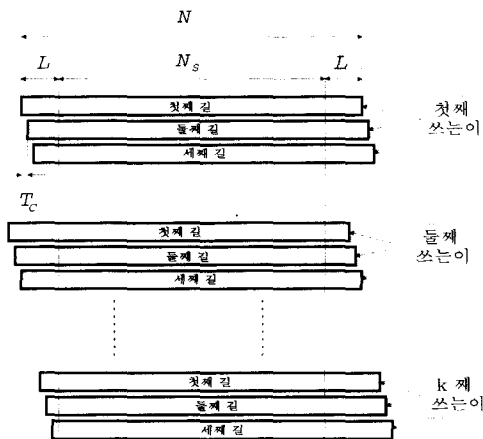


그림 2. 받은 신호의 보기
Fig. 2. Received signals through a multipath channel.

마찬가지로, k 째 쓰는이의 역확산 수열은 덧붙인 박-송 수열과 비슷하며 다음과 같다.

$$d_l^{(k)} = \begin{cases} 0, & \text{if } l=0, 1, \dots, L-1, \\ c_{l-L, k}, & \text{if } l=L, L+1, \dots, L+N_s-1, \\ 0, & \text{if } l=L+N_s, L+N_s+1, \dots, N-1. \end{cases} \quad (21)$$

이제, k 째 쓰는이의 서명 수열 파형은

$$a^{(k)}(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} a_{R(l, N)}^{(k)} P_{T_c}(t - lT_c) \quad (22)$$

이고, 여기서

$$P_{T_c}(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_c \text{ 이면,} \\ 0, & \text{그 밖} \end{cases} \quad (23)$$

이다. 마찬가지로 k 째 쓰는이의 역확산 수열은

$$d^{(k)}(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} d_{R(l, N)}^{(k)} P_{T_c}(t - lT_c) \quad (24)$$

이다.

이제, M 진 위상변조의 정보심볼이 다음과 같다고 하자.

$$b_i^{(k)} \in \left\{ \exp\left(\frac{2\pi jm}{M}\right), m=0, 1, \dots, M-1 \right\}. \quad (25)$$

여기서, $\log_2 M$ 은 한 심볼의 정보비트 수이다. 그러면, 정보심볼 파형은 다음과 같다.

$$b^{(k)}(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_l^{(k)} P_T(t-lT). \quad (26)$$

그러므로 보낸 신호는

$$s^{(k)}(t) = \sqrt{2P} \operatorname{Re}\left\{ \exp(2\pi j f_c t + \theta^{(k)}) S^{(k)}(t) \right\} \quad (27)$$

이다. 여기서, P 는 보낸 신호의 전력, f_c 는 반송주파수, $\theta^{(k)}$ 는 k 째 쓰는이의 위상이고, $S^{(k)}(t) = a^{(k)}(t) b^{(k)}(t)$ 이다. 동기 검파한 뒤 복소 바탕대역에서 받은 신호를 나타내면 다음과 같다.

$$R(t) = \sum_{k=0}^{K_s-1} \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \rho_l^{(k)} e^{j\psi_l^{(k)}} S^{(k)}(t-lT_c-\tau^{(k)}) + n(t) \quad (28)$$

여기서, $\{\psi_l^{(k)}\}$ 는 $(0, 2\pi)$ 에서 고르게 분포하고, 서로 독립이며 같은 분포를 갖는 k 째 쓰는이의 위상낮음이며, $n(t)$ 는 평균이 0이고 분산이 $2\eta_0$ 인 복소 정규잡음이다. $\{\rho_l^{(k)}\}$ 는 서로 독립이고 같은 분포를 갖는 나카가미 확률변수이고, 그 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f_{L,k}(x) = M(x, p, \Omega_i^{(k)}). \quad (29)$$

여기서,

$$M(r, p, \Omega) = \frac{2p^p r^{2p-1}}{\Gamma(p)\Omega^p} \exp\left(-\frac{p}{\Omega} r^2\right) \quad (30)$$

이다. 위 두 식에서

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{z-1} dt, \quad z > 0 \quad (31)$$

는 감마 함수이고, p 는 양의 실수이며, $\Omega_i^{(k)}$ 는 $\rho_l^{(k)}$ 의 2차 적률인데, 처음 길 세기의 2차 적률 $\Omega_0^{(k)}$ 와 다음과 같은 관계가 있다고 두었다.

$$\Omega_i^{(k)} = \Omega_0^{(k)} e^{-\delta i}, \quad \delta \geq 0. \quad (32)$$

이제, i 째 쓰는이의 갈퀴 수신기 출력은 다음과 같이

얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} U^{(i)} &= \sum_{p=0}^{L_s-1} \rho_p^{(i)} e^{-j\psi_p^{(i)}} \int_{pT_c}^{(N+p)T_c} \sqrt{2P} d^{(i)}(t-pT_c) \\ &\quad \cdot \left(\sqrt{2P} \sum_{k=0}^{K_s-1} \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \rho_l^{(k)} e^{j\psi_l^{(k)}} S^{(k)}(t-lT_c-\tau^{(k)}) + n(t) \right) dt \\ &= U_s^{(i)} + U_n^{(i)}. \end{aligned} \quad (33)$$

여기서, $U_n^{(i)}$ 는 잡음성분 응답이고, $U_s^{(i)}$ 는 신호성분 응답이며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U_s^{(i)} &= \sum_{p=0}^{L_s-1} \rho_p^{(i)} e^{-j\psi_p^{(i)}} \int_{pT_c}^{(N+p)T_c} 2Pd^{(i)}(t-pT_c) \sum_{k=0}^{K_s-1} \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \\ &\quad \rho_l^{(k)} e^{j\psi_l^{(k)}} S^{(k)}(t-lT_c-\tau^{(k)}) dt \\ &= 2P \sum_{p=0}^{L_s-1} \sum_{k=0}^{K_s-1} \sum_{l=0}^{L^{(k)}-1} \rho_l^{(k)} e^{j\psi_l^{(k)}} \rho_p^{(i)} e^{-j\psi_p^{(i)}} \\ &\quad \cdot \int_{pT_c}^{(N+p)T_c} d^{(i)}(t-pT_c) S^{(k)}(t-lT_c-\tau^{(k)}) dt. \end{aligned} \quad (34)$$

덧붙인 박-송 수열과 유사동기 시스템의 성질을 쓰면, (34)의 오른쪽에 있는 적분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I(l, k, p) &= b^{(k)} \int_{LT_c}^{(N-L)T_c} d^{(i)}(t) a^{(k)}(t-(l-p)T_c-\tau^{(k)}) dt \\ &= N_s T_c b^{(k)} \delta(l-p) \delta(k-i). \end{aligned} \quad (35)$$

식 (34)에 (35)를 대입하면,

$$U_s^{(i)} = 2PN_s T_c b^{(i)} \sum_{l=0}^{L_s-1} (\rho_l^{(i)})^2 \quad (36)$$

이다. 이제부터, 보기 쉽도록 쓰는이 색인 (i)를 쓰지 않기로 하자. 그러면, (33)에서 갈퀴 수신기로부터 나오는 잡음성분의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_n^2 = 4PN_s T_c \eta_0 \sum_{l=0}^{L_s-1} (\rho_l)^2. \quad (37)$$

이제, 다음과 같은 확률변수를 정의하자.

$$S \equiv \frac{1}{\Omega_0} \sum_{l=0}^{L_s-1} (\rho_l)^2. \quad (38)$$

여기서, $\Omega_0 = \Omega_0^{(0)} = \Omega_0^{(1)} = \dots = \Omega_0^{(K_s-1)}$ 이다. 이 때, \sqrt{S} 는 확률밀도함수가 다음과 같은 나카가미 확률변수로 근사화할^[10] 수 있다.

$$f_{\sqrt{S}}(x) \approx M(x, e_s, \Omega_s). \quad (39)$$

여기서, $e_s = p \frac{q^2(L_r, \delta)}{q(L_r, 2\delta)}$, $q(a, b) = \frac{1 - e^{-ab}}{1 - e^{-b}}$,

$\Omega_s = q(L_r, \delta)$ 이다.

식 (33), (36), (37), (38)로부터 $\{\rho_i\}$ 가 주어졌을 때 심볼 오류율을 [11]에서와 같이 근사화하여 다음을 얻을 수 있다.

$$P_M(S) \approx 2Q\left(\sqrt{\gamma S} \sin \frac{\pi}{M}\right). \quad (40)$$

여기서, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, $x \geq 0$ 이고, $\gamma = \frac{N_s}{N} \frac{E\Omega_0}{\eta_0}$,

$E = PNT_s$ 이다. 그러면, 평균 심볼 오류율은

$$P_M \approx \int_0^\infty 2Q(\sqrt{\gamma x} \sin \frac{\pi}{M}) f_{\gamma S}(x) dx \quad (41)$$

인데, 여기서

$$\gamma_s = \frac{\gamma q(L-r, 2\delta)}{2p q(L-r, \delta)} \sin^2 \frac{\pi}{M} \quad (42)$$

이며, ${}_2F_1(a, b; c; z)$ 는 다음과 같이 정의되는 초기하함수이다.

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a)_k (b)_k z^k}{(c)_k k!}. \quad (43)$$

식 (43)에서,

$$(a)_k = a(a+1)\cdots(a+k-1), \quad (a)_0 = 1 \quad (44)$$

이다.

2. 수치 결과

평균 신호대잡음비를 다음과 같이 정의하자.

$$\gamma_0 \equiv \frac{E\Omega_0}{\eta_0}. \quad (45)$$

수식으로 분석한 결과와 모의실험 결과를 견주어보자. $p=1$, $K=K_u=20$, $L_p=4$, $\delta=0.2$, $M=2$, $N=194$, $L=7$, $N_s=180$, $L_r=1, 2, 3$ 일 때의 심볼 오류율을 그림 3에 보였다. 식 (41)이 근사식이므로, 분석 결과와 모의실험 결과가 조금 다를 수 있다.

그림 4에는 $p=1$, $L_p=4$, $\delta=0.2$, $M=2$, $N=464$, $L=7$, $N_s=450$, $L_r=1, 4$ 일 때, 이진 의사잡음 수열과 제안한 서명 수열을 쓴 시스템의 심볼 오류율을 보여준다. 이진 의사잡음의 심볼 오류율은 [10]

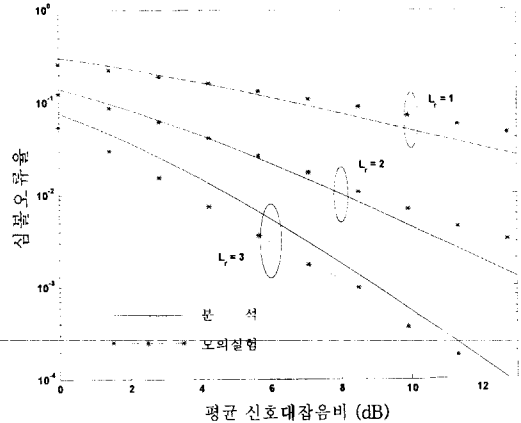


그림 3. $p=1$, $K=K_u=20$, $L_p=4$, $\delta=0.2$, $M=2$, $N=194$, $L=7$, $N_s=180$, $L_r=1, 2, 3$ 일 때, 제안한 수열을 쓴 유사동기 부호분할 다중접속 시스템의 심볼 오류율.

Fig. 3. The symbol error probability of the QS-CDMA system using the PS sequence, when $p=1$, $K=K_u=20$, $L_p=4$, $\delta=0.2$, $M=2$, $N=194$, $L=7$, $N_s=180$, and $L_r=1, 2, 3$.

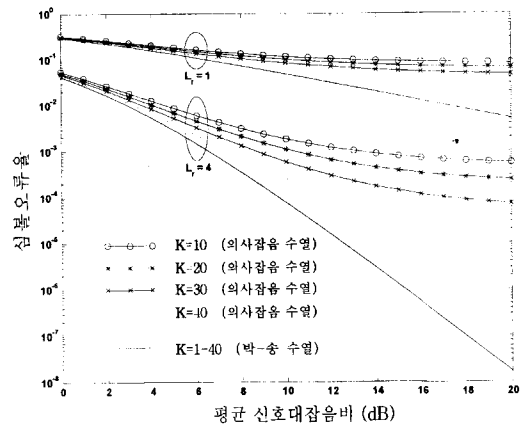


그림 4. $p=1$, $L_p=4$, $\delta=0.2$, $M=2$, $N=464$, $L=7$, $N_s=450$, $L_r=1, 4$, $K=K_u$ 일 때, 이진 의사잡음 수열과 박-송 수열을 쓴 시스템의 심볼 오류율.

Fig. 4. The symbol error probability of the systems using PS sequences and binary PN sequences, when $p=1$, $L_p=4$, $\delta=0.2$, $M=2$, $N=464$, $L=7$, $N_s=450$, $L_r=1, 4$, and $K=K_u$.

의 분석 결과를 써서 얻었다. 제안한 서명 수열을 쓰면 $2L/N$ 만큼의 에너지 손실과 대역폭 손실이 있지만,

$2L/N$ 은 실제 시스템에서 상대적으로 꽤 작은 값이다. 쓰느이가 늘어나면 의사잡음을 쓴 시스템의 심볼오류율이 뚜렷이 나빠지는 것을 볼 수 있다. 쓰느이가 10 사람일 때, $P_b = 10^{-3}$ 에서 제안한 서명 수열의 신호대잡음비 이득은 이진 의사잡음 수열과 견주었을 때 1 dB 쯤이다. 쓰느이 수가 많아지면 그 이득은 훨씬 커진다. 보기를 들어, 쓰느이가 40 사람일 때 $P_b = 10^{-3}$ 에서의 이득은 5 dB이다.

여기서, 이진 의사잡음 수열을 쓸 때 N 이 크면 쓰느이 사이 간섭을 줄일 수 있으므로, N 이 커지고 K_u 가 작아질수록 제안한 서명 수열의 신호대잡음비 이득은 작아진다. 그러나, 실제로는 작은 N 과 큰 K_u 값을 고르는 것이 바람직하므로, 제안한 서명 수열은 매우 쓸모가 있다.

IV. 맺 음 말

이 논문에서는, 새로운 수열과 그 수열을 만드는 간단한 방법을 제안하였다. 제안한 수열을 쓰는 시스템은 그 수열의 뛰어난 상관성질로 말미암아 쓰느이 사이 간섭이 없다. 더욱이, 제안한 수열은 정수 덧셈과 나머지 셈만으로 만들 수 있어서, 시스템을 구현하기가 쉽다. 제안한 수열을 썼을 때, 주파수 선택적이고 느리게 바뀌는 나카가미 감쇄 채널에서 갈퀴 수신기를 쓴 유사 동기 부호분할 다중접속 시스템의 성능을 분석하였다. 쓰느이 사이 간섭이 없으므로, 그 시스템은 다른 수열을 썼을 때보다 성능이 훨씬 뛰어남을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] D.V. Sarwate and M.B. Pursley, "Cross-correlation properties of pseudo-random and related sequences," *Proc. IEEE*, vol. 68, pp. 593-619, May 1980

[2] L.-M. Li and L.B. Milstein, "Rejection of narrow-band interference in PN spread-spectrum systems using transversal filters," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 30, pp. 925-928, May 1982

[3] S. Verdu, "Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 32, pp. 85-96, Jan. 1986

[4] R. Kohno, H. Imai, M. Hatori, and S. Pasupathy, "Combination of an adaptive array antenna and a canceller of interference for direct-sequence spread-spectrum multiple-access system," *IEEE J. Select. Areas Comm.*, vol. 8, pp. 675-682, May 1990

[5] 김광순, 윤석호, 송익호, 김윤희, 이주식, "유사동기 부호분할 다중접속 시스템에서 안테나 배열과 갈퀴 수신기를 쓴 여러 쓰느이 수신기", 한국통신학회논문지, 제 23권 9B호, 2403-2410쪽, 1998년 9월

[6] 김광순, 박소령, 송익호, 김홍길, 이주식, "채널이 시간을 따라 바뀌지 않을 때 비동기 직접수열 다중접속 계통에서 갈퀴 수신기를 쓴 유사 최대우도 여러 쓰느이 검파", *Telecommunications Review*, 제 9권 2호, 260-268쪽, 1999년 4월

[7] N. Suehiro and M. Hatori, "Modulatable orthogonal sequences and their application to SSMA systems," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 34, pp. 93-100, Jan. 1988

[8] N. Suehiro, "A signal design without co-channel interference for approximately synchronized CDMA systems," *IEEE J. Select. Areas Comm.*, vol. 12, pp. 837-841, June 1994

[9] 박성일, *대역확산 다중접속 방식 계통을 위한 최적 변복조방식과 오류정정 부호기법*, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1998

[10] T. Eng and L.B. Milstein, "Coherent DS-SS performance in Nakagami multipath fading," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 43, pp. 1134-1143, Feb./Mar./Apr. 1995

[11] J.G. Proakis, *Digital Communications*, New York, NY: McGraw-Hill, 1995

저 자 소 개

朴 聖 日(正會員)

1968년 5월 19일 태어남. 1986년 3월~1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사. 1991년 3월~1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1993년 3월~1998년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사. 1998년 9월~현재 대우전자 디지털 정보전송연구 3실 선임연구원. 한국음향학회, 한국통신학회 회원; IEEE 회원. * 주관심분야: 검파와 추정, 통계학적 신호처리와 통신이론, 오류정정부호, 변복조, 이동통신

朴 昭 玲(學生會員)

1974년 11월 22일 태어남. 1993년 3월~1997년 2월 연세대학교 전자공학과 공학사. 1997년 3월~1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1999년 3월~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정. * 주관심분야: 이동통신, 신호검파

宋 翊 鎬(正會員)

1960년 2월 20일 태어남. 1978년 3월~1982년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사 (준최우등). 1982년 3월~1984년 2월 서울대학교 전자공학과 공학석사. 1984년 1월~1985년 8월 펜실베니아대학교 전기공학과 공학석사. 1985년 9월~1987년 5월 펜실베니아대학교 전기공학과 공학박사. 1987년 3월~1988년 2월 벨 통신연구소 연구원. 1988년 3월~1991년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 조교수. 1991년 9월~1998년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 부교수. 1998년 9월~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 교수. 1995년 1월~현재 한국통신학회 논문지 편집위원. 1996년 1월~현재 한국음향학회 영문논문지 편집위원. 1998년 1월~현재 Journ. Comm., Networks 편집위원. 1991년 11월, 1996년 11월 한국통신학회 학술상 받음. 1993년 11월 한국음향학회 우수연구상 받음. 1998년 11월 한국통신학회 LG학술상 받음. 대한전자공학회, 한국음향학회, 한국통신학회 평생회원; IEE 회원; IEEE 선임회원
* 주관심분야: 통계학적 신호처리와 통신이론, 신호검파와 추정, 이동통신

尹 錫 皓(學生會員)

1976년 1월 7일 태어남. 1993년 3월~1997년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사 (최우등). 1997년 3월~1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1999년 3월~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정. * 주관심분야: 이동통신, 통계학적 신호처리, 적응 신호처리

李 柱 植(學生會員)

1974년 7월 30일 태어남. 1992년 3월~1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사. 1996년 3월~1998년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 1998년 3월~현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정. * 주관심분야: 배열신호처리, 신경회로망, 이동통신