Gray 사상을 이용한 이진 낮은 상관구역 수열군의 생성법

정회원 장 지 웅*, 김 영 식**, 임 대 운***°

Construction Method of Binary Low Correlation Zone Sequence Set Using Gray Mapping

Ji-Woong Jang*, Young-Sik Kim**, Dae-Woon Lim***° *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 이진 낮은 상관 구역 수열군의 새로운 생성법을 제안한다. 새로운 수열군은 Kim과 Jang, No, Chung이 제안한 4진 낮은 상관 구역 수열군에 Gray 사상을 적용하여 생성한다. 새로 생성된 이진 수열군의 주기는 생성에 사용한 4진 수열군의 주기의 2배이며, 낮은 상관구역 내 상관 값의 최대 크기 및 수열군의 크기는 생성에 사용한 수열군의 그것의 2배가 된다. 그러나 낮은 상관 구역의 크기는 그대로 유지된다. 생성에 사용한 4진 낮은 상관 구역 수열군의 최적인 경우 새로 생성된 이진 수열군은 높은 확률로 최적의 수열군이 된다.

Key Words : Gray 사상, LCZ, ZCZ, 준동기 부호 분할 다원 접속 시스템

ABSTRACT

In this paper, we propose a new construction method of binary low correlation zone (LCZ) sequence set. New construction method applies Gray mapping to conventional quaternary LCZ sequence set that has specific property. The period of new binary sequence set is twice as that of used sequence set in construction, and maximum magnitude of correlation value within the LCZ and cardinality of new set is also twice as those of used quaternary sequence set. But the LCZ size is the same with that of used sequence set. If the used quaternary sequence set is optimal, the constructed binary sequence set is optimal with high probability.

Ⅰ. 서 론

무선 LAN (Local Area Network)과 같이 셀의 크기가 매우 작은 마이크로 셀 통신 환경에서는 상대적으로 작은 전송 지연이 존재하므로 역방향 링크에서 전송의 시간 지연을 반송파의 수 칩 이내로 유지하는 것이 가능하다. 이러한 환경에서는 동기점의 수 칩 이내에서 항상 사용자 부호의 동기의 획득이 가능하므로 제한된 지연 내에서 동기점을 찾는 것만으로 충분히 동기의 획득이 가능하다. 이러한 사실에 주목하여 Gaudenzi와 Elia, Viola는 서로 다른 사용자간 제한된 칩의 시간 지연이 허용되는 준동기 부호 분할 다원 접속 시스템을 제안하였다[1].

이러한 준동기 부호 분할 다원 접속 시스템의 최대 성능을 이끌어 내기 위해서는, 동기점 부근에서 낮은 상관 값을 갖는 수열군이 필요하다[2]. 낮은 상관 구역 수열군으로 알려진 이러한 수열은 기존의 다른 수열군 들에 비하여 준동기 부호 분할 다원 접속 시스템에서 더 좋은 성능을 보인다[2],[3]. 이제 S가 주기가 N인 M개의 수열들로 구성된 수열군이라 하자. 이 때, S 내의 임의의 두 수열간의 상관 값의 위상 $|\tau|<L$의 범위에서 항상 ϵ보다 작거나 갈

* UCSD 전기컴퓨터공학부(stasera.jang@gmail.com), ** 삼성전자, System LSI 사업부 (mypurist@gmail.com)
*** 동국대학교 정보통신공학과 (daewoonlim@gmail.com)(°: 교신저자)
논문번호 : KICS2008-12-546, 접수일자 : 2008년 12월 9일, 최종논문접수일자 : 2009년 2월 2일

은 경우 S 를 매개 변수가 (N, M, L, ϵ)인 낮은 상관 구역 수열군(low correlation zone sequence set)이라 한다.

지금까지 다양한 문자크기를 갖는 낮은 상관 구역 수열군에 대한 많은 연구들이 있었다[2],[4]-[9]. 이러한 연구들 중 몇몇은 Tang과 Fan, Matsufuji의 bound[10]를 만족하는 수열군으로 그 최초는 Kim Jang, No, Chung이 제안한 이상적인 자기 상관 특성을 갖는 이진 수열을 이용하여 만든 4진 낮은 상관구역 수열군이다[8]. 이후 Jang과 No, Chung은 이를 일반화 하여 소수 p에 대해 통합 수열을 이용하여 p^2진 낮은 상관 구역 수열군을 제안하였고[5], Jang과 No, Chung, Tang은 최적의 p진 낮은 상관 구역 수열군을 제안하였다[6].

낮은 상관 구역 수열의 특수한 경우인 영 상관 구역 수열(zero correlation zone sequence)의 연구에 있어, Cha는 이진 및 3진 영상관 구역 수열을 세계 최초로 제안하였고[11],[12] 이를 확장하여 다중 위상을 갖는 영상관 구역 수열에 대한 연구 결과를 발표하였다[13],[14].

본 논문에서는 이진 낮은 상관 구역 수열군의 새로운 생성법을 제안한다. 새로운 수열군은 Kim, Jang, No, Chung이 제안한 4진 낮은 상관 구역 수열군[8]에 Gray 사상을 적용하여 생성한다. 새로 생성된 이진 수열군의 주기는 생성에 사용한 4진 수열군의 주기의 2배이며, 상관 구역 내 상관 값의 최대 크기 및 수열군의 크기는 생성에 사용한 수열군의 그것의 2배가 된다. 그러나 낮은 상관 구역의 크기는 그대로 유지된다. 생성에 사용한 4진 수열군의 최적의 것인 경우 새로 생성된 이진 수열군은 높은 확률로 최적의 수열군이 된다.

Ⅱ. 사전지식

본 장에서는 향후 논문의 이해를 위한 정의 및 사전정리 등을 기술한다.

주기가 N인 M진 수열 $s_1(t)$와 $s_2(t)$간의 상관 함수 $R_{s_1,s_2}(\tau)$는 다음과 같이 정의된다[15],[16].

$$R_{s_1,s_2}(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} \omega_M^{s_1(t) - s_2(t+\tau)}$$

단, ω_M은 M차 원시 복소 단위원이다.

소수 p와 $m|n$인 정수 m, n에 대해 trace 함수는 유한체 F_{p^n}에서 F_{p^m}으로의 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\mathrm{tr}_m^n(x) = \sum_{i=0}^{n/m-1} x^{p^{mi}}.$$

$x \in Z_4$인 정수 x 대하여 Z_4 로부터 (Z_2, Z_2)로의 사상인 Gray 사상 $\psi(x)$는 다음과 같이 정의된다.

$$\psi(x) = \begin{cases} 00, \text{ for } & x=0 \\ 01, \text{ for } & x=1 \\ 11 \text{ for } & x=2 \\ 10, \text{ for } & x=3. \end{cases}$$

Ⅲ. 우수한 자기 상관 특성을 갖는 4진 수열의 생성법

본 장에서는 Kim, Jang, No, Chung이 제안한 4진 낮은 상관 구역 수열군[8]에 Gray 사상을 적용하여 두 배의 주기와 군의 크기를 갖는 이진 낮은 상관구역 수열군의 생성법을 제안한다.

No, Chung, Yang, Song[17]은 짧은 주기의 이상적인 자기 상관 특성을 갖는 수열을 이용하여 긴 주기의 이상적인 자기 상관 특성을 갖는 확장 수열의 생성법을 다음과 같이 제시하였다.

정리 **1.**(No, Chung, Yang, Song[17]) n과 m이 $m|n$을 만족하는 양의 정수라 하자. 또한, $f(x)$는 $f(0)=0$인 차-균형성(difference-balance)을 갖는 F_{2^m}에서 F_2로의 함수이고, r은 $\gcd(r, 2^m-1)=1$인 $1 \le r \le 2^m-2$의 정수라 하자. 이 때 다음과 같이 정의되는 주기가 2^n-1인 수열은 이상적인 자기 상관 특성을 갖는다.

$$f([\mathrm{tr}_m^n(x)]^r)$$

단, $\mathrm{tr}_m^n(x)$는 F_{2^n}에서 F_{2^m}로의 trace 함수이다.

□

Kim, Jang, No, Chung은 정리 1의 통합 수열을 이용하여 다음과 같이 최적의 상관 특성을 갖는 4진 낮은 상관 구역 수열군을 생성하였다.

정리 **2.**(Kim, Jang, No, Chung[8]) $m|n$을 만족하는 양의 정수 n과 m에 대하여, $f(x)$가 정리 1에서 정의된 함수이고, r은 $\gcd(r, 2^m-1)=1$인 $1 \le r \le 2^m-2$의 정수라 하자. 이제 F_{2^n}의 원시원 β에 대하여 수열군 $S=\{s_i(t) |\ 0 \le i < 2^m-1\}$가 다음과 같이 정의되는 4진 수열들의 집합으로 정의한다.

$$s_i(t) = \begin{cases} 2f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r), & \text{for } i=0 \\ f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r) + 2f([\beta^i \mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r), & \text{otherwise.} \end{cases}$$

이 때, S는 매개변수가 $(2^n-1, 2^m-1, (2^n-1)/(2^m-1), 1)$인 낮은 상관구역 수열군이다.

□

정리 2의 4진 낮은 상관 구역 수열군에 Gray 사상을 적용하여 다음과 같이 이진 낮은 상관구역 수열군을 생성할 수 있다.

정리 3. $m|n$을 만족하는 양의 정수 n과 m에 대하여, $s_i(t)$가 정리 2에서 정의된 낮은 상관 구역 수열군이고, $s_i(t)$에 사용한 $f(x)$가 선형 함수라 하자. 또한 $x_0, x_1 \in Z_2$와 4진 심볼 $x = 2x_1 + x_0 \in Z_4$에 대해 x_0과 x_1을 추출하는 사상을 각각 $\pi(\cdot)$와 $\mu(\cdot)$를 다음과 같이 정의한다.

$$\pi(x) = x_0 = \begin{cases} 0, \text{ for } & x = 0 \text{ or } 1 \\ 1, \text{ for } & x = 2 \text{ or } 3 \end{cases}$$

$$\mu(x) = x_1 = \begin{cases} 0, \text{ for } & x = 0 \text{ or } 3 \\ 1, \text{ for } & x = 1 \text{ or } 2. \end{cases}$$

이제 다음과 같이 이진 수열군 B를 정의하자.

$$B = \{ b_i(t) \mid 0 \le i < 2(2^m - 1) \}$$

$$b_i(2t) = \begin{cases} \mu(s_i(t)), & \text{for } \ 0 \le i < 2^m - 1 \\ \mu(s_i(t)) \oplus 1, & \text{for } \ 2^m - 1 \le i < 2(2^m - 1) \end{cases}$$

$$b_i(2t+1) = \mu(s_i(t + 2^{n-1})), \text{for } \ 0 \le i < 2(2^m - 1).$$

이 때, 수열군 B는 매개 변수 (N, M, L, ϵ)가 $(2(2^n-1), 2(2^m-1), (2^n-1)/(2^m-1), 2)$인 낮은 상관 구역 수열군이다.

증명) 수열군 B의 정의로부터 수열군 B에 속하는 모든 수열의 주기가 $2(2^n-1)$인 것과 수열군 B가 $2(2^m-1)$개의 수열을 가짐은 자명하다. 그러므로 동기점에서의 자기 상관 함수를 제외한 수열군 B 내의 모든 수열간의 상관 함수가 위상 $|\tau| < (2^n-1)/(2^m-1)$내에서 2보다 작은 절대값을 가짐을 보여야 한다. 이제 다음의 3가지 경우를 생각하여 보자

경우 1) $0 \le i, j < 2^m - 1$

$b_i(t)$와 $b_j(t)$의 정의로부터 $R_{b_i, b_j}(\tau)$는 다음과 같이 주어진다.

$$R_{b_i, b_j}(\tau) = \sum_{t=0}^{2(2^n-1)-1} (-1)^{b_i(t) + b_j(t+\tau)}$$
$$= \begin{cases} \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{\pi(s_i(t)) + \pi(s_j(t+\tau/2))} \\ + \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1})) + \mu(s_j(t+2^{n-1}+\tau/2))}, \\ \text{for } \ \text{even } \tau \\ \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{\pi(s_i(t)) + \mu(s_j(t+2^{n-1}+(\tau+1)/2))} \\ + \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1})) + \pi(s_j(t+(\tau-1)/2))}, \\ \text{for } \ \text{odd } \tau. \end{cases}$$

또한, $x = x_0 + 2x_1$에 대해 $\mu(x) = x_0 \oplus x_1$, $\pi(x) = x_1$이므로 $s_i(t)$의 정의로부터 짝수 τ경우의 첫 번째 합은 다음과 같이 정리된다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{\pi(s_i(t)) + \pi(s_j(t+\tau/2))}$$
$$= \begin{cases} \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r) + f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+\tau/2})]^r)}, & i = j = 0 \\ \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r) + f([\beta^j \mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+\tau/2})]^r)}, & i = 0, j \ne 0 \\ \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{f([\beta^i \mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r) + f([\beta^j \mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+\tau/2})]^r)}, & i \ne 0, j \ne 0. \end{cases}$$

trace 함수의 특성과 정리 1에 의해 위 식은 다음과 같이 계산된다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{\pi(s_i(t)) + \pi(s_j(t+\tau/2))}$$
$$= \begin{cases} 2^n - 1, \text{ for } & \tau = 0, \ i = j = 0 \\ -1, \text{ for } & \tau \ne 0, \ i = j = 0 \\ 2^n - 1, \text{ for } & \tau = -\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1} j, \ i = 0, j \ne 0 \\ -1, \text{ for } & \tau \ne -\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1} j, \ i = 0, j \ne 0 \\ 2^n - 1, \text{ for } & \tau = \dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(i-j), \ i \ne 0, j \ne 0 \\ -1, \text{ for } & \tau \ne \dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(i-j), \ i \ne 0, j \ne 0. \end{cases}$$

또한 짝수 τ경우의 두 번째 합은 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1})) + \mu(s_j(t+2^{n-1}+\tau/2))}$$
$$= \begin{cases} \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r) + f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+\tau/2})]^r)}, \\ \quad i = j = 0 \\ \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r) + f((1+\beta^{rj})[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+\tau/2})]^r)}, \\ \quad i = 0, j \ne 0 \\ \sum_{t=0}^{2^n-2} (-1)^{f((1+\beta^{ri})[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r) + f([(1+\beta^{rj})(\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+\tau/2})]^r)}, \\ \quad i \ne 0, j \ne 0 \end{cases}$$

단, β는 F_{2^m}의 원시원이다. 유한체는 덧셈에 대해 닫혀있으므로 $1+\beta^{ir} = \beta^k$인 정수 k와 $1+\beta^{jr} = \beta^h$인 정수 h가 항상 존재하고, 이를 이용하여 위 식을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1})+\mu(s_j(t+2^{n-1}+\tau/2))}$$
$$=\begin{cases} 2^n-1, \text{ for } & \tau=0,\ i=j=0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq 0,\ i=j=0 \\ 2^n-1, \text{ for } & \tau=-\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}h,\ i=0,j\neq 0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq-\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}h,\ i=0,j\neq 0 \\ 2^n-1, \text{ for } & \tau=\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(k-h),\ i\neq 0,j\neq 0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(k-h),\ i\neq 0,j\neq 0. \end{cases}$$

홀수 τ경우의 첫 번째 합은 다음과 같이 정리된다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\pi(s_i(t))+\mu(s_j(t+2^{n-1}+(\tau+1)/2))}$$
$$=\begin{cases} \displaystyle\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r)+f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+2^{n-1}+(\tau+1)/2})]^r)}, \\ \quad i=j=0 \\ \displaystyle\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r)+f((1+\beta^{jr})[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+2^{n-1}+(\tau+1)/2})]^r)}, \\ \quad i=0,j\neq 0 \\ \displaystyle\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{f(\beta^{ir}[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^t)]^r)+f((1+\beta^{jr})[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+2^{n-1}+(\tau+1)/2})]^r)}, \\ \quad i\neq 0,j\neq 0. \end{cases}$$

이제 짝수 τ의 두 번째 합의 경우와 유사한 방법을 사용하면 위 식은 다음과 같이 계산된다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\pi(s_i(t))+\mu(s_j(t+2^{n-1}+(\tau+1)/2))}$$
$$=\begin{cases} 2^n-1, \text{ for } & \tau=0,\ i=j=0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq 0,\ i=j=0 \\ 2^n-1, \text{ for } & \tau=-\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}h,\ i=0,j\neq 0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq-\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}h,\ i=0,j\neq 0 \\ 2^n-1, \text{ for } & \tau=\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(ir-h), \\ & \quad i\neq 0,j\neq 0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(ir-h), \\ & \quad i\neq 0,j\neq 0. \end{cases}$$

홀수 τ의 두 번째 합의 경우 다음을 얻을 수 있다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1}))+\pi(s_j(t+(\tau-1)/2))}$$
$$=\begin{cases} \displaystyle\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+2^{n-1}})]^r)+f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+(\tau-1)/2})]^r)}, \\ \quad i=j=0 \\ \displaystyle\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{f([\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+2^{n-1}})]^r)+f(\beta^{jr}[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+(\tau-1)/2})]^r)}, \\ \quad i=0,j\neq 0 \\ \displaystyle\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{f((1+\beta^{ir})[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+2^{n-1}})]^r)+f(\beta^{jr}[\mathrm{tr}_m^n(\alpha^{t+(\tau-1)/2})]^r)}, \\ \quad i\neq 0,j\neq 0. \end{cases}$$

위 식 역시 짝수 τ의 두 번째 합의 경우와 유사한 방법을 사용하면 위 식은 다음과 같이 계산된다.

$$\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1}))+\pi(s_j(t+(\tau-1)/2))}$$
$$=\begin{cases} 2^n-1, \text{ for } & \tau=0,\ i=j=0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq 0,\ i=j=0 \\ 2^n-1, \text{ for } & \tau=-\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}jr,\ i=0,j\neq 0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq-\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}jr,\ i=0,j\neq 0 \\ 2^n-1, \text{ for } & \tau=\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(k-jr), \\ & \quad i\neq 0,j\neq 0 \\ -1, \quad \text{ for } & \tau\neq\dfrac{2(2^n-1)}{2^m-1}(k-jr), \\ & \quad i\neq 0,j\neq 0. \end{cases}$$

τ가 $(2^n-1)/(2^m-1)$의 배수인 경우 α^τ은 항상 F_{2^m}의 원소가 되므로 위의 4가지 경우 모두 동기점에서의 자기 상관 값 이외에는 $|\tau|<(2^n-1)/(2^m-1)$에서 절대 값이 1보다 크지 않으므로 $R_{b_i,b_j}(\tau)$의 절대 값은 2를 넘지 못한다.

경우 2) $2^m-1\le i,j<2(2^m-1)$

경우 1)과 유사한 과정으로 동기점에서의 자기 상관 값을 제외한 $R_{b_i,b_j}(\tau)$의 절대 값이 $|\tau|<(2^n-1)/(2^m-1)$의 위상에서 2를 넘지 않음을 쉽게 볼 수 있으므로 증명은 생략한다.

경우 3)

$0\le i<2^m-1$이고 $2^m-1\le j<2(2^m-1)$

$b_i(t)$와 $b_i(t)$의 정의로부터 $R_{b_i,b_j}(\tau)$는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$R_{b_i,b_j}(\tau)=\sum_{t=0}^{2(2^n-1)-1}(-1)^{b_i(t)+b_j(t+\tau)}$$
$$=\begin{cases} \displaystyle\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\pi(s_i(t)+\pi(s_j(t+\tau/2))} \\ \displaystyle-\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1})+\mu(s_j(t+2^{n-1}+\tau/2))}, \\ \text{for even } \tau \\ \displaystyle-\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\pi(s_i(t)+\mu(s_j(t+2^{n-1}+(\tau+1)/2))} \\ \displaystyle+\sum_{t=0}^{2^n-2}(-1)^{\mu(s_i(t+2^{n-1})+\pi(s_j(t+(\tau-1)/2))}, \\ \text{for odd } \tau. \end{cases}$$

위 식의 각각의 합 4가지는 모두 경우 1)에서 구하였고 그 값은 $|\tau|<(2^n-1)/(2^m-1)$의 위상에서 절대 값이 1을 넘지 못하였다. 그러므로 $j=i-M$에서

$\tau=0$을 제외한 $R_{b_i,b_j}(\tau)$의 절대 값이 $|\tau|<(2^n-1)/(2^m-1)$의 위상에서 2를 넘지 못한다. 또한, $j=i-M$에서 $\tau=0$인 경우에는 두 합의 값이 같고 부호는 반대이므로 0이되어 낮은 상관 구역 수열군의 조건을 만족한다.

경우 1)-경우 3)을 통하여 수열군 B가 매개변수 $(2(2^n-1),2(2^m-1),(2^n-1)/(2^m-1),2)$를 갖는 낮은 상관구역 수열군임을 알 수 있다.

□

정리 3의 생성법에 대해 다음과 같은 예제를 볼 수 있다.

예제 4. 주기가 15인 m-수열 $m(t)$는 다음과 같이 주어진다.

$$m(t)=0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1.$$

이를 이용하여 다음과 같이 Kim, Jang, No, Chung이 제안한 4진 낮은 상관구역 수열군[8] $\boldsymbol{Q}$를 생성할 수 있다.

$$\boldsymbol{Q}=\{q_i(t)\mid 0\le i<3\}$$

$$\begin{aligned}q_0(t)&=0,0,0,2,0,0,2,2,0,2,0,2,2,2,2\\ q_1(t)&=0,2,2,1,2,0,3,3,2,3,0,1,1,3,1\\ q_2(t)&=0,2,2,3,2,0,1,1,2,1,0,3,3,1,3.\end{aligned}$$

이 때, $\boldsymbol{Q}$의 매개 변수는 $(15,3,5,1)$이 된다. $\boldsymbol{Q}$에 정리 3의 생성법을 적용하여 다음과 같이 이진 낮은 상관구역 수열군 $\boldsymbol{B}$ 를 생성할 수 있다.

$$\boldsymbol{B}=\{b_i(t)\mid 0\le i<3\}$$

$$\begin{aligned}b_0(t)=&\ 0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,\\ &\ 0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1\\ b_1(t)=&\ 0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,\\ &\ 0,1,1,0,1,0,0,1,1,1,0,0,1,1,1\\ b_2(t)=&\ 0,1,1,0,1,0,0,1,1,1,0,0,1,1,1,\\ &\ 0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0\\ b_3(t)=&\ 1,0,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,\\ &\ 0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,1,0,1\\ b_4(t)=&\ 1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,\\ &\ 0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,1\\ b_5(t)=&\ 1,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,1,0,\\ &\ 0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0.\end{aligned}$$

이 때, $\boldsymbol{B}$의 매개 변수는 $(30,6,5,2)$가 된다. 예를 들어 $b_2(t)$와 $b_3(t)$간의 상호 상관 함수 $R_{b_2,b_3}(\tau)$는 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\begin{aligned}R_{b_2,b_3}(\tau)=&\ 0,0,0,0,0,16,0,0,0,0,16,0,0,0,0,\\ &\ 0,0,0,0,0,16,0,0,0,0,16,0,0,0,0.\end{aligned}$$

이 때 새롭게 생성된 B는 $ML=5\cdot 6=30$이고 $(N-1)/(1-2^2/N)\simeq 33.46$이므로 Tang, Fan, Matsufiji 상한[10]에 대해 최적인 이진 낮은 상관 구역 수열군이 된다.

□

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 Kim, Jang, No, Chung이 제안한 4진 낮은 상관구역 수열군에 Gray 사상을 적용하여 이진 낮은 상관 구역 수열군의 생성법을 제안하였다. 새로 제안된 생성법을 통해 최적의 상관 특성을 갖는 4진 낮은 상관구역 수열군이 존재하는 경우 높은 확률로 최적의 상관특성을 갖는 이진 낮은 상관 구역 수열군을 생성할 수 있다. 기존의 이진 낮은 상관구역 수열군의 생성법이 모두 이진 수열들을 이용하였다는 점에서 이 논문에서 새로 제안된 생성법은 이진 낮은 상관 구역 수열군의 생성에 새로운 관점을 도입하였다는데 그 의의를 찾을 수 있다.

참 고 문 헌

[1] R. De Gaudenzi, C. Elia, and R. Viola, "Bandlimited quasi-synchronous CDMA: A novel satellite access technique for mobile and personal communication systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.10, No.2, pp.328-343, Feb. 1992.

[2] B. Long, P. Zhang, and J. Hu, "A generalized QS-CDMA system and the design of new spreading codes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.47, No.6, pp.1268-1275, Nov. 1998.

[3] J.-D. Yang, X. Jin, K.-Y. Song, J.-S. No, and D.-J. Shin, "Multicode MIMO systems with quaternary LCZ and ZCZ sequences," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.57, No.4, pp.2334-2341, July 2008.

[4] J.-H. Chung and K. Yang, "New design of quaternary low-correlation zone sequence sets and quaternary Hadamard matrices," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.54, No.8, Aug. 2008.

[5] J.-W. Jang, J.-S. No, and H. Chung, "A new construction of optimal p^2-ary low correlation zone sequences using unified sequences," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol.E89-A, No.10, pp.2656-2661, Oct. 2006.

[6] J.-W. Jang, J.-S. No, H. Chung, and X. Tang, "New sets of optimal p-ary low correlation zone

sequences," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.53, No.2, pp.815-821, Feb. 2007.

〔7〕 Y.-S. Kim, J.-W. Jang, J.-S. No, and H. Chung, "New design of low correlation zone sequence sets," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.52, No.10, pp.4607-4616, Oct. 2006.

〔8〕 S.-H. Kim, J.-W. Jang, J.-S. No, and H. Chung, "New constructions of quaternary low correlation zone sequences," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.51, No.4, pp.1469-1477, Apr. 2005.

〔9〕 X. H. Tang and P. Z. Fan, "A class of pseudonoise sequences over $GF(p)$ with low correlation zone," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.47, No.4, pp.1644-1649, May 2001.

〔10〕 X. H. Tang, P. Z. Fan, and S. Matsufuji, "Lower bounds on correlation of spreading sequence set with low or zero correlation zone," *Electron. Lett.*, Vol.36, No.6, pp.551-552, Mar. 2000.

〔11〕 J. S. Cha, S. Kameda, K. Takahashi, M. Yokoyama, N. Suehiro, K. Masu, K. Tsubouchi, "Proposal and Implementation of Approximately synchronized CDMA system using novel biphase sequences," *Proc. IEICE ITC-CSCC 99, Sado Island Japan,* Vol.1, pp.56-59, July. 1999 .

〔12〕 J.S. Cha, S. Kameda, M. Yokoyama, H. Nakase, K. Masu and K. Tsubouchi, "New binary sequences with zero-correlation duration for approximately synchronised CDMA," *Electron. Lett.*, Vol.36, issue 11, pp.991-993, 2000.

〔13〕 J.S. Cha, "Class of ternary spreading sequences with zero correlation duration," *Electron. Lett.*, Vol.37, issue10, pp.636-637, 2001.

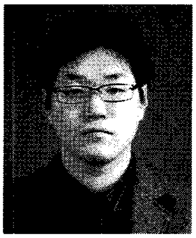
〔14〕 S.-Y. Lee, J. S. Cha, J.-W. Seo, E.-Y. Ko, and M.-C. Shin, "A class of multi-phase ZCD sequqnces for MAI-Cancelled DS-CDMA Systems," *Proc. ICIS 2002, Seoul , Korea,* Vol.1, 2002, pp.817-820.

〔15〕 C. E. Lee, "Perfect q-ary sequences from multiplicative characters over $GF(p)$," *Electron. Lett.*, Vol.28, pp.833-835, 1992.

〔16〕 V. M. Sidel'nikov, "Some k-valued pseudo-random sequences and nearly equidistant codes," *Probl. Inf. Transm.*, Vol.5, No.1, pp.12-16, 1969.

〔17〕 J.-S. No, K. Yang, H. Chung, and H.-Y. Song, "On the construction of binary sequences with ideal autocorrelation property," *in Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory and Its Appl. (ISITA'96), Victoria, British Columbia, Canada,* Sep. 1996, pp.837-840.

장 지 웅 (Ji-Woong Jang) 정회원



2000년 2월 서울대학교 전기공학부 공학사

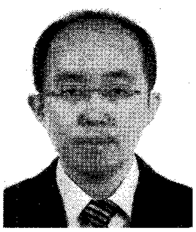
2002년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사

2006년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사

2006년 3월~2008년 6월 삼성전자 책임연구원

2008년 8월~현재 UCSD(postdoc)

김 영 식 (Young-Sik Kim) 정회원



2001년 2월 서울대학교 전기공학부 공학사

2003년 2월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사

2007년 2월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사

2007년 3월~현재 삼성전자

<관심분야> 암호학, 시퀀스, 오류정정부호, 디지털 통신

임 대 운 (Dae-Woon Lim) 정회원

1994년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사

1997년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사

2006년 8월 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사

1995년 9월~2002년 8월 LS산전(주) 중앙 연구소 선임 연구원

2006년 9월~현재 동국대학교 IT학부 조교수

<관심분야> OFDM, 부호 이론, 시공간 부호