

3G CDMA 시스템을 위한 확장 준직교 함수

Extended Quasi Orthogonal Functions for 3G CDMA Systems

이광재 · 문명룡* · Jia Hou** · 이문호**

Kwang-Jae Lee · Myung-Ryong Moon* · Jia Hou** · Moon-Ho Lee**

요약

3G CDMA 시스템의 순방향 링크는 사용자 수의 증가에 따른 제한을 받게 된다. 기존의 채널 구분을 위한 부호인 Walsh 부호는 많은 사용자에 대한 충분한 크기를 갖지 못하므로, Walsh 부호와 최적의 상관 특성을 갖는 준직교 부호(QOF: Quasi Orthogonal Function)가 고려되고 있다. 본 논문에서는 3G CDMA 시스템에서 더 낮은 상관 값과 우수한 성능을 갖는 재킷 행렬 상에서의 준직교 수열 생성에 관해 고찰하였다. 또한 QOF CDMA 시스템의 검파기의 단순화 및 BER 성능 개선을 위한 새로운 검파 구조를 제시하였다. 마지막으로, QOF 마스크 함수를 위한 bent 수열의 간단한 반복 생성에 대해 고찰하였다.

Abstract

The forward link of the 3G CDMA system may become limited under the increasing of the number of users. The conventional channelization code, Walsh code, has not enough sizes for much possible users, therefore, the quasi orthogonal function(QOF), which process optimal crosscorrelation with Walsh code, is considered. In this paper, we investigate quasi orthogonal function on Jacket matrices, which can lead lower correlations values and better performance in 3G CDMA system. Moreover, to simplify the detector and improve the BER performance, a novel detection for QOF CDMA system is proposed. Finally, the simple recursive generation of the bent sequences for QOF mask function is discussed.

Key words : CDMA, QOF, Bent Sequence, Hadamard

I. 서론

3G CDMA 시스템과 무선망은 다양한 환경과 다양한 응용을 목표로 전개되고 있으며, 높은 데이터 전송율을 요구하는 다양한 서비스를 요구할 것으로 전망된다. 최근, 1.25 MHz 스펙트럼 대역 내에서 효율적으로 고속 데이터 전송율을 지원하는 IS-2000의 발전된 형태인 HDR이 제안되었다^[1]. 또한, 동일 대역 내에서 저속 데이터 음성 서비스 뿐만 아니라 혼

합 고속 데이터를 효율적으로 지원하기 위해 IS-2000을 개량판인 1XEV-DV 및 WCDMA의 개량판인 HSDPA(High Speed Downlink Packet Access)를 포함한 여러 방식들이 표준화 되었다^[2]. 상기 표준에서 최대 고속 데이터 전송율은 Walsh 부호와 8-PSK, 16-QAM, 64-QAM 등과 같은 고차 변조기법의 결합에 의해 달성하고 있다. 그러나, 단지 Walsh 함수만으로 신호를 결합하면, 사용자 집합의 크기는 Walsh 부호의 길이 N 에 의해 제한된다. 전송 시스템의 통

「본 연구는 한국과학재단 2003 지역대학 우수과학자 R05-2003-000-10843-0 및 국제공동연구사업지원에 의해 이루어졌음.」

한려대학교 멀티미디어정보통신공학과(Department of Inform. & Telecomm. Engineering, Hanlyo University)

*전주공업대학 디지털전기정보과(Department of Digital & Electrical Information, Jeonju Technical College)

**전북대학교 정보통신연구소(Institute of Information & Communication)

· 논문 번호 : 20050331-040

· 수정완료일자 : 2005년 7월 12일

신 용량을 개선하기 위해 Walsh 부호 집합의 크기를 확장시킬 수 있는 준직교 부호가 제안되었다^{[3]~[5]}. 최근, 중앙 하중 Hadamard 행렬을 확장시켜 일반적인 재킷(Jacket) 행렬이 참고문헌 [6], [7]에 소개되었다. 주어진 정방행렬 $[A_N] = [(a_{ij})_N]$ 에 대해 이의 역 행렬이 단순히 각 원소에 대한 역으로서 주어지는 경우, 즉, $[A_N]^{-1} = \frac{1}{N}[(1/a_{ij})_N]$, $1 \leq i, j \leq N$ 과 같으면 이를 “재킷(Jacket)”이라 부르기로 한다. 잘 알려져 있는 Hadamard, DFT 등의 대표적인 행렬들 역시 재킷 행렬의 특수한 경우로 포함시킬 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 종래의 준직교 시퀀스의 특성을 고찰하며, 제 3장에서는 Hadamard가 아닌 전형적인 재킷 행렬을 기반으로 하는 준직교 시퀀스의 특성을 고찰하며, 제안하는 재킷 QOF가 CDMA 시스템의 처리율 개선을 위해 적용 가능한 적절한 방법으로 Hadamard 행렬을 기반으로 하는 일반적인 QOF 구성 방법에 비해 주기적 상관과 기수 자기 상관 측면에서 더 우수한 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 또한, 4장에서는 자기 간섭 소거 기법을 이용하는 간단한 역상관 알고리즘과 다단계 복호 기법을 제시하였다. 마지막으로 제 5장에서는 반복 함수에 근거한 bent 시퀀스의 설계 기법에 대해 고찰하였으며, 이 결과를 QOF 설계를 위한 마스크 함수의 구현 또는 확장을 위해 적용하였다.

II. 종래의 준직교 시퀀스 시스템

본 논문에서는 준직교 부호를 이용하는 간단한

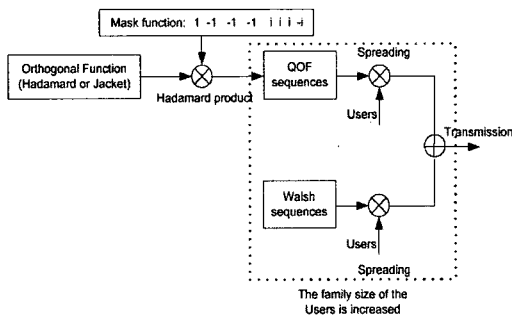


그림 1. CDMA 시스템을 위한 QOF 블럭도
Fig. 1. Block diagram of QOF for CDMA systems.

확산 시스템에 대해 고찰한다. 전송 모델은 그림 1에 나타내었으며, 여기서 준직교 부호 생성기는 두 개의 부분을 포함한다. 하나는 QOF 마스크 함수이며, 이 마스크는 4 가지의 심벌 ($\pm 1, \pm i$, 단 $i = \sqrt{-1}$)로 구성되는 길이 N 의 벡터이다. 다른 하나는 기본 부호이며, 일반적으로 길이 N 의 Walsh 부호를 흔히 이용한다. 이렇게 기본 부호와 마스크 함수의 곱에 의해 얻어진 수열을 준직교 수열이라 부르기로 하며, 이는 3G CDMA 시스템의 사용자에 대한 데이터 확산시의 시스템 용량을 증가시키기 위한 목적으로 사용된다.

준직교 수열의 설계 방법으로는 bent 함수와 관련된 마스크 함수가 이용된다^[5]. Hadamard 행렬 기반의 QOF 생성에 관한 종래의 연구에서 HQ_N 은 다음과 같이 생성된다^{[1],[5]}.

$$HQ_N = [H]_N \circ M_N \quad (1)$$

여기서 $[H]_N$ 은 $N \times N$ Hadamard 행렬, M_N 은 QOF 마스크 수열, \circ 은 Hadamard 곱을 나타낸다. QOF 마스크 함수는 다음과 같이 구성된다.

$$M_N = \{b_{N/2}, (-i) \times \text{Reverse}(b_{N/2})\} \quad (2)$$

여기서, $b_{N/2}$ 는 길이 $N/2$ 인 bent 수열, $i = \sqrt{-1}$, 그리고 $\text{Reverse}(b_{N/2})$ 은 수열 $b_{N/2}$ 의 비트 역순을 의미한다. 동일 QOF 집합에 속한 모든 부호 신호는 서로 직교하므로 각각에 대한 최대 상호상관은 Walsh 함수 집합과 마찬가지로 다음과 같이 주어진다.

$$|R_{ab}| \leq \sqrt{N} \quad (3)$$

여기서, a, b 는 다른 QOF 집합 또는 Walsh 함수에 따른 수열이다.

<예 1> 길이 8의 준직교 함수는 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$HQ_8 = [H]_8 \circ M_8$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot (1 \ -1 \ -1 \ -1 \ i \ i \ i \ -i) \\
 = & \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & i & i & i & -i \\ 1 & 1 & -1 & 1 & i & -i & i & i \\ 1 & -1 & 1 & 1 & i & i & -i & i \\ 1 & 1 & 1 & -1 & i & -i & -i & -i \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -i & -i & -i & -i \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -i & i & -i & -i \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -i & -i & i & -i \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -i & i & i & i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

식 (1)에 의해 설계된 QOF에서 천이(shift)가 존재하는 경우라면 이 수열의 최대 침투 값은 N 이 되며, 평균 상관이 상당히 크기 때문에 비동기 환경에서의 신호 전송에는 적합하지 않다. 본 논문에서는 준직교 수열을 생성하기 위해 종래의 Hadamard 행렬 기반과는 달리 재킷 행렬을 기반으로 하며, 이러한 방법으로 비동기 환경에서 훨씬 우수한 평균 상관을 얻을 수 있게 된다.

III. 재킷 행렬 기반의 QOF 수열

참고문헌 [7]에서는 재킷으로 명명한 일반화 된 행렬을 제시하고 있으며, 이는 하중 Hadamard 행렬^[8], Hadamard 및 이산 푸리에 변환으로부터 확장된 것이다.

[정의 1] : 영(零)이 아닌 원소를 갖는 크기 N 의 정방 재킷 행렬에 대해 이의 역 행렬 형태는 다음과 같이 단지 원소 단위의 역(inverse)과 전치(transpose)로 이루어진다.

$$[J]_N = \begin{bmatrix} j_{0,0} & j_{0,1} & \dots & j_{0,N-1} \\ j_{1,0} & j_{1,1} & \dots & j_{1,N-1} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ j_{N-1,0} & j_{N-1,1} & \dots & j_{N-1,N-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이의 역은 다음과 같다.

$$([J]_N^{-1})^T = \frac{1}{C} \begin{bmatrix} (j_{0,0})^{-1} & (j_{0,1})^{-1} & \dots & (j_{0,N-1})^{-1} \\ j_{1,0} & j_{1,1} & \dots & j_{1,N-1} \\ M & \dots & \dots & M \\ j_{N-1,0} & j_{N-1,1} & \dots & j_{N-1,N-1} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

여기서 C 는 정규화 상수, T 는 행렬의 전치를 나타낸다.

본 논문에서는 참고문헌 [7]에 소개된 일반적인 재킷 행렬을 고려하며, 재킷 행렬은 다음과 같은 반복 함수를 이용하여 구할 수 있다.

$$[J]_N = [J]_{N/2} \otimes [H]_2, \quad N > 4 \quad (6)$$

$$\text{여기서, } [J]_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -i & i & -1 \\ 1 & i & -i & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad [H]_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},$$

\otimes 는 Kronecker 곱을 나타낸다. 식 (6)으로부터 재킷 행렬이 직교 행렬임을 알 수 있다. 따라서 재킷 준직교 수열 JQ_N 은 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$JQ_N = [J]_N \cdot M_N \quad (7)$$

서로 다른 QOF 집합에 속한 임의의 두 신호간의 상호상관(cross-correlation)은 일정한 크기를 갖게 되며, Walsh 함수에 대한 최소 상호상관은 \sqrt{N} 이 된다.

$$\text{직교성 : } [J]_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -i & i & -1 \\ 1 & i & -i & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \text{에 근거한 재}$$

킷 행렬은 직교 행렬이다.

<증명>

$$[J]_4 ([J]_4)^* = 4 [J]_4 \text{이므로 } [J]_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -i & i & -1 \\ 1 & i & -i & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

이 직교 행렬임은 쉽게 증명된다. 단, $(\cdot)^*$ 는 공역 행렬, 그리고 $[J]_4$ 는 항등 행렬을 나타낸다. 이상의 성질에 근거하여 $[J]_N = [J]_{N/2} \otimes [H]_2$, $N > 4$ 와 같이 행렬 구성 방법을 일반화 할 수 있다. 기본 행렬인 $[J]_4$ 를 이용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[J]_4 = (([J]_4 \otimes [H]_2) \otimes [H]_2) \dots \otimes [H]_2$$

이의 직교성은 다음과 같이 증명된다.

$$\begin{aligned}
 [J]_N ([J]_N)^* &= ((([J]_4 \otimes [H]_2) \otimes [H]_2) \dots \otimes [H]_2) \\ &\quad \cdot ((([J]_4)^* \otimes [H]_2) \otimes [H]_2) \dots \otimes [H]_2) \\ &= ((([J]_4 ([J]_4)^*) \otimes ([H]_2) \dots \otimes [H]_2) \\ &\quad \cdot (([H]_2) \dots \otimes [H]_2)) \\ &= 4 [J]_4 \otimes \frac{N}{4} [J]_{N/4} = N [J]_N
 \end{aligned}$$

<예 2> 길이 4인 재킷 준직교 수열은 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$JQ_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -i & i & -1 \\ 1 & i & -i & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot (1 \ -1 \ -i \ i)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & -1 & -i & i \\ 1 & i & 1 & -i \\ 1 & -i & -1 & -i \\ 1 & 1 & i & i \end{pmatrix}$$

결과적으로, 재킷 준직교 수열과 Hadamard 행렬로부터 유추한 일반적인 준직교 수열간에는 그림 2와 같이 단지 수열 집합의 중심부에서만 차이를 갖게 된다.

제안한 재킷 준직교 수열과 기존의 일반적인 준직교 수열간의 차이를 비교하기 위해서는 적절한 평가 기준(criterion)이 필요하다.

3-1 상관 평가 기준

일반적으로 수열의 주기적 자기 상관(periodic autocorrelation)은 다음과 같이 정의할 수 있으며,

$$R_a(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i a_{(i+\tau) \bmod N}^* \quad (8)$$

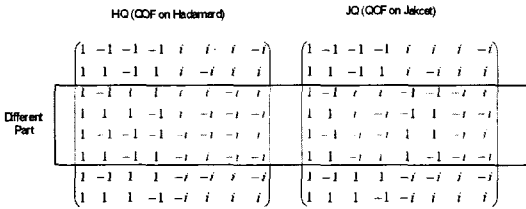


그림 2. 길이 8의 재킷 준직교 수열
Fig. 2. Jacket quasi orthogonal sequences of length-8.

표 1. 길이 8의 준직교 수열에 의한 상관 특성
Table 1. The correlations results from the quasi orthogonal sequences of length-8.

| | Auto-correlations | | Inner Cross-correlations (Cross-correlation in the same QOF set) | | Cross-correlations within Walsh Functions | |
|------------------------------------|-------------------|-----------------|---|-----------------|---|-----------------------|
| | HQ ₈ | JQ ₈ | HQ ₈ | JQ ₈ | HQ ₈ | JQ ₈ |
| Maximum side-lobe-values | 4 | 4 | 4 | 4 | $\sqrt{8}$ | $\sqrt{8}$ |
| Number of maximum side-lobe-values | 2 | 2 | 6 | 6 | The correlations have | The correlations have |
| Number of zeros | 1 | 5 | 21 | 28 | constant magnitude | constant magnitude |

주기적 상호상관은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{ab}(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i b_{(i+\tau) \bmod N}^* \quad (9)$$

여기서 a_i, b_i 는 각각 수열 a, b 의 i 번째 원소, N 은 수열 a, b 의 길이 그리고 $\tau (0 \leq \tau \leq N)$ 는 천이(shift) 계수를 나타낸다.

표 1에 수치해석 결과를 나타내었으며, 이 결과는 제안된 재킷 준직교 수열이 Hadamard 행렬로부터 유추한 일반적인 준직교 수열에 비해 더 우수한 상관 특성을 갖고 있음을 보여 주고 있다. 그림 3은 4차 재킷 준직교 수열과 일반적인 수열간의 상관 특성의 예를 나타낸다.

3-2 Merit Factor 평가 기준

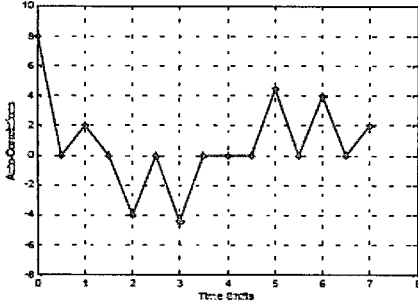
동기화(synchronization) 및 액세스에 이용되는 확산 수열의 또 다른 중요한 파라미터는 merit factor이며, 이는 자기 상관 함수의 주엽(main lobe) 에너지와 부엽(side lobe) 에너지의 비를 나타내며, 다음과 같이 표시된다^[8].

$$F_a = \frac{R_a(0)}{2 \sum_{\tau=1}^{N-1} |R_a(\tau)|^2} \quad (10)$$

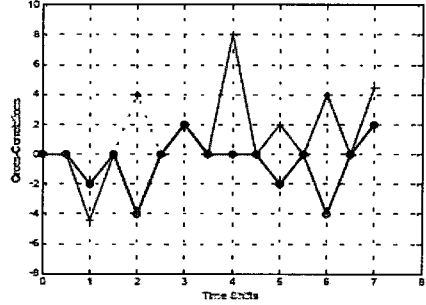
표 2에 길이 8의 준직교 수열로부터 구한 merit factor를 나타내었다. 이 수치해석 결과로부터 제안 재킷 준직교 수열의 merit factor가 기존 준직교 수열

표 2. 길이 8의 준직교 수열에 의한 merit factor
Table 2. The merit factors from the quasi orthogonal sequences of length-8.

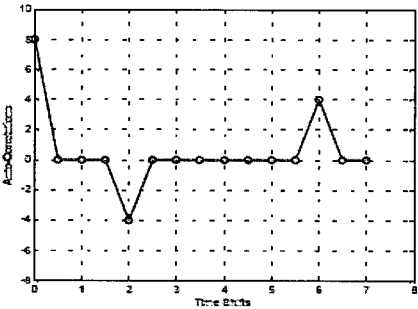
| | Merit factor F_a Conventional Quasi orthogonal on Hadamard | Merit factor F_a Proposed Quasi orthogonal on Jacket |
|---------|---|---|
| f1 | 0.05 | 0.05 |
| f2 | 0.05 | 0.05 |
| f3 | 0.05 | 0.125 |
| f4 | 0.05 | 0.125 |
| f5 | 0.05 | 0.125 |
| f6 | 0.05 | 0.125 |
| f7 | 0.05 | 0.05 |
| f8 | 0.05 | 0.05 |
| Average | 0.05 | 0.1 |



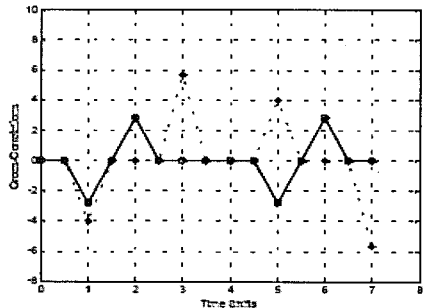
(a) Hadamard 상에서 길이 8인 QOF의 자기 상관
(a) Auto-correlations of length 8 QOF on Hadamard



(b) 재킷 상에서 길이 8인 QOF의 자기 상관
(b) Auto-correlations of length-8 QOF on Jacket



(c) Hadamard 상에서 길이 8인 QOF의 상호상관
(c) Cross-correlations of length-8 QOF on Hadamard



(d) 재킷 상에서 길이 8인 QOF의 상호상관
(d) Cross-correlations of length-8 QOF on Jacket

그림 3. QOF의 상관 특성

Fig. 3. Correlation properties of QOF.

에 비해 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 3G CDMA 시스템의 최적 수신기 설계에서 매우 유용한 것이다.

3-3 기수 자기 상관 평가 기준

비동기 시스템에서 준직교 수열을 적용 가능성을 검토하기 위해서는 기수(odd) 자기 상관 함수를 고찰한다^[9]. 기수 자기 상관 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_a(\tau) = C_a(\tau) - C_a(\tau - N) \quad (11)$$

여기서, $C_a(\tau)$ 는 비주기 자기 상관 함수이며 다음과 같이 정의된다.

$$C_a(\tau) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N-1-\tau} a_i(a_{i+\tau})^* & \text{for } 0 \leq \tau \leq N-1, \\ \sum_{i=0}^{N-1+\tau} a_{i-\tau}(a_i)^* & \text{for } 1-N \leq \tau < 0, \\ 0 & \text{for } |\tau| \geq N. \end{cases} \quad (12)$$

그림 4에 나타난 것처럼 길이 8의 재킷 준직교 수열에 대한 비주기 자기 상관은 기존의 준직교 수열에 비해 30% 정도의 개선이 가능하다. 또한, 재킷 준

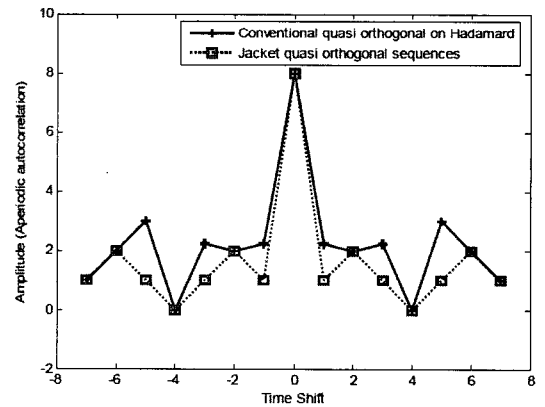


그림 4. 길이 8인 재킷 준직교 수열의 비주기 자기 상관 특성

Fig. 4. The aperiodic autocorrelation of Jacket quasi orthogonal sequence of length-8.

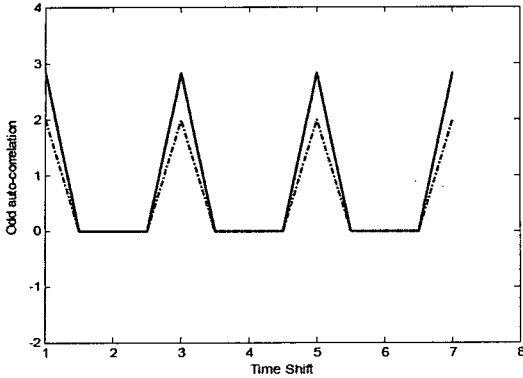


그림 5. 길이 8인 재킷 준직교 수열의 기수 비주기 자기 상관 특성

Fig. 5. The odd autocorrelation of Jacket orthogonal sequence of length-8(Dotted line: Jacket quasi orthogonal, Solid line: Quasi orthogonal on Hadamard).

직교 수열에 대한 기수 자기 상관은 그림 5에 나타난 것처럼 항상(어떤 경우든) 기존의 Hadamard 기반 준직교 수열의 $1/\sqrt{2}$ 이 된다. 따라서, 재킷 행렬 기반의 준직교 수열이 종래의 Hadamard 기반 수열에 비해 더 우수한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 6은 사용자 수가 8인 경우의 BER 성능 분석 결과이며, 재킷 QOF 수열 시스템이 종래의 Hadamard QOF 수열 시스템에 비해 더 우수한 특성을 가지고 있음을 보여주고 있다.

IV. 재킷 준직교 수열 역상관 시스템의 해석

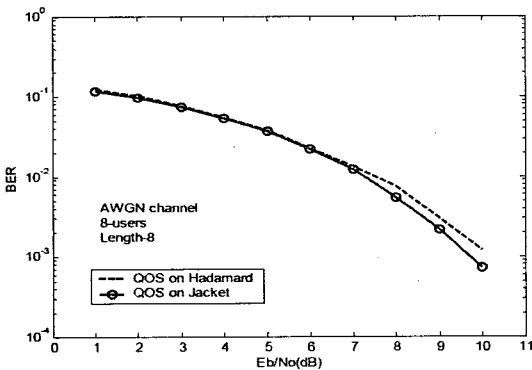


그림 6. AWGN 채널에서 재킷 QOF의 성능
Fig. 6. The performance of Jacket QOF over AWGN channel.

일반적으로, 시스템의 처리 이득은 확산 이득(k)을 부호율(code rate)로 나눈 값으로 표시할 수 있다. Walsh Hadamard 구성의 경우에 동기식 CDMA의 순방향 링크에서는 최대 k 개의 직교 부호 구성이 가능하다. 그러나, k 개 이상의 부호가 요구되는 경우, 제 2장에서 언급한 바와 같이 비직교로 구성될 수밖에 없으며, mini-max 상관의 관점에서 최적의 부호 집합은 QOF 집합이며 복합 전송 파형은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{tr}(t) = Re\{s(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (13)$$

여기서, f_c 는 반송 주파수이다. 심벌 구간 내에서의 기저 대역 전송 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{K-1} A_n^m \lfloor k/K \rfloor Q_n^m \lfloor k \bmod K \rfloor \cdot a_n^m \lfloor k/K \rfloor c[k]g(t - kT_c) \quad (14)$$

여기서, $g(t)$ 는 칩 펄스 성형 필터(단, 에너지는 칩 시간 T_c 에 의해 정규화 됨), M 은 사용된 QOF 마스크의 수, K 는 Walsh 부호 집합의 크기, $K \cdot M$ 은 순방향 링크의 전체 부호 채널 수, $c[k] \in \{\pm 1, \pm j\}$ 는 칩율에서의 복소 의사 랜덤 스크램블링 수열, $A_n^m \lfloor l \rfloor$ 은 심벌시간 l 에서 QOF 함수 Q_n^m 에 의해 부호 채널화된 전송 채널의 이득, $a_n^m \lfloor b \rfloor$ 는 시간 b 에서 QOF 함수 Q_n^m 에 의해 부호 채널화된 전송 채널에 대한 복소 QAM 또는 QPSK 데이터 심벌(단, 에너지는 1로 정규화 함), $Q_n^m \lfloor k \rfloor$ 는 Walsh 함수 w_n 에 마스크 m 를 적용하여 생성한 QOF를 나타낸다.

단일 이동 가입자의 데이터 전송율을 높이기 위해 $K \cdot M$ 순방향 링크의 부호 채널을 모두 사용하는 특별한 경우, $A_n^m \lfloor l \rfloor$ 은 모든 n, m 에 걸쳐 일정한 것으로 가정할 수 있다. 이것은 각 이동 단말에 대한 고속 데이터 전송율을 얻기 위해 전체 기지국 전력을 사용하고 다른 이동 단말에 대한 전송은 TDM 기법으로 다중화 하는 IS-2000 HDR 표준에서의 접근법과 유사하다. 따라서 다음 식에서 $A_n^m \lfloor l \rfloor = A \lfloor l \rfloor$ 은 일정한 상수로 표시할 수 있다.

재킷 준직교 함수가 사용되는 경우에는 다음의 관계를 갖게 된다.

$$\left| \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} Q_n^m[k] Q_j^i[k]^* \right| = \begin{cases} 1/\sqrt{K}, & \text{if } m \neq i \\ 0, & \text{if } m = i, n \neq j \\ 1, & \text{if } m = i, n = j \end{cases} \quad (15)$$

이상의 해석에서 도플러 천이 및 송신기와 수신기의 국부 발진기의 비정합으로 인한 주파수 오프셋(offset)에 대한 완벽한 추정 및 RAKE 핑거(finger) 시간 추적에 따른 지연 동기 루프 오류가 없는 이상적인 타이밍 복구를 가정하였다. 따라서, 페이딩 채널로부터 수신된 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r(t) = s(t) \cdot h(t) + z(t) \quad (16)$$

여기서, $h(t)$ 는 페이딩 팩터에 따른 경로 이득, $z(t)$ 는 복소 Gaussian 채널 잡음과 다른 사용자에게 의한 간섭을 나타낸다. 수신된 신호는 먼저 칩 정합 필터 $g^*(T_c - t)$ 를 거치게 된다. l 번째 핑거에서 $Q_n^m[k]$ 에 의해 역 채널화된 후의 출력은 다음과 같이 주어진다.

$$R_n^m[l] = \frac{1}{\sqrt{KT_c}} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{A[l]} \int_{(k-1)T_c + \tau_l}^{kT_c + \tau_l} r(t) Q_n^m[k]^* c^*[k] g(t - kT_c - \tau_l) dt \quad (17)$$

여기서, τ_l 은 시간 지연과 관련되며, 경로의 분해가 가능한 경우에는 $l \neq m$ 에 대해 $|\tau_l - \tau_m| > T_c$ 를 가정한다. 경로 이득은 $h(t) = \sum_{l=1}^L \beta_l \delta(t - \tau_l)$ 이며, 여기서 $\beta_l = |\beta_l| e^{i\theta_l}$ 은 l 번째 경로의 복소 시변 페이딩 채널의 이득이다. 이하에서는 $g(t)g^*(T_c - t) = f(t)$ 로 표시하며, $t=0$ 에서 $f(t)=1$, $t = \pm T_c, \pm 2T_c, \dots$ 에서 $f(t)=0$ 이다. 따라서 i 번째 사용자에게 대한 식 (17)은 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$R_n^m[l] = \beta_l \alpha_n^m[i] \frac{1}{\sqrt{KT_c}} + I_{QO}^m[l] + U_n^m[l] \quad (18)$$

식 (18)의 첫 번째 항은 요구량을 나타내며, 나머지 항들은 간섭과 잡음에 관련된 값을 나타낸다. 다중 경로에 따른 간섭은 무시하기로 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$U_n^m[l] = \frac{1}{\sqrt{KT_c}} \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \frac{1}{A[l]} \int_{(k-1)T_c + \tau_l}^{kT_c + \tau_l} z(t) Q_n^m[k]^* c^*[k] g(t - kT_c - \tau_l) dt \quad (19)$$

이는 평균 영(零)인 복소 Gaussian 랜덤 변수이다. 식 (18)의 두 번째 항은 서로 다른 QOF 집합간의 영(零)이 아닌 상호상관을 나타낸다.

$$I_{QO}^m[l] = \beta_l \sum_{m'=1, m' \neq m}^{K-1} \sum_{i=0}^{K-1} \alpha_n^m[l] v_{n,i}^{m,m'} \quad (20)$$

여기서,

$$v_{n,i}^{m,m'} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=0}^{K-1} Q_n^m[k] Q_n^{m'}[k]^* \quad (21)$$

QOF 집합 간의 상관 특성으로 인해 두 QOF 집합 간의 $v_{n,i}^{m,m'}$ 는 상수가 된다. 따라서, 다음 정리를 용이하게 유도할 수 있다.

[정리 1] 하나의 QOF 집합의 i 번째 사용자에게, 다른 QOF 집합 또는 Walsh 함수로부터의 간섭은 $1/Q_n^{m'}$ 을 곱하면 일정한 상수가 된다.

<증명> 각 QOF 집합은 직교 수열 집합이므로 QOF 집합 내의 수열로부터의 간섭은 영(零)이 된다. 따라서, 동일 QOF 집합에 속한 사용자의 간섭은 간단히 추정될 수 있다. i 번째 사용자가 m 번째 QOF 집합인 Q_n^m 과 관련되어 있는 것으로 가정하면, i 번째 사용자에게 대한 역 상관 함수는 다음과 같이 단순화 될 수 있다.

$$D_i = Q_n^m Q_n^m + \sum_{h=0, h' \neq i}^{K-1} Q_n^m Q_n^{h'} + \sum_{m'=1, m' \neq m}^{K-1} \left(\sum_{h=0}^{K-1} Q_n^{m'} Q_n^{h'} \right) \quad (22)$$

QOF 집합 내에서 직교인 경우이므로, $\sum_{h=0, h' \neq i}^{K-1} Q_n^m Q_n^{h'}$ = 0이 되는 것은 분명하다. 따라서 간섭 항은 단지 다음과 같이 주어진다.

$$I_0 = \sum_{m'=1, m' \neq m}^{K-1} \left(\sum_{h=0}^{K-1} Q_n^{m'} Q_n^{h'} \right) \quad (23)$$

동일 QOF 집합에서 factored 간섭 I_0 는 다음과 같은 상수 값으로 주어진다.

$$I_0 = \frac{1}{Q_n^m} \cdot I_0 = \frac{1}{Q_n^m} \left(\sum_{m'=1, m' \neq m}^{K-1} \left(\sum_{h=0}^{K-1} Q_n^{m'} Q_n^{h'} \right) \right) = \sum_{m'=1, m' \neq m}^{K-1} \left(\sum_{h=0}^{K-1} Q_n^{m'} \right) \quad (24)$$

QOF 집합간의 비직교성으로 인해 기지국에서 임의의 시간 구간(time slot) 내에서 고속 데이터 전송을 갖는 단일 사용자를 지원한다고 해도 간섭을 줄이기 위한 추가의 처리 과정 없이 식 (17), (18)과 같은 연관정 결과를 채널 복호기에 입력하는 경우에는 심각한 용량 손실을 초래하게 된다. 상호 상관 행렬 $[C_r]_{MK}$ 의 구조의 분석을 통해 간섭 전력을 줄이기 위한 알고리즘을 설계할 수 있다. 역상관 검파기는 $[C_r]_{MK}$ 의 역행렬에 근거한다. 예를 들어, 길이 8의 Walsh 함수와 길이 8의 재킷 QOF 집합에 대한 상호 상관 행렬을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[C_r]_{2 \times 8} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & v_{0,0} & v_{0,1} & \dots & v_{0,7} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & v_{1,0} & v_{1,1} & \dots & v_{1,7} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & v_{7,0} & v_{7,1} & \dots & v_{7,7} \\ v_{0,0} & v_{1,0} & \dots & v_{7,0} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ v_{0,1} & v_{1,1} & \dots & v_{7,1} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{0,7} & v_{1,7} & \dots & v_{7,7} & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

이는 다시 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$[C_r]_{2 \times 8} = \begin{bmatrix} I_8 & A \\ B & I_8 \end{bmatrix} \quad (26)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} v_{0,0} & v_{0,1} & \dots & v_{0,7} \\ v_{1,0} & v_{1,1} & \dots & v_{1,7} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{7,0} & v_{7,1} & \dots & v_{7,7} \end{bmatrix} \quad \text{과} \quad [B] = \begin{bmatrix} v_{0,0} & v_{1,0} & \dots & v_{7,0} \\ v_{0,1} & v_{1,1} & \dots & v_{7,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{0,7} & v_{1,7} & \dots & v_{7,7} \end{bmatrix}$$

는 서로 다른 QOF 집합에 관련된 상호상관을 나타낸다. 이러한 행렬의 역은 다음과 같이 용이하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} ([C_r]_{2 \times 8})^{-1} &= \begin{bmatrix} (I_8 - AI_8B)^{-1} & -(I_8 - AI_8B)^{-1}AI_8 \\ -(I_8 - AI_8B)^{-1}B & (I_8 - BA)^{-1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (I_8 - AB)^{-1} & -(I_8 - AB)^{-1}A \\ -(I_8 - BA)^{-1}B & (I_8 - BA)^{-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

따라서 역상관 검파는 다음과 같은 계산으로 수행된다.

$$Y = [C_r]^{-1} R \quad (28)$$

여기서, R 은 수신 심벌 벡터를 나타낸다. 경관정 검파의 경우의 역상관 검파기의 비트 오류 확률은 다음과 같이 주어진다^[9].

$$p_b(e) = Q\left(\frac{\sqrt{BA[0]}}{\sigma \sqrt{\det([C_r]^{-1})}}\right) \quad (29)$$

여기서 σ 는 평균 영(零)인 복소 Gaussian 잡음의 분

산을 나타낸다.

그러나 QOF 집합이 증가함에 따라 상호 상관 행렬의 역을 구하는 것은 상당히 복잡한 문제일 수 있다. 본 논문에서는 정리 1을 이용한 간단한 간섭 소거 알고리즘을 제안하며, 다음과 같이 구성된다.

1. 파일럿 채널 또는 보다 우수한 추정된 채널을 포함하는 경우를 고려한다. 양호한 조건에서 추정된 데이터를 $\hat{a}_n^m(b)$ 로 표시하면, 식 (18)로부터 주어지는 수식 정보는 다음과 같다.

$$R_n^m[l] = \beta_l a_n^m[b] \sqrt{KT_c} + I_{QO}^m[l] + U_n^m[l] \quad (30)$$

따라서 간섭항 $(I_{QO}^m[l])^h = I_{QO}^m[l] / (Q_l^m)^*$ 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$(\tilde{I}_{QO}^m[l])^h = (R_n^m[l] - \beta_l \hat{a}_n^m[b] \sqrt{KT_c}) / (Q_l^m)^* \quad (31)$$

2. 동일 QOF 집합에 속한 다른 사용자에 대한 간섭을 소거하기 위해 식 (31)을 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} R_n^m[l] &= \beta_l a_n^m[b] \sqrt{KT_c} + I_{QO}^m[l] + U_n^m[l] - (\tilde{I}_{QO}^m[l])^h (Q_l^m)^* \\ &\approx \beta_l a_n^m[b] \sqrt{KT_c} \end{aligned} \quad (32)$$

3. 다른 QOF 집합에 대해서도 위의 경우와 동일한 처리과정을 적용할 수 있다.

제안 알고리즘은 그림 7에 나타낸 것처럼 비교적 간단하게 구성할 수 있다. 역상관 알고리즘에 근거한 제안 재킷 준직교 수열 CDMA 시스템의 성능을 그림 8에 나타내었으며, 시뮬레이션 결과로부터 AWGN 환경 및 다중 경로 레일라이 페이딩 환경에서 보다 우수한 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

V. 반복 함수에 의한 새로운 QOF 마스크 함수의 생성

앞에서 언급한 바와 같이, 낮은 상관을 얻기 위한 기본 부호로서 Walsh 행렬 대신 재킷 행렬을 이용할 수 있다. 본 절에서는 다른 길이를 갖는 QOF 마스크 수열을 생성하기 위한 간단한 반복 함수를 고찰한다.

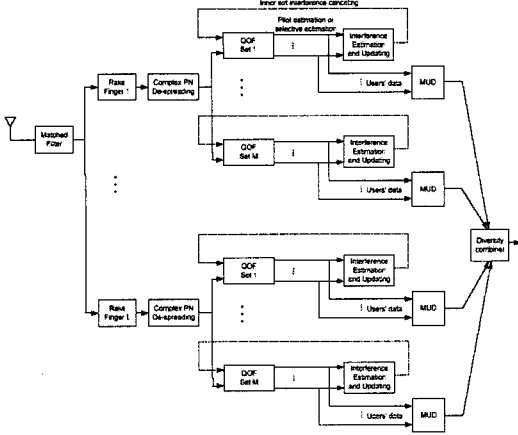


그림 7. 제안 재킷 준직교 수열 역상관기의 블록도
Fig. 7. The block diagram of the proposed Jacket quasi orthogonal sequences de-correlator.

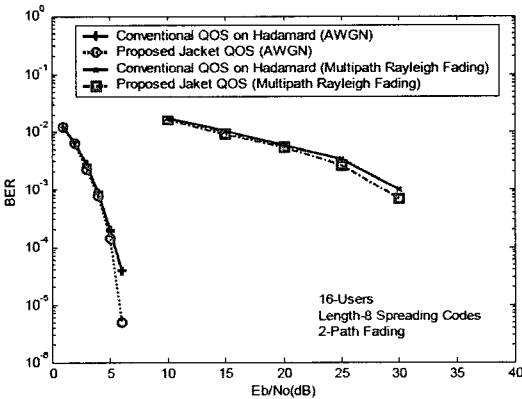


그림 8. AWGN 및 다중경로 페이딩 채널에서의 재킷 QOF 수열 CDMA 시스템의 성능
Fig. 8. The performance of the Jacket QOF sequences CDMA system over AWGN and multi-path fading channels.

【특성 1】 QOF 마스크 함수는 bent 수열이어야 한다.

〈예 3〉 QOF 마스크 함수가 $\{1 -1 -1 -1 j j j -j\}$ 로 주어진 경우, 이는 두 개의 bent 수열을 포함하며, 하나는 $\{1 -1 -1 -1\}$, 다른 하나는 $-j \times \{1 -1 -1 -1\}$ 이다.

따라서, QOF 마스크 함수를 구성하는 것은 다른 bent 수열을 찾는 것과 동일하다. Bent 수열은 일반

적으로 Hadamard 변환 등과 같은 직교 변환으로 부터 얻어진다. 벡터 a_N 에 대한 길이 N 의 Hadamard 변환을 D_N 이라 하면 다음과 같이 쓸 수 있다^[3].

$$D_N = [H]_N a_N \quad (33)$$

여기서, $N=2^t$, $t \in \{1, 2, \dots\}$, $[H]_N$ 은 $N \times N$ Hadamard 행렬이며, 다음과 같은 반복 함수에 근거한다^{[4],[5]}.

$$[H]_N = [H]_{N/2} \otimes [H]_2, \quad N > 4 \quad (34)$$

여기서, \otimes 는 Kronecker 곱을 나타내며, $[H]_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$ 이다.

【정의 2】 Hadamard 변환에서 첨두 factor 1을 갖는 경우 unimodular 수열은 Bent 수열로 기술된다. (예를 들어 HPF(Hadamard Peak Factor) 1을 갖는다.)

【정의 3】 a_N 의 HPF는 다음과 같이 정의된다.

$$HPF(a_N) = \frac{1}{N} \max \{D_N \circ D_N^*\} \quad (35)$$

식 (35)에서 \circ 는 Hadamard 곱을, D_N^* 은 D_N 의 켈레(conjugate)를 나타내며, D_N 은 다음과 같다.

$$D_N = [H_N] a_N \quad (36)$$

이는 a_N 이 unimodular이면 $1 < HPF(a_N) \leq N$ 임을 나타낸다. Unimodular는 a_N 의 각 원소의 크기가 1인 것을 의미한다^[10].

〈예 4〉 이진 수열 $a_4 = (1 \ 1 \ -1 \ 1)$ 을 고려하면, HPF는 다음과 같이 구할 수 있다.

Step 1:

$$D_4 = [H]_4 a_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} = [2 \ -2 \ 2 \ 2]$$

Step 2:

$$D_4 \circ D_4^* = [4 \ 4 \ 4 \ 4]$$

Step 3:

$$HPF(a_4) = \frac{1}{4} \max\{D_4 \cdot D_4^*\} = 1$$

따라서, 이진 수열 $a_4 = (1 \ 1 \ -1 \ 1)$ 은 bent 수열이다.

[특성 2] a_N 이 bent 수열이면, 임의의 천이(shift)를 갖는 수열 a_N 역시 bent 수열이다.

[특성 3] a_N 이 bent 수열이면, 이진 보수(binary complementary) - a_N 역시 bent 수열이다.

표 3에 길이 4의 bent 수열 리스트를 나타내었다.

Construction : bent 수열에 대한 반복 함수는 다음과 같이 간단하게 확장할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_N &= [H]_N(a_4 \otimes b_{N/4}) \\ &= ([H]_4 \otimes [H]_{N/4})(a_4 \otimes b_{N/4}) \\ &= ([H]_4 a_4) \otimes ([H]_{N/4} \cdot b_{N/4}) \end{aligned} \quad (37)$$

따라서 다음 식을 얻을 수 있으며,

$$\max(|D_N|) = \max(|[H]_{4a_4}|) \times \max(|[H]_{N/4b_{N/4}}|) \quad (38)$$

이는 a_4 의 HPF와 $b_{N/4}$ 와 관련된 HPF의 곱이다.

<예 5> $b_{N/4} = a_4$, $N=16$ 그리고 a_4 는 bent 수열이라 하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} D_{16} &= [H]_{16}(a_4 \otimes b_4) \\ &= ([H]_4 a_4) \otimes ([H]_4 b_4) = ([H]_4 a_4) \otimes D_4 \end{aligned} \quad (39)$$

따라서,

$$\begin{aligned} \max(|D_{16}|) &= \max(|[H]_4|) \times \max(|D_4|) \\ &= 2 \times 2 = 4 \end{aligned} \quad (40)$$

결국,

$$\begin{aligned} HPF(a_4 \otimes a_4) &= (4 \times 4) / 16 = 1 \\ &= HPF(D_{16}) \end{aligned} \quad (41)$$

일반적으로, $b_{N/4}$ 와 a_4 가 최저 HPF를 갖는 경우, 수열 $a_4 \otimes b_{N/4}$ 은 최저 HPF를 갖는다. 고차의 bent 수열은 두 개의 저차 bent 수열에 대한 Kronecker 연

표 3. 길이 4의 bent 수열

Table 3. Length-4 bent sequences.

| | | |
|---------|-------------|--------------|
| | a : + + + - | -a : - - - + |
| Shift 1 | + + - + | - - + - |
| Shift 2 | + - + + | - + - - |
| Shift 3 | - + + + | + - - - |

표 4. 길이 4 bent 수열로부터 구한 길이 16 bent 수열

Table 4. Length-16 bent sequences from length-4 bent sequences.

| Construction $a \otimes b$ | Length 16 bent sequence | max $ D_4 $ | max $ D_{16} $ | HPF |
|----------------------------|-------------------------|-------------|------------------|-----|
| {+++} \otimes {+++} | +++----++-- | 2 | $2 \times 2 = 4$ | 1 |
| {+++} \otimes {-+++} | ----++-- | 2 | $2 \times 2 = 4$ | 1 |
| {+++} \otimes {---+} | ----+---++-- | 2 | $2 \times 2 = 4$ | 1 |
| {+++} \otimes {+--- | ----+---++-- | 2 | $2 \times 2 = 4$ | 1 |

산과 천이 및 보수 특성을 이용하여 얻을 수 있다. 반복 기법에 의해 구한 길이 16의 몇몇 bent 수열을 표 4에 나타내었다. 결국, QOF 마스크 함수는 다음과 같은 형태로 얻을 수 있다.

$$M_N = \{b_{N/2}, (-j) \times b_{N/2}\} \quad (42)$$

여기서, b_n 은 길이 N 의 bent 수열을 나타낸다.

VI. 결 론

본 논문에서는 제킷 행렬 상에서 낮은 상관관을 갖는 QOF를 생성하는 간단한 구성 방법을 제시하였으며, 제안 수열이 기존의 확산 부호 구성에 비해 더 우수한 상관 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 또한, QOF 마스크 함수의 생성을 위해 기지의 짧은 bent 수열로부터 긴 bent 수열로의 간단한 확장 방법을 유도하였으며, IS2000 표준보다 우수한 다양한 QCF 마스크 함수 계열을 얻기 위한 단순화 된 방법을 제시하였다. QOF 수열의 특성을 조합하여, CDMA 시스템에서 최저 송신 전력 및 양호한 다원접속 오류 확률을 얻기 위한 제킷 QOF 수열의 계열을 쉽게 산출할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] P. Bender, "CDMA/HDR: A bandwidth efficient high speed wireless data service for nomadic users", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 7, pp. 70-77, Jul. 2000.

[2] 3GPP2-C50-20001204-R1, Joint 1XTREME Proposal for 1XEV-DV.

[3] A. Ghosh, "Air interface for 1XTREME/1XEV-DV", *Proc. of IEEE Veh. Tech. Conf.*, Rhodes, Greece, May 2001.

[4] A. Shanbhag, J. Holtzman, "Optimal QPSK modulated quasi orthogonal functions for IS2000", *Proc. of IEEE Int. Symp. on Spread Spectrum Tech. & Appl.*, pp. 756-760, 2000.

[5] K. Yang, Y. Kim, and P. Kumar, "Quasi orthogonal sequences for code-division multiple access systems", *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 46, no. 3, pp. 982-993, 2000.

[6] Moon Ho Lee, "A new reverse jacket transform and its fast algorithm", *IEEE Trans. on Circuit and Sys. II*, vol. 47, no. 1, pp. 39-47, Jan. 2000.

[7] Moon Ho Lee, B. Sunder Rajan, and J. Y. Park, "A generalized reverse jacket transform", *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 48, no. 7, pp. 684-690, 2001.

[8] Moon Ho Lee, "The center weighted Hadamard transform", *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 36, no. 9, pp. 1346-1348, Sep. 1989.

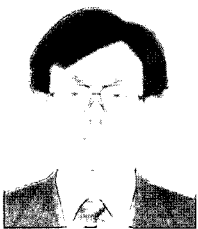
[9] I. Oppermann, B. S. Vucetic, "Complex spreading sequences with a wide range of correlation properties", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 45, no. 2, pp. 365-375, 1997.

[10] M. G. Parker, Moon Ho Lee, "Optimal bipolar sequences for the complex reverse-jacket transform", *ISITA2000, International Symposium on Information Theory and Its Application*, Honolulu, Hawaii, U.S.A., pp. 617-621, Nov. 2000.

[11] R. K. Yarlagadda, John E. Hershey, *Hadamard Matrix Analysis and Synthesis with Applications to Communications and Signal/Image Processing*, Kluwer Academic Publishers, U.S., 1997.

[12] S. S. Aгаian, *Hadamard Matrices and Their Applications, Lecture Notes in Mathematics*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1980.

이 광 재



1986년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1995년 2월: 전북대학교 전기공학과 박사과정 수료
 1995년 3월~현재: 한려대학교 멀티미디어 정보통신공학과 전임강사

[주 관심분야] 이동통신, 오류정정부호, RFID, 전력선통신

문 명 룡



1982년 2월: 조선대학교 전기공학과 (공학사)
 1984년 2월: 조선대학교 전기공학과 (공학석사)
 1998년 2월: 전북대학교 영상정보과 박사과정 수료
 1976년~1979년: 전남전신전화국

1990년~현재: 전주공업대학 디지털전기정보과 교수
 [주 관심분야] 이동통신, 암호, 전파측정, 부호이론 등

Jia Hou



2003년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학석사)

2005년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학박사)

2005년 2월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 Post Doc.

2005년 2월~현재: 중국 수조대학교수

[주 관심분야] Space Time Code, UWB, 오류정정부호 등

이 문 호



1967년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학사)

1976년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학석사)

1990년 2월: 일본 Tokyo University 정보통신공학과 (공학박사)

1981년 3월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 교수

[주 관심분야] 이동통신, 정보이론, UWB 등