

# 직교변환에 의한 Walsh 및 Golay 코드의 상호상관 제어방식과 수정된 코드를 사용한 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능에 관한 연구

## A Study on Cross-correlation Control Schemes on Walsh and Golay Codes Based on the Orthogonal Transformation and BER Performance Evaluation of Asynchronous CDMA System Using the Modified Codes

이원창, 김명진

Won Chang Lee and Myoung Jin Kim

### 요약

Walsh 코드나 Golay 코드와 같은 직교 코드는 동기가 맞지 않은 경우 상호상관 값이 커질 수 있으므로 CDMA 시스템의 역방향 링크와 같이 사용자간 동기가 맞지 않는 경우 직교성이 손상되어 사용자간 간섭이 발생하기 때문에 사용자 구별용으로 거의 사용되지 않는다. Wysocki는 기존의 Walsh-Hadamard 행렬에 직교변환 행렬을 곱함으로써 생성된 코드들이 직교성을 유지하면서 코드간 상호상관 값이 커지지 않도록 할 수 있음을 보였다. Seberry와 Wysocki는 Golay 코드에 대해서 유사한 상호상관 함수의 제어 방식을 제안하였다. 이것은 적절한 직교변환을 사용하면 Walsh 코드나 Golay 코드의 상호상관 값을 감소시킬 수 있고, 따라서 CDMA 역방향 링크에서 사용자 구별용으로 사용될 수 있음을 의미한다. 본 논문에서는 비동기 CDMA 링크의 성능에 영향을 주는 코드간의 상호상관 관련 파라미터들을 알아보고, 직교변환에 의해 이들 파라미터들이 어떻게 변화되는지 분석하였다. Walsh 코드와 Golay 코드에 대한 직교변환 행렬을 설계함에 있어 수정된 Walsh 또는 Golay 코드의 직교성을 유지하면서 결과 코드의 비주기 상호상관 피크치의 최대값( $ACC_{max}$ ) 또는 비주기 상호상관의 제곱평균( $R_{CC}$ )을 최소화하도록 하였다. 직교변환에 의해 생성된 코드집합을 사용한 CDMA 시스템에 대하여 사용자간 동기가 맞지 않은 경우에 대해 비트오율 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하여 성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

Orthogonal codes like Walsh and Golay codes may have large correlation value when they are not synchronized, hence they are seldom used in asynchronous CDMA systems. Wysocki[1] showed that by multiplying the original Walsh-Hadamard matrix with an orthogonal transformation matrix the resultant matrix sustains orthogonality between row vectors and their cross-correlation can be reduced. Seberry and Wysocki[2] proposed similar scheme on Golay codes. This implies that using the proper orthogonal transformation cross-correlation of Walsh and Golay codes can be reduced, and the transformed codes can be used for user separation in the CDMA reverse link. In this paper we discuss cross-correlation related parameters which affect the performance of an asynchronous CDMA link, and we investigate the correlation properties of the transformed codes. When we designed orthogonal transformation matrices for Walsh and Golay codes, we minimized the maximum value of aperiodic cross-correlation of the codes ( $ACC_{max}$ ) or the mean square value of the aperiodic cross-correlation ( $R_{CC}$ ) with preserving the orthogonality of the modified codes. We also evaluate the asynchronous CDMA system that uses the transformed Walsh and Golay codes.

**Keywords** : Walsh-Hadamard Code, Golay Code, Aperiodic Cross-correlation, Periodic Cross-correlation, Orthogonal Transformation, Asynchronous CDMA System

### I. 서론

동기식 DS-CDMA 시스템에서는 사용자 구별을 위해 Walsh 코드나 Golay 코드와 같은 직교코드를 사용한다. 이러한 직교코드는 서로 동기가 맞은 경우 상호상관 값이 0이 되어 사용자간 간섭이 없게 된다. 그러나 코드간 동기가 맞지 않으면 상호상관 함수가 상당히 큰 값을 가질 수 있다. 따라서 DS-CDMA의 역방향 링크와 같이 사용자간 동

\* 한국의국어대학교

접수일자 : 2008. 9. 01 수정 완료 : 2008. 10. 07

계재확정일자 : 2008. 10. 29

※본 논문은 2008년도 한국의국어대학교 교원연구비 지원으로 수행되었습니다.

기가 맞지 않는 경우 사용자간 간섭이 매우 커질 수 있기 때문에 CDMA 시스템의 역방향 링크에서 이러한 직교 코드가 사용자 구별용으로 사용되는 예는 거의 없다. Walsh 코드나 Golay 코드와 같은 직교코드를 수정하여 비동기 환경에서도 상호상관 값이 커지지 않도록 하는 연구가 진행되어 왔다. Wysocki[1, 2]는 Walsh 코드를 발생시키는 Hadamard 행렬에 직교변환 행렬을 곱함으로써 생성된 행렬이 행 벡터로 구성된 코드간 직교성을 유지하면서 코드간 비주기 상호상관(aperiodic cross-correlation)의 피크값을 감소시킬 수 있음을 보였다. Seberry와 Wysocki[3]는 Golay 코드에 대해서 유사한 직교변환을 함으로써 코드간 비주기 상호상관의 피크값을 감소시키는 방안을 제안하였다. 이것은 Walsh 코드나 Golay 코드에 적절한 직교변환을 적용하여 만들어진 수정된 코드들을 CDMA 시스템의 역방향 링크에서 사용자 구별용으로 사용할 수 있음을 의미한다.

CDMA 시스템의 비트오율 성능은 사용되는 확산코드의 상호상관 특성과 매우 깊게 관련된다. 시스템의 성능을 높이기 위한 확산코드를 설계하거나 선택하는데 있어, 상호간섭의 양을 예측하는데 비주기 상호상관의 최대값[4], 제공 평균 비주기 상호상관[4], 주기적 상호상관의 최대값[5] 등이 중요한 파라미터로 사용되고 있다. 본 논문에서는 Walsh 및 Golay 코드에 대해 [1~3]에 제안된 개념에 따라 직교변환 행렬을 구하고, 직교변환에 의해 생성된 코드를 사용하여 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능을 모의실험을 통하여 분석한다. 이를 위하여 2절에서는 Walsh와 Golay 코드의 생성 방법을 정리하고, 3절에서는[1~3] 제안된 직교변환에 의해 생성된 코드의 상호상관 특성을 분석한다. 4절에서는 제안된 직교변환을 Walsh 코드와 Golay 코드에 적용하여 생성된 코드들을 비동기 DS-CDMA 시스템에서 사용할 때의 비트오율 성능을 시뮬레이션을 통해 분석한다. 5절에서 논문의 결론을 맺는다.

## II. Walsh 및 Golay 코드의 상호상관 특성

Walsh 코드와 Golay 코드의 생성 방법을 먼저 살펴본 후 이 코드들의 상호상관 특성을 알아본다.

### 2.1 Walsh와 Golay 코드의 특성

Walsh 코드를 구성하는 Walsh-Hadamard 행렬은 크기가  $2^N \times 2^N$ 의 직교행렬로 식(1)과 같이 확장하여 발생시킬 수 있다.

$$H_1 = [1], H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \dots, H_{2N} = \begin{bmatrix} H_N & H_N \\ H_N & -H_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

Walsh-Hadamard 행렬은 또한 식(2)와 같이 표현할 수 있다[6].

$$H_{2^N} = \underbrace{H_2 \otimes H_2 \otimes \dots \otimes H_2}_{N \text{ times}} = (H_2)^{\otimes N} \quad (2)$$

여기서는 Kronecker product 연산자로서 다음과 같은 관계를 가진다.

$$A_{n \times m} \otimes B_{k \times l} = \begin{pmatrix} a_{11}B & a_{12}B & \dots & a_{1m}B \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1}B & a_{n2}B & \dots & a_{nm}B \end{pmatrix}_{(n \times k) \times (m \times l)} \quad (3)$$

Golay 코드는 상보계열 쌍(complementary sequence pair)으로부터 생성된다. 상보계열 쌍  $S_1$ 과  $S_2$ 는 위상차( $\tau$ )가 0 일 때를 제외하고 비주기 자기상관(aperiodic autocorrelation) 값의 합이 0이 된다[7]. 즉

$$C_{S_1}(\tau) + C_{S_2}(\tau) = 0, \quad \tau \neq 0 \quad (4)$$

여기서  $C_{S_i}(\tau)$ 는 식 (5)에 보인 비주기 자기상관함수이다.

$$C_{S_i}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1-\tau} s_i(k) s_i^*(k+\tau), & 0 \leq \tau \leq N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1+\tau} s_i(k) s_i^*(k+\tau), & 1-N \leq \tau \leq 0 \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (5)$$

양극성 Golay 코드는 길이가  $N = 2a_1 a_2 \dots a_r \in \mathbb{N}$ 이다[8]. 따라서 길이가 1, 2, 10, 26 등이 가능하여 Walsh 코드처럼 2의 지수일 필요가 없다. Golay 코드의 예를 들면

$$\begin{aligned} N=1: S_1 &= [+], S_2 = [+], \\ N=2: S_1 &= [++], S_2 = [+-], \\ N=10: S_1 &= [++-+-+---+], S_2 = [++-++++-] \end{aligned} \quad (6)$$

와 같다. 여기서 1은 +로 -1은 -로 표기하였다.

Golay 코드를 확장하는 한 가지 방법으로 순환행렬(circulant matrix)을 이용하는 방법이 있다. 임의의 벡터

$c = [c_0, c_1, \dots, c_{n-1}]$ 에 대하여 순환행렬  $C = \text{circ}(c)$ 는 다음과 같이 정의된다:

$$C = \begin{pmatrix} c_0 & c_1 & c_2 & \dots & c_{n-1} \\ c_{n-1} & c_0 & c_1 & \dots & c_{n-2} \\ c_{n-2} & c_{n-1} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & c_1 \\ c_1 & c_2 & \dots & c_{n-1} & c_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

행렬  $A$ 와  $B$ 가 상보계열로 이루어진 순환행렬이라면, 즉



$N \times N$  크기의 직교행렬을  $D_N$ 이라 하자. 그러면

$$W_N = H_N D_N \quad (16)$$

으로 정의되는 행렬  $W_N$ 은 변환된 Walsh 또는 Golay 코드를 발생시키는 행렬이 된다. 이 행렬  $W_N$ 은

$$\begin{aligned} W_N W_N^T &= H_N D_N (H_N D_N)^T = H_N D_N D_N^T H_N^T \\ &= H_N (kI_N) H_N^T \\ &= kI_N \end{aligned} \quad (17)$$

이 되어 변환된 코드도 역시 직교성을 유지한다는 것을 알 수 있다. 식 (17)에서 직교행렬  $D_N$ 이

$$D_N D_N^T = kI_N \quad (18)$$

을 만족한다고 가정하였다.

직교변환 행렬  $D_N$ 을 적절히 설계하면 변환된 코드행렬  $W_N$ 의 코드간 상호상관 특성을 개선시킬 수 있다는 것이 [1~3]의 주요 내용이다. 그러나 상호상관 값 측면에서 최적의  $D_N$ 을 설계하는 방법은 제시하지는 않고 있다. 간단한 방법으로  $D_N$ 을 식 (19)를 만족시키는 대각 행렬로 선택할 수 있다.

$$d_{m,n} = \begin{cases} 0 & \text{for } m \neq n \\ \exp^{j\phi_m} & \text{for } m = n \end{cases} \quad m, n = 1, \dots, N \quad (19)$$

여기서  $d_{m,n}$ 은  $D_N$ 의 원소이다. 만일  $\phi_m \in \{0, \pi\}$ 로 선정하면  $D_N$ 은 양극성의 이진 대각행렬이 된다. 그러면 변환된 코드는 양극성 이진 계열 형태가 그대로 유지된다.

변환된 Walsh 또는 Golay 코드를 확산코드로 사용하는 비동기 DS-CDMA 시스템의 비트오율 성능은 변환된 Walsh-Hadamard 행렬 또는 Golay-Hadamard 행렬의 상호상관 특성과 크게 관련된다. 변환된 코드가 바람직한 상호상관 특성을 갖도록 하려면 직교변환 행렬  $D_N$ 을 잘 선택해야 한다. 많은 경우 비동기 DS-CDMA 시스템의 비트오율 성능을 예측하는 지수로  $ACC_{max}$ 와  $R_{CC}$ 를 사용하고 있다.

본 논문에서는 주어진 Walsh 코드 또는 Golay 코드에서  $ACC_{max}$  또는  $R_{CC}$ 를 최소화하는 직교변환 행렬  $D_N$ 을 찾고자 하였다. 코드의 길이가  $N$ 인 경우  $D_N$ 을 양극성 이진 대각행렬로 제한하면 가능한  $D_N$ 은 모두  $2^N$  종류가 가능하다. 본 논문에서는  $N=16$ 과  $N=32$ 의 Walsh 코드와 Golay 코드에 대해  $ACC_{max}$ 와  $R_{CC}$ 를 최소화하는  $D_N$ 을 컴퓨터로 연산하여 찾아보았다. Golay 코드는 표 1에 보인 코드생성 방법을 동일하게 사용하였다. 표 2와 표 3에 각각  $ACC_{max}$ 와  $R_{CC}$ 를 최소화하는  $D_N$ 을 제시하고, 그 때의  $ACC_{max}$ 와  $R_{CC}$ 의 최소값을 보인다.

코드 길이가 16인 경우에는 Walsh 코드에 비해 Golay 코드의  $ACC_{max}$ 가 더 작은 값을 갖지만 코드 길이가 32인 경우에는 Walsh 코드의  $ACC_{max}$ 가 더 작은 값을 갖는다는 것을 볼 수 있다. Golay 코드의 장점은 코드 길이를 2의 지수로 할 필요가 없

으므로 시스템 설계에 있어 데이터율이나 확산이득을 선택하는데 유리하다.

표 2.  $ACC_{max}$ 를 최소화하는 직교변환 행렬  $D_N$ 과 변환된 Walsh 코드와 Golay 코드의  $ACC_{max}$  값.

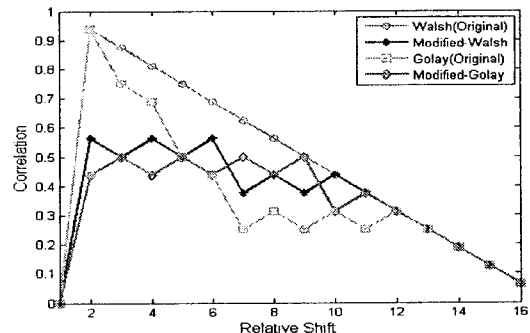
Table 2. Orthogonal transformation matrix  $D_N$  that minimizes the  $ACC_{max}$  and their values of the transformed Walsh and Golay codes.

		$D_N$	$ACC_{max}$
$N=16$	modified Walsh	[-----+----]	0.5625
	modified Golay	[-----+-----]	0.5000
$N=32$	modified Walsh	[+-----+-----+-----+-----]	0.4063
	modified Golay	[+-----+-----+-----+-----]	0.4688

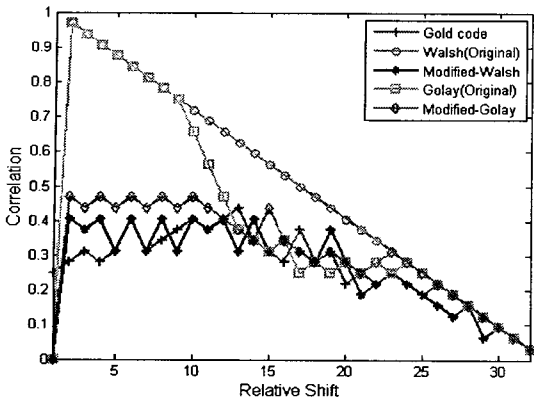
표 3.  $R_{CC}$ 를 최소화하는 직교변환 행렬  $D_N$ 과 변환된 Walsh 코드와 Golay 코드의  $R_{CC}$  값.

Table 3. Orthogonal transformation matrix  $D_N$  that minimizes the  $R_{CC}$  and their values of the transformed Walsh and Golay codes.

		$D_N$	$R_{CC}$
$N=16$	modified Walsh	[-----+]	0.7292
	modified Golay	[-----+-----]	0.7583
$N=32$	modified Walsh	[+-----+-----+-----+-----]	0.8700
	modified Golay	[+-----+-----+-----+-----]	0.9380



(a) 코드 길이가 16인 경우

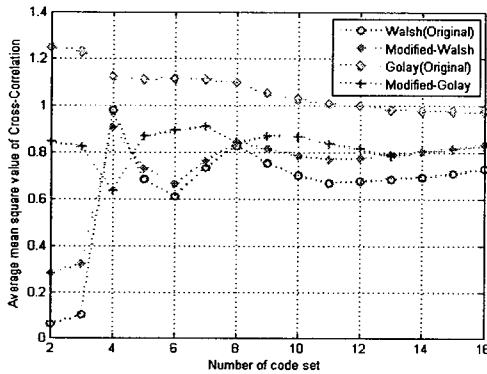


(b) 코드 길이가 32인 경우

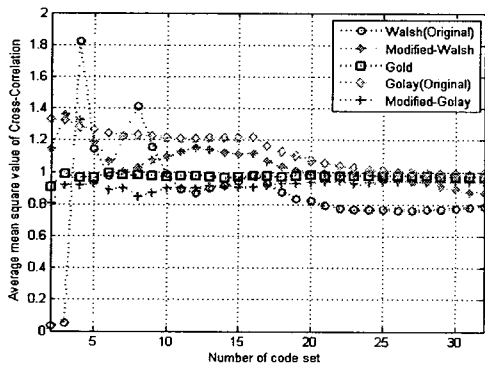
그림 1. 코드 위상차에 따른  $ACC_{max}(\tau)$ .

Fig. 1.  $ACC_{max}(\tau)$  value according to the relative shift of the codes.

(a) code length = 16 (b) code length = 32



(a) 코드 길이가 16인 경우



(b) 코드 길이가 32인 경우

그림 2. 원 코드와 변환된 코드의  $R_{CC}$  값.

Fig. 2.  $R_{CC}$  values of the original codes and the transformed codes.

(a) code length = 16 (b) code length = 32

그림 1에는 코드 길이가 16, 32인 경우에 대해 Walsh, Golay 및 변환된 Walsh, 변환된 Golay 코드의 상호상관 특성으로 위상차  $\tau$ 에 대해  $ACC_{max}(\tau)$ 의 값을 비교하여 보이고 있다. 그림을 보면 코드간의 상대적 위상차가 작을수록 원래의 Walsh 코드나 Golay 코드에 비해 변환된 코드의  $ACC_{max}(\tau)$  값이 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 CDMA 시스템의 상향 링크에서 직교변환된 Walsh 또는 Golay 코드를 사용자 구별용으로 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

그림 2에는 코드 길이가 16, 32인 경우에 대해 Walsh, Golay 및 변환된 Walsh, 변환된 Golay 코드의  $R_{CC}$  값을 보인다. 가용한 전체 코드 중에서 일부 코드를 사용하는 경우에 대해 비주기 상호상관의 제곱평균을 구한 값이다. 그림에 의하면 코드 집합의 크기가 작을 때는 변환된 Walsh 및 Golay 코드가  $R_{CC}$  값이 작지만 코드 집합의 크기가 큰 경우에는 원래의 Walsh 코드가  $R_{CC}$  값이 더 작다. 이것은 사용자수가 많으면 변환된 코드를 사용하는 시스템의 사용자간 간섭이 더 클 수 있다는 것을 의미한다.  $R_{CC}$ 가 CDMA 시스템의 성능을 예측하는 지표로 사용될 수 있으나 4절에서 언급한 바와 같이 시뮬레이션에 의한 성능 평가와 반드시 일치하지는 않는다.

#### IV. 변환된 코드를 사용한 비동기 CDMA 시스템

앞서  $ACC_{max}$ 와  $R_{CC}$ 를 기준으로 하여 선정한 직교변환을 사용하여 얻은 수정된 Walsh 및 Golay 코드를 확산코드로 사용하는 DS-CDMA 시스템에서 코드간 동기가 맞지 않는 경우에 대해 비트오율 성능을 시뮬레이션을 통하여 분석해 본다.

##### 4.1 비동기 CDMA 시스템 모델

사용자수가  $K$ 인 비동기 DS-CDMA 시스템을 가정하자.  $i$ 번째 사용자의 확산신호를  $s_i(t)$ 라 하고,  $\tau_i$ 만큼 지연되어 수신기에 도달한다고 하자. 위상천이 변조를 사용한다면  $i$ 번째 사용자의 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$v_i(t) = A \cos[\omega_c t + \phi_i(t) + \phi_0] \quad (20)$$

여기서  $\omega_c$ 는 반송파 주파수이고,  $\phi_i(t)$ 는 정보를 담고 있는 위상 함수이며,  $\phi_0$ 는 초기위상이다. 이 신호는 확산신호  $s_i(t)$ 와 곱해져서 전송된다. 무선채널에서 경로손실이 일어나지 않는다고 가정하면 수신기 안테나에 도달하는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^K v_i(t - \tau_i) s_i(t - \tau_i) \quad (21)$$

첫 번째 사용자를 원하는 사용자로 가정하면, 첫 번째 사용자의 수신기에서 역확산된 신호는 다음과 같다.

$$w_1(t) = v_1(t - \tau_1) s_1^2(t - \tau_1) + \sum_{i=2}^K v_i(t - \tau_i) s_i(t - \tau_i) s_1(t - \tau_1) \quad (22)$$

위의 식에서 첫 번째 항은 원하는 신호 성분이고 두 번째 항은 다중사용자 간섭 성분이다. BPSK 변조를 사용하는 비동기 DS-SS-CDMA 시스템의 경우 첫 번째 사용자의 상관 수신기 출력의 평균 SNR은 다음과 같이 표현된다[10].

$$SNR_1 = \left( \frac{N_0}{2E_b} + \frac{1}{6N^3} \sum_{k=2}^K \rho_{k,1} \right)^{-0.5} \quad (23)$$

여기서  $E_b$ 는 비트 에너지이고,  $N_0$ 는 단측파대 가우시안 잡음 프로세스의 전력스펙트럼밀도이며,  $\rho_{k,1}$ 은 다중사용자 간섭을 나타내는 파라미터로 다음과 같이 표현된다.

$$\rho_{k,i} = 2\mu_{k,i}(0) + Re\{\mu_{k,i}(1)\} \quad (24)$$

위의 식에서 상호상관 파라미터  $\mu_{k,i}(\tau)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{k,i}(\tau) = N^2 \sum_{n=1-N}^{N-1} c_{ki}(n)[c_{ki}(n+\tau)]^* \quad (25)$$

여기서  $c_{ki}(\tau)$ 는 식 (12)에서 정의한 비주기 상호상관 값이다.

Karkkainen은  $\rho_{k,i}$ 를 다음과 같이 근사시킬 수 있음을 보였다[11].

$$\rho_{k,i} \cong 2N^2 \sum_{\tau=1-N}^{N-1} |c_{ki}(\tau)|^2 \quad (26)$$

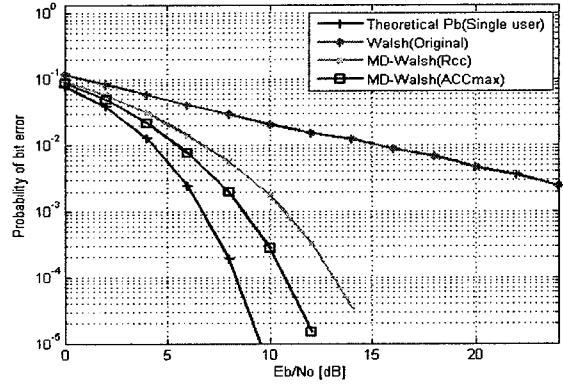
이러한 근사식을 적용하여 Oppermann과 Vucetic은 확산코드 집합의 모든  $M$  개의 코드를 사용하는 CDMA 시스템의 성능을 예측하기 위해서 코드집합에 있는 모든 코드에 대해 제곱평균 상호상관, 즉 식 (14)에 정의되어 있는  $R_{CC}$ 를 도입하였다[5]. 시스템 설계에서는  $R_{CC}$  값이 최소가 되도록 확산코드를 설계할 수 있으며, 3절에서 살펴본 변환행렬의 선택에서도  $R_{CC}$  값을 지표로 사용하였다.

그러나  $R_{CC}$ 를 사용한 성능예측은 코드집합의 크기가 크고 사용자수가 많으며, 사용자 신호간 지연차가 랜덤하게 변화하는 경우에는 유용하지만, 사용자수가 많지 않고 타사용자 간섭이 정적인(static) 환경에서는 유용하지 않다. 이러한 경우에는 최악 조건의 환경을 고려하는 것이 더 타당성이 있다. 따라서 비주기 상호상관 피크치의 최대값, 즉  $ACC_{max}$ 를 성능예측의 지표로 사용할 수 있다. 3절에서 변환행렬을 선택할 때 수정된 코드들이  $ACC_{max}$ 를 최소화하도록 하였다.

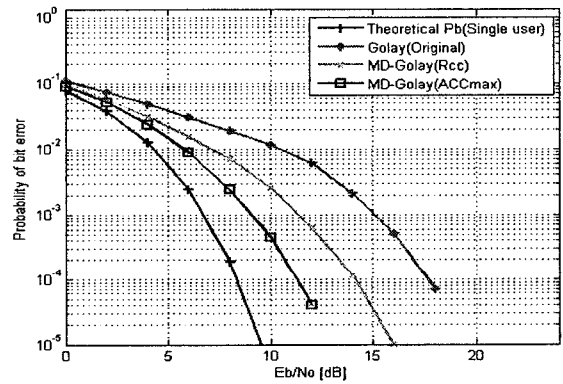
### 4.2 시뮬레이션

3절에서  $ACC_{max}$  및  $R_{CC}$ 를 기준으로 하여 얻은 변환된 Walsh 및 Golay 코드를 사용하여 비동기 CDMA 시스템의 비트오율을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 변조는 BPSK를 사용하고 통신채널은 경로감쇠가 없고, 멀티패스가 아닌 환경을 가정하였다. 사용자수, 사용자 신호별 경로지연, 코드 할당 등 시뮬레이션 환경이 너무 다양하여 몇 개의 시나리오로써 시스템의 종합적인 성능을 평가하기가 어렵다. 본 논문에서는 사용자수, 경로

지연, 코드 할당에 대해 몇 개의 예를 들어 비트오율 성능을 분석하여  $ACC_{max}$ 나  $R_{CC}$ 로써 예측한 성능과 일치하는 결과를 얻는지 검토하였다. 이



(a) 변환된 Walsh 코드

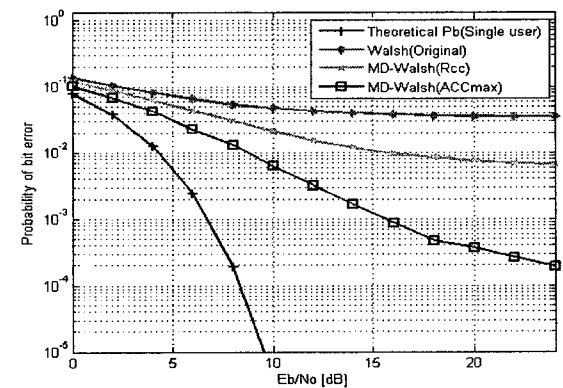


(b) 변환된 Golay 코드

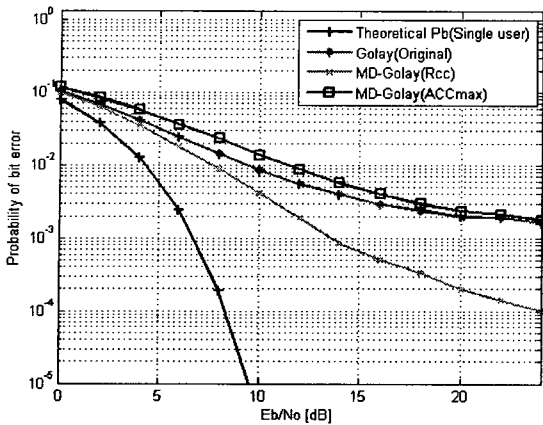
그림 3. 코드 길이가 16이고 사용자수가 4인 경우 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능.

Fig. 3. BER performance of asynchronous CDMA system when code length is 16 and the number of users is 4.

(a) Modified Walsh code (b) Modified Golay code



(a) 변환된 Walsh 코드



(b) 변환된 Golay 코드

그림 4. 코드 길이가 16이고 사용자수가 8인 경우 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능.

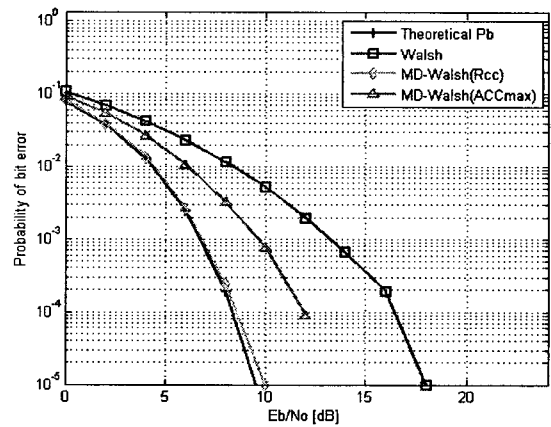
Fig. 4. BER performance of asynchronous CDMA system when code length is 16 and the number of users is 8.

(a) Modified Walsh code (b) Modified Golay code

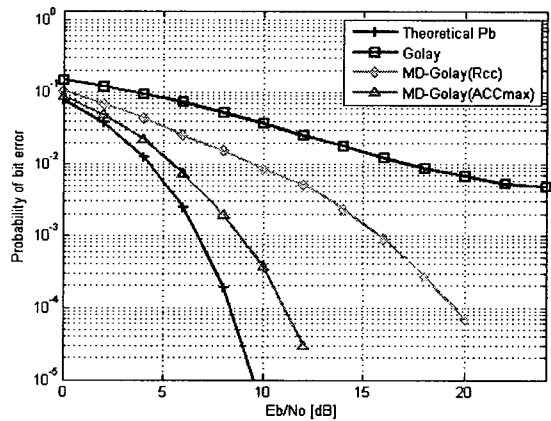
그림 3에 코드 길이가 16인 변환된 Walsh 및 Golay 코드를 사용한 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능을 보인다. 사용자수가 4인 경우를 고려하였으며, 표 2와 표 3의  $D_N$ 으로써 만든 직교변환 행렬에 의해 생성된 코드집합에서 4 개의 코드를 취하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 단일사용자 BPSK 시스템의 이론적인 비트오율과 비교되도록 하였다. 이론적인 비트오율은 다중사용자 환경에서 사용자 코드간 직교성이 성립하는 경우의 비트오율과 동일하여, 시뮬레이션의 성능 기준으로서 주어졌다. 그림 3(a)는 Walsh 코드에 대해  $ACC_{max}$  및  $R_{CC}$ 를 지표로 하여 찾은 변환행렬에 의해 생성된 코드 집합을 사용한 결과이며, 그림 3(b)는 Golay 코드에 대해 동일한 방법으로 발생시킨 코드 집합을 사용한 결과이다. 원래의 Walsh 코드나 Golay 코드에 비해 변환된 코드를 사용하는 경우 비트오율 성능이 개선된 것을 볼 수 있다. 그림 4는 그림 3과 동일한 코드 집합을 사용하면서 사용자수가 8인 경우에 대한 결과를 보이고 있다.

그림 5와 그림 6은 코드 길이가 32인 코드에 대해 사용자수가 각각 4와 8인 경우 변환된 Walsh 및 Golay 코드를 사용한 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능을 보인다. 그림에 보인 결과는 표 2와 표 3의  $D_N$ 으로써 만든 직교변환 행렬에 의해 생성된 코드집합에서 사용자수 만큼 임의로 코드를 선택하고, 사용자 신호간 지연차를 임의로 선정하여 얻은 것으로, 선택한 코드 조합이나 사용자 신호간 지연차를 다르게 선정하여 비트오율을 측정하면 다른 결과가 얻어졌다. 그러나 대부분의 경우 기존 코드에 비해 변환된 코드가 개선된 비트오율 성능을 보이는 것을 확인하였다. 기존 연구 결과에서는 변환된 코드의 상호상관 특성으로부터 CDMA 시스템의 성능을 예측하고자 하였으며, 사용자수가 큰 경우에는 제공평균 기반의  $R_{CC}$ 를 지표로 하여 얻은 코드

집합이 더 좋은 성능을 보이고, 사용자수가 작은 경우에는 최악조건 기반의  $ACC_{max}$ 를 지표로 하여 얻은 코드 집합이 더 좋은 성능을 보일 것이라고 예측하고 있다. 그러나 본 논문의 시뮬레이션 결과에 의하면 반드시 그렇지는 않으며 사용하는 코드 조합이나 사용자 신호간 지연차에 따라 더 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 원래의 코드보다는 변환된 코드를 사용함으로써 비동기 CDMA의 성능을 개선시킬 수 있다는 것은 공통된 결과라 할 수 있다.



(a) 변환된 Walsh 코드



(b) 변환된 Golay 코드

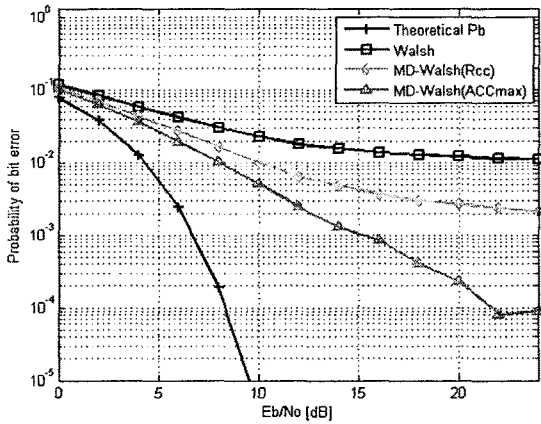
그림 5. 코드 길이가 32이고 사용자수가 4인 경우 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능.

Fig. 5. BER performance of asynchronous CDMA system when code length is 32 and the number of users is 4.

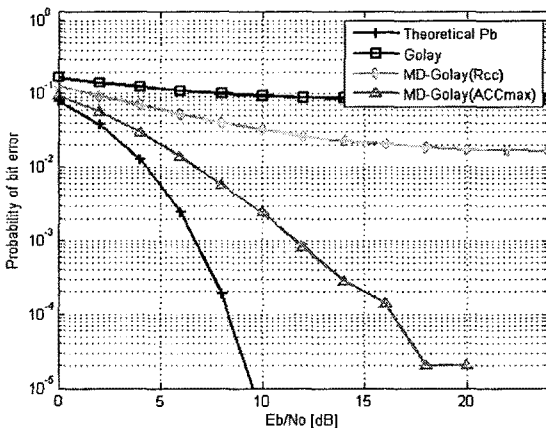
(a) Modified Walsh code (b) Modified Golay code

시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 종합해 보면 다음과 같다. 사용자간 동기화 및 지연차가 맞지 않은 비동기 CDMA 시스템에서 적절한 직교변환을 선택하여 Walsh 코드나 Golay 코드 집합을 수정하면 원래의 코드에 비해 비트오율 성능을 개선시킬 수 있다. 직교변환을 설계할 때 비주기 상호상관의 피크치의 최대값( $ACC_{max}$ )을 지표로 사용하거나 비주기 상호상관의 제곱평균( $R_{CC}$ )을 지표로

사용할 수 있지만, 어느 한 방안이 시스템의 비트오율 성능 측면에서 항상 유리한 것은 아니며 사용자수, 코드 집합에서 선택한 코드의 조합, 사용자 신호간 지연차 등에 따라 다르다. 이 결과는 멀티코드 CDMA 시스템에 적용할 수 있을 것으로 보인다. 즉 사용자 신호를 여러 코드로 확산시켜 전송하면 코드별로 수신 SNR이 다를 수 있으므로 코드 다이버시티를 이용하여 성능을 개선시킬 수 있을 것으로 보이며, 이는 향후의 연구 과제로 남긴다.



(a) 변환된 Walsh 코드



(b) 변환된 Golay 코드

그림 6. 코드 길이가 32이고 사용자수가 8인 경우 비동기 CDMA 시스템의 비트오율 성능.

Fig. 6. BER performance of asynchronous CDMA system when code length is 32 and the number of users is 8.

(a) Modified Walsh code (b) Modified Golay code

### V. 결론

Walsh 코드나 Golay 코드는 코드간 동기가 맞는 경우에는 직교하지만 동기가 맞지 않으면 상호상관 값이 커질 수 있어서 CDMA 시스템의 역방향 링크에 사용될 수 없다. 본 논문에서는

이러한 코드들을 발생시키는 행렬에 대하여 적절한 직교변환을 하면 동기가 맞는 경우 코드간 직교성을 유지하면서, 동기가 맞지 않은 경우 코드간 상호상관 값을 줄일 수 있음을 보였다. 따라서 변환된 코드를 사용한 비동기 DS-SS-CDMA 시스템에서 사용자간 간섭을 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 직교변환 행렬을 간단히 대각행렬로 설정해도 원하는 효과를 얻을 수 있음을 보였다. 구체적으로 직교변환 행렬을 설계하는 과정에서는 변환된 Walsh 또는 Golay 코드의 직교성을 유지하면서 결과 코드의 비주기 상호상관 피크치의 최대값( $ACC_{max}$ ) 또는 비주기 상호상관의 제곱평균( $R_{CC}$ )을 최소화하도록 하였다. 이를 통하여 얻은 직교변환 행렬에 의해 생성된 코드간 상호상관 특성을 분석하였으며, 이 코드집합을 사용한 CDMA 시스템에 대하여 사용자간 동기가 맞지 않은 경우에 대해 비트오율 성능을 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 변환된 코드를 사용하면 원래의 코드를 사용하는 것에 비해 비동기 상황에서 성능을 개선시킬 수 있다. 그러나 직교변환 행렬을 설계하는 데 있어  $ACC_{max}$ 나  $R_{CC}$  어느 한 가지가 항상 유리한 것은 아니며 사용자수, 코드집합 내에서 선택된 코드 조합, 사용자 신호간 지연차 등에 따라 서로 다른 비트오율 성능을 보이는 것을 확인하였다. 따라서 셀 내의 사용자 분포 등을 고려하여 직교변환 행렬을 설계할 필요가 있다. 향후 연구에서는 셀 내 사용자수에 따른 직교변환 행렬과 코드할당 방식을 연구할 필요가 있다. 또한 멀티코드 CDMA 시스템에 적용하여 코드 다이버시티를 얻는 기법도 이어지는 연구 주제라 할 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] B.J. Wysocki and T.A. Wysocki, "Optimization of Orthogonal Polyphase Spreading Sequences for Wireless Data Applications," *Vehicular Technology Conference 2001, VTC 2001 Fall*, Vol. 3, pp. 1894-1898, 2001.
- [2] B.J. Wysocki and T.A. Wysocki, "Orthogonal Binary sequence with wide range of correlation properties," *ISCTA'01, Ambleside, Lake District, U.K*, 2001.
- [3] J.R. Seberry, B.J. Wysocki, T.A. Wysocki, "On a use of Golay sequences for asynchronous DS-SS-CDMA applications." In: Wysocki TA, Darnell M, Honary B (eds) *Advanced digital signal processing for communication systems*, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, pp. 182 - 196, 2002.
- [4] I. Oppermann and B.S. Vecetic, "Complex spreading sequences with a wide range of correlation properties," *IEEE Trans, on Commun.*, vol. COM-45, pp.365-375, 1997.
- [5] M. Stuller and S. Tomazic, "Maximum Periodic Correlation of Pseudo-Random Sequences in CDMA," *Proceedings of MELE-CON*, vol. I, 2000.



- [6] E.H. Dinan and B. Jabbari, "Spreading Codes for Direct Sequence CDMA and Wideband CDMA Cellular Networks," *IEEE Communications Magazine*, Sept. pp. 48-54, 1998.
  - [7] P. Fan and M. Darnell, *Sequence Design for Communications Applications*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
  - [8] J. Seberry, B.J. Wysocki, and T.A. Wysocki. "On Some Applications of Hadamard Matrices." *Metrika*, Physica Verlag, An Imprint of Springer-Verlag GmbH, Vo. 32, pp. 221-239, Nov. 2005.
  - [9] J. Seberry, M. Yamada, Hadamard matrices, in: R. Guy (Ed.), *Combinatorial Structures and their Applications*, Gordon and Breach, New York, pp. 435-437, 1970.
  - [10] M.B. Pursley, "Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication - part I system analysis," *IEEE Trans. on Commun.*, COM-25, pp. 795-799, 1977.
  - [11] K.H. Karkkainen, "Mean-square cross-correlation as a performance measure for spreading code families," *IEEE 2nd Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA)*, pp. 147-150, 1992.
- 

**이 원 창(Won Chang Lee)**



2009년 2월 한국외국어대학교 수학과 (이학사)  
2009년 3월 ~ 현재 한국외국어대 수학과 석사과정  
※주관심분야 : 금융공학, 대역확산통신

**김 명 진(Myoung Jin Kim)**



1982년 서울대 제어계측공학과(공학사)  
1984년 서울대 제어계측공학과(공학석사)  
1992년 미네소타주립대 전기공학과 (공학박사)  
1984년 ~ 1996년 한국전자통신연구원  
이동통신기술연구단 책임연구원  
1996년 9월 ~ 현재 한국외국어대 정보통신공학과 교수  
※주관심분야 : WPAN, 이동통신, 신호처리

---