

시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 최대 다이버시티를 달성하기 위한 준순환 저밀도 패리티 검사 부호의 생성 연구

중신회원 김 성 환*

Study on the Construction Method of QC LDPC Codes in ST-BICM Systems for Full Diversity

Sunghwan Kim* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 최대 다이버시티를 가지기 위한 준순환 저밀도 패리티 검사 부호의 설계 방안을 제안한다. 제안된 부호가 최대 다이버시티를 가지기 위해서는 부호의 시스템 성분에 해당하는 부분행렬이 가역행렬이라는 필요충분조건을 제시하고 이를 증명한다. 또한 이진 가역 행렬의 새로운 생성 방법을 제안하고 이를 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템 내의 준순환 저밀도 패리티 검사 부호에 활용하기 위한 방법을 기술한다.

Key Words : 다이버시티, 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조, 역행렬, 저밀도 패리티 검사 부호, 준순환 부호

ABSTRACT

In this paper, design of quasi-cyclic(QC) low-density parity-check codes is proposed to have full diversity for space-time bit-interleaved coded modulation(ST-BICM) systems. Necessary and sufficient conditions that the proposed scheme has full diversity are proved as the condition that submatrices corresponding to the system part of codewords are invertible. And new construction method of binary invertible matrices for QC LDPC codes in ST-BICM systems are also proposed and modification for parity-check matrices are also explained.

I. 서 론

다중 입출력(MIMO: Multiple Input Multiple Output) 안테나 기법과 반복 복호(Iterative Decoding)가 가능한 부호 기법으로 구성된 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조(BICM: Bit-Interleaved Coded Modulation) 시스템은 다이버시티와 부호 이득이 존재하므로 타 시스템에 비해 우수한 성능을 가진다고

알려져 있다¹⁻³⁾. 특히 Tonello는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 중요한 두 가지 특성인 부호 이득과 다이버시티 차수가 송수신 안테나 수와 부호어의 해밍(Hamming) 거리 등의 함수로 표현됨을 유도하였다¹⁾. 특히 다이버시티 관점에서는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 임의의 두 부호화된 시퀀스 짝이 안테나별 위치상에서 해밍 거리를 계산하였을 때 거리 값이 0이 아니면 그 시공간 비

※ 이 논문은 2011년 울산대학교 연구비에 의해 연구되었음

* 울산대학교 전기공학부 (sungkim@ulsan.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-12-599, 접수일자 : 2011년 12월 2일, 최종논문접수일자 : 2012년 3월 20일

트 인터리브된 부호화 변조 시스템은 최대 다이버시티를 가짐을 증명하였다^[1]. 이를 활용하여 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 최대 다이버시티를 지원하는 부호화 설계 방법의 연구가 수행되었다^[2,3].

반복 복호가 가능한 부호 중 선형 부호의 일종인 저밀도 패리티 검사(LDPC: Low-Density Parity-Check) 부호는 대부분 원소가 0이고 소수의 0이 아닌 원소를 가지는 패리티 검사 행렬로 정의된다. 저밀도 패리티 검사 부호는 채널 용량 한계에 근접하는 우수한 성능을 보여주면서 이를 활용한 다양한 연구가 진행 중이다. 특히 저밀도 패리티 검사 부호 중 준순환(Quasi-Cyclic) 저밀도 패리티 검사 부호는 일반적인 저밀도 패리티 검사 부호에 비해 부호 설계 방식이 용이하고 복잡도가 낮아 하드웨어 구현 및 시스템 활용에 널리 사용된다^[4]. 또한 준순환 저밀도 패리티 검사 부호가 정의되는 패리티 검사 행렬은 순환 치환 행렬(Circulant Permutation Matrix)의 배열로 구성되어 부호 특성을 파악하는데 용이하다. 이 준순환 부호를 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에 활용한 방법한 성능 향상 방법이 최근 연구되었다^[2,3].

본 논문에서는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 최대 다이버시티 차수를 가지기 위한 준순환 저밀도 패리티 검사 부호의 생성 방법을 논의한다. 이를 위한 필요충분조건이 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬이 역행렬이 존재한다는 것을 증명한다. 또한 이진 원소로 구성되면서 역행렬이 존재하는 행렬의 새로운 생성 방법을 제안한다. 우수한 저밀도 패리티 검사 부호를 만들기 위한 가역 행렬의 변형 방법을 설명하고 제안한 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템의 비트오류율 성능을 모의 실험으로 확인한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템의 송수신 블록선도(Block Diagram)는 그림 1에 도시한다. 송신기에서는 보내려는 정보가 저밀도 패리티 검사 부호의 부호기(Encoder)를 거치면서 부호어(Codeword) c 가 생성된다. 이 부호어는 비트 인터리버(Bit Interleaver)를 통해 순서가 섞이고 직병렬 변환기(S/P: Serial to Parallel Converter)를 거쳐 송신안테나 수만큼 신호가 병렬 처리되고 변조기와 송신 안테나를 거쳐 신호가 전송된다. 수신기는 각각의 수신 안테나로부터 유입된 신호를 이용하여 복

조기(Demodulator)와 복호기(Decoder)가 각각 신호의 갱신되는 확률 정보를 서로 전달하여 반복 복호를 수행하면서 보낸 정보를 검출한다.

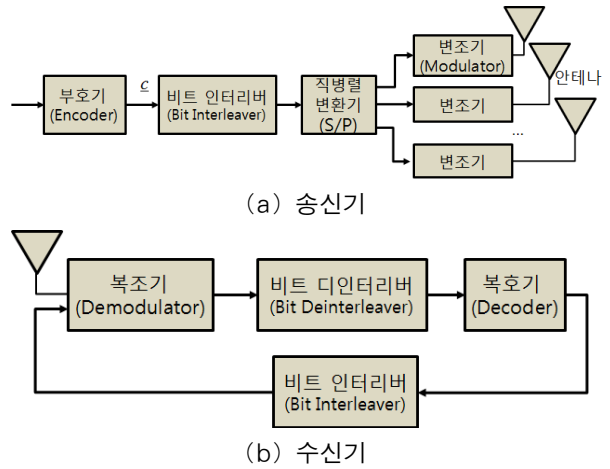


그림 1. 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 방식의 송수신기 블록선도
Fig. 1. Block diagram of a transmitter and a receiver in space-time bit-interleaved coded modulation system.

본 논문에서 사용하는 표기를 다음과 같이 정의한다. 한 패킷(Packet) 당 정보의 비트 수는 k 로 정의하고 부호어의 길이는 n 으로 정의한다. 송신 안테나 수는 n_t 로 정의한다. 부호율(Coding Rate) r 은 k/n 으로 정의되는데 본 논문에서 고려하는 준순환 저밀도 패리티 검사 부호의 경우는 부호어 길이가 $n = kn_t$ 로 정의되므로 부호율 r 은 $1/n_t$ 이다. 본 논문에서 고려하는 준순환 저밀도 패리티 검사 부호의 패리티 검사 행렬은 논문^[2]에서 고려한 행렬과 유사하며 다음과 같은 행렬로 표현된다.

$$H = \begin{bmatrix} A_1 & D & Z & Z \cdots Z \\ A_2 & Z & D & Z \cdots Z \\ A_3 & Z & Z & D \cdots Z \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ A_{n_t-1} & Z & Z & Z \cdots D \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 A_i 는 $k \times k$ 정사각행렬이고 부호어의 시스템 성분(Systematic Part)에 해당한다. D 는 $k \times k$ 이중 대각행렬이고 다음과 같이 정의된다.

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \cdots 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \cdots 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \cdots 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \cdots 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \cdots 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \cdots 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Z 행렬은 모든 원소가 0인 $k \times k$ 영행렬로 정의한다. 식 (1)로 정의되는 저밀도 패리티 검사 부호의 부호어 c 를 부분 행렬의 위치에 따라 $c = [d p_1 p_2 \cdots p_{n_i-1}]$ 로 정의한다. 이때 d 및 p_i 는 길이가 k 인 벡터이며 각각 부호어의 시스템 성분 및 패리티 성분에 해당한다. 이 부호어는 식(1)에서 정의한 패리티 검사 조건을 만족해야 하므로 다음과 같은 수식이 성립한다.

$$Hc^T = 0 \quad (2)$$

III. 최대 다이버시티를 가지기 위한 패리티 검사 행렬의 조건

본 장에서는 비트 인터리브된 부호화 변조 방식에서 최대 다이버시티를 가지기 위한 패리티 검사 행렬의 조건에 대해 기술한다. 이 조건은 논문 [1]에서 기술된 두 가지 핵심 연구 내용 중 하나인 안테나별 부분 부호어의 해밍 거리가 0이 아닐 때 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템이 최대 다이버시티를 가진다는 사실에 기반을 둔다. 다음 정리1에서 저밀도 패리티 행렬과 다이버시티와의 관계를 정리한다.

정리1: 식 (1)로 정의된 저밀도 패리티 검사 부호가 사용된 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템이 최대 다이버시티를 가지기 위한 필요충분조건은 부호어의 시스템 성분에 해당하는 행렬 A_i 의 역행렬이 존재하는 것이다.

증명: 증명은 먼저 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬 A_i 가 가역행렬이면 고려한 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템이 최대 다이버시티를 가진다는 것을 증명하고 다음으로 고려하는 시스템이 최대 다이버시티를 가지면 A_i 행렬의 역행렬이 존재함을 증명한다.

우선 A_i 행렬의 역행렬이 존재한다고 가정하고 임의의 두 개 부호어 c, c' 을 고려한다. 두 부호어는 패리티 검사 조건인 식 (2)를 만족하므로 l 번째 안테나에 대해 다음 수식이 유도된다.

$$A_i c_0^T + D c_l^T = 0_k \quad (3)$$

$$A_i c'_0{}^T + D c'_l{}^T = 0_k \quad (4)$$

만약 고려하는 시스템이 최대 다이버시티를 가지지 않는다고 가정하면 해밍 거리가 같은 부호어가 생성되어야 한다. 식 (3), (4)에서 좌변 두 번째 항은 서로 같게 되므로 다음과 같은 식이 성립한다.

$$A_i c_0^T = A_i c'_0{}^T \quad (5)$$

행렬 A_i 의 역행렬이 존재하므로 식 (5)에서 양변의 왼쪽 부분에 A_i 의 역행렬을 곱해주면 두 부호어의 시스템 성분 c_0 와 c'_0 이 같다는 결과를 얻게 된다. 이는 두 개 부호어라는 조건을 위배하므로 최대 다이버시티를 가지지 않는다는 조건은 모순이 된다. 따라서 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬 A_i 의 역행렬이 존재할 경우 고려한 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템은 최대 다이버시티를 가짐을 증명하였다.

다음으로 식 (1)로 정의된 저밀도 패리티 검사 부호를 사용하는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템이 최대 다이버시티를 가지면 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬 A_i 의 역행렬이 존재함을 증명한다. 일단 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬의 역행렬이 존재하지 않는다고 가정한다. l 번째 안테나 기준으로 A_i 이 역행렬이 존재하지 않으므로 식 (5)가 성립하는 두 부분 부호어 c_0 와 c'_0 가 존재한다. 이 두 개의 부분 부호어를 가지는 두 부호어 c, c' 에 대해 식(3)과 (4)를 고려한다. 식(5)가 성립하므로 $D c_l^T = D c'_l{}^T$ 가 유도된다. 여기서 행렬 D 는 역행렬이 존재하므로 두 패리티 성분에 해당하는 부분 부호어 c_l 와 c'_l 는 같다. 이 결과는 c 와 c' 의 해밍거리가 0이 되어 고려한 시스템이 최대 다이버시티를 가진다는 조건에 위배된다. 이는 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬 A_i 의 역행렬이 존재하지 않는다는 가정이 모순됨을 의미한다. 따라서 본 논문에서 고려한 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템이 최대 다이버시티를 가지면 패리티 검사 행렬에서 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬 A_i 의 역행렬이 존재함을 증명하였다.

위의 두 증명으로부터 고려되는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 패리티 검사 부호의 부호어 중 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬의 역행렬이 존재하면 그 시스템이 최대 다이버시티를 가진다는 필요충분조건을 증명하였다.

IV. 이진 가역 행렬의 새로운 생성 방법

이 장에서는 이진 가역 행렬의 새로운 생성 방법에 대해 논의한다. 우선 $I_m(q)$ 는 $0 \leq r < m$ 인 r 번째 행에서 $(r+q) \bmod m$ 에 해당하는 열에는 1이 위치하고 그 외에 $m-1$ 개 열에는 0이 위치하는 $m \times m$ 순환 치환 행렬을 가정한다. q 가 0인 경우 $I_m(0)$ 는 $m \times m$ 항등행렬이다. 예를 들어 m 이 5이고 q 가 1인 경우 $I_5(1)$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$I_5(1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위의 순환 치환 행렬을 활용하여 $B_m(q_0, q_1, \dots, q_{s-1})$ 을 s 개 $I_m(q_0), I_m(q_1), \dots, I_m(q_{s-1})$ 행렬에서 0이 아닌 원소가 중첩되어 구성된 행렬로 정의한다. 여기서 $0 \leq i \leq s-1, 0 \leq j \leq s-1$ 인 두 i, j 에 대해서 $i \neq j$ 인 경우 $q_i \neq q_j$ 로 가정한다. 예를 들어 $B_5(1,2)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$B_5(1,2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

m 과 순환 값 q_0, \dots, q_{s-1} 에 따른 $B_m(q_0, q_1, \dots, q_{s-1})$ 이 가역 행렬이 되는 새로운 생성 방법을 정리 2에 기술한다.

정리 2: 양의 정수 t 를 고려 시 $m = 3t+1$ 혹은 $m = 3t+2$ 인 m 에 대해 $B_m(0,1,2)$ 는 이진 가역 행렬이다.

증명: 수학적 귀납법을 이용하여 증명을 수행한다. 우선 t 가 1인 경우 $B_{3t+1}(0,1,2)$ 와 $B_{3t+2}(0,1,2)$ 가 가역 행렬임을 증명한다. 증명의 이해를 돕기 위해 그림 2에 $B_4(0,1,2)$ 가 가역 행렬이라는 증명 과정을 도시화한다.

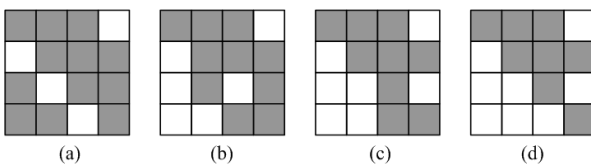


그림 2. $B_4(0,1,2)$ 의 가역성.
Fig. 2. Invertible property of $B_4(0,1,2)$.

그림 2.(a)에서 검은색과 흰색 사각형은 $B_4(0,1,2)$ 에서 1과 0을 각각 의미한다. 이 $B_4(0,1,2)$ 에서 0번째 행을 2번째와 3번째 행에 이진 더하기 연산을 수행하면 그림 2.(b)로 표현된다. 다음 1번째 행을 2번째 행에 이진 더하기 연산을 수행하면 그림 2.(c)로 표현된다. 마지막으로 2번째 행을 3번째 행에 이진 더하기 연산을 수행하면 그림 2.(d)의 행렬을 얻는다. 그림 2.(d) 행렬은 상삼각행렬(Upper Triangular Matrix)이고 대각 성분이 0이 아니므로 $B_4(0,1,2)$ 는 가역 행렬이다.

다음으로 $B_5(0,1,2)$ 의 가역성을 논의한다. 증명의 이해를 돕기 위해 증명 과정을 그림 3에 도시화 한다.

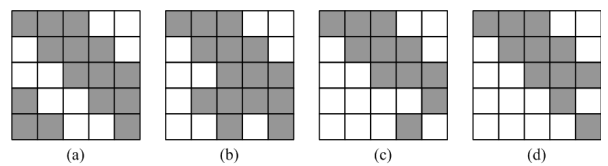


그림 3. $B_5(0,1,2)$ 의 가역성.
Fig. 3. Invertible property of $B_5(0,1,2)$.

그림 3.(a)에서도 검은색, 흰색 사각형은 $B_5(0,1,2)$ 의 1과 0을 각각 의미한다. 이 $B_5(0,1,2)$ 에서 0번째 행을 3번째, 4번째 행에 이진 더하기 연산을 수행하면 그림 3.(b)로 표현된다. 다음 1번째 행을 3번째 행에 그리고 2번째 행을 4번째 행에 이진 더하기 연산을 수행하면 그림 3.(c)로 표현된다. 마지막으로 3번째 행과 4번째 행을 바꾸면 그림 3.(d)의 행렬을 얻는다. 이 행렬도 상삼각행렬이고 대각 성분이 모두 0이 아니므로 $B_5(0,1,2)$ 또한 가역 행렬이다. 따라서 t 가 1인 경우의 m 에 대해서 $B_m(0,1,2)$ 는 가역 행렬임을 증명하였다.

다음으로 t 일 때 $B_m(0,1,2)$ 이 가역 행렬이라고 가정할 때 $t+1$ 인 경우에서도 $B_{m+3}(0,1,2)$ 이 가역 행렬임을 유도하고자 한다. 일단 $B_m(0,1,2)$ 이 가역 행렬이라면 $B_m(0,1,2)$ 의 랭크(Rank)는 m 이다. 증명을 위해 $B_m(0,1,2)$ 과 $B_{m+3}(0,1,2)$ 의 관계를 정리한 내용을 그림 4에 도시화한다.

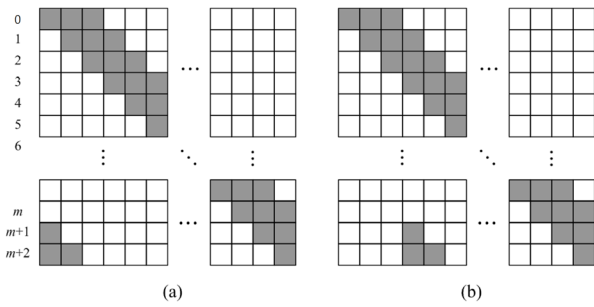


그림 4. $B_{m+3}(0,1,2)$ 과 $B_m(0,1,2)$ 의 관계.
Fig. 4. Relationship between $B_{m+3}(0,1,2)$ and $B_m(0,1,2)$.

일반적인 $B_{m+3}(0,1,2)$ 의 행렬은 그림 4.(a)에 도시된다. 다음으로 0번째 행을 $m+1$ 번째 행과 $m+2$ 번째 행에 이진 더하기 연산을 하고 1번째 행을 $m+1$ 번째 행에 이진 더하기 연산을 하면 그림 4.(b)로 표현된다. 이 행렬에서 3번째 행과 열부터 $m+2$ 번째 행과 열에 해당하는 부분 행렬이 $B_m(0,1,2)$ 과 동일하다. $B_m(0,1,2)$ 의 랭크가 m 이고 $B_m(0,1,2)$ 을 제외한 부분도 독립된 행이므로 $B_{m+3}(0,1,2)$ 의 랭크는 $m+3$ 이 된다. 이는 $B_{m+3}(0,1,2)$ 의 랭크가 최대값을 가지므로 가역 행렬이 된다. 따라서 t 일 때 $B_m(0,1,2)$ 이 가역 행렬이면 $t+1$ 일 때 $B_{m+3}(0,1,2)$ 이 가역 행렬임을 증명하였다.

t 가 1일 때 성립함을 보였고 t' 일 때 성립하면 $t'+1$ 일 때도 성립함을 보였으므로 수학적 귀납법에 의해 모든 양의 정수 t 에 대해 $m=3t+1$ 혹은 $m=3t+2$ 인 $B_m(0,1,2)$ 은 가역 행렬임을 증명하였다.

이 $B_m(0,1,2)$ 행렬에서 행과 열의 차수(Degree)는 3이 되고 이 행렬을 그래프로 표현할 때 거스(Girth)는 4가 되는데 이 $B_m(0,1,2)$ 행렬을 바로 저밀도 패리티 검사 부호의 패리티 검사 행렬의 A_i 로 사용하게 되면 성능이 저하되는 단점이 존재한다⁴⁾. 따라서 본 논문에서는 $B_m(0,1,2)$ 의 변형된 형태 F_m 행렬을 고려한다. F_m 행렬은 $B_m(0,1,2)$ 의 0번째 행에 1번째 행의 원소를 이진 더하기 연산하여 0번째 행을 새로 만든다. 다음 1번째 행부터 $m-2$ 번째 행까지 0번째 행을 만든 것처럼 다음 행을 이용하여 이진 더하기 연산을 수행하여 새로 만들고 $m-1$ 번째 행은 변경 없이 그대로 둔다. 이 F_m 행렬의 형태는 그림 5에 도시화한다.

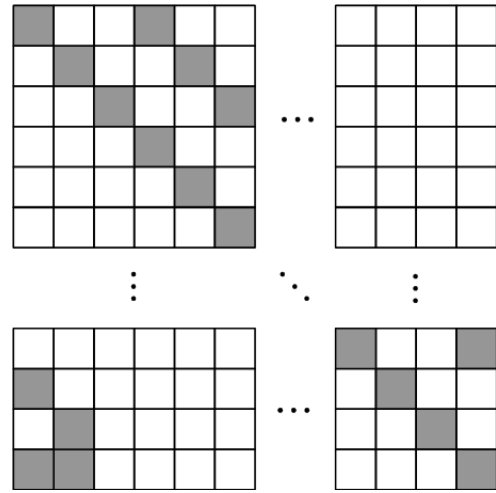


그림 5. F_m 행렬의 생성 방법.
Fig. 5. Construction method of F_m .

그림 5의 행렬은 $m-1$ 개 행의 차수가 2, 1개의 행의 차수가 3이며, 2개 열의 차수가 3, 1개 열의 차수가 1, $m-3$ 개 열의 차수가 2로 구성된다. 이 F_m 행렬의 거스는 6이 되어 $B_m(0,1,2)$ 을 사용할 경우보다 거스 및 차수 분포 특성이 좋아진다.

V. 모의 성능 실험

본 논문에서 고려한 모의실험 환경은 다음과 같다. 송신 안테나 수는 3개를 고려하였고 이 경우 부호율은 1/3에 해당한다. 고려한 저밀도 패리티 검사 행렬은 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} F_7(0) & D & Z \\ F_7(2) & Z & D \end{bmatrix}$$

여기서 $F_7(0)$ 과 $F_7(2)$ 는 각각 F_7 과 F_7 을 2만큼 순환 치환한 행렬을 의미한다. m 을 7로 사용한 이유는 논문 [3]에서 고려한 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템을 비교 기법(Reference)로 하여 제안한 기법과 성능 비교하기 위함이다. 비교 기법은 논문 [3]의 $H_b(\{1,2,3\})$ 를 저밀도 패리티 검사 행렬로 사용한 시스템을 고려하였다. 제안된 방법(Proposed)과 비교 기법의 신호 대 잡음비(E_b/N_0)에 따른 비트 오류율(BER: Bit error rate)은 그림 6에 도시화 한다. 모의 실험 결과로부터 일반적인 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 방법과 비교 시 제안된 기법의 다이버시티 차수가 크게 되어 비트 오류율 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

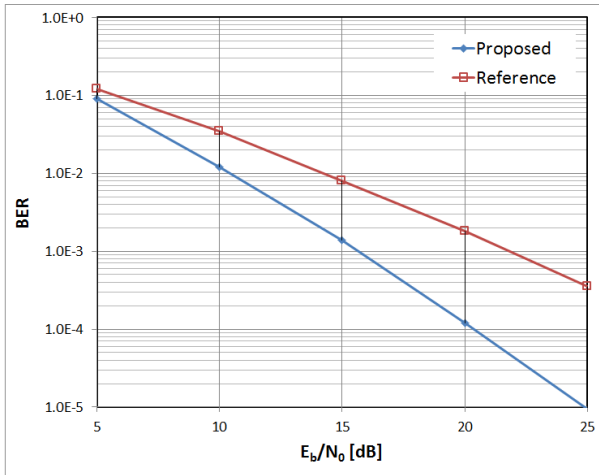


그림 6. 제안하는 기법(Proposed)과 비교 기법(Reference)의 비트 오류율(BER) 성능 결과.

Fig. 6. BER performances of the proposed and the reference scheme.

VI. 결 론

본 논문에서는 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 최대 다이버시티 가지기 위한 준순환 저밀도 패리티 검사 부호의 생성 방법을 논의하였다. 고려한 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조 시스템에서 다이버시티 차수를 최대로 가지기 위한 조건은 부호어의 시스템 성분에 해당하는 부분 행렬의 역행렬이 존재하는 것과 필요충분조건 관계임을 증명하였다. 또한 역행렬이 존재하는 이진 행렬의 생성 방법을 제안하였고 저밀도 패리티 검사 부호의 차수 분포 및 거스를 향상하기 위한 행렬 변형 방법을 제시하였다. 모의실험 결과에서는 제안한 기법의 다이버시티가 비교 방법보다 커서 비트 오류율 측면에서 성능 향상이 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] A. M. Tonello, "Space-time bit-interleaved coded modulation with an iterative decoding strategy," in *Proc. IEEE VTC'00*, pp. 473-478, Sept. 2000.
- [2] 김성환, "최대 다이버시티를 위한 시공간 비트 인터리브된 부호화 변조용 저밀도 패리티 검사 부호의 설계", *신호처리합동학술대회논문지*, 제 24권, 1호, Sept. 2011.
- [3] S. -N. Hong, S. Kim, D.-J. Shin, and I. Lee, "Quasi-cyclic low-density parity-check codes for space-time bit-interleaved coded

modulation," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 10, pp. 767-769, Oct. 2008.

- [4] S. Kim, J.-S. No, H. Chung, and D.-J. Shin, "Quasi-cyclic low-density parity-check codes with girth larger than 12," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 8, pp. 2885-2891, Aug. 2007.

김 성 환 (Sunghwan Kim)

종신회원



1999년 2월 서울대학교 전기공학부 졸업

2001년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학석사

2005년 3월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 공학박사

2005년 10월~2007년 4월 Georgia Institute of

Technology 박사후 과정

2007년 5월~2011년 2월 삼성전자 DMC 연구소 책임 연구원

2011년 3월~현재 울산대학교 전기공학부 조교수
<관심분야> 디지털 통신, 오류정정부호, LDPC 부호, 정보 이론