논문 2011-48SC-2-6

# 이동 멀티미디어 통신 시스템을 위한 구조적인 저밀도패리티검사 부호

## ( Structured LDPC Codes for Mobile Multimedia Communication Systems )

유 석 근*, 주 언 경**

( Seog Kun Yu and Eon Kyeong Joo )

요 약

현재 및 미래의 이동 멀티미디어 통신시스템들은 전송 고도화를 위한 강력한 오류정정 성능뿐만 아니라 다양한 서비스를 위하여 쉽게 부호어 길이와 부호율을 가변 할 수 있는 오류정정 부호들을 요구한다. 또한 소형의 이동 단말기를 위하여 가능한 한 낮은 복잡도를 가지는 것이 바람직하다. 일반적으로 여러 저밀도패리티검사(low-density parity-check; LDPC) 부호 중에서 비균일 랜덤 LDPC 부호가 가장 우수한 오류성능을 가지는 것으로 알려져 있다. 하지만 비균일 랜덤 LDPC 부호는 부복호를 위해 여러 서비스에 해당하는 모든 패리티검사행렬을 저장해야하는 비효율성을 가진다. 최근 효율적으로 가변 부호율 및 길이를 가지는 구조적인 LDPC 부호들이 많이 연구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 여러 구조적인 LDPC 부호들의 가변성, 메모리 크기 그리고 오류성능을 비교 및 분석한다. 그리고 이 중 이동 멀티미디어 통신시스템에 가장 적합한 구조적인 LDPC 부호를 제시한다.

Abstract

Error correcting codes with easy variability in code rate and codeword length in addition to powerful error correcting capability are required for present and future mobile multimedia communication systems. And low complexity is also needed for the compact mobile terminals. In general, the irregular random LDPC(low-density parity-check) code is known to have the superior performance among various LDPC codes. But it has inefficiency since the various parity check matrices for various services should be stored for encoding and decoding. The structured LDPC codes which can easily provide various rates and lengths are studied recently. Therefore, the flexibility, memory size, and error performance of various structured LDPC codes are compared and analyzed in this paper. And the most appropriate structured LDPC code is also suggested.

**Keywords :** 이동 멀티미디어 통신시스템, 구조적인 LDPC 부호, 가변 부호율, 가변 길이

## Ⅰ. 서 론

현재 그리고 미래의 이동 통신시스템은 이동 및 휴대수신 환경에서 HDTV, SDTV, 오디오, 멀티미디어 서비스 등 다양한 서비스가 가능하도록 고안되고 있다. 이러한 시스템에 사용되는 오류정정 부호는 전송품질을 위한 강력한 오류정정 성능과 다양한 서비스 요구를 위하여 시스템이 요구하는 다양한 부호어 길이와 부호율을 쉽게 구성 할 수 있어야 한다. 또한 이동 및 휴대수신 환경 단말기의 특성에 의하여 낮은 복잡도가 요구된다.

최근에 많은 주목을 받고 있는 LDPC 부호[1]는 Shannon 한계에 근접하는 매우 우수한 오류정정 성능을 보인다[2]. 또한 인터리버의 기능을 내재하고 있어 이

* 학생회원, ** 평생회원-교신저자,
경북대학교 IT 대학 전자공학부
(School of Electronics Engineering, College of IT Engineering, Kyungpook National University)
접수일자: 2010년10월22일, 수정완료일: 2011년3월10일

동 통신채널인 페이딩 환경에서도 좋은 성능을 유지한다[3]. 그리고 간단한 SPA(sum-product algorithm)를 이용하여 복호할 수 있다[2~3]. 이러한 장점들에 의해서 LDPC 부호는 유럽의 위성방송 규격인 DVB-S2[3]와 휴대인터넷의 표준 중 하나인 WiMAX[4]의 표준으로 채택되는 등 활발히 연구되고 있다.

일반적으로 여러 형태의 LDPC 부호 중에서 가장 우수한 성능을 보이는 비균일 랜덤 LDPC 부호는 부호화 특성에 의하여 부호어 길이와 부호율의 변화에 따라 최적 패리티검사행렬도 달라지는 특성이 있다. 따라서 각각의 서비스 조건에 해당하는 부호율 및 부호어 길이를 가지는 패리티검사행렬을 이동 단말기에 모두 저장하여야 한다. 그렇지만 이동 단말기에 필요한 모든 패리티검사행렬을 저장하는 것은 현실적으로 비효율적인 면이 있다. 그러므로 최근에는 이를 구조적으로 발생시켜 단말기의 메모리 부담을 줄이면서 LDPC 부호의 가변성은 확장시키는 방법들에 대한 연구들이 이루어지고 있다[5~8]. 따라서 본 논문에서는 이러한 구조적인 LDPC 부호들의 가변 가능성, 메모리 크기 그리고 오류성능을 비교 분석하고 이들 중 이동 멀티미디어 통신 시스템에 가장 적합한 LDPC 부호를 제시한다.

## Ⅱ. LDPC 부호

1960년대 초 Gallager[1]에 의해 처음 소개된 LDPC 부호는 Shannon 한계에 근접하는 우수한 성능[2]으로 최근 터보 부호와 함께 차세대 통신시스템의 오류정정 부호로서 각광을 받고 있다. LDPC 부호는 일종의 선형 블록 부호로서 패리티검사행렬의 열과 행 무게가 대단히 작은(sparse) 특성을 가진다. 이 무게의 분포에 따라 일정한 행과 열 무게를 갖는 균일(regular) LDPC 부호와 그 무게가 각기 다른 비균일 LDPC 부호로 구분된다. 또한 패리티검사행렬의 생성방법에 따라 랜덤 LDPC 부호[2], 구조적인 LDPC 부호[5~8]로 구분할 수 있다.

랜덤 LDPC 부호는 패리티검사행렬에 있는 '1'의 위치가 랜덤하게 결정된다. 따라서 다양한 서비스를 제공하기 위해서는 수신단에서 각 서비스에 적합한 패리티검사행렬을 모두 저장하여야 한다. 반면에 구조적인 LDPC 부호는 '1'의 위치가 특정 규칙에 따라 결정되므로 수신단에서는 이 규칙만 저장하고 있으면 규칙에 맞는 패리티검사행렬을 생성할 수 있다.

현재까지 발표된 구조적인 LDPC 부호에는 세미-랜덤[5], BIBD(balanced incomplete block design)[6], SeIRA(structured extended irregular repeat accumulate)[7] 그리고 array LDPC 부호[8] 등이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 부호들과 일반적으로 가장 우수한 성능을 가진다고 알려진 비균일 랜덤 LDPC 부호를 대표적인 이동 멀티미디어 방송 시스템인 AT-DMB(advanced terrestrial-digital multimedia broadcasting) 시스템 규격에 적용하여 가변 가능성, 메모리 크기 및 오류성능을 비교 분석한다.

## Ⅲ. LDPC 부호들의 성능 비교 및 분석

AT-DMB 시스템은 32, 64, 96, 128 kbps의 전송속도에 따라 각각 768, 1536, 2304 및 3072 비트의 4가지 메시지 길이를 가진다. 그리고 각 전송속도에 따라 1/2, 2/5, 1/3, 1/4의 부호율을 갖는다. 다양한 부호율과 길이를 가지므로 이동 통신시스템을 위한 여러 구조적인 LDPC 부호들의 성능을 비교, 분석하기에 적합한 것으로 판단된다.

### 1. 가변가능성

각 LDPC 부호의 가변성을 정리하면 표 1과 같다. 정보비트의 수를 $k$, 부호어의 길이가 $n$이면 비균일 랜덤 LDPC 부호의 패리티검사행렬은 $(n-k)\times n$의 크기를 갖는다. 세미랜덤, SeIRA LDPC 부호의 경우 전체 패리티검사행렬은 $(n-k)\times k$ 크기의 $\mathbf{H_d}$행렬과 $(n-k)\times(n-k)$크기의 $\mathbf{H_p}$행렬 두 부분으로 구성된다[5, 7]. 그러므로 이 LDPC 부호들은 $k$, $n$값을 적절히 조정하여 원하는 부호어 길이와 부호율에 맞는 패리티검사행렬을

표 1. 여러 LDPC 부호들의 가변성
Table 1. Flexibility of various LDPC codes.

| LDPC code | Possible code rate | Possible codeword length |
|---|---|---|
| Irregular random | All | All |
| Semi-random | All | All |
| SeIRA | All | All |
| BIBD | $1-1/m$ | Multiple of $v$ |
| Array | All | Multiple of $p$ |

$m$ : number of submatrices
$v$ : number of check nodes
$p$ : odd prime number

구성 할 수 있다.

그러나 BIBD LDPC 부호의 경우, $v \times v$크기의 부행렬을 $m$개 사용하여 구성한다[6]. 여기서 $v$는 체크노드의 수를 나타낸다. 이렇게 구성된 부호어의 길이는 $m \times v$가 되고 정보비트의 길이는 $(m \times v) - v$이므로 부호율은 $1 - 1/m$이 된다. 따라서 BIBD LDPC 부호에서 가능한 최소 부호율은 1/2이고 $m$이 증가함에 따라 부호율이 2/3, 3/4등으로 증가한다. 그리고 Bose에 의해 설계된 3가지 타입의 BIBD LDPC 부호[6]는 $v$가 홀수로 제한되므로 원하는 부호어 길이와 부호율을 만족시키는 패리티검사행렬을 생성하기 어렵다. array LDPC 부호의 패리티검사행렬의 크기는 행 무게인 $\rho$와 열 무게인 $\gamma$에 의해 결정된다[8]. array LDPC 부호가 생성 가능한 부호어의 길이는 $\rho p$ 비트, 정보비트는 $\lambda p$ 비트이므로 생성 가능한 부호율은 $1 - \lambda/\rho$이다[8]. 따라서 적절한 $\rho$, $\gamma$값을 선택하여 어떠한 부호율이라도 구성할 수 있다. 하지만 부호어의 길이를 결정하는 $p$가 홀수인 소수로 제한되어 모든 부호어 길이에 적합한 패리티검사행렬의 생성이 어렵다.

## 2. 메모리 크기

비균일 랜덤 LDPC 부호의 경우 패리티검사행렬의 모든 '1'의 위치를 메모리에 저장하여야 한다. '1'의 위치를 저장하는 방법은 여러 가지가 존재하겠지만 본 논문에서는 간단한 비교를 위하여 '1'의 위치인 행과 열을 저장하는 것으로 한다. 따라서 하나의 '1'당 2개의 메모리가 필요하며 가장 큰 위치값은 정보비트의 길이가 3,072비트이고 부호율이 1/4인 경우로 12,288이 된다. 따라서 이를 표현하기 위해서는 2바이트가 필요하다. 그러므로 하나의 '1'의 위치를 저장하기 위해서는 총 4 바이트가 사용된다.

세미랜덤 LDPC 부호는 $\mathbf{H}_p$행렬이 부호어의 길이와 부호율에 따라 크기와 '1'의 위치가 정해지므로 이 행렬은 메모리에 저장하지 않아도 된다. 반면에 $\mathbf{H}_d$행렬은 랜덤하게 생성되므로 이 부분의 '1'의 위치는 메모리에 저장하여야 한다. SeIRA LDPC 부호[7]는 세미랜덤 LDPC 부호와는 달리 $\mathbf{H}_d$행렬도 특정한 규칙을 갖는다. SeIRA LDPC 부호의 $\mathbf{H}_d$행렬은 $\mathbf{P}$ 행렬과 $\mathbf{\Pi}^{\mathrm{T}}$행렬로 구성된다. 여기서 $\mathbf{P}$ 행렬은 각 행이 $L$개, 각 열은 $J$개의 부행렬로 구성되며 각 부행렬은 단위행렬을 순환이동 하여 구한다. 각 부행렬의 순환이동 회수는 랜덤하게 결정되므로 SeIRA LDPC 부호는 '1'의 위치가 아니라 단위행렬을 오른쪽으로 순환이동 한 횟수인 $\mathbf{P}$ 행렬의 $L \times J$개의 행렬원소를 저장하여야 한다. $\mathbf{\Pi}^{\mathrm{T}}$행렬은 치환행렬로 $\mathbf{P}$ 행렬을 섞어주는 역할[7]을 하며 정해진 규칙에 따라 구성되므로 저장하지 않아도 된다. SeIRA LDPC 부호는 생성된 '1'의 개수를 제한하기 위해서 마스킹 방법을 사용한다. 본 논문에서는 순환마스킹 방법[7]을 사용하였다. 그러므로 $\mathbf{P}$ 행렬에서 마스킹 되지 않은 행렬 원소들과 그 위치를 저장하여야 한다. 또한 $\mathbf{P}$ 행렬을 이루고 있는 각 부행렬의 크기인 $Q$ 를 저장하기 위해서 1개의 메모리가 추가로 필요하다. BIBD LDPC 부호의 패리티검사행렬은 $m$개의 부행렬로 구성되며, 부행렬은 $v \times v$크기를 갖는다. 여기서 $v$는 전술한 바와 같이 체크 노드의 수를 나타낸다. 그리고 각각의 부행렬은 동일한 기본 블록을 통해 구성된다[4]. 이 기본 블록은 BIBD LDPC 부호의 타입에 따라 하나의 기저 원소(basis element)를 통해 계산된다[4]. 따라서 사용된 타입과 기본 블록의 기저값도 필요하다. 그러므로 BIBD LDPC 부호의 패리티검사행렬을 생성하기 위해서는 총 4개의 매개변수($m$, $v$, 타입, 기저값)가 요구된다. Array LDPC 부호의 경우는 $\rho$, $\gamma$, $p$를 이용하여 부행렬의 크기와 개수를 정하여 패리티검사행렬을 생성하므로 3개의 매개변수($\rho$, $\gamma$, $p$)를 저장하여야 한다.

비균일 랜덤 LDPC 부호의 경우 열 무게 분포를 모든 서비스에서 $0.3 \times 2 / 0.6 \times 3 / 0.1 \times 7$로 설정하였다. 이는 Tanner graph 상에서 비트노드에 연결된 체크노드의 수가 2개인 것이 30%이며 3개인 것은 60%, 그리고 7개인 것이 10%로 분포한다는 뜻이다. 만약 정보비트 길이가 768 비트이고 부호율이 1/2 이라면 1,536개의 열이 존재하며 '1'의 개수는 총 4,762개이므로 19,046 바이트의 메모리가 필요하다. 따라서 동일한 방식으로 모든 서비스에서 계산하면 필요한 총 메모리의 크기는 1,095,168 바이트이다. 세미랜덤 LDPC 부호의 경우 랜덤하게 생성되는 $\mathbf{H}_d$행렬의 '1'의 개수만을 저장하면 된다. 본 논문에서는 총 6개의 부행렬을 통하여 $\mathbf{H}_d$ 행렬을 구성하였으므로 $\mathbf{H}_d$행렬의 열무게는 6이 되므로 정보비트 길이가 768 비트이고 부호율이 1/2 이라면 4,608개의 '1'이 존재하여 모두 16,432 바이트의 메모리가 요구되며 총 737,280바이트가 사용된다. 그리고 본 논문에서 사용된 SeIRA LDPC 부호의 경우 $\mathbf{P}$ 행렬은 12×12개의 부행렬로 구성하였고 하나의 부행렬은 128×128의

크기를 가지며 열당 마스킹 수는 7로 하였다[10]. P 행렬에서 마스킹 되지 않은 행렬 원소는 열당 5개씩 이므로 모든 서비스를 위하여 3,632 바이트의 메모리가 필요하다. BIBD, array LDPC 부호의 경우, 요구 서비스들을 모두 만족하는 패리티검사행렬을 생성 할 수는 없다. 하지만 하나의 서비스에서 전술한 바와 같이 BIBD LDPC 부호는 4개, array LDPC 부호는 3개의 메모리가 필요하다. 1개의 메모리 크기를 2바이트로 설정하면 AT-DMB에서는 모두 16가지의 서비스율로 구성되므로 BIBD LDPC 부호는 128바이트, array LDPC 부호는 96바이트의 메모리가 필요하다. 따라서 세미랜덤 LDPC 부호는 비균일 랜덤 LDPC 부호에 비해 약 67%, SeIRA LDPC 부호는 약 0.3%, 그리고 BIBD와 array LDPC 부호는 약 0.01%의 메모리만이 요구된다.

## 3. 오류 성능

AT-DMB의 모든 서비스 조건에서 각 LDPC 부호의 오류성능을 비교하였다. 모의실험에는 AWGN 채널을 사용하였고 모든 LDPC 부호는 SPA로 복호하였다. 이 때 최대반복복호 회수는 200회로 설정하였다. BIBD와 array LDPC 부호의 경우 부호어 길이의 생성에 제한이 있으므로 비균일 랜덤 LDPC 부호와 가장 근접한 크기를 가지도록 설정하였다. 그리고 BIBD LDPC 부호의 경우는 패리티검사행렬 생성의 제약 때문에 부호율이 1/2일 때의 성능을 비교하였다. 모든 서비스에서 각 LDPC 부호들의 오류성능은 유사한 경향을 보였으므로 본 논문에서는 대표적으로 정보비트의 수가 768 비트 그리고 1,536 비트에서 부호율이 1/2인 경우의 결과만을 나타내었다. 정보비트의 수가 768 비트에서 BIBD LDPC 부호의 경우 BIBD 타입은 I, $v$는 769 비트이고 부행렬의 수는 2개로 설정하여 769×1538 크기의 패리티검사행렬을 구성하였다. 1536 비트에서 역시 타입과 부행렬의 수는 동일하게 설정하였으며 $v$는 1537 비트로 하여 패리티검사행렬 크기가 1537×3074가 되도록 하였다. 그리고 array LDPC 부호는 정보비트의 수가 768 비트일 때 $\rho$, $\gamma$와 $p$를 각각 6, 3, 127로 하여 762×1524 크기를 가진 패리티검사행렬을 구성하였으며 1536 비트에서는 6, 3, 509로 설정하여 1527×3054크기의 패리티검사행렬을 생성하였다.

그림 1은 정보비트 수가 768 비트이고 부호율이 1/2일 때 각 LDPC 부호의 성능을 나타낸다.

이 경우, 비트오류율 10-4을 얻기 위하여 비균일 랜덤, 세미랜덤, SeIRA LDPC 부호는 약 2.0dB가 요구되었다. 반면에 BIBD와 array LDPC 부호의 경우 동일한 비트오류율을 위하여 약 3.9dB가 요구되어 나머지 3가지 부호에 비해 열악한 성능을 보였다. 그림 2는 정보비트 수가 1536비트이고 부호율이 1/2 일 때의 성능을 나타낸다. 각 LDPC 부호의 성능은 부호어 길이가 길어져 전체적인 오류 성능은 향상되었으나 비균일 랜덤, 세미랜덤, SeIRA LDPC 부호 그룹은 768 비트에서와 마찬가지로 유사한 성능을 보였다. 그리고 이들 부호와 BIBD, array LDPC 부호 간의 성능 격차 역시 정보비트 수가 768 비트일 때와 거의 동일한 약 1.9dB 임을 알 수 있다.

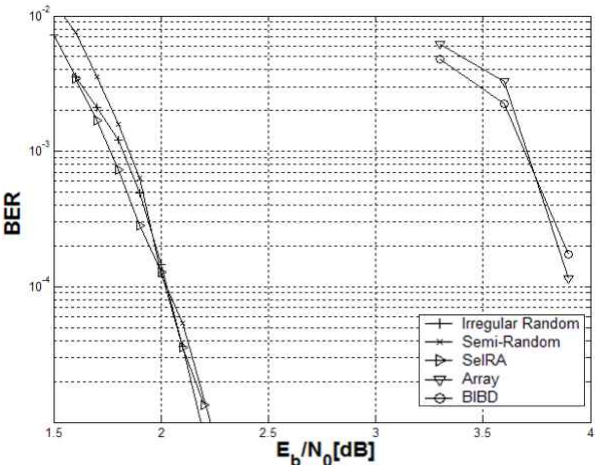


그림 1. 정보비트 768 비트, 부호율 1/2 에서 LDPC 부호들의 오류성능.

Fig. 1. Error performance of various LDPC codes with 768 information bits and code rate of 1/2.

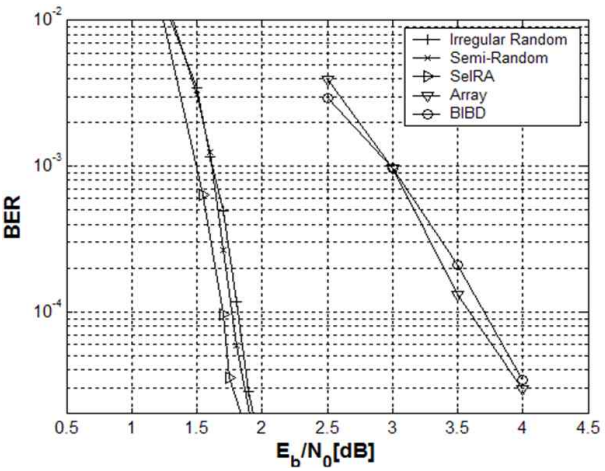


그림 2. 정보비트 1536 비트, 부호율 1/2 에서 LDPC 부호들의 오류성능.

Fig. 2. Error performance of various LDPC codes with 1536 information bits and code rate of 1/2.

## Ⅳ. 결 론

최근 차세대 이동 통신시스템에 요구되는 다양한 서비스에 쉽게 적용 가능한 가변 부호율 및 가변 길이의 구조적인 LDPC 부호들이 연구되고 있다. 이러한 부호들에는 세미랜덤, BIBD, SeIRA 그리고 array LDPC 부호가 있다. 따라서 본 논문에서는 이들을 대상으로 대표적인 이동 멀티미디어 방송 시스템의 한 예인 AT-DMB 환경 하에서 가변성, 메모리 크기, 오류 성능을 비균일 랜덤 LDPC 부호와 비교 분석 하였다.

그 결과, 세미랜덤과 SeIRA LDPC 부호는 요구되는 모든 부호어 길이와 부호율에 맞는 패리티 검사 행렬을 생성 할 수 있었지만 BIBD와 array LDPC 부호는 부호 구성방법에 의해서 그 부호율과 길이에 제한이 있었다. 또한 세미랜덤 LDPC 부호는 패리티검사행렬을 저장하는데 필요한 메모리가 비균일 랜덤 LDPC 부호에 비해 약 67% 정도였으나 SeIRA BIBD, array LDPC 부호의 경우에는 1%이하로 나타났다. 그리고 세미랜덤, SeIRA LDPC 부호는 비균일 랜덤 LDPC 부호와 유사한 오류 성능을 보였다. 하지만 BIBD와 array LDPC 부호는 상대적으로 비균일 랜덤 LDPC 부호에 비해 열악한 성능을 보였다.

그러므로 다양한 서비스를 우수한 성능으로 제공해야 하는 차세대 이동 멀티미디어 통신 시스템의 경우에는 모든 부호율과 부호어 길이를 만족 할 수 있으며 상대적으로 적은 메모리가 필요하고 또한 비균일 랜덤 LDPC 부호와 유사한 오류 성능을 보이는 SeIRA LDPC 부호를 적용하는 것이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌


[1] R. G. Gallager, “Low-density parity-check codes,” *IRE Trans. Inform. Theory*, vol. 8, no. 1, pp. 21-28, Jan. 1962.

[2] D. J. C. Mackay and R. M. Neal, “Near Shannon limit performance of low density parity check codes,” *Electron. Lett.,* vol. 33, no. 6, pp. 457-458, Mar. 1997.

[3] ETSI TS 102 377 v1.1.1, Digital Video Broadcasting (DVB); DVB-H Implementation Guidelines, *ETSI*, Feb. 2005.

[4] J. Lin, et. al., “Efficient shuffle network architecture and application for WiMAX LDPC decoders,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, Exp. Briefs, vol. 56, no. 3, pp. 215-219, Mar. 2009.

[5] L. Ping, et. al., “Low density parity check codes with semi-random parity check matrix,” *Electron. Lett.,* vol. 35, no. 1, pp. 38-39, Jan. 1999.

[6] B. Honary, et. al., “Construction of well-structured quasi-cyclic low-density parity check codes,” Proc. IEE Commun., vol. 152, pp. 1081-1085, Dec. 2005.

[7] Y. Zhang, et. al., “Design of structured eIRA codes with applications to wireless channels,” *Proc. IEEE WCNC 2006*, Las Vegas, NV, vol. 3, pp. 1390-1395, Apr. 2006.

[8] O. Milenkovic, et. al., “Shortened array codes of large girth,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 8, pp. 3702-3722, Aug. 2006.

[9] H. T. Lim, et. al., “Performance of concatenated code with hierarchical modulation in T-DMB system,” *Proc. ICECE '06*, Dhaka, Bangladesh, pp. 282-285, Dec. 2006.

[10] S. K. Yu, et. al., “Performance comparison of varialble-rate and variable-length LDPC codes,” *Proc. KICS Summer Conf. 2008*, p232, July 2008.


### 저 자 소 개


유 석 근(학생회원)
대한전자공학회 논문지
제 45권 TC편 제 12호 참조

주 언 경(평생회원)
대한전자공학회 논문지
제 39권 TC편 제 11호 참조