

# LDPCA 부호를 이용한 실용적 분산 소스 부호화의 복호복잡도

준회원 장 민\*, 정회원 강 진 환\*, 종신회원 김 상 효\*°

## Complexity of Distributed Source Coding using LDPCA Codes

Min Jang\* Associate Member, Jin Whan Kang\* Regular Member, Sang-Hyo Kim\*° Lifelong Member

### 요 약

분산 소스 부호화 시스템은 복호복잡도가 높다는 문제점을 갖는다. 본 논문에서는 신드롬 기반의 분산 소스 부호인 low-density parity check accumulate (LDPCA) 부호의 복호복잡도를 효율적으로 낮추기 위하여 LDPC 부호에 사용되는 각종 정지조건을 LDPCA 복호기에 적용하고 이에 따른 복잡도를 평가하였다. 대표적으로 convergence of mean magnitude (CMM) 정지 조건을 적용하여, 정지 조건을 사용하지 않았을 때보다 압축부호 손실을 2% 이하로 발생시키며 약 85%의 복호복잡도 감소 효과를 얻을 수 있었다. 더불어 사용되는 부호의 성능을 파악하고 있을 때 초기에 과잉 신드롬을 전송하는 방법과, 채널 정보가 얻기 힘든 경우 기존 정지조건을 부호화 적응적인 LDPCA 부호에 적합하게 수정하는 방법을 제안하였다.

**Key Words** : Distributed Source Coding(DSC), Distributed Video Coding(DVC), LDPCA Codes Atopping Criterion, Inter-rate Stopping Criterion

### ABSTRACT

Distributed source coding (DSC) system moves computational burden from encoder to decoder, so it takes higher decoding complexity. This paper explores the problem of reducing the decoding complexity of practical Slepian-Wolf coding using low-density parity check accumulate (LDPCA) codes. It is shown that the convergence of mean magnitude (CMM) stopping criteria for LDPC codes help reduce the 85% of decoding complexity under the 2% of compression rate loss, and marginal initial rate request reduces complexity below complexity minimum bound. Moreover, inter-rate stopping criterion, modified for rate-adaptable characteristic, is proposed for LDPCA codes, and it makes decoder perform less iterative decoding than normal stopping criterion does when channel characteristic is unknown.

### I. 서 론

1973년에 Slepian과 Wolf는 상관관계가 있는 두 개의 다른 소스를 독립적으로 부호화하고 결합하여 복호화 하더라도, 결합하여 부호화하고 결합하여 복호했을 때 얻을 수 있는 최대 압축부호율을 동일하게 얻

을 수 있다는 사실을 밝혔다<sup>[1]</sup>. 이 이론은 이후 Wyner와 Ziv에 의해서 손실 압축 상황으로 확장되었으며<sup>[2]</sup>, 보다 일반적인 용어인 ‘분산 소스 부호화 (distributed source coding, DSC)’로 일컬어지게 되었다.

‘분산 비디오 부호화 (distributed video coding, DVC)’<sup>[3]</sup>는 연속된 비디오 프레임들의 높은 상관관계

\* 본 연구는 한국산업기술평가관리원 IT산업원천기술개발 사업 (2009-F-032-01, 차세대 모바일 영상서비스를 위한 초경량 비디오 부호화 원천기술 개발) 지원으로 수행되었습니다.

\* 성균관대학교 정보통신공학부 통신 및 부호이론 연구실(minycloud@gmail.com, jinwhan@skku.edu, iamshkim@skku.edu), (°: 교신저자) 논문번호: KICS2010-01-026, 접수일자: 2010년 1월 20일, 최종논문접수일자: 2010년 3월 31일

를 이용하는 비디오 부호화 기술로, 내부에 Slepian-Wolf 부·복호기를 사용하는 DSC의 실제적인 응용 기술이다. 기존의 비디오 부호 시스템은 모션 예측 등 계산량이 많은 연산을 부호기 쪽에서 수행하지만, DVC 시스템은 이를 복호기 쪽에서 수행한다. 따라서 DVC를 이용하면 부호기의 복잡도와 계산량을 낮출 수 있어, 성능이 낮은 휴대폰이나 폐쇄회로 카메라, 캠코더 등을 이용하여 영상을 촬영하고, 이를 실시간으로 전송할 수 있다.

이와 같은 실질적인 DSC 시스템은 신드롬 기반의 오류 정정 부호를 이용하여 구현 가능한데 [4], 이러한 부호는 채널 용량에 근접하는 우수한 성능과 부호율 적응적인 (rate-adaptable) 특성을 가져야 한다. 이러한 조건을 만족하는 부호로 본 논문에서는 Stanford 대학에서 제안한 low-density parity check accumulate (LDPCA) 부호<sup>[5]</sup>를 고려한다. LDPCA 부호는 기존 LDPC 부호<sup>[6]</sup>를 DSC 시스템에 적용한 부호율 적응적인 오류 정정 부호로, DSC에 터보 부호를 적용했을 때보다 뛰어난 압축부호율을 나타내지만<sup>[7]</sup>, 정보 비트 수에 비례하는 연산을 반복적으로 수행하기 때문에 복호복잡도가 높아진다. 따라서 보다 현실적인 DSC 시스템을 설계하기 위해서는 복호복잡도가 낮아야 하므로, 이를 위해서 LDPC 부호에서 사용되는 각종 정지조건을 LDPCA 부호에 적용할 수 있다.

본 논문에서는 서로 다른 목적과 상황에서 DSC 시스템의 복호복잡도를 낮추는 방법에 대해 다룬다. DSC 시스템을 이해하기 위한 배경 지식을 2장에서 다룰 것이며, 3장에서는 상황에 따라 DSC 시스템이 취할 수 있는 복호 전략을 살펴보기로 한다. 4장에서는 각 복호 전략을 모의 실험한 결과에 대해 알아보고, 5장에서는 결론을 내리도록 한다.

## II. 시스템 모델

### 2.1 Slepian-Wolf 부호기와 복호기

상관관계가 있는 두 소스  $X$ 와  $Y$ 를 부호화할 때, 각 소스의 압축부호율은 Slepian-Wolf 정리<sup>[1]</sup>에 의해서 결정된다. 그림 1은 Slepian-Wolf 정리에 따라 달성 가능한 소스  $X$ 와  $Y$ 의 압축부호율을 평면상에 표시한 그림이다. 음영으로 칠해진 부분이 두 소스의 압축부호율 영역이며, 각 압축부호율의 합이 최적이 되는 한계 구간은 식 (1)과 같이 두 소스의 결합 엔트로피로 정의되는 선분  $AB$  구간이다. 이 선분의 압축부호율은 각 소스의 부호화 과정을 분리하든, 결합하든 동일하게 얻을 수 있다.

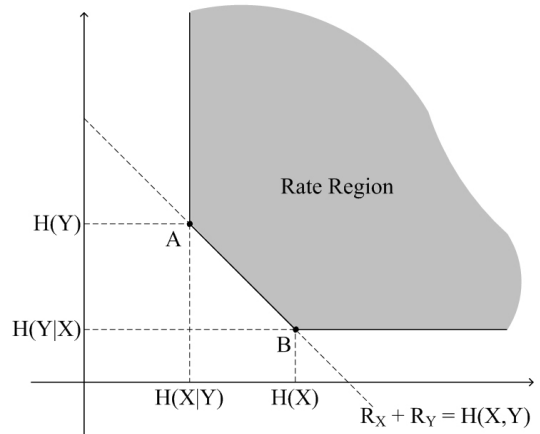


그림 1. Slepian-Wolf 이론에 따른 부호율 영역  
Figure 1. Rate region according to Slepian-Wolf theorem

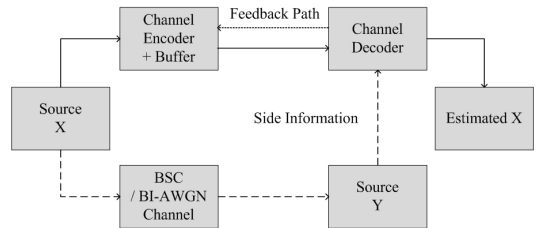


그림 2. 실질적인 분산 소스 부호화 시스템  
Figure 2. Practical distributed source coding system

$$R_X + R_Y = H(X, Y) = H(Y) + H(X|Y) \quad (1)$$

만약  $Y$ 를 보조정보로 이용하여  $X$ 를 최대한 압축한다면,  $X$ 의 최대 압축부호율은 선분  $AB$  상의 점  $A$ 로 나타난다. 즉, 복호기에서 보조정보  $Y$ 를 온전히 사용할 수 있다면,  $X$ 는 조건부 엔트로피인  $H(X|Y)$ 의 압축부호율로 압축될 수 있다.

그림 2는 실제적인 분산 소스 부호화 시스템으로, 신드롬 기반의 오류 정정 부호를 사용한다. 부호기는 소스  $X$ 를 오류 정정 부호로 부호화하여 신드롬을 생성하고, 이를 버퍼에 저장한 뒤 복호기로부터 최초 요청받은 양만큼의 신드롬을 우선 전송한다. 복호기는 수신 받은 신드롬을 가지고 채널 부호의 복호화 과정을 진행하는데, 수신 받은 신드롬만으로 복호가 성공하면 그 결과를 소스  $X$ 의 예측 값으로 출력한다. 만약 복호가 실패하면 복호기는 부호기에 추가 신드롬 전송을 요청한다. 이에 따라 버퍼는 일정량의 추가 신드롬을 전송하고, 복호기는 이전에 받은 신드롬과 추가로 받은 신드롬을 가지고 다시 복호를 진행한다. 이 과정은 복호가 성공하거나 혹은 복호기가 정한 특정 조건을 만족할 때까지 반복하여 진행된다.

2.2 소스와 보조정보 사이의 가상채널

상관관계가 있는 둘 이상의 소스 사이의 관계는 그림 2와 같은 가상 채널로 고려할 수 있다. 일반적으로 이와 같은 가상채널은 이진 대칭 채널 (binary symmetric channel, BSC)이나 이진 AWGN 채널을 모델링된다. 본 논문에서는 상관관계가 있는 두 소스를 소스  $X$ 와 보조정보  $Y$ 로 구분하고, 보조정보  $Y$ 를  $X$ 와 BSC를 이용하여 생성한다.

분산 소스 부호에 사용되는 오류 정정 부호는 수신 심벌의 log-likelihood ratio (LLR)를 이용하는 복호 방법을 사용한다. LLR은 수신 받은 심벌의 신뢰 정도를 나타내는 수치이다. 이러한 LLR을 사용하기 위해서 부호기는  $X$ 의 각 비트들은 1과 -1의 값을 갖도록 심벌 변조 한다. 각 소스 심벌은 이진 대칭 채널을 통과하면서 찬이 확률  $p$ 에 의하여 찬이된다. 복호기는 이진 대칭 채널을 통과한 보조 정보의 각 심벌  $y$ 와 찬이 확률  $p$ 를 이용하여 식 (2)와 같이 각 변수 노드의 LLR을 계산한다.

$$L_{BSC} = \log \frac{1 - (p + y - 2py)}{(p + y - 2py)} \quad (2)$$

2.3 부호율 적응 채널 부호: LDPCA 부호

LDPCA 부호는 실질적인 분산 소스 부호화 시스템에 사용되는 신드롬 기반의 오류 정정 부호이다. 이 부호는 irregular repeat accumulate (IRA) 부호<sup>[8]</sup>를 바탕으로 설계되었으며, 추가적인 신드롬을 수신 받을 때마다 체크 노드 방정식을 수정하는 방식으로 부호율 적응적인 복호를 지원한다. LDPCA 부호의 성능은 Slepian-Wolf 한계에 가까우며, 부호율 적응적으로 설계된 터보 부호보다 뛰어나다<sup>[5]</sup>. LDPCA 부호는 DISCOVER 라는 분산 비디오 부호화 프로젝트에 실제로 사용되고 있다<sup>[9]</sup>.

본 논문에서는 Stanford 대학에서 설계한 LDPCA 부호를 고려한다<sup>[5]</sup>. 이 LDPCA 부호는 소스 비트를 부호화하여 동일한 양의 신드롬을 생성한다. 생성된 신드롬은 순차적으로 누적되어 버퍼에 저장되고, 총 66 단계에 걸쳐 부분적으로 복호기에 전송되는데 이러한 각 단계를 ‘압축부호율 단계’라고 정의한다. 복호기는 소스와 보조정보 사이의 상관관계를 예측하여 적절한 양의 초기 신드롬을 요청하여 이를 이용하여 복호를 시도한다. 이후 복호가 실패하게 되면 피드백 메시지에 의해서 각 단계에 맞는 추가적인 누적 신드롬이 복호기로 전송된다.

2.4 반복 복호 정지조건

LDPC 부호 시스템은 정지조건을 활용하여 불필요

한 반복 복호 횟수를 줄일 수 있다. LDPCA 부호 또한 LDPC 부호에 사용되는 신뢰 전파 (belief propagation) 복호 알고리즘을 사용하기 때문에 동일한 정지조건이 적용될 수 있다. 본 논문에서는 기본적인 정지조건인 신드롬 체크 정지조건과 부가적으로 사용되는 hard decision aided (HDA)<sup>[10]</sup>, convergence of mean magnitude (CMM)<sup>[11]</sup>, number of satisfied parity check (NSPC)<sup>[12]</sup> 정지조건을 고려한다. 부가적인 정지조건은 반복 복호 결과의 수렴 경향을 감지하여 최종적인 복호 실패 여부를 미리 판단으로써 불필요한 반복 복호 횟수를 줄인다. 하지만 이러한 판단이 틀릴 경우, 압축부호율의 손실을 유발할 수 있다.

2.4.1 신드롬 체크

신드롬 체크는 LDPC 부호의 복호가 성공했는지 실패했는지를 판단하는 가장 기본적인 정지조건이다. 변수 노드와 체크 노드 사이의 메시지 전달이 종료되면 복호기는 변수 노드 벡터와 패리티 체크 행렬을 곱하여 신드롬 벡터를 얻는다. 기존 LDPC 부호의 복호기는 이 신드롬 벡터의 원소가 모두 0이면 복호가 성공한 것으로 판단하지만, LDPCA 부호는 전송 받은 누적 신드롬을 다시 순차적으로 누적한 값들과 동일해야 복호가 성공했다고 판단한다. 만약 사전에 지정된  $I_{max}$  횟수동안 복호가 성공하지 않으면 복호는 실패하게 된다.

2.4.2 HDA 정지조건

HDA 정지조건이 적용된 LDPC 복호기는 신뢰 전파 복호를 통해서 얻어진 임의적인 부호어를 지속적으로 비교한다. 신드롬 체크에 의해서 복호가 실패하면, 복호기는 이번 반복 복호를 통해 구한 부호어를 저장하고 다음 반복 복호를 수행한다. 만약 미리 지정된  $P$  횟수의 반복 복호 동안 저장된 부호어의 모든 원소가 변화하지 않았다면 복호기는 더 이상의 반복 복호가 의미 없다고 판단하고 복호를 정지한다.

2.4.3 CMM 정지조건

CMM 정지조건은 반복 복호를 마칠 때마다 LLR 값의 평균 절대값을 계산하여 변화량을 측정한다. 이 정지 조건을 사용하기 위해서 복호기는 사전에 임계값  $\lambda$ 와 심도(depth factor)  $P$ 를 설정하며, 다음과 같은 순서에 의해서 동작한다.

- ① 카운터를 0으로 초기화한다.
- ②  $i$ 번째 반복 복호를 시도한다.
- ③ 식 (3)에 따라서 LLR 값의 평균 절대값을 계산

한다. 여기서  $L(j)$ 는  $j$ 번째 변수 노드의 LLR 값이고,  $k$ 는 전체 변수 노드의 개수이다.

$$E[L^i] = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k |L^i(j)| \quad (3)$$

- ④ 식 (4)와 같은 조건을 만족하면 카운터를 1 증가시키고, 만족하지 않으면 카운터를 초기화한다.

$$|E[L^i] - E[L^{i-1}]| < \lambda E[L^{i-1}] \quad (4)$$

- ⑤ 카운터가 심도  $P$ 와 같아지거나, 반복 복호 횟수가 미리 지정한 최대 반복 복호 수  $I_{max}$ 에 도달하면, 복호를 정지한다. 그렇지 않으면 신드롬 체크 과정을 진행한다.
- ⑥ 신드롬 체크 과정을 수행한다. 복호가 실패하면  $i+1$  번째 복호를 위해 ②의 과정으로 돌아간다.

#### 2.4.4 NSPC 정지조건

NSPC 정지조건은 CMM 정지조건인 1 비트 버전으로, 패리티 검사를 만족하는 체크 노드의 개수를 세어 이 값의 수렴 경향을 감지한다. NSPC 정지 기법을 사용할 경우, 임계값  $\theta_d$ 와  $\theta_{spc}$ , 심도  $\theta_{max}$ 를 사전에 지정해야 한다. 동작 순서는 다음과 같다.

- ① 카운터를 0으로 초기화한다.
- ②  $i$ 번째 반복 복호를 시도한다.
- ③ 식 (5)에 따라  $N_{spc}$ 를 계산한다. 여기서  $m$ 은 변수 노드의 개수,  $s_j$ 는 신드롬 벡터의  $j$ 번째 원소,  $\hat{s}_j$ 는 복호를 마친  $j$ 번째 체크 노드의 경관정 값이다.

$$N_{spc} = m - \sum_{j=1}^m (s_j \oplus \hat{s}_j) \quad (5)$$

- ④  $i > 1$ 이면, 식 (6)에 따라서  $N_{spc}$ 의 변화량  $d_{spc}^{(i)}$ 을 계산한다.

$$d_{spc}^{(i)} = N_{spc}^{(i)} - N_{spc}^{(i-1)} \quad (6)$$

- ⑤  $d_{spc}^{(i)} < \theta_d$ 이면, 카운터를 1 증가시키고 ⑥ 과정을 진행한다. 만족하지 않으면 카운터를 0으로 초기화하고 ⑦ 과정을 진행한다.
- ⑥ 카운터가  $\theta_{max}$ 에 도달했을 때,  $N_{spc}^{(i)} < \theta_{spc}$ 의 조건을 만족하면 반복 복호를 정지한다. 상기의

조건을 만족하지 않으면 카운터를 0으로 초기화하고 ⑦ 과정으로 진행한다.

- ⑦ 신드롬 체크 과정을 진행한다. 복호가 실패하면  $i+1$ 번째 복호를 위해서 ② 과정으로 돌아간다.

### III. 복호 전략 및 제안 기술

이번 장에서는 LDPCA 부호의 복호복잡도를 낮추기 위한 복호 전략에 대해서 살펴보고, 각 복호전략을 구현하는 기법에 대해서 알아본다.

첫 번째 복호 전략은 LDPCA 부호의 압축부호율 손실 없이 복호복잡도를 낮추는 것이다. 압축부호율의 손실을 줄이기 위해서 복호기가 초기 전송받는 신드롬의 양은 복호 성공을 위해 전송받아야 하는 최소의 신드롬의 양보다 작아야 한다. 가장 낮은 압축부호율 단계부터 전송을 시작할 수도 있지만, 주어지는 채널과 부호의 정보에 따라서 효율적인 초기 전송량 요구(initial rate request, IRR) 메시지를 생성할 수 있다. BSC의 천이 확률이나 AWGN 채널의 잡음 분산과 같은 채널 정보가 알려진 경우라면 Slepian-Wolf 정리에 따른 이론적인 최고의 압축부호율  $H(X|Y)$ 를 IRR로 설정할 수 있다. 이를 'SW 한계'라고 정의한다. 만약 채널 정보뿐만 아니라 설계된 LDPCA 부호의 성능까지 복호기가 파악하고 있다면, 부호의 평균 압축부호율로 정의된 '성능 한계'를 IRR 메시지로 전달할 수 있다.

두 번째 복호 전략은 LDPCA 부호의 압축부호율-복호복잡도 trade-off를 이용하는 것이다. 첫 번째 복호 전략이 압축부호율 손실을 최소화하는 것이라면, 이 복호 전략은 상황에 따라서 압축부호율의 손실을 감수하더라도 복호복잡도를 더 낮추는 것이 목적이다.

#### 복잡도 저감 기법 1. 정지 조건의 적용

압축부호율의 손실을 최소화하는 첫 번째 복호 전략의 복잡도 저감 기법으로 2장에서 살펴본 정지 조건을 LDPCA 부호에 적용하는 것을 고려한다. 그리고 이 정지 기법을 복호기가 채널 정보를 파악하고 있는 상황인 시나리오에서 평가하기로 한다. 채널 정보가 파악되어 있기 때문에 복호기는 IRR 메시지로 SW 한계인  $H(X|Y)$  값을 부호기에 전달한다. 하지만 실제 LDPCA 부호의 압축 성능은 SW 한계보다 낮으므로 일반적으로 복호 성공을 위해서 더 많은 정보 전송이 필요하다. 따라서 추가적인 신드롬 요청이 발생하게 되고, 복호기는 압축부호율 단계를 높여가며 복호를 진행하게 된다. 이 경우 각 압축부호율마다 최대 횟수

만큼 반복 복호를 수행하게 되면 복호복잡도는 크게 증가하기 때문에, HDA, CMM 조건과 같은 정지 기법을 사용하여 성공 확률이 낮은 복호 과정을 조기에 멈춤으로써 복호복잡도를 낮출 수 있다.

**복잡도 저감 기법 2. 부호율 간 정지조건 적용**  
 이번 장에서 고려하는 복잡도 저감 기법 또한 압축 부호율 손실 최소화를 우선으로 하는 첫 번째 복호 전략 하에 사용된다. 복잡도 저감 기법 1에서 고려된 정지 조건은 반복 복호마다 계산된 측정값의 수렴 여부를 살펴보기 때문에, 반복 복호를 최소 미리 지정한 심도  $P$  이상 진행했을 때 적용할 수 있다. 본 논문에서는 이전 압축부호율 단계에서 복호가 정지조건에 의하여 실패했을 때 최종적으로 저장한 측정값을 참고하여 1회의 반복 복호 이후에도 복호를 정지시킬 수 있는 정지조건을 제안한다. 부호율 간 정지조건은 기존의 정지조건을 이용하여 구현되는데, 여기서는 CMM 정지 기법과 함께 사용하는 부호율 간 (inter-rate, IR) CMM을 고려한다. 이 정지조건은 사전에 또 다른 임계값인 부호율간 임계값  $\mu$ 를 설정하며, 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 압축부호율 단계  $r$ 에서 CMM 정지조건으로 복호가 중단될 때, LLR 절대값의 평균  $E_r[L^i]$ 을 저장한다.
- ② 추가 정보를 받아 압축부호율 단계  $(r+1)$ 에서  $i$  번째 반복 복호를 수행한다.
- ③  $i$ 가 1이면 ④ 단계를 진행하고, 그렇지 않으면 일반적인 CMM 정지 조건을 적용한다.
- ④ 1번째 반복 복호 중에  $E_{r+1}[L^i]$ 을 계산한다.
- ⑤ 식 (7)을 만족하면 기준값으로  $E_{r+1}[L^i]$ 로 저장하고 반복 복호를 정지한다. 만족하지 않으면 ② 과정으로 돌아간다.  $n$ 은 0을 포함하는 양의 정수이다.

$$|E_r[L^i] - E_{r+1}[L^i]| < \mu E_r[L^i] / r^n \quad (7)$$

이 기법은 복호기가 채널 정보를 파악하는 것이 불가능한 시나리오에서 평가하기로 한다.

**복잡도 저감 기법 3. 초기 과잉 신드롬 전송**  
 어느 정도의 압축부호율 손실을 감안할 수 있다면 압축부호율-복호복잡도 trade-off 관계를 이용하는 복호 전략을 고려할 수 있다. 이를 위해 초기에 과잉 신드롬을 전송하는 기법을 사용할 수 있다. 만약 더 낮

은 복호복잡도가 요구된다면, 복호기는 복호에 성공하기 위한 최소 예측량보다 더 많은 신드롬을 요구하는 IRR 메시지를 생성한다. 복호기가 채널 정보를 예측할 수 있는 경우에는 SW 한계보다 많은 정보를 요청하고, 부호 성능까지 알고 있는 경우엔 성능한계보다 많은 정보를 요구한다. 추가 신드롬 전송 없이 복호 성공에 필요한 최소의 신드롬을 한 번에 받아 반복한 복호 횟수를 ‘복잡도 최소 한계 (complexity minimum bound)’라고 정의한다면, 초기에 과잉 신드롬을 전송함으로써 복호복잡도를 이보다 더 낮출 수 있다. 이 정지 기법은 복호기가 채널 정보뿐만 아니라 부호 성능을 파악하고 있는 시나리오에서 평가하기로 한다.

#### IV. 모의실험 결과

이 장에서는 [5]에서 설계한 LDPCA 부호를 사용하여, 3장에서 살펴본 복호 기법들을 실험하였다. 실험에 사용된 압축 부호는 블록의 크기가 6336 비트인 균일 LDPCA 부호로, 총 66개의 압축부호율 단계를 갖는다. 소스와 보조정보 사이의 관계는 2장에서 살펴본 BSC이며, 천이확률을 바꿔가며 실험을 진행하였다. 각 그래프의 가로축은 천이확률에 따라 소스와 보조정보 사이의 상관관계를 나타내는 값  $H(X|Y)$ 이다. 이러한 조건으로 진행된 실험에서 압축부호율과 복호 복잡도에 해당하는 성능 지표를 얻었다. 평균 압축률은 전체 소스 비트 중에 전송한 비트의 비율로 압축 효율을 나타낸다. 평균 반복 횟수는 복호가 성공할 때까지 수행한 복호의 총 횟수로 복잡도에 관련된 지표이다. 한 부호율에서 수행하는 최대 반복 복호의 횟수는 100회로 설정하였다.

##### 시나리오 1. 채널 정보 예측이 가능한 상황

본 시나리오는 복호기가 채널 정보를 알고 있다는 가정 아래, 정지조건 적용 기법을 평가한다. 이 실험에서 고려된 정지조건은 2장에서 살펴본 HDA, CMM, NSPC이다. 각각의 정지조건마다 설정할 수 있는 파라미터를 변화시켜가면서 실험을 하여, 압축부호율 손실이 작고 복호복잡도가 낮은 결과들을 선정하였다. 그리고 정지조건을 사용하지 않았을 때의 결과와 비교하였다. 특별히 정지조건이 적용되지 않은 경우에 얻을 수 있는 압축부호율을 ‘최고 압축성능 (best rate performance)’라고 정의한다. 실험결과는 그림 3와 그림 4에 나타나있다. HDA 조건의 파라미터 ( $P$ )는 심도를 의미하고, CMM 조건의 파라미터

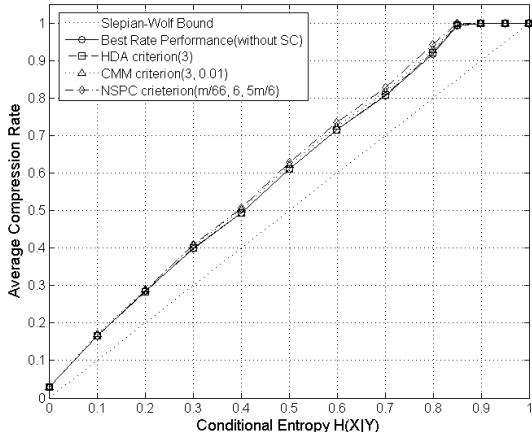


그림 3. 정지 조건 적용 기법에 따른 압축부호율  
Figure 3. Compression rate according to stopping criterion

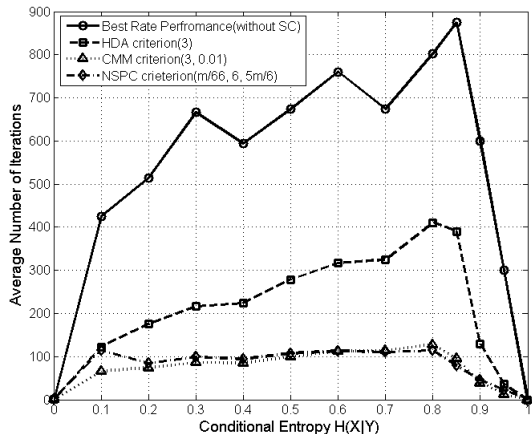


그림 4. 정지 조건 적용 기법에 따른 복호복잡도  
Figure 4. Complexity according to stopping criterion

( $P$ ,  $\lambda$ )는 각각 임계값과 심도를 나타낸다. 그리고 NSPC의 파라미터 ( $\theta_a$ ,  $\theta_{max}$ ,  $\theta_{spc}$ )는 각각  $d_{spc}^{(l)}$ 의 임계값, 심도,  $N_{spc}^{(l)}$ 의 임계값을 의미한다.

실험 결과, 적용한 정지조건에 따른 압축부호율 손실은 HDA, CMM, NSPC 조건 순으로 커졌다. 반면에 복호복잡도는 CMM과 NSPC가 가장 낮아 압축부호율과 복호복잡도 사이에 trade-off 관계를 확인할 수 있었다. 특히 CMM 조건은 압축부호율 손실이 2 퍼센트 이하면서도 복호복잡도를 최대 1/8까지 크게 낮추어 압축부호율-복호복잡도 trade-off 성능이 가장 우수했다.

시나리오 2: 부호 성능이 알려진 상황  
복호기가 LDPCA 부호의 성능을 파악하고 있다면,

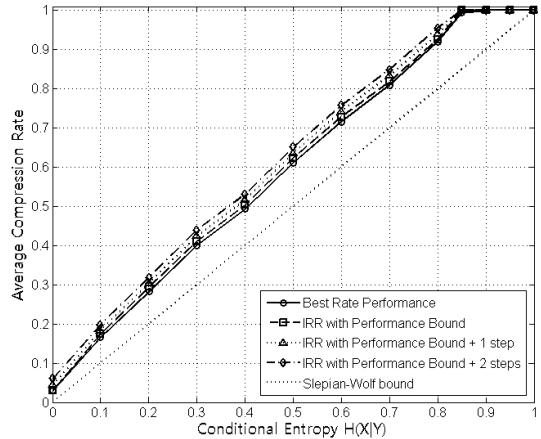


그림 5. 과잉 신드롬 전송 기법에 따른 압축부호율  
Figure 5. Compression rate according to marginal rate request

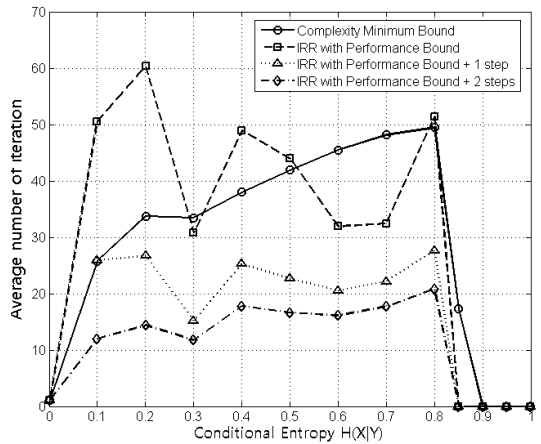


그림 6. 과잉 신드롬 전송 기법에 따른 복호복잡도  
Figure 6. Decoding complexity according to marginal rate request

성능 한계에 기반을 둔 IRR 메시지를 생성할 수 있다. 이번 모의실험에서는 과잉 신드롬 전송을 통해서 얼마만큼의 복호복잡도를 추가적으로 낮출 수 있는지 알아본다. 성능한계에 더해지는 과잉량을 각각 0, 압축부호율 한 단계, 압축부호율 2 단계로 하여 실험하였고, 이를 압축률 최소 한계와 비교하였다. 해당하는 실험 결과는 그림 5와 그림 6에 나타나있다.

결과적으로, 과잉 신드롬을 전송하면 압축부호율의 손실이 발생하지만, 최소 복잡도 한계보다 낮아진다. 그리고 과잉량이 클수록 반복 복호의 횟수는 복잡도 최소 한계보다 줄어들었다. 가령 과잉량이 압축부호율의 두 단계인 경우, 압축률 최소 한계보다 복호복잡도를 60 퍼센트 정도 낮춘다. 이는 과잉 신드롬을 전송하면 추가 신드롬 요청을 하지 않을 뿐만 아니라, 더

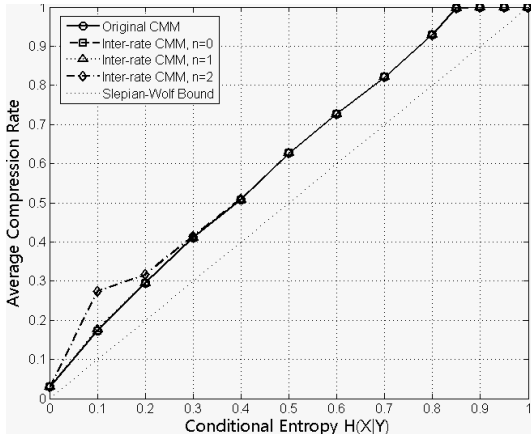


그림 7. 부호율 간 정지조건에 따른 압축부호율  
Figure 7. Compression rate according to inter-rate stopping criterion

적은 횟수의 반복 복호로도 복호를 성공시킬 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 복호복잡도가 제한적인 상황에서는 초기에 과잉 신드롬을 전송하여 복호복잡도를 크게 낮출 수 있다.

시나리오 3: 채널 정보 예측이 불가능한 상황

채널 정보를 전혀 알지 못하는 상황에서 압축부호율 손실을 최소화하려면, 가장 낮은 압축률 단계부터 복호를 시도하여 복호가 성공할 때까지 추가 정보를 수신 받아야 한다. 이러한 상황에서 3장에서 제안한 IR-CMM 기법이 복호가 불가능한 압축부호율 단계를 1회의 반복 복호 이후에 얼마나 효율적으로 정지시키는 지 실험을 통해 알아보았다. IR-CMM의 파라미터  $n$ 은 각각 0, 1, 2로 설정하였으며, 각 실험 결과를 일반 CMM의 성능과 비교하였다. CMM의 심도  $P$ 는 2이고, 임계값  $\lambda$ 는 0.01이다. IR-CMM의 심도  $P$ 와 부호율 내 임계값  $\lambda$ 는 CMM과 동일하고, 부호율 간 임계값  $\mu$ 는 0.01로 설정하였다. IR-CMM의 압축부호율과 복호복잡도 성능은 그림 7과 그림 8 나타나있다.

IR-CMM 정지 기법은 전체  $H(X|Y)$  범위에서 압축부호율의 큰 손실 없이 CMM보다 복호복잡도를 낮추었다. 특히 차수  $n$ 의 값이 1인 경우, 압축부호율 손실은 0.5% 이하로 매우 낮지만 복호복잡도는 25% 감소하였다. 소스와 보조정보 사이의 상관관계가 낮아 전체 패리티를 받아야 복호가 성공하는 경우, 모든 압축부호율 단계를 반복 복호 1회 만에 정지시켜 기존의 정지조건이 낮출 수 없는 수준의 복호복잡도를 얻을 수 있었다.

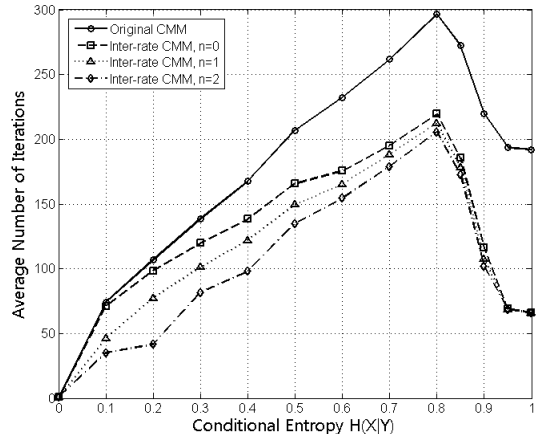


그림 8. 부호율 간 정지조건에 따른 복호복잡도  
Figure 8. Decoding complexity according to inter-rate stopping criterion

V. 결 론

본 논문에서는 LDPCA 부호를 사용하는 분산 비디오 부호화 시스템의 복호복잡도를 효율적으로 낮추는 방법에 대해서 연구하였다. 먼저 압축부호율 손실을 최소화하는 복호전략과 압축부호율-복호복잡도 trade-off를 이용하는 복호 전략을 수립하고, 각 전략에 사용할 수 있는 기법을 살펴보았다. 그리고 이러한 기법을 채널과 부호기의 상태가 서로 다른 세 가지 상황에서 실험하였다. LDPC 부호에 사용하는 정지조건을 LDPCA 부호에 적용하는 것과 본 논문에서 제안한 부호율 간 정지조건을 적용하는 기법은 압축부호율 손실을 최소화 하면서도 복호복잡도를 크게 낮추었다. 또한, 의도적으로 압축부호율의 손실을 허용하는 상황에서 과잉 신드롬을 초기에 전송하여 복호복잡도를 한계보다 낮추는 기법도 고려하였다. 본 논문에서는 이와 같은 결과를 이진 대칭 채널에서만 고려하였지만, 별도의 실험을 통해서 BI-AWGN 채널과 같은 연속 채널에서도 결과가 동일함을 확인하였다.

이렇게 얻어진 결과를 바탕으로 앞으로는 기존의 정지조건 간에 특성을 이용한 복합적인 정지 조건과 압축부호율 적응적인 오류 정정 부호를 효율적으로 설계할 수 있는 방법에 대해 연구할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] J. D. Slepian and J. K. Wolf, "Noiseless coding of correlated information sources," *IEEE Trans.*

*Inf. Theory*, Vol.19, pp.471-480, July 1973.

[2] D. Wyner and J. Ziv, "The rate-distortion function for source coding with side information at the decoder," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.22, No.1, pp.1-10, Jan. 1976.

[3] B. Girod et al., "Distributed video coding," *Proc. IEEE*, Vol.93, No.1, pp.71-83, Jan. 2005.

[4] S. S. Pradhan and K. Ramchandran, "Distributed source coding using syndromes (DISCUS): Design and construction," in *Proc. IEEE Data Compression Conf.*, Snowbird, UT, Mar. 1999.

[5] D. Varodayan, A. Aaron, and B. Girod, "Rate-adaptive codes for distributed source coding," *EURASIP Signal Processing Journal, Special Section on DSC*, Vol.86, No.11, Nov. 2006.

[6] R. G. Gallager, *Low-Density Parity-Check Codes*, Cambridge, MA: MIT Press, 1963.

[7] A. Aaron, R. Zhang, and B. Girod, "Wyner-Ziv coding of motion video," in *Proc. Asilomar Conf. Pacific Grove CA*, Nov. 2002.

[8] H. Jin, A. Khandekar, and R. J. McEliece, "Irregular repeat-accumulate codes," in *Proc. 2nd Int. Symp. Turbo Codes and Related Topics*, Brest, France, Sept. 4, 2000, pp.1-8.

[9] X. Artigas et al., "The DISCOVER codec: architecture, techniques, and evaluation" in *Proc. Picture Coding Symposium*, Lisbon, Portugal, 2007.

[10] R. Y. Shao, S. Lin, and M.P. C. Fossorier, "Two simple stopping criteria for turbo decoding," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.47, No.8, pp. 1117-1120, Aug. 1999.

[11] J. Li, X. H. You, and J. Li, "Early stopping for LDPC decoding: convergence of mean magnitude (CMM)," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 10, No.9, pp.667-669, Sept. 2006.

[12] D. Shin, J. Ha, K. Heo, and H. Lee, "A stopping criterion for low-density parity-check codes," *IEICE Trans Commun. Lett.*, Vol.E92-B, No.4, pp.1145-148, 2008.

장 민 (Min Jang)

준회원



2009년 2월 성균관대학교 전자  
전기공학과  
2009년 3월~현재 성균관대학  
교 휴대폰학과 석사과정  
<관심분야> 오류정정부호, 정  
보이론, 부호이론

강 진 환 (Jin Whan Kang)

정회원



2008년 2월 성균관대학교 전자  
전기공학과  
2010년 2월 성균관대학교 휴대  
폰학과 석사  
2009년 3월~현재 성균관대학  
교 휴대폰학과 박사과정  
<관심분야> 다중 안테나 시스  
템, 오류정정부호, 부호이론

김 상 호 (Sang-Hyo Kim)

종신회원



1998년 2월 서울대학교 전기공  
학부  
2000년 2월 서울대학교 전기공  
학부 석사  
2004년 2월 서울대학교 전자·  
컴퓨터공학부 박사  
2004년 3월~2006년 7월 삼성  
전자, 책임연구원  
2006년 8월~2007년 8월 박사후 연구원(USC)  
2007년 9월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 조  
교수  
<관심분야> 오류정정부호, 다중 안테나 시스템, 시  
퀀스, 협력 통신