

고정 소수점 처리 기반 5G LDPC 부호를 위한 HARQ 결합 기법 설계

김정현[◦], 김지형^{*}, 이문식^{**}

Design of HARQ Combining Scheme for Fixed-Point Processing Based 5G LDPC Codes

Junghyun Kim[◦], Jihyung Kim^{*},
Moon-Sik Lee^{**}

요약

본 논문에서는 비트 수가 제한적인 고정 소수점 처리 기반 5G LDPC 복호기에서 기존 HARQ 결합 기법의 성능 열화에 대해 분석하고 개선된 결합 기법을 제안한다.

Key Words : Wireless communications, 5G NR, HARQ, LDPC codes, Fixed-point processing

ABSTRACT

In this paper, we analyze the performance degradation of the existing HARQ combining scheme for fixed-point processing-based 5G LDPC decoders with limited number of bits, and propose a new improved combining scheme.

I. 서론

LDPC 부호는 낮은 복잡도와 Shannon의 채널 용량 한계에 근접하는 성능을 갖는 오류 정정 부호로 5G NR 이동통신 표준 규격의 핵심 기술로 사용되고

있다^[1]. LDPC 복호기는 하드웨어 구현을 위하여 제한된 비트 수로 실수값을 표현해야 하며 이로 인해 발생하는 양자화 오류에 강인하게 설계되어야 한다^[2]. 양자화 오류를 최소화하기 위한 기존 연구로 실수값을 표현하기 위한 정수 비트 수와 실수 비트 수의 최적 비율에 관한 연구^[3,4]와 선형 양자화^[5], 다단계 양자화^[6], 유사-균등 양자화^[7], 비균등 양자화^[8] 등을 이용한 복호 함수 근사화에 관한 연구가 있다. 이러한 기법들은 단일 수신 패킷에 대한 복호 시 양자화 오류로 인한 성능 열화를 최소화하기 위한 기법들이다.

단일 수신으로 패킷을 복호하기 어려운 경우, 재전송 패킷을 기존 수신 패킷과 결합하여 복호에 사용한다. 기존 결합 방식으로 수신 신호를 심볼 레벨 혹은 비트 레벨에서 단순히 누적하여 더하는 기법^[9]과 결합한 결과가 전체 수신 신호들의 평균값이 되도록 각 수신 신호에 가중치를 곱하고 누적하여 더하는 기법^[10]이 있다. 일반적으로 이렇게 결합된 수신 신호에 단일 수신 패킷 복호 시 양자화 오류를 최소화하기 위한 기법들을 적용하여 양자화 오류를 극복한다.

본 논문에서는 허용 비트 수가 제한적인 고정 소수점 처리 기반 5G LDPC 복호기에 기존 결합 방식을 이용하여 복호 시 성능 및 한계점을 분석하고 채널 추정 및 불완전성과 양자화 오류를 극복할 수 있도록 새로운 결합 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안한 기법이 기존 기법들보다 탁월한 성능을 가짐을 보인다.

II. 고정 소수점 처리 기반 LDPC 부호의 복호

LDPC 부호는 각 코드 블록별로 Tanner 그래프 상의 변수 노드(variable node; VN)와 검사 노드(check node; CN) 사이에서 반복적인 정보 전달과정에 의해 복호된다. 복호 과정은 변수 노드 업데이트, 검사 노드 업데이트, 로그 우도율(log likelihood ratio; LLR) 업데이트 단계로 구성된다. 이러한 업데이트가 반복적으로 수행된 후 최종적으로 정해진 LLR 값을 기준으로 복호 비트가 정해진다. 이때 사용되는 대표적인 복호 알고리즘으로 합-곱(sum-product; SP) 알고리즘과 최소-합(min-sum; MS) 알고리즘이 있다. 합-곱 알고

※ 이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019-0-01360, 동적 기능분할을 지원하는 개방형 4차원 분산 유닛(DU) 기술 개발)

◦ First and Corresponding Author : Soonchunhyang University, Department of Bigdata Engineering, kimjh@sch.ac.kr, 중신회원

* Electronics and Telecommunications Research Institute, savant21@etri.re.kr, 정회원

** Electronics and Telecommunications Research Institute, moonsiklee@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : 201910-230-A-LU, Received October 9, 2019; Revised November 11, 2019; Accepted November 12, 2019

리즘은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

(i) VN 업데이트:

$$L_{v_j \rightarrow c_i} = L_{v_j} + \sum_{i^* \in N(j)-i} L_{c_{i^*} \rightarrow v_j} \quad (1)$$

여기서 $L_{v_j \rightarrow c_i}$ 는 j 번째 변수 노드에서 i 번째 검사 노드로 전달되는 LLR 값이다. L_{v_j} 는 j 번째 변수 노드에 대한 LLR 값이다. $N(j)$ 는 j 번째 변수 노드와 연결된 검사 노드의 인덱스 집합, i^* 는 $N(j)$ 에서 i 를 제외한 인덱스 중 하나를 의미한다. $L_{c_{i^*} \rightarrow v_j}$ 는 i^* 번째 검사 노드에서 j 번째 변수 노드로 전달되는 LLR 값이다.

(ii) CN 업데이트:

$$L_{c_i \rightarrow v_j} = 2 \operatorname{arctanh} \left(\prod_{j^* \in N(i)-j} \tanh \left(\frac{L_{v_{j^*} \rightarrow c_i}}{2} \right) \right) \quad (2)$$

여기서 $N(i)$ 는 i 번째 검사 노드와 연결된 변수 노드의 인덱스 집합이다.

(iii) LLR 업데이트:

$$L_{v_j}' = L_{v_j} + \sum_{i \in N(j)} L_{c_i \rightarrow v_j} \quad (3)$$

여기서 L_{v_j} 는 j 번째 변수 노드에 대한 업데이트 전 LLR 값이고 L_{v_j}' 은 업데이트 후의 LLR 값이다.

수식 (2)와 같이 합-곱 알고리즘의 검사 노드 업데이트는 \tanh 연산과 $\operatorname{arctanh}$ 연산이 포함되어 있어 복잡도가 크므로, 이를 \min 연산과 \sum 연산으로 근사화한 것이 최소-합 알고리즘이다. 근사화 과정은 다음과 같다.

$$L_{c_i \rightarrow v_j} = \Phi \left(\sum_{j^* \in N(i)-j} \Phi \left(\frac{L_{v_{j^*} \rightarrow c_i}}{2} \right) \right) \quad (4)$$

여기서 $\Phi(x) = -\ln(\tanh(x))$ 이다. 식 (4)를 하드웨어 구현이 용이하도록 순차적 계산을 적용하면

$$\begin{aligned} \Phi(\Phi(x) + \Phi(y)) &= x \boxplus y \\ &= \ln \left(\frac{1 + \exp(x+y)}{\exp(x) + \exp(y)} \right) \\ &= \operatorname{sign}(x) \times \operatorname{sign}(y) \times \min(|x|, |y|) \\ &\quad + \ln(1 + \exp(-|x+y|)) - \ln(1 + \exp(-|x-y|)) \end{aligned} \quad (5)$$

의 형태로 표현할 수 있다. 여기서 $\operatorname{sign}(x)$ 는 x 가 음수면 -1, 이외의 경우는 1로 정의한다. 식 (5)에서 마지막 두 항을 생략하면 다음과 같이 최소-합 알고리즘이 된다.

$$x \boxplus y \approx \operatorname{sign}(x) \times \operatorname{sign}(y) \times \min(|x|, |y|) \quad (6)$$

수신단에서 고정 소수점 복호기를 사용할 경우 식 (5)의 마지막 두 항은 일반적으로 룩업 테이블(lookup table) 또는 근사화된 수식을 통해 계산된다. 만일 고정 소수점 복호기의 허용 비트 수가 매우 제한적인 경우 이 값들은 무시할 수 있을 정도로 작은 값을 갖는다. 이러한 환경에서는 합-곱 알고리즘과 최소-합 알고리즘의 성능 차이는 거의 없다. 따라서 앞서 소개한 다양한 양자화 기법을 통한 양자화 오류 극복 효과는 매우 제한적이다.

III. 제안하는 HARQ 결합 기법

HARQ를 지원하는 통신 시스템에서 수신단이 특정 패킷에 대해 한 번의 수신만으로 복호에 실패한 경우 송신단에게 재전송을 요청한다. 수신단은 해당 패킷에 대해 재전송된 신호를 결합하여 수신 성공 확률을 높인다. 이때 동일한 부호율로 부호화된 패킷을 반복하여 전송 및 수신하는 기법을 체이스 결합(chase combining; CC) 기법이라고 하고 새로운 비트를 추가하여 전송 및 수신하는 기법을 리던던시 증가(incremental redundancy; IR) 기법이라고 한다^[9].

5G NR 규격의 LDPC 부호는 특정 패킷에 대해 IR 기법으로 수신단에서 최대 4번까지 수신할 수 있도록 지원한다. 이때 순환 버퍼를 생성한 후, 매 전송 시 리던던시 버전(redundancy version)에 따라 전송 패킷의 시작점을 다르게 하여 순환 버퍼 내의 일부 비트를 전송한다.

매 재수신시 복호기에서는 기존에 수신된 LLR 값에 새롭게 수신된 LLR 값을 결합하여 복호 성능을 향상시킨다. 이때 일반적으로 사용되는 방식은 각 비트에 대응되는 LLR 값을 누적하여 더하는 합-결합(sum-combining; SC) 기법^[9]이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$CL_{v_j}^{(k)} = CL_{v_j}^{(k-1)} + L_{v_j}^{(k)} \quad (7)$$

여기서 $L_{v_j}^{(k)}$ 는 k 번째 재전송시 수신된 j 번째 변수 노드에 대한 LLR 값이고 $CL_{v_j}^{(k)}$ 는 합-결합 LLR 값이다. $CL_{v_j}^{(0)}$ 는 초기 수신값 $L_{v_j}^{(0)}$ 로 초기화하고 k 번째 재전송된 패킷에 j 번째 변수 노드에 해당하는 비트가 포함되지 않은 경우 $L_{v_j}^{(k)}$ 를 0으로 계산한다.

합-결합 방식은 동일 패킷을 여러 번 수신할 경우

LLR 값이 부스팅되는 효과를 통해 성능을 향상시킨다. 그러나 비트 수가 매우 제한적인 고정 소수점 복호기 사용 시 합-곱 기법을 적용하면 복호기 내에서 표현할 수 있는 LLR 값 범위가 제한되어 클리핑으로 인한 성능 열화가 발생할 수 있다. 또한 채널 추정이 불완전하여 LLR 값이 매우 크게 계산된 경우는 추가 재전송을 여러 번 하더라도 성능 열화를 극복하지 못한다. 이러한 현상을 극복하기 위해 수신된 LLR 값들의 평균값을 사용하는 평균-결합(average-combining; AC) 기법^[10]을 적용할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$CL_{v_j}^{(k)} = \frac{k \times CL_{v_j}^{(k-1)} + L_{v_j}^{(k)}}{k+1} \quad (8)$$

평균-결합 기법은 합-결합 기법의 단점을 완화시킬 수 있으나 LLR 부스팅 효과를 얻을 수 없어서 성능이 열화되는 단점이 있다. 또한 허용 비트 수가 충분하지 않은 고정 소수점 복호기 사용 시 LLR 값이 매우 작아지면 평균-결합 결과가 0이 되어 오히려 복호에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 비트 수가 매우 제한적인 고정 소수점 복호기 사용 시 합-결합 기법과 평균-결합 기법의 단점을 모두 보완하는 새로운 결합 방식이 요구된다.

알고리즘 1. Mixed-combining scheme

```

initialization:  $CL_{v_j}^{(0)} = L_{v_j}^{(0)}, Flag_{v_j}^{(0)} = 1,$ 
 $j \in 1, 2, \dots, N$ 
for  $k = 1; k \leq K; k++$ 
  for  $j = 1; j \leq N; j++$ 
    if  $Flag_{v_j}^{(k-1)} = 1$ 
       $V_1 = k \times CL_{v_j}^{(k-1)} + L_{v_j}^{(k)}$ 
       $V_2 = V_1 / (k+1)$ 
      if  $V_2 = 0$ 
         $CL_{v_j}^{(k)} = V_1$ 
         $Flag_{v_j}^{(k)} = 0$ 
      else
         $CL_{v_j}^{(k)} = V_2$ 
         $Flag_{v_j}^{(k)} = 1$ 
    else
       $V_1 = CL_{v_j}^{(k-1)} + L_{v_j}^{(k)}$ 
       $V_2 = V_1 / (k+1)$ 
      if  $V_2 = 0$ 
         $CL_{v_j}^{(k)} = V_1$ 
         $Flag_{v_j}^{(k)} = 0$ 
      else
         $CL_{v_j}^{(k)} = V_2$ 
         $Flag_{v_j}^{(k)} = 1$ 

```

본 논문에서는 다음의 알고리즘 1과 같이 합-결합 기법과 평균-결합 기법을 혼합한 형태의 혼합-결합 (mixed-combining; MC) 기법을 제안한다. 혼합-결합 기법은 평균-결합 방식으로 결합 LLR 값을 계산했을 때 결과 값이 0이 아니면 평균-결합 방식으로 동작하고 결과 값이 0이면 합-결합 방식으로 동작하는 기법이다. 결과적으로 제안한 혼합-결합 기법은 재전송 패킷 으로부터 부스팅 효과는 최대한 획득하면서 클리핑으로 인한 성능 열화 및 채널 추정의 불완전성으로 인한 성능 열화를 최소화한다.

IV. 그림과 표

모의실험은 5G NR 규격의 시스템 구조를 사용하였다. 또한 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널에서 복조 참조 신호(demodulation reference signal; DMRS)를 통해 추정된 채널 값을 이용하여 복조 및 복호를 수행하였다. LDPC 복호기는 총 7비트로 LLR 값의 범위를 표현하는 고정 소수점 처리 복호기를 사용하였다. 복호 알고리즘으로는 최소합 알고리즘을 사용하였다. 재전송이 없는 경우, 한 번 있는 경우, 세 번 있는 경우에 대해 각각 SA0, SA1, SA3로 표시하였다. 매 전송 시 리던던시 버전은 0-2-3-1 순으로 사용하였다. 재전송 패킷 수신을 위해 앞서 정의한 합-결합, 평균-결합, 혼합-결합 방식을 사용하였고 각각 SC, AC, MC로 표시하였다. 모든 성능은 수신기에서 신호 대 잡음 비(SNR) 대비 순환중복검사 오류율(CRCER)로 표현하였다.

그림 1은 QPSK 신호를 사용한 고정 소수점 처리 기반 LDPC 복호기의 수신 패킷 결합 방식에 따른 성능을 비교한 실험결과이다. 패킷의 페이로드(payload) 크기는 160, 부호율은 0.62로 설정하였다. 실험결과를 통해 SC는 높은 SNR 영역에서 재전송 횟수가 증가해도 성능이 개선되지 않음을 확인할 수 있다. 이는 AC는 재전송 횟수가 증가할수록 성능이 개선되지만 부스팅 효과를 얻을 수 없어서 성능의 한계를 보임을 나타낸다. 반면 제안한 MC는 동일 CRCER 기준으로 요구되는 SNR을 비교해보면 SA0와 SA1의 간격과 SA1과 SA3의 간격이 각각 약 3dB이므로 수신 신호가 부스팅된 효과를 얻을 수 있다.

그림 2는 16QAM 신호에 대해 수신 패킷 결합 방식에 따른 성능을 비교한 실험결과이다. 패킷의 페이로드 크기는 160, 부호율은 0.31로 설정하였다. 실험 결과는 QPSK 신호를 사용한 경우와 유사한 경향을 보여준다. 일부 낮은 SNR 영역에서 SC가 제안한 MC

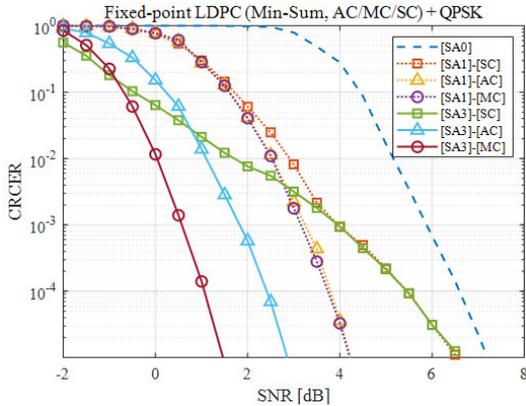


그림 1. QPSK 신호를 사용한 고정 소수점 처리 기반 LDPC 복호기의 수신 패킷 결합 방식에 따른 성능 비교
Fig. 1. Performance comparison of three combining schemes for fixed-point processing based LDPC decoder with QPSK signaling.

보다 나은 성능을 보이기도 하지만 주요 관심 오류율 영역($CRCER < 10^{-2}$)에서는 모든 경우 제안한 MC가 가장 좋은 성능을 보인다.

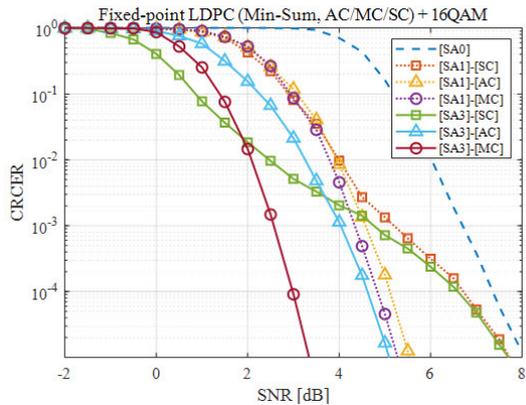


그림 2. 16QAM 신호를 사용한 고정 소수점 처리 기반 LDPC 복호기의 수신 패킷 결합 방식에 따른 성능 비교
Fig. 2. Performance comparison of three combining schemes for fixed-point processing based LDPC decoder with 16QAM signaling.

V. 결론

본 논문에서는 허용 비트 수가 제한적인 고정 소수점 처리 기반 LDPC 복호기의 HARQ 결합 기법에 대해 제안하였다. 모의실험에서 제안하는 혼합-결합 방식은 기존 합-결합 방식 대비 탁월한 성능 개선을 보였다. 향후 검증을 통해 다양한 오류 정정 부호에 적용 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] 3GPP, TS 38.212. *Multiplexing and channel coding, V15.7.0*, Sep. 2019. from https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.212/38212-f70.zip
- [2] J. Kim and W. Sung, "Fixed-point arithmetic optimization for LDPC decoding," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 730-731, Feb. 2012.
- [3] E.-S. Kim, H.-J. Kim, and K.-W. Shin, "A performance analysis of layered LDPC decoder for mobile WiMAX system," *Journal of the KIICE*, vol. 15, no. 4, pp. 921-929, Apr. 2011.
- [4] X. Zuo, R. G. Maunder, and L. Hanzo, "Design of fixed-point processing based LDPC codes using EXIT charts," in *Proc. IEEE VTC Fall*, pp. 1-5, Sep. 2011.
- [5] G. Masera, F. Quaglio, and F. Vacca, "Finite precision implementation of LDPC decoders," *IEE Commun.*, vol. 152, no. 6, pp. 1098-1102, Dec. 2005.
- [6] S. Tolouei and A. H. Banihashemi, "Lowering the Error Floor of LDPC Codes using Multi-step Quantization," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 86-89, Jan. 2014.
- [7] X. Zhang and P. H. Siegel, "Quantized Iterative message passing decoders with low error floor for LDPC codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 1, pp. 1-14, Jan. 2014.
- [8] Q. Xinru and Y. Liuguo, "Non-uniform quantization scheme for the decoding of low-density parity-check codes with the sum-product algorithm," in *Proc. IEEE ICEIEC*, pp. 121-125, Jun. 2016.
- [9] W. Lee, O. Simeone, J. Kang, S. Rangan, and P. Popovski, "HARQ Buffer Management: An Information-Theoretic View," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 11, pp. 4539-4550, Nov. 2015.
- [10] P. J. Sartori, Y. W. Blankenship, B. K. Classon, A. Nimbalkar, S. Simoens, and E. Vistosky, "Method for Cooperative Relaying within Multi-hop Wireless Communication Systems," *US Patent 8,068,438*, Nov. 29, 2011.