고속 처리와 성능 향상을 위한 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기

Decision Feedback Equalizer Based on LDPC Code for Fast Processing and Performance Improvement

김 도 훈 · 최 진 규 · 유 흥 균

Do-Hoon Kim · Jinkyu Choi · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 OFDM 시스템에서 고속 처리와 성능 향상을 위한 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기(Decision Feedback Equalizer: DFE)를 제안한다. LDPC 코드는 우수한 오류 정정 능력과 Shannon의 채널 용량에 근접하는 성능을 갖는다. 그러나, 많은 parity 검사 행렬과 반복 횟수를 가진다는 단점이 있다. 제안된 시스템에서는 판정된 신호와 복호기 사이의 신호의 MSE(Mean Square Error)를 등화기로 피드백한다. 이러한 방법을 사용하면 추정된 채널 응답을 보정해 주기 때문에 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 동일한 성능에서 피드백이 포함되지 않은 시스템보다 낮은 반복 횟수를 갖기 때문에 시스템의 복잡도를 줄일 수 있다. 시뮬레이션을 통해 다중 경로 채널에서 CFO(Carrier Frequency Offset)와 위상 잡음이 고려된 OFDM 시스템의 성능을 평가하여 제안 시스템의 우수성을 보인다.

Abstract

In this paper, we propose a decision feedback equalizer based on LDPC(Low Density Parity Check) code for the fast processing and performance improvement in OFDM system. LDPC code has good error correcting capability and its performance approaches the Shannon capacity limit. However, it has longer parity check matrix and needs more iteration numbers. In our proposed system, MSE(Mean Square Error) of signal between decision device and decoder is fed back to equalizer. This proposed system can improve BER performance because it corrects estimated channel response more accurately. In addition, the proposed system can reduce complexity because it has a lower number of iterations than system without feedback at the same performance. Simulation results evaluate and show the performance of OFDM system with the CFO and phase noise in multipath channel.

Key words : LDPC, Decision Feedback Equalizer, MSE, CFO, Phase Noise, OFDM

I. 서 론

많은 양의 데이터를 고속으로 보내기 위해서 다
중 반송과 전송의 특수한 형태로써 orthogonal frequ-

ency division multiplexing(OFDM) 전송 기술이 제안
되었다^[1]. OFDM은 광대역 무선 인터페이스 표준의
물리계층(physical layer)에서 신호의 변조 방식으로
채택되어 왔다^{[2]~[4]}.

「이 논문은 2011학년도 충북대학교 학술연구지원사업에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2011).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

· 논 문 번 호 : 20110929-110

· 교 신 저 자 : 유흥균(e-mail : ecomm@cbu.ac.kr)

· 심사일자 : 2011년 11월 16일 · 수정완료일자 : 2011년 11월 23일

그러나 고속 디지털 통신이 가능한 OFDM 기술에도 고속 통신을 저해하는 요인이 존재한다. 첫 번째로는 송·수신기의 phase locked loop(PLL)에서 발생하고, 수신기에서 하향 변환 시에 영향을 미치는 위상 잡음이다^{[5]~[7]}. 두 번째로는 주파수 오프셋(CFO: Carrier Frequency Offset)의 영향으로 수신 신호의 주파수 스펙트럼에 주파수 천이가 발생하여 OFDM의 성능을 저하시킨다^[8]. 이로 인해 발생하는 주파수 오프셋은 신호의 크기를 감소시키고 위상을 회전시켜, 인접 부반송파 간의 간섭(Inter sub-Carrier Interference: ICI)을 야기한다.

지금까지 OFDM 시스템에서 CFO나 위상 잡음에 의한 ICI를 보상하기 위해 많은 방법들이 연구되었다^{[9],[10]}. ICI에 의해 영향을 받은 심볼을 통해 위상 회전 및 ICI 성분을 추정하여 보상하는 방법들이 많았다. 특히, 대표적으로 훈련 신호에서 추출 전력을 사용한 등화기의 MMSE(Minimum Mean Square Error) 판정 기준을 계산하여 ICI 성분을 보상하는 방법들이 제안되었다^[11].

비록 OFDM 전송 방식을 사용함으로써 다중 경로 채널에 의한 심볼 간 간섭을 극복할 수 있으나, 특정 부반송파의 감쇄가 심한 경우에는 수신 SNR(Signal To Noise Ratio)이 낮아져 그 부반송파로 전송된 데이터의 오류 확률이 증가하기 때문에 전체 bit error rate(BER)에서 error floor가 발생할 수 있다. 또한, 위에 언급한 바 같이 CFO나 위상 잡음으로 인한 ICI 성분이 존재할 경우에 수신 성능이 상당히 저하되게 된다. 따라서 OFDM 방식에서 일반적으로 전방 오류 정정 부호(Forward Error Correction code: FEC code)를 함께 사용하여 이러한 현상을 효과적으로 극복하고자 한다.

특히, 오류 정정 부호 중에서도 LDPC(Low-Density Parity-Check) 코드는 가장 우수한 성능을 가진 부호로 알려져 있다^[12]. LDPC 부호는 1962년 Gallager에 의해 처음 제안되었으나, LDPC 부호는 하드웨어 기술의 한계로 인하여 1996년 MacKay와 Neal에 의해 재발견될 때까지 주목 받지 못하였다^{[13],[14]}. Shannon의 채널 용량의 한계에 가장 근접하는 오류 정정 능력을 보이는 LDPC 부호는 터보 부호와 더불어 제 4세대 이동 통신 시스템에 활용하기에 적합하여 주목을 받고 있다. 높은 오류 정정 성능으로 속도와

채널 용량(channel capacity)을 개선하거나 열악한 전송 품질을 개선하기 위해 사용된다^[15]. 그리고 SNR이 떨어지는 통신 환경에서도 양호한 오류 정정 성능을 발휘한다. 터보 코드에 비해 적은 복호 복잡도를 가지고, error floor 현상이 없거나 매우 낮은 프레임 오류 현상이 나타난다. 그리고 최소 행렬에 의한 완전 병렬 처리로 고속 처리가 가능하다.

그러나 한편, LDPC 코드는 터보 부호에 비해서 적은 복잡도를 갖지만, 다중 경로 환경에서 우수한 성능을 확보하기 위하여 긴 패리티 검사 행렬과 LDPC 부호의 많은 반복 횟수가 필요하다. 이는 계산량과 소모되는 전력이 많음을 의미하며, 많은 계산량으로 인한 처리 속도의 지연 문제와 전력 소모를 야기한다. 따라서 본 논문에서는 낮은 복잡도를 갖는 결합된 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기 시스템을 제안한다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기는 기존의 등화기만을 사용했을 때보다 반복 횟수가 작고, OFDM에서 BER 성능을 저해하는 CFO와 위상 잡음과 같은 ICI 성분을 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기로 제거할 수 있다. 그렇기 때문에 OFDM 시스템에서 CFO와 위상 잡음을 고려하여 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기를 분석하고, OFDM 시스템에서 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기의 성능을 평가한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 OFDM 시스템에서 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기의 시스템 모델을 보여준다. 본 논문에서는 기존의 IEEE 802.11a와 호환성을 유지하면서 고속의 데이터를 보내기 위해 IEEE 802.11n 시스템

그림 1. 제안하는 LDPC 기반 결정 궤환 등화기를 사용하는 시스템

Fig. 1. System using proposed DFE based on LDPC.

을 기반으로 시스템을 모델링하였다. IEEE 802.11n의 시스템에서 다중 경로 채널 환경을 고려하였고, 주파수 오프셋과 위상 잡음에 의한 간섭을 고려하였다. 고려한 다중 경로 채널 환경으로는 Stanford University Interim(SUI) 보행자 모델을 사용하였다. 주파수 오프셋은 RF단에서 주파수 합성기에서 발생하거나 송수신기의 이동으로 인한 Doppler 주파수에 의해 발생한다. 위상 잡음은 수신기의 하향 변환 시 발생한다.

송신기에서는 먼저 데이터를 부호화하고 신호를 QPSK 성상에 맞도록 대응시키고 난 다음에 OFDM 변조를 하여 전송한다. 이에 비해 수신기 구조는 더 복잡한 구조를 가진다. 수신기에서는 FFT를 통하여 OFDM 복조를 하고 주파수 영역에서 혼련 신호를 통해 채널 응답을 추정한다. 추정된 채널 응답으로 등화하고 정보를 0과 1로 결정한다.

OFDM 시스템에서 CFO나 위상 잡음에 의한 ICI 성분들이 존재하기 때문에 성능을 저하시킨다. 위와 같은 시스템에서 고속의 데이터를 전송하고 성능을 향상하기 위해서 LDPC 채널 부호화 방법을 함께 사용한다. 또한, 혼련 신호를 보내서 채널 추정기를 통해 채널 특성을 얻는다. 추정한 채널을 결정 궤환 등화기를 사용하여 등화하면 CFO와 위상 잡음에 의해 영향을 받은 성능을 개선할 수 있다. 결정 궤환 등화기를 사용하기 때문에 궤환 신호를 보내는 부분이 시스템에 포함되게 된다. LDPC 복호기를 거친 다음의 결정된 신호를 등화기로 피드백하여 보내게 된다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기 시스템은 피드백 블록에서 MSE(Mean Square Error)를 계산하여 등화기로 보내져서 추정된 채널을 더 정확하게 만들어주기 때문에 성능 향상을 기대할 수 있다. 그리고 피드백을 포함하지 않은 경우보다 낮은 반복 횟수에서 같은 성능을 낼 수 있기 때문에 제안하는 시스템은 복잡도까지 줄일 수 있다.

III. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기

서론에서 언급한 것과 같이 LDPC 부호는 Shannon의 채널 용량에 근접하기 때문에 고속의 데이터를 송·수신하는 시스템에서 적합하게 사용할 수 있고, 오류 정정 능력도 뛰어나다. OFDM 시스템에서 다

중 경로 채널로 인한 주파수 선택적 페이딩 현상을 효과적으로 극복하기 위해 LDPC 부호와 같은 FEC 부호를 함께 사용한다. 그리고 더 정확한 채널 추정 및 성능 향상을 기대하기 위하여 결정 궤환 등화기를 사용하여 LDPC 복호기를 거친 신호와 판정된 신호의 MSE 계산을 하여 등화기로 피드백한다.

3-1 LDPC 부호화

LDPC 부호는 선형 블록 코드의 한 종류이다. 따라서 LDPC 부호는 (N, K) 로 표현할 수 있고, 부호화율은 K/N 으로 표현할 수 있다. LDPC 부호는 $(N-K) \times N$ 의 크기를 갖는 희소 parity 검사 행렬을 갖는다. H행렬은 non-systematic 희소 parity 검사 행렬이다. 수신 벡터는 아래와 같이 오류 벡터에 의해 손실된다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{c} \oplus \mathbf{e} = [\mathbf{p} \quad \mathbf{m}] \oplus \mathbf{e} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{p}$ 는 parity 벡터이고, $\mathbf{m}$ 은 message 벡터이다. Parity 벡터와 message 벡터는 각각 전형적이고 부호 벡터의 격자 부분에 위치한다고 가정한다. 수신기의 복호기는 아래와 같이 syndrome 벡터를 찾는 과정을 수행한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= \mathbf{r} \mathbf{H}^T = ([\mathbf{p} \quad \mathbf{m}] \oplus \mathbf{e}) \begin{bmatrix} H_1^T \\ H_2^T \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{p} H_1^T \oplus \mathbf{m} H_2^T \oplus \mathbf{e} H^T. \end{aligned} \quad (2)$$

$\mathbf{e} = 0$ 인 에러가 없는 상황에서 syndrome 벡터는 0의 값을 가진다.

$$\mathbf{s} = \mathbf{p} H_1^T \oplus \mathbf{m} H_2^T = \mathbf{0}. \quad (3)$$

Parity 벡터 $\mathbf{p}$ 를 다음과 같이 message 벡터 $\mathbf{m}$ 으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p} = \mathbf{m} H_2^T H_1^{-T}. \quad (4)$$

다음의 코드 발생 벡터 G 는

$$G = [H_2^T H_1^{-T} \quad I] \quad (5)$$

부호 벡터가 아래와 같이 발생 벡터 G 와 메시지 벡터 $\mathbf{m}$ 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{c} = \mathbf{m} G = [\mathbf{m} H_2^T H_1^{-T} \quad \mathbf{m}] = [\mathbf{p} \quad \mathbf{m}]. \quad (6)$$

여기서, 패리티 검사 행렬이 LDPC 부호의 성능에 있어서 핵심이다. 그러므로 패리티 검사 행렬의 설계가 가장 중요하다.

3-2 LDPC 복호화

LDPC 복호기는 변수 노드와 검사 노드에서 각각의 확률값을 구하여 반복을 통해 전송된 비트를 결정한다. LDPC 복호 알고리즘은 크게 합-곱 알고리즘(Sum-Product)과 최소-합 알고리즘(Min-Sum)으로 나눌 수 있다. SP 알고리즘은 체크 노드에서 곱셈이, 비트 노드에서 덧셈이 사용되는 방식으로 가장 좋은 BER 성능을 보이는 알고리즘이지만, 연산 복잡도가 높다는 단점이 있다. 반대로 MS 알고리즘은 체크 노드에서는 최소값을 찾고, 비트 노드에서 덧셈을 사용한다. MS 알고리즘은 SP 알고리즘에 비해 연산 복잡도가 적은 반면, BER 성능은 낮다는 단점이 있다. 본 논문에서 사용한 LDPC 복호 알고리즘은 SP 알고리즘으로, LDPC 복호기는 크게 4가지 과정을 수행한다. 첫 번째는 수신 비트에다가 채널 추정 값을 구하는 초기화 과정, 체크 노드 확률을 구하는 체크 노드 업데이트 과정, 비트 확률을 구하는 비트 노드 업데이트 과정, 마지막으로 판정 과정을 수행한다.

3-3 채널 추정 및 등화

OFDM 시스템에서 주파수 영역 훈련 신호는 채널의 출력으로부터

$$Y(k) = Y_R(k) + jY_I(k) \quad (7)$$

다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X(k) = X_R(k) + jX_I(k). \quad (8)$$

채널 추정은 $X(k)$ 와 $Y(k)$ 로부터 다음과 같다.

$$H_p = \frac{Y(k)}{X(k)}. \quad (9)$$

채널 추정을 위한 훈련 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X(k) = 1 \quad \text{or} \quad -1 (\text{with } X_I(k) = 0). \quad (10)$$

채널 추정 신호는 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$H_p = \frac{Y(k)}{X(k)} = \frac{Y_R(k) + jY_I(k)}{X_R(k)}. \quad (11)$$

긴 훈련 신호는 두 번 반복된 훈련 신호가 포함되어 있기 때문에 채널 출력의 FFT 평균으로 채널 추정을 더 정확하게 할 수 있다.

$$H_p = \frac{1}{2} \frac{Y_1(k) + Y_2(k)}{X(k)}. \quad (12)$$

그래서 추정된 채널은 다음과 같이 채널의 영향을 보상하기 위해 등화할 수 있다.

$$\hat{X}(k) = \frac{Y'}{\hat{H}_p}. \quad (13)$$

3-4 제안하는 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기

그림 2는 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기의 피드백 시스템의 세부 블록도를 보여준다. 다음과 같은 그림은 OFDM 수신기에서 FFT 이후의 세부 시스템이다. Preamble에서 송수신기에서 미리 알고 있는 훈련 신호를 보내서 채널과 시스템 성능을 저해하는 요소들에 의한 신호 왜곡을 추정할 수 있다.

그리고 LDPC decoder 이후에 신호인 L_s 와 Decision 후 신호인 L_d 의 MSE 연산을 이용하여 긴 훈련 신호로 추정된 채널 H_p 를 보정하는 C_F 값을 주파수 도메인 1-tap 등화기로 피드백해준다. 그 이후에 수신된 데이터를 보정된 채널특성 $\hat{H}_p$ 값으로 보상한다.

$$\tilde{L}_s = \text{norm}(L_s) \quad (14)$$

그림 2. LDPC 기반 결정 궤환 등화기의 블록도
Fig. 2. Block diagram of DFE based on LDPC.

$$\hat{L}_k = \sum_{k \in s_d} \tilde{L}_s^* L_d \quad (15)$$

$$C_F = \frac{\hat{L}_k}{\sum_{k \in s_d} |\tilde{L}_s|^2} \quad (16)$$

$\hat{H}_p$ 는 훈련 신호를 이용하여 채널 추정을 한 이후의 특성이다.

$$\hat{H}_p = H_p + C_F. \quad (17)$$

보정된 채널 특성이 다음 수식을 통하여 등화과정을 거치고 성능을 향상시킨다.

$$Y'_k = \frac{Y_k}{\hat{H}_p}. \quad (18)$$

피드백이 없는 일반적인 채널 추정과 등화기는 H_p 로 등화 과정을 거쳐서 채널을 보상하지만, 제안하는 결정 궤환 등화기는 $H_p + C_F$ 인 과정을 통하여 $\hat{H}_p$ 을 더 정확한 채널 추정이 가능하도록 보정해준다.

IV. 시뮬레이션 결과

표 1은 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기를 위한

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameters	Values
# of data subcarriers	52
# of pilot subcarriers	4
# of padded zeros	8
FFT size	64
# of samples in a GI (CP length)	16
Modulation	QPSK
Code rate	3/4
Parity check matrix size	720
# of iteration	3, 5, 8
Multipath channel	SUI model
Normalized CFO	0.03
Phase noise power	-12 dBc
Phase noise cutoff frequency	10e3
Phase noise floor	-120 dBc

시스템 파라미터이다. 본 논문에서는 IEEE 802.11n 형식으로 고려하였다. LDPC의 부호화율은 3/4이고, parity 검사 행렬의 사이즈는 720이다. 그리고 시뮬레이션에서는 AWGN과 다중 경로 채널을 고려하였다. 다중 경로 채널은 Stanford University Interim(SUI) 보행자 모델을 사용하였다. 그리고 정규화된 CFO는 0.03이고, 위상 잡음의 전력은 -12 dBc으로 고려하였다.

그림 3은 AWGN 환경에서 3/4 부호화율에 720 크기의 패리티 검사 행렬을 가지는 LDPC 복호기의 반복 횟수에 따른 BER 곡선을 보여준다. LDPC 부호에서는 반복 횟수가 중요한 파라미터 중에 하나이다. 오류 확률이 10^{-4} 일 때, 반복 횟수가 8번인 경우가 5번인 경우보다 약 0.5 dB의 이득을 얻는 것을 확인할 수 있다. 반복 횟수가 많아질수록 BER 성능이 향상되는 것을 보이지만, 반복 횟수가 증가하면 할수록 LDPC 복호기의 복잡도가 크게 증가함을 알 수 있다. LDPC 복호기는 Sum-Product 알고리즘을 통하여 복호하는데 복잡도는 곱셈 연산에 크게 좌우되기 때문에 반복 횟수와 복잡도는 밀접한 관계를 가진다. 그리고 LDPC 복호기에서는 반복적인 계산으로 인하여 복호 지연이 생기게 된다. LDPC 복호기에서는 체크 노드와 비트 노드의 확률을 구하는 업데이트 과정을 반복 횟수에 따라 수행하게 된다. 따라서 복호 지연은 반복 횟수와 밀접한 관련이 있고, 정보의 크기 부호화율과의 관련이 깊다. 하지만 본 논문에서는 복호 지연으로 생기는 문제에 대해서는 고

그림 3. AWGN에서 반복 횟수에 따른 BER
Fig. 3. BER according to iteration number in AWGN.

그림 4. CFO가 있는 경우의 BER 비교
Fig. 4. Comparison of BER considering CFO.

려하지 않고 완벽하게 동기가 이루어진다고 가정을 하고 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 4는 CFO만 고려된 상황에서 LDPC 기반 결정 궤환 등화기와 피드백이 포함되지 않은 시스템의 성능을 비교한 결과이다. 표 1에 언급한 시스템 파라미터와 동일하게 정규화 된 CFO는 0.03으로 고려하여 시뮬레이션 하였다. 다중 경로 채널은 Stanford University Interim 모델을 사용하였다. LDPC의 반복 횟수는 5번이고, 부호화율을 3/4로 가진다. LDPC 기반 결정 궤환 등화기의 성능이 10^{-3} 에서 채널 추정과 등화를 하지 않은 경우보다 약 0.25 dB 개선된 성능을 보인다. CFO 성분에 의해 영향을 받은 훈련 신호를 추정하여 등화하기 때문에 그림 4와 같이 채널 추정 및 등화를 하지 않은 경우보다 향상된 성능을 볼 수 있다.

그림 5는 위상 잡음만 고려된 상황에서 LDPC 기반 결정 궤환 등화기와 피드백이 포함되지 않은 시스템의 성능을 비교한 결과이다. 표 1에 언급한 위상 잡음 파라미터를 고려하여 시뮬레이션 하였다. 위상 잡음 전력은 -12 dBc이고, cutoff 주파수는 1 kHz이며, 위상 잡음 floor는 -120 dBc이다. 여기서도 역시 다중 경로 채널은 Stanford University Interim 모델을 사용하였다. LDPC의 반복 횟수, 부호화율 등은 그림 4에서 고려된 파라미터와 동일하다. 여기서도 역시 위상 잡음에 의해 영향을 받은 훈련 신호를 추정하여 등화하기 때문에 채널 추정 및 등화를 하지

그림 5. 위상 잡음이 있는 경우 BER 비교
Fig. 5. Comparison of BER considering phase noise.

않은 경우보다 향상된 성능을 볼 수 있다.

그림 6은 CFO와 위상 잡음이 함께 고려된 상황에서 LDPC 기반 결정 궤환 등화기와 피드백이 포함되지 않은 시스템의 성능을 비교한 결과이다. 표 1에 언급한 CFO와 위상 잡음 파라미터를 고려하여 시뮬레이션 하였다. 정규화된 CFO는 0.03이고, 위상 잡음 전력은 -12 dBc이고, cutoff 주파수는 1 kHz이며, 위상 잡음 floor는 -120 dBc이다. 여기서도 역시 다중 경로 채널은 Stanford University Interim 모델을 사용하였다. LDPC의 반복 횟수, 부호화율 등은 그림 4, 5에서 고려된 파라미터와 동일하다. 여기서도 역시 CFO와 위상 잡음에 의해 영향을 받은 훈련 신호를

그림 6. CFO와 위상 잡음이 있을 때 BER 비교
Fig. 6. Comparison of BER considering CFO and phase noise.

그림 7. LDPC 기반 결정 궤환 등화기의 성능 비교 (1)

Fig. 7. Comparison of BER of the DFE based on LDPC(1).

추정하여 등화하기 때문에 채널 추정 및 등화를 하지 않은 경우보다 향상된 성능을 볼 수 있다.

그림 7은 동일한 반복 횟수를 적용했을 때, LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기와 드백 과정이 포함되지 않고 결합하지 않은 형태의 BER 성능을 보여준다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기의 성능이 결합하지 않은 형태의 시스템보다 더 좋은 것을 보인다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기가 피드백이 포함되지 않은 시스템과 비교하면 10^{-4} 의 같은 오류 확률일 때, 약 0.25 dB가 더 좋다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기는 피드백을 통해 LDPC 복호기와 판정기를 거친 두 신호의 MSE 계산을 받기 때문에, 채널 추정된 신호가 더 정확하게 추정이 가능하다. 그러므로 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기는 CFO와 위상 잡음에 대해 더 정확한 보상이 가능하다.

그림 8은 각각 다른 반복 횟수에서 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기와 피드백이 포함되지 않은 등화기가 거의 비슷한 BER 성능을 나타내는 것을 보여준다. SNR 3.5 dB일 때는 두 방식의 BER 성능이 일치한다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기의 반복 횟수는 3번이고, 다른 경우에는 5번이다. LDPC의 복호기는 Sum-Product 알고리즘을 사용한다. 여기에서 복잡도는 곱셈 연산에 의해 크게 좌우되므로 반복 횟수가 많으면 많아질수록 복잡도는 반복 횟수와 연관이 많아진다. 따라서 반복 횟수가 낮은 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기가 그렇지 않은 경우와

그림 8. LDPC 기반 결정 궤환 등화기의 성능 비교 (2)

Fig. 8. Comparison of BER of the DFE based on LDPC(2).

비교하였을 때 낮은 복잡도를 가진다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 OFDM에서 CFO와 위상 잡음을 보상하기 위해 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기를 제안하였다. IEEE 802.11n 형식으로 시스템을 모델링을 하였다. 고속의 데이터를 전송하고 시스템의 성능을 향상하기 위하여 LDPC 채널 부호화 방법을 함께 사용하였다. 채널을 추정하기 위해서는 훈련 신호를 사용하였고, 결정 궤환 등화기를 통하여 등화 한다. 결정 궤환 등화기는 피드백 신호를 받는 부분이 포함되어 있기 때문에 LDPC 복호기 이후에 L_s 와 L_e 의 MSE 연산을 하였다. 그리고 MSE를 등화기로 피드백한다. 그렇기 때문에 채널 추정기는 $\hat{H}_p$ 과 같이 더 정확하게 추정이 가능하다. 그리하여 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기의 성능이 향상되게 된다. 또한, LDPC 복호기에서는 Sum-product 알고리즘을 사용하기 때문에 반복 횟수와 복잡도가 매우 밀접하게 연관되어 있다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기는 피드백을 포함하지 않은 시스템과 비교하면, 같은 오류 확률을 확보하기 위해서는 적은 반복 횟수를 가진다. 적은 반복 횟수를 가지기 때문에 LDPC 기반 결정 궤환 등화기의 복잡도는 낮아지게 된다. LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기는 CFO와 위상 잡음과 같은 ICI 성분이 고려될 때, 매우 우수

한 성능을 나타낸다. 그러므로 본 논문에서는 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기를 이용하여 OFDM에서 CFO와 위상 잡음을 보상한다고 할 수 있다. 또한, 성능 향상과 시스템의 복잡도를 줄임으로써 LDPC 코드 기반 결정 궤환 등화기가 실제 시스템에서 구현이 되고 높은 성능을 가지는 시스템이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. B. Weinstein, P. M. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform", *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. COM-19, no. 5, pp. 628-634, Oct. 1971.
- [2] Tristan de Couasnon, Raoul Monnier, and Jean Bernard Rault, "OFDM for digital TV broadcasting", *Signal Processing*, vol. 39, pp. 1-32, 1994.
- [3] A. Hac, *Multimedia Applications Support for Wireless ATM Networks*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000.
- [4] "Draft supplement to standard for telecommunications and information exchange between systems-LAN/MSN specific requirements-Part 11: wireless LAN and PHY specifications: high speed physical layer in the 5 GHz band", *IEEE, Piscataway, NJ*, P802.11a/D6.0, 1999.
- [5] "Broadband radio access networks(BRAN); High performance radio local area network(HIPERLAN) Type 2; Requirements and architectures for wireless broadband access", TR 101 031, 1999.
- [6] M. R. Golami, S. Nader-Esfahani, and A. A. Eftekhari, "A new method of phase noise compensation in OFDM", *ICC '03. IEEE International Conference on Communications*, vol. 5, pp. 3443-3446, 2003.
- [7] T. Pollet, M. van Bladel, and M. Moeneclaey, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise", *IEEE Trans on Comm.*, vol. 43, no. 2, pp. 887-895, 1995.
- [8] J. Beek, M. Sandell, and P. O. Brojesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 45, no. 7, pp. 1800-1805, 1997.
- [9] P. H. Moose, "A technique for OFDM frequency offset correction", *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 42, no. 10, pp. 2908-2914, 1994.
- [10] H. G. Ryu, H. S. Lee, "Analysis and minimization of phase noise the digital hybrid PLL frequency synthesizer", *IEEE Transactions Consumer Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 304-312, 2002.
- [11] S. B. Ryu, J. Kim, H. G. Ryu, and Y. Li, "PNS algorithm for the SC-FDMA communication system with phase noise", *Wireless and Optical Communications Networks, 2009 IFIP International Conference*, Apr. 2009.
- [12] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes", *IRE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-8, pp. 21-28, Jan. 1962.
- [13] D. J. MacKay, "Good error correcting codes based on very sparse matrices", *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, pp. 399-431. Mar. 1999.
- [14] D. J. MacKay, R. M. Neal, "Near Shannon limit performance of low density parity check codes", *Electronic Letters*, vol. 33, no. 6, pp. 457-458, Mar. 1997.
- [15] J. Chen, A. Dholakia, E. Eleftheriou, M. P. C. Fossorier, and X. Hu, "Reduced-complexity decoding of LDPC codes", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, pp. 1288-1299, Aug. 2005.

김 도 훈

2011년 2월: 충북대학교 전자공학
부 (공학사)
2011년 3월~현재: 충북대학교 전
자공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 정
보이론

유 흥 균

1988년~현재: 충북대학교 전자공
학과 교수
2002년 3월~2004년 2월: 충북대학
교 컴퓨터정보통신연구소 소장
2002년: 한국전자파학회 학술상 수
상
2008년: ICWMC 2008 국제학술대
회 "Best Paper Award" 수상
[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 위성 통신, B3G/4G 이동
통신 시스템, 통신 회로 설계 및 통신 신호 처리

최 진 규

1999년: 한양대학교 전자공학과 (공
학사)
2001년: 한양대학교 전파통신전자
공학과 (공학석사)
2001년~현재: 한국전자통신연구원
선임연구원
[주 관심분야] MIMO-OFDM, Digi-

tal RF Transceiver, SDR, CR.