

다중 채널 환경에서 터보 등화기 성능 분석

정 지 원*

Performance Analysis of Turbo Equalizer in the Multipath Channel

Ji Won Jung*

요 약

무선통신 시스템에서 신호의 다중경로 전달 과정에 의해 발생하는 지연 확산 현상 때문에 인접 심벌 간 간섭 (ISI, Inter-Symbol Interference)에 영향을 받는다. 본 논문에서는 다중 경로를 갖는 채널에서 채널 부호화 기법과 등화기가 결합하여 동작하는 터보 등화기를 갖는 시스템의 성능을 검증하였다. 그 결과 본 논문에서 사용한 터보 등화기를 이용하여 반복 복호를 하였을 때는, 1회 반복 시 BER 10⁻⁴을 기준으로 반복이 없는 등화기를 사용하였을 때 보다 1.5 dB 성능이 향상되었다. 또한 터보 등화기의 반복이 2, 3 회로 늘어남에 따라 약 3.5 dB 성능이 향상되었고, 3회 이상 반복하였을 때는 더 이상 성능이 향상되지 않음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

This paper investigates the performance of Turbo equalization in wireless multipath channels. Turbo equalization mainly consists of a SISO(soft-in soft-out) equalizer and a SISO decoder. Iterative channel estimators can improve the accuracy of channel estimates by soft information fed back from the SISO decoder. Comparing iterative channel estimators with LMS(least mean square) and RLS(recursive least squares) algorithms, which are the most common algorithms to estimate and track a time-varying channel impulse response, the iterative channel estimator with RLS converges more faster than the one with LMS. However, the difference of BER(bit error rate) performances gradually decreases as the number of iterations for Turbo equalization increases.

Keywords : Multipath Channel, Turbo Codes, Turbo Equalization, Least Mean Square. SISO

1. 서 론

이동통신 등과 같은 무선통신은 다중경로 등에 의해 크게 왜곡되며, 에서 고속 데이터 전송을 위하여 통신 채널 특성을 결정하는 시공간 변화에

의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 한다. 특히 다중경로는 시변 산란에 의해 도플러 확산과 직접파에 혼입되어 통신 채널의 특성을 좌우하게 된다. 이러한 채널 특

* 해양대학교 (jwjung@hhu.ac.kr)

접수일자 : 2012년 7월 30일, 수정일자 : 2012년 8월 13일, 심사완료일자 : 2012년 9월 2일

성의 시공간적인 변화는 디지털 통신에서 송신하는 심벌간의 상호간섭(Inter-Symbol Interference : ISI)을 야기하여 통신 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 이러한 비선형 복합 채널을 가지는 무선통신에서, 시간에 따라 채널의 특성이 매우 빠르게 변하는 시변 특성을 가지는 채널이므로, 이를 신뢰성이 있게 올바르게 복조하기 위해서는 송신단에서 여러 특성을 고려한 채널 부호화 방식과 결합된 효율적인 등화 알고리즘의 적용이 매우 중요하다.[1][2][3]

이에 본 논문에서는 이러한 다중 경로 환경에서 수신신호의 성능을 향상시키고저 수중통신에 적합한 반복부호와 결합하는 등화기를 연구하였다. 적용가능한 반복부호로는 터보 부호와 LDPC 부호가 있으며, 성능 및 부호화 길이, 등화기 적용 등의 파라메타를 기반으로 터보 부호의 적용이 적합하다. 수신단에서 등화기와 채널 복호기 사이에 반복적인 연산 과정을 통해 심벌 간 간섭을 크게 줄일 수 있는 터보 등화기에 대한 연구가 이루어져 왔으며, 최근에는 여러 이동 통신시스템에도 적용되고 있다. Oberg 등은 선형 등화기와 터보 복호화를 이용하여 4-QAM 변복조로 전송하여 평균 2.88 kbps의 전송율을 얻었으며 [6], Magnus 등은 터보 등화기와 Alamouti 구조를 이용한 MIMO 시스템을 제안하였다. 또한 Choi 등은 직접 적응형 터보 등화기와 선형 MMSE (Minimum Mean Squared Error) 터보 등화기를 MIMO 시스템에 적용하여 성능을 비교하였다. 하지만 국내의 경우 아직 실제 터보 등화기를 적용한 연구 사례는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 다중 경로를 갖는 채널에서 채널 부호화 기법과 등화기가 결합하여 동작하는 터보 등화기를 갖는 시스템의 성능을 검증하였다. 그 결과 본 논문에서 사용한 터보 등화기를 이용하여 반복 부호를 하였을 때는, 1회 반복 시 BER 10⁻⁴을 기준으로 반복이 없는 등화기를 사용하였을 때 보다 1.5 dB 성능이 향상되었다. 또한 터보 등화기의 반복이 2, 3 회로 늘어남에 따라 약 3.5 dB 성능이 향상되었고, 3회 이상 반복하였을 때는 더 이상 성능이 향상되지 않음을 알 수 있었다.

II. 터보 부호기반의 터보등화기

본 논문에서는 이러한 다중 경로 환경에서 수신신호의 성능을 향상시키고저 다중경로 통신에 적합한 반복부호를 설정하였다. 적용가능한 반복부호로는 터보 부호와 LDPC 부호가 있다. DVB-RCS를 기반으로 하는 터보 부호는 기존의 1 bit를 입력하여 출력하는 binary 부호가 아니라 2 bit를 입력하고 출력하는 이진 바이너리(double binary) 부호이다. 이진 바이너리 구조의 CRSC (Circular Recursive Systematic Convolution) 부호는 반복 부호 기법을 이용하여 Shannon이 제시하는 이론적 한계값에 매우 근접하는 우수한 오류정정 능력을 보이고 있다. 하지만 높은 SNR에서는 오류 마루 현상이 존재하여 이를 극복하기 위해 DVB-RCS NG 부호화 방식인 터보 Pi 부호기 구조를 사용하였다. 이러한 터보 Pi 부호화기는 기존의 이진 바이너리 구조를 이용하는 터보 구조와 동일하며, 단지 16상태를 이용하는 구조이다.[4]

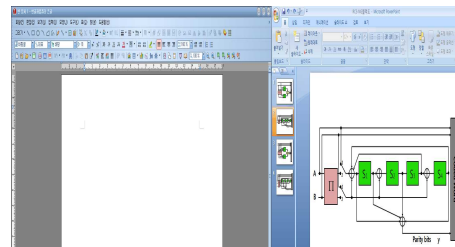


그림 1. 터보 Pi 부호기 구조
Fig. 1 The structure of turbo pu codes

기존의 터보 부호화기는 3개의 S1,S2,S3 메모리를 가지며 8-state로 구성되어 있다. 본 논문에서 적용한 그림 1과 같은 터보 Pi 부호화기는 4개의 메모리를 가지며 16개의 state를 이용하여 각각의 상태가 가지는 해밍거리차이를 더 크게 만들어 오류 마루 현상을 제거할 수 있는 구조이다.

터보 등화기는 기존의 등화기보다 좋은 성능을 보이지만 원래 MAP(Maximum a Posteriori) 알고리즘을 사용하기 때문에 복잡도가 채널 길이 등에 대해 지수적으로 증가하는 단점이 있다. 이

러한 이유로 인해 터보 등화기의 복잡도를 줄이기 위한 방법으로 MAP 등화기보다 복잡도가 적은 선형 등화기나 결정 궤환 등화기를 사용하는 방법이 있는데 본 논문에서는 결정 궤환 등화기를 갖는 터보 등화기를 고려하였다. 그림 1과 같은 시스템 모델을 고려하자. 테이터는 채널 부호화기를 거치고 난 뒤 인터리버, 심벌 매핑 후 변조기를 통과한다. 전송된 심벌은 채널을 통과한 후 백색 가우시안 잡음이 더해진다. 수신단의 터보 등화기는 등화기와 복호기로 구성되어 있으며, 등화기와 복호기는 인터리버와 디인터리버를 통해 연결되어 서로의 정보를 반복해서 갱신한다. 인터리버는 송신측에서 한 개 블록 크기의 부호기 출력 값을 재배치시키고, 디인터리버는 인터리버의 역 과정을 거쳐 송신신호를 복원한다. 복호기에서 출력한 피드백 정보는 다시 인터리빙 과정을 거쳐 정정된 신호를 등화기에 재입력한다. 송신된 신호는 수중채널을 거치고 백색 가우시안 잡음이 더해져 수신 신호 y_n 이 된다. 기저대역으로 변환한 후 LLe는 결정 궤환 등화기의 출력 값으로 수신 신호 y_n 으로부터 등화기에서 추정되어진 extrinsic 값이다.

$y[k]$ 는 k 시점에서의 등화기 입력 값이라 하면, 등화기의 출력값은 다음 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$L_e^I[k] = \sum_{i=0}^{N_c-1} c_i[k]y[k-i] - \sum_{j=1}^{N_c} b_j[k]\widehat{L}_e^I[k-j] \quad (1)$$

$c_i[k]$ ($i = 0, 1, \dots, N_c-1$)는 k 시점에서의 포워드 등화기의 탭 계수이며 $\widehat{L}_e^I[k]$ 는 정상도 상에서 $L_e^I[k]$ 에 가장 가까운 점들인 slicer 출력 값이다.

결정 궤환 등화기에서 피드포워드와 피드백 필터 탭을 업데이트하는 알고리즘은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} c_j[k+1] &= c_j[k] - \mu e_D[k]y[k-i], \\ b_j[k+1] &= b_j[k] + \mu e_D[k]\widehat{L}_e^I[k-i], \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 μ 는 스텝 사이즈이고 $e_D = L_e^I[k] - \widehat{L}_e^I[k]$ 는 DD(Decision-directed) 에러이다.

블라인드 모드에서 SAG(Stop And Go) 알고리즘을 사용하는 블라인드 모드에서 필터 탭 계수는 아래 식을 통해 업데이트 된다.

$$\begin{aligned} c_j[k+1] &= c_j[k] - \mu f[k]e_D[k]y[k-i], \\ b_j[k+1] &= b_j[k] + \mu f[k]e_D[k]\widehat{L}_e^I[k-i], \end{aligned} \quad (3)$$

$f[k]$ 는 아래 식으로 정의된다.

$$f[k] = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}\{e_D[k]\} = \text{sgn}\{e_s[k]\} \\ 0 & \text{if } \text{sgn}\{e_D[k]\} \neq \text{sgn}\{e_s[k]\}, \end{cases} \quad (4)$$

$\text{sgn}\{\cdot\}$ 은 아래와 같이 정의되는 시그넘 함수이다.

$$\text{sgn}\{x\} = \begin{cases} -1 & \text{when } x < 0 \\ 0 & \text{when } x = 0 \\ +1 & \text{when } x > 0, \end{cases} \quad (5)$$

$e_s[k]$ 는 아래와 같은 Sato 에러이다.

$$e_s[k] = L_e^I y[k] - \gamma \text{sgn}\{L_e^I[k]\} \quad (6)$$

여기서 γ 는 아래와 같은 상수 값이다.

$$\gamma = \frac{E[|a[k]|^2]}{E[|a[k]|]} \quad (7)$$

LDe의 값은 결정 궤환 등화기의 출력 값 LLe와 LIc의 차를 디인터리빙하여 계산되어져 터보 복호기로 입력되어 진다. 터보 복호기에서 추정되어진 extrinsic 값 LDc 은 식 (8)과 같이 구할수 있다.

$$L_c^D = \log \frac{P(x=+1)}{P(x=-1)} \quad (8)$$

LDc 와 LDe의 차의 값을 다시 인터리빙하여 LIc를 계산하여 결정 궤환 등화기에 입력된다.

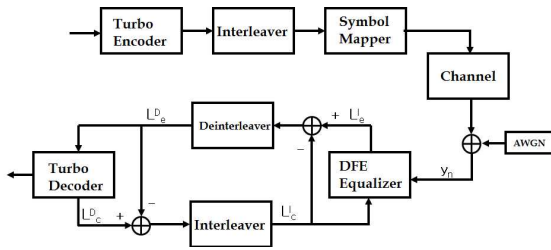


그림 2. 기저대역에서 터보 등화기 모델
Fig. 2. Model of the turbo equalization in baseband.

III. 다중 채널 모델링 및 시뮬레이션 결과

채널 부호화기는 부호화율이 1/3을 가지고 등화기는 LMS(Least Mean Square) DFE(Decision Feedback Equalizer)를 적용하였다. 다중경로를 포함한 채널 모델링은 다음과 같다. 채널 임펄스 응답은 송신신호가 수신기에 도달할 때까지의 정보를 나타낸다. 이러한 채널 임펄스 응답을 통하여 송수신기 위치에 따른 시·공간적인 채널 응답 특성과 채널에서의 송신시간에 대한 도달 시간의 시변동성을 확인할 수 있다. 이에 preamble 데이터를 이용하여 채널 응답 특성을 추정하였으며, 이를 그림 4에 나타내었다. 그림은 시간에 따라 변동 특성을 보이면서 6개 정도의 dominant reflection들을 보여준다.

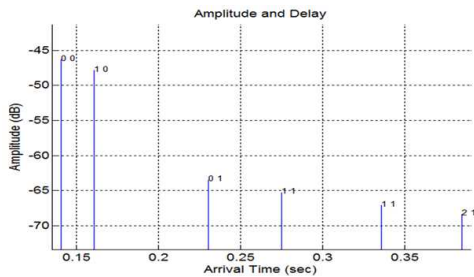


그림 3. 채널 모델링
Fig. 3. Channel Modeling

그림 4의 BER 성능에 따르면 반복 복호가 없

는 일반적인 방법의 등화기를 이용하였을 때는 BER 10^{-4} 을 기준으로 약 $E_b/N_0=7.5$ dB에서 만족할만한 성능이 나타났다. 이에 비해 본 논문에서 사용한 터보 등화기를 이용하여 반복 복호를 하였을 때는, 1회의 반복을 하였을 때에는 10^{-4} 을 기준으로 반복이 없는 등화기를 사용하였을 때보다 1.5 dB 성능이 향상되었다. 또한 터보 등화기의 반복이 2, 3 회로 늘어남에 따라 약 3.5 dB의 성능이 향상되었고, 3회 이상 반복하였을 때는 더 이상 성능이 향상되지 않음을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서의 실험환경에서는 터보 등화기의 반복횟수는 3회가 적합함을 알 수 있다.

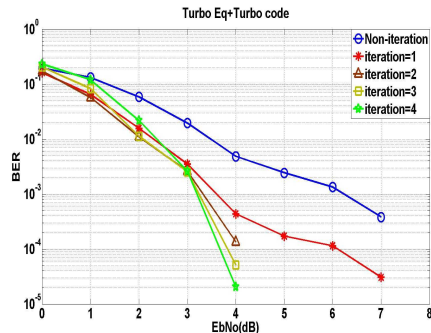


그림 4. BER 성능
Fig. 4. BER Performance

IV. 결론

이동통신과 같은 무선통신 채널은 다중 경로 전달 특성을 가지므로 심벌 간 간섭 현상에 의해 성능이 크게 저하된다. 이를 극복하기 위해 국외에서는 최근 터보 등화기를 적용하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 이에 본 논문에서는 6개의 다중 경로를 가지는 채널에서 결정 궤환 등화기를 사용하는 터보 등화기의 성능을 분석하였다. 그 결과 터보 등화기의 반복 수행 과정을 통해 성능의 이득을 얻을 수 있었으며, 소프트 정보를 사용함으로써 정확도를 향상시킬 수 있었다. 또한 반복 횟수가 증가함에 따라 BER 성능의 차이는 감소함을 확인할 수 있었다. 향후 본 논문과 같은 SISO(Single-Input Single-Output) 채널뿐만 아니라 MIMO (Multiple- Input Multiple-Output)에서 터보 등화기 적용에 대한 연구가 이루어질 예정이다.

