

주파수 선택적 페이딩 채널에서의 다이버시티 수신 터보 등화 및 복호화

임동민

경상대학교 전기전자공학부

전화 : 0591-751-5356, 팩스 : 0591-759-7814

Turbo Equalization and Decoding with Diversity Reception on the Frequency-Selective Fading Channel

Dongmin Lim

Department of Electrical and Electronic Engineering

Gyeongsang National University

E-mail : dmlim@gsnu.ac.kr

Abstract

In this paper, a method based on the turbo principle is presented which combines diversity reception, equalization, and channel decoding, to combat the high transmission losses over the frequency-selective fading channel. The simulation results show that with the method presented, the BER performance within 0.3 dB from that on the AWGN channel can be obtained over the frequency-selective fading channel in the investigated scenarios.

I. 서론

수신기 내의 여러 모듈 사이에서 연관성에 의한 정보를 반복적으로 교환하는 터보 원리 (turbo principle) 는 채널 부호화뿐만 아니라 코드화된 변조 (coded modulation), 채널 등화 (channel equalization), 다중이용자 검출 (multiuser detection) 등 여러 가지 통신 신호처리 분야에 적용될 수 있다 [1]. 채널 등화의 분야에서는 신호의 검출에 채널 복호화기를 심벌상호간의 간섭 (intersymbol interference: ISI)을 제거하는 MAP 검출기와 직렬 연결시키는 구조가 제안되었으며 채널 부호로 컨벌루션 부호 [2],[3], 병렬 연결 부호 [4], 직렬 연결 부호를 [5] 사용하여 ISI를 극복하는 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 위에서 언급한 논문에서는 ISI를 가지는 AWGN 채널 또는 주파수 선택적 페이딩 채널이 고려되었으며 페이딩 채널의 경우 페이딩 극복에 효과적인 다이버시티 수신 방식은 고려되지 않았다. 본 논문에서는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 다이버시티 수신 방식을 터보 등화 및 복호화에 결합시키는 방안을 제시하고 컴퓨터 모의실험을 통하여 비트

에러율 (BER) 성능을 분석한다. 제 2 절에서는 본 논문에서 사용하는 채널 모델, MAP 검출기, 터보 복호기 등을 포함하는 시스템 모델에 대하여 설명하고, 제 3 절에서는 모의 실험 방법에 대하여 설명하고 결과를 분석하며, 제 4 절에 결론을 기술한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 다루는 시스템의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 송신부는 채널 부호화기와 인터리버 (interleaver: Π)로 구성되어 있으며 수신부는 다이버시티 수신 MAP 검출기가 디인터리버 (deinterleaver: Π^{-1})를 통하여 채널 복호화기와 직렬 연결되어 있다. 채널 부호화에는 일반적인 채널부호가 이용될 수 있으며 보다 우수한 비트에러율 성능을 얻기 위해서는 병렬 연결 또는 직렬 연결 부호를 이용하는 것이 효과적이다. 병렬 연결 또는 직렬 연결 부호를 이용하는 경우 수신부의 채널 복호화기 (turbo decoder)의 구조는 참고문헌 [4]와 [5]에 설명되어 있다.

주파수 선택적 페이딩 채널의 모델링에는 구조가 간단하여 다루기 쉬운 등가 이산적 백색 잡음 필터 모

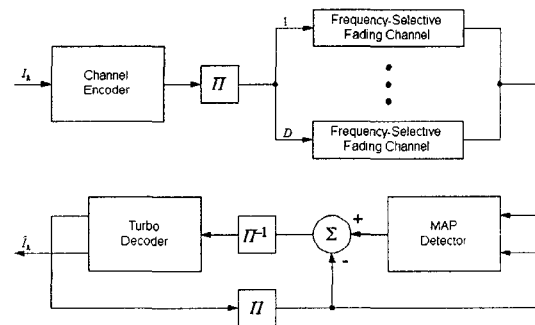


그림 1 시스템 모델

델 (equivalent discrete-time white noise filter model [6])이 일반적으로 널리 이용되고 있다. 이 채널 모델에서는 송신부의 전송 필터, 채널 특성, 수신부의 정합 필터 (matched filter), 표본기 (sampler), 이산 백색 잡음화 필터 (discrete-time noise-whitening filter)의 직렬 연결 프로세스를 백색 가우스 잡음이 부과된 하나의 이산 트랜스버설 필터 (discrete-time transversal filter)로 나타낸다. 다이버시티 수신인 경우 d 번째 수신 신호 또는 채널은 다음과 같이 표시할 수 있다 [6].

$$y_k^{(d)} = \sum_{n=0}^L g_{k,n}^{(d)} x_{k-n} + \eta_k^{(d)} \quad (1)$$

위 식에서 $\{x_k\}$ 는 채널 입력, $\{y_k^{(d)}\}$ 는 d 번째 채널의 출력, $\{g_{k,n}^{(d)}\}$ 은 d 번째 채널 필터의 k 시점에서의 탭계수 (tap coefficients), $\{\eta_k^{(d)}\}$ 은 d 번째 채널의 부과 백색 가우스 잡음, L 은 채널 메모리 길이를 나타낸다. 레일리 페이딩 채널의 경우 $\{g_{k,n}^{(d)}\}$ 는 평균이 0인 복소 가우스 랜덤 프로세스로 나타나며 d 와 n 에 따라 상호 상관관계를 가질 수도 있다.

본 논문에서는 터보 등화 및 복호화에 maximum a posteriori probability (MAP) 모델을 이용하며 MAP 알고리즘에 대해서는 다양한 연구 결과가 발표되고 있다 [8]-[11]. 터보 복호화에 이용되는 MAP 모델은 참고문헌 [4],[5],[11] 등을 참조하였으며 다이버시티 수신을 포함하는 MAP 검출기 모듈의 구조 및 알고리즘은 다음과 같다. 주파수 선택적 페이딩 채널은 이산적 등가 시변 트랜스버설 필터로 모델링할 수 있으며 따라서 그 트렐리스 구조는 그림 2와 같이 도시할 수 있다 [11]. 이진 변조 전송 방식의 경우를 가정하면 트렐리스의 상태 변화를 표시하는 가지 (edge) e 는 다음과 같은 4 가지 요소를 가진다.

- i) 시작상태: $s^S(e)$
- ii) 종료상태: $s^E(e)$
- iii) 입력 비트: $u_k(e)$
- iv) 출력 신호: $\vec{z}_k(e)$

출력신호 벡터 $\vec{z}_k(e)$ 는 D 개의 신호 경로를 가지는 다이버시티 수신인 경우 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\vec{z}_k(e) = (z_k^{(1)}(e), z_k^{(2)}(e), \dots, z_k^{(D)}(e)) \quad (2)$$

$$z_k^{(d)}(e) = \sum_{n=0}^L g_{k,n}^{(d)} (2u_{k-n}(e) - 1)$$

식 (2)에서 $\{u_{k-n}(e), n=1, \dots, L\}$ 값은 시작상태 $s^S(e)$ 로부터 구할 수 있다. 이러한 트렐리스 구조를 가지는 경우 MAP 알고리즘을 구현하는 MAP 검출기 모듈은 그림 3과 같이 3 개의 입출력 단자를 가진다.

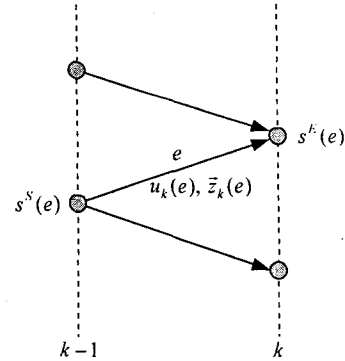


그림 3 채널 트렐리스의 부분도

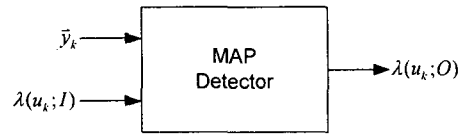


그림 3 MAP 검출기

그림에서 입력 \vec{y}_k 는 식 (1)과 같이 표시되는 D 다이버시티 수신 채널 신호 벡터이며 $\lambda_k(B; \cdot)$ 는 식 (3)과 같이 정의되는 비트 B 에 대한 신뢰도 (log-likelihood ratio)를 나타낸다.

$$\lambda(B; \cdot) = \log \frac{P(B=1)}{P(B=0)} \quad (3)$$

그림 3의 MAP 모듈의 입출력 관계식은 식 (4)~(6)과 같이 정리된다 [7],[11]. 식 (4)~(6)에서 r_c 는 채널부호화율 (code rate), E_b 는 비트당 에너지, N_o 는 잡음 전력밀도함수를 나타내며 $\max^*\{\cdot\}$ 함수는 식 (7)과 같이 정의된다. 식 (7)에서 보정함수 $\delta(\cdot)$ 는 일차원 lookup table을 이용하는 반복적인 연산으로 처리할 수 있으며 8 개의 저장값으로 충분히 우수한 결과를 얻을 수 있다 [9].

$$\lambda(u_k; O) = \max^*_{\{e | u_k(e)=1\}} \{ \alpha_{k-1}(s^S(e)) + u_k(e)\lambda(u_k; I) - (r_c/D)(E_b/N_o) | \vec{y}_k - \vec{z}_k(e) |^2 + \beta_k(s^E(e)) \} \quad (4)$$

$$- \max^*_{\{e | u_k(e)=0\}} \{ \alpha_{k-1}(s^S(e)) + u_k(e)\lambda(u_k; I) - (r_c/D)(E_b/N_o) | \vec{y}_k - \vec{z}_k(e) |^2 + \beta_k(s^E(e)) \}$$

$$\alpha_k(s) = \max^*_{\{e | s^E(e) = s\}} \{ \alpha_{k-1}(s^E(e)) + u_k(e)\lambda(u_k; I) - (r_c/D)(E_b/N_0) | \vec{y}_k - \vec{z}_k(e) |^2 \} \quad (5)$$

$$\beta_k(s) = \max^*_{\{e | s^E(e) = s\}} \{ \beta_{k+1}(s^E(e)) + u_{k+1}(e)\lambda(u_{k+1}; I) - (r_c/D)(E_b/N_0) | \vec{y}_{k+1} - \vec{z}_{k+1}(e) |^2 \} \quad (6)$$

$$\max_i^* \{a_i\} = \log \left\{ \sum_{i=1}^N \exp(a_i) \right\} = \max_i \{a_i\} + \delta(a_1, a_2, \dots, a_N) \quad (7)$$

III. 모의실험 및 결과

컴퓨터 모의실험에 수행한 시스템의 세부 사항을 송신부, 페이딩 채널, 수신부 순서로 정리하면 다음과 같다. 전체적으로 시스템은 이진 (binary) 정보 또는 신호를 다루며 변조 방식에는 BPSK (또는 QPSK)를 가정하였다. 송신부의 채널부호화에는 식 (8)과 같은 생성 매트릭스 (generator matrix)를 가지는 recursive systematic convolutional (RSC) code를 병렬 연결하여 사용하였다.

$$G(D) = \left[1, \frac{1+D^2}{1+D+D^2} \right] \quad (8)$$

입력은 1024 비트가 하나의 블록으로 처리되며 랜덤 방식의 인터리버를 거쳐 최종 전송되는 프레임의 길이는 3×1024 비트가 된다. 주파수 선택적 페이딩 채널은 채널 필터의 탭수 ($L+1$)가 3이며 최대 ISI 손실을 갖는 식 (9)와 같은 레일리 페이딩 채널을 고려하였으며 다이버시티 수신에 의한 각 페이딩 신호는 서로 통계적으로 독립적인 (statistically independent) 경우를 고려하였다 [6],[7].

$$E\{g_{k,n}^{*(d)} g_{k+1,m}^{(d)}\} = \begin{cases} \sigma_n^2 J_0(2\pi l T), & n = m \\ 0, & n \neq m \end{cases} \quad (9)$$

$$\{\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2\} = \{1/2, 1/\sqrt{2}, 1/2\}$$

식 (9)에서 $J_0(\cdot)$ 는 0차 제 1 종 베셀 함수를 나타내며 T 는 한 비트의 전송시간이다. 모의실험에서는 다수의 독립적인 레일리 페이딩 신호를 생성하기 위하여 다이버시티 수신 시스템에 적합한 변형된 Jakes 모델을 이용하였다 [12]. MAP 모듈에서는 프레임 단위로 데이터를 처리하는 방식을 선택하였다. 프레임 단위의 데이터 처리 방식에서는 일반적으로 하나의 RSC 부호의 트래리스를 일정한 상태로 중단시키는 방법이 이용되고 있다. 본 모의실험에서는 두 개의 RSC 부호의 트래리스를 모두 중단시키지 않고 다음과 같은 조건을

부과하는 방식을 이용하였다 [8].

$$\alpha_0(s) = \begin{cases} 0, & s = 0 \\ -\infty, & s \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta_K(s) = \alpha_K(s), \quad \forall s$$

식 (10)에서 K 는 종단 시점에 해당한다.

그림 4에 위에서 언급한 주파수 선택적 레일리 페이딩 채널에서 다이버시티 수신을 하는 반복적인 터보 등화 및 복호화를 10회 수행하여 얻은 비트에러율 (BER) 성능을 도시하였다. 모의실험에서는 채널의 페이딩, 잡음 전력에 대한 정확한 추정이 가능한 이상적인 경우를 가정하였다. 실제의 경우에는 채널에 대한 정확한 정보를 얻기가 힘들거나 추정치에 오차가 발생할 수 있으며 따라서 다소간의 성능 저하를 예상할 수 있다 [13]. 페이딩이 없는 고정된 계수의 ISI 채널의 경우 AWGN 채널에 비하여 BER 성능에서 약 1.0 ~ 1.5 dB 손실이 발생하고 있다 (BER < 10^{-5} 범위에서). 이 값은 채널부호화를 고려하지 않고 최적의 등화를 수행하는 경우의 이론적인 ISI 최대 손실 2.3 dB ($L+1$ 이 3인 경우) 보다 작은 값이다. 주파수 선택적 페이딩 채널은 시변 ISI 채널에 해당하며 이 경우에는 수신 신호의 페이딩에도 불구하고 고정된 ISI 채널에 비해 약 0.5 ~ 1.0 dB 정도 우수한 BER 성능을 나타내고 있다. 이것은 신호의 페이딩으로 인하여 최대 손실을 내는 ISI 계수 조건 (식 (9)의 계수)에서 벗어나기 때문이며 또한 ISI 현상이 일종의 전송 다이버시티에 해당하여 페이딩의 영향을 감소시키기 때문이다 [14]. 2개의 다이버시티 경로를 사용하는 경우 BER 성능은 AWGN 채널의 성능에 약 0.3 dB 이내로 접근함

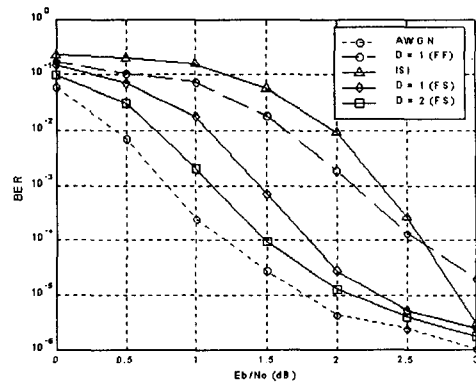


그림 4 주파수 선택적 페이딩 채널에서 다이버시티 수신 터보 등화 및 복호화에 의한 BER 성능 (터보 반복 횟수: 10회, 인터리버 길이: 1024 FF: 주파수 비선택적 레일리 페이딩 채널, ISI: 시불변 최대 손실 ISI 채널, FS: 주파수 선택적 레일리 페이딩 채널, D: 다이버시티 경로수)

을 확인할 수 있다 ($BER < 10^{-5}$ 범위에서).

IV. 결론

주파수 선택적 페이딩 채널에서의 데이터 전송에 있어 다이버시티 수신, 등화, 채널복호화는 채널 품질 개선을 위해 널리 이용되는 대표적인 기법들이다. 본 논문에서는 다이버시티 수신, 등화, 채널복호화를 터보 원리로 결합시키는 방안을 제시하였으며 주파수 선택적 페이딩 채널 환경에서 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 채널 필터의 탭수 $L+1$ 이 3이 되는 주파수 선택적 페이딩 채널에서 병렬 연결 부호를 사용하고 인터리버의 길이가 1024인 경우 두 개의 경로를 가지는 다이버시티 수신 터보 등화 및 복호화를 통하여 AWGN 채널에서의 BER 성능에 0.3 dB 이내로 근접하는 결과를 얻을 수 있었다. 향후 과제에서는 본 논문에서 제시된 시스템 구조에서 직렬 연결 부호를 채널복호화에 사용하는 경우의 성능과 불완전한 채널 추정이 성능에 미치는 영향 등을 분석할 예정이다.

참고문헌

- [1] S. Benedetto, D. Divsalar, and J. Hagenauer, "Guest editorial, Concatenated coding techniques and iterative decoding: sailing toward channel capacity," *IEEE J. Select. Area. Comm.*, vol. 16, pp. 137 - 139, Feb. 1998.
- [2] C. Douillard, M. Jezequel, and C. Berrou, "Iterative correction of intersymbol interference: turbo-equalization," *European Trans. Telecomm.*, vol. 6, pp. 507 - 511, Sept./Oct. 1995.
- [3] A. Picart, P. Didier, and A. Glavieux, "Turbo-detection: a new approach to combat channel frequency selectivity," in *Proc. ICC'97, Montreal, Quebec, Canada, Jun. 1997*, pp. 1498 - 1502.
- [4] D. Raphaeli and Y. Zurai, "Combined turbo equalization and turbo decoding," *IEEE Comm. Letter.*, vol. 2, pp. 107 - 109, Apr. 1998.
- [5] Y. Li and W. H. Mow, "Iterative decoding of serially concatenated convolutional codes over multipath intersymbol-interference channels," in *Proc. ICC'99, Vancouver, British Columbia, Canada, Jun. 1999*, pp. 947 - 951.
- [6] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 3rd ed., McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [7] M.-C. Chiu and C.-C. Chao, "Performance of joint equalization and trellis-coded modulation on multipath fading channels," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 43, pp. 1230 - 1234, Feb./Mar./Apr. 1995.
- [8] P. Robertson, "Illuminating the structure of code and decoder of parallel concatenated recursive systematic (turbo) codes," in *Proc. GLOBECOM'94, San Francisco, CA, Dec. 1994*, pp. 1298 - 1303.
- [9] P. Robertson and E. Vilebrun, and P. Hoeher, "A comparison of optimal and sub-optimal MAP decoding algorithms operating in the log domain," in *Proc. ICC'95, Seattle, WA, Jun. 1995*, pp. 1009 - 1013.
- [10] J. Hagenauer, E. Offer, and L. Papke, "Iterative decoding of binary block and convolutional codes," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 42, pp. 429 - 445, Mar. 1996.
- [11] S. Benedetto, D. Divsalar, G. Montorsi, and F. Pollara, "A soft-input soft-output maximum a posteriori (MAP) module to decode parallel and serial concatenated codes," *JPL TDA Progress Report 42-127*, Nov. 15, 1996. (available from the JPL web site)
- [12] D. Lim, "On the Jakes fading model in the simulation of diversity systems," in preparation.
- [13] M.-C. Chiu and C.-C. Chao "Analysis of LMS-adaptive MLSE equalization on multipath fading channels," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 44, pp. 1684 - 1692, Dec. 1996.
- [14] J. H. Winters, "The diversity gain of transmit diversity in wireless systems with Rayleigh fading," *IEEE Trans. Vehi. Tech.*, vol. 47, pp. 119 - 123, Feb. 1998.