

논문 2010-2-2

최대 우도 등화기를 적용한 협력통신 시스템의 간섭 제거 성능

Performance of Interference Cancellation for Cooperative Communication Systems with Maximum Likelihood Equalizer

김주찬*, 김진영*

Joochan Kim and Jin Young Kim

요 약 본 논문에서는 최대 우도 (ML: maximum likelihood) 등화기를 적용한 협력통신 시스템의 성능을 분석하고 모의실험 하였다. 무선통신 시스템에서 통신 커버리지를 확장하기 위해서 다수의 중계기를 이용한 협력통신 개념이 적용된다. 중계기와 사용자 단말기는 모두 이동할 수 있는 것으로 가정한다. 따라서 두 개 이상의 중계기의 커버리지가 서로 겹칠 수 있다. 만약 원하는 신호와 간섭 신호가 동일 채널을 통해 전송되고 커버리지가 중복된 부분에 하나의 수신 단말이 존재한다면, 간섭신호로 인해 수신기의 성능은 열화된다. 따라서 본 논문에서는 통신 시스템의 성능을 향상시키고 간섭 신호의 영향을 제거하기 위해 최대 우도 등화기를 적용하였다. 협력통신 시스템의 성능은 비트 오류율 측면에서 평가되었다. 실험 결과로부터 최대 우도 수신기는 복잡도가 높지만 간섭 제거 성능이 우수한 것을 확인하였다.

Abstract In this paper, we analyze and simulate the performance of a cooperative communication system adopting a maximum likelihood (ML) equalizer. In wireless communication systems, cooperative communication schemes employing several relays can be applied for extending the communication coverage. It is assumed that both relays and user terminals can move. Therefore, coverages of two or more relays can overlap each other. If wanted and interfering signals are transmitted through the same channel and there are one terminal in the overlapped region, its performance is degraded due to interference. Hence, we use a ML equalizer for rejecting the effect of interfering signal and enhancing the communication system performance. The cooperative system performance is evaluated in terms of bit error probability. From the simulation results, it is demonstrated that the ML receiver shows good interference cancellation performance although its complexity is high.

Key Words : Cochannel interference, Cooperative communication, Interference cancellation, Maximum likelihood (ML) equalizer

I. 서 론

무선통신 시스템에서 중계기는 기본적으로 기지국의 셀 영역을 확장하거나 음영지역 문제를 해결하여 서비스 품질을 향상시키기 위해 사용되었다. 하지만 근래에

들어서는 협력 프로토콜을 이용하여 기지국과 단말기 사이에서 통신을 지원하고 다이버시티 이득으로 인한 전체 시스템 성능 향상을 도모하기 위해서 사용되기도 한다^[1-4].

다수의 중계기를 이용하여 협력통신을 하는 경우 인접한 중계기의 서비스 영역이 서로 겹칠 수 있다. 그리고 그림 1에서 보는 바와 같이 단말기가 이동중에 두

*정회원, 광운대학교 전자공학과
접수일자 2010.3.5, 수정일자 2010.4.15

중계기의 서비스 영역이 겹치는 부분에 들어왔을 경우, 단말기는 자신이 원하는 신호뿐만 아니라 원하지 않는 간섭 신호 역시 수신하게 된다. 게다가 만약 간섭 신호와 원하는 신호의 주파수 대역이 동일하다면 단말기는 원하는 신호와 간섭 신호를 구별할 수 없게 된다. 따라서 이러한 경우 협력통신을 통한 다이버시티 이득을 얻을 수 없게 되고, 결국 시스템 성능은 저하된다.

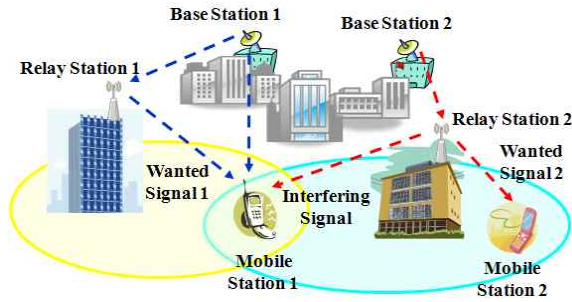


그림 1. 본 논문에서 고려한 간섭 시나리오
Fig. 1. Interference scenario considered in this paper

이와 같이 협력통신에서 중계기간에 발생하는 간섭 문제를 해결하기 위해서, 다수의 기지국과 이동국이 있는 통신 네트워크에서 multiuser zero-forcing 중계 기법 및 최적 중계기 이득 할당 기법^[5, 6]이 제안되었다. 또한 [7]에서는 기지국과 각 중계기간의 채널 정보를 이용하여 적절한 사전부호화 벡터를 선택하여 다수의 중계기간에 발생하는 동일채널 간섭 문제를 해결하는 방법이 제안되었다.

본 논문에서는 최대 우도 (ML: Maximum Likelihood) 등화를 적용한 협력 무선통신 시스템의 성능을 분석하고, 모의 실험을 통해 동일 채널 간섭이 존재하는 경우 간섭 제거 성능을 보였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 2장에서는 협력통신 시스템 모델 및 간섭 시나리오를 제시한다. 제 3장에서는 최대 우도 수신기를 이용한 간섭 제거 알고리즘에 대해 간략히 소개하고, 제 4장에서 제안한 시스템의 성능을 분석한다. 제 5장에서 모의 실험 결과를 제시하고, 마지막으로 제 6장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 협력통신 시스템 모델 및 간섭 시나리오

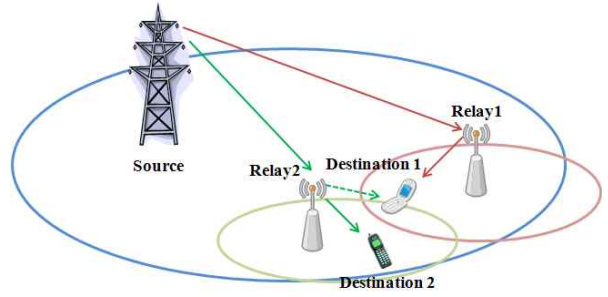


그림 2. 협력통신 시스템 모델
Fig. 2. Cooperative communication system model

그림 2는 본 논문에서 고려한 협력통신 시스템을 나타낸다. 협력통신 시스템에는 Source와 Relay 1, Relay 2, 및 Destination 1, Destination 2의 5개의 노드로 이루어져 있다. 각 노드들은 모두 2개의 안테나를 가지고 있다. Source와 Destination 1 및 Destination 2 사이에는 건물이나 산 등의 장애물이 있어서 Source에서 송신된 신호가 곧바로 Destination 1 및 Destination 2에 수신되지 않고, 반드시 Relay 1 및 Relay 2를 거쳐서 목적지에 수신된다. 그리고 모든 전송 경로는 각각 독립이라고 가정한다.

m 번째 Relay에서 수신된 신호는 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{Rm} = H_{Rm}X + N_{Rm} \quad (1)$$

여기서 $m = 1, 2$ 이고, $Y_{Rm} = [y_{1,Rm} \ y_{2,Rm}]^T$ 이며, $y_{1,Rm}$ 및 $y_{2,Rm}$ 은 Relay m 의 첫 번째 안테나와 두 번째 안테나에 수신된 신호를 나타낸다. $X = [x_1 \ x_2]^T$ 는 Source의 각 안테나에서 송신된 신호이다.

$H_{Rm} = \begin{bmatrix} h_{11,Rm} & h_{12,Rm} \\ h_{21,Rm} & h_{22,Rm} \end{bmatrix}$ 는 Source와 Relay m 사이의 채널 행렬을 나타낸다. 그리고 $N_{Rm} = [N_{1,Rm} \ N_{2,Rm}]^T$ 은 평균이 0이고 분산이 $\sigma_{Rm}^2 = [\sigma_{1,Rm}^2 \ \sigma_{2,Rm}^2]^T$ 인 복소 부가 백색 가우시안 잡음 (AWGN : Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다. n 번째 Destination에 수신된 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{Dn} = H_{Dn}\hat{X} + N_{Dn} \quad (2)$$

여기서 $Y_{Dn} = [y_{1,Dn} \ y_{2,Dn}]^T$ 이고, $y_{1,Dn}$ 및 $y_{2,Dn}$ 는 Destination n 의 첫 번째 안테나와 두 번째 안테나에 수신된 신호를 나타낸다.

$H_{Dn} = \begin{bmatrix} h_{11,Dn} & h_{12,Dn} \\ h_{21,Dn} & h_{22,Dn} \end{bmatrix}$ 는 Relay1 및 Relay 2와 Destination n 사이의 채널 행렬을 나타낸다. 그리고 $N_{Dn} = [N_{1,Dn} \ N_{2,Dn}]^T$ 은 평균이 0이고 분산이 $\sigma_{Dn}^2 = [\sigma_{1,Dn}^2 \ \sigma_{2,Dn}^2]^T$ 인 복소 AWGN을 나타낸다.

III. 간섭 제거 알고리즘

1. ZF 수신기

ZF 수신기에서는 간섭제거를 위해 다음과 같이 선형적인 검출기를 적용한다.

$$W_{ZF}H = I \quad (3)$$

여기서 $W_{ZF} = (H^H H)^{-1} H^H$ 는 ZF 복호 행렬이며, $(\cdot)^H$ 는 Hermitian 전치행렬을 나타낸다. $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$ 는 채널 행렬을 나타내며, h_{ij} 는 송신기의 j 번째 안테나에서 수신기의 i 번째 안테나로의 채널 계수를 나타낸다. 수신된 신호 Y 가 주어졌을 때, ZF 등화기로부터 추정된 신호를 얻을 수 있는데, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X} = W_{ZF}Y \quad (4)$$

여기서 $\hat{X} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2]$ 은 추정된 신호를 나타낸다. 만약 H 의 행렬식이 0이 아니라면 역행렬이 존재하게 되는데 이 때 복호 행렬은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{ZF} = H^{-1} \quad (5)$$

그리고 ZF 복호 후의 추정된 신호는 식 (6) 및 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{X}_1 = X_1 + \frac{h_{22}N_1 - h_{12}N_2}{h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}} \quad (6)$$

$$\hat{X}_2 = X_2 + \frac{-h_{21}N_1 + h_{11}N_2}{h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}} \quad (7)$$

ZF 알고리즘은 채널이 잡음이 없을 때는 이상적이지만 채널에 잡음이 추가된다면 채널의 부가 잡음이 증폭되어 시스템의 성능이 저하 될 수 있다.

2. MMSE 수신기

ZF 수신기의 단점을 극복하기 위해 잡음의 전력을 최소화하는 MMSE 수신기는 ZF 수신기보다 우수한 성능을 보인다. MMSE의 복호 행렬은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{MMSE} = \arg \min_{W_{MMSE}} \cdot E \left[\| W_{MMSE}Y - X \|_F^2 \right] \quad (8)$$

여기서 $\| \cdot \|_F$ 는 Frobenius norm을 나타낸다. 또한 직교 이론을 이용하면 식 (9)의 결과를 얻을 수 있다.

$$E \left[(W_{MMSE}Y - X) Y^H \right] = 0_{2,2} \quad (9)$$

여기서 $0_{2,2}$ 는 2x2 영 행렬을 나타낸다. 식 (9)를 이용하여 MMSE 복호행렬을 다시 나타내면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{MMSE} = \left(H^H H + \frac{1}{\alpha} I \right)^{-1} H^H \quad (10)$$

여기서 α 는 신호대 잡음비 (SNR : Signal to Noise Ratio)를 나타낸다.

MMSE 알고리즘은 SNR에 따른 복호 행렬을 사용하여 간섭을 제거하며, ZF와 다르게 잡음 성분이 증폭되는 것을 제거할 수 있다.

3. 최대 우도 수신기

최대 우도 수신기는 최적의 간섭제거 수신기이다^[8]. 만약 데이터 스트림이 부호화되지 않은 경우, 최대 우도 수신기는 식 (11)과 같이 간섭 신호를 제거하고 원하는 신호를 추정한다.

$$\hat{X} = \arg \min_X \| Y - HX \|^2 \quad (11)$$

여기서 \hat{X} 은 송신된 신호의 추정 신호 행렬이다. 최대 우도 수신기는 모든 가능한 송신 신호 벡터에 대한 전체 벡터 constellation을 찾아서 신호를 추정한다. 이는 매우 많은 시간이 들고 복잡한 일이다. 따라서 최대 우도 수신기는 최적의 성능을 나타내기는 하지만 구현하기가 복잡한 단점을 가지고 있다.

IV. 성능 분석

이번 장에서는 본 논문에서 고려한 협력통신 시스템의 비트 오류 확률 (BEP : Bit Error Probability) 성능을 분석한다. Destination 1의 i 번째 안테나에서 순시 비트 에너지대 잡음 비 γ_i 는 식 (12)와 같다.

$$\gamma_i = \frac{|h_{i1,D}|^2 E_b}{N_0} \quad (12)$$

여기서 $i = 1, 2$ 이고, $\sigma_{i,D}^2 = \frac{N_0}{2}$ 이다. 채널 등화기를 거친 후 비트 에너지대 잡음비 γ 는 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma = \sum_{i=1}^2 \frac{|h_{i1,D}|^2 E_b}{N_0} \quad (13)$$

본 논문에서는 무선 채널을 레일레이 (Rayleigh) 페이딩 채널로 모델링하였다. 따라서 $h_{i1,D}$ 는 레일레이 분포를 갖는 불규칙 변수이고, $|h_{i1,D}|^2$ 은 2차 자유도를 갖는 카이 스퀘어 (chi-square) 불규칙 변수이다. γ_i 의 확률밀도함수는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\gamma_i) = \frac{1}{(E_b/N_0)} \exp\left(\frac{-\gamma_i}{(E_b/N_0)}\right) \quad (14)$$

γ 는 두 개의 카이 스퀘어 불규칙 변수의 합이므로 γ 의 PDF는 4차 자유도를 갖는 카이 스퀘어 불규칙 변수이다. 따라서 γ 의 확률밀도함수는 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\gamma) = \frac{1}{(E_b/N_0)^2} \gamma \exp\left(\frac{-\gamma}{(E_b/N_0)}\right) \quad (15)$$

여기서 $\gamma \geq 0$ 이다. 레일레이 페이딩 채널에서 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 변조된 신호에 대한 BEP는 식 (16)과 같이 표현할 수 있다^[8].

$$P_{e,BPSK} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{(E_b/N_0)}{(E_b/N_0)+1}} \right) \quad (16)$$

따라서 γ 이 주어진 상황에서 전체 BEP는 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{e,Total} = \int_0^\infty \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) f(\gamma) d\gamma \quad (17)$$

식 (15)를 식 (17)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{e,Total} &= \int_0^\infty \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \right) \frac{1}{(E_b/N_0)^2} \cdot \\ &\quad \gamma \exp\left(\frac{-\gamma}{(E_b/N_0)}\right) d\gamma \\ &= \left[\frac{1}{2} (1 - U) \right]^2 \sum_{k=0}^1 \binom{1+k}{k} \left[\frac{1}{2} (1 + U) \right]^k \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 $U = \sqrt{\frac{(E_b/N_0)}{(E_b/N_0)+1}}$ 이다.

V. 모의 실험 결과

그림 3은 최대 우도 수신기를 적용한 협력통신 시스템에서 SNR (signal to noise ratio)에 따른 BEP 성능

을 나타낸다. 성능 비교를 위해 ZF (zero forcing) 수신기와 MMSE (minimum mean square error) 수신기를 동일한 시스템에 적용한 경우를 보였다. 또한 모든 무선통신 시스템은 채널 부호화하여 신호를 전송하므로, 실제적인 시스템과 유사한 환경을 만들기 위해 부호율이 $\frac{1}{2}$ 인 컨벌루션 (convolutional) 부호로 부호화한 경우의 시스템 성능을 보였다. 예상한 바와 같이 그림 1의 시스템 모델에서 최대 우도 수신기가 채널 부호화한 경우와 부호화하지 않은 경우 모두 다른 종류의 수신기에 비해 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 하지만 채널 부호화한 경우는 모든 수신기가 상당한 부호화 이득으로 인해 성능이 좋아지기 때문에, 최대 우도 수신기를 사용하여 얻는 이득은 부호화하지 않은 경우에 비해 작은 것을 확인할 수 있다. SNR이 10^{-3} 의 경우, 최대 우도 방법과 ZF 방법의 성능 차이는 부호화한 경우가 약 5 dB인데 반해서 부호화하지 않은 경우는 약 14 dB이다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 최대 우도 수신기는 다른 수신기에 비해 복잡도가 높다. 따라서 수신기 제작 시 요구되는 복잡도 문제를 해결할 수 있다면, 본 논문에서 고려한 협력통신 시스템에서 최대 우도 등화기를 적용한 수신기가 최적임을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 협력통신 시스템에서 동일 주파수로 수신되는 간섭 신호가 있는 경우 최대 우도 등화기의 성능을 분석하고, 모의 실험을 통해 간섭 제거 성능을 보였다. 일반적으로 최대 우도 등화기는 가장 우수한 성능을 가지지만, 실제 모든 가능한 경로에 대한 계산을 수행함으로써 그 복잡도가 증가한다고 알려져 있다. 따라서, 최대 우도 등화 기법을 적용하여 얻은 계산은 동일 조건 하의 다른 등화기를 적용했을 경우의 상한 기준이 된다. 모의 실험 결과 최대 우도 수신기를 적용한 협력통신 시스템이 가장 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 컨벌루션 부호로 부호화한 경우 부호화 이득으로 인해 간섭 제거 성능이 더욱 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 부호화한 경우는 부호화하지 않은 경우에 비해 다른 수신기와의 성능 차이가 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 최대 우도 수신기를 적용한 협력통신 시스템이 동일 주파수의 간섭이 존재하는 상황에서 가장 좋은 것을 확인할 수 있다. 본 논문의 결과는 협력 통신 시스템에 동일채널간섭 (CCI : Co-Channel Interference) 제거 알고리즘을 구현하는데 참고자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] J. Y. Kim, *Cooperative Wireless Communication Systems*, GS Interservice Publishers, Seoul, Korea, 2009.
- [2] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 10, pp. 74-80, Oct. 2004.
- [3] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [4] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 10, pp. 74-80, Oct. 2004.

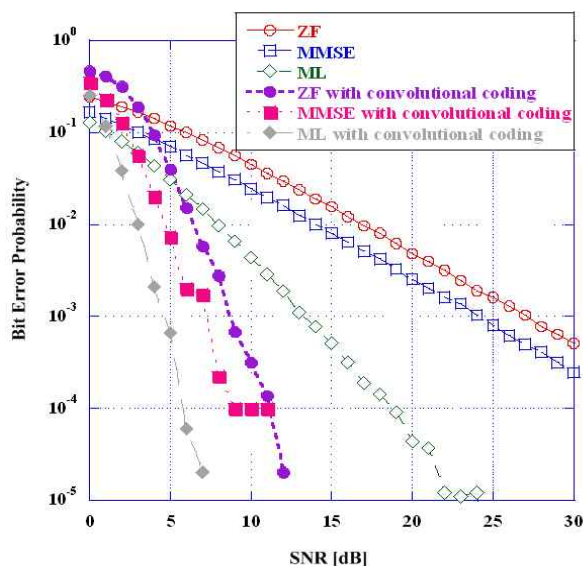


그림 3. 최대 우도 등화를 적용한 협력통신 시스템 성능
 Fig. 3. Performance of cooperative communication system employing 최대 우도 equalizing

- [5] A. Wittneben and B. Rankov, "Distributed antenna systems and linear relaying for gigabit MIMO wireless," *in Proc. of IEEE VTC2004*, vol. 5, pp. 3624-3630, Sep. 2004.
- [6] A. Wittneben and I. Hammerstroem, "Multiuser zero forcing relaying with noisy channel state information," *in Proc. of IEEE WCNC2005*, vol. 2, pp. 1318-1023, Mar. 2005.
- [7] J. Zhao, M. Kuhn, A. Wittneben, and G. Bauch, "Cooperative transmission schemes for decode-and-forward relaying," *in Proc. of IEEE PIMRC2007*, pp. 1-5, Sep. 2007.
- [8] J. G. Proakis. *Digital Communications*, 4th ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2001.

※ "본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음"
(NIPA-2010-(C1090-1011-0005))

저자 소개

김 주 찬(정회원)



- 2002년 광운대학교 전자공학부 (학사)
- 2004년 광운대학교 전자공학과 (공학 석사)
- 2004년 ~ 현재 광운대학교 전자공학과 박사과정

<주관심분야 : 디지털 통신, 신호처리>

김 진 영(정회원)



- 1998년 서울대 전자공학과(공학박사)
- 1998년 ~ 2000년 미국 Princeton University, Research Associate
- 2000년 ~ 2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원
- 2001년 ~ 현재 광운대학교 전자공학과 교수

<주관심분야 : 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화>