

Full Duplex 릴레이 시스템에서의 자기 신호 제거 Echo Cancellation in Relay Systems

우중재 *, 주형식**

Choong-Chae Woo*, Hyungsik Ju**

Abstract

We propose a new relay system which use echo cancellation in relay station. In the proposed relay system, a half of time resource is required to transmit a symbol compared to conventional relay system. We show the echo cancellation method and frame structure of the proposed system. Simulation result shows that the proposed system has twice capacity than that of the conventional system.

요 약

본 논문에서는 릴레이 스테이션에서 에코 제거를 사용하는 새로운 릴레이 시스템을 제안하였다. 제안된 릴레이 시스템에서는 한 심볼을 전송하는데 기존 릴레이 시스템에 비해 절반의 시간 자원만을 필요로 한다. 에코 제거 기법과 제안된 시스템의 프레임 구조를 기술하였으며 제안된 기법은 기존 시스템에 비해 두 배의 용량을 가짐을 모의실험으로 보였다.

Key words : Echo Cancellation, Relay Systems

1. 서론

무선 통신 환경에서 릴레이 (relay station)을 사용하는 통신 시스템은 보다 적은 전력으로 좀 더 넓은 범위(coverage)에서의 데이터 통신을 지원할 수 있다는 장점을 가진다[1]. 하지만, 릴레이를 적용하는 통신 시스템을 사용하기 위해서는, 릴레이를 사용하

지 않는 시스템에 비해 더 많은 시간 슬롯(slot)을 사용하기 때문에 데이터 전송률에 많은 손실이 생긴다는 단점이 있다[2]. 즉, 릴레이를 사용함으로써 전력 및 coverage에서의 장점은 생기지만, 시간 및 주파수 자원의 활용 면에 있어서는 기존의 통신 시스템에서 발생하지 않았던 낭비가 발생하게 된다. 이러한 단점은, 기지국(base station, BS), 릴레이(relay station, RS), 단말(mobile station, MS) 모두에서 half-duplex 방식을 사용하기 때문에 발생하게 된다. 이러한 half duplex 방식을 사용할 경우, 한 station에서 다른 station으로 심볼을 전송하는 데에 2개의 시간 슬롯이, 송신하는 데에 2개의 시간 슬롯이 필요하여, 총 4개의 시간 슬롯이 필요하다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 half duplex 방식 외에, 다중 안테나를 사용하는 환경에서 상, 하향 링크에서 신호를 동시에 송수신 하는 duplex 방식이 제안되었다[5][6]. 이러한 duplex 방식을 full duplex 방식이라고 부른다. 이러한 full duplex 방식을 릴레이를 사용하는 통신 시스템에 적용할 경우, half

* 정회원, 한서대학교 전자공학과
(Electronics, Computer and Communication Engineering at Hanseo University)

★ 정회원, 싱가포르대학교 전기컴퓨터공학과
(Electrical and Computer Engineering at National University of Singapore)

※ “이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0014022)

接受日:2011년 12월 14일, 修正完了日: 2012년 03월13일
掲載確定日:2012년 6월 11일

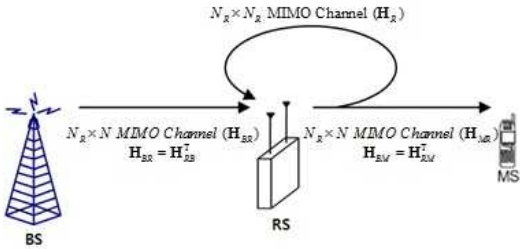


Fig 1. System Model
그림 1. 시스템 모델

duplex의 사용에 의해 기존의 릴레이를 사용하는 통신 시스템에서 발생했었던 시간 또는 주파수 자원의 낭비 문제를 해결할 수 있다.

본 논문에서는, full duplex를 사용하는 릴레이 시스템에서의 송수신 신호의 생성 방법 및 프레임 구조를 제안한다. 본 논문에서는 BS, RS, MS가 각각 개, 개, 개의 안테나를 사용하는 상황을 고려한다. 또한 full duplex를 수행하기 위해 RS가 같은 대역의 신호를 동시에 송수신 할 수 있는 안테나를 가지고 있는 상황을 가정한다. 이러한 상황 및 가정을 기반으로, 어떤 문제점이 발생하는지를 설명하고, 이러한 문제를 해결하면서 통신을 수행할 수 있도록 하는 통신 protocol 및 frame structure에 대해 다루도록 한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

그림 1은, 릴레이에서 신호를 동시에 송수신 하는 경우의 시스템 모델이다. BS, MS에서 RS로의 채널은 각각, 로 표시된다. 이들 채널, 은 각각 채널이며, 각각의 element가 0의 평균과 1의 분산 (variance, power의 의미를 가짐)을 가지는 Gaussian 랜덤 변수인 벡터 채널이다. 또한, 채널의 상호 호혜성 (channel reciprocity)에 의해 RS에서 BS, MS로의 채널, 은 각각, 로 표현되며, 이들 또한 각각의 element가 0의 평균과 1의 분산을 가지는 Gaussian 랜덤 변수인 채널이다. RS에서 송신 신호가 자신에게 피드백 되는 신호를 에코 신호라 한다. 에코 신호가 통과하는 채널을 에코 채널이라 하며, 으로 표기한다. 은 채널로 표현된다[4]. 이 때, 의 각 element는 임의의 분포를 가지는 랜덤 변수이다.

2. 프레임 구조

위와 같은 신호 구조를 가지는 릴레이 시스템에

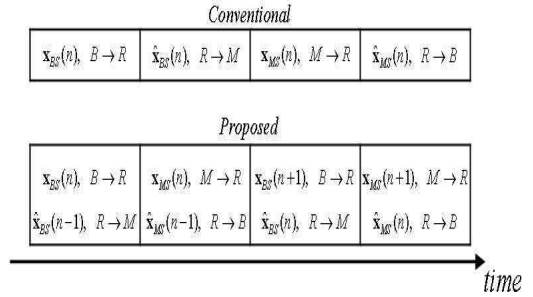


Fig 2. Frame structure of the existing relay system and the proposed relay system

그림 2. 기존의 릴레이 시스템과 제안된 릴레이 시스템의 프레임 구조

서는 RS가 full duplex 노드처럼 동작한다. 따라서 BS가 RS로 신호를 전송하는 동시에 RS는 MS로 신호를 전송할 수 있고, 마찬가지로 MS가 RS로 신호를 전송하는 동시에 RS는 BS로 신호를 전송할 수 있다. 따라서 기존의 half duplex relay를 사용하는 릴레이 시스템과는 다른 frame 구조를 가지게 된다. 그림 2는 기존의 half duplex를 사용하는 amplify-and-forward 또는 decode-and-forward 릴레이를 쓰는 시스템과 제안된 릴레이 시스템의 프레임 구조를 보여준다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 기존의 half duplex relay 시스템에서는 BS와 MS가 RS를 통하여 한 개의 심볼을 주고받을 때 총 4개의 시간 슬롯이 필요하다. 하지만 제안된 릴레이 시스템에서는 BS와 MS가 RS를 통하여 한 개의 심볼을 주고받을 때 총 2개의 시간 슬롯만이 필요함을 알 수 있다. 첫 번째, 세 번째 시간 슬롯은 BS에서 MS로의 정보 전달에 사용된다. 이들 각각의 시간 슬롯에서는 BS와 RS가 동시에 심볼을 전송하며, 따라서 두 시간 슬롯은 각각 서로 다른 심볼을 전송하는데 사용된다. 마찬가지로 두 번째, 네 번째 시간 슬롯은 MS에서 BS로의 정보 전달에 사용된다. 이들 각각의 시간 슬롯에서는 MS와 RS가 동시에 심볼을 전송하며, 따라서 두 시간 슬롯은 각각 서로 다른 심볼을 전송하는데 사용된다. 즉, 제안된 릴레이 시스템에서는 기존의 릴레이 시스템과 비교하여 절반의 시간 슬롯을 필요로 함을 알 수 있다.

3. 송수신 신호의 구조

Full duplex relay 시스템에서는, RS에 에코 신호가 필연적으로 존재하고, 이 에코 신호가 간섭으로 작용하여 일반적으로 통신이 매우 힘들어진다. 따라서 RS에서는 에코 신호를 제거하기 위해 [4]에서와 같이 에코 제거(echo cancellation)가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 에코 신호 제거를 위해 프리코딩(preceding)과 포스트코딩(postcoding)을 이용한다.

완벽한 에코 신호의 제거를 위한 RS에서의 프리코더(P_R)와 포스트코더(D_R)는 다음의 조건을 만족하도록 설계되어야 한다.

$$D_R^H H_R P_R = 0 \quad (1)$$

에코 채널 H_R 의 singular value decomposition (SVD)를

$$H_R = U_R \Sigma_R V_R^H \quad (2)$$

이라 하면, 에코 신호의 완벽한 제거를 위한 P_R 과 D_R 설계의 충분조건 (sufficient condition)은 다음과 같다.

1) P_R 의 각 column vector들은 V_R 의 column vector들로, D_R 의 column vector들은 U_R 의 column vector들로 이루어진다.

2) U_R 과 V_R 의 i 번째 열벡터를 각각 $u_{R,i}$, $v_{R,i}$ 라 한다. P_R 을 이루는 $v_{R,i}$ 들의 index (i)들의 집합을 $S_{R,P}$, D_R 을 이루는 $u_{R,j}$ 들의 index (j)들의 집합을 $S_{R,D}$ 라 하면 $S_{R,P}$ 와 $S_{R,D}$ 는 다음의 조건을 만족한다.

$$S_{R,P} \cap S_{R,D} = \emptyset. \quad (3)$$

3) RS에서의 안테나 수 N_R 은 $N_R \geq 2N$ 을 만족해야 한다.

위의 충분 조건에 대한 증명은 다음과 같다: 1)의 조건을 만족하는 P_R 과 D_R 을 이용하여 H_R 을 preceding, decoding을 해 주면 다음과 같다.

$$D_R^H H_R P_R(i, j) = d_{R,i}^H \left(\sum_{r=1}^{N_R} \lambda_r u_{R,r} v_{R,r}^H \right) p_{R,j}. \quad (4)$$

이 때 λ_r 은 H_R 의 r 번째 singular value이다. 또한, $d_{R,i}$ 와 $p_{R,j}$ 는 각각 D_R 의 i 번째 column vector와 P_R 의 j 번째 column vector이다. 만약, $d_{R,i} = u_{R,k}$, $p_{R,j} = u_{R,k}$ 라면 (4)에서 $D_R^H H_R P_R(i, j) \neq 0$ 임을 쉽게 알 수 있다. 따라서 모든 (i, j) 에 대하여 $D_R^H H_R P_R(i, j) = 0$ 을 만족시키기 위해서는 2)의 조건이 만족되어야 한다. 또한 2)의 조건을 만족시키기 위해서는 3)의 조건이 선결되어야 한다.

위의 1) - 3)의 충분 조건을 만족시키는 P_R 과 D_R 의 설계는 unique하게 결정되지 않는다. 따라서 모든 조합 중 채널 용량을 최대로 하는 column vector들의 조합을 찾아 P_R 과 D_R 을 설계함으로써 선택 다양성 (selection diversity)를 얻어 채널 용량을 증대시킬 수 있다.

4. Full Duplex Relay 시스템의 채널 용량

본 장에서는 decode-and-forward relay 방식을 사용하는 full duplex relay 시스템에서의 송, 수신 채널 및 이로부터 얻을 수 있는 채널 용량을 분석한다.

RS는 위의 P_R 과 D_R 을 이용하여 송신 신호와 수신 신호를 각각 프리코딩, 포스트코딩한다. BS와 MS는 프리코딩 된 RS 송신 신호를 받으므로 BS, RS의 수신 신호는 아래와 같다.

$$y_B = \alpha_R H_{R,B} P_R x_R + n_B, \quad (5)$$

$$y_M = \alpha_R H_{R,M} P_R x_R + n_M, \quad (6)$$

여기서 x_R 은 RS의 송신신호로 $N_R \times 1$ vector이다. 또한 y_B 와 y_M 는 각각 BS와 MS의 수신 신호로, $N \times 1$ vector이다. 마지막으로 n_B 와 n_M 는 각각 BS와 MS에서의 잡음 (noise)으로 $N \times 1$ vector이다 (이후로도 아래첨자 B, R, M 은 각각 BS, RS, MS를 의미한다.) α_R 은 preceding 이후에 발생하는 RS의 송신 파워를 정규화 해 주기 위한 정규화 상수 (normalization factor)이다.

한편 RS는 BS, MS에서 송신한 신호 외에 자신의 신호를 같이 수신하게 되며, 따라서 에코 신호에 대

한 제거가 필요하다. 이러한 에코 신호를 제거하기 위해 수신 신호를 포스트코딩한다. 먼저 RS가 BS로부터 받은 신호를 MS로 릴레이 해 주는 경우에는 다음과 같이 포스트 코딩을 해 준다.

$$\begin{aligned} D_R^H y_R &= D_R^H H_{BR} x_B + \alpha_R D_R^H H_R P_R x_R + D_R^H n_R \\ &= D_R^H H_{BR} x_B + D_R^H n_R. \end{aligned} \quad (7)$$

마찬가지로, RS가 MS로부터 받은 신호를 BS로 릴레이 해 주는 경우에는 다음과 같이 포스트 코딩을 해준다.

$$\begin{aligned} D_R^H y_R &= D_R^H H_{MR} x_M + \alpha_R D_R^H H_R P_R x_R + D_R^H n_R \\ &= D_R^H H_{MR} x_M + D_R^H n_R. \end{aligned} \quad (8)$$

마찬가지로 BS의 송신신호 x_B 와 MS의 송신신호 x_M 은 $N \times 1$ vector이다.

RS에서 decode-and-forward relay 방식이 사용되었으므로 각 방향에서의 채널 용량은 다음과 같이 정해진다.

$$C_{BM} = \min\{C_{BR}, C_{RM}\}, \quad (9)$$

$$C_{MB} = \min\{C_{MR}, C_{RB}\}. \quad (10)$$

이 때, C_{BR} , C_{MR} , C_{RB} , C_{RM} 은 다음과 같이 표현된다.

$$C_{BR} = \log_2(\det(I + \rho D_R^H H_{BR} H_{BR}^H D_R)), \quad (11)$$

$$C_{MR} = \log_2(\det(I + \rho D_R^H H_{MR} H_{MR}^H D_R)), \quad (12)$$

$$C_{RB} = \log_2(\det(I + \rho_B H_{RB} P_R P_R^H H_{RB}^H)), \quad (13)$$

$$C_{RM} = \log_2(\det(I + \rho_M H_{RM} P_R P_R^H H_{RM}^H)). \quad (14)$$

여기서 ρ 는 $D_R^H n_R$ 및 P_R , D_R 에 의해 결정되는 RS의 신호대 잡음비이다. BS와 MS에서의 신호대 잡음비 ρ_B 와 ρ_M 는 α_R 및 P_R , D_R 의 설계에 의해 결정된다.

위의 (9)와 (10)에서 알 수 있듯이, 채널 용량은 P_R 과 D_R 중 rank가 작은쪽에 의해 결정되며, 이

rank는 P_R 을 구성하는 서로 다른 $v_{R,i}$ 의 수, D_R 을 구성하는 서로 다른 $u_{R,i}$ 의 수에 의해 결정된다. 따라서, P_R 을 구성하는 서로 다른 $v_{R,i}$ 의 수와 D_R 을 구성하는 서로 다른 $u_{R,i}$ 의 수를 $N_R/2$ 로 균형을 맞춰줄 때 채널 용량이 최대가 된다.

III 실험 결과

그림 3은 $(N, N_R) = (1, 2), (2, 4), (3, 6)$ 일 때

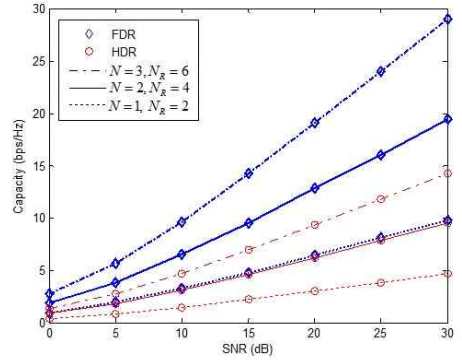


Fig 3. Comparing the channel capacity of the existing

relay system and the proposed relay system

그림 3. 기존의 릴레이 시스템과 제안된 릴레이 시스템의 채널 용량 비교

decode-and-forward 기법을 사용하는 half duplex 릴레이 시스템과 본 논문에서 제안한 릴레이 시스템의 채널 용량 (channel capacity)을 비교한 것이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이, 제안된 릴레이 시스템은 기존의 릴레이 시스템에 비해 신호를 전송하는데 필요한 시간 슬롯의 수가 절반이므로 2배의 채널 용량 증가율을 얻을 수 있다. 또한, 위에서 설명한대로, P_R 과 D_R 을 생성할 수 있는 여러 경우 중 시스템의 전송률을 더 크게 하는 경우를 골라줌으로써 선택에 의한 다이버시티를 얻어 추가적인 채널 용량 향상 효과를 얻을 수 있다. 따라서, half duplex relay를 쓰는 시스템에 비해 2배 이상의 채널 용량을 얻을 수 있다. 이러한 채널 용량의 증대 효과를 통해 기존의 릴레이를 썼을 때의 채널 용량의 손실을 극복할 수 있다.

IV 결론

본 논문에서는 2-way 통신에 사용되는 릴레이 시스템에서 채널 용량을 향상시킬 수 있는 새로운 프로토콜 및 신호 구조를 제안했다. 제안된 릴레이 시스템은 릴레이 노드에서 다중안테나를 사용하며, 자기 신호 제거 메커니즘을 기반으로 동작한다. 이러한 제안된 메커니즘을 통해, 기존의 릴레이 방식 보다 약 2배의 채널 용량을 가질 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. O. Hasna, "End-to-End Performance of Transmission Systems with Relays over Rayleigh-Fading Channels", IEEE Trans. on Wireless Comm. vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003
- [2] R. Pabst et al., "Relay-based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Cellular Radio", IEEE Comm. Magazine, vol. 42, pp. 80-89, Sep. 2004
- [3] A. Sendonaris et al., "User Cooperation Diversity - Part I & II", IEEE Trans. on Comm., vol. 51, no. 11, pp. 1927-1948, Nov. 2003
- [4] Y. Jing et al., "Distributed Space-Time Coding in Wireless Relay Networks", IEEE Trans. Wireless Comm., vol. 5, no. 12, pp. 3524-3536, Dec. 2006
- [5] S. Chen, et. al., "Division-Free Duplex for Wireless Applications", IEEE Electronic Letter, vol. 34, no. 2, pp. 147-148, Jan. 1998
- [6] H. Ju, et. al. "A New Duplex without Loss of Data Rate and Utilizing Selection Diversity", VTC 2008 spring accepted

저 자 소 개

우 중 재 (정회원)



2000년 : 순천대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 2002년 : 연세대학교 대학원 전기 전자공학과 (공학석사)
 2007년 : 연세대학교 대학원 전기 전자공학과 (공학박사)
 2009년 : 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2009년 3월~현재 : 한서대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야> 이동통신, 신호처리

주 형 식 (정회원)



2005년 : 연세대학교 전기전자공학과 졸업 (공학사)
 2011년 : 연세대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사)
 2011년 3월~현재 : 싱가포르대학교 전기컴퓨터공학과
 <주관심분야> 이동통신, 무선 자원 관리