

셀룰러 상향링크에서 다중사용자 릴레이 전송 기법

엄준수*, 강길모*,
 김현민**, 신오순

A Multiuser Relaying Scheme for Uplink Cellular Systems

Joon-Soo Eom*, Gil-Mo Kang*,
 Hyeon Min Kim**, Oh-Soon Shin

요약

셀룰러 시스템 상향링크에서 전송 신뢰도를 향상시킬 수 있는 신호 중첩과 메시지 전달 알고리즘 기반 다중 사용자 릴레이 전송 방식을 제안한다. 먼저 상향링크 릴레이 시스템의 자원 할당 구조를 제시하고 중첩 자원할당과 신뢰 전파 기반 메시지 전달 알고리즘을 도출한다. 모의실험을 통해 제안한 방법의 성능을 기존의 직교 자원할당을 하는 경우와 비교한다.

Key Words : Cellular system, frequency diversity, message passing algorithm (MPA), relay, signal superposition

ABSTRACT

A multiuser relaying scheme based on signal superposition and message passing algorithm is proposed to improve communication reliability in the uplink of cellular systems. We first present a resource allocation structure for the uplink relaying system, and then devise the overlapped resource allocation and the message passing algorithm based on belief propagation. Simulation results are provided to compare the performance of the proposed approach with that of the conventional orthogonal

resource allocation.

I. 서론

무선통신에서 릴레이(Relay)를 이용한 멀티홉(Multi-hop) 전송은 개별 링크의 송신거리를 줄임으로써 전송 신뢰도를 향상시킬 수 있는 기술이다. 이러한 장점 때문에 셀룰러 시스템에 릴레이를 적용하면 전송 커버리지 확장과 전송률 향상 효과를 얻을 수 있다^[1]. 릴레이가 신호를 처리하는 방식에 따라 증폭 후 전달(Amplify-and-Forward: AF)과 복호 후 전달(Decode-and-Forward: DF) 방식으로 구분되는데, 일반적으로 DF 방식이 디지털 처리를 통해 잡음을 제거하므로 더 좋은 성능을 얻을 수 있다^[2].

셀룰러 상향링크에서 릴레이는 단말이 보낸 신호를 기지국으로 중계하는 역할을 한다. 릴레이 근처에 위치한 여러 단말들이 하나의 릴레이를 공유하는 경우 각 단말은 서로 직교하는 자원을 통해 릴레이에 신호를 전송해야만 간섭을 피할 수 있다^[3]. 릴레이에서 기지국으로 신호를 전달할 때도 마찬가지로 각 단말로부터 받은 신호를 서로 다른 자원을 통해 전송해야 한다.

본 논문에서는 여러 단말들이 자원을 공유하여 신호를 중첩하여 전송하는 방식을 제안한다. 이러한 방법은 단말 간 간섭 문제를 일으키는데, 이를 극복하기 위해 성상도 회전과 수신기에서 메시지 전달 알고리즘(Message Passing Algorithm: MPA) 기반의 복호 기법을 도입하였다. 모의실험을 통해 제안한 기법이

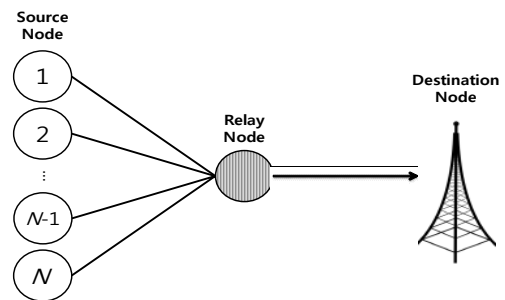


그림 1. 셀룰러 상향링크에서 릴레이 전송 모델.
 Fig. 1. Relay transmission model in a cellular uplink.

※ 본 연구는 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B03030436).
 * First Author : (ORCID:0000-0002-6358-4600)Soongsil University, School of Electronic Engineering, jseom@soongsil.ac.kr, 학생회원
 ° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6984-8240)Soongsil University, School of Electronic Engineering and Department of ICMC Convergence Technology, osshin@ssu.ac.kr, 종신회원
 * (ORCID:0000-0002-6893-1261)Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, gilmokang@ssu.ac.kr, 학생회원
 ** (ORCID:0000-0002-8943-3675)Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, hminplus@ssu.ac.kr, 학생회원
 논문번호 : 201907-142-A-LU, Received July 30, 2019; Revised August 7, 2019; Accepted August 7, 2019

기존의 직교 자원할당의 경우에 비해 다이버시티 (Diversity) 효과에 따른 비트오류율(Bit Error Rate: BER) 성능 향상을 얻을 수 있음을 확인하였다.

II. 시스템 모델 및 신호 중첩 방법

본 논문에서 고려하는 셀룰러 상향링크에서 릴레이 전송 모델은 그림 1과 같다. N 개의 사용자 단말에 해당되는 소스(Source) 노드에서 하나의 릴레이노드로 신호를 전송하면 릴레이 노드에서는 DF 방식으로 목적지(Destination) 노드인 기지국에 신호를 전달한다. 각 소스 노드에서 릴레이 노드로 가는 링크를 SR 링크, 릴레이 노드에서 목적지 노드로 가는 링크를 RD 링크라고 할 때, 각 링크는 소스 노드의 수에 비례하는 수의 주파수 자원을 사용하여 신호를 전송한다고 가정한다. SR 링크와 RD 링크에는 서로 다른 시간 슬롯을 할당하여 릴레이는 반이중(Half Duplex) 방식으로 동작한다. 일반적으로 SR 링크에서는 소스 노드마다 직교하는 주파수 자원을 할당하고, RD 링크에서도 각 소스 노드에 해당하는 신호마다 서로 다른 주파수 자원을 할당해야만 간섭을 회피할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법은 기존의 방법과 달리 SR 링크 및 RD 링크에서 서로 다른 사용자의 신호를 중첩하여 주파수 자원을 공유하고 전송 노드와 주파수 자원 노드 간의 신뢰 전파(Belief Propagation)를 통한 복호를 통해 릴레이 전송 성능을 향상시키고자 한다. 그림 2는 $N=4$ 인 경우 제안하는 신호 중첩 (Signal Superposition) 기반으로 주파수 자원을 할당하는 예시이다.¹⁾ 그림 2에서 x_j , \bar{x}_j , \hat{x}_j ($j=1,2,\dots,N$)는 각각 j 번째 소스 노드의 전송 신호, 이에 해당하는 릴레이 노드 전송 신호와 목적지 노드에서 디코딩한 신호를 나타낸다. f_i 는 i 번째 주파수 자원(부채널)을 의미한다. 그림 2의 SR 링크에서 x_j 는 f_j 와 $f_{\text{mod}(j,N)+1}$ 을 통해 전송되고, 그 결과 각각의 주파수 자원에는 서로 다른 두개의 신호가 중첩되어 전송된다. 이 때, 수신기가 중첩된 신호를 효율적으로 구분할 수 있도록 $f_{\text{mod}(j,N)+1}$ 을 통해 전송하는 신호의 성상도(Constellation)는 f_j 를 통해 전송하는 신호의 성상도에서 각 신호를 특정한 각도 θ 만큼 회전하여 사용한다. RD 링크에서도 마찬가지로 신호를 중첩하여 전송한다.

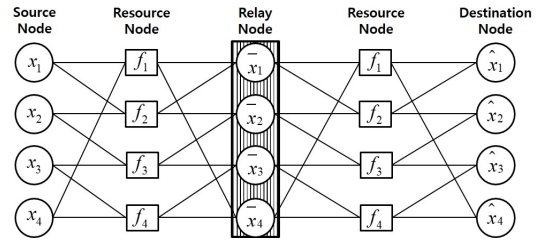


그림 2. 신호 중첩 기반 주파수 자원할당 구조
Fig. 2. Frequency resource allocation structure based on signal superposition.

$N(=4)$ 개의 소스 노드에서 릴레이 노드로의 N 개의 주파수 자원을 이용한 전송 채널은 $N \times N$ 행렬 H 로 나타낼 수 있다. 그림 2의 경우 4×4 행렬 H 는 다음과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & 0 & 0 & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & 0 & 0 \\ 0 & h_{32} & h_{33} & 0 \\ 0 & 0 & h_{43} & h_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 h_{ij} 는 x_j 가 i 번째 주파수 자원을 통해 전송될 때 겪는 채널을 나타내고 Rayleigh 페이딩의 경우 복소 가우시안 랜덤변수이다. 행렬 H 에서 0인 부분은 해당 주파수 자원이 사용되지 않음을 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 릴레이 노드에 수신되는 신호 y 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$y = Hx + n \quad (2)$$

여기서 $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)^T$, $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ 로 정의되고, $n = (n_1, n_2, n_3, n_4)^T$ 은 각 성분의 평균이 0, 분산이 σ^2 인 Additive White Gaussian Noise를 나타낸다. 릴레이 노드는 식 (2)로부터 MPA 기법을 적용하여 송신 신호 x 를 복원한 후 동일한 방법으로 복원한 신호 \bar{x} 를 목적지인 기지국으로 전송하고 기지국 역시 MPA 기법을 통해 신호를 복원한다.

III. MPA 기반 복호 기법

릴레이는 소스 노드와 자원 노드 간의 신뢰 전파를 통한 Maximum a Posteriori Probability (MAP) 검출 기법을 이용하여 송신 신호를 복호한다³⁾. 먼저 i 번째 자원 노드에서 j 번째 소스 노드로 전파되는 신뢰 메시지는 다음과 같다.

1) 주파수 자원 당 중첩되는 신호의 수 및 중첩되는 패턴 등을 변경할 수 있고, 그림 2는 한 가지 경우를 나타낸다.

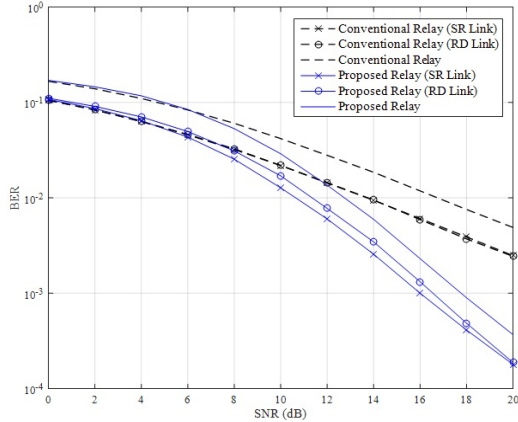


그림 3. 다중 사용자 릴레이 전송 방식의 BER 성능 비교
Fig. 3. BER performance comparison of multiuser relaying schemes.

$$m_{i \rightarrow j}(a) = \sum_{x_j = a \in C_j} P(y_i | \mathbf{x}, \mathbf{H}) \prod_{j' \in I_i} m_{j' \rightarrow i'} \quad (3)$$

여기서 C_j 는 x_j 가 가질 수 있는 모든 값들의 집합, $I_i \equiv \{j : h_{ij} \neq 0\}$, 조건부 확률 $P(y_i | \mathbf{x}, \mathbf{H})$ 는 아래와 같다.

$$P(y_i | \mathbf{x}, \mathbf{H}) \approx e^{-\frac{|y_i - \sum_{j \in I_i} h_{ij} x_j|^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

또한 j 번째 소스 노드에서 i 번째 자원 노드로 전파되는 신뢰 메시지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{j \rightarrow i}(a) = \prod_{i' \in I_j} m_{i' \rightarrow j'}(a) \quad (5)$$

여기서 $I_j \equiv \{i : h_{ij} \neq 0\}$ 로 정의된다. 소스 노드와 자원 노드 간의 반복적인(Iterative) 메시지 교환을 통해서 신뢰 전파가 충분히 이루어진 후 릴레이는 송신 신호 x_j 를 아래와 같이 검출한다.

$$\bar{x}_j = \operatorname{argmax}_{a \in C_j} \prod_{i \in I_j} m_{i \rightarrow j}(a) \quad (6)$$

위와 마찬가지로 목적지에서는 가상의 릴레이(노드2)와 자원 노드 간의 신뢰 전파를 통해 신호를 복호할 수 있다.

2) 물리적인 릴레이 노드는 하나지만 N 개의 서로 다른 신호를 전송하므로 이를 가상의 릴레이 노드로 칭한다.

IV. 성능 평가

그림 3은 상향링크 릴레이 시스템에서 전송 기법에 따른 동시 전송 사용자 수 $N=4$ 인 경우 SR 링크, RD 링크와 전체 링크의 BER 성능을 비교한 것이다. “Conventional Relay” 기법은 서로 다른 사용자 당 하나의 상호 배타적인 자원을 할당한 경우이고, “Proposed Relay”는 그림 2의 패턴에 따라 중첩적인 자원할당을 한 경우이다. 릴레이와 기지국에서의 복호 방법으로는 모두 III장에서 설명한 MPA 기법을 적용하였다. 각 신호의 변조 방식은 모두 QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) 와 $\theta = 22.5^\circ$ 인 Rotated-QPSK를 사용하였다. 주파수 자원 별 채널, 즉 식 (1)의 행렬 \mathbf{H} 의 원소는 모두 독립으로 가정하였다. 그림 3의 결과로부터 제안하는 기법이 기존의 기법에 비해 향상된 BER 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 주목할 점은 높은 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio: SNR) 영역에서 BER 그래프의 기울기로부터 제안한 기법의 다이버시티 효과를 확인할 수 있다. 이는 각 송신 신호가 서로 독립적인 페이딩을 겪는 복수의 주파수 자원을 사용함으로써 얻어지는 것으로 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 셀룰러 상향링크에서 다중 사용자 릴레이 시스템의 효과적인 전송 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 다중 송신 신호가 주파수 자원을 중첩적으로 사용하도록 하고, 성상도 회전과 MPA 기법을 통해 중첩된 신호 간의 간섭 문제를 해결하였다. 모의 실험 결과 제안한 방법을 사용하면 기존의 직교 자원 할당을 하는 경우에 비해 다이버시티 효과에 따른 BER 성능 향상을 얻을 수 있다.

References

[1] L. Le and E. Hossain, “Multihop cellular networks: Potential gains, research challenges and a resource allocation framework,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 9, pp. 66-73, Sep. 2007.
[2] M. Dashti, N. Mokari, and K. Navaie, “Uplink radio resource allocation in AF and DF relay-assisted networks with limited rate feedback,”

IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 64, no. 7, pp. 3056-3074, Jul. 2015.

- [3] G.-M. Kang, H. M. Kim, Y. Shin, and O.-S. Shin, "Performance analysis of signal detection based on message passing algorithm in uplink sparse code multiple access systems with multiple antennas," *J. KICS*, vol. 43, no. 3, pp. 497-505, Mar. 2018.