

# 셀룰러 상향링크에서 다중사용자 릴레이 전송을 위한 신호 성상도 회전 기법

엄준수\*, 강길모\*, 김현민\*\*, 신오순°

## Constellation Rotation for Multiuser Relaying in Uplink Cellular Systems

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

### 요약

셀룰러 상향링크에서 주파수 중첩 사용을 허용하는 다중사용자 통신 환경에서 신호 성상도 회전 기반 송신 기법과 메시지 전달 알고리즘 기반 복호 기법을 사용하는 릴레이 시스템을 고려한다. 이러한 릴레이 시스템에서 최적의 신호 성상도 회전 각도를 도출한다. 최적화된 회전 각도를 사용함으로써 기존 기법에 비해 릴레이 시스템의 비트오류확률을 낮출 수 있음을 모의실험을 통해 검증한다.

**Key Words** : Cellular system, frequency overloading, message passing algorithm (MPA), multiuser relaying, constellation rotation

### ABSTRACT

We consider a relaying system with a transmission scheme based on constellation rotation and a decoding scheme based on message passing algorithm in the uplink of a cellular system. We derive an

optimal rotation angle of the signal constellation in such a relaying system. Simulation results show that the proposed optimization of the rotation angle can reduce the bit error rate of the relaying system as compared with the conventional scheme without optimization.

### I. 서론

셀룰러 상향링크에서 릴레이는 주변 사용자가 기지국으로 전송한 신호를 전달하는 데 사용된다<sup>[1]</sup>. 릴레이 근처에 위치한 여러 사용자들이 하나의 릴레이를 공유하는 경우, 각 사용자는 서로 직교하는 주파수 자원을 사용하여 릴레이에 신호를 전송하는 것이 일반적이다. 또한 각 사용자로부터 수신된 신호를 기지국에 전달할 때도 서로 다른 자원을 통해 전송해야 간섭을 피할 수 있다. 하지만 사용자들이 주파수 자원을 부분적으로 중첩 사용 하도록 허용함으로써 시스템 전체의 주파수 사용 효율을 높일 수 있다. 이 경우 발생하는 사용자 간의 간섭 문제 해결을 위해 [2]에서는 신호 성상도 회전 기반의 송신 기법과 메시지 전달 알고리즘(Message Passing Algorithm: MPA) 기반의 복호 기법을 제안하였다. [2]에서는 제안하는 송·수신 기법을 통해 사용자 간의 간섭 문제를 해결할 뿐만 아니라 주파수 다이버시티 효과에 따른 성능 향상을 얻을 수 있음을 검증하였다.

본 논문에서는 신호 성상도 회전각 최적화를 통해 [2]에서 제안한 다중사용자 릴레이 통신 시스템의 성능을 향상시키고자 한다. 이를 위해 여러 사용자 신호가 중첩된 신호를 식으로 표현하고, 성상도 포인트 간의 최소 거리를 최대화하는 회전각을 도출한다. 모의 실험 결과를 통해 최적의 성상도 회전각을 사용하면 기존의 회전각을 사용하는 경우에 비해 릴레이 전송의 비트오류율(Bit Error Rate: BER) 성능을 향상시킬 수 있음을 검증한다.

※ 이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017-0-00724, 셀룰러 기반 산업 자동화 시스템 구축을 위한 5G 성능 한계 극복 저지연, 고신뢰, 초연결 통합 핵심기술 개발).

• First Author : (ORCID:0000-0002-6358-4600)Soongsil University, Department of Information Communication Convergence Technology, jseom@soongsil.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6984-8240)Soongsil University, School of Electronic Engineering and Department of Information Communication Convergence Technology, osshin@ssu.ac.kr, 정교수, 중신회원

\* (ORCID:0000-0002-6893-1261)Soongsil University, Department of Information Communication Convergence Technology, gilmokang@ssu.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

\*\* (ORCID:0000-0002-8943-3675)Soongsil University, Department of Information Communication Convergence Technology, hminplus@ssu.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

논문번호 : 202106-123-A-LU, Received June 8, 2021; Revised June 29, 2021; Accepted June 29, 2021

## II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 셀룰러 상향링크에서의 다중 사용자 릴레이 시스템 모델은 [그림 1]과 같다. 하나의 셀에서  $N$ 개의 사용자로 구성된 소스 노드에서  $M$ 개의 주파수 자원을 사용하여 하나의 릴레이 노드로 신호를 전송하면 상대적으로 기지국에 가까운 릴레이 노드에서 Decode-and-Forward 방식으로 기지국인 목적지 노드로 신호를 전달한다. 소스 노드에서 릴레이 노드로 가는 SR 링크와 릴레이 노드에서 목적지 노드로 가는 RD 링크에는 서로 다른 시간 슬롯을 할당하여 릴레이는 반이중(Half Duplex) 방식으로 동작한다.

각 링크에서는 소스 노드의 수보다 적거나 같은 수의 주파수 자원을 공유하여, 즉  $M \leq N$ , 서로 다른  $N$ 개의 신호가 중첩 전송된다. [그림 2]는 사용자 수  $N=6$ , 사용하는 주파수 자원의 수  $M=4$ 인 경우의 자원 할당 예시를 보여준다. 물리적인 릴레이 노드와 목적지 노드는 하나지만  $N$ 개의 서로 다른 신호를 전송하므로 이를 가상의 노드들로 표현하였다.  $x_j$ 는  $j$ 번째 소스 노드의 송신 신호,  $\bar{x}_j$ 는  $i$ 번째 자원 노드를 통해 릴레이 노드에서 수신되어 디코딩 후 목적

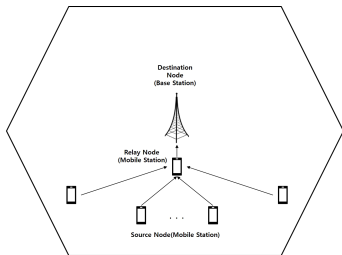


그림 1. 셀룰러 상향링크에서 다중사용자 릴레이 전송 모델. Fig. 1. A multiuser relay transmission model in the uplink of a cellular system.

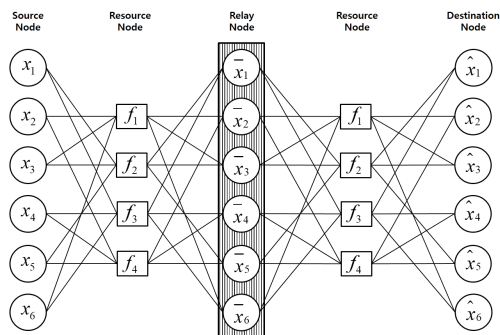


그림 2.  $M=4$ ,  $N=6$ 인 경우의 자원 할당 예시. Fig. 2. An example of resource allocation for the case of  $M=4$ ,  $N=6$ .

지 노드로 전송하는 신호,  $\hat{x}_j$ 는  $j$ 번째 목적지 노드에서 디코딩한 신호를 나타낸다. 릴레이 및 목적지는 소스 노드와 자원 노드 간의 신뢰 전파를 이용한 MPA 기반 검출 기법을 이용하여 송신 신호를 복호한다<sup>3)</sup>.

## III. 신호 성상도 회전각 최적화

[그림 2]에서와 같이 하나의 주파수 자원에 여러 송신 신호를 중첩하여 전송하는 Overloaded 자원 할당의 경우, 각 사용자들이 동일한 변조 체계를 사용하면 신호 성상도가 구분되지 않는다. [그림 3(a)]는 각 주파수 자원을 공유하는 3명의 사용자가 모두 동일한 QPSK 변조 체계를 사용한 경우의 신호의 성상도를 나타낸다. 총  $64(=4^3)$ 개의 서로 다른 신호 조합이 있지만 16개 포인트만 나타남을 확인할 수 있고 이는 평균적으로 4개의 서로 다른 신호 조합이 성상도상에서 구분되지 않음을 의미한다. 이러한 문제 해결을 위해 [2]에서는 사용자마다 신호 성상도의 회전각을 달리 함으로써 [그림 3(b)]와 같이 서로 다른 신호 조합이 구분되도록 하였다.

[2]에서는 Heuristic 방법으로 구한 회전각을 적용하였으므로 최적의 회전각 도출을 통한 성능 개선의 여지가 있다. 본 논문에서는 신호 성상도에서 포인트 간의 최소 거리를 최대화하는 회전각을 도출한다. 최적의 회전각 도출을 위해 먼저 표준 QPSK 변조 신호의 값을 식 (1)과 같이 정의한다.)

$$P(k, \ell) = a_k + jb_\ell, \quad k, \ell \in \{1, 2\} \quad (1)$$

여기서  $a_1 = b_1 = -a_2 = -b_2 = 1/\sqrt{2}$ 이다. 식 (1)로부터  $\theta$ 만큼 회전된 QPSK 신호는 식 (2)와 같다.

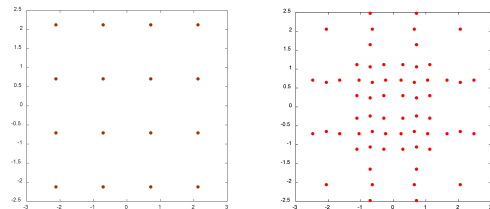


그림 3. 중첩된 QPSK 신호의 성상도 (a) 성상도 회전을 적용하지 않은 경우. (b) 성상도 회전을 적용한 경우. Fig. 3. Signal constellation of overlapped QPSK signals. (a) Without rotations. (b) With rotations.

1) 설명의 편의를 위해 III장에서는 변조 방식을 QPSK로 한정하지만, 제안하는 방법은 다른 변조 방식에도 적용 가능하다. IV장에서는 16-QAM에 대한 결과도 제시한다.

$$P_{\theta}(k, \ell) = (a_k \cos \theta + b_k \sin \theta) + j(-a_k \sin \theta + b_k \cos \theta), \quad k, \ell \in \{1, 2\} \quad (2)$$

동일 주파수 자원을 공유하는 사용자 수를  $S$ , 사용자 간 회전각의 최소 차이를  $\theta$ , 기준 사용자(사용자 1)의 회전각을  $\theta_0$ 라 하면 중첩된 신호는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$P_{\theta}(\mathbf{k}, \boldsymbol{\ell}) = \sum_{s=1}^S P_{\theta_0 + (s-1)\theta}(k_s, \ell_s), \quad (3)$$

$$\mathbf{k} = [k_1, k_2, \dots, k_S], \boldsymbol{\ell} = [\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_S],$$

$$k_i, \ell_i, \dots, k_S, \ell_S \in \{1, 2\}$$

식 (3)으로부터 중첩된 신호의 성상도 포인트 간의 최소 거리는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$d_{\min}(\theta) = \min \{ \|P_{\theta}(\mathbf{k}, \boldsymbol{\ell}) - P_{\theta}(\mathbf{k}', \boldsymbol{\ell}')\| : \mathbf{k} \neq \mathbf{k}', \boldsymbol{\ell} \neq \boldsymbol{\ell}' \} \quad (4)$$

따라서 최소 거리를 최대화하는 최적 회전각 차이  $\theta^*$ 는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta^* = \operatorname{argmax}_{\theta} d_{\min}(\theta) \quad (5)$$

[그림 4]는  $S=3$ 의 경우  $\theta$ 에 따른  $d_{\min}(\theta)$  값의 변화를 보여주고, 이 경우 최적의 회전각 차이  $\theta^* \approx 17.53^\circ$ 이다.

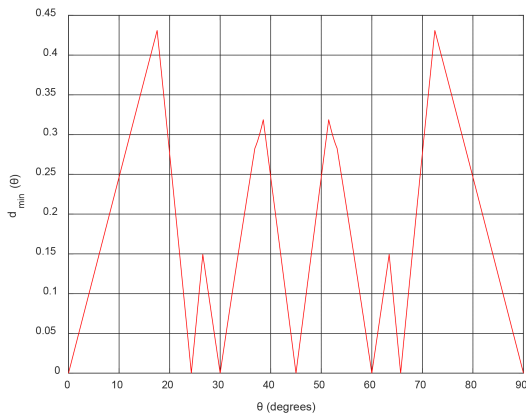


그림 4.  $\theta$ 에 따른 성상도 포인트 최소 거리 변화.  
Fig. 4. Minimum distance between signal points in the constellation versus  $\theta$ .

#### IV. 모의실험 결과

[그림 2]에 해당하는  $M=4, N=6, S=3$ 인 경우에 대해 모의실험을 수행하였다. 릴레이 노드에서 발생하는 잡음은 평균이 0, 분산이  $\sigma^2$ 인 Additive White Gaussian Noise이며, 각 전송 신호는 Rayleigh 페이딩 채널을 겪는다고 가정하였다.

[그림 5]는 QPSK를 사용한 경우 회전각 최적화 여부에 따른 Bit Error Rate (BER) 성능을 비교한 모의 실험 결과를 보여준다. “No Rotation” 그래프는  $\theta=0$ , “Heuristic” 그래프는 [2]에서 제시한  $\theta=\pi/16=11.25^\circ$ 로 설정한 경우이며, “Optimal” 그래프는 III장에서 구한 바와 같이  $\theta=17.53^\circ$ 로 설정한 경우이다. [그림 6]은 16-QAM의 경우 BER 성능을 비교한 모의실험 결과를 보여준다. “No Rotation” 그래프는  $\theta=0$ , “Heuristic” 그래프는  $\theta=\pi/32=5.625^\circ$ 로 설정한 경우이며, “Optimal” 그래프는 III장에서 설명한 기법을 16-QAM에 적용하

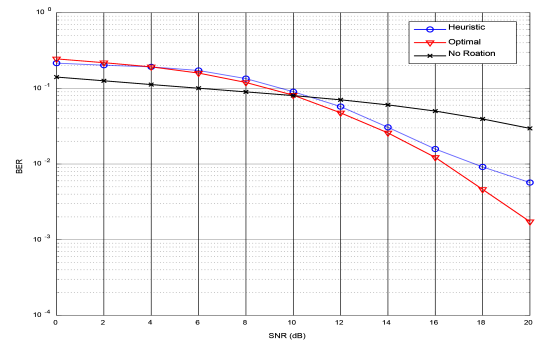


그림 5. QPSK를 사용하는 경우 회전각 최적화 여부에 따른 BER 성능 비교.  
Fig. 5. Comparison of BER performance of QPSK signals with and without optimization of the rotation angle.

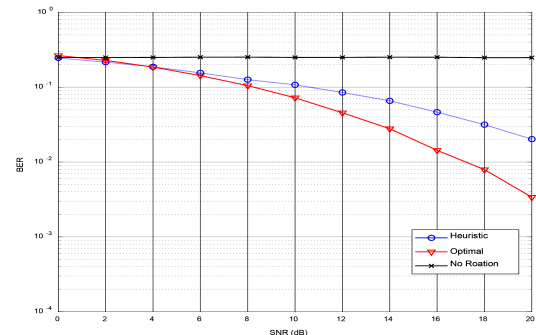


그림 6. 16-QAM을 사용하는 경우 회전각 최적화 여부에 따른 BER 성능 비교.  
Fig. 6. Comparison of BER performance of 16-QAM signals with and without optimization of the rotation angle.

여 구한 최적 회전각인  $\theta = 28.83^\circ$  로 설정한 경우이다. 신호 성상도 회전각 최적화에 따른 이득은 16-QAM의 경우가 QPSK의 경우에 비해 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다.

## V. 결 론

셀룰러 상향링크에서 주파수 중첩을 통해 다중사용자 릴레이 전송을 하는 시스템에서 다중 신호 구분을 위해서는 신호 성상도 회전이 필요하다. 본 논문에서는 최적의 신호 성상도 회전각을 도출하고 모의실험을 통해 기존에 적용한 회전각 대비 성능이 향상됨을 검증하였다. QPSK의 경우와 16-QAM의 경우의 비교를 통해 제안한 회전각 최적화에 따른 이득이 16-QAM의 경우 상대적으로 크게 나타남을 확인하였다.

## 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] J.-S. Eom, G.-M. Kang, H. M. Kim, and O.-S. Shin, "A multiuser relaying scheme for uplink cellular systems," *J. KICS*, vol. 44, no. 9, pp. 1698-1701, Sep. 2019.
- [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.