

협력 네트워크를 위한 선택 기반 협력기법에 대한 비교

강재욱 이동훈 이흥노 김기선

광주과학기술원

(jwkkang, mmdang, heungno, kskim)@gist.ac.kr

Comparison of Selection-Based Cooperation techniques for Cooperative Networks

Jaewook Kang, Donghun Lee, Heung-No Lee, Kiseon Kim

Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

요 약

최근 일정한 공간 안에 존재하는 다중 사용자를 릴레이 자원으로 이용하기 위한 협력통신에 대한 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다. 협력통신은 일정한 공간에서 단일 안테나를 가지는 다중 사용자들이 서로의 안테나를 공유하는 네트워크를 형성하여 가상의 MIMO 시스템을 만드는 전송 기법이다. 선택 기반의 협력(Selection Based Cooperation, SBC)은 협력통신을 위한 하나의 유력한 기법이다. 분산 부호화 기법과는 다르게 선택 기반의 협력은 협력 네트워크에 존재하는 다중 사용자 중에서 좋은 조건으로 통신에 잘 기여할 수 있는 사용자만을 선택하여 이용한다. 잘 설계된 선택 기반의 협력통신 알고리즘은 시스템 오류 성능을 향상 시킬 뿐만 아니라 에너지 효율적 통신 전략으로도 유용하다. 본 논문의 목적은 선택 기반 협력 기법을 비교하고 분석하는 것이다.

1. 서 론

MIMO(Multi-Input-Multi-Output) 기법은 차세대 무선 통신 시스템을 위한 해법 중에 하나로 가장 각광받고 있다. 하지만 기존 MIMO 기법을 이용하는 무선통신 시스템은 다음과 같은 문제점을 안고 있다.

I. 하드웨어적인 제한: MIMO 기법은 안테나 개수가 증가함에 따라서 송수신기에서의 구현 복잡성이 급격하게 증가한다.

II. 지형적인 제한: 기존의 MIMO 기법은 단일 점 대 점 통신 시스템을 기반으로 하기 때문에 지형적으로 송수신기 사이에 큰 장애물이 있을 경우 통신이 제한된다.

차세대 무선 통신 시스템에서 위에서 언급된 MIMO 기법의 문제점을 극복하면서 기존의 데이터 전송 속도를 뛰어 넘는 통신 기술로 협력통신이 제안되고 있다[1]. 협력통신의 기본 아이디어는 일정한 공간 안의 단일 안테나를 가지는 다중 사용자들이 협력 네트워크를 구성하여 서로의 안테나를 공유하는 가상의 MIMO 시스템을 만드는 것이다. 즉 하나의 사용자가 소스가 되어 데이터를 전송할 때 협력 네트워크 상의 다른 사용자들은 릴레이가 되어 소스를 지원한다. 즉 협력 네트워크 안의 사용자의 수에 따라서 한 전송을 지원 할 수 있는 릴레이의 수가 결정되고 이것은 협력 다이버시티 이득으로 표현된다. 협력통신에서는 사용자 단말은 단순하게 단일 안테나로 구성되기 때문에 복잡한 하드웨어 구현을 피할 수 있다. 그 뿐만 아니라, 일정 공간 안에 분산되어 있는

사용자들이 서로를 릴레이로 이용하므로 전송 시 소스 노드와 목적 노드 사이에 지형적으로 큰 장애물이 있는 경우에도 적절한 알고리즘을 통하여 다른 사용자 노드들과 장애물을 피하는 링크를 형성한다면 통신을 이룰 수 있다.

협력통신은 크게 분산 부호화 기법과 릴레이 선택 기법에 대한 연구로 진다. 분산 부호화 기법은 기존에 존재하는 부호화 기법을 협력통신 모델에 적합하게 수정하여 적용하는 방향으로 연구가 진행되어 오고 있다. 대표적으로는 분산 시간-공간 부호 나 분산 그래프 부호화와 같은 기법들이 나와 있다[2]. 본 논문에서는 그러한 협력 통신 기법 중 선택 기반의 협력통신에 초점을 맞춘다. 다음 장에서는 선택 기반 협력통신 대해서 설명한다. 3장에서는 설명된 선택 기반 기법에 대한 비교와 분석을 한다.

2. 선택 기반의 협력 통신 기법

선택 기반의 협력 통신 기법은 기본적으로 다음과 같은 특징을 가진다.

- * 모든 사용자가 가상 MIMO 시스템에 참여하는 것이 아니고 가장 조건이 좋은 한 노드 또는 몇 개의 다중 노드만이 선택되어 릴레이로써 참여한다.
- * 부호화 와 복호화가 필요하지 않기 때문에 구현이 비교적 단순하다.

다

본 장에서는 먼저 단일 릴레이 선택 기법인 기회적 최선 단일 릴레이 선택 기법에 대해서 설명한다. 그 후 다중 릴레이 선택 기법에 대하여 소개한다.

A. 기회적 최선 단일 릴레이 선택 기법(Opportunistic best single relay selection)

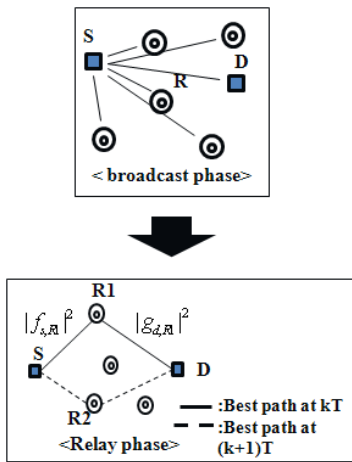


그림 1 기회적 최선 단일 릴레이 선택 기법

2006년에 Bletsas는 최적 단일 릴레이 선택을 기반으로 하는 간단한 네트워크 경로 선택 기법을 제안하였다[3]. 이 기법은 네트워크 상에 하나의 소스 사용자 노드와 그 목적 노드가 존재하고 M개의 릴레이 사용자 노드가 있는 환경을 고려한다. 그리고 모든 릴레이 노드와 목적 노드 사이의 링크들은 직교하고 독립인 준 정적 레일레이(Quasi-static Rayleigh) 채널로 가정하고 반 이중 제약(Half-duplex Constraint)조건 하에 통신이 수행된다. Bletsas는 그러한 환경에서 매 전송마다 하나의 최선 릴레이만을 사용하여 M의 협력 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 보였다. 소스의 정보 전송은 두 단계로 나누어 진행된다.

- 1) 브로드캐스트 단계: 소스 노드는 목적 노드로 정보를 전송하고 릴레이 노드에서는 그 정보를 엿듣는다.
- 2) 릴레이 단계: 선택된 릴레이 노드가 소스로부터 엿들은 정보를 다시 한 번 목적 노드로 전송한다.

선택되는 릴레이는 매 순간마다 분산되어 있는 릴레이 중에서 소스-릴레이, 릴레이-목적의 순간 채널 상태가 가장 좋은 릴레이가 선택된다. 그렇기 때문에 이 기법을 기회적 릴레이 선택(Opportunistic Relay Selection)기법이라고 부른다.

Bletsas가 제안한 기법에서는 릴레이를 선택을 위한 순간 채널 상태를 측정하기 위해서 소스 노드와 목적 노드가 주고받는 RTS

(Ready-to-send)와 CTS(Clear-to-send)를 이용한다. 각 릴레이에서 RTS 와 CTS신호를 모니터링 하여 그 신호 세기를 기준으로 순간 채널 상태를 판단한다. 그리고 두 정보의 적절한 함수를 h_i 이용하여 각 릴레이에서 좋은 채널 상태를 가지는 릴레이의 타이머가 가장 먼저 종료되도록 설정한다. 타이머의 초기 값을 T_i 라고 했을 때 기회적 최선 릴레이 선택은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$T_{best} = \min\{T_i\}, i \in [1, \dots, M]$$

$$\text{where } T_i = \frac{\lambda}{h_i}, \lambda: \text{A constant}$$

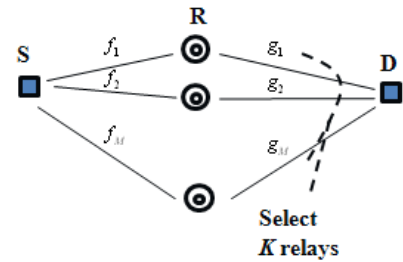


그림 2 다중 릴레이 선택 기법

함수 h_i 는 목적에 따라서 아래와 같이 여러 종류가 사용 될 수 있다.

- 함수1- SNR 함수

$$h_i(f_i, g_i, P_i) := \frac{PP_i |f_i g_i|^2}{1 + P |f_i|^2 + P_i |g_i|^2}$$

- 함수2-조화 평균 함수

$$h_i(f_i, g_i, P_i) = \left(\frac{1}{P |f_i|^2} + \frac{1}{P_i |g_i|^2} \right)^{-1}$$

- 함수 3-나쁜 채널 함수

$$h_i(f_i, g_i, P_i) = \min\{P |f_i|^2, P_i |g_i|^2\}$$

여기서 소스 노드와 M개의 릴레이 간의 채널을 f_1, \dots, f_M 으로 표시하고 그 릴레이들과 목적 노드 간의 채널을 g_1, \dots, g_M 으로 표시한다. P, P_i 는 각각 소스 노드에서의 전송 전력과 릴레이에서의 전송 전력을 나타낸다.

이러한 기회적 최선 단일 릴레이 선택 알고리즘은 네트워크 상의 채널이 변화 할 때 마다 최적의 경로를 다시 형성하여 통신을 하기 때문에 페이딩 채널에 대응하는 하나의 대안이 된다. 또한 최선 릴레이 선택을 타이머를 이용하여 경쟁 기반(Contention-based)으로 하기 때문에 각 릴레이에서 네트워크 토폴로지에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 기회적 최선 릴레이 선택 기법이 성립하기 위해서는 매 통신 순간 마다 최선 릴레이를 선택하기 위한 일정한 채널 코히어런스 시간

(Channel coherence time)이 보장 되어야 한다. 또한 같은 수의 릴레이를 사용하는 분산 부호화 기법과 비교하였을 때 릴레이를 하나만 이용하기 때문에 다이버시티 이득은 같으나 SNR 이득 측면에서는 성능이 떨어진다.

B. 다중 릴레이 선택 기법(Multiple relay selection)

협력 네트워크에서 릴레이를 여러 개의 선택하여 사용하는 다중 릴레이 선택 기법이 Jing에 의해 2009년에 고려되었다 [4]. 즉 네트워크에 존재하는 M 개의 릴레이 노드들 중에 하나가 아닌 K개의 릴레이를 선택한다. 하지만 이 경우 릴레이 간의 경쟁 기반 프로토콜이 아닌 목적 노드의 수신기에서 모든 채널 상태 정보를 가지고 K개의 릴레이를 선택하는 방법을 사용한다. 수신기에서 선택된 K개의 신호는 최대 비율 결합(Maximum ratio combining, MRC)으로 처리된다. 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r = \sqrt{P} \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i |f_i g_i| \sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2} P} s + \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i |g_i| \sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2} P} v_i + w, \alpha_i \in \{0,1\}$$

여기서 v_i, w 는 각각 릴레이에서의 i.i.d. 복소 가우시안 백색 잡음을 나타내고 α_i 는 릴레이의 동작 상태를 나타낸다. ($\alpha_i = 1$: 해당 릴레이 켜짐, $\alpha_i = 0$: 해당 릴레이 꺼짐) 그 이외의 기호는 위에서 사용했던 것과 같다. 수신 신호의 SNR은 다음과 같이 주어진다.

$$SNR_{general} = \frac{P \left(\sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i |f_i g_i| \sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2} P} \right)^2}{1 + \sum_{i=1}^M \frac{\alpha_i^2 |g_i|^2 \sqrt{P_i}}{\sqrt{1+|f_i|^2} P}}$$

결과적으로 다중 릴레이 선택의 문제는 수신 SNR을 최대화 하는 릴레이의 집합을 찾는 문제가 된다.

$$\max_{\{\alpha_1, \dots, \alpha_R\}} SNR_{general} \quad s.t. \alpha_i \in \{0,1\}$$

하지만, 모든 가능한 경우를 모두 비교하여 선택한다면 M개의 릴레이가 존재하기 때문에 총 $2^M - 1$ 개의 가능성을 고려해야 한다. 하지만 Jing은 릴레이를 순서화 하는 방법을 이용하여 릴레이의 개수 M에 비례하는 복잡도를 가지는 다중 릴레이 선택 기법을 제안하였다. 그 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 수신기는 알고 있는 모든 채널 상태 정보를 바탕으로 생성한 합수 값 h_i 을 이용하여 M 개의 릴레이를 순서화 하여 즉 $h_1 > h_2 > \dots > h_M, \{1,2,\dots,M\}$ 을 얻는다. 합수 값 h_i 는

기회적 최선 릴레이 선택 기법에서 소개했던 것과 같이 여러 가지 함수가 사용될 수 있다.

- 2) 수신기는 $SNR\{1\}, SNR\{1,2\}, \dots, SNR\{1,2,\dots,M\}$ 중에서 가장 큰 값을 가지는 집합 $\{1,\dots,K\}$ 을 찾아 선택한다 그리고

$$h_{th} = \frac{h_k + h_{k+1}}{2} \text{ 을 모든 M 릴레이에게 피드백 한다.}$$

- 3) 각 릴레이는 h_{th} 과 자신의 h_i 값을 비교하여 $h_i > h_{th}$ 이면 협력통신에 참여 하고 그렇지 않으면 한 정보 전송 기간 동안 백오프 상태로 들어간다.

릴레이 순서화 알고리즘을 통하여 다중 릴레이를 선택하는 경우 총 M개의 경우 즉 $SNR\{1\}, SNR\{1,2\}, \dots, SNR\{1,2,\dots,M\}$ 에 대해서만 고려하기 때문에 선택 알고리즘의 복잡도는 네트워크에 있는 릴레이의 개수 M에 선형적으로 비례하게 증가한다. 그러나 이 경우 고려되지 않은 집합에 최적의 성능을 내는 집합이 존재 할 가능성이 남아있기 때문에 결과하는 성능은 최적이라고 할 수 없다. 하지만 Jing이 실행한 컴퓨터

	Best single Relay Selection	Multiple Relay Selection
Diversity order	M	M
SNR gain	small	large
Energy consumption	large	small
Control	Local	Central (at the destination)

그림 3 단일 릴레이 선택과 다중 릴레이 선택의 비교

모의 실험 결과는 릴레이 순서화 알고리즘을 이용한 다중 릴레이 선택이 최적의 성능에 근접하는 준 최적의 성능을 가진다는 것을 보여주었다. 단일 최선 릴레이 선택 기법과 비교하였을 때는 다이버시티 이득 측면에서는 같으나 다중 릴레이를 선택하는 경우 SNR 이득을 더 얻을 수 있다. 하지만 더 많은 릴레이를 사용하기 때문에 결과적으로 사용하는 릴레이 개수에 비례하는 에너지를 사용하게 된다.

3. 결론

본 논문에서는 기회적 단일 최선 릴레이 선택 방법과 다중 릴레이 선택 방법에 대해서 간략하게 소개 하였다. 선택 기반의 협력 기법은 매 전송마다 좋은 채널을 골라서 사용함으로써 적은 수의 릴레이의 사용만으로 네트워크에 있는 릴레이 개수만큼의 다이버시티 이득을 누릴 수 있다는 장점을 가진다. 표 1에서는 두 기법의 특징에 대하여 비교 하였다. 공통적으로 선택 기반의 협력 통신은 릴레이 노드 사이에 동기화가 필요 없고 단순하게 분산 네트워크의 통신 모델을 설계하기에 적합한 기법이기 때문에 무선 센서 네트워크나 셀룰러 모바일 네트워크에 적용할 수 있는 유력한 기술로 주목 받고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Laneman, J.N., Tse, D.N.C., Wornell, G.W., "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," IEEE Trans. on Inform. Theory, Vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [2] Yonghui Li, "Distributed coding for cooperative wireless networks: An overview and recent advances - [Topics in Ad Hoc and Sensor Networks]," IEEE Communi. Magazine, Vol. 47, Issue 8, pp. 71-77, August, 2009.
- [3] Bletsas, A., Khisti, A., Reed, D.P., Lippman, A., "A simple cooperative diversity method based on network path selection,"IEEE J. Sel. Areas in Communi .Vol. 24, Issue 3, pp. 659-672, March, 2006.
- [4] Jing, Y., Jafarkhani, H., "Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders,"IEEE Trans. on Wireless Communi., Vol. 8, Issue 3, art. no. 4801494, pp. 1414-1423, March 2009.