

네트워크 코딩 기반의 협력통신에서 Hybrid AF and DF 방식의 아웃티지 성능 분석 및 최적 파워 할당 기법

백주하^{a)}, 이동훈^{b)}, 이재영^{b)}, 허준^{b)‡}

Outage Analysis and Optimal Power allocation for Network-coding-based Hybrid AF and DF

JooHa Bek^{a)}, Donghoon Lee^{b)}, Jaeyoung Lee^{b)}, and Jun Heo^{a)‡}

요 약

네트워크 코딩은 멀티캐스트 네트워크에서 전송량을 증가시키기 위해 제안된 기법으로 최근에는 다수의 사용자가 성능 향상을 위해 서로의 자원을 공유하는 협력통신에 네트워크 코딩을 적용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 네트워크 코딩 기반의 협력통신에서 사용자는 자기 자신의 데이터와 다른 사용자의 데이터를 네트워크 코딩 연산을 통해 결합하여 전송한다. 기존의 연구에서는 네트워크 코딩을 기반으로 한 적응형 복호 후 전송(Network-Coding-based Adaptive Decode-and-Forward, NC-ADF) 방식이 다이버시티(diversity) 이득과 추가적인 전송량 증대를 가져올 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 기존 프로토콜의 성능 증대와 네트워크 코딩의 이득을 극대화 하기 위해 사용자간 채널의 상태에 따라 증폭 후 전송(Amplify-and-Forward, AF) 방식과 복호 후 전송(Decode-and-Forward, DF) 방식을 적응적으로 적용한 새로운 네트워크 코딩 기반의 협력통신 기법을 제안하였다. 또한 제안한 기법의 아웃티지 확률을 구하고 높은 SNR 영역에서 최대 다이버시티 차수(full diversity order)를 가짐을 보였다. 나아가 추가적인 성능 향상을 위해 본 논문에서 제안된 기법에 의한 아웃티지 확률을 기반으로 최적의 전송 파워 비율을 구하였다.

Abstract

Network coding was proposed to increase the achievable throughput of multicast in a network. Recently, combining network coding into user cooperation has attracted research attention. For cooperative transmission schemes with network coding, users combine their own and their partners messages by network coding. In previous works, it was shown that adaptive DF with network coding can achieve diversity gain and additional throughput gain. In this paper, to improve performance of conventional protocols and maximize advantage of using network coding, we propose a new network coding based user cooperation scheme which uses adaptively amplify-and-forward and decode-and-forward according to interuser channel status. We derive outage probability bound of proposed scheme and prove that it has full diversity order in the high SNR regime. Moreover, based on the outage bound, we compute optimal power allocation for the proposed scheme.

Keyword : Cooperative communication, network coding, hybrid AF and DF, outage probability, power allocation, transmit diversity

a) 삼성전자

Samsung Electronics

b) 고려대학교 전자전기공학과

School of Electrical Engineering, Korea University

‡ 교신저자 : 허준 (junheo@korea.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-C1090-1131-0009)
· 접수일(2011년10월28일), 수정일(2011년12월6일), 게재확정일(2011년12월6일)

1. 서론

이동통신 시스템에서 페이딩(fading)의 영향을 최소화 하는 것은 초고속 통신과 수신된 신호의 신뢰성 확보를 위해 항상 중요한 이슈이다. 또한 스마트폰의 확산과 더불어 단말기의 기능이 복잡해짐에 따라 소비전력을 최소화 하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다. 페이딩 채널을 효율적으로 극복하는 기법 중에서 공간 다이버시티(space diversity)를 이용하는 다중 안테나 전송 기술(Multiple Input Multiple Output, MIMO)은 최근 이동통신 연구의 주요한 분야이다. 그러나 현실적으로 전력과 크기가 제한적인 단말기에 많은 안테나를 삽입하는 것은 공간적인 측면이나 복잡도 측면에서 제약이 생긴다.

릴레이를 이용한 협력통신 기법(relay cooperation)은 사용자와 기지국 사이에 위치한 릴레이들이 사용자로부터 전송된 신호가 페이딩의 영향으로 신호 세기가 감쇠될 때 이를 보완해주는 기법으로 사용자와 릴레이가 다중 송신 안테나의 역할을 하게 되므로 단말기에 물리적인 안테나의 추가 삽입 없이도 공간 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 또한 여러 명의 사용자가 존재할 때 릴레이의 역할을 각 사용자가 수행할 수 있는 방법이 제안되었고 이러한 사용자간의 협력 통신 기법(user cooperation)으로도 다이버시티 효과를 얻을 수 있다^{[1][2]}. 그림 1은 위의 두 협력통신 기법을 예시한 것이다.

이러한 협력 통신은 송신 노드로부터 수신된 신호를 증폭하여 수신 노드로 전송하는 증폭 후 전송(Amplify-and-Forward, AF)과 수신한 신호에 에러가 없을 경우 수신된

신호를 다시 인코딩 하여 전송하는 복호 후 전송(Decode-and-Forward, DF)의 두 가지 프로토콜로 크게 분류 할 수 있다. AF 프로토콜은 복잡도가 작고 사용자-릴레이간 채널의 상태가 좋을 경우 좋은 성능을 보이며 DF 프로토콜은 복잡도가 크지만 릴레이가 복호에 성공할 경우 AF에 비하여 향상된 성능을 보인다. 그리고 relay cooperation에서 기존의 DF 방식의 성능을 향상시키기 위하여 적응형 복호 후 전송(Adaptive Decode-and-Forward, AdDF) 프로토콜이 제안되었으며 이를 user cooperation에 적용하는 방식 또한 제안되었다^{[3][4]}. 이 방식은 사용자가 상대 사용자 정보의 복호에 성공하였을 경우 DF 프로토콜을 이용하여 정보를 전달하지만, 실패하였을 경우 사용자는 자신의 정보를 목적으로 재전송하는 프로토콜이다. 그러나 이 프로토콜은 복호에 실패한 정보는 목적 노드로의 네 번의 전송 기회 중 한번만 전송이 되는 정보의 불균형을 초래한다. 이를 극복하기 위한 방법으로 하이브리드 릴레이(hybrid relay) 기법이 소개되었으며^[5], 이후 하이브리드 릴레이 기법은 여러 릴레이 및 사용자 협력 통신에 적용 및 발전되고 있다^{[6][7][8][9]}. 또한 현재 경로 다이버시티 이득과 함께 코딩 이득을 얻기 위해 채널코딩기법을 협력통신에 적용하는 channel coded user cooperation도 활발히 연구 중이다^{[10][11]}.

본 논문에서는 네트워크코딩 기반의 협력통신 기법을 고려한다. 네트워크 코딩(network coding)은 다수의 사용자가 서로의 자원을 효과적으로 공유함으로써 멀티캐스트 네트워크에서 전송량의 증가를 기대할 수 있으며^[12], user cooperation에 네트워크 코딩의 적용은 효과적인 성능 향상 기법 중 하나이며 [13][14] 그 중 [13]은 AdDF 프로토콜에

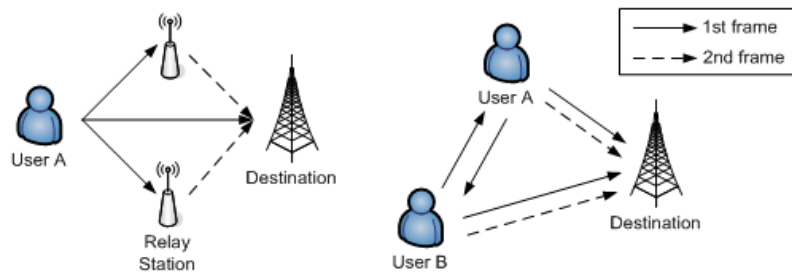


그림 1. 릴레이를 이용한 협력통신 기법(좌)과 사용자간의 협력통신 기법(우)
 Fig. 1. Relay cooperation(left-image) and user cooperation(right-image)

네트워크코딩 기법을 적용한 기법(Network-Coding-based Adaptive Decode and Forward, NC-AdDF)을 제안하였다.

한편, 무선통신환경에서 소형화된 단말기의 제한적인 배터리 용량으로 인해 단말의 전력 소모를 줄이는 문제는 매우 중요한 이슈이다. 이를 위해 여러 협력통신 기법에 최적의 파워를 할당하는 방법은 꾸준히 연구되어 왔다. 특히 한정된 파워를 최적의 비율로 단말에 할당함으로써 아웃티지 확률을 최소화 하는 연구는 [15][16]에 소개되었다.

본 논문에서는 기존 협력통신 프로토콜(NC-AdDF)의 성능을 높이고, 네트워크코딩의 장점을 최대한 살리기 위하여 Hybrid relay와 네트워크코딩의 장점을 적절히 결합한 “네트워크 코딩 기반의 Hybrid AF and DF (NC-HAD)” 프로토콜을 제안하였다. NC-HAD 프로토콜은 상대방의 정보를 AF 해줌으로써 자기 자신의 정보뿐 아니라 상대방의 정보도 복호에 활용하는 네트워크코딩 기법의 협력통신에 매우 효과적이다. 이 프로토콜의 성능 검증을 위해 아웃티지 확률을 분석하였고, 기존 프로토콜과의 성능 비교를 통해 본 논문에서 제안된 프로토콜의 성능이 더욱 우수함을 보였다. 또한 높은 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR) 영역에서의 근사화 방법을 이용하여 제안된 프로토콜이 최대 다이버시티 차수를 가짐을 증명하였다. 마지막으로 피드백 채널을 통해 채널상태정보(channel-state-information, CSI)를 완벽히 알 수 있다는 가정하에 최적의 전송파워 할당을 위한 최적의 전송파워 비율을 유도하였으며 이 경우의 성능 이득을 수치적 분석을 통해 확인하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 기존 논문과 같은 사용자 협력 통신에 의거한 2명의 서로 다른 사용자(User 1과 User 2)가 존재하고 1개의 목적노드가 있는 네트워크를 가정한다^{[6][10][11][14]}. 각 사용자는 릴레이 역할을 하는 상대 사용자를 통하여 정보를 전송하고 동시에 각 사용자는 직접 목적노드로 정보를 전송한다. 본 논문은 모든 전송 모드를 두 번의 프레임(frame)을 통하여 전송하는 반이중방식(half-duplex)을 가정하였고, 목적노드까지 하나의 릴레이를 거치는 이중-홉

(dual-hop) 중계방식을 사용하여 통신한다. 각 사용자는 직교 채널(orthogonal channel)을 통하여 정보를 보내고, 이 때 채널의 변화 정도는 slow and flat Rayleigh fading으로 가정하였다. 목적 노드에서는 각 신호를 최대비합성(Maximal-Ratio-Combining, MRC)하여 수신한다. 또한 모든 노드는 채널상태정보(CSI)를 완벽히 알고 있다고 가정하였다.

첫 번째 프레임에서 각 사용자는 자신의 정보를 상대 사용자와 목적 노드로 브로드캐스팅(broadcasting) 한다. 이때 User 1으로부터 목적노드가 받는 신호 $r_{1,d}$ 와 상대 사용자(User 2)가 받는 신호 $r_{1,2}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{1,d} &= \sqrt{P_1} h_{1,d} x_1 + n_{1,d} \\ r_{1,2} &= \sqrt{P_1} h_{1,2} x_1 + n_{1,2} \end{aligned} \quad (1)$$

이때, x_1 은 User 1의 송신 신호를 나타내며, P_1 은 송신 신호의 파워를 나타낸다. 또한 $h_{1,d}$ 와 $h_{1,2}$ 는 각각 User 1과 목적노드, User 1과 User 2 사이 채널의 계수(channel coefficient)를 나타내며, $n_{1,d}$ 와 $n_{1,2}$ 는 각 수신단에서의 백색 가우시안 노이즈(Additive White Gaussian Noise, AWGN)을 나타낸다.

두 번째 프레임에서 목적노드가 릴레이 역할의 사용자(User 2)로부터 받는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{2,d} = \beta_i h_{2,d} r_{1,2} + n_{2,d} \quad (2)$$

여기서 β_i 는 릴레이 노드(User 2)의 파워 제약에 따른 증폭 계수로써 전송 프로토콜의 종류에 따라 다른 값을 갖는다. 만약 User 2가 AF 프로토콜을 이용해 정보를 전송한다면 β_{AF} 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\beta_{AF} \leq \sqrt{P_2 / (P_1 |h_{1,2}|^2 + N_0)} \quad (3)$$

이때, P_2 는 User 2의 송신 파워를 나타낸다. 또한 만약 User 2가 DF 프로토콜을 이용해 정보를 전송한다면 β_{DF} 는 $\sqrt{P_2}$ 로 나타낼 수 있다.

채널 계수인 $h_{1,d}$, $h_{1,2}$, $h_{2,d}$ 는 평균이 0이고, 분산

(variance)이 각각 $\delta_{1,2}^2$, $\delta_{1,d}^2$, $\delta_{2,d}^2$ 인 복소 가우시안 랜덤변수(complex Gaussian random variable)로 모델링 되며, 노이즈는 평균이 0이고, 각 차원의 분산이 $N_0/2$ 인 복소 가우시안 랜덤변수로 모델링 된다.

최대 평균 상호 정보량(maximum average mutual information)은 다음과 같이 표시 할 수 있으며

$$I_D = \log_2 \left(1 + \frac{P_i |h_{i,j}|^2}{N_0} \right) \quad (b/s/Hz) \quad (4)$$

아웃티지는 I_D 가 임계값(threshold) R 보다 작을 때 일어난다고 가정하면, 아웃티지 확률 $\Pr\{I_D < R\}$ 은 다음과 같다.

$$\Pr \left\{ |h_{i,j}|^2 < \frac{(2^R - 1)N_0}{P_i} \right\} \quad (5)$$

Rayleigh fading 채널 환경에서는 $|h_{i,j}|^2$ 는 parameter로 $\delta_{i,j}^2$ 를 가지는 지수분포(exponential distribution)이며, 이때 아웃티지 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr\{I_D < R\} = \Pr \left\{ |h_{i,j}|^2 < \frac{(2^R - 1)N_0}{P_i} \right\} \\ &= 1 - \exp \left(-\frac{(2^R - 1)N_0}{P_i \delta_{i,j}^2} \right) \approx \frac{(2^R - 1)N_0}{P_i \delta_{i,j}^2} = \frac{2^R - 1}{\Gamma_{i,j}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\Gamma_{i,j}$ 는 fading 채널을 통해 수신된 신호의 평균 신호 대 잡음비(SNR) 값을 나타내며 본 논문에서는 마지막 수식처럼 outage bound를 구하기 위해서 asymptotic한 분

석을 추가로 수행한다.

III. 기존의 협력통신 기법

1. Adaptive DF와 Hybrid relay를 이용한 협력 통신

적응형 복호 후 전송(AdDF) 방식은 relay cooperation에서 DF 프로토콜의 한 분류로서 첫 번째 프레임에서 상대 사용자의 정보 복호에 성공할 경우 두 번째 프레임에선 수신한 정보를 DF 프로토콜을 이용하여 전송하지만, 실패할 경우 자기 자신의 정보를 목적 노드로 재전송 하는 방식이다^{[3][4]}. 이를 바탕으로 user cooperation에 AdDF 프로토콜을 적용한 방식도 제안되었다^[10]. User cooperation의 경우 각 사용자의 복호 성공 여부에 따라서 4가지 경우로 나눌 수 있는데 그림2는 위의 AdDF 방식으로 정보를 전송할 때 첫 번째 프레임에서 User 1은 복호에 실패하고, User 2는 복호에 성공할 경우를 예시한 것이다.

그림 2를 통해서 두 사용자 중 하나의 사용자가 복호에 실패하였을 경우 모든 사용자가 같은 정보를 보내게 되고 이는 어느 한 사용자의 정보가 전송되지 않음으로써(User 2의 정보) 해당 사용자의 성능 열화를 발생하게 된다. 따라서 user cooperation에서 AdDF를 적용할 경우 정보의 불균형이라는 단점이 발생하게 된다.

2. Network-coding-based Adaptive DF를 이용한 협력 통신

이와 같은 정보의 불균형을 해소하기 위해서 네트워크

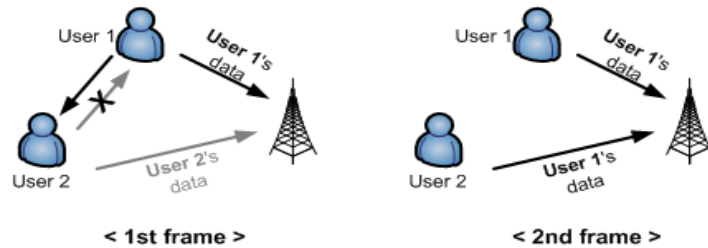


그림 2. 적응형 복호 후 전송(AdDF)의 프레임 구조 예시
Fig. 2. Illustration of Adaptive DF (AdDF) frame model

코딩 기반의 적응형 복호 후 전송 기법(Network-Coding-based Adaptive Decode and Forward, NC-AdDF)이 제안되었다. 이 방식은 AdDF와 네트워크 코딩이 결합된 프로토콜로서 릴레이 역할의 사용자는 상대방 유저 정보의 복호에 성공했을 경우 두 번째 프레임에서 자신의 정보와 수신된 정보를 네트워크 코딩 연산(modulo-2 addition)을 통해 결합하여 목적노드로 전송하며 실패했을 경우 자기 자신의 정보를 목적노드로 재전송한다. 따라서 NC-AdDF에서는 하나의 사용자는 네트워크 코딩 연산을 통해 다른 사용자의 정보를 결합하여 전송하므로 만약 두 사용자중 한 사용자의 정보의 복호에 실패하더라도 두 사용자의 정보가 결합된 데이터로 인해 정보 불균형을 해소 할 수 있다. NC-AdDF는 각 사용자의 복호 성공 여부에 따라 네 가지의 케이스(Case)로 세분화 할 수 있으며, 그림 3에 NC-AdDF의 각 Case별 프레임 구조를 도시하였다.

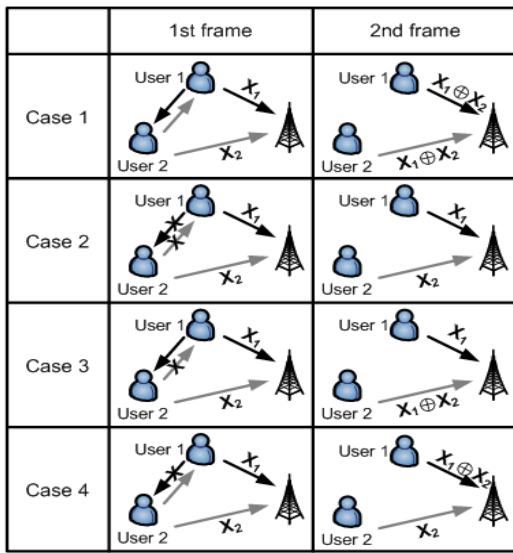


그림 3. NC-AdDF 프로토콜의 Case별 프레임 구조 (x는 수신 노드의 복호 실패를 의미하며, X1은 User 1의 정보, X2는 User 2의 정보를 나타낸다)

IV. NETWORK-CODING-BASED HYBRID AF AND DF

본 논문에서 제안하는 Network-Coding-based Hybrid

AF and DF (NC-HAD) 협력통신 기법은 앞서 언급된 NC-AdDF 프로토콜과 Hybrid relaying 프로토콜의 장점을 결합한 협력통신 기법으로, 첫 번째 프레임에선 각 사용자는 자신의 정보를 상대 사용자와 목적노드로 전송한다. 이때, 수신한 상대 사용자의 정보(pilot symbol)의 복호에 성공할 경우 두 번째 프레임에서 자기 자신의 정보와 상대 사용자의 정보를 네트워크 코딩 연산을 통해 결합한 정보를 목적노드로 전송하며, 실패할 경우 상대 사용자의 정보를 AF 프로토콜을 이용하여 중계한다. 한편, 네트워크 코딩 연산으로 결합된 정보를 복호하는 방법은 다음과 같다.

$$(A \oplus B) \oplus B = A \quad (7)$$

여기서 $A \oplus B$ 는 네트워크 코딩 연산으로 결합된 정보, B 는 상대 사용자의 정보, A 는 우리가 얻고자 하는 정보이다. 위 식에서 알 수 있듯이, 네트워크 코딩 복호에서는 사용자 정보 A 를 얻기 위해서는 B 의 정보를 효율적으로 관

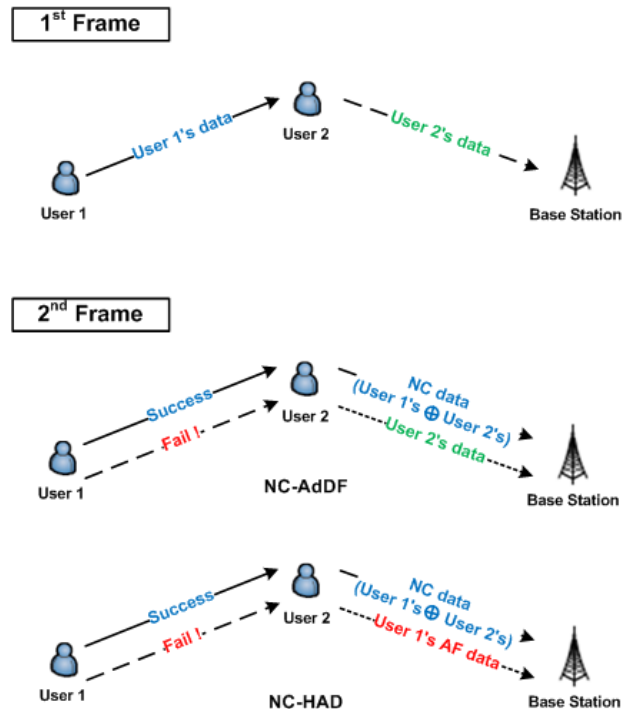


그림 4. NC-AdDF 프로토콜과 NC-HAD 프로토콜의 전송 방식 비교
Fig. 4. Comparison between NC-AdDF and NC-HAD protocols

리하는 것이 중요하며, 상대 사용자 정보의 reliability를 확보하기 위해서 본 논문에서는 상대방 정보를 AF 프로토콜을 이용해서 전송하는 Hybrid relay 프로토콜을 적용하였다. 그림 4는 기존의 NC-AdDF 방식과 본 논문에서 제안하는 NC-HAD 방식의 전송 시나리오를 비교한 것이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 네트워크 코딩을 이용하는 user cooperation에 Hybrid relaying을 적용함으로써 상대방 정보를 AF 프로토콜을 이용해서 전송하게 되고 이는 목적노드에서 복호할 때 보다 좋은 상대방 정보를 이용할 수 있기 때문에 성능 향상에 도움이 된다.

1. 아웃티지 확률 분석

앞서 언급하였듯이 본 논문에서 제안된 NC-HAD 프로토콜을 이용한 협력통신 기법은 두 번의 프레임에서 정보를 전송하며, 이를 통해 다수의 사용자가 협력통신에 참여하는 경우(N명의 사용자가 참여할 경우 2^N cases)로 쉽게 확장 가능하다. 그림 5에 두 명의 사용자가 협력통신에

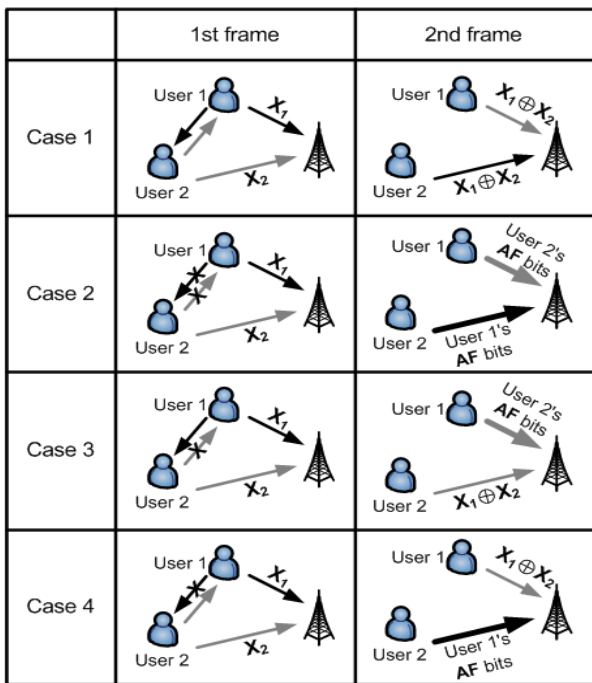


그림 5. NC-HAD 프로토콜의 Case별 프레임 구조 (x는 수신 노드의 복호 실패를 의미하며, X1은 User 1의 정보, X2는 User 2의 정보를 나타낸다)

참여할 경우에 대한 NC-HAD 프로토콜의 프레임 구조를 도시하였으며, 첫 번째 프레임에서 상대 사용자 정보의 복호 성공 여부에 따라 4가지 Case로 구분하였다.

Case 1: NC-HAD 프로토콜에서 Case 1은 NC-AdDF 프로토콜의 Case 1과 동일하다^[14]. 이는 첫 번째 프레임에서 두 사용자 모두 상대 사용자 정보의 복호에 성공할 경우이며, 정보이론적 관점에서 사용자간 채널의 용량이 임계값 (R)보다 클 경우로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{1,2}^1(\gamma_{1,2}) = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{1,2}) > R$$

$$C_{2,1}^1(\gamma_{2,1}) = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{2,1}) > R$$
(8)

이때 $\gamma_{i,j}$ 는 User i와 User j 사이의 instantaneous SNR을 나타내고, $C_{i,j}^k$ 는 User i와 User j 사이 채널의 용량으로써 위 첨자 k는 정보를 전송하는 프레임을 나타낸다. 만약 첫 번째 프레임에서 목적노드가 각 사용자(User 1과 User 2)로부터 수신한 정보(X_1 과 X_2)모두의 복호에 실패할 경우 두 번째 프레임에서 전송되는 정보($X_1 \oplus X_2$)의 복호 성공여부와 관계없이 아웃티지가 발생하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{C_{1,d}^1 < R\} \cdot \{C_{2,d}^1 < R\}$$

$$= \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\}$$
(9)

또한 첫 번째 프레임에서 목적노드가 User 1로부터 수신한 정보의 복호에 실패하고 User 2로부터 수신한 정보의 복호에는 성공할 경우, 두 번째 프레임에서 수신한 네트워크 코딩된 정보의 복호 실패 시 아웃티지가 발생한다. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{C_{1,d}^1 < R\} \cdot \{C_{2,d}^1 < R\} \cdot \{C_{1,d+2,d}^2 < R\}$$

$$= \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{(\gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < 2^{2R} - 1\}$$
(10)

위의 두 경우를 고려한 Case 1의 전체 아웃티지 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \{C_{1,d}^1 < R\} \cdot \{C_{2,d}^1 < R\} \cdot \{C_{1,d+2,d}^2 < R\} \\ = & \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\} \cdot \\ & \Pr\{(\gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < 2^{2R} - 1\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_{out}^{Case1} & = \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{2,1} < 2^{2R} - 1\} \cdot \\ & \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \cdot \\ & [\Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\} + \Pr\{\gamma_{2,d} > 2^{2R} - 1\}] \cdot \\ & \Pr\{(\gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < 2^{2R} - 1\} \end{aligned} \quad (11)$$

Case 2: 첫 번째 프레임에서 두 사용자 모두 상대방 정보의 복호에 실패한 경우이다.

$$\begin{aligned} C_{1,2}^1(\gamma_{1,2}) & = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{1,2}) < R \\ C_{2,1}^1(\gamma_{2,1}) & = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{2,1}) < R \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 두 번째 프레임에서 User 1은 User 2의 정보를 AF하여 전송하고, User 2는 User 1의 정보를 AF하여 전송한다. 이 경우 각 사용자는 상대방 정보를 자신의 채널을 통해 전송함으로써 추가적인 경로 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 이때 아웃티지는 AF프로토콜을 통해 전송한 정보의 복호에 실패할 경우 발생하며 Case 2의 전체 아웃티지는 AF프로토콜의 instantaneous SNR [3]에 의거해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out}^{Case2} & = \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{2,1} < 2^{2R} - 1\} \\ & \cdot \Pr\left\{\gamma_{1,d} + \frac{\gamma_{1,2}\gamma_{2,d}}{\gamma_{1,2} + \gamma_{2,d} + 1} < 2^{2R} - 1\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

표기의 편의를 위해 AF 프로토콜의 전체 instantaneous SNR(γ_{AF}^r)을 다음과 같이 정의하였다.

$$\gamma_{AF}^1 = \gamma_{2,d} + \frac{\gamma_{2,1}\gamma_{1,d}}{\gamma_{2,1} + \gamma_{1,d} + 1} \quad (14)$$

$$\gamma_{AF}^2 = \gamma_{1,d} + \frac{\gamma_{1,2}\gamma_{2,d}}{\gamma_{1,2} + \gamma_{2,d} + 1} \quad (15)$$

이때 위 첨자 $r \in \{1, 2\}$ 은 릴레이 역할을 하는 사용자

를 구분한다.

Case 3: 첫 번째 프레임에서 User 1은 상대방 정보의 복호에 실패하고, User 2는 상대방 정보의 복호에 성공한 경우이다.

$$\begin{aligned} C_{1,2}^1(\gamma_{1,2}) & = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{1,2}) < R \\ C_{2,1}^1(\gamma_{2,1}) & = \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{2,1}) > R \end{aligned} \quad (15)$$

따라서 두 번째 프레임에서 User 1은 수신한 상대방 (User 2)의 정보를 AF하여 목적노드로 전송한다. 반면 상대방 (User 1) 정보의 복호에 성공한 User 2는 자기 자신의 정보와 상대방 (User 1)의 정보를 네트워크 코딩 연산 (modulo-2 addition)으로 결합하여 목적노드로 전송한다. 이때 User 1의 아웃티지가 발생하려면 우선 첫 번째 프레임에서 User 1이 목적노드로 전송한 데이터(X_1)의 복호에 반드시 실패하여야 한다. 동시에 User 2의 AF 프로토콜에서 아웃티지가 발생 하거나($\gamma_{AF}^1 < R$), 두 번째 프레임에서 User 2를 통해 전송되는 네트워크 코딩 된 정보의 복호에 실패할 경우 아웃티지가 발생한다. 그러므로 Case 3의 전체 아웃티지 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out}^{Case3} & = \Pr\{\gamma_{1,2} > 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{2,1} < 2^{2R} - 1\} \cdot \\ & \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \cdot \\ & [\Pr\{\gamma_{AF}^1 < 2^{2R} - 1\} + \Pr\{\gamma_{AF}^1 > 2^{2R} - 1\}] \cdot \\ & \Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\} \end{aligned} \quad (16)$$

Case 4: 첫 번째 프레임에서 User 1은 상대방 정보의 복호에 성공하고, User 2는 상대방 정보의 복호에 실패한 경우로서 Case 3에서 User 1과 User 2의 역할이 서로 바뀐 경우로서 위와 같은 방식으로 구하면 Case 4의 전체 아웃티지 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out}^{Case4} & = \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{2,1} > 2^{2R} - 1\} \cdot \\ & \Pr\{\gamma_{AF}^2 < 2^{2R} - 1\} \cdot \\ & [\Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\} + \Pr\{\gamma_{2,d} > 2^{2R} - 1\}] \cdot \\ & \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \end{aligned} \quad (17)$$

User 1의 전체 아웃티지 확률은 위의 모든 Case별 아웃티지 확률의 합으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out,1} = P_{out}^{Case1} + P_{out}^{Case2} + P_{out}^{Case3} + P_{out}^{Case4} \quad (18)$$

만약 사용자간 채널을 방향과 상관 없이 동일하게 간주하는 reciprocal inter-user 채널($\gamma_{1,2} = \gamma_{2,1}$)을 가정한다면, Case 3과 Case 4는 발생하지 않는다. 따라서 reciprocal inter-user 채널의 경우 식 (18)은 다음과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$P_{out,1} = \Pr\{\gamma_{1,2} > 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \\ \cdot [\Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\} + \Pr\{\gamma_{2,d} > 2^{2R} - 1\}] \\ \cdot \Pr\{(\gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < 2^{2R} - 1\} \\ + \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{AF}^2 < 2^{2R} - 1\} \quad (19)$$

위 식 (19)에 식 (6)을 적용하면 reciprocal inter-user 채널 환경에서 NC-HAD 프로토콜의 전체 아웃티지 확률은 다음과 asymptotic 하게 근사화 할 수 있다.

$$P_{out}^{NC-HAD} = (1 - \frac{K}{P_1\delta_{1,2}^2}) (\frac{K}{P_1\delta_{1,d}^2}) (\frac{K}{P_2\delta_{2,d}^2} + \frac{K^2}{2P_1\delta_{1,d}^2 P_2\delta_{2,d}^2}) \\ + (\frac{K}{P_1\delta_{1,2}^2}) (\frac{(P_1\delta_{1,2}^2 + P_2\delta_{2,d}^2)K^2}{2P_1^2\delta_{1,d}^2 P_2\delta_{2,d}^2\delta_{1,2}^2}) \quad (20)$$

여기서 K 는 $(2^{2R} - 1)N_0$ 을 간략하게 표시한 것이다.

2. 다이버시티 차수

이번 절에서는 본 논문에서 제안한 NC-HAD 프로토콜의 성능 검증을 위해 [6][11][17]의 근사화 방법을 사용해 Rayleigh fading 채널에서의 다이버시티 차수(diversity order)를 유도하였다. 이를 위해 평균 SNR $\Gamma_{i,j}$ 을 다음과 같이 다시 정의하였다.

$$\Gamma_{i,j} \rightarrow \Gamma_T \cdot \Gamma_{i,j} \quad (21)$$

여기서 Γ_T 는 전송 파워와 수신 잡음의 비율을 나타내며,

$\Gamma_{i,j}$ 는 경로손실(path loss)과 음영효과(shadowing effect)에 의해 제한되는 상수를 나타낸다. 그리고 다이버시티 차수를 계산하기 위하여 두 사용자의 Γ_T 는 동일하다고 가정하였고, 각기 다른 채널 품질의 상대적인 차이는 $\Gamma_{i,j}$ 값으로 얻을 수 있다. 이 방법을 통하여 사용자의 송신 파워와 채널의 물리적인 감쇠 정도를 분리하여 적용할 수 있다. 따라서 NC-HAD 프로토콜의 아웃티지 확률을 $1/\Gamma_T$ 의 함수로 표현하고, $\Gamma_T \rightarrow \infty$ (높은 SNR 영역)을 대입하여 계산하면 다이버시티 차수는 의 가장 낮은 차수의 성분으로서 구할 수 있다.

위 방법을 적용하고 높은 차수(3차 이상)의 항을 $O(\frac{1}{\Gamma_T^3})$ 으로 묶으면, 사용자가 복호에 성공할 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{out,1} = \Pr\{\gamma_{1,2} > 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{1,d} < 2^{2R} - 1\} \\ \cdot [\Pr\{\gamma_{2,d} < 2^{2R} - 1\} + \Pr\{\gamma_{2,d} > 2^{2R} - 1\}] \\ \cdot \Pr\{(\gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < 2^{2R} - 1\} \\ + \Pr\{\gamma_{1,2} < 2^{2R} - 1\} \cdot \Pr\{\gamma_{AF}^2 < 2^{2R} - 1\} \quad (19)$$

$$\Pr\{\gamma_{i,j} > 2^R - 1\} = \exp(-\frac{1-2^R}{\Gamma_T \Gamma_{i,j}}) \\ = 1 - \frac{2^R - 1}{\Gamma_T \Gamma_{i,j}} + \frac{(2^R - 1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{i,j}^2} + O(\frac{1}{\Gamma_T^3}) \quad (22)$$

위와 마찬가지로 사용자가 복호에 실패할 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr\{\gamma_{i,j} < 2^R - 1\} = 1 - \exp(-\frac{1-2^R}{\Gamma_T \Gamma_{i,j}}) \\ = \frac{2^R - 1}{\Gamma_T \Gamma_{i,j}} - \frac{(2^R - 1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{i,j}^2} + O(\frac{1}{\Gamma_T^3}) \quad (23)$$

그리고, AF 프로토콜의 아웃티지 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr\{\gamma_{i,j} < 2^{2R} - 1\} = \frac{(\Gamma_{1,2} + \Gamma_{2,d})(2^{2R} - 1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{1,2} \Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d}} + O(\frac{1}{\Gamma_T^3}) \quad (24)$$

이때, 두 사용자 중 User 2가 릴레이 역할을 할 경우를 가정하였으며, 높은 SNR 영역에서의 AF 프로토콜의 아웃티지 확률 근사식은 [3]을 참조하였다.

마지막으로, 목적노드에서 두 개의 경로를 통해 전송된 정보를 MRC 한 경우의 아웃티지 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \Pr\{(\gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < 2^{2R} - 1\} \\
 &= \int_0^{2^{2R}-1} \int_0^k \frac{1}{\Gamma_{1,d}} \exp\left(-\frac{\gamma_{1,d}}{\Gamma_{1,d}}\right) \frac{1}{\Gamma_{2,d}} \exp\left(-\frac{\gamma_{2,d}}{\Gamma_{2,d}}\right) d\gamma_{2,d} d\gamma_{1,d} \\
 &= \int_0^{2^{2R}-1} \frac{1}{\Gamma_{2,d}} \exp\left(-\frac{\gamma_{2,d}}{\Gamma_{2,d}}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{k}{\Gamma_{1,d}}\right)\right] d\gamma_{2,d} \quad (25) \\
 &= \left[1 - \exp\left(-\frac{1-2^{2R}}{\Gamma_{2,d}}\right)\right] - \\
 & \quad \frac{1}{\Gamma_{2,d}} \int_0^{2^{2R}-1} \exp\left(-\frac{\gamma_{2,d}}{\Gamma_{2,d}} - \frac{k}{\Gamma_{1,d}}\right) d\gamma_{2,d}
 \end{aligned}$$

이때, k 는 $2^{2R} - 1 - \gamma_{2,d}$ 이다.

식 (25)의 $\frac{1}{\Gamma_{2,d}} \int_0^{2^{2R}-1} \exp\left(-\frac{\gamma_{2,d}}{\Gamma_{2,d}} - \frac{k}{\Gamma_{1,d}}\right) d\gamma_{2,d}$ 항을 앞에 언급한 방식으로 $\Gamma_{i,j}$ 를 $\Gamma_T \cdot \Gamma_{i,j}$ 로 치환하여 풀면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\Gamma_{2,d}} \int_0^{2^{2R}-1} \exp\left(-\frac{\gamma_{2,d}}{\Gamma_{2,d}} - \frac{k}{\Gamma_{1,d}}\right) d\gamma_{2,d} \\
 &= \frac{1}{\Gamma_T \Gamma_{2,d}} \int_0^{2^{2R}-1} \left[1 - \frac{\gamma_{2,d}}{\Gamma_T \Gamma_{2,d}} - \frac{k}{\Gamma_T \Gamma_{1,d}}\right] d\gamma_{2,d} + O\left(\frac{1}{\Gamma_T^3}\right) \quad (26) \\
 &= \frac{(2^{2R}-1)}{\Gamma_T \Gamma_{2,d}} - \frac{(2^{2R}-1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d}} - \frac{(2^{2R}-1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{2,d}} + O\left(\frac{1}{\Gamma_T^3}\right)
 \end{aligned}$$

식(25)에 식(23)과 식(26)를 대입하여 정리하면 다음 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \Pr\{(\gamma_{1,d} + \gamma_{2,d}) < 2^{2R} - 1\} \\
 &= \left(\frac{2^{2R}-1}{\Gamma_T \Gamma_{2,d}} - \frac{(2^{2R}-1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{2,d}^2}\right) - \\
 & \quad \left(\frac{2^{2R}-1}{\Gamma_T \Gamma_{2,d}} - \frac{(2^{2R}-1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d}} - \frac{(2^{2R}-1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{2,d}}\right) + O\left(\frac{1}{\Gamma_T^3}\right) \quad (27) \\
 &= \frac{(2^{2R}-1)^2}{2\Gamma_T^2 \Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d}} + O\left(\frac{1}{\Gamma_T^3}\right)
 \end{aligned}$$

각 경우에 대한 아웃티지 확률 근사식을 식(19)에 대입하여 정리하면 NC-HAD 프로토콜의 다이버시티 차수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{out,1} = \frac{(2^R - 1)^2}{\Gamma_T^2 \Gamma_{1,d} \Gamma_{2,d}} + O\left(\frac{1}{\Gamma_T^3}\right) \quad (28)$$

이 결과를 통해 NC-HAD 프로토콜의 다이버시티 차수는 협력통신에 참여하는 사용자가 2명일 경우의 최대 다이버시티 차수인 2임을 증명하였다.

3. 최적의 전송 파워 할당 기법

본 논문에서는 모든 사용자가 채널 추정과 피드백(feedback) 알고리즘을 통해 채널 상태 정보(CSI)를 완벽히 알고 있다고 가정하였다. 본 절에서는 CSI를 이용하여 첫 번째 프레임과 두 번째 프레임의 파워를 적절히 할당함으로써 추가적인 성능 이득을 얻는 방법을 연구한다.

각 프레임 별 최적의 파워 할당을 위해서 전체 프레임의 전송 파워가 P 이하인 제약조건 하에 아웃티지 확률을 최소로 만드는 각 프레임 별 파워 비율을 구해야 한다. 본 절에서는 reciprocal inter-user 채널 환경을 가정하여 식(20)을 최소로 만드는 프레임 별 전송 파워 비율을 구하였다. 이때 첫 번째 프레임의 전송 파워를 P_1 , 두 번째 프레임의 전송 파워를 P_2 로 표현하면 식 (26)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다

$$\begin{aligned}
 P_{out}^{NC,HAD} &= \left(1 - \frac{K}{P_1 \delta_{1,2}^2}\right) \left(\frac{K}{P_1 \delta_{1,d}^2}\right) \left(\frac{K}{P_1 \delta_{2,d}^2} + \frac{K^2}{2P_2 \delta_{1,d}^2 P_2 \delta_{2,d}^2}\right) \\
 & \quad + \left(\frac{K}{P_1 \delta_{1,2}^2}\right) \left(\frac{(P_1 \delta_{1,2}^2 + P_2 \delta_{2,d}^2) K^2}{2P_1^2 \delta_{1,d}^2 P_2 \delta_{2,d}^2 \delta_{1,2}^2}\right) \quad (29)
 \end{aligned}$$

파워 할당의 최적화 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\mathbf{p}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{p}} P_{out}^{NC,HAD} \quad (30)$$

제약조건은 다음과 같다.

$$P_1 + P_2 \leq P, P_i \geq 0, \forall i$$

여기서 $\mathbf{p} = [P_1, P_2]$ 는 각 프레임의 파워로 구성된 벡터이며, P 는 하나의 심볼(symbol)을 전송하는데 허용되는 전체 전송 파워의 최대치이다.

식(30)는 주어진 조건하에서 convex 함수로서, Lagrange 승수법을 이용하여 최적화 문제를 설계할 수 있으며, 이는 다음과 같다.

$$L = P_{out}^{NC-HAD} + \tilde{\lambda}(P_1 + P_2 - P) + \sum_{i=1}^2 \mu_i(0 - P_i) \quad (31)$$

여기서 μ_i 는 위 식을 등식으로 만들어 주기 위한 제약식의 slack 변수이다. 이때 각 사용자의 파워(P_i)는 항상 양수 이므로 $P_i > 0$ 일 때 상보여유정리 (complementary slackness)가 성립하기 위해서 μ_i 는 0이어야 한다.

Lagrange 최적화 식(36)에 일차 최적 조건(first-order optimality condition)을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{\partial L}{\partial P_2} = \frac{\partial L}{\partial \tilde{\lambda}} = 0 \quad (32)$$

여기서, 새로운 변수 ($a_1 = P_1/P, a_2 = P_2/P, a_1 + a_2 = 1$)를 원소로 가지는 새로운 벡터 $\mathbf{a} = [a_1, a_2]$ 를 정의하고, 본 절의 목적인 1st frame과 2nd frame의 최적 파워 비율을 $c_{opt} = (a_2/a_1) = (P_2/P_1)$ 으로 정의한다.

벡터 $\mathbf{a} = [a_1, a_2]$ 를 식 (32)에 대입하고, 각 프레임 별 전송 파워의 비율($c_{opt} = (a_2/a_1) = (P_2/P_1)$)은 전체 전송 파워(P)에 영향을 받지 않는다고 가정하여 위 식을 풀면 각 프레임 별 최적의 전송 파워 비율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$c_{opt} = \frac{\frac{3}{2} \delta_{2,d}^2}{\frac{3}{2} K - \delta_{1,2}^2} \quad (33)$$

즉, 첫 번째 프레임의 전송 파워를 두 번째 프레임에 비해

1.5배 더 높이는 것이 추가적인 성능의 이득을 가져올 수 있다.

V. 수치적 분석 결과

이번 장에서는 두 명의 사용자가 협력통신에 참여할 때 4장에서 유도한 NC-HAD user cooperation의 아웃티지 확률 식을 기반으로 reciprocal inter-user 채널 환경과 independent inter-user 채널 환경에서의 성능을 분석하였다. 성능 분석을 위한 시뮬레이션을 위해 몬테 카를로 방식 (Monte Carlo Method)을 적용하였고, 전송 채널은 Rayleigh 페이딩 채널을 가정하였다. 또한 기존 프로토콜인 NC-AdDF 방식과의 성능 비교를 통해 제안된 NC-HAD 프로토콜의 성능에 이득이 있음을 보였다. 마지막으로 앞 장에서 유도한 최적의 파워 비율을 기반으로 각 사용자에 동일한 비율의 파워를 할당한 경우(equal power allocation)와 최적 비율의 파워를 할당한 경우(optimal power allocation)의 성능을 비교 분석하였다.

그림 6과 그림 7은 independent inter-user channel과 reciprocal inter-user channel의 두 가지 채널 환경에 대해 본

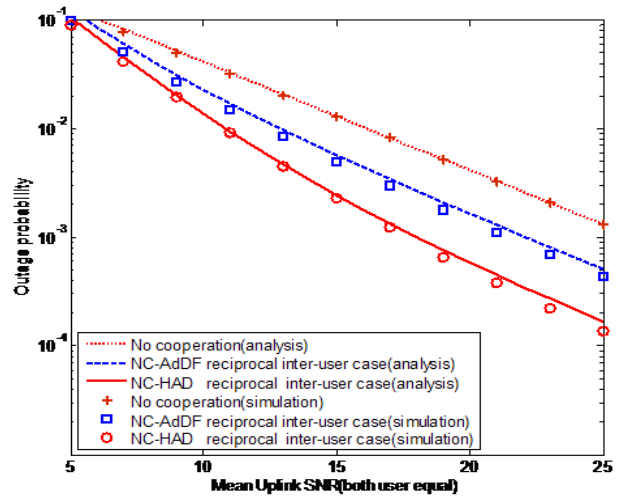


그림 6. Reciprocal inter-user channel 환경에서 NC-AdDF와 NC-HAD의 아웃티지 성능 비교

Fig. 6. Outage probabilities of NC-AdDF and NC-HAD over reciprocal inter-user channel

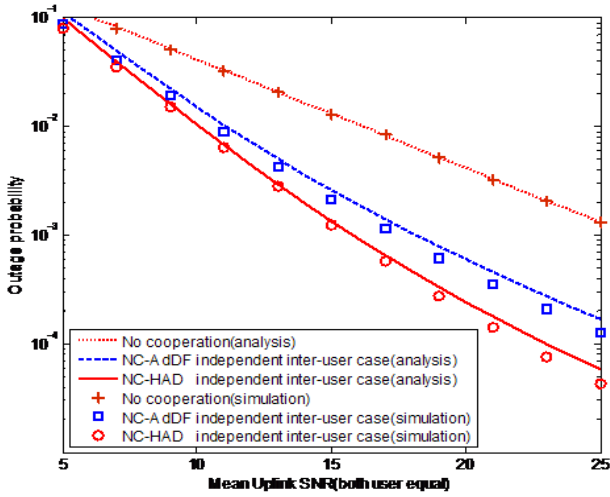


그림 7. Independent inter-user channel 환경에서 NC-AdDF와 NC-HAD의 아웃티지 성능 비교
 Fig. 7. Outage probabilities of NC-AdDF and NC-HAD over independent inter-user channel

논문에서 제안된 NC-HAD 프로토콜과 기존 NC-AdDF 프로토콜의 성능을 비교한 그래프로서 아웃티지 확률의 수학적 분석을 통해 도출된 결과와 시뮬레이션을 통한 결과를

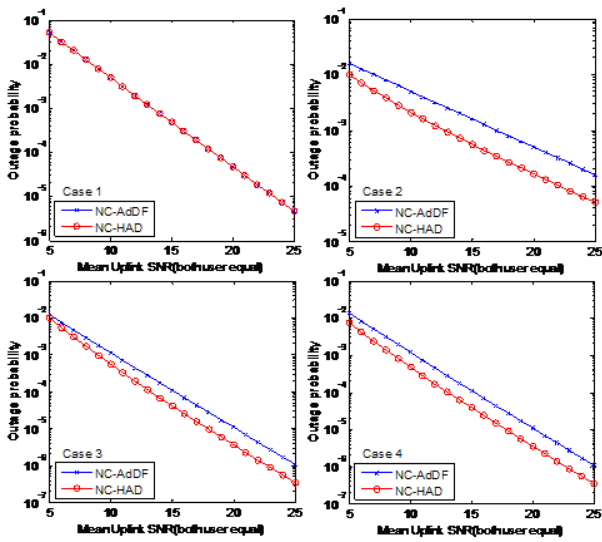


그림 8. Independent inter-user channel 환경에서 NC-AdDF와 NC-HAD의 각 Case별 아웃티지 성능 비교
 Fig. 8. Outage probabilities of NC-AdDF and NC-HAD over independent inter-user channel for 4 cases

비교한 것이다. 이때 사용자와 목적노드 사이의 평균 SNR에 따른 아웃티지 확률을 도시하였다. 또한 사용자와 목적노드 사이의 평균 SNR은 User 1과 User 2 모두 같다고 가정하였으며($\Gamma_{1,d} = \Gamma_{2,d}$), 사용자간 채널의 평균 SNR은 User 1과 User 2 모두 5dB ($\Gamma_{1,2} = \Gamma_{2,1} = 5dB$)로 고정하였다. 또한 임계값 $R = 0.5$ 로 가정하였다.

SNR은 User 1과 User 2 모두 5dB ($\Gamma_{1,2} = \Gamma_{2,1} = 5dB$)로 고정하였다. 또한 임계값 $R = 0.5$ 로 가정하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안된 NC-HAD 방식의 성능이 기존의 NC-AdDF 방식보다 두 채널에 모두에서 성능이 좋다는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 언급했듯이 네트워크 코딩 특유의 복호 특성을 이용하여 상대방 정보를 AF해줌으로써 얻는 이득과 추가적인 path diversity에 대한 이득 모두가 작용해서 얻을 결과라고 할 수 있다.

NC-HAD 프로토콜의 다이버시티 이득을 더 자세히 살펴보기 위해 그림 8에서 네 가지 Case별로 NC-HAD와 NC-AdDF의 아웃티지 확률을 비교하였다. 이때 시뮬레이션 parameter는 위와 동일하다. 위 그림에서 볼 수 있듯이 Case 1의 경우 두 프로토콜은 동일한 알고리즘으로 정보를

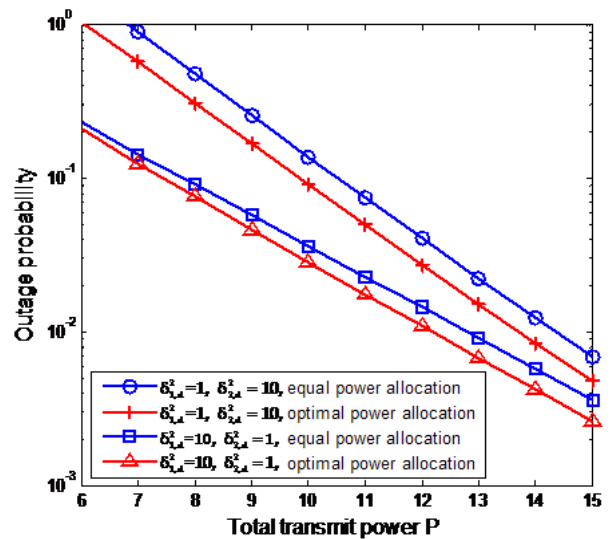


그림 9. 두 가지 채널 환경에서 각 프레임 별 동일한 전송 파워 할당과 최적의 전송 파워 할당에 따른 NC-HAD 프로토콜의 아웃티지 성능 비교
 Fig. 9. Outage probability of NC-HAD over two different channels with equal power allocation and optimal power allocation per each frame

전송하므로 성능의 차이가 없다. 나머지 세 Case의 경우 제안된 NC-HAD 프로토콜의 성능이 더 좋음을 알 수 있다. 이는 상대 사용자 정보의 복호 실패 시 AF 프로토콜을 이용하여 전송하는 Hybrid relaying에 의한 성능 증가라고 할 수 있다.

마지막으로 reciprocal inter-user channel 환경에서 NC-HAD 프로토콜에 식 (32)에서 유도된 최적 파워 할당 기법을 적용할 경우의 성능 향상을 분석하였다. 그림 9는 전체 전송 파워가 P 로 한정될 때 1st frame과 2nd frame에서 각각 동일한 파워($P_2/P_1 = 1$)로 정보를 전송할 경우와 본 논문에서 구한 최적의 파워로 정보를 전송할 경우의 성능을 비교한 그래프로써, 전체 전송 파워(P)의 변화에 따른 아웃티지 확률을 도시화 하였다. 이때 사용자간 채널의 분산은 1로 고정하고($\sigma_{1,d}^2 = 1$) 임계값 $R=1$ 로 가정하였다.

위 결과에서 볼 수 있듯이 첫 번째 프레임과 두 번째 프레임의 전송 파워를 본 논문에서 제시한 최적의 파워비율로 할당함으로써 추가적인 성능 이득이 발생한다. 즉, 전체 전송 파워가 한정적일 때, 각 채널의 상황에 맞춰서 파워를 유동적으로 전송함으로써 보다 나은 성능을 얻을 수 있음을 확인 할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 기존의 네트워크 코딩을 이용하는 user cooperation의 성능을 향상시키기 위해서 Hybrid relay 기법을 적용하는 NC-HAD 기법을 제안하였다. NC-HAD 프로토콜은 사용자가 상대 사용자 정보의 복호에 성공할 경우 자기 자신의 정보와 상대 사용자의 정보를 네트워크 코딩 연산을 통해 결합하여 목적노드로 전송하고, 복호에 실패할 경우 상대 사용자의 신호를 AF 프로토콜을 통해 증폭하여 전송한다. 이는 네트워크 코딩 복호의 원하는 정보를 얻기 위해서는 reliable한 상대방 정보가 필요한 특성을 이용한 것으로 상대방 정보의 성능을 향상시키기 위해 받은 신호를 AF를 이용해서 전송하는 Hybrid relay 기법을 적용하였다. 본 논문에서는 제안한 NC-HAD의 아웃티지 확률을 분석하고 해당 프로토콜이 full diversity임을 증명했으며 수치적 결과를

통해서 기존의 NC-AdDF의 우수한 성능을 갖는 것을 확인하였다. 마지막으로 아웃티지 확률을 바탕으로 최적의 전송 파워 비율을 구했으며 해당 비율이 균등파워를 이용한 전송보다 성능이 더 좋음을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part 1: System description," IEEE Trans. Commun., vol.51, no.11, pp.1927- 1938, Nov.2003.
- [2] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity-Part 2: Implementation aspects and performance analysis," IEEE Trans. Commun., vol.51, no.11, pp.1939- 1948, Nov.2003.
- [3] J. Nicholas Laneman, David N.C.Tse, Gregory W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient protocols and Outage Behavior," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [4] B. Zhao and M. C. Valenti, "Some new adaptive protocols for the wireless relay channel," in Proc. Allerton Conf. Commun., Control, and Comp., Monticello, IL, Oct. 2003.
- [5] Yonghui Li, Branka Vecetic, Jinhong Yuan "Distributed Turbo coding with Hybrid Relaying protocols," IEEE PIRMC, Cannes, France, September, 2008.
- [6] J. Lee, S. Kim, and J. Heo, "Performance analysis of hybrid coded cooperation in wireless networks," in Proc. IEEE APWCS, Kaohsiung, Taiwan, May. 2010.
- [7] J. Lee, S. Kim, and J. Heo, "Performance Analysis and Optimal Power Allocation for Hybrid Incremental Relaying," in Proc. IEEE ISITA, Taichung, Taiwan, pp. 163-168, Oct. 2010.
- [8] D. Thirupathi, J. Lee, and J. Heo, "SEP analysis for Hybrid Relaying Protocol with Opportunistic Relaying," in Proc. ITC-CSCC, Gyeongju, Korea, Jun. 2011.
- [9] J. Ch. Fricke, M. M. Butt, and P. A. Hoeher, "Quality-oriented adaptive forwarding for wireless relaying," IEEE Commun. Lett., vol.12, pp.200-202, March 2008.
- [10] Todd E. Hunter, Aria Nosratinia, "Diversity through Coded Cooperation," IEEE Trans. on Wireless Commun., vol. 5, no. 2, Feb. 2006.
- [11] D. Thirupathi, S. Kim, J. Lee, and J. Heo, "Performance Analysis of Coded Cooperation over Rician Fading Channel," in Proc. ITC-CSCC, Jeju, Korea, Jul. 2009.
- [12] R. Ahlswede, N. Cai, S. -Y. R. Li and R. W. Yeung, "Network information flow," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 46, no. 4, pp.1204-1216, Jul. 2000.
- [13] Y. Chen, S. Kishore and J. Li, "Wireless diversity through network coding," Proc. IEEE WCNC, Las Vegas, NV, Mar. 2006.
- [14] Dereje H. Woldegebreal, Holger Karl "Network-coding-based adaptive decode and forward cooperative transmission in a wireless network: outage analysis," European Wireless Conference, Paris, France, Apr. 2007.

- [15] K. G. Seddik, A. K. Sadek, W. Su, and K. J. R. Liu "Outage analysis and optimal power allocation for multinode relay networks," IEEE Signal Processing Lett., vol 14, no. 6, pp. 377-380, Jun. 2007.
- [16] G. Farhadi, and N. C. Beaulieu "Power-Optimized Amplify-and-Forward Multi-Hop Relaying Systems," IEEE Trans. on Wireless Commun., vol. 8, no. 9, Sep. 2009.
- [17] Todd E. Hunter, Shahab Sanayei, Aria Nosratinia "Outage Analysis of coded cooperation," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 52, no. 2, Feb. 2006.

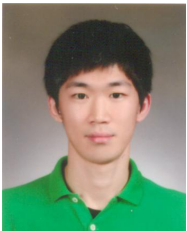
저 자 소 개

백 주 하



- 2009년 : 고려대학교 전기전자전파공학과 학사과정 졸업
- 2011년 : 고려대학교 전기전자전파공학과 석사과정 졸업
- 2011년 ~ 현재 : 삼성전자
- 주관심분야 : Channel coding, Cooperative communication

이 동 훈



- 2010년 : 고려대학교 전기전자전파공학과 학사과정 졸업
- 2011년 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자전파공학과 석사과정 재학
- 주관심분야 : Cooperative communication, Information Hiding

이 재 영



- 2008년 : 고려대학교 전파통신공학과 학사과정 졸업
- 2008년 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자전파공학과 박사과정 재학
- 주관심분야 : Channel coding, Network Coding, Cooperative communication

허 준



- 1989년 : 서울대학교 전자공학과 학사과정 졸업
- 1991년 : 서울대학교 전자공학과 석사과정 졸업
- 2002년 : University of Southern California 박사과정 졸업
- 2003년 ~ 2007년 : 건국대학교 전자공학부 조교수
- 2007년 ~ 현재 : 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수
- 주관심분야 : Channel coding, Network Coding, Cooperative communication, Quantum Information Theory