DBpia

네트워크 부호화를 사용한 양방향 협력 ARQ 프로토콜의 성능 분석

정회원 변 일 무*, 준회원 이 형 열*, 종신회원 김 광 순**

Performance Analysis of a Two-way Cooperative ARQ Protocol Using Network Coding

Ilmu Byun* ***Regular Member***, Hyung Yeol Lee* ***Associate Member***,
Kwang Soon Kim** ***Lifelong Member***

요 약

양방향 중계 채널 (two-way relay channel)은 2개의 단말이 중계기 (relay)의 도움을 받아 양방향의 정보를 주고 받는 협력 통신 (cooperative communication) 채널이다. 기존의 협력 통신에서는 중계기가 시간 또는 주파수 자원을 나누어 양방향으로 신호를 송신하지만, 네트워크 부호화 (network coding)를 사용한 양방향 중계 채널에서는 중계기가 동일 자원을 사용하여 두 단말로 신호를 동시에 송신하므로 기존 기법보다 높은 통신용량을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 ARQ환경에서 네트워크 부호화를 사용한 협력통신 프로토콜을 보이고, 이를 스테이트 다이어그램 (state diagram) 을 이용하여 성능을 분석하였다.

Key Words : Cooperative communication, Relay, Two-way communication, Network coding, ARQ

ABSTRACT

Two-way relay channel is a bidirectional cooperative communication channel that two terminals communicate each other with the help of a relay. In the previous cooperative communication schemes, a relay uses two divided resources for bidirectional transmission. When a network coding is used at a relay, the relay can transmit bidirec-tional data to two terminals simultaneously using one resource only. Thus the throughput of this scheme is greater than that of the previous scheme. In this paper, we showa two-way cooperative ARQ protocol using network coding and the throughput of this protocol is analyzed using a state diagram.

Ⅰ. 서 론

협력 통신 (cooperative communication) 기법은 여러 명의 사용자가 있는 환경에서 두 단말간의 통신을 중계기 (relay) 가 도움으로써 다중안테나 에서와 같은 송신 다이버시티 (transmit diversity) 를 얻는 기법이다. 이 기법은 애드혹 (ad-hoc) 네트워크나 메쉬 (mesh) 네트워크와 같이 기지국이 없는 환경에서도 통신시스템의 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있는 장점이 있다. [1]에서는 이론적으로 송신단, 수신단, 그리고 중계기의 3개의 단말이 있는 환경에서 협력 통신의 용량 (capacity) 을 이론적으로 얻었다. 그

※ 본 연구는 2007년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2007-313-D00515).
* 연세대학교 전기전자공학부 디지털통신연구실 ({dlfan, neolee}@dcl.yonsei.ac.kr)
** 연세대학교 전기전자공학과 교수 (ks.kim @yonsei.ac.kr)
논문번호 : KICS2008-05-230, 접수일자 : 2008년 5월 22일, 최종논문접수일자 : 2008년 9월 24일

www.dbpia.co.kr

후, 실제로 협력통신을 수행하기 위한프로토콜과 전송 기법이 제안되었다 [2][3]. DF (decode-and-forward) 방식은 중계기에서 송신단으로부터 수신한 신호를 복원한 뒤 다시 부호화하여 수신단으로 송신하는 방식으로, 만약 중계기에서 복호화 (decoding) 를 실패하는 경우에는 협력 통신이 이루어지지 않기 때문에 성능저하가 발생한다[2]. AF (amplified-and-forward) 방식은 중계기가 송신단으로부터 수신한 신호를 복호화하지 않고 단순히 증폭만 시켜서 수신단으로 보내는 기법이다[3]. 그러므로 AF 방식에서는 DF방식과 같이 복호화 실패에 의한 성능 저하는 없지만, 중계기에서 잡음이 증폭되는 단점이 있다. 세 번째는 CF (compressed- and-forward) 방식으로, 중계기에서 수신한 신호를 양자화 (quantization) 한 다음에 송신하는 기법이다 [1]. [4]에서는 중계기와 송신단 간의 채널 상황에 따라 전송형식을 변화하는 선택중계 (selection relaying) 기법과 수신단이 수신에 실패하면 중계기가 재송신을 하는 증분중계 (incremental relaying) 기법을 제안하고, 아웃티지 (outage) 확률관점에서 기존 기법과 함께 성능을 분석하였다.

네트워크 부호화 (network coding) 는 패킷 레벨 (packet level) 에서 부호화를 적용하는 기법으로 전체네트워크의 용량을 증가시킬 수 있는 장점이 있다 [5]. 그러므로 최근에는 협력통신의 성능을 향상시키기 위해 협력통신과 네트워크 부호화를 결합한 양방향 중계 채널 (two-way relay channel) 에 대한 연구가 있었다. [6]에서는 전이중 (full duplex) 협력통신 모델에서 네트워크 부호화를 사용한 다양한 프로토콜의 전송률의 범위 (achievable rate region) 를 구했다. [7]에서는 각 단말과 기지국이 최대율결합 (Maximum ratio combining) 을 사용하는 것이 가능한 환경을 가정하고, 네트워크 부호화를 사용할 때 중계기를 선택하고 중계기의 전송전력을 구하는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 ARQ채널 상황에서의 네트워크 부호화를 사용한 양방향 협력 ARQ 프로토콜을 보이고, 스테이트 다이어그램을 사용하여 프로토콜의 성능을 분석하였다. 또한 제안한 프로토콜이 네트워크 부후화를 사용하지 않은 프로토콜보다 보다 많은 통신용량을 갖는 것을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 네트워크 부호화를 사용한 양방향 협력통신 시스템 모형과 신호 모형을 보이고, 양방향 협력 ARQ 프로토콜을 보인다. Ⅲ장에서는 각 단말에서의 아웃티지 확률을 보이고, 제안한 프로토콜을 스테이트 다이어그램을 사용하여 성능을 분석한다. Ⅳ장에서는 중계기의 위치와 변조방식에 따라 제안한 프로토콜의 성능과 수학적으로 분석한 결과를 비교한다. 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 맺는다.

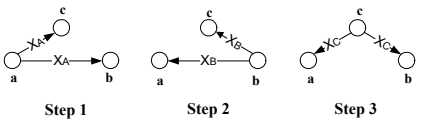


그림 1. 양방향 협력통신 모형

Ⅱ. 프로토콜과 시스템 및 신호 모형

2.1 시스템 모형과 프로토콜

본 논문에서는 그림 1과 같이 서로 데이터를 전송하고자 하는 두 개의 사용자 단말과 두 단말간의 통신을 돕는 하나의 중계기가 있는 양방향 중계 채널을 가정한다. 각 단말은 각 부호어의 복호 성공여부를 나타내는 ACK/NACK 정보를 공유하는 ARQ (automatic repeat request) 채널 환경이고 각 단말에서의 최대 재전송 횟수는 M이다.

양방향 중계 채널에서의 협력 통신은 3단계로 이루어진다. 1단계와 2단계에서는 각 단말이 서로 한 패킷 (packet) 만큼의 데이터를 주고받고, 3단계에서는 중계기가 복호화한 양방향의 수신 데이터를 네트워크 부호화 기법을 사용해 결합하고 이를 양방향으로 동시에 전송한다. 이와 같이 네트워크 부호화를 사용한 협력 통신 기법은 3단계로 이루어지므로, 기존에 제안된 4단계로 이루어진 협력통신 기법들보다 적은 시간 자원을 사용해 동일한 데이터를 전송할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 네트워크 부호화 기법으로 간단한 선형네트워크 부호화 기법을 사용하였다. 선형네트워크 부호화는 양방향의 수신 데이터를 비트 단위에서 exclusive OR로 결합하는 기법이다. 단말 a의 송신 데이터를 b_a라 하고 단말 b의 송신 데이터를 b_b라 하면, 네트워크 부호화된 데이터 b_c는 다음 식과 같이 얻을 수 있다.

$$b_c = b_a \oplus b_b$$

선형네트워크 부호화 기법을 사용하기 위해서는 중계기에서 양방향의 데이터를 알아야 하므로, DF 프로토콜에서와 같이 중계기에서 양방향의 신호를 복호화 해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 DF 프로토콜을 기반으로 한 양방향 협력 ARQ 프로토콜

www.dbpia.co.kr

을 사용하였다. 이 프로토콜을 간단히 NDF (network coded decode and forward) 프로토콜이라고 하였다. NDF 프로토콜은 다음과 같다.

1 단계: 단말 a가 단말 b 또는 중계기 c가 수신 신호의 복호화를 성공할 때까지 반복해서 송신한다. 둘 중 한 단말이 복호화를 성공하면 2 단계로 이동한다.

2 단계: 단말 b가 단말 a 또는 중계기 c가 수신 신호의 복호화를 성공할 때 까지 반복해서 송신한다. 둘 중 한 단말이 복호화를 성공하면 송신 중단하고 3 단계로 이동한다.

3 단계: 단말 a, b 모두 다른 단말로부터 신호의 복호화를 실패한 경우에는 중계기에서 네트워크 부호화된 패킷을 양방향으로 송신한다. 이와 달리 한 단말만 복호화에 실패한 경우에는 네트워크 부호화를 사용하지 못하고, 수신에 실패한 단말에게만 신호를 송신한다. 단말 a, b가 모두 수신 신호의 복호화를 성공하면 1단계로 돌아가 단말 a가 다음 패킷의 송신을 시작한다.

ARQ가 적용된 양방향 협력 통신 프로토콜에서는 양방향의 수신이 한 번에 성공하면 최소 2번의 전송으로 양방향 통신을 마칠 수 있다. 그러나 계속해서 수신을 실패하면 최대 3M 번의 전송을 한 후 양방향 통신을 마치게 된다. 이와 같이 필요에 따라 중계기의 사용을 결정할 수 있으므로, 이로 인해 시스템의 스루풋을 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

2.2 수신 신호 모형

각 단말의 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_\beta[m]=\sqrt{g_{\alpha\beta}}h_{\alpha,\beta}[m]x_\alpha[m]+n_\beta[m] \qquad (1)$$

위 식에서 $\alpha=\{a,b,c\}$는 송신 단말이고, $\beta=\{a,b,c\}\setminus\alpha$는 단말 α가 송신 했을 때의 수신 단말이다. $y_\beta(m)$은 단말 β에서의 m번째 수신 신호이고 $x_\alpha(m)$는 단말 α의 m번째 송신신호이다. $n_\beta(m)$은 β의 m번째 수신 잡음 (noise)을 나타내고, 평균은 0이고 분산은 1인 독립이고 동일 분포를 갖는 정규 확률 변수이다. 단말 α와 β간의 m번째 송신 시의 채널은 $h_{\alpha,\beta}$이고 매 전송마다 독립이고 균일 분포를 갖는 정규 확률 변수로 평균은 0, 분산은 1인 블록 페이딩 채널 (block fading channel) 이다. $g_{\alpha,\beta}$는 단말 α와 β간의 채널 이득 (channel gain) 이다. 각각의 단말은 긴 주기 평균 SNR (signal to noise ratio) 정보를 알고 있으며 이에 따라 변조 방식을 결정할 수 있다. 중계기를 제외한 송신 단말과 수신 단말은 각각 $\alpha'=\{a,b\}$와 $\beta'=\{a,b\}\setminus\alpha'$로 나타낼 수 있다. 단말 α'에서 패킷의 전송률이 $r_{\alpha'}$ (bit/s/Hz) 일 때, 수신단에서 복호를 성공하면 $R_{\alpha'}=r_{\alpha'}$이 되고, 수신단에서 복호를 실패한 경우에는 $R_{\alpha'}=0$ 이 된다. 이를 바탕으로 ARQ환경에서의 양방향 스루풋 (through put) 은 [9]

$$\eta=\frac{E[R]}{E[T]}=\frac{E[R_a+R_b]}{E[T]} \qquad (2)$$

과 같이 구할 수 있다. 위 식에서 $E[T]$는 양방향평균 전송횟수이고, 여기서 T는 단말 a와 b가 서로에게 단일 패킷을 송신하기 위한 총 전송횟수를 뜻한다. $E[R]$은 양방향 평균 전송률이다. 각각 단말 a와 b가 송신하는 패킷의 전송률이 r_a와 r_b일 때, 최대 재전송 횟수 M이 충분히 크면, 각 단말로부터 수신한 신호의 복호화를 실패할 확률은 0이라고 가정할 수 있으므로, 각각 $E[R_a]=r_a$와 $E[R_b]=r_b$가 된다. 그러므로 양방향의 평균 전송률은 간단히 $E[R]=r_a+r_b$ 가 되고, 이 값을 사용하여 양방향 스루풋을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta=\frac{r_a+r_b}{E[T]} \qquad (3)$$

그러므로 각 단말의 전송률이 정해지면 양방향 평균 전송횟수를 구함으로써 양방향 스루풋을 얻을 수 있다.

Ⅲ. 협력통신 프로토콜의 성능분석

[8]에서 양방향의 전송률이 같은 경우와 다른 경우 모두 선형 네트워크 부호화를 사용한 신호의 BER (bit error rate) 성능이 네트워크 부호화를 사용하지 않은 신호의 BER 성능과 거의 동일한 것을 보였다. 그러므로 네트워크 부호화를 사용한 신호의 아웃티지 (outage) 확률도 네트워크 부호화를 사용하지 않은 단방향 통신의 아웃티지 확률과 동일하게 계산할 수 있다. 3.1에서는 이 연구결과를 바탕으로 각 단말에서의 아웃티지 확률을 구하고, 3.2에서는 이를 바탕으로 NDF 프로토콜의 평균 전송횟수를 구하였다.

www.dbpia.co.kr

3.1 아웃티지 확률 모형

단계마다 각 단말에서의 수신 실패 확률을 아웃티지를 사용하여 모형화 하였다. 수신단에서 m번째 패킷을 수신한 후 복호화를 성공하는 사건을 S_m이라고 하고 실패하는 사건을 $\overline{S}_m$이라고 하면, m번째 패킷 수신후의 복호화를 성공할 확률은

$$\Pr\left(\overline{S}_1,\overline{S}_2,.....,S_m\right)=q(\mathrm{m}) \tag{4}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 비슷하게 m번째 패킷 수신후의 복호화를 실패할 확률은

$$\Pr\left(\overline{S}_1,\overline{S}_2,.....,\overline{S}_m\right)=p(m)=1-\sum_{l=1}^{m}q(l) \tag{5}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 두 확률 $q(m)$과 $p(m)$은 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$q(\mathrm{m})=p(m-1)-p(m) \tag{6}$$

각 단계에서 m번째 패킷 수신 후의 복호화 실패 확률은 다음과 같은 아웃티지 확률을 사용하여 정의 하였다. 1단계에서 단말 b와 중계기 c에서의 m번째 패킷 수신 후의 복호화 실패 확률은 각각 $p_1(m)$과 $p_2(m)$이고, 2단계에서 단말 a와 중계기 c에서의 복호화 실패 확률은 각각 $p_3(m)$과 $p_4(m)$이다. 1단계와 2단계에서의 복호화 실패 확률은 다음과 같은 아웃티지 확률로 나타낼 수 있다.

$$p_s(m)=\Pr\left(g_{\alpha,\beta}\sum_{l=1}^{m}|h_l|^2\le\frac{\overline{\gamma}_{\mathrm{target}}}{\overline{\gamma}}\right) \tag{7}$$

여기서 $s=\{1,2,3,4\}$ 이다. $\overline{\gamma}$는 단말에서 수신한 패킷의 SNR값이고, $\overline{\gamma}_{target}$은 목표 오류율을 만족하기 위한 임계 SNR 이다. 3단계에서의 복호화 실패 확률은 1단계와 2단계가 각각 몇 번의 송신 만에 종료되었는가를 고려하여야 한다. 만약 1, 2 단계에서 각 단말이 수신 신호의 복호화에 성공한 경우에는 상관이 없지만, 만약 한 단말이 복호화에 실패한 경우에는 그 단말이 1단계 또는 2 단계에서 다른 단말로부터 패킷을 수신한 신호의 횟수가 3단계에서의 복호화 성공확률에 영향을 끼친다. 그러므로 3단계에서의 단말 b의 복호화 실패 확률은 다음과 같다. 1단계에서 단말 a로부터 패킷을 n번 수신한 상태에서, 3단계에서 m번 째 신호를 수신한 후의 단말 b에서의 아웃티지 확률은 $p_5(m,n)$로 나타내고 이를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_5(m,n)=\Pr\left(g_{a,b}\sum_{l'=1}^{n}|h[l']|^2+g_{c,b}\sum_{l=1}^{m}|h[l]|^2\le\frac{\overline{\gamma}_{\mathrm{target}}}{\overline{\gamma}}\right) \tag{8}$$

같은 방법으로 단말 a에서의 아웃티지 확률 $p_6(m,n)$은

$$p_6(m,n)=\Pr\left(g_{b,a}\sum_{l'=1}^{n}|h[l']|^2+g_{c,a}\sum_{l=1}^{m}|h[l]|^2\le\frac{\overline{\gamma}_{\mathrm{target}}}{\overline{\gamma}}\right) \tag{9}$$

와 같이 구할 수 있다. 이와 같이 3단계에서의 아웃티지 확률이 그 이전 단계에서의 수신 횟수에 영향을 받으므로, 정확한 스테이트 다이어그램을 그리기 위해서는 1단계와 2단계에서의 각 단말의 패킷 수신 횟수에 따라 스테이트를 나누어야 한다. 그러나 이 경우에는 스테이트 다이어그램이 복잡해지므로 보다 간단한 스테이트 다이어그램을 그리기 위하여 다음을 가정하였다.

일반적으로 중계기 c가 지나치게 한쪽 단말에 가까운 경우를 제외하면, 경로 감쇄효과로 인해, 단말 β'이 단말 α'로부터 수신한 신호가 중계기 c로부터 수신한 신호보다 매우 작기 때문에, 1단계 또는 2단계에서 α'로부터 수신한 n개의 신호의 영향은 거의 없는 것으로 가정하여 p_5과 p_6를 간단히 구할 수 있다. 이와 달리 중계기의 위치가 단말 α'에 매우 가까운 경우에는 단말 α'으로부터 수신한 신호의 크기와 중계기 c로부터 수신한 신호의 크기가 거의 동일하기 때문에, p_5과 p_6를 구할 때 1단계 또는 2단계에서 α'로부터 수신한 n개의 신호를 무시할 수 없다. 또한 이 경우에는 중계기와 단말 α'사이의 채널 이득 $g_{\alpha',c}$이 매우 크므로 대부분의 경우에 중계기 c는 한 번의 수신으로 단말 α'의 신호를 복호할 할 수 있다. 그러므로 이 경우 *n=1*로 가정할 수 있고, 3단계에서의 아웃티지를 다음과 같이 간단히 구할 수 있다.

$$p_{s'}(m)\approx\Pr\left(g_{a,b}|h[1]|^2+g_{c,\beta'}\sum_{l=1}^{m}|h[l]|^2\le\frac{\overline{\gamma}_{\mathrm{target}}}{\overline{\gamma}}\right) \tag{10}$$

위 식에서 $s'=\{5,6\}$이다. 식 (10)과 같은 아웃티지 식을 사용하면 1단계와 2단계에서의 각 단말의 수신 신호 개수에 따라 스테이트를 나누지 않아도 되므로 비교적 간단히 스테이트 다이어그램을 얻을 수 있다.

www.dbpia.co.kr

3.2 양방향 평균 전송횟수

식 (3)을 통해 양방향의 평균 전송횟수를 구하면 양방향 스루풋을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이 절에서는 스테이트 다이어그램을 사용해 양방향 전송횟수를 구하였다. 그림 2는 NDF 프로토콜의 스테이트 다이어그램이다. 이 스테이트 다이어그램에서 각각의 스테이트가 나타내는 것은 다음과 같다. 1단계의 A_m은 단말 a에서 m번째 송신을 나타내는 스테이트이고, 2단계의 B_m은 중계기 c는 복호를 성공했지만, 단말 b는 복호화를 실패한 상황에서 단말 b의 m번째 송신을 나타내는 스테이트이다. 또한 2단계의 C_m은 단말 b가 복호화를 성공한 상황에서 단말 b의 m번째 송신을 나타내는 스테이트이다. 3단계의 D_m은 이전 1, 2단계에서 단말 a, b 모두 복호화에 실패하고 c가 양방향 신호의 복호화를 성공한 경우에, 3단계에서 중계기 c가 양방향으로 네트워크 부호화된 신호를 m번째 송신하는 경우의 스테이트이다. E_m은 이전 단계에서 a는 복호화에 성공하고, b는 복호화에 실패한 경우로, 3단계에서 중계기 c가 b로만 신호를 m번째 송신하는 경우의 스테이트이고, F_m은 이전 단계에서 단말 b만 복호화에 성공하고 단말 a는 복호화에 실패한 경우로, 중계기 c에서 a로만 신호를 m번째 송신하는 경우의 스테이트이다.

표 1에서 스테이트 다이어그램의 브랜치 값들을 나타내었다. 표 1에서 $p(m|m-1)$은 수신 단말 β가 송신 단말 α로부터 수신한 m-1개의 수신 신호를 가지고 복호에 실패한 상태에서, 신호를 한번 더 수

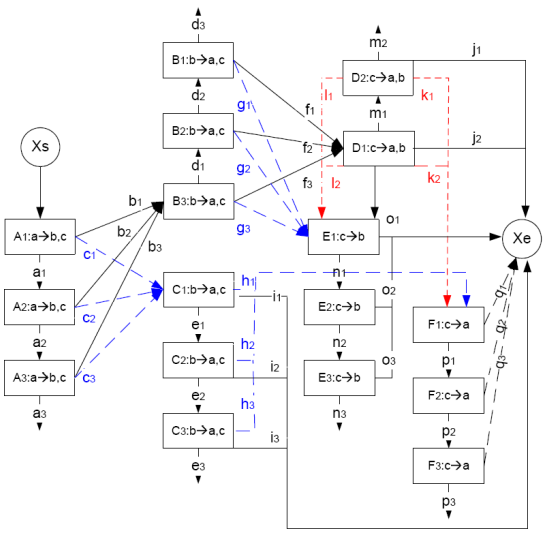


그림 2. 양방향 협력통신 프로토콜의 스테이트 다이어그램

표 1. 스테이트 다이어그램의 브랜치 값들

State from	branches
A_m	$a_m = p_1(m\|m-1)p_2(m\|m-1)T$ $b_m = p_1(m\|m-1)(1-p_2(m\|m-1))T$ $c_m = (1-p_1(m\|m-1))T$
B_m C_m	$d_m = e_m = p_3(m\|m-1)p_4(m\|m-1)T$ $f_m = h_m = p_3(m\|m-1)(1-p_4(m\|m-1))T$ $g_m = i_m = (1-p_3(m\|m-1))T$
D_m	$j_m = (1-p_5(m\|m-1))(1-p_6(m\|m-1))T$ $k_m = (1-p_5(m\|m-1))p_6(m\|m-1)T$ $l_m = p_5(m\|m-1)(1-p_6(m\|m-1))T$ $m_m = p_5(m\|m-1)p_6(m\|m-1)T$
E_m	$n_m = p_5(m\|m-1)T$ $o_m = (1-p_5(m\|m-1))T$
F_m	$p_m = p_6(m\|m-1)T$ $q_m = (1-p_6(m\|m-1))T$

패할 확률을 나타낸다. 예를 들면, $p_1(m|m-1)$은 1단계에서 송신 단말 a가 송신한 신호를 수신 단말 b가 m-1번째 수신까지 복호를 실패한 경우에, m번째 수신에서도 복호를 실패할 확률이다. 그림 2의 스테이크 다이어그램과 표 1의 브랜치 값들을 사용하여 표 2 와 같은 스테이트 방정식을 세울 수 있다. 표 2의 스테이트 방정식을 정리하여 식 (11)과 같은 트랜스퍼 함수 (transfer function) 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} f(T) = &\left\{\left(G_D(T)+G_E(T)E_D(T)+G_F(T)F_D(T)\right)\right. \\ &\left. D_B(T)+G_E(T)E_B(T)\right\}B_A(T) \\ &+\left(G_F(T)F_c(T)+G_C(T)\right)C_A(T) \end{aligned} \tag{11}$$

식 (11)을 미분하여, 최종적으로 다음과 같은 평균 전송횟수 $E[T]$를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E[T] &= \left.\frac{df(T)}{dT}\right|_{T=1} \\ &= 1+\sum_{m=1}^{M-1}p_1(m)p_2(m)+C_A\left(1+\sum_{m=1}^{M-1}p_3(m)p_4(m)+F_C\left(1+\sum_{m=1}^{M-1}p_6(m)\right)\right) \\ &+B_A\left\{1+\sum_{m=1}^{M-1}p_3(m)p_4(m)+E_B\left(1+\sum_{m=1}^{M-1}p_5(m)\right)\right. \\ &\left.+D_B\left(1+\sum_{m=1}^{M-1}p_5(m)p_6(m)+E_D\left(1+\sum_{m=1}^{M-1}p_5(m)\right)+F_D\left(1+\sum_{m=1}^{M-1}p_6(m)\right)\right)\right\} \end{aligned} \tag{12}$$

식 (12)에서 $T=1$이므로 $B_A(T)$, $C_A(T)$, $F_C(T)$, $E_B(T)$, $D_B(T)$, $E_D(T)$, $F_D(T)$ 들을 각각 간략히 B_A, C_A, F_C, E_B, D_B, E_D, F_D 로 나타내었다. 식 (12)를 통해 얻은 양방향 평균 전송횟수를 식 (3)에 대입하면 NDF 프로토콜의 양방향 스루풋을 얻을 수 있다.

www.dbpia.co.kr

표 2. 스테이트 방정식

State equation
$A_1 = X_s,\quad A_m = p_1(m-1)p_2(m-1)T^{m-1}A_1$
$B_1 = \sum_{m=1}^{M} p_1(m)q_2(m)T^m A_1 = B_A(T)A_1,$ $B_m = p_3(m-1)p_4(m-1)T^{m-1}B_1$ $C_1 = \left(\sum_{m=1}^{M} q_1(m)p_2(m-1)T^m + p_1(M)p_2(M)T^M\right)A_1 = C_A(T)A_1$ $C_m = p_3(m-1)p_4(m-1)T^{m-1}C_1$
$D_1 = \sum_{m=1}^{M} p_3(m)q_4(m)T^m B_1 = D_B(T)B_1$ $D_m = p_5(m-1)p_6(m-1)T^{m-1}D_1$
$E_1 = \left(\sum_{m=1}^{M} q_3(m)p_4(m-1)T^m + p_3(M)p_4(M)T^M\right)B_1$ $+\sum_{m=1}^{M} p_5(m)q_6(m)T^m D_1 = E_B(T)B_1 + E_D(T)D_2$ $E_m = p_5(m-1)T^{m-1}E_1$
$F_1 = \sum_{m=1}^{M} p_3(m)q_4(m-1)T^m C_1 + \sum_{m=1}^{M} q_5(m)p_6(m)T^m D_1$ $= F_C(T)C_1 + F_D(T)D_1$ $F_m = p_6(m-1)T^{m-1}F_1$
$X_e = \left(\sum_{m=1}^{M} q_3(m)p_4(m-1)T^m + p_3(M)p_4(M)T^M\right)C_1$ $+\left(\sum_{m=1}^{M} q_5(m)q_6(m)T^m + p_5(M)p_6(M)T^M\right)D_1$ $+\left(\sum_{m=1}^{M} q_5(m)T^m + p_5(M)T^M\right)E_1 + \left(\sum_{m=1}^{M} q_6(m)T^m + p_6(M)T^M\right)F_1$ $= G_C(T)C_1 + G_D(T)D_1 + G_E(T)E_1 + G_F(T)F_1$

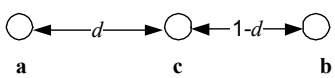


그림 3. 간단한 협력 통신 모델

Ⅳ. 모의실험 결과

본 모의 실험에서는 그림 3과 같이 중계기 c가 단말 a, b와 일직선 상에 위치하는 선형 협력통신 모델 (linear cooperative communication model) 을 가정하였다. d 는 a와 c간의 거리이고, 경로 감쇄 (path-loss) 지수는 4로 하였다. 각 경로 별 채널 이득은 다음과 같다. 우선 두 단말 a, b사이의 채널 이득 (channel gain) 은 $g_{a,b}=1$이고, 단말 a와 중계기 c사이의 채널 이득은 $g_{a,c}=d^{-4}$, 중계기 c와 단말 b사이의 채널 이득은 $g_{c,b}=(1-d)^{-4}$이다. 또한 매 전송마다 채널은 독립적으로 변하는 블록 페이딩 채널을 가정하였다. 기본적으로 채널 코드를 사용하지 않은 비부호화 (uncoded) 상황을 고려하였고, 한 패킷은 하나의 심볼로 가정하였다. 변조방식으로는 QAM을 사용하였다. ARQ채널상황에의 재전송방식은 단순한 반복 송신 기법을 사용하였고, 수신 신호간의 결합은 체이스 결합 (chase combining) 기법을 사용하였다. 변조 방식은 긴 주기 SNR정보를 이용하여 정해지고 양방향의 전송률이 일정하게 유지되는 상황을 가정하였다. 최대 재전송횟수 M 은 20으로 두었고, ACK/NACK 신호의 오류는 없는 것으로 가정하였다. 패킷의 목표 오류율 (target error rate) 은 10^{-3}으로 두었다. 4.1절에서는 제안한 NDF프로토콜과 기존의 프로토콜의 성능을 비교하였고, 4.2절에서는 프로토콜의 실제 성능과 수학적 분석 결과를 비교하였다.

4.1 양방향 협력통신 ARQ 프로토콜의 성능 비교

이 절에서는 네트워크 부호를 사용하지 않은 DF 양방향 협력통신 ARQ 프로토콜과 NDF 프로토콜의 성능을 비교해 보았다. DF 양방향 협력 통신 ARQ 프로토콜은 다음과 같다[8].

- 1 단계: 단말 a가 단말 b와 중계기 c로 b 또는 c가 수신 신호의 복호화를 성공할 때까지 반복해서 송신한다. 둘 중 한 단말이 복호화를 성공하면 2 단계로 이동한다.
- 2 단계: 중계기 c가 단말 b에서 수신 신호의 복호화를 성공할 때까지 반복해서 송신 한다.
- 3 단계: 단말 b가 단말 a와 중계기 c로 a 또는 c가 수신 신호의 복호화를 성공할 때까지 반복해서 송신한다. 둘 중 한 단말이 복호화를 성공하면 4 단계로 이동한다.
- 4 단계: 중계기 c가 단말 a에서 수신 신호의 복호화를 성공할 때까지 반복해서 송신한다.

그림 4는 SNR에 따라 양방향 협력통신 ARQ 프로토콜간의 성능을 비교한 그래프이다. 그림에서 이 DF 양방향 협력통신 ARQ 프로토콜을 간단히 DF 프로토콜이라고 표현하였다. 그림을 통해 본 논문에서 제안하는 NDF 프로토콜이 DF 프로토콜보다 스루풋이 큰 것을 확인 할 수 있었다. 또한 SNR이 증가함에 따라 프로토콜간의 스루풋 차이가 감소하는 것을 알 수 있었다. 그림 5는 SNR=12dB일 때 중계기 위치에 따라 DF와 NDF 프로토콜의 성능을 비교한 그래프이다. 동일한 변조방식을 사용한 경우에는 중계기의 위치에 상관없이 NDF 프로토콜이 DF 프로토콜보다 스루풋이 큰 것을 확인 할 수 있었다. 두 프로토콜의 스루풋 차이는 $d=0.5$일 때가 가장 크고 중계기의 위치가 한쪽으로 치우칠수록

www.dbpia.co.kr

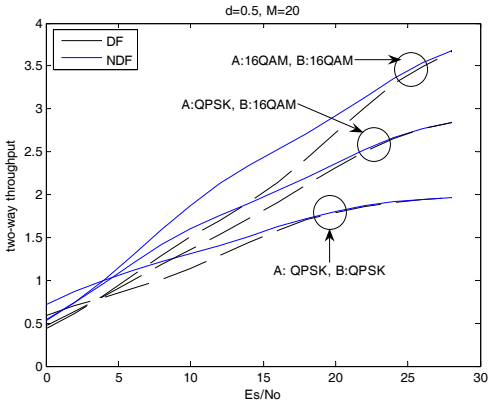


그림 4. SNR에 따른 양방향 협력 ARQ 프로토콜의 성능비교

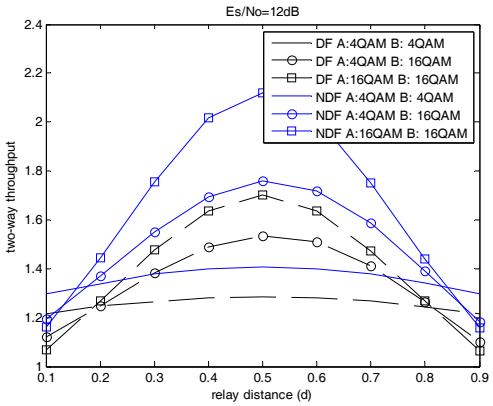


그림 5. 중계기 위치 d에 따른 양방향 협력 ARQ 프로토콜의 성능 비교

감소하였다. 전반적으로 제안한 NDF프로토콜의 스루풋 증가량이 예상했던 것만큼 크지 않았는데, 이는 3단계에서 항상 네트워크 부호화를 사용할 수 있는 것은 아니기 때문이다. 즉, 스테이트 다이어그램에서 E_m과 F_m 스테이트의 경우에는 중계기에서 네트워크 부호를 사용하지 못하므로 이 경우에는 네트워크 부호화에 따른 성능이득을 얻을 수 없다. 이를 보완하기 위해, 중계기에서 버퍼를 사용해 송신할 신호를 저장함으로써 네트워크 부호화의 사용빈도를 증가시킬 수 있다.

4.2 모의 실험과 분석 결과 비교

그림 6과 7은 모의 실험과 4장에서 분석한 결과를 각각 SNR과 거리에 따라 비교한 그래프이다. 그림 6에서 양방향의 전송률이 같은 경우와 다른 경우 모두 SNR이 낮을 때는 분석한 결과와 모의 실험이 조금 차이가 났지만, SNR이 높아짐에 따라 모의 실험과 분석 결과가 일치함을 확인 할 수 있

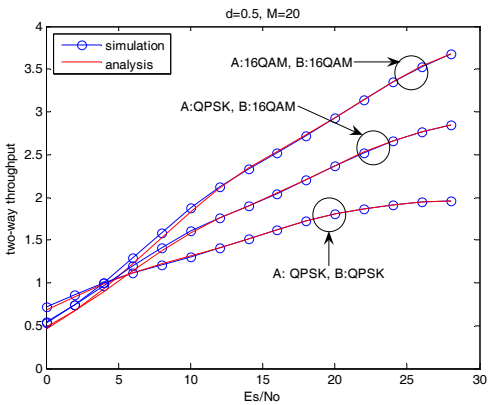


그림 6. SNR에 따른 모의 실험과 분석의 성능 비교

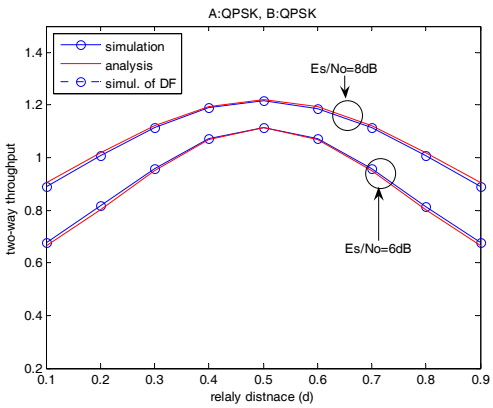


그림 7. 중계기 위치d에 따른 모의실험과 분석의 성능비교

었다. 그림 7은 양방향의 변조방식이 QPSK인 경우에 거리 d에 따른 양방향 스루풋의 변화를 나타낸 그래프이다. d가 0.5인 경우에 양방향 스루풋이 가장 높은 것을 알 수 있고, 중간을 기준으로 대칭을 이룸을 알 수 있다. 또한, 모의 실험과 분석은 d가 0.5일 때가 가장 비슷하고 중계기 c가 한쪽으로 치우칠수록 오차가 발생함을 알 수 있었다. 모의 실험 결과를 통해, 수학적으로 성능을 분석한 결과가 모의실험과 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러므로 제안한 분석 기법은 중계기의 위치와 긴 주기 SNR에 따라 변조방식을 결정하는 적응 전송 시스템에 적용할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 ARQ환경에서 네트워크 부호화를 사용한 NDF 프로토콜을 보이고, 이를 수학적으로 분석하였다. 스루풋은 비부호화 환경에서 아웃티지

www.dbpia.co.kr

확률을 기반으로 구하였다. 모의 실험을 통해 네트워크 부호화를 사용한 NDF 프로토콜의 스루풋이 기존 DF 프로토콜보다 높은 것을 알 수 있었고, 분석결과가 모의 실험과 비교적 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 제안한 성능 분석 기법은 긴 주기 SNR을 바탕으로 초기 전송률을 결정하는 비부호화 시스템에서 초기 변조방식을 정하는데 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

〔1〕 T.M. Cover and A. A. El Gamal, “Capacity theorems for the relay channel,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.25, pp.572-584, April 2005.

〔2〕 A. Sendonaries, E. Erkip, and B. Aazhang, “user Cooperation Diversity Part Ⅰand Part Ⅱ,” *IEEE Commun.*, Vol.51, pp.1927-1948, November 2003.

〔3〕 J.N. Laneman, G.W. Wornell, and D.N.C. Tse, “An Efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks,” *Proc. IEEE Inter. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, Washington D.C., U.S.A., pp.294, June 2001,

〔4〕 J.N. Laneman, D.N.C. Tse, and G.W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage benavior,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.50, pp.3062-3080, December 2004.

〔5〕 R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y.R. Li, and R.W. Yeung, “Network information Flow,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.46, pp.1204-1216, July 2000.

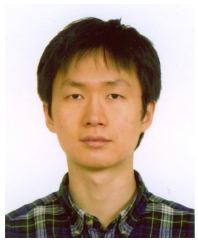
〔6〕 B. Rankov, A. Wittneben, “Achievable rate regions for the two-way relay channel,” *Proc. IEEE Inter. Symp. Inform. Theory (ISIT)*, Seattle, WA, U.S.A., pp.1668-1672, July 2006.

〔7〕 J. Hwang and S.-L. Kim, “A two-phase algorithm for network coding enabled cellular systems,” *Proc. ACMInter. Wireless Commun. and Mobile Comput. (IWCMC)*, Hawai, U.S.A., pp.73-78, June 2007.

〔8〕 변일무, 김광순, “ARQ가 있는 양방향 중계 채널에서 네트워크 부호화를 사용한 협력통신 기법,” *Telecommun. Review*, 17권 6호, pp.996-1008, 2007년 12월.

〔9〕 G. Caire and D. Tuninetti, “The throughput of Hybrid ARQ Protocols for the gaussian collision channel,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.47, No.5, pp.1971-1988, July 2001.

변 일 무 (Ilmu Byun) 정회원



2005년 2월 연세대학교 전기전자공학부 학사

2007년 2월 연세대학교 전기전자공학부 석사

2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정

<관심분야> 다중안테나 시스템, 협력통신, Hybrid -ARQ

이 형 열 (Hyung Yeol Lee) 준회원

2007년 2월 연세대학교 전기 전자공학부 학사

2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 석박통합과정

<관심분야> 스케줄링, 협력통신

김 광 순 (Kwang Soon Kim) 종신회원

1994년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 학사

1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 석사

1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 박사

2000년 3월 Dept. ECE. UC San Diego, 박사 후 연구원

2000년 4월~2004년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원

2004년 4월~현재 연세대학교 전기전자공학부 조교수

2006년 1월~현재 한국통신학회 논문지 편집위원

<관심분야> 채널부호, 계층간 최적화, 협력통신

www.dbpia.co.kr