

지연된 채널 정보를 가진 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률 및 처리율 분석

박진현, 이재홍
서울대학교

jinyunpark@snu.ac.kr, jhlee@snu.ac.kr

Outage Probability and Throughput Analysis of Hybrid-ARQ Based Opportunistic Relaying with Outdated CSI

Jinhyun Park Jae Hong Lee
Seoul National University

요 약

기회적 중계 기술(opportunistic relaying)은 중계기를 사용하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 효율적인 기술로 평가되고 있다. 기회적 중계 기술에서는 가장 좋은 중계기를 선택하여 송신기의 전송 신호를 재전송하게 되는데, 중계기 선택은 채널 정보(channel state information)를 이용하여 이루어진다. 본 논문에서는 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 기술에서 중계기를 선택할 때 사용하는 채널 정보(channel state information)가 지연된 정보일 때, 시스템의 불능 확률(outage probability) 및 처리량(throughput)을 분석한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석이 정확한지 검증한다.

1. 서론

기회적 중계 기술(opportunistic relaying)은 다중 릴레이 시스템에서 최대 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 효율적인 기술로 평가되고 있다 [1]. 기회적 중계 기술에서는, 여러 릴레이 중 채널 상태가 가장 좋은 릴레이 하나가 선택되어 신호를 중계한다.

ARQ 기법은 통신의 신뢰도를 높이기 위해 활발히 연구되어 온 기법으로서, 시그널이 정상적으로 전송되지 않으면 수신기의 피드백 정보에 따라 재전송을 수행한다. ARQ 기법의 재전송 횟수를 줄이기 위해, ARQ 와 오류 정정 부호를 결합한 하이브리드 ARQ 기법이 널리 사용되고 있다. 기회적 중계 기술과 하이브리드 ARQ 의 장점을 모두 얻기 위해, 두 기술을 융합하고자 하는 연구가 진행되었다. [2]에서는 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 시스템에서 기회적 중계 기술만 적용한 시스템 보다 더 나은 다이버시티-다중화 트레이드오프(diversity-multiplexing tradeoff) 성능을 달성함을 보였다.

현재까지의 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 시스템에 대한 연구는 릴레이와 수신기가 채널 정보(channel state information)를 완벽하게 알고 있다는 가정 하에서 진행되었다.

실제 통신 환경에서는 채널 정보를 얻는 시점과 시그널을 송수신하는 시점의 시간차가 존재하므로, 릴레이와 수신기가 가진 채널 정보는 완벽하지 않으며 지연된(outdated) 값이다. 이에 따라 시스템의 불능 확률 및 다이버시티 이득이 심각하게 감소될 수 있다 [3]. 이 논문에서는 하이브리드 ARQ 를 사용한 기회적 중계 시스템에서 채널 정보가 지연되었을 때 시스템의 성능을 분석하고자 한다. 시스템의 성능은 불능 확률 및 처리량(throughput)으로 나타내고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 시스템 모델을 설정하고, 3 절에서는 ARQ 기반 기회적 중계 기술의 불능 확률 및 처리율을 분석한다. 4 절에서는 제안한 분석 결과를 수치적으로 확인하며, 마지막으로 5 절에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

이 논문은 그림 1 과 같이 하나의 송신기, K 개의 중계기, 하나의 수신기로 구성된 시스템을 다루고 있다. 각 단말기는 하나의 안테나를 가지고 있으며, 송신기와 수신기 사이의 직경로는 없다고 가정한다.

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0001274, 2011-0017437).

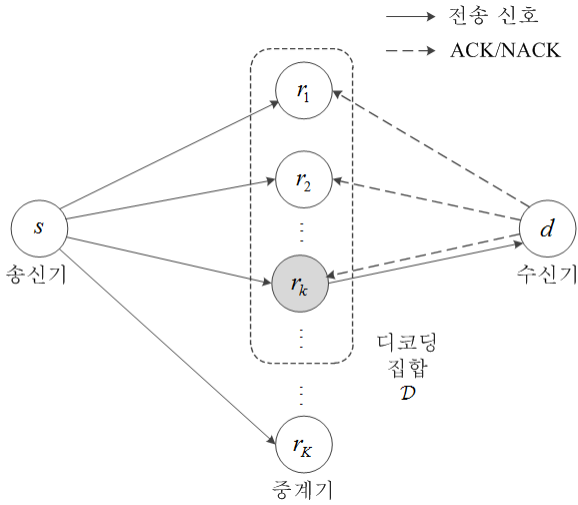


그림 1. 시스템 모델.

송신기 s 는 중계기 r_k , $k=1, 2, \dots, K$ 에게 데이터를 전송한다. 중계기 중 송신기에서 수신받은 신호를 성공적으로 디코딩한 중계기의 집합을 디코딩 집합 D 라고 명명한다. 디코딩 집합에서 중계기로부터 수신기 d 까지의 채널이 가장 좋은 중계기가 최적적 중계 기법에 의해 선택되어 신호를 전송하게 된다. 수신기는 선택된 중계기에게서 수신받은 신호를 디코딩하며, 만일 디코딩이 성공적이면 ACK 신호를 모든 중계기에게 전송한다. 그렇지 않으면 수신기는 NACK 신호를 전송하며 동일한 신호를 재전송하기 위해 중계기가 새로 선택되게 된다. 재전송 횟수는 제한되어 있으며, 각각의 중계기는 ACK/NACK 신호를 오류 없이 수신한다고 가정한다.

송신기로부터 중계기 r_k 까지의 채널 계수 h_{s,r_k} , $k=1, 2, \dots, K$ 는 평균이 0, 분산이 1 인 복소 가우시안 확률 변수이다. 그러면 중계기 r_k 에서의 수신 SNR 은 $\Gamma_{s,r_k} = |h_{s,r_k}|^2 P_s / N_0$ 으로 주어지며, 여기서 P_s 는 송신기의 전송 전력, N_0 은 중계기 r_k 의 노이즈의 분산을 가리킨다. 만일 중계기 r_k 의 수신 SNR 이 미리 정해진 SNR 문턱값 γ_0 보다 크면, 중계기 r_k 는 수신 신호를 성공적으로 디코딩하게 된다.

허용 가능한 최대 ARQ 라운드가 N 이라고 가정하자. n 번째 ARQ 라운드에 중계기 r_k 로부터 수신기까지의 채널 계수 $h_{r_k,d}^{(n)}$, $k=1, 2, \dots, K$, $n=1, 2, \dots, N$ 은 평균이 0, 분산이 1 인 복소 가우시안 확률 변수이다. n 번째 ARQ 라운드에 선택된 중계기가 r^* 이라 하면, n 번째 ARQ 라운드에 수신기에서의 수신 SNR 은 $\Gamma_{r^*,d}^{(n)} = |h_{r^*,d}^{(n)}|^2 P_{r^*} / N_0$ 으로 주어지며, 여기서 P_{r^*} 은 n 번째 ARQ 라운드에 선택된 중계기의 전송 전력, N_0 은 수신기의 노이즈의 분산을 가리킨다. 분석을 단순화하기 위해, 송신기와 각 ARQ 라운드에 선택된 중계기가 동일한 전력 P 로 신호를 전송한다고 가정한다. 그러면 확률변수 Γ_{s,r_k} 와 $\Gamma_{r^*,d}^{(n)}$ 은 동일한 평균 $\bar{\Gamma} = P / N_0$ 을 갖는다.

각 ARQ 라운드에 수신기에서 수신된 신호는 최대비 결합 기법 (maximal ratio combining: MRC) 에 따라 결합된다. 결합된 신호의 SNR 이 미리 정해진 SNR 문턱값 γ_0 보다 크면 수신기는 수신 신호를 성공적으로 디코딩하게 되며, 그렇지

않으면 수신 신호 디코딩이 실패하게 된다. 만일 수신기가 N ARQ 라운드 동안 수신 신호를 디코딩하지 못하면 불능 사건 (outage event) 이 발생한다.

채널에 시변성 (time-varying nature) 에 의해, 중계기 선택 시점의 채널 정보 (channel state information: CSI) 가 신호 전송 시점에는 지연되게 (outdated) 된다 [3]. 지연된 채널 정보로부터 얻은 중계기 r_k 로부터 수신기까지의 SNR, 즉 지연된 중계기 r_k 로부터 수신기까지의 SNR 을 $\hat{\Gamma}_{r_k,d}^{(n)}$ 로 명명한다. Jakes 모델에 따르면, $\hat{\Gamma}_{r_k,d}^{(n)}$ 와 $\Gamma_{r_k,d}^{(n)}$ 간의 상관관계는 계수 $J_0(2\pi f_d \tau)$ 로 주어지는데, 여기서 $J_0(\cdot)$ 은 제 1 종 0 차 베셀 함수 (Bessel function of the first kind and order 0), f_d 는 도플러 주파수, τ 는 중계기 선택을 위해 필요한 시간을 가리킨다 [4].

3. 불능확률 및 처리량 분석

A. 불능확률 분석

지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 최적적 중계 기법의 n 번째 ARQ 라운드에서의 불능 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{out}^{(n)} = \Pr(|D|=0) + \sum_{l=1}^K \Pr(|D|=l) P_{fail,l}^{(n)}. \quad (1)$$

위 식에서 $\Pr(|D|=l)$ 은 l 개의 중계기가 송신기로부터 수신받은 신호를 성공적으로 디코딩할 확률을 의미하며, $P_{fail,l}^{(n)}$ 은 $|D|=l$ 인 조건 하에서 수신기가 n ARQ 라운드 동안 수신 신호를 디코딩하지 못할 확률을 의미한다.

l 개의 중계기가 송신기로부터 수신받은 신호를 성공적으로 디코딩할 확률은 다음과 같이 주어진다 [3].

$$\Pr(|D|=l) = \binom{K}{l} e^{-l\gamma_0/\bar{\Gamma}} (1 - e^{-\gamma_0/\bar{\Gamma}})^{K-l}. \quad (2)$$

n 번째 ARQ 라운드에서의 지연된 SNR $\hat{\Gamma}_{r^*,d}^{(n)}$ 은 $\Gamma_{r^*,d}^{(n)}$ 와 동일한 분포를 갖는다고 가정한다. $|D|=l$ 인 조건 하에서 n 번째 ARQ 라운드에 선택된 중계기 r^* 로부터 수신기까지의 채널의 SNR 과 지연된 SNR 을 각각 $\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}$ 와 $\hat{\Gamma}_{r^*,d,l}^{(n)}$ 로 명명하면, $\hat{\Gamma}_{r^*,d,l}^{(n)}$ 의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다 [5].

$$f_{\hat{\Gamma}_{r^*,d,l}^{(n)}}(\hat{\gamma}) = \sum_{k=1}^l \binom{l}{k} \frac{k(-1)^{k-1}}{\bar{\Gamma}} e^{-k\hat{\gamma}/\bar{\Gamma}}. \quad (3)$$

또한 $\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}$ 의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다 [6].

$$f_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}}(\gamma) = \sum_{k=1}^l \binom{l}{k} \frac{k(-1)^{k-1}}{\bar{\Gamma} \{k(1-\rho) + \rho\}} e^{-\frac{k\gamma}{\{k(1-\rho) + \rho\}\bar{\Gamma}}}. \quad (4)$$

이로부터 $\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}$ 의 적률생성함수를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$M_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}}(s) = \sum_{k=1}^l \binom{l}{k} \frac{k(-1)^k / [\bar{\Gamma} \{k(1-\rho) + \rho\}]}{s - k / [\bar{\Gamma} \{k(1-\rho) + \rho\}]}. \quad (5)$$

$|D|=l$ 인 조건 하에, n 번째 ARQ 라운드에 결합된 신호의 SNR 은 다음과 같이 주어진다.

$$\Gamma_{d,l}^{(n)} = \sum_{i=1}^n \Gamma_{r',d,l}^{(i)} \quad (6)$$

독립적이고 동일한 확률변수들의 합에 대한 적률생성함수는 각 확률변수의 적률생성함수의 곱과 같다는 사실로부터, $\Gamma_{d,l}^{(n)}$ 의 적률생성함수는 다음과 같이 주어진다.

$$M_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(s) = \left[\sum_{k=1}^l \binom{l}{k} \frac{k(-1)^k / \{\bar{\Gamma}(k(1-\rho) + \rho)\}}{s - k / \{\bar{\Gamma}(k(1-\rho) + \rho)\}} \right]^n \quad (7)$$

라플라스 변환의 성질에 의해, $\Gamma_{d,l}^{(n)}$ 의 누적분포함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma) = L^{-1} \left[\frac{M_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(-s)}{s} \right] \quad (8)$$

이를 통해, $|D|=l$ 인 조건 하에서 수신기가 n ARQ 라운드 동안 수신 신호를 디코딩하지 못할 확률을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{fail,l}^{(n)} = F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma_0) \quad (9)$$

(1), (2), (9)로부터, 지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{out} = \left(1 - e^{-\gamma_0/\bar{\Gamma}}\right)^K + \sum_{l=1}^K \binom{K}{l} e^{-l\gamma_0/\bar{\Gamma}} \left(1 - e^{-\gamma_0/\bar{\Gamma}}\right)^{K-l} F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma_0) \quad (10)$$

B. 처리량 분석

지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 처리량은 신호 전송률과 전송 성공 확률의 곱을 수신기가 송신기로부터의 신호를 성공적으로 수신하기 위한 평균 (재)전송 횟수로 나눈 값으로서, 다음과 같이 기술된다 [7].

$$R = \frac{(1 - P_{out}) \log_2(1 + \gamma_0)}{\eta + 1} \quad (11)$$

위 식의 분모의 η 는 중계기의 평균 (재)전송 횟수를 가리키며, 1 은 송신기의 전송 횟수를 가리킨다. η 를 구하기 위해, 먼저 n 번째 ARQ 라운드에서의 디코딩 성공 확률을 유도하면 다음과 같다.

$$P_{succ}^{(n)} = P_{out}^{(n-1)} - P_{out}^{(n)} \quad (12)$$

이를 통해, 평균 (재)전송 횟수는 다음과 같이 기술된다.

$$\eta = \sum_{n=1}^N n P_{succ}^{(n)} + N P_{out} \quad (13)$$

위 식에서 첫 번째 항은 디코딩이 성공할 때의 (재)전송 횟수에 대한 평균값을 가리키며, 두 번째 항은 디코딩이 실패할 때의 재전송 횟수를 가리킨다.

(11)과 (13)으로부터, 지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 처리량은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{(1 - P_{out}) \log_2(1 + \gamma_0)}{1 + \sum_{n=1}^N n P_{succ}^{(n)} + N P_{out}} \quad (14)$$

4. 모의실험 결과

모의실험에서의 노이즈의 분산 $N_0=1$ 로 설정하였으며, 수신 SNR 과 지연 SNR 간의 상관계수 $\rho=0.5$, SNR 문턱값 $\gamma_0=1$ dB 로 설정하였다.

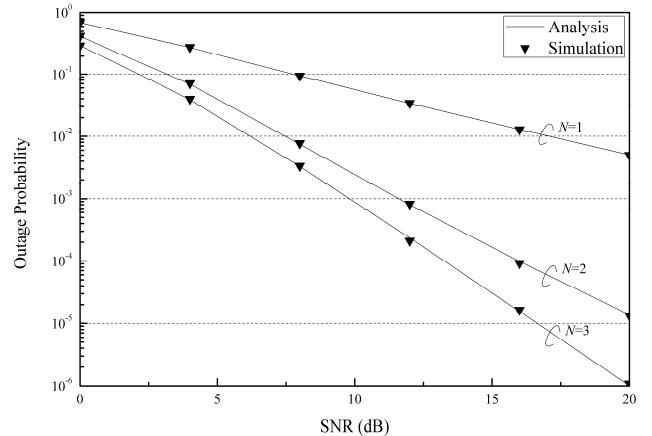


그림 2. 여러 N 값에 대한 불능 확률 비교. $K=3$.

그림 2 에서는 중계기가 3 개일 때, 지연된 채널 정보 하에서 여러 N 값에 대한 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률에 대한 분석 및 시뮬레이션 결과를 보인다. 0 dB~20 dB 사이의 SNR 에서 분석 결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 또한 최대 ARQ 라운드 N 이 커질수록 불능 확률이 감소함을 확인할 수 있다.

N	Analysis (bps/Hz)	Simulation (bps/Hz)
1	0.36	0.37
2	0.41	0.42
3	0.41	0.43

표 1. 4 dB 에서 여러 N 값에 대한 처리량 비교. $K=3$.

표 1 에서는 중계기가 3 개일 때, 지연된 채널 정보 하에서 여러 N 값에 대한 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 처리량에 대한 분석 및 시뮬레이션 결과를 보인다. 분석 결과 및 시뮬레이션 결과가 거의 일치하며, N 의 변화에 대한 처리량의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 지연된 채널 정보를 사용한 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률 및 처리량을 분석하였다. 수신기의 수신 SNR 에 대한 적률생성함수를 통해 불능 확률을

유도하였으며, 중계기의 평균 (재)전송 횟수를 통해 처리량을 분석하였다. 모의실험을 통해 분석한 불능 확률 및 처리량 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* vol. 24, no. 3, pp. 659–672, Mar. 2006.
- [2] A. Bletsas, A. Khisti, and M. Z. Win, "Opportunistic cooperative diversity with feedback and cheap radios," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 5, pp. 1823–1827, May 2008.
- [3] J. L. Vicario, A. Bel, J. A. L.-Salcedo, and G. Seco, "Opportunistic relay selection with outdated CSI: Outage probability and diversity analysis" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 2872–2876, June 2009.
- [4] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, IEEE press, 1994.
- [5] M. Torabi, W. Ajib, and D. Haccoun, "Performance analysis of amplify-and-forward cooperative networks with relay selection over Rayleigh fading channels," *Proc. IEEE VTC 2009-Spring*, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [6] M. Torabi and D. Haccoun, "Capacity analysis of opportunistic relaying in cooperative systems with outdated channel information," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 1137–1139, Dec. 2010.
- [7] J. Kim, H. Jin, D. K. Sung, and R. Schober, "Optimization of wireless multicast systems employing hybrid-ARQ with Chase combining," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 7, pp. 3342–3355, Sept. 2010.