

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

박진현^{a)†}, 이재홍^{a)}

Outage Probability and Throughput Analysis of Hybrid-ARQ Based Opportunistic Relaying with Outdated CSI

Jinhyun Park^{a)†} and Jae Hong Lee^{a)}

요 약

하이브리드 ARQ 및 기회적 중계 기법(opportunistic relaying)은 이동통신 환경에서 다이버시티 이득(diversity gain)을 높이기 위해 널리 사용되는 기법이다. 기회적 중계 기법에서 최적의 중계기(relay)를 선택하는 데 중계기와 단말기 간 채널 상태 정보(CSI: channel state information)가 요구되는데, 수신 단말기가 고속으로 이동하는 경우 채널 상태 정보는 지연된(outdated) 정보가 된다. 본 논문에서는 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 기법에서 지연된 채널 정보를 알 때의 시스템 성능을 불능 확률(outage probability) 및 처리율(throughput) 관점에서 분석하고자 한다. 컴퓨터 모의실험을 통해 이 분석이 정확한지 검증한다.

Abstract

Hybrid-ARQ and opportunistic relaying are the widely used schemes for obtaining diversity gain in wireless communications. In opportunistic relaying, channel state information(CSI) between relays and destination is required to select the best relay. But if the destination moves very fast, the CSI becomes outdated. In this paper, performance of hybrid-ARQ based opportunistic relaying with outdated CSI is analyzed in outage probability and throughput perspective. The analysis is verified by computer simulations.

Keyword : outdated CSI, opportunistic relaying, hybrid-ARQ

1. 서론

LTE-A 및 802.16m과 같은 최근 이동통신 표준에서 도

달거리 확장(coverage extension) 및 셀 경계(cell edge)에서의 전송률 향상을 위해 중계기(relay) 기술이 도입되었으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 여러 중계기가 존재하는 경우 이를 효율적으로 활용하기 위한 방법으로서 기회적 중계 기법(opportunistic relaying)이 제안되었다^[1]. 기회적 중계 기법에서는 여러 중계기 중 채널 상태가 가장 좋은 중계기 하나가 선택되어 신호를 중계하며, 이를 통해 최대 다이버시티 이득(diversity gain)을 얻을 수 있다고 알려져 있다.

a) 서울대학교 전기·컴퓨터공학부
Department of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National Univ.

† 교신저자 : 박진현 (jinhyunpark@snu.ac.kr)

※ 이 논문은 2011, 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017437, 2012-0000919).
· 접수일(2012년1월11일), 수정일(2012년3월5일), 게재확정일(2012년3월5일)

또한 ARQ 기법은 통신의 신뢰도를 높이기 위해 널리 사용되어 온 기법으로서, 신호가 정상적으로 전송되지 않으면 수신기의 되먹임(feedback) 정보에 따라 재전송을 수행한다. ARQ 기법에 오류 정정 부호를 적용하면 재전송 횟수가 줄어 처리량(throughput)이 향상되며 이를 하이브리드 ARQ라고 한다. 기회적 중계 시스템에 하이브리드 ARQ를 적용한 경우 그렇지 않은 시스템보다 더 나은 다이버시티-다중화 트레이드오프(diversity-multiplexing tradeoff) 성능을 달성하게 된다^[2].

현재까지의 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 시스템에 대한 연구는 중계기와 단말기 간의 채널 상태 정보(CSI: channel state information)를 완벽하게 알고 있다는 가정 하에서 진행되었다. 실제 통신 환경에서는 채널 정보를 얻는 시점과 신호를 송수신하는 시점의 시간차가 존재하며, 단말기가 고속으로 움직이는 경우 이 시간차 동안에 채널 상태가 변하게 되므로 알고 있는 채널 상태 정보는 지연된(outdated) 정보가 된다. 중계기를 이용하는 802.16m 시스템에서 단말기의 이동 속도를 최대 350km/h 까지 보장하고 있으므로, 단말기 이동에 따른 채널 상태의 변화에 대한 영향이 분석될 필요가 있다. 기회적 중계 시스템에 대해서는 채널 상태 정보가 지연됨에 따라 시스템의 불능 확률 및 다이버시티 이득이 심각하게 감소되는 것이 알려져 있으나^[3], 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 시스템에서는 이에 대한 영향이 아직까지 분석되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 하이브리드 ARQ를 사용한 기회적 중계 시스템에서 채널 상태 정보가 지연되었을 때의 시스템의 성능을 분석한다. 시스템의 성능은 불능 확률 및 처리량으로 나타낸다.

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

II. 시스템 모델

그림 1과 같이 하나의 송신기, K 개의 중계기, 하나의 단

말기로 구성된 시스템을 가정한다. 각 단말기는 하나의 안테나를 가지고 있으며, 송신기와 단말기 사이의 직경로(direct path)는 없다고 가정한다.

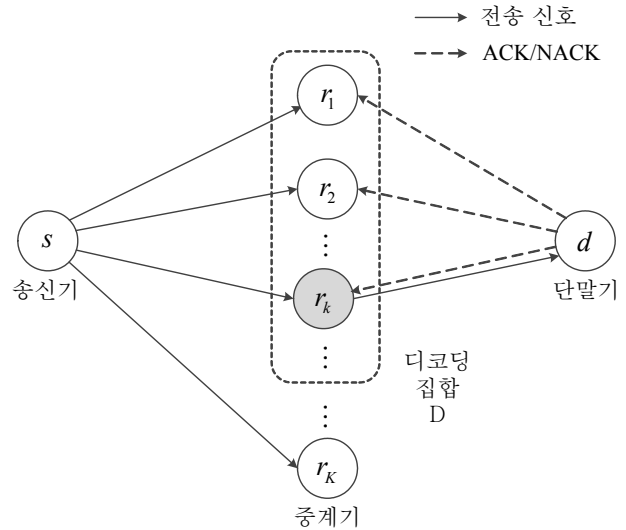


그림 1. 하이브리드 ARQ 기반 기회적 중계 시스템 모델
Fig. 1. System model for a hybrid-ARQ based opportunistic relaying

송신기는 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 단말기까지의 채널이 가장 좋은 중계기가 기회적 중계 기법에 의해 선택되어 신호를 전송하게 된다. 중계기와 단말기 간의 전송은 다음의 ARQ 과정에 따라 진행된다. 우선 단말기는 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. ARQ를 통하여 중계기가 신호를 전송하는 횟수를 ARQ 라운드라고 명명하며, 허용 가능한 최대 ARQ 라운드는 N 으로 제한되어 있다고 가정한다. 또한, 각각의 중계기는 ACK/NACK 신호를 오류 없이 수신한다고 가정한다.

송신기로부터 중계기 r_k 까지의 채널 계수 $h_{s,r_k}, k =$

1, 2, ..., K는 평균이 0, 분산이 1인 복소 가우시안 확률 변수이다. 그러면 중계기 r_k 에서의 수신 SNR은 $\Gamma_{s,r_k} = |h_{s,r_k}|^2 P_s / N_0$ 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 SNR이 미리 정해진 SNR 문턱값 γ_0 보다 크면, 중계기 r_k 는 수신 신호를 성공적으로 디코딩한다고 가정한다.

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 1인 복소 가우시안 확률 변수이다. n 번째 ARQ 라운드에 선택된 중계기가 r^* 이라 하면, n 번째 ARQ 라운드에 수신기에서의 수신 SNR은 $\Gamma_{r^*,d}^{(n)} = |h_{r^*,d}^{(n)}|^2 P_r / N_0$ 으로 주어지며, 여기서 P_r 은 n 번째 ARQ 라운드에 선택된 중계기의 전송 전력, N_0 은 수신기의 노이즈의 분산을 가리킨다.

각 ARQ 라운드에 수신기에서 수신된 신호는 최대비 결합 기법 (maximal ratio combining: MRC) 에 따라 결합된다. 결합된 신호의 SNR이 미리 정해진 SNR 문턱값 γ_0 보다 크면 수신기는 수신 신호를 성공적으로 디코딩하며, 그렇지 않으면 수신 신호 디코딩이 실패한다고 가정한다. 만일 수신기가 N ARQ 라운드 동안 수신 신호를 디코딩하지 못하면 불능 사건(outage event)이 발생한다.

채널의 시변성(time-varying nature)에 의해, 중계기 선택 시점의 채널 정보가 신호 전송 시점에는 지연된 정보가 된다^[3]. n 번째 ARQ 라운드에 지연된 채널 정보로부터 얻은 중계기 r_k 로부터 수신기까지의 SNR을 $\widehat{\Gamma}_{r_k,d}^{(n)}$ 로 명명한다. Jakes의 모델에 따르면, 실제 수신 SNR과 지연된 채널 정보로부터 얻은 SNR, 즉 $\Gamma_{r_k,d}^{(n)}$ 와 $\widehat{\Gamma}_{r_k,d}^{(n)}$ 간의 상관계수 (correlation coefficient)는 $\rho = J_0^2(2\pi f_D \tau)$ 로 주어지며, 여기서 $J_0(\cdot)$ 은 0차 제1종 베셀 함수 (zeroth order Bessel function of the first kind), f_D 는 도플러 주파수, τ 는 중계기 선택 시점과 신호 전송 시점 간의 시간차를 의미한다^[4]. 단말기가 속도 v 로 움직인다고 가정하면 도플러 주파수 $f_D = vf_c/c$ 로 주어지며, 여기서 f_c 는 방송파 주파수, c 는 전파 속도를 가리킨다. τ 는 중계기와 단말기 간의 채널을 추정하는 시간과 같다고 가정하며, 한 타임슬롯의 길이가 t 일

때 $\tau = Kt$ 로 가정한다.

표 1은 위 시스템 모델 하에서 방송파 주파수 및 단말기의 속력에 따른 ρ 값을 보인다. 타임슬롯의 길이는 LTE 표준에 따라 $t = 0.5$ ms로 가정하였으며, 중계기의 수 $K = 3$ 으로 가정하였다.

표 1. 방송파 주파수 및 단말기의 속력에 따른 ρ 값

Table 1. The value of ρ by various carrier frequency and speed of the receiver

$f_c \backslash v$	40 km/h	80 km/h	120 km/h
900 MHz	0.95	0.82	0.62
1.8 GHz	0.82	0.41	0.08
2.1 GHz	0.76	0.28	0.01

III. 불능확률 및 처리량 분석

1. 불능확률 분석

지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 기회적 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 단말기가 n ARQ 라운드 동안 수신 신호를 디코딩하지 못할 확률을 의미한다.

분석을 단순화하기 위해 송신기와 중계기가 동일한 전력 P 로 신호를 전송한다고 가정하면, l 개의 중계기가 송신기로부터 수신받은 신호를 성공적으로 디코딩할 확률은 다음과 같이 주어진다^[3].

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

위 식에서 $\bar{\Gamma} = P/N_0$ 을 가리킨다.

이제 $P_{fail,l}^{(n)}$ 을 구하기 위해, N ARQ 라운드 동안 단말기에서 결합된 신호의 SNR에 대한 누적분포함수(CDF: cumulative distribution function)를 구하도록 한다.

n 번째 ARQ 라운드에서의 지연된 채널 정보로부터 얻은 SNR $\Gamma_{r_k,d}^{(n)}$ 은 $\Gamma_{r_k,d}^{(n)}$ 와 동일한 분포를 갖는다고 가정한다. $|D|=l$ 인 조건 하에서 n 번째 ARQ 라운드에 선택된 중계기 r^* 로부터 단말기까지의 채널의 SNR과 지연된 채널 정보로부터 얻은 SNR을 각각 $\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}$ 와 $\hat{\Gamma}_{r^*,d,l}^{(n)}$ 로 정의하자. $\hat{\Gamma}_{r^*,d,l}^{(n)}$ 는 디코딩 집합 내의 r_k 에 대한 $\Gamma_{r_k,d}^{(n)}$ 의 최대 값이므로, 이에 대한 누적분포함수는 다음과 같이 주어진다.

$$F_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}}(\hat{\gamma}) = (1 - e^{-\hat{\gamma}/\bar{\Gamma}})^l. \quad (3)$$

위 식을 $\hat{\gamma}$ 에 대하여 미분한 후 이항정리(binomial expansion)를 적용하면, $\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}$ 의 확률밀도함수(PDF: probability distribution function)는 다음과 같이 주어진다^[5].

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

$\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)} = \hat{\gamma}$ 일 때 $\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}$ 의 조건부 확률밀도함수는 다음과 같이 주어지며

$$f_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}|\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}}(\gamma|\hat{\gamma}) = \frac{1}{(1-\rho)\bar{\Gamma}} e^{-\frac{\rho\hat{\gamma}+\gamma}{(1-\rho)\bar{\Gamma}}} I_0\left(\frac{2\sqrt{\rho\hat{\gamma}\gamma}}{(1-\rho)\bar{\Gamma}}\right), \quad (5)$$

여기서 $I_0(\cdot)$ 은 0차 제 1종 수정 베셀 함수(zeroth order modified Bessel function of the first kind)이다. (4)와 (5)로부터 $\Gamma_{r_k,d,l}^{(n)}$ 의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다^[6].

$$\begin{aligned} f_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}}(\gamma) &= \int_0^\infty f_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}|\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}}(\gamma|\hat{\gamma}) \cdot f_{\hat{\Gamma}_{r^*,d,l}^{(n)}}(\hat{\gamma}) d\hat{\gamma} \\ &= \sum_{k=1}^l \binom{l}{k} \frac{k(-1)^{k-1}}{\bar{\Gamma}\{k(1-\rho)+\rho\}} e^{-\frac{k\gamma}{\{k(1-\rho)+\rho\}\bar{\Gamma}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

(6)으로부터 $\Gamma_{r_k,d,l}^{(n)}$ 의 적률생성함수(MGF: moment generating function)를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\mathcal{M}_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(n)}}(s) = \sum_{k=1}^l \binom{l}{k} \frac{k(-1)^k / [\bar{\Gamma}\{k(1-\rho)+\rho\}]}{s - k / [\bar{\Gamma}\{k(1-\rho)+\rho\}]}. \quad (7)$$

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

$$\Gamma_{d,l}^{(n)} = \sum_{i=1}^n \Gamma_{r^*,d,l}^{(i)} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(s) &= \prod_{i=1}^n \mathcal{M}_{\Gamma_{r^*,d,l}^{(i)}}(s) \\ &= \left[\sum_{k=1}^l \binom{l}{k} \frac{k(-1)^k / [\bar{\Gamma}\{k(1-\rho)+\rho\}]}{s - k / [\bar{\Gamma}\{k(1-\rho)+\rho\}]} \right]^n. \end{aligned} \quad (9)$$

분석을 단순화하기 위해 (9)를 $g(k) = k / \{\bar{\Gamma}\{k(1-\rho)+\rho\}\}$ 로 정의하고 다항정리(multinomial expansion)를 사용하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(s) &= \sum_{u_1+u_2+\dots+u_l=n} \frac{n!}{u_1!u_2!\dots u_l!} \prod_{k=1}^l \left[\binom{l}{k} \frac{(-1)^k g(k)}{s - g(k)} \right]^{u_k}. \end{aligned} \quad (10)$$

위 식에서 u_1, u_2, \dots, u_l 은 정수이다. $u_1 + u_2 + \dots + u_l = n$ 및 $u_1, u_2, \dots, u_l \geq 0$ 을 만족하는 순서쌍 (u_1, u_2, \dots, u_l) 은 총 $\binom{l+n-1}{n}$ 개 있다. 여기서 $u_1^{(p)}, u_2^{(p)}, \dots, u_l^{(p)}$, $p=1, 2, \dots, \binom{l+n-1}{n}$ 를 p 번째 순서쌍의 원소라고 하자. 그러면 (10)은 다음과 같이 정리된다.

$$\mathcal{M}_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(s) = \sum_{p=1}^P \frac{n!}{u_1^{(p)}! u_2^{(p)}! \dots u_l^{(p)}!} \prod_{k=1}^l \left[\binom{l}{k} \frac{(-1)^k g(k)}{s-g(k)} \right]^{u_k^{(p)}} \quad (11)$$

위 식에서 $P = \binom{l+n-1}{n}$ 이다.

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

$$\mathcal{M}_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(s) = \sum_{p=1}^P \frac{n!}{u_1^{(p)}! u_2^{(p)}! \dots u_l^{(p)}!} \prod_{k=1}^l \left[\binom{l}{k} \frac{(-1)^k g(k)}{s-g(k)} \right]^{u_k^{(p)}} \quad (11)$$

(12)는 부분분수분해(partial fraction expansion)를 통해 다음과 같이 정리된다.

(13)에서 $A_0^{(p)}$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$A_0^{(p)} = \prod_{k=1}^l \left[(-1)^{k-1} \binom{l}{k} \right]^{u_k^{(p)}} \quad (14)$$

(13)에서 $A_{k,i}^{(p)}$, $i = 1, 2, \dots, u_k^{(p)}$ 는 우선 (15)를 계산한 후 다음으로 (16)을 $m = 1, 2, \dots, u_k^{(p)} - 1$ 에 대하여 계산함으로써 얻을 수 있다^[7].

$$F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma) = L^{-1} \left[\frac{\mathcal{M}_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(-s)}{s} \right] = L^{-1} \left[\sum_{p=1}^P \frac{n!}{u_1^{(p)}! u_2^{(p)}! \dots u_l^{(p)}!} \frac{1}{s} \prod_{k=1}^l \left\{ \binom{l}{k} \frac{(-1)^{k-1} g(k)}{s+g(k)} \right\}^{u_k^{(p)}} \right] \quad (12)$$

$$F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma) = L^{-1} \left[\sum_{p=1}^P \frac{n!}{u_1^{(p)}! u_2^{(p)}! \dots u_l^{(p)}!} \left\{ \frac{A_0^{(p)}}{s} + \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^{u_k^{(p)}} \frac{A_{k,i}^{(p)}}{(s+g(k))^i} \right\} \right] \quad (13)$$

$$A_{k,u_k^{(p)}} = \frac{(-1)^{(k-1)u_k^{(p)}+1}}{g(k)} \left\{ \binom{l}{k} g(k) \right\}^{u_k^{(p)}} \prod_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^l \left\{ \binom{l}{r} \frac{(-1)^{r-1} g(r)}{g(r)-g(k)} \right\}^{u_r^{(p)}} \quad (15)$$

$$A_{k,u_k^{(p)}-m} = \left[\frac{1}{s} \prod_{r=1}^l \left\{ \binom{l}{r} \frac{(-1)^{r-1} g(r)}{s+g(r)} \right\}^{u_r^{(p)}} - \sum_{r=0}^{m-1} \frac{A_{k,u_k^{(p)}-r}}{(s+g(k))^{u_k^{(p)}-r}} \right] (s+g(k))^{u_k^{(p)}-m} \Big|_{s=-g(k)} \quad (16)$$

$$F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma) = \sum_{p=1}^P \frac{n!}{u_1^{(p)}! u_2^{(p)}! \dots u_l^{(p)}!} \left[A_0^{(p)} + \sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^{u_k^{(p)}} \frac{A_{k,i}^{(p)} \gamma^{i-1}}{(i-1)!} e^{-g(k)\gamma} \right] \quad (17)$$

관계식 [8, (17.13.17)]에 의해, (12)는 다음과 같이 정리된다.

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

$$P_{fail,l}^{(n)} = F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma_0) \quad (18)$$

(1), (2), (18)로부터, 지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률은 다음과 같이 얻어진다.

$$P_{out} = \left(1 - e^{-\gamma_0/\bar{\Gamma}} \right)^K + \sum_{l=1}^K \binom{K}{l} e^{-l\gamma_0/\bar{\Gamma}} \left(1 - e^{-\gamma_0/\bar{\Gamma}} \right)^{K-l} F_{\Gamma_{d,l}^{(n)}}(\gamma_0) \quad (19)$$

2. 처리량 분석

지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 처리량의 기대값은 단위 시간당 수신기에서 성공적으로 디코딩된 신호의 양으로 정의할 수 있다. 이는 신호 전송률과 전송 성공 확률의 곱을 평균 (재)전송 횟수로 나눈 값으로서, 다음과 같이 기술된다^[9].

$$R = \frac{(1 - P_{out}) \log_2(1 + \gamma_0)}{\eta + 1} \quad (20)$$

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

$$P_{\text{succ}}^{(n)} = P_{\text{out}}^{(n-1)} - P_{\text{out}}^{(n)}. \quad (21)$$

이를 통해, 평균 (재)전송 횟수는 다음과 같이 기술된다.

$$\eta = \sum_{n=1}^N n P_{\text{succ}}^{(n)} + N P_{\text{out}}. \quad (22)$$

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

(20)과 (22)으로부터, 지연된 채널 정보 하에서 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 처리량의 기대값은 다음과 같이 주어진다.

$$R = \frac{(1 - P_{\text{out}}) \log_2(1 + \gamma_0)}{1 + \sum_{n=1}^N n P_{\text{succ}}^{(n)} + N P_{\text{out}}}. \quad (23)$$

IV. 모의실험 결과

컴퓨터 모의실험을 위해 노이즈의 분산 $N_0 = 1$ 로 설정하였으며, SNR 문턱값 $\gamma_0 = 1$ dB로 설정하였다. 채널은 시스템 모델에서와 같이 레일리 페이딩을 겪는 것으로 가정하였으며, Jakes 모델에 따라 매 시간마다 변하는 것으로 가정하였다. 타임슬롯의 길이 $t = 0.5$ ms로서 LTE 시스템과 동일하게 설정하였으며, 반송파 주파수 $f_c = 2.1$ GHz로 설정하였다. 단말기가 속력 $v = 60$ km/h로 일정하게 움직인다고 가정하였으며, 이 때 실제 수신 SNR과 지연된 채널 정보로부터 얻은 SNR간의 상관계수 $\rho \approx 0.5$ 로 주어진다.

그림 2에서는 중계기의 수 $K = 3$ 일 때, 지연된 채널 정보 또는 완벽한 채널 정보 하에서 여러 N 값에 대한 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률에 대한 분석 및 시뮬레이션 결과를 보인다. 0 dB ~

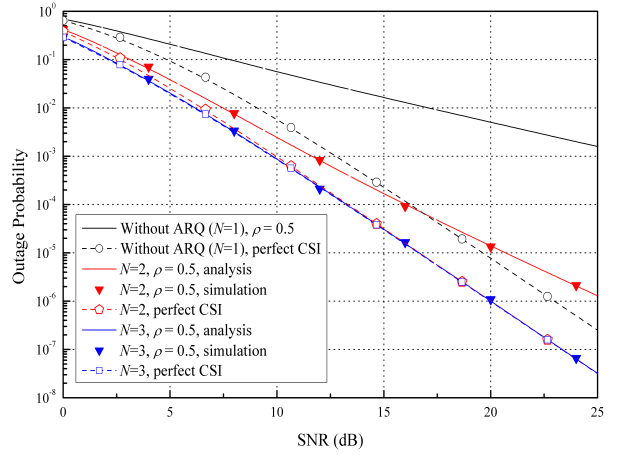


그림 2. $K=3$ 일 때 여러 N 값에 대한 불능 확률 비교
Fig. 2. Outage probability of various N when $K=3$

이선 결과를 보인다. 지연된 채널 정보를 가질 때, 0 dB ~ 25 dB 사이의 SNR에서 분석 결과와 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 또한 지연된 채널 정보 하에서 최대 ARQ 라운드 N 이 커질수록 SNR에 따른 불능 확률의 기울기가 감소하여 완벽한 채널 정보 하에서의 불능 확률에 근접하게 된다. 예를 들어 10^{-3} 의 불능 확률에서 지연된 채널 정보에 의해 $N = 1$ 인 경우 10 dB 이상의 성능 열화가 발생하지만, $N = 2$ 인 경우는 1.6 dB의 성능 열화가 발생하며, $N = 3$ 인 경우는 성능 열화가 거의 없다. 이 결과를 통해 기회적 중계 기법에서 지연된 채널 정보 하에서는 최대 재전송 횟수를 증가시키는 것이 불능 확률 면에서 상당한 성능 향상을 가져다 준다는 것을 확인하였다. 또한 SNR이 약 16 dB 이하인 경우에는 $N = 2, \rho = 0.5$ 인 시스템의 불능 확률이 $N = 1, \text{perfect CSI}$ 인 시스템의 불능 확률보다 낮으며, SNR이 약 16 dB 이상인 경우는 성능이 반전된다. 이 결과는 SNR이 낮을 때 시스템의 불능 확률이 CSI의 정확도보다 최대 재전송 횟수에 더 큰 영향을 받으며, 반면에 높은 SNR에서는 불능 확률이 CSI의 정확도에 더 많은 영향을 받음을 보인다.

그림 3에서는 $N = 2, \rho = 0.5$ 일 때, 지연된 채널 정보 하에서 여러 K 값에 대한 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률에 대한 분석 및 시뮬레이션 결과를 보인다. 0 dB ~ 30 dB 사이의 SNR 및 주어진 K 값에 대하여 분석 결과

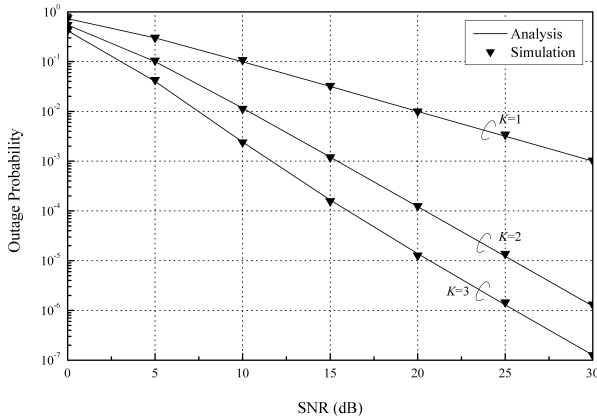


그림 3. N=2일 때 여러 K값에 대한 불능 확률 비교
Fig. 3. Outage probability of various K when N=2

와 시뮬레이션 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 또한 SNR ≥ 10 dB 일 때, $K=1$ 인 경우와 $K=2$ 인 경우 SNR에 따른 불능 확률의 기울기가 다르지만 $K=2$ 인 경우와 $K=3$ 인 경우의 기울기는 거의 동일한 것을 볼 수 있다. SNR에 따른 불능 확률의 기울기는 다이버시티 차수 (diversity order)를 의미하므로, 이를 통해 $N=2$, $\rho=0.5$ 일 때 중계기의 수를 2보다 높게 설정해도 중계기가 2개인 경우와 다이버시티 차수는 동일함을 알 수 있다.

그림 4에서는 $K=3$, $\rho=0.5$ 일 때, 지연된 채널 정보 하에서 여러 N값에 대한 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 처리량의 기대값을 보인다. 이를 통해 기회적 중계 기법에

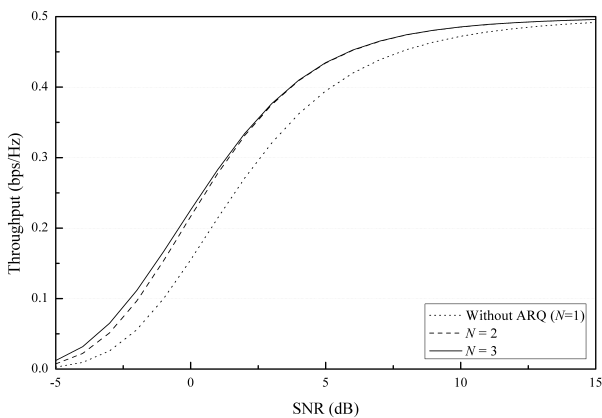


그림 4. K=3일 때 여러 N값에 대한 처리량의 기대값 비교
Fig. 4. Expected throughput of various N when K=3

서 ARQ를 적용했을 때, ARQ를 사용하지 않았을 때에 비해 처리량의 기대값이 향상됨을 확인한다. 특히 2 dB 이하의 낮은 SNR에서 $N=2$ 일 때, ARQ를 사용하지 않았을 때에 비해 20% 이상 처리량의 기대값이 향상된다. 처리량의 기대값이 향상되는 이유는 ARQ를 사용하면 불능 확률이 낮아지므로, 단말기에서 성공적으로 디코딩하는 데이터의 양이 증가하기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 지연된 채널 정보를 사용한 ARQ 기반 기회적 중계 기법의 불능 확률 및 처리량의 기대값을 분석하였다. 수신기의 수신 SNR에 대한 적률생성함수를 통해 불능 확률을 유도하였으며, 중계기의 평균 (재)전송 횟수를 통해 처리량의 기대값을 분석하였다. 모의실험을 통해 지연된 채널 정보 하에서 분석한 불능 확률이 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인하였으며, 지연된 채널 정보 하에서의 불능 확률을 완벽한 채널 정보 하에서의 불능 확률과 비교하였다. 또한 지연된 채널 정보 하에서 기회적 중계 기법에 ARQ를 적용하는 것이 처리량 측면에서 더 우수함을 확인하였다.

참고 문헌

- [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 relay-

- ing in cooperative systems with outdated channel information," IEEE Commun. Lett., vol. 14, no. 12, pp. 1137-1139, Dec. 2010.
- [7] Y. K. Man, "A simple algorithm for computing partial fraction expansions with multiple poles," Int. J. Math. Educ. Sci. Technol., vol. 38, no. 2, pp. 247-251, Mar. 2007.
- [8] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, Table of Integrals, Series, and Products, 7/e. Academic Press, 2007.
- [9] 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.

저 자 소 개



박진현

- 2010년 : 서울대학교 전기·정보공학부 학사
- 2012년 현재 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석·박사통합과정
- 주관심분야 : 협력 다이버시티, 자원관리 기법



이재홍

- 1976년 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1978년 : 서울대학교 전자공학과 석사
- 1986년 : University of Michigan, Ann Arbor, 전기및컴퓨터공학과 박사
- 1987년 ~ 현재 : 서울대학교 전기공학부 교수
- 주관심분야 : 디지털통신, 부호이론, MIMO, OFDM