레일리 페이딩 채널에서의 OADF 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능분석 기법에 관한 연구

Study of New Approach of Performance Analysis for OADF Relay Systems over Rayleigh Fading channels

고 균 병*, 서 정 태*

Kyun-Byoung Ko*, Jeong-Tae Seo*

요 약

본 논문에서는 OADF(Opportunistic Adaptive Decode-and-Forward) 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능분석 기법을 레일리 페이딩 채널에 대하여 제안하였다. 제안된 분석 기법에서는 릴레이들의 복호 오류 사건(error-event)을 기반으로 수신된 순시 신호대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)를 표현한다. 또한 SNR의 확률 밀도 함수(Probability Density Function: PDF)를 기존의 분석 기법보다 일반적인 (PDF 표현에서 합 기호의 개수 및 그 영역이 구체화된)형태로 제시한다. 그리고 이를 이용하여 정확한 평균 오류율(Average Error Rate), 누락 확률(Outage Probability) 및 평균 채널 용량(Average Channel Capacity)을 일반적인 형태로 유도한다. 제안된 성능분석 기법의 정확성은 모의실험을 통하여 검증한다. OADF 기법을 다른 기법들과 비교하여 평균 오류 확률, 누락 확률 및 채널 용량 측면에서 성능 향상 정도가 우수함을 확인하였다.

Abstract

In this letter, we have derived another exact performance analysis for the OADF(opportunistic adaptive decode-and-forward) relay systems over Rayleigh fading channels. Based on error-events at relay nodes, the received instantaneous SNR(signal-to-noise ratio) is presented and its PDF(probability density function) is expressed as a more tractable form in which the number of summations and the length of each summation are specified. Then, exact average error rate, outage probability, and average channel capacity are obtained as general forms. Simulation results are finally presented to validate that the proposed analytical expressions can be a unified frame work covering all Rayleigh fading channel conditions. Furthermore, it is confirmed that OADF schemes can outperform the other schemes on the average error rate, outage probability, and average channel capacity.

Keywords : OADF relay systems, Rayleigh fading channels, SNR, PDF, average error rate, outage probability, average channel capacity

Ⅰ. 서 론

무선 통신에서 릴레이(Relay, R) 시스템은 송신 단에서 큰 파워를 사용하지 않고도 통화 영역을 넓힐 수 있는 장점을 가지고 있다[1][2]. 또한, 페이딩 채널에서 무선 통신의 용량과 신뢰성을 증대시킬 수 있는 협력 다이버시티를 위해 이용할 수 있다[3][4]. 릴레이 시스템은 동작 방식에 따라 릴레이에서 수신 신호를 복호화하지 않고, 단순히 수신 신호의 파워만 증폭하여 다시 목적지로 전송하는 증폭 후 전달(Amplify-and-Forward: AF) 릴레이 시스템과 수신 신호를 복호화하고 다시 변조하여 목적지로 전송하는 디코딩 후 전달(Decoded-and-Forward: DF) 릴레이 시스템으로 구분할 수 있다. 이 중 AF 릴레이 시스템은 릴레이에서의 복호화가 필요 없으므로 릴레이를 하드웨어 측면에서 더 간단하게 구성할 수 있다는 장점을 가지는 반면에 DF 릴레이 시스템의 경우 릴레이단의 복호 과정으로 인해 복잡도가 증가되지만 각 릴레이가 복호에 성공한 경우에는 AF에 비하여 향상된 성능을 나타내는 장점이 있다[1-5]. 또한 CRC(Cyclic Redundancy Check) 기법 등을 이용하여 릴레이 단에서 복호 신호의 오류 유무를 판단할 수 있다고 가정한 릴레이 기법에 관한 연구가 진행되었다. 즉, 릴레이 단에서 수신된 신호의 오류 유무를 확인하여 오류가 없을 때에만 신호를 전송하고 그렇지 않은 경우는 해당 릴레이가 전송을 하지 않는 적응형 DF(Adaptive DF: ADF) 기법에 관한 연구가 진행 되었다[5-7].

최근에는 각 링크의 채널 정보를 이용하여 가장 좋은 채널의 릴레이를 선택하여 전송함으로써 릴레이 시스템의 가

* 충주대학교

투고 일자 : 2011. 4. 12 수정완료일자 : 2011. 7. 27
게재확정일자 : 2011. 8. 2
※"이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0002650)."
"이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임."

장 큰 단점인 주파수 효율 저하를 극복할 수 있는 선택적 기법(Opportunistic ADF: OADF)에 관한 연구가 진행되었다[5-6]. 이러한 OADF 기법에 관한 연구들에서는 수신단에서의 순시 신호대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)에 대한 확률 밀도 함수(Probability Density Function: PDF)를 릴레이 단의 오류 유무를 포함한 형태로 직접 유도하는 접근법을 사용함으로서 성능분석 결과가 복잡한 형태로 유도되는 단점이 있다[5-6]. 즉, 비록 성능분석 결과가 정확한 해(exact solution)를 제시한다 할지라도 다이버시티 시스템에서 이미 잘 알려진 식의 형태로 유도되지 못하여 OADF 릴레이 시스템의 특성을 설명하는데 한계가 있다고 할 수 있다. 본 논문에서는 소스와 릴레이 링크에서의 복호 오류 유무에 따라 오류 사건을 정의[7]하고 이를 바탕으로 OADF 릴레이에 대한 성능분석 기법을 제안하도록 한다. 제안된 분석 기법에서는 릴레이 단의 오류 유무가 주어진 오류 사건에 포함됨으로써 기존의 분석과는 다르게 수신단 순시 SNR의 PDF가 잘 알려진 다이버시티 수신기에서와 같은 형태로 표현되게 된다. 특히 PDF의 표현에서는 집합 연산을 사용함으로써 합 기호의 개수 및 영역이 구체화된 형태로 표현된다. 이는 기존의 분석 기법과의 차별성으로 제안된 기법이 OADF 릴레이 시스템의 다이버시티 효과를 이론적으로 설명할 수 있음을 의미한다. 그리고 주어진 오류 사건에 대한 성능분석을 수행한 후 모든 오류 사건에 대해 평균을 취하여 최종적인 성능분석 결과를 이미 잘 알려진 해의 형태로 유도하도록 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 OADF 릴레이 시스템 모델을 설명한다. Ⅲ장에서는 OADF 릴레이 시스템에 대한 성능분석을 수행하고 Ⅳ장에서는 제안된 성능분석 결과를 모의실험 결과와 비교 분석하여 그 정확성을 검증한다. 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 맺는다.

II. OADF 릴레이 시스템

그림 1은 OADF 프로토콜을 사용하는 릴레이 시스템 블록도를 나타낸다[5]. 그림에서 S(Source)는 정보를 전송하고자하는 송신 노드를, D(Destination)는 최종 수신 노드를, R(Relay)는 릴레이 노드들을 각각 나타낸다. ADF 릴레이 시스템에서는 R개의 릴레이 중 오류 없이 수신한 릴레이들만 재생성한 신호를 재전송하게 된다. 따라서 총 $R+1$개의 직교채널이 필요하다. 반면 OADF 릴레이 시스템에서는 두 개(하나는 S-D 링크, 다른 하나는 선택된 R-D 링크)의 직교 채널을 사용하여 전송하게 된다[5-6]. 즉, OADF 릴레이 시스템의 첫 번째 직교 채널에서 S는 R과 D로 전송 신호를 전송한다. 두 번째 직교 채널에서는 첫 번째 직교 채널에서 오류 없이 수신한 릴레이들 중 가장 좋은 채널 상태의 릴레이를 선택하고 오류 없이 수신한 신호를 재생성하여 D로 전송한다. 따라서 OADF 시스템에서는 총 2개의 직교 채널만을 필요로 한다. 여기서 S-D 링크는 S와 D사이의 채널 링크를, S-R 링크는 S와 R사이의 채널 링크를, R-D 링크는 R과 D사이의 채널 링크를 각각 나타낸다. 따라서 각 링크의 수신신호는 다음과 같다.

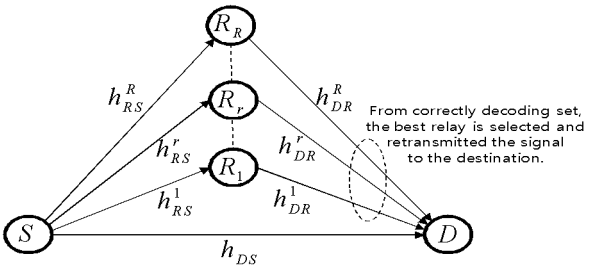


그림 1. OADF 릴레이 시스템 블록도.
Fig. 1. Block diagram for OADF Relay System.

$$\begin{aligned} y_{DS} &= h_{DS}\sqrt{E_s}s + n_{DS} \\ y_{RS}^r &= h_{RS}^r\sqrt{E_s}s + n_{RS}^r \\ y_{DR}^r &= h_{DR}^r\sqrt{E_r}\hat{s^r} + n_{DR}^r \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 h_{DS}, h_{RS}^r 및 h_{DR}^r는 각각 S-D, r번째 S-R 및 R-D링크의 채널 이득을 나타낸다. 그리고 각 링크의 채널 이득은 상호 독립적이고 크기가 Rayleigh 분포를 갖는 랜덤변수이다. E_s 및 E_r은 S와 r번째 릴레이서의 전송 심벌 에너지를 각각 나타낸다. 또한 n_{DS}, n_{RS}^r 및 n_{DR}^r는 각 링크 채널에 대한 부가 백색 가우스 복소 잡음 (Additive White Gaussian complex Noise: AWGN)으로 모두 평균은 0이고 분산은 σ^2로 가정한다. 그리고 전송 심벌 s는 $E[|s|^2]=1$를 만족하고 $\hat{s^r}$는 r번째 릴레이에서 복호 후 재생성한 전송 심벌이다. 따라서 각 링크에서의 수신 SNR은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= |h_{DS}|^2 E_s/\sigma^2 \\ \gamma_{R+r} &= |h_{RS}^r|^2 E_s/\sigma^2 \\ \gamma_r &= |h_{DR}^r|^2 E_r/\sigma^2 \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 각 링크의 평균 SNR은 $E[\gamma_0]=\overline{\gamma_0}$, $E[\gamma_{R+r}]=\overline{\gamma_{R+r}}$, 및 $E[\gamma_r]=\overline{\gamma_r}$로 정의한다. 또한 $i\in\{0,1,\cdots,2R\}$인 확률 변수 γ_i의 PDF는 $f_{\gamma_i}(\gamma)=\frac{1}{\overline{\gamma_i}}\exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma_i}}\right)$이다[8]. 그리고 D에서는 최종적으로 S-D 링크 및 R-D 링크 수신신호를 결합함으로써 릴레이를 통한 성능향상을 얻게 된다.

III. OADF 릴레이 시스템 성능분석

본 장에서는 OADF 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능분석 기법을 제안하기 위하여 우선 다중 릴레이의 오류 사건(error-event)을 정의하고 이러한 오류 사건 하에서의 성능분석을 수행한다. 최종적으로 발생가능한 모든 오류사건에 대한 평균을 취함으로써 보다 명확히 OADF 시스템의 다이버시티 효과를 설명할 수 있는 새로운 표현의 성능분석 결과를 도출하도록 한다.

3.1 릴레이 단에서의 오류 사건

우선 R개의 릴레이가 존재하는 시스템에서 총 심벌 오류 사건은 2^R개가 존재한다. 이중 p번째 오류 사건을 다음과 같이 정의한다[7].

$$E^p=[e_1^p\cdots e_r^p\cdots e_R^p] \tag{3}$$

여기서 $p\in\{1,2,\cdots,2^R\}$이고 e_r^p는 p번째 오류 사건의 r번째 릴레이의 복호 심벌 오류 유무를 의미한다. 즉, $e_r^p=1$ 및 $e_r^p=0$는 복호 과정에 오류가 발생한 경우와 오류가 없는 경우를 각각 나타낸다. 또한 편의상 E^1은 모든 원소가 0인 벡터 그리고, E^{2^R}은 모든 원소가 1인 벡터가 되도록 E^p를 할당한다. MPSK(M-ary Phase Shift Keying) 심벌에 대한 r번째 S-R 링크의 평균 심벌 오류율은 다음과 같다[9].

$$P_{ASER,r}=\frac{1}{\pi}\int_0^{(M-1)\pi/M}\frac{1}{1+\overline{\gamma}_{R+r}s}d\theta \tag{4}$$

여기서 $g_{PSK}=\sin^2(\pi/M)$이고 $s=g_{PSK}/\sin^2\theta$이다. 따라서 p번째 오류 사건이 발생할 확률은 다음과 같다.

$$\Pr\{E^p\}=\prod_{r=1}^{R}(1-P_{ASER,r})^{\overline{e_r^p}}(P_{ASER,r})^{e_r^p} \tag{5}$$

여기서 $\overline{e_r^p}=(e_r^{p+1})\bmod 2$이다.

3.1 OADF 릴레이 시스템의 수신 신호 모델

OADF 릴레이 시스템의 수신 노드에서 MRC(Maximum Ratio Combining) 기법의 사용을 가정할 때 p번째 오류 사건에 대한 수신 신호는 다음과 같다.

$$\gamma^p=\gamma_0+\max_{r\in D_p}\left\{\overline{e_r^p}\gamma_r\right\}=\gamma_0+\gamma_{\max}^p \tag{6}$$

여기서 D_p는 p번째 오류 사건에서 오류 없이 수신한 릴레이들의 인덱스를 원소로 갖는 집합으로 다음과 같다.

$$r\in D_p,\quad \text{if}\quad \overline{e_r^p}=1 \tag{7}$$

또한 $\gamma_{\max}^p=\max_{r\in D_p}\left\{\overline{e_r^p}\gamma_r\right\}$는 p번째 오류 사건의 오류 없이 수신한 릴레이들 중에서 순시 SNR들 중에서 가장 큰 값을 의미한다. 그리고 p번째 오류 사건에서 오류 없이 수신한 릴레이들의 개수(집합 D_p의 원소 개수)는 $L_p=\sum_{r=1}^{R}\overline{e_r^p}$이다. 본 논문에서는 성능분석 결과를 보다 이해하기 쉬운 형태로 유도하기 위하여 집합 D_p의 부분 집합을 고려하도록 한다. 이러한 부분 집합들 중에서 k개의 원소를 갖는 부분 집합은 총 $N_{p,k}=\binom{L_p}{k}=\frac{L_p!}{(L_p-k)!k!}$개가 존재한다. 부분 집합을 원소들의 합이 증가되는 순서로 정렬한다고 할 때 j번째 부분 집합을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D_p^{k,j}=\left\{\lambda_{p,1}^{k,j},\cdots,\lambda_{p,m}^{k,j},\cdots,\lambda_{p,k}^{k,j}\right\} \tag{8}$$

OADF 릴레이 시스템의 성능분석을 위해서는 식 (6)의 $\gamma_{\max}^p$의 PDF를 유도하여야 한다. 이를 위해서 먼저 $\gamma_{\max}^p$의 CDF(Cumulative Distribution Function)를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}F_{\gamma_{\max}^p}(\gamma)&=\prod_{r=1}^{R}\Pr\left\{\overline{e_r^p}\gamma_r\le\gamma\right\}=\prod_{r=1}^{R}\left(1-\exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma}_r}\right)\right)^{\overline{e_r^p}}\\&=1+\sum_{k=1}^{L_p}(-1)^k\sum_{j=1}^{N_{p,k}}\prod_{m=1}^{k}\exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma}_{\lambda_{p,m}^{k,j}}}\right)\end{aligned} \tag{9}$$

상기 식을 미분하여 $\gamma_{\max}^p$의 PDF를 다음과 같이 얻는다.

$$f_{\gamma_{\max}^p}(\gamma)=\sum_{k=1}^{L_p}(-1)^{k+1}\sum_{j=1}^{N_{p,k}}\frac{1}{A_p^{k,j}}\exp\left(-\frac{\gamma}{A_p^{k,j}}\right) \tag{10}$$

여기서 $1/A_p^{k,j}=\sum_{m=1}^{k}1/\overline{\gamma_{\lambda_{p,m}^{k,j}}}$이다. 그리고 γ_0 및 $\gamma_{\max}^p$의 PDF로부터 식 (6)의 γ^p PDF를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$f_{\gamma^p}(\gamma)|_{L_p>0}=\begin{cases}\displaystyle\sum_{k=1}^{L_p}(-1)^{k+1}\sum_{j=1}^{N_{p,k}}\left(\frac{e^{-\gamma/\overline{\gamma}_0}}{\overline{\gamma}_0-A_p^{k,j}}+\frac{e^{-\gamma/A_p^{k,j}}}{A_p^{k,j}-\overline{\gamma}_0}\right) & \overline{\gamma}_0\neq A_p^{k,j}\\ \displaystyle\sum_{k=1}^{L_p}(-1)^{k+1}\sum_{j=1}^{N_{p,k}}\frac{\gamma}{(\overline{\gamma}_0)^2}e^{-\gamma/\overline{\gamma}_0} & \overline{\gamma}_0=A_p^{k,j}\end{cases} \tag{11-1}$$

$$f_{\gamma^p}(\gamma)|_{L_p=0}=f_{\gamma_0}(\gamma)=\frac{1}{\overline{\gamma}_0}\exp\left(-\frac{\gamma}{\overline{\gamma}_0}\right) \tag{11-2}$$

또한 γ^p의 CDF는 γ^p의 PDF를 적분함으로써 다음과 같이 유도 된다.

$$F_{\gamma^p}(\gamma)|_{L_p>0}=\int_0^{\gamma}f_{\gamma^p}(x)|_{L_p>0}dx=\sum_{k=1}^{L_p}(-1)^{k+1}\sum_{j=1}^{N_{p,k}}G_1 \tag{12-1}$$

$$F_{\gamma^p}(\gamma)|_{L_p=0}=\int_0^{\gamma}f_{\gamma_0}(x)\,dx=1-e^{-\gamma/\overline{\gamma}_0} \tag{12-2}$$

여기서 변수 G_1은 다음과 같다.

$$G_1=\begin{cases}\dfrac{\overline{\gamma}_0\left(1-e^{-\gamma/\overline{\gamma}_0}\right)}{\overline{\gamma}_0-A_p^{k,j}}+\dfrac{A_p^{k,j}\left(1-e^{-\gamma/A_p^{k,j}}\right)}{A_p^{k,j}-\overline{\gamma}_0}, & \overline{\gamma}_0\neq A_p^{k,j}\\ 1-\left(\dfrac{\gamma}{\overline{\gamma}_0}+1\right)e^{-\gamma/\overline{\gamma}_0}, & \overline{\gamma}_0=A_p^{k,j}\end{cases}$$

본 논문에서 제안하는 분석 결과 식 (11)은 참고문헌 [5]의 식 (6) 및 (7)의 다른 표현으로 이해될 수 있다. 하지한 참고문헌 [5]와는 다르게 PDF의 표현에서 합 기호의 개수와 각 합 기호의 영역이 구체화된 형태로 표현되어 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 분석기법은 레일리 페이딩 채널의 모든 조건을 포함하는 일반적인 형태라 할 수 있다.

3.2 평균 심벌 오류율

식 (10)과 (11-2)로부터, p 번째 오류 사건에 대한 평균 심벌 오류율은 다음과 같이 표현된다[9].

$$\begin{aligned} P_{ASER}^{p} &= \frac{1}{\pi}\int_{0}^{(M-1)\pi/M}\exp\left(-\frac{(\gamma_0+\gamma_{\max}^{p})g_{PSK}}{\sin^2\theta}\right)d\theta f(\gamma_0)f(\gamma_{\max}^{p})d\gamma_0 d\gamma_{\max}^{p} \\ &= \sum_{k=1}^{L_p}(-1)^{k+1}\sum_{j=1}^{N_{p,k}}\frac{1}{\pi}\int_{0}^{(M-1)\pi/M}\frac{1}{1+\gamma_0 s}\frac{1}{1+A_p^{k,j}s}d\theta \end{aligned} \tag{13}$$

그러므로 모든 오류 사건을 고려한 최종적인 평균 심벌 오류율은 다음과 같다.

$$P_{ASER}=\sum_{p=1}^{2^R}\Pr\{E^p\}P_{ASER}^{p} \tag{14}$$

3.3 평균 비트 오류율

식 (11-1)과 (11-2)로부터 p 번째 오류 사건에 대한 평균 비트 오류율 다음과 같이 유도된다[8].

$$\begin{aligned} P_e^{p}|_{L_p>0} &= \alpha\int_{0}^{\infty}Q(\sqrt{\beta\gamma})f_{\gamma^p}(\gamma)|_{L_p>0}d\gamma \\ &= \sum_{k=1}^{L_p}(-1)^{k+1}\sum_{j=1}^{N_{p,k}}G_2 \end{aligned} \tag{15-1}$$

$$P_e^{p}|_{L_p=0}=\alpha\int_{0}^{\infty}Q(\sqrt{\beta\gamma})f_{\gamma_0}(\gamma)d\gamma=\frac{\alpha}{2}\left(1-\sqrt{\frac{\beta\overline{\gamma_0}/2}{\beta\overline{\gamma_0}/2+1}}\right) \tag{15-2}$$

여기서 $Q(\sqrt{2x})=\int_{\sqrt{2x}}^{\infty}1/\sqrt{2\pi}\exp(-t^2/2)dt$이고

$$G_2=\begin{cases}\dfrac{\overline{\gamma_0}}{\overline{\gamma_0}-A_p^{k,j}}\dfrac{\alpha}{2}\left(1-\sqrt{\dfrac{\beta\overline{\gamma_0}/2}{\beta\overline{\gamma_0}/2+1}}\right) \\ +\dfrac{A_p^{k,j}}{A_p^{k,j}-\overline{\gamma_0}}\dfrac{\alpha}{2}\left(1-\sqrt{\dfrac{\beta A_p^{k,j}/2}{\beta A_p^{k,j}/2+1}}\right), & \overline{\gamma_0}\neq A_p^{k,j} \\ \alpha\left(\dfrac{1}{2}-\dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{\beta\overline{\gamma_0}/2}{\beta\overline{\gamma_0}/2+1}}\right)^2 \\ \times\sum_{n=0}^{1}\binom{n+1}{n}\left(\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{2}\sqrt{\dfrac{\beta\overline{\gamma_0}/2}{\beta\overline{\gamma_0}/2+1}}\right)^n, & \overline{\gamma_0}=A_p^{k,j}\end{cases}$$

이다. 또한 α 및 β는 변조 기법에 따른 상수로 BPSK의 경우 $\alpha=1$이고 $\beta=2$이고 이에 대한 평균 비트 오류율은 모든 오류 사건을 고려할 때 다음과 같다.

$$P_e=\sum_{p=1}^{2^R}\Pr\{E^p\}P_e^{p} \tag{15-3}$$

여기서 다양한 변조 기법에 대한 α 및 β 값을 사용함으로써 평균 비트 오류율을 얻을 수 있음을 강조한다.

3.4 누락 확률

p 번째 오류 사건의 누락 확률(Outage Probability)을 채널 상호 정보(channel mutual information : I)가 요구되는 전송율(T)이하가 되는 $I=\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^p)\le T$의 사건 확률로 정의하면 다음과 같이 표현할 수 있다[5].

$$P_{OUT}^{p}=\Pr\left\{\frac{1}{2}\log_2(1+\gamma^p)\le T\right\} \tag{16-1}$$

또한 식 (11-1)과 (11-2)로부터 다음을 얻는다.

$$P_{OUT}^{p}=\Pr\{\gamma^p\le 2^{2T}-1\}=F_{\gamma^p}(2^{2T}-1) \tag{16-2}$$

그러므로 모든 오류 사건을 고려한 최종적인 누락 확률은 다음과 같다.

$$P_{OUT}=\sum_{p=1}^{2^R}\Pr\{E^p\}P_{OUT}^{p} \tag{17}$$

3.5 채널 용량

섀논의 채널 용량은 획득 가능한 전송율의 최대치를 나타내는 중요한 성능 기준이 된다[8]. p 번째 오류 사건의 평균 채널 용량은 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{C^p}=\frac{W}{2}\int_{0}^{\infty}\log_2(1+\gamma)f_{\gamma^p}(\gamma)d\gamma \tag{18}$$

여기서 W는 신호의 전송 대역폭을 의미한다. 식 (11-1) 혹은 (11-2)를 식 (18)에 대입하면 다음을 얻는다.

$$\overline{C^p}|_{L_p>0}=\frac{W}{2\ln(2)}\sum_{k=1}^{L_p}(-1)^{k+1}\sum_{j=1}^{N_{p,k}}G_3 \tag{19-1}$$

$$G_3=\begin{cases}\dfrac{\overline{\gamma_0}e^{1/\overline{\gamma_0}}E_1(1/\overline{\gamma_0})}{\overline{\gamma_0}-A_p^{k,j}}+\dfrac{A_p^{k,j}e^{1/A_p^{k,j}}E_1(1/A_p^{k,j})}{A_p^{k,j}-\overline{\gamma_0}}, & \overline{\gamma_0}\neq A_p^{k,j} \\ 1+\dfrac{\overline{\gamma_0}-1}{\overline{\gamma_0}}e^{1/\overline{\gamma_0}}E_1(1/\overline{\gamma_0}), & \overline{\gamma_0}=A_p^{k,j}\end{cases}$$

$$\overline{C^p}|_{L_p=0}=\frac{W}{2\ln(2)}e^{1/\overline{\gamma_0}}E_1(1/\overline{\gamma_0}) \tag{19-2}$$

여기서 $E_1=\int_{x}^{\infty}\frac{\exp(-t)}{t}dt$ 이다[5]. 따라서 릴레이 단의 모든 오류 사건을 고려할 때 채널 용량은 다음과 같다.

$$\overline{C}=\sum_{p=1}^{2^R}\Pr\{E^p\}\overline{C^p} \tag{20}$$

상기 식들을 통하여 다음의 사실을 확인할 수 있다. R개의 릴레이 중 모든 릴레이 단에서 오류가 발생한 $L_p=0$의 경우 릴레이가 선택되지 않고 재 생성된 심벌을 전송하지 않는다. 이에 따라 다이버시티 효과를 얻지 못한다. 반면 $L_p>0$의 경우 L_p개의 릴레이 중 가장 좋은 채널의 릴레이를 선택 전송함으로써 릴레이 시스템의 다이버시티는 선택 다이버시티로 나타남을 알 수 있다. 또한 이러한 다이버시티 효과는 각 오류 사건의 발생 확률값과 관련되어 있다.

즉, 주어진 릴레이의 복호결과 오류가 발생한 경우$(e_r^p=1)$에는 $\overline{e_r^p}\,\gamma_r=0$가 되어 다이버시티를 얻지 못하게 되고 복호결과 오류가 없는 경우$(e_r^p=0)$에는 $\overline{e_r^p}\,\gamma_r=\gamma_r$가 되어 선택에 따른 다이버시티 효과를 얻게 됨을 수식적으로 확인할 수 있다. 또한 앞 절에서 유도된 평균 오류율, 누락 확률 및 채널 용량은 IID(Independent and Identical distributed) 및 INID(Independent and Non-identical distributed) 레일리 페이딩 채널 조건을 포함하는 일반적인 형태임을 알 수 있다.

Ⅳ. 성능분석 및 모의실험 결과

본 장에서는 제안하는 성능분석 기법의 정확성을 메트랩 프로그램을 이용한 Monte-Carlo 모의실험을 통해 검증하고 OADF 릴레이 시스템의 성능을 다른 릴레이 시스템들과 비교한다. 공정한 비교를 위하여 다중 릴레이 시스템에서 $E_s=\sum_{r=1}^{R}E_r$을 가정하며 선택적 릴레이 기법(OAF, OADF)에서는 i 번째 릴레이가 선택된 경우 $E_s=E_i$를 가정한다. 또한 릴레이는 S와 D 사이에 균일하게 위치한다고 가정하여 S와 D 사이에 거리에 대한 S와 r 번째 릴레이의 상대적 거리를 $\alpha_r=r/(R+1)$로 정의한다. 그리고 릴레이의 위치에 따른 경로 손실을 반영하여 $\overline{\gamma_{R+r}}=\overline{\gamma_0}/\alpha_r^{\mu}$, $\overline{\gamma_r}=\overline{\gamma_0}/(1-\alpha_r)^{\mu}$, 및 $\mu=3.76$로 정의한다. SNR은 S-D 링크의 평균 SNR $\overline{\gamma_0}$로 정의하고 변조방식으로는 BPSK를 가정한다. 그림 2~4에서 'Sim'은 모의실험 결과를 나타낸다.

그림 2에서는 다양한 릴레이 기법들의 SNR에 따른 평균 오류율 성능을 비교하고 있다. 또한 그림 3에서는 SNR에 따른 평균 누락 확률 성능을 비교하고 있다. 사용되는 직교 채널의 수를 갖게 하기 위하여 AF 및 ADF에서는 $R=1$을 가정하였다. 그림을 통하여 선택적 기법 즉, OAF 및 OADF 기법은 같은 직교 채널을 사용하면서 다이버시티 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 10^{-4}의 평균 오류율 및 누락 확률을 기준으로 할 때 OADF 기법은 OAF 기법에 비해 3dB 이상의 SNR 이득을 얻는다.

그림 4에서는 그림 2 및 3과 동일 환경에서의 정규화된 채널 용량($\overline{C}/W$) 성능을 SNR에 따라 비교하고 있다. OAF 기법의 경우 채널 용량 성능은 ADF 기법보다 열화되는 반면에 OADF 기법은 채널 용량 측면에서도 다른 모든 기법에 비해 우수한 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 또한 모든 그림에서 제안된 성능분석 결과와 모의실험 결과가 일치하고 있음을 알 수 있다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 OADF 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능분석 기법을 레일리 페이딩 채널에 대하여 제안하였다. 즉, 합 기호의 개수 및 그 영역이 구체화되지 못한 기존의 성능분석 결과보다 일반적인 형태의 성능분석 결과를 릴레이들의 복호 오류 사건을 기반으로 집합 연산의 방법을 사용하여 제시하였다. 제안된 성능분석 기법의 정확성은 모의실험을 통하여 검증되었다. 성능분석 및 모의실험을 통하여 OADF 기법이 평균 오류 확률, 누락 확률 및 채널 용량 측면에서 성능 향상 정도가 우수함을 확인하였다.

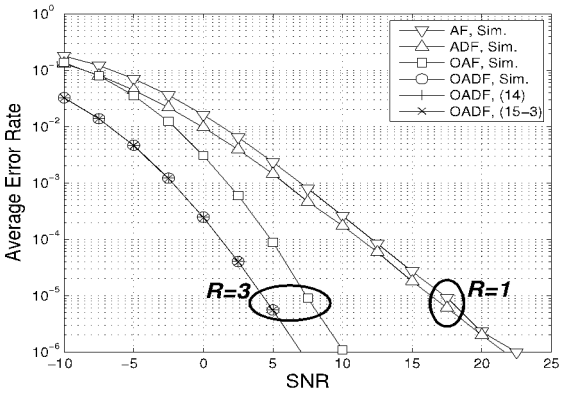


그림 2. SNR에 따른 평균 오류율 성능 비교.

Fig. 2. Average Error Rate comparison with respect to SNR.

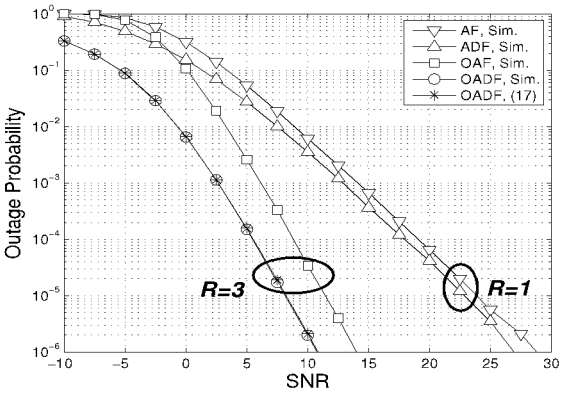


그림 3. SNR에 따른 누락 비교.

Fig. 3. Outage Probability comparison with respect to SNR.

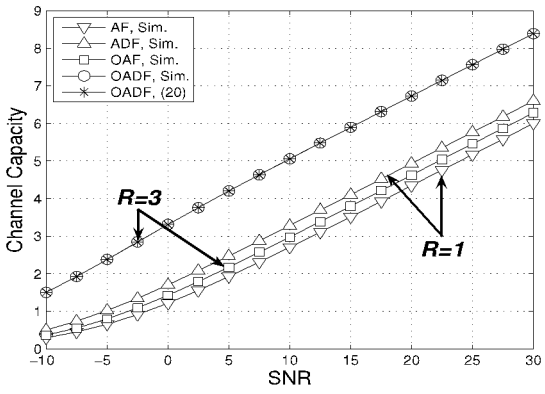


그림 4. SNR에 따른 채널 용량 비교.

Fig. 4. Channel Capacity comparison with respect to SNR.

참 고 문 헌

[1] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "End-to-End Performance of Transmission Systems with Relays Over Rayleigh-Fading Channels," IEEE Trans. on Wireless Comm., vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003.

[2] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "Harmonic Mean and End-to-End Performance of Transmission Systems With Relays," IEEE Trans. on Comm., vol. 52, no. 1, pp. 130-135, Jan. 2004.

[3] Jemin Lee, Sungsoo Park, Hano Wang, and Daesik Hong, "QoS-guaranteed Transmission Scheme Selection for OFDMA Multi-hop Cellular Networks", IEEE ICC'07, pp. 4587 - 4591, 24-28 June 2007.

[4] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 49, pp. 2415-2425, Nov. 2003.

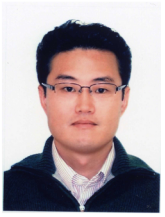
[5] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, "Exact Error Probability and Channel Capacity of the Best-Relay Cooperative Diversity Networks," IEEE Signal Process. Lett., vol.16, no.12, pp. 1051-1054, Dec. 2009.

[6] G. C. Alexandropoulos, A. Papadogiannis, and K. Berberidis, "Performance Analysis of Cooperative Networks With Relay Selection Over Nakagami-m Fading Channels," IEEE Signal Process. Lett., vol.17, no.5, pp. 441-444, May 2010.

[7] Yinman Lee, Ming-Hung Tsai, and Sok-Ian Sou, "Performance of Decode-and-Forward Cooperative Communications with Multiple Dual-Hop Relays over Nakagami-m Fading Channels," IEEE Trans. on Wireless Commun., vol.8, no.6, pp.2853-2859, June 2009.

[8] John G. Proakis, Digital Communications, New York: Gaw-Hill, 1995.

[9] Marvin K. Simon and Mohamed-Slim Alouini, Digital Communication over Fading Channels, John Wiley & Sons, 2000.



고 균 병(Kyun-Byoung Ko)

정 회 원

1997년 2월 연세대 전자공학과(공학사)
1999년 9월 연세대 전기전자공학과(공학석사)
2004년 2월 연세대 전기전자공학과(공학박사)
2004년 3월 ~ 2007년 2월 삼성전자 통신연구소

2007년 3월 ~ 현재 국립충주대학교 제어계측공학과, 조교수
※주관심분야 : 이동통신, MIMO, 통신 신호처리

서 정 태(Jeong-Tae Seo)

정 회 원

1985년 2월 연세대 전자공학과(공학사)
1987년 2월 연세대 전자공학과(공학석사)
1995년 2월 연세대 전자공학과(공학박사)
1988년 ~ 1990년 삼성전자 주임연구원

1995년 ~ 현재 국립충주대학교 제어계측공학과, 교수
※주관심분야 : 음성부호화, 영상 부호화, 통신 신호처리