논문 2011-48TC-8-1

레일리 페이딩 채널에 대한 이중 홉 증폭 후 전달 릴레이 시스템의 새로운 분석 기법

(New Analytical Approach for Dual-hop AF Relay systems over Rayleigh Fading Channels)

고 균 병*, 서 정 태**

(Kyun-Byoung Ko and Jeong-Tae Seo)

요 약

본 논문에서는 이중 홉 증폭 후 전달(AF: Amplify-and-Forward) 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능 분석 기법을 레일리 페이딩 채널에 대하여 제안한다. 기존의 분석 기법들에서는 S-R-D(Source-Relay-Destination) 링크의 수신 신호 대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)에 대한 누적 분포 함수(CDF: Cumulative Distribution Function) 혹은 확률 밀도 함수 (PDF: Probability Density Function)로부터 모멘트 발생 함수(MGF: Moment Generating Function)를 유도한 후 평균 심벌 오류율을 유도된 MGF를 이용하여 표현하였다. 본 논문에서는 기존의 분석과 다른 새로운 접근법을 제안한다. 즉, S-R(Source-Relay) 링크 및 R-D(Relay-Destination) 링크의 PDF들로부터 S-R-D 링크에 대한 MGF를 직접 유도한다. 그리고 새롭게 유도된 MGF을 기존의 연구들에서 제시한 형태와 비교 분석한다. 또한 제안된 성능분석 기법의 정확성은 모의실험을 통하여 검증한다. 이를 통하여 제안된 분석 기법이 이중 홉 증폭 후 전달 릴레이 시스템에 대한 새로운 해를 제시함을 확인한다.

Abstract

In this paper, another analytical approach for dual-hop amplify-and-forward(AF) relay systems is proposed over Rayleigh fading channels. Previous approaches derived the moment generating function(MGF) by using the cumulative distribution function(CDF) or probability density function(PDF) of the received signal-to-noise ratio(SNR) for source-relay-destination(S-R-D) link. Then, the average symbol error rate is expressed based on derived MGFs. In this paper, another new approach is proposed. It means that the MGF is directly derived by utilizing PDFs of both source-relay(S-R) and relay-destination(R-D) links. Additionary, the newly derived MGF is compared and analyzed with previous ones. Furthermore, simulation results are presented to validate the accuracy of proposed analytical expression. Based on this, it is confirmed that the proposed analytical approach can be a another solution for dual-hop AF relay systems.

Keywords : dual-hop AF relay, Rayleigh fading channels, CDF, PDF, MGF

Ⅰ. 서 론

페이딩 채널에 대한 영향의 극복은 이동통신 시스템에서 항상 중요한 과제 중에 하나이며, 그 중에서 다이버시티 기법을 사용하는 것은 효과적으로 페이딩 채널의 영향을 극복하는 무선통신 방법으로 널리 사용되고 있다. 그 중에서도 공간 다이버시티 효과를 얻기 위한 방법으로 Source와 Destination 사이에 다수의 릴레이(Relay)를 사용하는 협력 통신 기법에 관한 연구들이 광범위하게 수행되어 왔다[1~5]. 또한 무선통신에서 릴레이 시스템은 송신단에서 큰 파워를 사용하지 않고도 통화 영역을 넓힐 수 있는 장점을 갖고 있다[1~2].

이러한 협력 통신은 증폭 후 전송(AF: Amplify and

* 평생회원, ** 정회원-교신저자, 충주대학교 제어계측공학과
(Control and Instrumentation Engineering at Chungju National University)

※ “이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0002650).”

접수일자: 2011년4월21일, 수정완료일: 2011년8월17일

Forward)과 복호 후 전송(DF: Decoded and Forward)의 두 가지 프로토콜로 크게 분류 할 수 있다. AF 프로토콜은 Relay가 Source로부터 수신한 신호를 증폭하여 재전송하는 방식으로 복잡도가 작지만 노이즈가 증폭되는 단점이 있고 DF는 Relay가 Source로부터 수신한 신호를 복호 후 재생성하여 전송하는 방식으로 복잡도가 크지만 Relay가 복호에 성공한 경우에는 AF에 비하여 향상된 성능을 나타낸다[3~4]. 기존의 Relay 기법이 갖는 가장 큰 단점으로는 직교 채널을 통한 전송으로 야기되는 주파수 효율의 손실이 있고 이를 해결하기 위한 연구들도 진행되고 있는 상황이다[5~6].

특히 AF 릴레이 시스템의 성능 분석에 관한 연구들에서는 S-R-D(Source-Relay-Destination) 링크의 수신 신호 대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)를 나타내는 확률 변수의 누적 분포 함수(CDF: Cumulative Distribution Function) 혹은 확률 밀도 함수 (PDF: Probability Density Function)로부터 모멘트 발생 함수(MGF: Moment Generating Function)를 유도한다. 그리고 유도된 MGF를 이용하여 평균 심벌 오류율을 표현하였다[2, 7]. 이러한 기존의 분석에서는 가장 큰 기여도는 S-R(Source-Relay) 및 R-D(Relay-Destination) 링크의 수신 SNR들의 조화 평균(Harmonic Mean)으로 주어지는 S-R-D 링크에 대한 확률 변수의 MGF를 닫혀진 형태로 유도함으로써 정확한 AF 릴레이의 평균 심벌 오류율을 유도함에 있다. 그러나 S-R-D 링크의 수신 SNR을 나타내는 확률 변수 자체의 CDF 혹은 PDF를 유도함으로 인해 분석 과정에 대한 난해함이 야기된다[1~2, 7].

본 논문에서는 이러한 난해함을 회피할 수 있는 새로운 접근법을 제안하도록 한다. 즉, S-R 및 R-D 링크의 PDF들로부터 S-R-D 링크에 대한 MGF를 직접 유도한다. 그리고 새롭게 유도된 MGF을 기존의 연구들에서 제시한 형태와 비교 분석한다. 또한 제안된 성능분석 기법의 정확성은 모의실험을 통하여 검증한다. 이를 통하여 제안된 분석 기법이 이중 홉 증폭 후 전달 릴레이 시스템의 평균 오류율에 대한 새로운 해를 제시함을 확인한다.

논문의 구성은 다음과 같다. Ⅱ장에서는 이중 홉 AF 릴레이 시스템 모델을 설명한다. Ⅲ장에서는 이중 홉 AF 릴레이 시스템의 평균 심벌 오류율에 대한 새로운 성능 분석을 수행하고 Ⅳ장에서는 제안된 성능 분석 결과를 기존의 분석 결과 및 모의실험 결과와 비교 분석하여 그 정확성을 검증한다. 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 이중 홉 AF 릴레이 시스템

그림 1은 이중 홉 AF 프로토콜을 사용하는 릴레이 시스템 블록도를 나타낸다[2]. 그림에서 S(Source)는 정보를 전송하고자하는 송신 노드를, D(Destination)는 최종 수신 노드를, R(Relay)은 릴레이 노드들을 각각 나타낸다. AF 릴레이 시스템에서는 R 개의 릴레이가 수신된 신호를 증폭하여 재전송하게 된다. 따라서 총 $R+1$개의 직교채널이 필요하다. 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 i 번째 릴레이에 대한 각 링크의 수신신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_h &= h\,s + n_h \\ y_{f_i} &= f_i\,s + n_{f_i} \\ y_{g_i} &= g_i\,G_{AF_i} y_{f_i} + n_{g_i} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 h, f_i 및 g_i는 각각 S-D, i 번째 S-R 및 R-D 링크의 채널 이득을 나타낸다. 그리고 각 링크의 채널 이득은 상호 독립적이고 크기가 Rayleigh 분포를 갖는 랜덤 변수로 가정한다. 또한 n_h, n_{f_i} 및 n_{g_i}는 각 링크 채널에 대한 부가 백색 가우시안 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 만족한다. 또한 i 번째 릴레이의 R-D 링크의 증폭이득을 S-R 링크의 잡음 성분을 무시할 때 $G_{AF_i}=\sqrt{1/|h|^2}$로 정의할 수 있다[2]. 이러한 가정은 AF

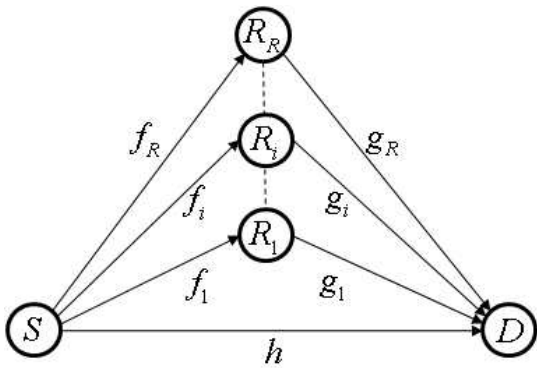


그림 1. AF Relay 기법의 블록도
Fig. 1. Block Diagram of AF Relay schemes.

릴레이 시스템의 성능 분석에서 광범위하게 사용된 것으로 i 번째 S-R-D 링크의 수신 SNR을 $\gamma_{AF_i}=\frac{\gamma_{f_i}\gamma_{g_i}}{\gamma_{f_i}+\gamma_{g_i}}$로 표현할 수 있도록 한다[1~2, 7]. 따라서 각 링크에 대한 수신 SNR은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\gamma_h &= |h|^2/\sigma^2 \\ \gamma_{f_i} &= |f_i|^2/\sigma^2 \\ \gamma_{g_i} &= |g_i|^2/\sigma^2\end{aligned} \tag{2}$$

그리고 각 링크의 평균 SNR은 $E[\gamma_h]=\overline{\gamma_h}$, $E[\gamma_{f_i}]=\overline{\gamma_{f_i}}$ 및 $E[\gamma_{g_i}]=\overline{\gamma_{g_i}}$로 정의할 때 레일리 페이딩 채널에 대해 순시 SNR을 나타내는 확률 변수들의 PDF는 각각 $f_{\gamma_h}(\gamma)=1/\overline{\gamma_h}\exp\left(-\gamma/\overline{\gamma_h}\right)$, $f_{\gamma_{f_i}}(\gamma)=1/\overline{\gamma_{f_i}}\exp\left(-\gamma/\overline{\gamma_{f_i}}\right)$ 및 $f_{\gamma_{g_i}}(\gamma)=1/\overline{\gamma_{g_i}}\exp\left(-\gamma/\overline{\gamma_{g_i}}\right)$로 표현된다[8].

Ⅲ. 이중 홉 AF 릴레이 시스템 성능 분석

릴레이 시스템의 가장 큰 장점은 릴레이 노드들이 직교하는 전송 채널(혹은 시간 슬롯)을 할당받아 전송함으로 인한 다이버시티 획득이다. 이러한 장점은 릴레이 개수와 비례하는 직교하는 전송 채널을 통해 얻어지며 이는 주파수 효율과 상충관계(Trade-Off)가 있다고 할 수 있다. 참고문헌 [2]와 [7]에서는 AF 릴레이 시스템의 평율 심벌 오류율 성능을 수신 순시 SNR에 대한 MGF을 이용하여 표현함으로써 이러한 다이버시티 이득에 의한 성능 향상을 검증할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 기존의 연구들과는 다른 접근법을 통하여 MGF를 유도함으로써 AF 릴레이 시스템의 평균 심벌 오류율에 대한 새로운 성능 분석기법을 제안한다.

1. 조건부 심벌 오류율

AF 릴레이 시스템의 수신 노드에서 MRC(Maximum Ratio Combining) 기법의 사용을 가정할 때 수신 신호의 순시 SNR은 다음과 같다[2].

$$\gamma_{tot}=\gamma_h+\sum_{i=1}^{R}\gamma_{AF_i}=\gamma_h+\sum_{i=1}^{R}\frac{\gamma_{f_i}\gamma_{g_i}}{\gamma_{f_i}+\gamma_{g_i}} \tag{3}$$

그리고 M-ary Phase Shift Keying(MPSK) 심벌에 대한 조건부 오류율은 식 (3)으로부터 다음과 같이 표현된다[9].

$$\begin{aligned}&P_S\left(\gamma_h,\{\gamma_{AF_i}\}\right)\\ &=\frac{1}{\pi}\int_0^{(M-1)\pi/M}\exp\left(-\gamma_{tot}s\right)d\theta\\ &=\frac{1}{\pi}\int_0^{(M-1)\pi/M}\exp\left(-\gamma_h s\right)\prod_{i=1}^{R}\exp\left(-\gamma_{AF_i}s\right)d\theta\end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $s=g_{PSK}/\sin^2\theta$이고 $g_{PSK}=\sin^2(\pi/M)$이다.

2. 평균 심벌 오류율

식 (4)를 주어진 확률 변수 γ_h 및 $\{\gamma_{AF_i}\}$에 대해 평균을 취하여 평균 심벌 오류율을 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned}P_S&=\frac{1}{\pi}\int_0^{(M-1)\pi/M}E\left[e^{-\gamma_h s}\right]\prod_{i=1}^{R}E\left[e^{-\gamma_{AF_i}s}\right]d\theta\\ &=\frac{1}{\pi}\int_0^{(M-1)\pi/M}M_{\gamma_h}(s)\prod_{i=1}^{R}M_{\gamma_{AF_i}}(s)\,d\theta\end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $M_{\gamma_h}(s)$는 확률 변수 γ_h의 MGF로 다음과 같다[8~9].

$$M_{\gamma_h}(s)=E\left[e^{-\gamma_h s}\right]=\int_0^{\infty}e^{-\gamma s}f_{\gamma_h}(\gamma)d\gamma=\frac{1}{1+s\overline{\gamma_h}} \tag{6}$$

그리고 $M_{\gamma_{AF_i}}(s)$는 확률 변수 γ_{AF_i}의 MGF로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_{\gamma_{AF_i}}(s)=E\left[e^{-\gamma_{AF_i}s}\right]=\int_0^{\infty}e^{-\gamma s}f_{\gamma_{AF_i}}(\gamma)d\gamma \tag{7}$$

참고문헌 [2]와 [7]의 기존 성능분석에서는 식 (7)로 표현되는 MGF를 유도하기 위하여 γ_{AF_i}의 PDF 혹은 CDF를 직접 유도하는 접근법을 사용하였기 때문에 그 분석 및 유도과정이 난해하다고 할 수 있다.

3. γ_{AF_i}의 MGF에 대한 새로운 표현

본 논문에서는 식 (7)로 표현되는 $M_{\gamma_{AF_i}}(s)$를 유도하는 새로운 분석 기법을 제안하고 그 정확성을 기존의 분석 방법들과 비교 분석하고자 한다. 이를 위하여 식 (7)을 다음과 같이 표현하도록 한다.

$$\begin{aligned}M_{\gamma_{AF_i}}(s)&=E\left[e^{-\gamma_{AF_i}s}\right]\\ &=\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}e^{-\frac{xy}{x+y}s}f_{\gamma_{f_i}}(x)f_{\gamma_{g_i}}(y)dxdy\end{aligned}$$

상기 식의 적분을 유도하는 것은 확률 변수 γ_{f_i}와 γ_{g_i}의 조화 평균으로 주어지는 확률 변수 γ_{AF_i}의 MGF를 확률 변수 γ_{f_i}와 γ_{g_i}의 PDF로부터 직접 유도함을 의미한다. 이

를 위하여 우선 식 (8)의 이중적분을 두 영역 즉, $x \geq y$ 및 $x < y$으로 나누어 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} M_{\gamma_{AF_i}}(s) &= M_1(s) + M_2(s) \\ M_1(s) &= \int_0^{\infty}\int_0^{x} e^{-\frac{xy}{x+y}s} \frac{1}{\overline{\gamma}_{f_i}} e^{-x/\overline{\gamma}_{f_i}} \frac{1}{\overline{\gamma}_{g_i}} e^{-x/\overline{\gamma}_{g_i}} dydx \\ M_2(s) &= \int_0^{\infty}\int_x^{\infty} e^{-\frac{xy}{x+y}s} \frac{1}{\overline{\gamma}_{f_i}} e^{-x/\overline{\gamma}_{f_i}} \frac{1}{\overline{\gamma}_{g_i}} e^{-x/\overline{\gamma}_{g_i}} dydx \end{aligned} \quad (9)$$

다음으로 $M_1(s)$의 적분 유도를 위하여 $x \geq y$인 영역에 대해 $x = r\cos(\phi)$ 및 $y = r\sin(\phi)$로 치환하여 다음을 얻는다.

$$M_1(s) = \frac{1}{\overline{\gamma}_{f_i}} \frac{1}{\overline{\gamma}_{g_i}} \int_0^{\pi/4}\int_0^{\infty} r\exp(-A_1 r) dr d\phi \quad (10\text{-}1)$$

여기서 $A_1 = \dfrac{\cos(\phi)\sin(\phi)}{\cos(\phi)+\sin(\phi)} s + \dfrac{\cos(\phi)}{\overline{\gamma}_{f_i}} + \dfrac{\sin(\phi)}{\overline{\gamma}_{g_i}}$ 이다. 그리고 적분 영역 $x \geq y$에서는 항상 $A_1 > 0$을 만족하므로 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} M_1(s) &= \frac{1}{\overline{\gamma}_{f_i}} \frac{1}{\overline{\gamma}_{g_i}} \int_0^{\pi/4} A_1^{-2} d\phi \\ &= 2\overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} \int_0^{\pi/2} \frac{1+\sin(\phi)}{\left(a + b_1\cos(\phi) + c\sin(\phi)\right)^2} d\phi \end{aligned} \quad (10\text{-}2)$$

여기서 $a = \overline{\gamma}_{f_i} + \overline{\gamma}_{g_i}$, $b_1 = \overline{\gamma}_{g_i} - \overline{\gamma}_{f_i}$ 및 $c = \overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} s + \overline{\gamma}_{f_i} + \overline{\gamma}_{g_i}$ 이고 $a^2 < b_1^2 + c^2$을 만족한다. 참고문헌 [10]의 식 (2.558)을 이용하여 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} &M_1(s) \\ &= 2\overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} \left(\frac{2b_1}{\Delta(a+c)} + \frac{-a-b_1+c}{\Delta(a+b_1)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{-a+c}{\Delta^{3/2}} \left(\ln\frac{a-b_1+c-\sqrt{\Delta}}{a-b_1+c+\sqrt{\Delta}} - \ln\frac{c-\sqrt{\Delta}}{c+\sqrt{\Delta}} \right) \right) \end{aligned} \quad (10\text{-}3)$$

여기서 $\Delta = b_1^2 + c^2 - a^2$ 이다. 또한 a, b_1, c 및 Δ에서 릴레이를 나타내는 i는 편의상 생략되었다.

또한 $M_1(s)$의 유도 과정과 유사한 방법으로 적분 영역 $x < y$에 대한 $M_2(s)$를 유도한다. 즉, 식 (9)의 $M_2(s)$에서 $x = r\sin(\phi)$ 및 $y = r\cos(\phi)$로 치환하여 다음을 얻는다.

$$M_2(s) = \frac{1}{\overline{\gamma}_{f_i}} \frac{1}{\overline{\gamma}_{g_i}} \int_0^{\pi/4}\int_0^{\infty} r\exp(-A_2 r) dr d\phi \quad (11\text{-}1)$$

여기서 $A_2 = \dfrac{\cos(\phi)\sin(\phi)}{\cos(\phi)+\sin(\phi)} s + \dfrac{\sin(\phi)}{\overline{\gamma}_{f_i}} + \dfrac{\cos(\phi)}{\overline{\gamma}_{g_i}}$ 이고 적분 영역 $x < y$에서 $A_2 > 0$을 만족하므로 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} M_2(s) &= \frac{1}{\overline{\gamma}_{f_i}} \frac{1}{\overline{\gamma}_{g_i}} \int_0^{\pi/4} A_2^{-2} d\phi \\ &= 2\overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} \int_0^{\pi/2} \frac{1+\sin(\phi)}{\left(a + b_2\cos(\phi) + c\sin(\phi)\right)^2} d\phi \end{aligned} \quad (11\text{-}2)$$

여기서 $a = \overline{\gamma}_{f_i} + \overline{\gamma}_{g_i}$, $b_2 = \overline{\gamma}_{f_i} - \overline{\gamma}_{g_i}$ 및 $c = \overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} s + \overline{\gamma}_{f_i} + \overline{\gamma}_{g_i}$ 이고 $a^2 < b_2^2 + c^2$을 만족한다. 참고문헌 [10]의 식 (2.558)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} &M_2(s) \\ &= 2\overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} \left(\frac{2b_2}{\Delta(a+c)} + \frac{-a-b_2+c}{\Delta(a+b_2)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{-a+c}{\Delta^{3/2}} \left(\ln\frac{a-b_2+c-\sqrt{\Delta}}{a-b_2+c+\sqrt{\Delta}} - \ln\frac{c-\sqrt{\Delta}}{c+\sqrt{\Delta}} \right) \right) \end{aligned} \quad (11\text{-}3)$$

여기서 $\Delta = b_2^2 + c^2 - a^2$ 이고 또한 a, b, c 및 Δ에서 릴레이를 나타내는 i는 편의상 생략되었다.

최종적으로 식 (9), (10-3), (11-3) 및 참고문헌 [10]의 식 (2.143) 즉, $\dfrac{1}{2}\ln\dfrac{1+x}{1-x} = \arctan h(x)$, $-1 < x < 1$를 이용하여 식 (8)은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} &M_{\gamma_{AF_i}}(s) \\ &= \overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} \left(\frac{c-2\overline{\gamma}_{f_i}}{\Delta\overline{\gamma}_{f_i}} + \frac{c-2\overline{\gamma}_{g_i}}{\Delta\overline{\gamma}_{g_i}} + \frac{2\overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} s}{\Delta^{3/2}} \left(2\arctan h\frac{\sqrt{\Delta}}{c} \right) \right) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $c = \overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i} s + \overline{\gamma}_{f_i} + \overline{\gamma}_{g_i}$ 및 $\Delta = c^2 - \overline{\gamma}_{f_i}\overline{\gamma}_{g_i}$이고 편의상 릴레이를 나타내는 i는 생략한다. 본 논문에서 새롭게 유도된 식 (12)는 참고문헌 [2]의 식 (7)과 참고문헌 [7]의 식 (A.8)의 다른 표현이다.

마지막으로 식 (12)을 식 (5)에 대입함으로써 이중 홉 릴레이 시스템의 평균 심벌 오류율에 대한 또 다른 해를 얻을 수 있다.

Ⅳ. 모의실험 결과

본 장에서는 제안하는 성능분석 기법의 정확성을 기존의 분석 결과 및 모의실험 결과와의 비교를 통해 검

증하고 AF 릴레이 시스템의 성능을 다양한 릴레이 시스템과 비교한다. SNR은 S-D 링크의 평균 SNR $\overline{\gamma_0}$로 정의하고 S-D 링크의 송신 전력과 R-D 링크들 송신 전력 합이 같도록 $\overline{\gamma_0}=\sum_{i=1}^{R}\overline{\gamma_{g_i}}$로 가정하여 릴레이 시스템의 다이버시티 이득에 대한 공정한 비교를 수행한다. 또한 S와 D 사이에 거리에 대한 S와 i번째 릴레이의 상대적 거리를 α_i로 정의한다. 그리고 릴레이의 위치에 따른 경로 손실을 반영하여 $\overline{\gamma_{f_i}}=\overline{\gamma_0}/\alpha_i^{\mu}$, $\overline{\gamma_{g_i}}=\left(\overline{\gamma_0}/R\right)/(1-\alpha_i)^{\mu}$ 및 $\mu=3.76$로 정의한다.

그림 2에서는 릴레이의 위치 변화에 따른 평균 심벌 오류율 성능을 다양한 릴레이 개수에 대해 비교한다. 그림에서는 BPSK($M=2$), SNR=0dB 및 모든 릴레이는 동일하게 위치한다고 가정($\alpha_i=\alpha,\ i\in\{1,2,\cdots,R\}$)한다. 그림으로부터 새롭게 유도한 성능분석 결과가 다양한 릴레이 개수 및 릴레이 위치에 상관없이 참고문헌 [2] 및 [7]과 같은 결과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 성능 분석 결과가 모의실험과 정확이 일치함을 알 수 있다. 그림에서 0dB의 SNR 환경에서 S-D 링크는 10^{-1}이상의 평균 심벌 오류율로 열악한 성능을 나타내고 있다. 반면 릴레이 시스템은 릴레이 개수 증가에 따라 다이버시티 이득을 얻게 되고 이에 따른 성능 향상을 얻게 됨을 확인할 수 있다. 또한 릴레이 개수가 한 개 이상으로 늘어나게 되면 최적의 릴레이 위치는 S와 D의 중앙이

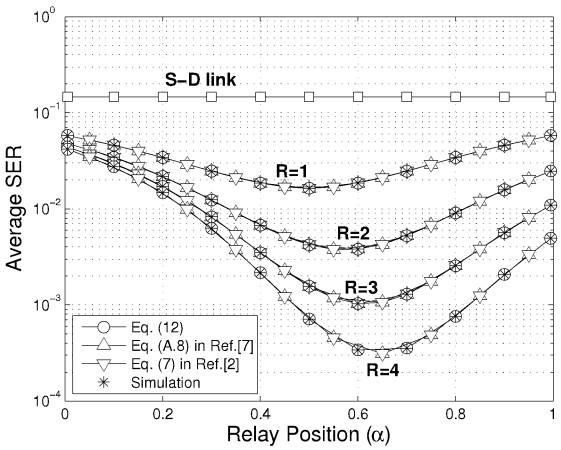


그림 2. 다양한 릴레이 개수에 대한 릴레이 위치 변화에 따른 평균 심벌 오류율 ($M=2$, SNR=0dB, $R\in\{1,2,3,4\}$)

Fig. 2. Averaged SER versus relay position with respect to different number of relays ($M=2$, SNR=0dB, $R\in\{1,2,3,4\}$).

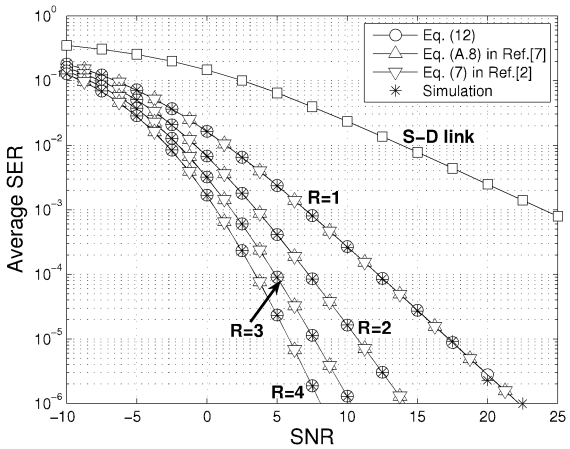


그림 3. 다양한 릴레이 개수에 대한 SNR 변화에 따른 평균 심벌 오류율($M=2, R\in\{1,2,3,4\}$)

Fig. 3. Averaged SER versus SNR with respect to different number of relays($M=2, R\in\{1,2,3,4\}$).

아니라 D쪽에 가까워지는 사실을 확인 할 수 있다.

그림 3에서는 SNR 변화에 따른 평균 심벌 오류율 성능을 다양한 릴레이 개수에 대해 비교하고 있다. 그림에서는 BPSK($M=2$) 및 릴레이들이 S와 D 사이에 균일하게 위치한다고 가정($\alpha_i=i/(R+1)$)한다. 그림은 본 논문의 성능분석 결과가 여러 릴레이 개수 및 SNR에 상관없이 모의실험 결과 그리고, 참고문헌 [2] 및 [7]의 분석 결과와 같다는 것을 나타내고 있다. 또한 경로 손실을 고려한 성능분석 결과는 릴레이 시스템이 릴레이 개수 증가에 따라 얻을 수 있는 성능 이득이 매우 크다는 사실을 명백히 설명하고 있다. 즉, S-D 링크의 SNR이 5dB인 경우 3개 이상의 릴레이를 사용함으로써 10^{-4} 이하의 평균 오류율 성능을 얻게 됨을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 이중 홉 AF 릴레이 시스템의 레일리 페이딩 채널에서의 평균 심벌 오류율에 대한 새로운 분석 기법을 제안하였다. 제안된 분석 기법에서는 S-R 링크 및 R-D 링크의 수신 SNR에 대한 PDF들을 기반으로 하여 S-R-D 링크의 수신 SNR의 MGF를 직접 유도할 수 있음을 보이고 평균 심벌 오류율에 대한 새로운 해를 제시하였다. 그리고 유도된 분석결과를 모의실험 결과 및 기존의 분석결과들과 비교하여 그 정확성을 검증하였다.

본 논문에서는 S-R 링크 및 R-D 링크의 수신 SNR

에 대한 PDF들로부터 직접 AF 릴레이 시스템의 평균 심벌 오류율을 유도할 수 있음으로 분석적으로 제시하였다. 이러한 분석기법은 선택적 AF(OAF: Opportunistic AF)[11] 릴레이 시스템에도 적용할 수 있다고 판단된다. 따라서 본 논문에서 제시한 분석 기법은 OAF 릴레이 시스템에 대한 보다 정확한 성능분석을 위한 도구로 활용될 수 있을 것이다.

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. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, Nov. 2003.

[2] P. A. Anghel and M. Kaveh, "Exact symbol error probability of a cooperative network in a Rayleigh-fading environment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 9, pp. 1416-1421, Sept. 2004.

[3] J. N. Laneman, D.N.C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory.*, vol. 50, no. 12, pp. 3063-3080, Dec. 2004.

[4] 오은성, 주형식, 한승엽, 홍대식, "릴레이 기반의 OFDMA 시스템에서 전송량 증대를 위한 간략화된 자원 할당 방법," *전자공학회논문지*, 제46권, TC편, 제9호, 24-30쪽, 2009년 9월.

[5] A. bletsas, H. Shin, M. Z. Win, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. of Selected Areas in Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.

[6] 민현기, 이성은, 홍대식, "증폭 후 전달 릴레이 시스템을 위한 송신 Maximum-Ratio-Combining과 릴레이 선택 다이버시티에 대한 Outage 확률 분석," *전자공학회논문지*, 제45권, TC편, 제2호, 13-18쪽, 2008년 2월.

[7] T. Q. Duong and H. J. Zepernick, "On the performance gain of hybrid decode -amplify-forward cooperative communications," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, article ID 479463, 10 pages, 2009.

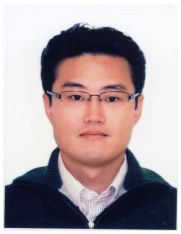
[8] John G. Proakis, *Digital Communication*. McGraw Hill, 1995.

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

[10] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*, Academic Press, San Diego, Calif, USA, 7th edition, 2007.

[11] B. Maham and A. Hjorungnes, "Performance analysis of amplify-and-forward opportunistic relaying in Rician fading," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 643-646, Aug. 2009.

저 자 소 개



고 균 병(평생회원)

1997년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.
1999년 연세대학교 전기전자공학 석사 졸업.
2004년 연세대학교 전기전자공학 석사 졸업.
2004년 3월～2007년 2월 삼성전자 통신연구소.
2007년 3월～현재 국립충주대학교 제어계측공학과.

<주관심분야 : 통신, 컴퓨터, 신호처리, 반도체>

서 정 태(정회원)-교신저자

1985년 연세대학교 전자공학과 학사 졸업.
1987년 연세대학교 전자공학과 석사 졸업.
1995년 연세대학교 전자공학과 박사 졸업.
1988년～1990년 삼성전자 주임연구원.
1995년～현재 국립충주대학교 제어계측공학과.

<주관심분야 : 이동통신, 신호처리>