

논문 2012-49TC-4-1

OAF 시스템의 정확한 심볼 오류 성능 분석

(Average SER Performance Analysis for Opportunistic Amplify-and-Forward Relay Systems)

남 상 호*, 고 균 병**, 홍 대 식***

(Sangho Nam, Kyunbyoung Ko, and Daesik Hong)

요 약

본 논문에서는 레일리 페이딩 환경에서 OAF (opportunistic amplify-and-forward) 릴레이 전송 기법의 정확한 성능을 제시하는 새로운 분석 기법에 대해서 알아본다. 이를 위해 집합 연산 기반의 선택될 확률을 활용한다. 이를 기반으로 OAF 릴레이 전송기법의 수정된 MGF(modified moment generating function)를 제안한다. 제안된 MGF 를 바탕으로 OAF 릴레이 전송 기법의 특성을 정확하게 표현해주는 M-ary Phase Shift Keying (MPSK) 심볼 오류 확률을 제안한다. 모의 실험 결과를 통해서 제안된 심볼 오류 확률의 정확함을 확인한다.

Abstract

This paper presents a method for obtaining an exact average symbol error rate (ASER) of M-ary Phase Shift Keying (MPSK) for opportunistic amplify-and-forward (OAF) relay systems over Rayleigh fading channels. This is based on the relay selection probability when a relay is selected as the best one with respect to the received signal-to-noise ratio. We then derive the modified moment generating function (MGF) for OAF relay systems by taking the given relay selection probability into consideration. Based on the modified MGF, we derive the exact ASER which accurately explicates OAF relay system characteristics. Our results confirm that the derived ASER provides a tight upper bound for OAF relay systems.

Keywords : ASER, opportunistic amplify-and-forward, Rayleigh fading channel.

I. 서 론

릴레이를 이용한 협력 시스템에서는 여러 개의 릴레이

이를 이용하여 공간 다이버시티를 얻을 수 있다. 이 때, 릴레이는 처리 과정에 따라 크게 두 가지 종류로 분류된다^[1~2]. 하나는 릴레이에서 수신된 송신단 (source)의 파형 자체를 재전송하는 증폭 후 전달 (amplify-and-forward, AF) 릴레이이고 다른 하나는 수신된 메시지를 검출하여 이를 다시 변조하여 전송하는 복호 후 전달 (decode-and-forward, DF) 릴레이이다.

AF 릴레이는 복잡도가 작지만 노이즈가 증폭되는 단점이 있고, DF 릴레이는 복잡도는 크지만 릴레이가 복호에 성공한 경우에는 AF 릴레이에 비하여 향상된 성능을 나타낸다. 이러한 기존 릴레이 전송 기법의 가장 큰 단점은 직교 채널을 통한 전송으로 야기되는 주파수 효율의 손실이다.

* 학생회원 LG-ERICSSON
(LG-ERICSSON)

** 평생회원, 한국교통대학교 제어계측공학과
(Korea National University of Transportation)

*** 평생회원-교신저자, 연세대학교 전기전자공학과
(Yonsei University)

※ 이 논문은 일부분 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2010-0018938) 일부분 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0002650).

접수일자: 2011년12월22일, 수정완료일: 2012년4월17일

이러한 문제점을 해결하기 위해서 기회 릴레이 (opportunistic relay) 전송 기법에 대한 연구가 진행되고 있다^[3~4]. 기회 릴레이 전송 기법에서는 두 개의 직교 채널만이 사용되는 데, 하나는 송신단과 수신단 (destination)의 직접 채널 (direct channel)이고 다른 하나는 최적의 중계 채널 (best relay channel)이다. 기회 AF 릴레이 (opportunistic AF relaying, OAF) 전송 기법과 기회 DF 릴레이 (opportunistic DF relaying) 전송 기법은 오수신 확률 (outage probability) 측면에서 시공간 부호 (space time coding)를 이용한 협력 시스템과 동일한 다이버시티 차수 (diversity order)를 얻을 수 있다^[5]. 최근에는 OAF 릴레이 전송 기법의 점근적 오류 성능 (asymptotic error performance)에 대해서 분석되었다^[6]. 또한, 비 균일 라이시안 페이딩 채널 (non-identical Rician fading channel)에서 OAF 릴레이 전송 기법의 근사 평균 심볼 오류 확률 (approximate average symbol error rate, ASER)이 제안되었다^[7].

기존 OAF 전송 기법에 관한 연구에서는 평균 수신 신호 대 잡음 비 (signal to noise power ratio, SNR)의 상계 (upper bound) 값을 이용하여 성능이 분석되었다^{[5][7]}. 정확한 평균 수신 SNR 대신 상계 값이 성능 분석에 사용되었을 때, SNR이 충분히 큰 구간에서는 성능 분석의 결과가 정확하다. 그러나, 그렇지 않은 구간에서는 성능 분석 결과의 정확성이 떨어지게 된다. 이러한 문제점은 AF 릴레이 전송 기법에서도 발생하게 되는데, 최근에 이러한 문제점을 해결한 AF 릴레이의 정확한 성능 분석 기법이 제안되었다^[8]. 그러나, 이는 다수 개의 릴레이가 존재하는 OAF 릴레이 전송 기법의 특성을 설명하는 데는 어려움이 있다.

또한, OAF 릴레이 전송 기법의 보다 정확한 성능 분석을 위해 집합 연산 기반의 분석이 제안되었다^[9]. 그러나, OAF 릴레이 전송 기법의 정확한 성능을 제시하지는 못했다. 특히, 릴레이의 개수가 늘어나게 되면 평균 수신 SNR이 작거나 크지 않은 구간에서는 성능 분석의 오차가 증가되게 된다^[5~7].

본 논문에서는 OAF 릴레이 전송 기법의 정확한 성능 분석을 위한 새로운 기법이 제안된다. 제안된 분석 기법에서는 OAF 릴레이 전송 기법의 SNR의 상계값이 아닌 정확한 SNR 값이 이용된다. 이를 위하여 집합 연산 기반의 릴레이 선택 확률을 사용한다^[9]. 이를 기반으로 OAF 릴레이 전송 기법의 새로운 모멘트 발생 함수 (moment generating function, MGF)가 제안된다. 이를

이용하여 OAF 릴레이 전송 기법의 정확한 성능이 제시된다.

II. OAF 릴레이 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 한 개의 송신 노드(S), R개의 릴레이 노드(R), 한 개의 수신 노드(D)가 존재하는 이중 홉 OAF 릴레이 시스템을 고려한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 i번째 릴레이에 대한 각 링크의 채널 이득은 S-D 링크는 h , S-R 링크는 f_i , R-D 링크는 g_i 로 표시된다. 이 때, 각 링크의 채널 이득인 h, f_i, g_i 는 i.n.i.d.(independent and non-identical distribution) 레일리 페이딩으로 모델링 한다. 또한, 모든 링크 채널에 대한 부가 백색 가우시안 복소 잡음 (additive white Gaussian complex noise, AWGN)은 평균은 0이고 분산은 σ^2 로 가정한다. 이를 이용하면 i번째 릴레이에 대한 각 링크의 순시 SNR은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\gamma_h &= |h|^2 E_s / \sigma^2, \\ \gamma_{f_i} &= |f_i|^2 E_s / \sigma^2, \\ \gamma_{g_i} &= |g_i|^2 E_i / \sigma^2,\end{aligned}\quad (1)$$

여기서, E_s 와 E_i 는 각각 송신 노드와 릴레이 노드의 평균 전송 파워이다. 그리고, 각 링크의 평균 SNR을 $E[\gamma_h] = \bar{\gamma}_h$, $E[\gamma_{f_i}] = \bar{\gamma}_{f_i}$, $E[\gamma_{g_i}] = \bar{\gamma}_{g_i}$ 로 정의할 때, 레일리 페이딩 채널에 대한 순시 SNR을 나타내는 확률 변수들의 확률 밀도 함수 (probability density function, PDF)는 각각 $f_{\gamma_h}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_h} \exp(-\frac{\gamma}{\gamma_h})$, $f_{\gamma_{f_i}}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_{f_i}}$

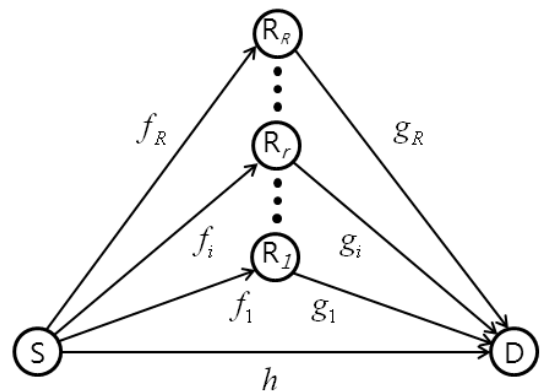


그림 1. OAF Relay 시스템의 블록도
Fig. 1. Block Diagram of OAF Relay Systems.

• $\exp(-\frac{\gamma}{\gamma_{f_i}})$, $f_{\gamma_{g_i}}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_{g_i}} \exp(-\frac{\gamma}{\gamma_{g_i}})$ 로 표현된다.

그리고 i 번째 릴레이의 R-D 링크의 증폭이득은 S-R 링크의 잡음 성분을 무시하여 $\sqrt{1/|f_i|^2}$ 로 가정하였다^[1,3]. 이와 같은 가정은 AF 릴레이 및 OAF 릴레이 전송 기법의 성능 분석에서 널리 사용되었다. 이를 이용하여 i 번째 릴레이의 S-R-D 링크의 수신 SNR은 $\gamma_{OAF_i} = \gamma_{f_i}\gamma_{g_i}/(\gamma_{f_i} + \gamma_{g_i})$ 로 표현된다^[3,7].

일반적으로 OAF 전송 기법에서는 두 단계로 데이터가 전송된다^[6-7,11]. 첫 번째 단계에서는 송신 노드로부터 모든 릴레이 노드와 수신 노드로 데이터가 전송된다. 두 번째 단계에서는 기회 릴레이 전송 방식이 사용된다. 이를 위해서 γ_{OAF_i} 값이 가장 큰 릴레이 노드가 선택되고 선택된 릴레이 노드를 통해서 소스로부터 받은 데이터가 재전송된다. 그러므로, OAF 전송 기법을 적용하게 되면 수신 노드에서의 최종 SNR은 다음과 같이 표현된다^[5].

$$\gamma_{OAF} = \gamma_h + \max_{i \in \{1, \dots, R\}} \{\gamma_{OAF_i}\} \quad (2)$$

기존 OAF 전송 기법의 성능 분석 연구에서는 $\max_{i \in \{1, \dots, R\}} \{\gamma_{OAF_i}\}$ 의 PDF가 간결한 형태로 정리되기 어렵기 때문에 γ_{OAF} 의 상계값 $\gamma_{OAF} \leq \gamma_h + \gamma_{\max}$ 의 PDF가 사용되었다^[5,7]. S-R 링크와 R-D 링크의 SNR 중 작은 값을 $\gamma_i = \min\{\gamma_{f_i}, \gamma_{g_i}\}$ 라 정의했을 때, γ_{\max} 는 γ_i 의 최대값 $\max\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_R\}$ 로 선택된다. 이 때, γ_i 의 PDF $f_{\gamma_i}(\gamma)$ 는 평균 SNR 값이 $E(\gamma_i) = \bar{\gamma}_i = (1/\bar{\gamma}_{f_i} + 1/\bar{\gamma}_{g_i})^{-1}$ 인 레일리 페이딩에 대한 순시 SNR을 나타내는 $\frac{1}{\gamma_i} \exp(-\frac{\gamma}{\gamma_i})$ 로 정의된다. 이렇게 정확한 γ_{OAF} 값 대신 상계값을 이용하는 접근 방식은 광범위하게 사용된 방식이며 SNR이 충분히 큰 구간에서는 성능 분석의 결과가 정확하다^[5].

III. OAF 릴레이 전송 기법의 정확한 성능 분석

본 논문에서는 정확한 OAF 릴레이 전송 기법의 성능 분석을 위해 기존 많은 연구에서 채택되었던 릴레이 선택 조건인 $\gamma_{OAF_r} \approx \min\{\gamma_{f_r}, \gamma_{g_r}\}$ 대신에 다음과 같

은 릴레이 선택 조건을 사용한다.

$$i = \arg \max_{r \in \{1, \dots, R\}} \{\min\{\gamma_{f_r}, \gamma_{g_r}\}\} \quad (3)$$

(3)을 기반으로 성능 분석을 위해 집합 연산을 사용하는 기회적 릴레이 선택 확률에 대해서 알아본다^[9]. 이를 기반으로 OAF 릴레이 전송 기법의 새로운 MGF와 정확한 평균 심벌 오류에 대한 새로운 성능 분석 기법을 제안한다.

1. 심벌 오류율

i 번째 릴레이의 순시 SNR은 $\gamma_h + \gamma_{OAF_i}$ 이므로 M-ary Phase Shift Keying (MPSK) 심벌에 대한 조건부 심벌 오류율은 다음과 같다^[12].

$$P_{S,i}(\gamma_h, \gamma_{f_i}, \gamma_{g_i}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} \exp(-(\gamma_h + \gamma_{OAF_i})s) d\phi, \quad (4)$$

여기서, s 는 $g_{PSK}/\sin^2(\phi)$ 이고, g_{PSK} 은 $\sin^2(\pi/M)$ 이다.

i 번째 릴레이의 평균 심벌 오류율을 구하기 위해서는 조건부 심벌 오류율 (4)에 i 번째 릴레이가 선택될 확률이 반영되어야 한다. i 번째 릴레이가 선택될 확률을 구하기 위해 i 번째 릴레이의 인덱스가 제외된 집합 $S_i = \{1, 2, \dots, R\} - \{i\}$ 를 정의하자. 또한, S_i 의 공집합을 제외한 부분 집합을 다음과 같이 정의하자.

$$S_i^{k,j} = \lambda_{i,1}^{k,j}, \dots, \lambda_{i,m}^{k,j}, \dots, \lambda_{i,k}^{k,j}, \quad (5)$$

여기서, k ($= 1, 2, \dots, R-1$)는 원소의 개수를 의미하며, j ($= 1, 2, \dots, \binom{R-1}{k}$)는 원소의 개수가 k 개인 부분 집합의 개수이며 $S_i^{k,j}$ 의 원소의 합이 올림 차순으로 결정된다. $\binom{R-1}{k}$ 은 $\frac{(R-1)!}{(R-k-1)!k!}$ 이며 $\lambda_{i,m}^{k,j}$ 는 $S_i^{k,j}$ 의 m 번째 원소이다.

R 개의 릴레이 중에서 i 번째 릴레이가 전송될 릴레이로 선택되었다는 것은 i 번째 릴레이의 순시 SNR이 $R-1$ 개의 순시 SNR보다 크거나 같다는 것을 의미한다. 그러므로, R 개의 릴레이 중에서 i 번째 릴레이가 전송될 릴레이로 선택된 확률은 다음과 같다.

$$p_i(\gamma_i) = \prod_{r=1, r \neq i}^R \Pr\{\gamma_r \leq \gamma_i\} \quad (6)$$

$$= \prod_{r=1, r \neq i}^R (1 - \exp(-\gamma_i/\bar{\gamma}_r)),$$

여기서, $p_i(\gamma_i)$ 는 (5)와 이항정리를 이용하면 다음과 같이 정리된다.

$$p_i(\gamma_i) = 1 + \sum_{k=1}^{R-1} (-1)^{-k} \sum_{j=1}^k \prod_{m=1}^k \exp\left(-\frac{x}{\gamma_{\lambda_{i,m}^{k,j}}}\right) \quad (7)$$

$$= \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=0}^{\binom{R-1}{k}} \exp(-B_i^{k,j} \gamma_i),$$

여기서, $B_i^{k,j}$ 는 $\sum_{m=1}^k 1/\bar{\gamma}_{\lambda_{i,m}^{k,j}}$ 이며 ($\sum_{m=1}^k 1/\bar{\gamma}_{\lambda_{i,m}^{k,j}}|_{k=0} = 0$).

(4)와 (7)을 이용하면 i 번째 릴레이의 평균 심벌 오류율은 다음과 표현될 수 있다.

$$P_{S,i} = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} (1 + s\bar{\gamma}_h)^{-1}$$

$$\times \left[\int_0^\infty \int_0^\infty \exp(-\gamma_{\text{OAF}_i} s) p_i(\min\{\gamma_{f_i}, \gamma_{g_i}\}) \right. \quad (8)$$

$$\left. \cdot f_{f_i}(\gamma_{f_i}) f_{g_i}(\gamma_{g_i}) d\gamma_{f_i} d\gamma_{g_i} \right] d\phi.$$

2. 수정된 MGF로 표현된 기존의 심벌 오류율

기존 연구에서 릴레이의 심벌오류율을 (8)의 형태로 나타내기 위해서 릴레이의 선택 조건으로 (2)대신 (3)으로 채택하였다. 또한, (8)을 간단한 형태로 표현하기 위해서 γ_{OAF_i} 를 $\gamma_i (= \min\{\gamma_{f_i}, \gamma_{g_i}\})$ 로 근사화하였다^[5,7]. 그러므로, (8)의 $\exp(-\gamma_{\text{OAF}_i} s)$ 는 $\exp(-\gamma_i s)$ 로 대체될 수 있으며 이중 적분식은 γ_i 에 대한 단일 적분식으로 다음과 같다.

$$P_S \geq P_S^{\text{old}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} (1 + s\bar{\gamma}_h)^{-1} \quad (9)$$

$$\times \left[\sum_{i=1}^R \int_0^\infty \exp(-\gamma_i s) f_i(\gamma_i) p_i(\gamma_i) d\gamma_i \right] d\phi,$$

여기서, $P_S \geq P_S^{\text{old}}$ 인 것은 $\gamma_{\text{OAF}_i} \leq \gamma_i$ 이기 때문이다. 따라서 P_S^{old} 는 OAF 릴레이 전송 기법의 하계값이 된다. 또한, γ_{OAF_i} 를 $\gamma_i (= \min\{\gamma_{f_i}, \gamma_{g_i}\})$ 로 근사화하였기

때문에 (9)의 $\sum_{i=1}^R f_i(\gamma_i) p_i(\gamma_i)$ 는 $\sum_{i=1}^R f_i(\gamma_i) \cdot \prod_{r=1, r \neq i}^R \Pr\{\gamma_r \leq \gamma_i\}$ 와 동일한 값이 된다. 이는 참고문헌 [7]의 γ_{max} 의 PDF인 (8)과 같은 형태가 됨을 의미한다. 따라서 (9)는 참고문헌 [7]의 (9)와 동일하게 된다. 또한, (7)을 (9)에 적용하게 되면 수정된 MGF 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_S^{\text{old}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} (1 + s\bar{\gamma}_h)^{-1} \quad (10)$$

$$\times \left[\sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{\binom{R-1}{k}} M_{\gamma_i}(s + B_i^{k,j}) \right] d\phi,$$

여기서, $M_{\gamma_i}(s)$ 는 $1/(1 + s\bar{\gamma}_i)$ 이다.

3. OAF 릴레이 전송 기법의 정확한 심벌 오류율

기존 연구에서 적용되었던 근사화 기법을 OAF 릴레이 전송 방식의 성능 분석에 적용하게 되면 정확한 심벌 오류율을 얻기가 어렵다. 그러므로, OAF 릴레이 전송 방식의 정확한 심벌 오류율을 얻기 위해 기존 연구의 근사화 기법을 채택하는 대신 γ_{OAF_i} 의 새로운 형태의 MGF를 제안한다. 제안된 MGF를 적용하여 OAF 릴레이 전송 방식의 정확한 성능을 제시한다.

i 번째 릴레이가 전송되는 릴레이로 선택되었을 때, 평균 심벌 오류율을 의미하는 (8)의 이중 적분은 수정된 MGF로 다음과 같다.

$$M_{\gamma_{\text{OAF}_i}}(s) = \int_0^\infty \exp(-\gamma_{\text{OAF}_i} s) \quad (11)$$

$$\cdot p_i(\min\{\gamma_{f_i}, \gamma_{g_i}\}) f_{f_i}(\gamma_{f_i}) f_{g_i}(\gamma_{g_i}) d\gamma_{f_i} d\gamma_{g_i}$$

$$= \frac{1}{\bar{\gamma}_{f_i} \bar{\gamma}_{g_i}} \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left(-\frac{xy}{x+y} s - \frac{x}{\bar{\gamma}_{f_i}} - \frac{y}{\bar{\gamma}_{g_i}}\right)$$

$$\cdot p_i(\min\{x, y\}) dy dx,$$

여기서, $x \leq y$ 인 경우 $p_i(\min\{x, y\})$ 는 $p_i(x)$ 이고, 이외의 경우에는 $p_i(y)$ 가 된다. 이를 (11)에 적용하면 $M_{\gamma_{\text{OAF}_i}}(s)$ 는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$M_{\gamma_{\text{OAF}_i}}(s) = \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{\binom{R-1}{k}} (M_1^{i,j,k}(s) + M_2^{i,j,k}(s)), \quad (12)$$

여기서, $M_1^{i,j,k}(s)$ 과 $M_2^{i,j,k}(s)$ 은 $1/(1/\bar{\gamma}_{g_i} + B_i^{k,j})$ 과 $1/(1/\bar{\gamma}_{g_i} + B_i^{k,j})$ 을 각각 $\bar{\gamma}_{g_i}'$ 과 $\bar{\gamma}_{f_i}'$ 로 치환하면 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$M_1^{i,j,k}(s) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}'(1/\bar{\gamma}_{g_i} + B_i^{k,j})} \quad (13)$$

$$\cdot \int_0^\infty \int_0^x \exp\left(-\frac{xy}{x+y}s - \frac{x}{\bar{\gamma}_{f_i}'} - \frac{y}{\bar{\gamma}_{g_i}'}\right) dy dx.$$

$$M_2^{i,j,k}(s) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}'(1/\bar{\gamma}_{f_i} + B_i^{k,j})} \quad (14)$$

$$\cdot \int_0^\infty \int_x^\infty \exp\left(-\frac{xy}{x+y}s - \frac{x}{\bar{\gamma}_{f_i}'} - \frac{y}{\bar{\gamma}_{g_i}'}\right) dy dx.$$

먼저 (13)의 적분식의 정리하기 위해 $\frac{xy}{x+y}$ 과 $\frac{z}{y}$ 을 각각 z 와 t 로 치환하자. 그러면 (13)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$M_1^{i,j,k}(s) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}'(1/\bar{\gamma}_{g_i} + B_i^{k,j})} \int_{1/2}^1 \frac{1}{t^2(1-t)^2} \quad (15)$$

$$\cdot \left[\int_0^\infty z \exp\left(-\left(s + \frac{1}{\bar{\gamma}_{f_i}'(1-t)} + \frac{1}{\bar{\gamma}_{g_i}'t}\right)z\right) dz \right] dt.$$

또한, $-\bar{\gamma}_{f_i}'$ 와 $-\bar{s}\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}' + \bar{\gamma}_{f_i}' - \bar{\gamma}_{g_i}'$ 와 $s\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}'$ 를 각각 a_1, b_1, c_1 라 치환하면

$$M_1^{i,j,k}(s) = \frac{\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}'}{1 + \bar{\gamma}_{g_i}'B_i^{k,j}} \int_{1/2}^1 \frac{1}{(a_1 + b_1t + c_1t^2)^2} dt. \quad (16)$$

(16)은 참고 문헌 [15]의 (2.178)를 이용하여 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$M_1^{i,j,k}(s) = \frac{a_1(a_1 + b_1 + c_1)}{(1 + \bar{\gamma}_{g_i}'B_i^{k,j})} \left[\frac{4(b_1 + c_1)}{\Delta_1(4a_1 + 2b_1 + c_1)} \quad (17)$$

$$- \frac{b_1 + 2c_1}{\Delta_1(a_1 + b_1 + c_1)} + \frac{4c_1}{(\Delta_1)^{3/2}} \left(\operatorname{arctanh}\left(\frac{b_1 + 2c_1}{\sqrt{\Delta_1}}\right) - \operatorname{arctanh}\left(\frac{b_1 + c_1}{\sqrt{\Delta_1}}\right) \right) \right].$$

여기서, Δ_1 은 $(b_1)^2 - 4a_1c_1$ 이며 i, j, k 에 따라서 a_1, b_1, c_1 값이 달라질 수 있지만 수식의 간략함을 위해서 $i,$

j, k 는 생략되었다.

$M_2^{i,j,k}(s)$ 는 $M_1^{i,j,k}(s)$ 을 정리한 마찬가지로 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$M_2^{i,j,k}(s) = \frac{a_2(a_2 + b_2 + c_2)}{(1 + \bar{\gamma}_{f_i}'B_i^{k,j})} \left[\frac{b_2}{\Delta_2 a_2} \quad (18)$$

$$- \frac{4(b_2 + c_2)}{\Delta_2(4a_2 + 2b_2 + c_2)} + \frac{4c_2}{(\Delta_2)^{3/2}} \left(\operatorname{arctanh}\left(\frac{b_2 + c_2}{\sqrt{\Delta_2}}\right) - \operatorname{arctanh}\left(\frac{b_2}{\sqrt{\Delta_2}}\right) \right) \right].$$

여기서, a_2, b_2, c_2 는 각각 $-\bar{\gamma}_{f_i}', -s\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}' + \bar{\gamma}_{f_i}' - \bar{\gamma}_{g_i}'$, $s\bar{\gamma}_{f_i}'\bar{\gamma}_{g_i}'$ 이며, Δ_2 는 $(b_2)^2 - 4a_2c_2$ 이 된다.

(17)과 (18)을 적용하여 최종적으로 R 개의 릴레이를 고려하게 되면 OAF 릴레이 전송 방식의 심볼 오류율을 다음과 같다.

$$P_S = \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} (1 + s\bar{\gamma}_h)^{-1} \quad (19)$$

$$\cdot (M_1^{i,j,k}(s) + M_2^{i,j,k}(s)) d\phi.$$

IV. 모 의 실험

본 모의 실험에서는 앞 장에서 제안된 릴레이 전송 방식의 성능 분석의 정확성을 검증해본다. AF 릴레이 전송 방법으로는 각 릴레이에서 동일한 전송 파워를 사용하는 $E_r = E_s/R$ ($r=1, \dots, R$)를 가정하였다. 또한, OAF 릴레이 전송 방법으로는 i 번째 릴레이가 전송될 릴레이로 선택 되었을 때 $E_s = E_i$ 로 가정하였다. 거리 손실 (path loss)에 의한 심볼 오류율의 영향을 살펴보기 위해서 송신 노드와 릴레이 노드의 상대적인 거리를 α 로 정의하였다. 채널모델은 $\mu \in [2, 5]$ 범위를 만족하는 $E[|f_i|^2] = E[|h|^2]/\alpha^\mu$ 과 $E[|g_i|^2] = E[|h|^2]/(1-\alpha)^\mu$ 를 선택하였다.

그림 2는 송신 노드와 릴레이 노드의 상대적인 거리를 α 와 평균 심볼 오류율의 성능을 보여주고 있다. 변조 기법으로는 BPSK가 선택되었다. 릴레이 선택 조건인 (2)와 (3)의 차이를 살펴보기 위해서 모의 실험이 진행되었다. (2)와 (3)의 모의 실험 결과 성능이 일치함을 관찰할 수 있다. 이는 본 논문에서 가정된 (3)의 가정성능 분석에 있어서 유효한 것을 의미한다. R 개의 릴

레이들이 송신 노드와 수신 노드 중간에 위치할 때 OAF 릴레이 전송 기법의 성능이 가장 우수함을 관찰

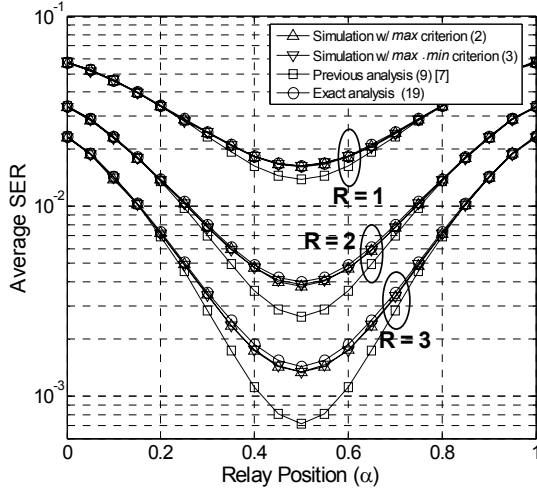


그림 2. 다양한 릴레이의 개수와 릴레이의 위치에 따른 OAF 릴레이 전송 기법의 성능 ($M = 2(\text{BPSK})$, $\bar{\gamma}_h = 0(\text{dB})$, and $R = 1, 2, 3$)

Fig. 2. Average SER versus relay position of α with respect to different number of relay nodes (R) for OAF relay systems ($M = 2(\text{BPSK})$, $\bar{\gamma}_h = 0(\text{dB})$, and $R = 1, 2, 3$).

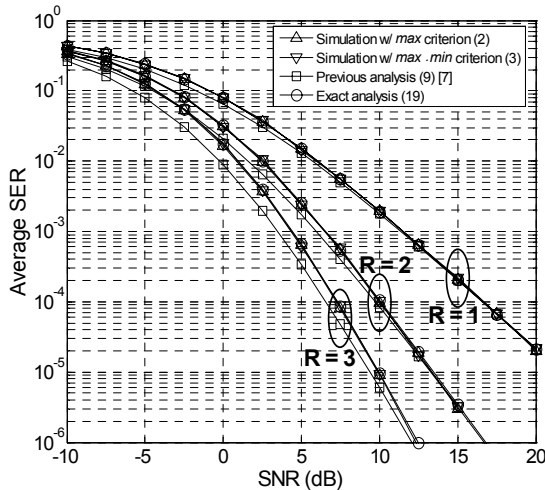


그림 3. 다양한 릴레이 개수와 수신 SNR 에 따른 OAF 릴레이 전송 방식의 성능 ($\alpha = 0.5$, $M = 4(\text{QPSK})$, $\text{SNR} = \bar{\gamma}_h$, and $R = 1, 2, 3$)

Fig. 3. Average SER versus SNR (dB) with respect to different number of relay nodes (R) for OAF relay systems when a relay node is located at the center between source and destination ($\alpha = 0.5$, $M = 4(\text{QPSK})$, $\text{SNR} = \bar{\gamma}_h$, and $R = 1, 2, 3$).

할 수 있다. 반면 기존 연구 결과의 정확성이 가장 떨어짐을 관찰할 수 있다. 또한, 릴레이의 개수가 증가함에 따라 기존 연구 결과와 본 논문에서 제시된 성능 분석 결과의 차이가 점점 더 늘어남을 관찰할 수 있다. 이는 기존 연구의 경우 γ_{OAF_i} 의 값으로 이의 하계값인 $\gamma_i (= \min\{\gamma_{f_i}, \gamma_{g_i}\})$ 로 근사화하였기 때문이다. 그러므로, 본 논문에서 제시된 새로운 분석 결과가 OAF 전송 방식의 실험 결과가 정확하게 일치함을 알 수 있다.

그림 3은 릴레이 노드의 개수가 증가함에 따른 S-D 링크의 평균 SNR ($\bar{\gamma}_h$) 에 따른 성능을 보여주고 있다. 이 때, 릴레이 노드들은 송신 노드와 수신 노드의 중앙에 위치해 있다. 변조 기법으로는 QPSK가 선택되었다. 그림 3에서는 릴레이의 개수가 증가함에 따라서 평균 SNR이 작은 값이거나 중간 값을 갖는 영역에서는 기존 연구들의 결과인 하계값과 본 논문에서 제안된 성능 분석의 결과의 차이가 점점 더 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 기존 연구에서 제안된 하계값이 높은 SNR 구간에서는 정확하지만 그렇지 않은 구간에서는 정확도가 떨어짐을 알 수 있다. 반면, 본 논문에서 제시된 분석 결과는 모든 SNR 구간에서 릴레이의 개수가 늘어나더라도 정확함을 관찰할 수 있다.

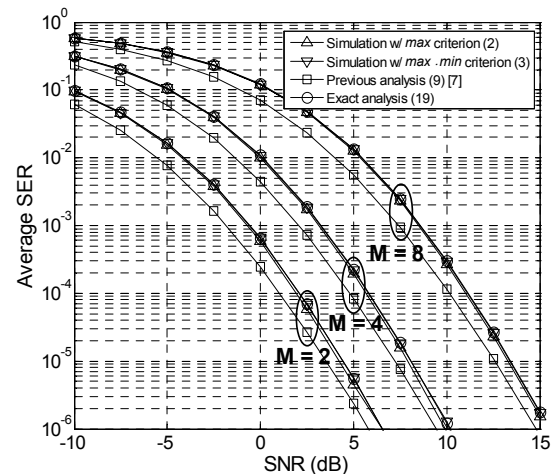


그림 4. 다양한 M 값과 수신 SNR에 따른 OAF 릴레이 전송 방식의 성능 ($R = 4$, $\text{SNR} = \bar{\gamma}_h$, $M = 2(\text{BPSK})$, $4(\text{QPSK})$, and $8(\text{BPSK})$)

Fig. 4. Average SER versus SNR (dB) with respect to different M for OAF relay systems when a relay node is located at the center between the source and destination ($R = 4$, $\text{SNR} = \bar{\gamma}_h$, $M = 2(\text{BPSK})$, $4(\text{QPSK})$, and $8(\text{BPSK})$).

그림 4는 $\bar{\gamma}_h$ 의 변화에 따른 다양한 MPSK 전송 기법의 성능을 보여주고 있다. 이 때, 릴레이 노드들은 송신 노드와 수신 노드의 중앙에 위치해 있다. 그리고 릴레이 노드의 개수는 4개이다. 평균 심볼 오류율이 10^{-3} 인 경우 본 논문에서 제시된 분석결과는 모의실험 결과와 일치하지만 기존 연구의 하계값의 결과는 모의실험과 1 dB 정도 크게 차이가 발생함을 관찰할 수 있다. 그러므로, 본 논문에서 제시된 분석 결과가 다양한 환경에 대하여 OAF 릴레이 전송 방식의 MPSK 심볼 오류율을 정확하게 표현함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 레일리 페이딩 무선 환경에서 OAF 릴레이 전송 방식의 정확한 성능 분석 결과를 제시하였다. OAF 릴레이 전송 방식의 정확한 성능 분석을 위해 기존 연구에서 가정된 근사화 기법을 적용하지 않았다. 근사화 기법을 적용하는 대신에 릴레이 선택 확률에 따른 OAF 릴레이 전송방식에 대한 새로운 형태의 MGF를 제안하였다. 제안된 릴레이 선택 확률은 OAF 릴레이 전송 방식의 특징을 반영하기 때문에 SNR이 높지 않은 구간에서도 제안된 성능 분석 결과가 정확함을 알 수 있었다. 또한, 모의실험 결과를 통해서 릴레이의 위치, 릴레이 노드의 개수, MPSK 전송 방식에 따른 다양한 환경에서도 제안된 분석 결과가 정확함을 관찰할 수 있었다. 결론적으로, 본 논문에서 제안된 성능 분석 결과가 OAF 릴레이 전송 방식의 향후 연구나 실질적인 구현에도 효과적으로 사용됨을 기대할 수 있다.

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] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062 - 3080, Dec. 2004.
- [3] 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.
- [4] 고균병, 서정태, "레일리 페이딩 채널에서의 OADF 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능분석 기법에 관한 연구," *한국신호처리 시스템 학회 논문지*, 제12권, 제3호, 188-193쪽, 2011년 7월.
- [5] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659 - 672, Mar. 2006.
- [6] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, "Symbol error rate of selection amplify-and-forward relay systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 11, pp. 757 - 759, Nov. 2006.
- [7] B. Maham and A. Hjørungnes, "Performance analysis of amplify-and-forward opportunistic relaying in Rician fading," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 643 - 646, Aug. 2009.
- [8] 고균병, 서정태, "레일리 페이딩 채널에 대한 이중 흡 증폭 후 전달 릴레이 시스템의 새로운 분석 기법," *전자공학회논문지*, 제12권, TC편, 제3호, 188-193쪽, 2011년 8월.
- [9] 고균병, 서정태, 김학원, "레일리 페이딩 채널에서의 OAF 릴레이 시스템에 대한 집합 연산 기반의 분석 기법에 관한 연구," *전기전자학회 논문지*, 제15권, TC편, 제3호, 198-204쪽, 2011년 9월.
- [10] S. S. Ikki, and M. H. Ahmed, "Performance Analysis of Adaptive Decode-and-Forward Cooperative Diversity Networks with Best-Relay Selection," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 1, pp. 68 - 72, Jan. 2010.
- [11] H. Min, S. Lee, K. Kwak, and D. Hong, "Effect of multiple antennas at the source on outage probability for amplify-and-forward relaying systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 2, pp. 633 - 637, Feb. 2009.
- [12] Marvin K. Simon and Mohamed-Slim Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*. John Wiley & Sons, 2000.
- [13] 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.
- [14] He Chen, Ju Liu, Lina Zheng, Chao Zhai, and Yong Zhou, "Approximate SEP Analysis for DF Cooperative Networks With Opportunistic Relaying," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 17,

no. 9, pp. 779 - 782, Sep. 2010.

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

저 자 소 개



남 상 호(학생회원)
2000년 연세대학교 기계전자
공학부 학사 졸업.
2001년 연세대학교 전기전자
공학과 석사 졸업.
2012년 연세대학교 전기전자
공학과 박사 졸업.

2011년~현재 LG-ERICSSON 선임연구원.
<주관심분야 : 펌토셀, 멀티홉 시스템, 다중 안테
나, 초저전력 통신>



홍 대 식(평생회원)-교신저자
1990년 Purdue University
Electrical Engineering
박사 졸업.
1991년~현재 연세대학교
전기전자공학과 교수.

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스
템, OFDM, 멀티홉 시스템, CR, M2M>



고 균 병(평생회원)
1997년 연세대학교 전자공학과
학사 졸업.
1999년 연세대학교 전기전자
공학과 석사 졸업.
2004년 연세대학교 전기전자
공학과 박사 졸업.

2004년 3월~2007년 2월 삼성전자 통신연구소
2007년 3월~현재 한국교통대학교
제어계측공학과.
<주관심분야 : 이동통신, MIMO, 적응신호처리>