

레이리 페이딩 채널에서의 OAF 릴레이 시스템에 대한 집합 연산 기반의 분석 기법에 관한 연구 Study of Set-Operation Based Analytical Approach for OAF Relay Systems over Rayleigh Fading channels

고 균 병*, 서 정 태*, 김 학 원**
Kyun-Byoung Ko*, Jeong-Tae Seo*, Hag-Wone Kim**

Abstract

In this letter, another analytical approach for the opportunistic amplify-and-forward (OAF) relay systems is proposed over Rayleigh fading channels. Based on set-operation at the selected relay node, its selection probability as the best relay is derived and then, the probability density function (PDF) of the received instantaneous signal-to-noise ratio (SNR) is expressed as a more tractable form in which the number of summations and the length of each summation are specified. Then, the average error rate, outage probability, and average channel capacity are obtained as approximated closed-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 OAF schemes can outperform the other non-selective schemes on the average error rate, outage probability, and average channel capacity.

요 약

본 논문에서는 선택적 증폭후 전달(Opportunistic Amplify-and-Forward: OAF) 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능 분석 기법을 레이리 페이딩 채널에 대하여 제안하였다. 제안된 분석 기법에서는 집합 연산(set-operation)을 기반으로 각 릴레이가 최적의 릴레이로 선택될 확률을 유도한다. 그리고 수신된 순시 신호 대 잡음비의 확률 밀도 함수를 기존의 분석 기법보다 일반적인 (확률밀도함수 표현에서 합 기호의 개수 및 그 영역이 구체화된)형태로 제시한다. 그리고 이를 이용하여 평균 오류율, 누락 확률 및 평균 채널 용량을 근사화된 닫혀진 형태로 유도한다. 제안된 성능분석 기법의 정확성은 모의실험을 통하여 검증한다. 성능분석 및 모의실험 결과 비교를 통하여 OAF 기법이 평균 오류 확률, 누락 확률 및 평균 채널 용량 측면에서 비선택적 기법에 비해 성능 향상 정도가 우수함을 확인한다.

Key words : OAF relay, Rayleigh fading channels, average error rate, outage probability, channel capacity

I. 서론

무선 통신에서 릴레이(Relay) 시스템은 송신 단에

서 큰 전력을 사용하지 않고도 통화 영역을 넓힐 수 있는 장점을 가지고 있다[1][2]. 또한, 페이딩 채널에서 무선 통신의 용량과 신뢰성을 증대를 위해 사용될 수 있다[3][4]. 릴레이 시스템은 동작 방식에 따라 릴레이에서 수신 신호의 전력을 증폭하여 전달하는 증폭 후 전달(Amplify-and-Forward, AF) 릴레이 시스템과 수신 신호를 복호화하고 다시 변조하여 전송하는 디코딩 후 전달(Decoded-and-Forward, DF) 릴레이 시스템으로 구분할 수 있다[1-5].

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

* 충주대학교 제어계측공학과
(Dept. of Control and Instrumentation Engineering,
Chungju National University)

★ 교신저자 (Corresponding author)
※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로
한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것
임(2010-0002650).

接受日:2011年 07月 19日, 修正完了日: 2011年 08月 21日
掲載確定日: 2011年 09月 01日

시스템의 가장 큰 단점인 주파수 효율 저하를 극복할 수 있는 선택적 기법(Opportunistic AF: OAF)에 관한 연구가 진행되었다[5-8]. 이러한 OAF 기법에 관한 연구들에서는 모든 링크들의 채널 정보를 알고 있다는 가정하에 수신단의 순시 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio: SNR)에 대한 근사화를 적용한 후 확률 밀도 함수(Probability Density Function: PDF)를 닫혀진 형태로 유도하고 이를 이용하여 OAF 기법의 성능을 분석한다. 하지만 기존의 연구들에서는 유도된 PDF의 표현에서 사용되는 합 기호의 개수 및 각 합 기호의 길이를 OAF 릴레이 시스템 변수로 특정하지 못하고 있다[5-6]. 따라서 성능 분석 결과가 닫혀진 형태로 제시되었다 하더라도 다이버시티 시스템에서 이미 잘 알려진 식의 형태로 유도되지 못하여 OAF 릴레이 시스템의 특성을 설명하는데 한계가 있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 기존의 연구들[5, 7-8]과 같은 근사화 방법을 사용하면서 OAF 릴레이 시스템의 각 릴레이가 최적으로 선택될 확률을 유도한다. 각 릴레이의 선택 확률에서는 집합 연산을 사용함으로써 합 기호의 개수 및 영역이 시스템 변수로 특정화된 형태로 표현된다. 이는 기존의 분석 기법과의 차별성으로 제안된 기법이 OAF 릴레이 시스템의 다이버시티 효과를 이론적으로 설명할 수 있음을 의미한다. 이를 바탕으로 수신 SNR의 PDF를 시스템 변수로 특정화된 형태로 유도하여 평균 오류율, 누락(Outage) 확률 및 평균 채널 용량을 닫혀진 형태로 유도한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 OAF 릴레이 시스템 모델을 설명한다. 3장에서는 OAF 릴레이 시스템에 대한 성능분석을 수행한다. 4장에서는 제안된 성능분석 결과를 모의실험 결과와 비교 분석하여 그 정확성을 검증하고 5장에서 결론을 맺는다.

II. OAF Relay System 모델

그림 1은 OAF 릴레이 시스템 블록도를 나타낸다 [5]. 그림에서 S(Source)는 정보를 전송하고자 하는 송신 노드를, D(Destination)는 최종 수신 노드를, R(Relay)는 릴레이 노드들을 각각 나타낸다.

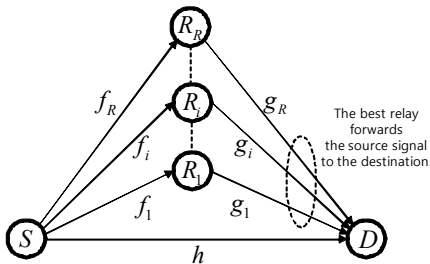


Fig. 1. Block diagram for OAF relay systems
그림 1. OAF 릴레이 시스템 블록도

AF 릴레이 시스템에서는 R 개의 릴레이가 수신된 신호를 폭하여 재전송하게 된다. 따라서 총 $R+1$ 개의 직교채널이 필요하다. 반면 OAF 릴레이 시스템에서는 두 개(하나는 S-D 링크, 다른 하나는 선택된 R-D 링크)의 직교 채널을 사용하여 전송하게 된다[5-6]. 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 릴레이가 선택되었다고 가정할 때 각 링크의 수신신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_h &= h \sqrt{E_s} s + n_h \\ y_{f_i} &= f_i \sqrt{E_s} s + n_{f_i} \\ y_{g_i} &= g_i G_{AF_i} y_{f_i} + n_{g_i} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 h , f_i 및 g_i 는 각각 상호 독립적이고 크기가 레일리 분포를 갖는 랜덤변수로 S-D, i 번째 S-R 및 R-D 링크의 채널 이득을 나타낸다. 또한 n_h , n_{f_i} 및 n_{g_i} 는 각 링크 채널에 대한 부가 백색 가우스 복소 잡음으로 모두 평균은 0이고 분산은 σ^2 로 가정한다. 그리고 전송 심벌 s 는 $E[|s|^2] = 1$ 를 만족한다. 또한

$G_{AF_i} = \sqrt{\sum_{r=1}^R E_r / (E_s |h_i|^2)}$ 는 선택된 i 번째 릴레이의 증폭이득을 나타낸다[2]. 여기서 E_s 는 S의 전송 심벌 에너지를 나타내고 E_i 는 일반적인 AF 릴레이 시스템에서 i 번째 릴레이의 전송 심벌 에너지를 나타낸다. 따라서 각 링크에 대한 수신 SNR은 다음과 같다.

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

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 정의한다. 또한 i 번째 S-R-D 링크의 수신 SNR은 $\gamma_{AF_i} = \gamma_{f_i} \gamma_{g_i} / (\gamma_{f_i} + \gamma_{g_i})$ 로 정의한다[2, 7].

III. OAF 릴레이 시스템 성능분석

본 논문에서는 OAF 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능 분석 기법을 제안하기 위하여 R 개의 릴레이들 중 각 릴레이가 선택될 확률을 우선 유도한다. 그리

고 기존의 분석 기법들과는 다르게 수신 SNR의 PDF 표현에서 합 기호의 개수 및 합 기호의 영역을 구체화된 형태로 유도한다. 즉, 본 논문에서 제안된 분석 기법이 레일리 페이딩 채널의 다양한 조건을 반영할 수 있는 일반적인 형태임을 제시하도록 한다.

OAF 릴레이 시스템의 수신 노드에서 MRC (Maximum Ratio Combining) 기법의 사용을 가정할 때 수신 신호의 SNR은 다음과 같다.

$$\gamma_{tot} = \gamma_h + \max_{i \in R} \{\gamma_{AF_i}\} = \gamma_h + \gamma_{\max} \quad (3)$$

여기서 $\gamma_{\max} = \max_{i \in R} \{\gamma_{AF_i}\}$ 는 R 개의 S-R-D 링크 SNR 중 가장 큰 값을 의미한다. 본 논문에서는 닫혀진 형태의 성능분석 결과를 유도하기 위하여 기존의 논문들[5, 7-8]과 같은 가정을 사용하도록 한다. 즉, γ_{tot} 의 상한 값을 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma_{tot} \leq \gamma_b = \gamma_h + \gamma_{up} \quad (4)$$

여기서 $\gamma_i = \min \{\gamma_i\}$ 일 때 $\gamma_{up} = \max_{i \in R} \{\gamma_i\}$ 이다. 또한 γ_i 의 PDF는 $E[\gamma_i] = \bar{\gamma}_i = \gamma_{f_i} \gamma_{g_i} / (\gamma_{f_i} + \gamma_{g_i})$ 일 때 $f_{\gamma_i}(\gamma) = 1/\bar{\gamma}_i \exp(-\gamma/\bar{\gamma}_i)$ 이다[9]. 이러한 가정은 기존의 연구들에서 광범위하게 사용된 것으로 중간 및 높은 SNR에서 그 정확성이 확인되었다[5, 7-8].

1. OAF 릴레이 시스템에서 i 번째 릴레이의 선택 확률

우선 R 개의 릴레이가 존재하는 시스템에서 R 개의 릴레이 각각은 최상의 릴레이로 선택되어질 수 있다. 우선 i 번째 릴레이가 선택될 확률을 먼저 유도하도록 한다. 각 원소가 선택되지 않은 릴레이들을 의미하는 집합 $D_i = \{1, 2, \dots, R\} - \{i\}$ 를 고려한다. i 번째 릴레이가 선택된다는 것은 $\gamma_i = \gamma$ 가 $\{\gamma_j\}_{j=1}^R$ 중에서 최대값이 됨을 의미한다. 이는 $R-1$ 개 릴레이의 순시 SNR이 모두 $\gamma_i = \gamma$ 보다 작거나 작을 확률을 나타내므로 다음으로 표현할 수 있다.

$$p_i(\gamma) = \prod_{r=1, r \neq i}^R \Pr\{\gamma_r \leq \gamma\} = \prod_{r=1, r \neq i}^R (1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}_r}) \quad (5)$$

본 논문에서는 성능 분석 결과를 보다 이해하기 쉬운 형태로 유도하기 위하여 집합 D_i 의 부분 집합들을 다룬다. 그리고 집합 D_i 의 부분 집합들 중에서 k 개의 원소를 갖는 부분 집합은 총 $N_k = \binom{R-1}{k} = \frac{(R-1)!}{(R-1-k)!k!}$ 개가 존재한다. 부분 집합을 원소들의 합이 증가되는 순서로 정렬한다고

할 때 k 개의 원소를 갖는 j 번째 부분 집합을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D^{i,k,j} = \{\lambda_1^{i,k,j}, \dots, \lambda_m^{i,k,j}, \dots, \lambda_k^{i,k,j}\} \quad (6)$$

따라서 이항 정리를 통하여 식 (5)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p_i(\gamma) = 1 + \sum_{k=1}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{N_k} \exp\left(-\gamma \sum_{m=1}^k \frac{1}{\gamma_{\lambda_m^{i,k,j}}}\right) \quad (7)$$

그러므로 γ_{up} 의 PDF는 다음과 같다.

$$f_{\gamma_{up}}(\gamma) = \sum_{i=1}^R f_{\gamma_i}(\gamma) p_i(\gamma) \quad (8)$$

$$= \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{N_k} \frac{1}{\gamma_i} \exp\left(-\frac{\gamma}{A^{i,k,j}}\right)$$

여기서 $1/A^{i,k,j} = 1/\bar{\gamma}_i + \sum_{m=1}^k 1/\gamma_{\lambda_m^{i,k,j}}$ 이다. 단 $k=0$ 이

면 $\sum_{m=1}^k (\cdot)_{k=0} = 0$ 이고 $1/A^{i,k,j}|_{k=0} = 1/\bar{\gamma}_i$ 이다.

그러므로 γ_h 및 γ_{up} 의 PDF로부터 식 (4)로 주어지는 γ_{tot} 의 상한 값 γ_b 에 대한 PDF를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$f_{\gamma_b}(\gamma) = \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{N_k} \frac{A^{i,k,j}}{\gamma_i} G_1 \quad (9)$$

여기서 변수 G_1 은 다음과 같다.

$$G_1 = \begin{cases} \frac{e^{-\gamma/\bar{\gamma}_h}}{\bar{\gamma}_h - A^{i,k,j}} + \frac{e^{-\gamma/A^{i,k,j}}}{A^{i,k,j} - \bar{\gamma}_h}, & \bar{\gamma}_h \neq A^{i,k,j} \\ \frac{\gamma}{(\bar{\gamma}_h)^2} e^{-\gamma/\bar{\gamma}_h}, & \bar{\gamma}_h = A^{i,k,j} \end{cases}$$

또한 γ_b 의 CDF는 다음과 같이 유도 된다.

$$F_{\gamma_b}(\gamma) = \int_0^\gamma f_{\gamma_b}(x) dx = \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{N_k} \frac{A^{i,k,j}}{\gamma_i} G_2 \quad (10)$$

여기서 변수 G_2 은 다음과 같다.

$$G_2 = \begin{cases} \frac{\bar{\gamma}_h(1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}_h})}{\bar{\gamma}_h - A^{i,k,j}} + \frac{A^{i,k,j}(1 - e^{-\gamma/A^{i,k,j}})}{A^{i,k,j} - \bar{\gamma}_h}, & \bar{\gamma}_h \neq A^{i,k,j} \\ 1 - \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_h} + 1\right) e^{-\gamma/\bar{\gamma}_h}, & \bar{\gamma}_h = A^{i,k,j} \end{cases}$$

본 논문에서 제안하는 분석 결과 식 (8)은 참고문헌 [5]의 식 (11)의 다른 표현으로 레일리 페이딩 채널의 모든 조건을 포함하는 일반적인 형태라 할 수 있다.

2. 평균 심벌 오류율

식 (9)와 γ_h PDF로부터 M-ary Phase Shift Keying (MPSK) 심벌에 대한 평균 심벌 오류율은 다음과 같이 표현된다[10].

$$P_{ASER} = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{(M-1)\pi/M} e^{-(x+y)g_{PSK}/\sin^2\theta} d\theta \times f_{\gamma_h}(x)f_{\gamma_{up}}(y) dx dy$$

$$= \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{N_i} \frac{A^{i,k,j}}{\gamma_i} \times \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} \frac{1}{1+\gamma_h s} \frac{1}{1+A^{i,k,j} s} d\theta$$

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

3. 평균 비트 오류율

식 (9)로부터 평균 비트 오류율은 다음과 같이 유도된다[9].

$$P_e = \alpha \int_0^\infty Q(\sqrt{\beta\gamma}) f_{\gamma_h}(\gamma) d\gamma$$

$$= \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{N_i} \frac{A^{i,k,j}}{\gamma_i} G_3$$

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

$$G_3 = \frac{\bar{\gamma}_h}{\bar{\gamma}_h - A^{i,k,j}} \frac{\alpha}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\beta\bar{\gamma}_h/2}{\beta\bar{\gamma}_h/2 + 1}} \right) + \frac{A^{i,k,j}}{A^{i,k,j} - \bar{\gamma}_h} \frac{\alpha}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\beta A^{i,k,j}/2}{\beta A^{i,k,j}/2 + 1}} \right),$$

$\bar{\gamma}_h \neq A^{i,k,j}$

$$G_3 = \alpha \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta\bar{\gamma}_h/2}{\beta\bar{\gamma}_h/2 + 1}} \right)^2 \times \sum_{n=0}^1 \binom{n+1}{n} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta\bar{\gamma}_h/2}{\beta\bar{\gamma}_h/2 + 1}} \right)^n,$$

$\bar{\gamma}_h = A^{i,k,j}$

이다. 또한 α 및 β 는 변조 기법에 따른 상수로 BPSK의 경우 $\alpha = 1$ 이고 $\beta = 2$ 이다.

4. 누락 확률

누락 확률을 채널 상호 정보(channel mutual information : I)가 요구되는 전송률(T)이하가 되는

$I = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_h) \leq T$ 에 대한 확률로 정의하면

$P_{OUT} = \Pr\left\{\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_h) \leq T\right\}$ 로 표현할 수 있다 [5]. 또한 식 (10)으로부터 다음을 얻는다.

$$P_{OUT} = \Pr\{\gamma_h \leq 2^{2T} - 1\} = F_{\gamma_h}(2^{2T} - 1) \quad (13)$$

5. 평균 채널 용량

새로운 채널 용량은 획득 가능한 전송률의 최대치를 나타내는 중요한 성능 기준으로 평균 채널 용량은

$\bar{C} = \frac{W}{2} \int_0^\infty \log_2(1 + \gamma) f_{\gamma_h}(\gamma) d\gamma$ 로 표현할 수 있다

[9]. 여기서 W 는 신호의 전송 대역폭을 의미한다. 식 (9)를 상기식에 대입하면 다음을 얻는다.

$$\bar{C} = \frac{W}{2 \ln(2)} \sum_{i=1}^R \sum_{k=0}^{R-1} (-1)^k \sum_{j=1}^{N_i} \frac{A^{i,k,j}}{\gamma_i} G_4 \quad (14)$$

$$G_4 = \begin{cases} \frac{\bar{\gamma}_h e^{1/\bar{\gamma}_h} E_1(1/\bar{\gamma}_h)}{\bar{\gamma}_h - A^{i,k,j}} + \frac{A^{i,k,j} e^{1/A^{i,k,j}} E_1(1/A^{i,k,j})}{A^{i,k,j} - \bar{\gamma}_h}, & \bar{\gamma}_h \neq A^{i,k,j} \\ 1 + \frac{\bar{\gamma}_h - 1}{\bar{\gamma}_h} e^{1/\bar{\gamma}_h} E_1(1/\bar{\gamma}_h), & \bar{\gamma}_h = A^{i,k,j} \end{cases}$$

$$E_1(x) = \int_x^\infty \frac{\exp(-t)}{t} dt$$

상기 식들을 통하여 다음의 사실을 확인할 수 있다. R 개의 릴레이 각각은 최적의 릴레이로 선택되어 질 수 있으며 그 선택 확률은 식 (7)로 주어진다. 그리고 S-D 링크를 고려할 때 $R+1$ 의 다이버시티 오더(식 (9))를 갖게 된다.

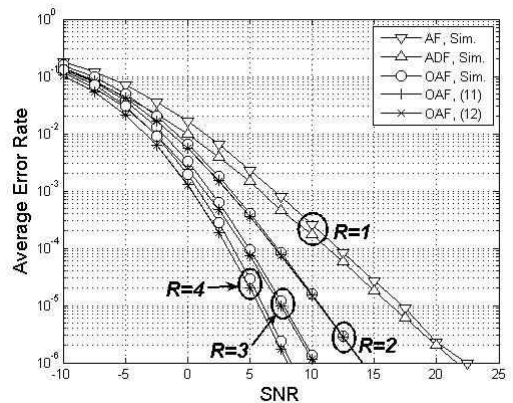


Fig. 2. Averaged Error Rate comparison with respect to SNR
그림 2. SNR에 따른 평균 오류율 성능 비교

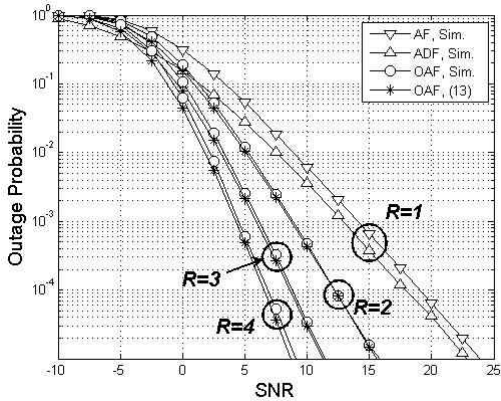


Fig. 3. Outage Probability comparison with respect to SNR

그림 3. SNR에 따른 누락 확률 비교

또한 식 (12)는 참고문헌 [5]의 식 (14)의 다른 표현으로 시스템 파라미터 R 과 관련된 값으로 특정되어 있다. 그리고 유도된 성능분석 결과 식 (12), (13) 및 (14)는 모든 레일리 페이딩 채널의 조건을 포함하는 일반화된 성능분석 결과임을 알 수 있다.

IV. 성능분석 및 모의실험 결과

본 절에서는 제안하는 성능분석 기법의 정확성을 모의실험을 통해 검증하고 OAF 릴레이 시스템의 성능을 다양한 릴레이 시스템과 비교한다.

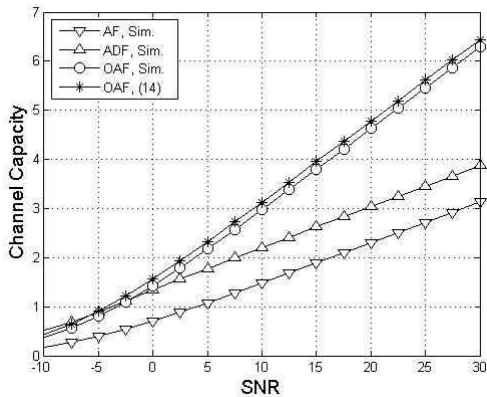


Fig. 4. Channel Capacity comparison with respect to SNR

그림 4. SNR에 따른 채널 용량 비교

공정한 비교를 위하여 다중 릴레이 시스템에서

$E_s = \sum_{r=1}^R E_r$ 을 가정하며 OAF 기법에서는 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 정의한다.

그림 2에서는 여러 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 OAF 기법은 같은 직교 채널을 사용하면서 릴레이 개수 R 이 증가함에 따라 다이버시티 이득이 증가되고 이에 따라 평균 오류율 성능 및 누락 확률 성능이 증가되고 있음을 알 수 있다. 또한 성능 분석에서 사용된 근사화 기법으로 인하여 성능 분석 결과와 모의실험 결과 사이에 오차가 발생함을 알 수 있다. 그리고 이러한 오차는 릴레이 개수 R 이 증가됨에 따라 커짐을 확인할 수 있다. $R=4$ 인 경우 10^{-3} 의 평균 오류율과 누락 확률에서 SNR 오차는 약 0.5dB이하임을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 유도된 성능 분석 결과는 OAF 릴레이 시스템이 획득할 수 있는 성능 상한을 근사적으로 나타냄을 알 수 있다.

그림 4에서는 그림 2 및 3과 동일 환경에서 $R=3$ 에 대한 정규화 채널 용량(\overline{C}/W) 성능을 SNR에 따라 비교하고 있다. OAF 기법의 채널 용량 성능은 0dB 이상의 SNR에서 AF 및 ADF 기법보다 우수함을 확인할 수 있다. 또한 SNR 증가에 따른 채널 용량 증가정도가 AF 및 ADF 기법에 비해 커짐을 알 수 있다. 이는 채널 환경이 좋은 경우 OAF 기법이 릴레이 개수 증가에 따른 주파수 효율 저하 없이 다이버시티 이득에 따른 채널 용량 증가를 얻게 됨을 의미한다. 또한 본 논문의 성능 분석 결과는 분석과정에서 사용된 근사화 기법으로 인해 모의실험 결과와 차이를 보이나, 그 차이는 모든 영역의 SNR에서 약 0.2 이하의 정규화 채널 용량 차이를 나타냄을 확인할 수 있다.

그림들을 통하여 관찰할 수 있는 바와 같이 선택적 기법은 비선택적 기법에 비해 우수한 성능을 나타내게 되며, 이는 각 링크의 모든 채널 정보를 안다는 가정 하에 최적의 릴레이를 선택하였기 때문에 얻어지는 성능이라 할 수 있다. 즉, 본 논문의 성능 분석 결과는 OAF 기법이 획득할 수 있는 이론적 상한 성능으로 실제 시스템에 적용할 경우에는 그 성능이 열화될 가능성이 있다. 또한 모든 그림에서 제안된 성능분석 결과와 모의실험 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 분석 기법은 OAF 기법의 성능 분석의 중요한 도구로 활용될 수 있을 것이다.

V. 결론

본 논문에서는 OAF 릴레이 시스템에 대한 새로운 성능 분석 기법을 모든 레일리 페이딩 채널에 대해 적용할 수 있도록 제안하였다. 제안된 분석 기법에서는 복소 릴레이의 선택 확률을 집합 연산의 방법을 사용함으로써 기존의 분석 결과보다 일반적인 형태로 유도하였다. 또한 제안된 성능분석 기법의 정확성은 모의실험을 통하여 검증되었다. 성능분석 및 모의실험을 통하여 OAF 기법이 평균 오류 확률, 누락 확률 및 채널 용량 측면에서 성능 향상 정도가 비선택 기법에 비해 우수함을 확인하였다.

참고문헌

[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 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] 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] 고균병, 서정태, "복호 후 전달 릴레이 시스템의 평균 오류율에 대한 릴레이 노드에서의 오류 사건

기반의 의사-분석 기법," *전기전자학회논문지*, 15권 1호, pp. 64-69, 2011년 3월.

[5] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, "Performance of Multiple-Relay Cooperative Diversity Systems with Best Relay Selection over Rayleigh Fading Channels," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, May 2008.

[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] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, 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.

[8] 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.

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

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

저 자 소 개

고 균 병 (정회원)



1997년 : 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1999년 : 연세대학교 대학원 전기 전자공학과 (공학석사)
 2004년 : 연세대학교 대학원 전기 전자공학과 (공학박사)
 2004년 03월~ 2006년 02월 : 삼성 전자 통신연구소, 책임연구원
 2007년 03월~현재 : 충주대학교 제어계측공학과, 조교수
 <주관심분야> Multi-Antenna & Multi-Carrier System, Cooperative Network, 통신신호처리

서 정 태 (정회원)

1985년 : 연세대학교 전자공학과
졸업 (공학사)
1987년 : 연세대학교 대학원 전자
공학과 (공학석사)
1988년 ~ 1990년 : 삼성전자 주
임연구원
1990년 ~ 1995년 : 연세대학교
대학원 전자공학과 (공학박사)
1995년 ~ 현재 : 충주대학교 제어계측공학과, 교수
<주관심분야> 적응신호처리, 통신신호처리

김 학 원 (정회원)

1989년 : 고려대학교 전자공학과
졸업 (공학사)
1991년 : 한국과학기술원 전자전
산학과 졸업 (공학석사)
2005년 : 한국과학기술원 전자전
산학과 졸업 (공학박사)
1991년 ~ 2008년 : LG전자(주)
디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원
2008년 ~ 현재 : 충주대학교 제어계측공학과, 조교수
<주관심분야> 전력전자, 전력변환, 전동기 제어,
제어 신호처리, 통신 신호처리 응용