복호 후 전달 릴레이 시스템의 평균 오류율에 대한 릴레이 노드에서의 오류 사건 기반의 의사-분석 기법

Semi-Analytical BER Evaluation Based on Error-Events at Relay Nodes for Decoded-and-Forward Relay Systems

고 균 병*, 서 정 태*★
Kyun-Byoung Ko*, Jeong-Tae Seo*★

Abstract

In this paper, a semi-analytical approach is proposed for decode-and-forward(DF) relay systems over rayleigh fading channels. At first, we derive the general form of the averaged bit error rate(BER) based on error-events at relay nodes in which a selection scheme is not used. It is confirmed that an erroneous detection and transmission at relay nodes can cause the degradation of the received signal-to-noise ratio (SNR) and the averaged BER performance. Furthermore, the proposed method can be extended to selective-DF(SDF) relay schemes so that it is verified to be another general solution for DF relay systems. Also, proposed semi-analytical expressions have been verified by comparing with simulations.

요 약

본 논문에서는 복호 후 전달(decode-and-forward: DF) 릴레이 시스템에 대한 레일리 페이딩 채널에서의 의사-성능 분석 기법을 제안하였다. 우선, 각 릴레이가 복호 오류 유무에 상관없이 전송하는 경우에 대한 성능분석을 릴레이 노드단의 오류 사건을 기반으로 유도한다. 분석된 성능 분석 결과를 통하여 각 릴레이 단의 복호 오류가 수신 SNR 및 평균 오류율 성능 저하를 야기할 수 있음을 확인한다. 또한 제안된 분석 기법을 복호 오류가 없는 경우에만 전송하는 SDF의 경우로 확장함으로써 제안된 분석 기법이 DF 릴레이 시스템에 대한 일반적인 성능 분석 기법임을 확인한다. 그리고 제안된 분석기법의 정확성은 모의실험을 통하여 비교 검증되었다.

Key words : DF-Relay, Rayleigh fading channels, SDF, Averaged BER

Ⅰ. 서론

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 시스템

* 충주대학교 제어계측공학과
(Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Chungju National University)
★ 교신저자 (Corresponding author)
※ 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-331-D00358).
接受日:2011年 3月 2日, 修正完了日: 2011年 3月 30日

은 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].

최근에는 Cyclic Redundancy Check (CRC) 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 소스(source, S)에 재전송을 요구하는 기법에 관한 연구가 진행 되었다[6].

본 논문에서는 소스와 릴레이 링크에서의 복호 오류 유무에 따라 오류 사건을 정의하고 이를 바탕으로 DF 릴레이에 대한 성능 분석 기법을 제안하도록 한다. 우선 복호 오류 유무에 상관없이 항상 재전송을 수행하는 FDF(fixed decoded-and forward) 릴레이에 대한 성능 분석을 수행한다. 성능 분석은 R-D 링크에 대한 평균 오류율 분석과 S-D 및 R-D 링크 결합에 대한 평균 오류율 분석을 수행한다. 다음에는 제안된 성능 분석 기법을 각 릴레이가 복호 오류가 없는 경우에만 재전송을 수행하는 SDF(selective decoded-and forward) 릴레이 시스템에 대한 경우로 확장 적용하도록 한다.

따라서 본 논문에서는 기존 연구들이 제시하지 못한 DF 릴레이 시스템의 일반적인 의사-성능분석 기법을 제안하고 그 성능을 모의실험을 통하여 검증한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 DF 릴레이 시스템 모델을 설명한다. 3장에서는 FDF 릴레이 시스템의 성능분석을 수행하고 4장에서는 제안된 성능분석 결과를 SDF 릴레이 시스템에 확장 적용한다. 그리고 5장에서는 제안된 성능분석 결과를 모의실험 결과와 비교 분석하여 6장에서 결론을 맺는다.

II. DF Relay System 모델

그림 1은 DF 프로토콜을 사용하는 릴레이 시스템 블록도를 나타낸다. 그림에서 S(Source)는 정보를 전송하고자하는 송신 노드를, D(Destination)는 최종 수신 노드를, Re(Relay)는 릴레이 노드들을 각각 나타낸다. 0번째 시간슬롯에서 S는 Re와 D로 전송 신호를 전송한다. 첫번째 시간슬롯에서는 첫 번째 Relay가 S로부터 수신한 신호를 복호 후 재생성하여 D로 전송한다. 따라서 R개의 릴레이를 갖는 시스템에서는 전송을 위해 총 $R+1$개의 시간슬롯이 필요하다. 그리고 S-D 링크는 S와 D사이의 채널 링크를, S-R 링크는 S와 Re사이의 채널 링크를, R-D 링크는 Re와 D사이의 채널 링크를 각각 나타낸다.

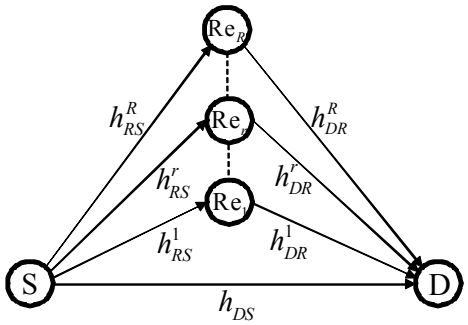


Fig. 1. Block diagram for DF relay systems(source(S), destination(D), relay(Re))
그림 1. 복호 후 전달 릴레이 시스템 블록도(source(S), destination(D), relay(Re))

따라서 각 링크의 수신신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_{DS} &= h_{DS}s + n_{DS} \\ y^r_{RS} &= h^r_{RS}s + n^r_{RS} \\ y^r_{DR} &= h^r_{DR}\hat{s^r} + n^r_{DR} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 h_{DS}, h^r_{RS} 및 h^r_{DR}는 각각 S-D, r번째 S-R 및 R-D링크의 채널 이득을 나타낸다. 그리고 각 링크의 채널 이득은 상호 독립적이고 크기가 Rayleigh 분포를 갖는 랜덤변수이다. 또한 n_{DS}, n^r_{RS} 및 n^r_{DR}는 각 링크 채널에 대한 부가 백색 가우스 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)으로 그 분산은 모두 σ^2로 가정한다. 그리고 전송 심벌 s는 $E[|s|^2]=1$를 만족하는 BPSK(Binary Phase Shift Keying)심벌이고 $\hat{s^r}$는 r번째 릴레이에서 복호 후 재생성한 전송 심벌이다. 따라서 각 링크에서의 수신 신호대 잡음비(signal to noise ration: SNR)는 다음과 같다.

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

그리고 D에서는 최종적으로 R-D 링크들의 수신신호를 결합하거나 S-D 링크 및 R-D 링크들의 수신신호를 결합하여 릴레이를 통한 성능향상을 얻게 된다.

III. FDF 릴레이 시스템에 대한 성능분석

본 논문에서는 DF 릴레이의 성능분석을 위하여 우선 다중 릴레이의 오류 사건(error event)의 표현 기법을 설명한다. 이를 바탕으로 FDF 릴레이 시스템의 성능 분석을 수행하도록 한다. 우선 R개의 릴레이가 존재하는 시스템에서 총 오류 사건은 2^R 개가 존재한다. 이중 p번째 오류 사건을 다음과 같이 정의한다.

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

여기서 $p \in \{1,2,\cdots,2^R\}$이고 e_r^p는 p번째 오류 사건의 r번째 릴레이의 복호 오류를 의미한다. 즉, $e_r^p = 1$는 복호 과정에 오류가 발생한 경우를 나타내어 $\hat{s^r} = -s$를 의미한다. 또한 편의상 E^1은 모든 원소가 0인 벡터를 E^{2^R}은 모든 원소가 1인 벡터로 할당한다.

1. FDF에 대한 R-D 링크 결합 성능분석

FDF 릴레이 시스템에서는 각 릴레이가 복호 오류 유무에 상관없이 항상 심벌을 재 생성하여 전송한다. 따라서 p번째 오류 사건에 대한 R-D 링크들을 결합한 순시 수신 SNR은 다음과 같다.

$$\gamma_C^p = \sum_{r=1}^{R} (-1)^{e_r^p} \gamma_r \tag{4}$$

또한 조건부 오류율은 γ_C^p의 영역에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$P_C^p(\gamma_C^p) = P_C^p\left(\{\gamma_r\}_{r=1}^R\right) = \begin{cases} Q(\sqrt{2\gamma_C^p}) & \gamma_C^p \geq 0 \\ 1 - Q(\sqrt{2|\gamma_C^p|}) & \text{else} \end{cases} \tag{5}$$

여기서 $Q(\sqrt{2x}) = \int_{\sqrt{2x}}^{\infty} 1/\sqrt{2\pi}\exp(-t^2/2)dt$ 이다. 상기 식을 통하여 다음의 사실을 확인할 수 있다. 즉, 각 릴레이의 복호 과정에서의 오류는 R-D 링크의 결합시 순시 수신 SNR의 감쇄를 야기하고 이에 따라 R-D 링크 결합에 따른 다이버시티 이득을 보장하지 못하게 된다. 또한 평균 오류율이 0.5보다 큰 경우가 발생할 수 있게 되는데 이는 릴레이를 사용하는 초기의 목적에 반하는 결과라 할 수 있다. 따라서 각 릴레이 단에서 복호 오류가 발생하지 않는 경우에만 전송함으로써 성능향상을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, SDF 시스템의 필요성 및 그 성능에 대한 이론적 바탕이 된다고 할 수 있다.

상기 식 (5)에 대한 적분을 수행함으로써 p번째 오류 사건에 대한 평균 오류율은 다음과 같이 표현된다.

$$P_C^p = \int_0^{\infty} \cdots \int_0^{\infty} f(\gamma_1, \cdots, \gamma_R) \times P_C^p(\{\gamma_r\}) d\gamma_1 \cdots d\gamma_R \tag{6}$$

여기서 $f(\gamma_1, \cdots, \gamma_R)$는 $\{\gamma_r\}_{r=1}^R$의 결합 확률밀도함수이다. 또한 모든 오류 사건을 고려할 때 R-D 링크 결합에 따른 평균 오류 확률은 다음과 같다.

$$P_C = \sum_{p=1}^{2^R} \prod_{r=1}^{R} \left(1 - P_b(\overline{\gamma_{R+r}})\right)^{\overline{e_r^p}} \left(P_b(\overline{\gamma_{R+r}})\right)^{e_r^p} P_C^p \tag{7}$$

여기서 $\overline{e_r^p} = (e_r^{p+1}) \bmod 2$이고 $P_b(\overline{\gamma_{R+r}})$는 r번째 S-R 링크의 평균 오류율로 다음과 같다.

$$P_b(\overline{\gamma_{R+r}}) = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\overline{\gamma_{R+r}}}{1+\overline{\gamma_{R+r}}}}\right) \tag{8}$$

여기서 $\overline{\gamma_{R+r}} = E[\gamma_{R+r}]$는 r번째 S-R 링크의 평균 수신 SNR이다.

2. FDF에 대한 S-D 및 R-D 링크 결합 성능분석

본 절에서는 S-D 링크의 수신 신호를 결합한 경우에 대한 평균 오류율 분석을 다루고자 한다. 앞 절에서 유도한 p번째 오류 사건에 대해 S-D 링크의 수신 신호를 결합할 때의 전체 수신 SNR은 $\gamma_T^p = \gamma_0 + \gamma_C^p$이 된다. 그리고 γ_T^p의 영역에 따른 조건부 오류율은 다음과 같다.

$$P_T^p(\gamma_T^p) = P_T^p\left(\{\gamma_r\}_{r=0}^R\right) = \begin{cases} Q(\sqrt{2\gamma_T^p}) & \gamma_T^p \geq 0 \\ 1 - Q(\sqrt{2|\gamma_T^p|}) & \text{else} \end{cases} \tag{9}$$

식 (6)과 유사하게 평균 오류율을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P_T^p = \int_0^{\infty} \cdots \int_0^{\infty} f(\gamma_0, \cdots, \gamma_R) \times P_C^p(\{\gamma_r\}) d\gamma_0 \cdots d\gamma_R \tag{10}$$

여기서 $f(\gamma_0, \cdots, \gamma_R)$는 $\{\gamma_r\}_{r=0}^R$의 결합 확률밀도함수이다. 그리고 릴레이 단에서의 모든 오류 사건을 고려할 때 S-D 및 R-D 링크 결합에 따른 평균 오류 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$P_T = \sum_{p=1}^{2^R} \prod_{r=1}^{R} \left(1 - P_b(\overline{\gamma_{R+r}})\right)^{\overline{e_r^p}} \left(P_b(\overline{\gamma_{R+r}})\right)^{e_r^p} P_T^p \tag{11}$$

Ⅳ. SDF 릴레이 시스템에 대한 성능분석

본 절에서는 앞 절에서 유도한 FDF 릴레이 시스템의 성능 분석 기법을 확장하여 SDF 릴레이 시스템에 대한 성능 분석을 수행하도록 한다. FDF 릴레이 시스템과는 다르게 SDF 릴레이 시스템에서는 각 릴레이가 복호과정에서 오류가 발생하지 않는 경우에만 재생성된 심벌을 전송한다. 따라서 r번째 릴레이의 재생성된 심벌은 $P_b\left(\overline{\gamma_{R+r}}\right)$의 확률로 $\hat{s^r}=0$의 값을 갖거나 $1-P_b\left(\overline{\gamma_{R+r}}\right)$의 확률로 $\hat{s^r}=s$의 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

1. SDF에 대한 R-D 링크 결합 성능분석

SDF 릴레이 시스템의 경우 식 (4)의 순시 수신 SNR을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\gamma_{C,SDF}^{p}=\sum_{r=1}^{R}\overline{e_r^p}\gamma_r \tag{12}$$

상기 식은 다음을 의미한다. 즉, SDF 릴레이 시스템에서 주어진 릴레이의 복호 결과 오류가 발생한 경우 $\left(e_r^p=1\right)$에는 $\overline{e_r^p}\gamma_r=0$가 되고 복호 결과 오류가 없는 경우$\left(e_r^p=0\right)$에는 $\overline{e_r^p}\gamma_r=\gamma_r$가 됨을 알 수 있다. 따라서 FDF의 경우와는 다르게 수신 SNR의 감쇄는 발생하지 않음을 수식적으로 확인할 수 있다.

또한 식 (5), (6) 및 (7)은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{C,SDF}^{p}\left(\gamma_{C,SDF}^{p}\right)=P_{C,SDF}^{p}\left(\{\gamma_r\}_{r=1}^{R}\right)=Q\left(\sqrt{2\gamma_{C,SDF}^{p}}\right) \tag{13}$$

$$P_{C,SDF}^{p}=\int_0^{\infty}\cdots\int_0^{\infty}f(\gamma_1,\cdots,\gamma_R)\times P_{C,SDF}^{p}\left(\{\gamma_r\}\right)d\gamma_1\cdots d\gamma_R \tag{14}$$

$$P_{C,SDF}=\sum_{p=1}^{2^R}\prod_{r=1}^{R}\left(1-P_b\left(\overline{\gamma_{R+r}}\right)\right)^{\overline{e_r^p}}\left(P_b\left(\overline{\gamma_{R+r}}\right)\right)^{e_r^p}P_{C,SDF}^{p} \tag{15}$$

단, 식 (15)에서 다음의 경우에 주의할 필요가 있다. 모든 릴레이에서 오류가 발생된 사건$\left(p=2^R\right)$의 경우 $\gamma_{C,SDF}^{p}\big|_{p=2^R}=0$이 되어 $P_{C,SDF}^{p}\big|_{p=2^R}=0.5$가 된다.

2. SDF에 대한 S-D 및 R-D 링크 결합 성능분석

본 절에서는 S-D 링크 및 R-D 링크들의 수신 신호를 결합한 경우에 대한 평균 오류율 분석을 수행하고자 한다. 앞 절에서 유도한 경우와 유사하게 p번째 오류 사건에 대해 전체 수신 SNR은 $\gamma_{T,SDF}^{p}=\gamma_0+\gamma_{C,SDF}^{p}$가 된다. 따라서 조건부 오류율은 다음과 같다.

$$P_{T,SDF}^{p}\left(\gamma_{T,SDF}^{p}\right)=P_{T,SDF}^{p}\left(\{\gamma_r\}_{r=0}^{R}\right)=Q\left(\sqrt{2\gamma_{T,SDF}^{p}}\right) \tag{16}$$

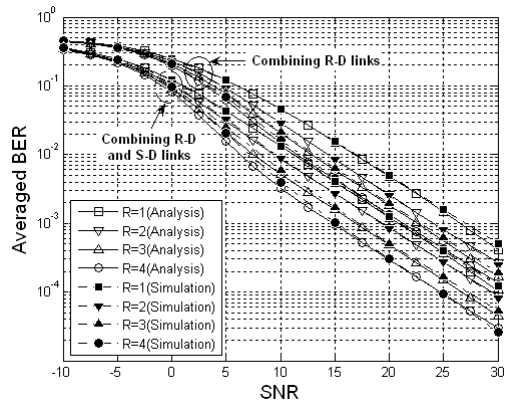


Fig. 2. Averaged BER versus SNR for FDF relay systems with respect to different number of relay nodes($R\in\{1,2,3,4\}$, $SNR=\overline{\gamma_0}$)

그림 2. FDF 릴레이 시스템에서 릴레이 수에 따른 SNR 대 평균 BER 비교($R\in\{1,2,3,4\}$, $SNR=\overline{\gamma_0}$)

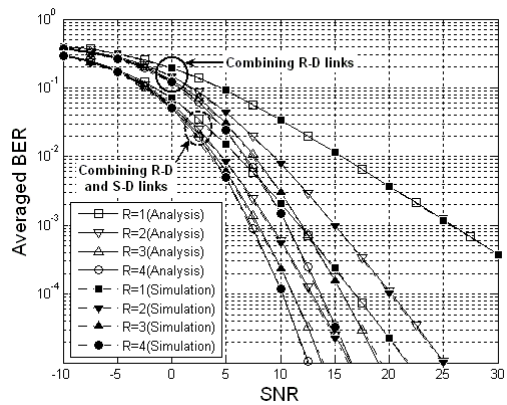


Fig. 3. Averaged BER versus SNR for SDF relay systems with respect to different number of relay nodes($R\in\{1,2,3,4\}$, $SNR=\overline{\gamma_0}$)

그림 3. SDF 릴레이 시스템에서 릴레이 수에 따른 SNR 대 평균 BER 비교($R\in\{1,2,3,4\}$, $SNR=\overline{\gamma_0}$)

또한 p번째 오류 사건에 대한 평균 오류율 및 최종적인 평균오류율은 다음과 같이 유도 된다.

$$P_{T,SDF}^{p} = \int_{0}^{\infty} \cdots \int_{0}^{\infty} f(\gamma_{0,} \cdots, \gamma_{R}) \times P_{T,SDF}^{p}(\{\gamma_r\}) d\gamma_0 \cdots d\gamma_R \quad (17)$$

$$P_{T,SDF} = \sum_{p=1}^{2^R} \prod_{r=1}^{R} \left(1 - P_b\left(\overline{\gamma_{R+r}}\right)\right)^{\overline{e_r^p}} \left(P_b\left(\overline{\gamma_{R+r}}\right)\right)^{e_r^p} P_{T,SDF}^{p} \quad (18)$$

유도된 식 (6), (10), (14) 및 (17)의 결과는 Monte Carlo 적분을 통하여 얻을 수 있다[9-10].

Ⅴ. 성능분석 및 모의실험 결과 비교

본 절에서는 제안하는 성능분석 기법의 정확성을 모의실험을 통해 검증하고 다양한 릴레이 시스템 변수들에 따른 DF 릴레이의 성능을 확인한다. 모의실험에서는 $r \in \{1,2,\cdots,R\}$에 대해 $\overline{\gamma_0} = \overline{\gamma_{R+r}}$를 즉, S-D 링크와 S-R 링크의 평균 SNR이 같다고 가정하였다. 또한 릴레이 개수 증가에 따른 다이버시티 효과를 비교 분석하기 위하여 $R \in \{1,2,3,4\}$에 대해 $\overline{\gamma_0} = \sum_{r=1}^{R} \overline{\gamma_r}$ 및 $\overline{\gamma_{r+1}} = \overline{\gamma_r} e^{-1/R}$를 가정하였다. 이는 S-D 링크에서의 전체 송신 전력과 모든 R-D 링크의 전송 전력 합이 같음을 의미하고 각 릴레이 링크 전력의 지수함수적 감소인자가 $1/R$임을 의미한다.

그림 2에서는 FDF 릴레이 시스템의 성능을 릴레이 개수 증가에 따라 비교하고 있다. 또한 R-D 링크 결합에 대한 경우와 S-D 및 R-D 링크 결합에 경우에 대해 성능 분석 결과와 모의실험 결과를 각각 비교하고 있다. 비교를 통해 제안된 성능 분석 기법이 모의실험 결과와 일치됨을 확인할 수 있다. 또한, 그림을 통하여 릴레이 개수 R이 증가됨에 따라 성능 향상을 관찰할 수 있으나 다이버시티 증가는 확인할 수 없다. 이는 성능 분석 결과에서도 예측된 바와 같이 FDF의 경우 각 릴레이가 잘못 재생성된 심벌을 전송함에 따라 수신 SNR의 감쇄와 이에 따른 오류율 증가에 기인함을 알 수 있다.

그림 3에서는 SDF 릴레이 시스템에 대한 성능 분석 결과를 모의실험 결과와 비교하고 있다. 그림을 통하여 제안된 분석 기법의 정확성을 확인할 수 있다. 그리고 SDF의 경우 릴레이 개수 R이 증가됨에 따라 다이버시티 이득을 효율적으로 획득하여 FDF보다 우수한 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

Ⅵ. 결론

본 논문에서는 DF 릴레이 시스템에 대한 의사-성능분석 기법을 레일리 페이딩 채널에 대하여 제안하였다. 제안된 분석 기법에서는 다수의 릴레이의 복호 오류 사건을 기반으로 접근하였으며 FDF 릴레이에 대한 평균 오류율 분석을 수행한 후 분석 결과를 SDF 릴레이 기법으로 확장하였다. 그리고 R-D 링크 및 S-D 링크의 결합에 따른 성능분석 또한 포함하였다. 제안된 성능분석 기법의 정확성은 모의실험을 통하여 검증되었다. 성능분석 및 모의실험을 통하여 SDF 릴레이 시스템이 FDF 릴레이 시스템에 비해 다이버시티 획득에 의한 성능 향상 정도가 큼을 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 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

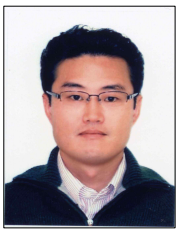
[5] Tairan Wang, Alfonso Cano, Georgios B. Giannakis, and J. Nicholas Laneman, "High-Performance Cooperative Demodulation With Decode-and-Forward Relays," *IEEE Trans. on Comm.*, Vol. 55, no. 7, pp. 1427-1438, July. 2007

[6] 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
[7] John G. Proakis, *Dgital Communications*. New York: Gaw-Hill, 1995
[8] John Boyer, David D, and Halim Yanikomeroglu, "Multihop Diversity in Wireless Relaying Channels," *IEEE Trans. on Comm*, Vol. 52, no. 10, pp. 1820-1830, Oct. 2004
[9] William H. Tranter, K. Sam Shanmugan, Theodore S. Rappaport, and Kurt L. Kosbar, *Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall, 2004
[10] 고균병, 서정태, "다중경로 간섭제거기법을 적용한 다중코드 CDMA 시스템 성능 분석에서의 부가적 가우시안 근사화에 의한 영향 분석", *대한전자공학회*, 제45권 TC편 제8호, 2008년, pp. 75-81

저 자 소 개

고 균 병 (정회원)



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

서 정 태 (정회원)

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