

최선 릴레이 선택을 적용한 OFDM 기반 이중-홉 다중 릴레이 시스템의 아웃티지 성능 분석

준회원 박재철*, 왕진수*, 이지혜*, 종신회원 김윤희*

Outage Analysis of OFDM-Based Dual-hop Multi-Relay Systems with Best Relay Selection

Jae Cheol Park*, Jin Soo Wang*, Ji Hye Lee* *Associate Members,*
Yun Hee Kim* *Lifelong Member*

요약

본 논문은 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 기반 이중-홉 다중 릴레이 시스템에서 상호정보를 최대화 하는 릴레이 선택 기법을 고려한다. 상기 시스템에서 DF (decode-and-forward) 릴레이를 적용할 때와 AF (amplify-and-forward) 릴레이를 적용할 때에 대해 각각 시스템 아웃티지 확률에 대한 하한과 제공 가능한 최대 다양성 차수를 유도하고 모의실험으로 아웃티지 용량을 제공한다. 성능 평가 결과 DF와 AF 방식 모두 아웃티지 확률 하한과 동일한 다양성 차수를 제공하지만, DF가 AF보다 아웃티지 확률 하한에 더 가깝고 더 큰 아웃티지 용량을 제공함을 볼 수 있다. 또한, 플랫 페이딩과 달리 주파수 선택성 채널에서는 다중 경로 수가 증가하거나 릴레이 선택의 후보 릴레이 수가 증가할수록 AF에 대한 DF 방식의 성능 이득이 더욱 커짐을 볼 수 있다. 따라서, OFDM 기반 다중 릴레이 시스템에서는 성능 면에서 AF 릴레이보다는 DF 릴레이가 유리함을 알 수 있다.

Key Words : Amplify-and-forward, Decode-and-forward, OFDM, Outage Probability, Outage Capacity, Relay Selection

ABSTRACT

This paper presents an OFDM-based dual-hop multi-relay system with best relay selection maximizing the mutual information. For the system either with decode-and-forward (DF) relays or with amplify-and-forward (AF) relays, we derive a lower-bound on the outage probability and the diversity order achievable in frequency selective fading channels and provide the outage capacity from simulation. Performance evaluation shows that both DF and AF provide the same diversity order as in the lower-bound but DF of which the outage probability is much closer to the lower-bound provides a better outage capacity than AF. It is also observed that the SNR gain of DF over AF gets larger as either the number of resolvable multipaths or the number of relay candidates increases, which makes DF relaying more favorable to the OFDM-based multi-relay system.

1. 서론

최근 ad hoc 시스템과 셀룰러 시스템에서 전송 신

뢰도를 높이고 적은 비용으로 서비스 가능 범위를 확장하는 방법으로 릴레이에 대한 관심이 증폭되고 있다^[1-2]. 릴레이 방식은 크게 릴레이 노드가 수신 신호

* 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-314-D00311)

* 경희대학교 전자전파공학과 (jcpark@khu.ac.kr, delta310@khu.ac.kr, yoyo278@khu.ac.kr, yheekim@khu.ac.kr)

논문번호 KICS2010-02-086, 접수일자 : 2010년 1월 14일, 최종논문접수일자: 2010년 3월 19일

를 복호하여 다시 심볼을 생성 전달하는 DF (decode-and-forward) 방식과 수신 신호의 크기만 단순히 증폭하는 AF (amplify-and-forward) 방식으로 분류할 수 있다³⁾. 최근 몇 년 동안 이러한 릴레이 방식을 다양한 시스템 환경으로 확장 적용하고 성능을 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 예를 들어 다중 릴레이 시스템에서의 분산 시공간 부호화, 릴레이 선택 또는 릴레이 빔형성 기법과 다중 송수신 안테나 릴레이 전송 방법 등이 있다⁴⁻⁷⁾.

지금까지 릴레이 전송 방식에 대한 연구는 주로 단일 반송과 협대역 통신 시스템에 집중되었는데, 광대역 통신을 위해서는 주파수 선택적 페이딩을 겪는 채널에서의 연구가 필요하다. 근래에 주파수 선택성 채널에서 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 방식을 적용할 때 릴레이 전송 방식과 성능 분석에 대한 다양한 연구가 진행되고 있는데⁸⁻¹²⁾, 대부분의 연구가 AF 릴레이를 기반으로 하고 있다.

OFDM 관련 연구에서 이중-홉 다중 릴레이 시스템을 고려한 연구로 [8], [11], [12]를 들 수 있는데, [8]은 분산 시공간 부호화를 적용하고 [11]과 [12]는 시스템 구현이 용이한 릴레이 선택을 적용하였다. 성능 분석 방법으로 [8]과 [12]는 OFDM 병렬 데이터에 대한 쌍-오류율을 유도하였으며, 그 결과 두 방식 모두 시스템이 제공하는 최대 다양성 차수가 동일함을 볼 수 있었다. 한편, [11]에서는 릴레이 노드 선택 방법에 대한 성능 분석 방법으로 채널 부호화가 제공 가능한 최대 성능을 예측하는 아웃티지 확률을 유도하였는데, 유도 과정에서 부반송파별로 독립 페이딩을 겪는다고 가정하였기 때문에 실제 무선 채널에서의 성능과는 크게 다르게 된다.

이에 본 논문은 OFDM 기반 이중-홉 다중 릴레이 시스템에서 상호정보를 최대로 하는 단일 릴레이를 선택할 때 실제적인 무선 채널 모형에서의 아웃티지 성능을 분석한다. 특히 AF 릴레이로 구성된 시스템뿐만 아니라 DF 릴레이로 구성된 시스템도 함께 고려하고 아웃티지 확률에 대한 하한을 유도하여 시스템이 제공 가능한 부호화 성능의 최대 성능과 최대 다양성 차수를 예측할 수 있도록 한다. 또한, 모의실험으로 아웃티지 용량을 제공함으로써 저속 이동 환경에서 광대역 시스템이 제공 가능한 전송률 한계를 제공하며, 채널의 주파수 다양성과 릴레이 선택 다양성이 AF와 DF 방식의 성능에 미치는 영향을 살펴본다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 OFDM 기반 릴레이 시스템 모형과 채널 모형을 설명하고, III장에서 상호정보, 아웃티지 확률의 하한, 그리고 시스템이

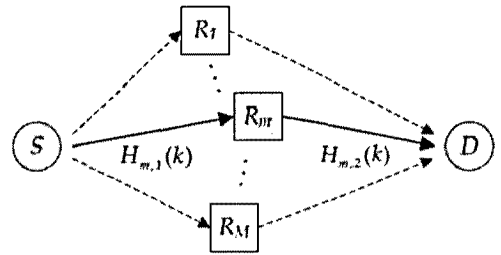


그림 1. 이중-홉 다중 릴레이 시스템 모형

제공하는 다양성 차수를 유도한다. IV장에서는 실제적인 무선 채널 모형에서 분석 결과와 모의실험과 아웃티지 확률과 용량을 살펴보고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모형

그림 1은 본 논문에서 고려한 단일 원천 노드 S와 단일 목적 노드 D, 그리고 M 릴레이 노드 $\{R_m, m=1,2,\dots,M\}$ 로 구성된 이중-홉 다중 릴레이 시스템을 보인 것이다. 모든 노드는 반이중 (half-duplex) 방식으로 통신하고 원천 노드와 목적 노드 간의 직접 링크는 무시할만하다고 가정한다. 원천 노드 송신 신호는 M 릴레이 노드 가운데 선택된 한 릴레이 노드를 거쳐 목적 노드로 전달된다.

각 홉에서 릴레이와 원천 (또는 목적) 노드간 채널은 주파수 선택적 페이딩 특성을 띄며, 한 부호어를 전송하는 동안 채널의 시간 변화는 없다고 가정한다. 그러면, i ($=1,2$)째 홉에서 m 째 릴레이를 거치는 채널인 (m,i) 채널에 대한 채널 충격 응답은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$h_{m,i}(\tau) = \sum_{l=1}^{L_{m,i}} h_{m,i,l} \delta(\tau - \tau_{m,i,l}) \quad (1)$$

여기서, $L_{m,i}$ 은 (m,i) 채널의 구분 가능한 다중경로 수이고, $h_{m,i,l}$ 과 $\tau_{m,i,l}$ 은 (m,i) 채널의 l 째 경로에 대한 복소 페이딩 진폭과 시간 지연을 나타낸다. 레일리 페이딩을 고려하면 복소 페이딩 진폭 $\{h_{m,i,l}\}_{l=1}^{L_{m,i}}$ 은 서로 독립이고 분포가 $CN(0, \zeta_{m,i,l})$ 이다. 여기서, $CN(m, \sigma^2)$ 은 평균이 m 이고 분산이 σ^2 인 순환 대칭 복소 가우시안 분포를 나타내고, $\{\zeta_{m,i,l}\}_{l=1}^{L_{m,i}}$ 는 $\sum_{l=1}^{L_{m,i}} \zeta_{m,i,l} = 1$ 로 정규화된 다중경로 전력 분포를 나타낸다.

각 노드는 다중경로에 의한 심볼간간섭을 충분히 없앨 수 있는 부반송파 수가 N 인 OFDM 방식을 적

용한다고 가정하자. 첫 번째 홉에서 원천 노드는 $\{S(k)\}_{k=0}^{N-1}$ 심볼을 OFDM 방식에 의한 병렬 채널로 릴레이에게 전달하고, 두 번째 홉에서 릴레이 노드는 DF 또는 AF 방법에 따라 송신 심볼 $\{\hat{S}(k)\}_{k=0}^{N-1}$ 를 생성한 뒤 OFDM 방식으로 목적 노드에 전달한다. 이때, 원천 노드에서의 심볼별 평균 송신 전력은 P_1 , 릴레이 노드에서의 심볼별 평균 송신 전력은 P_2 이다.

송신 심볼이 m 째 릴레이 노드를 거쳐 목적 노드로 전송될 경우 릴레이 노드와 목적 노드가 수신한 k 째 부반송파 수신된 심볼은 각각

$$Y_{R,m}(k) = \sqrt{P_1} H_{m,1}(k)S(k) + W_{R,m}(k) \quad (2)$$

와

$$Y_D(k) = \sqrt{P_2} H_{m,2}(k)\hat{S}_m(k) + W_D(k) \quad (3)$$

로 쓸 수 있다. 여기서, $H_{m,i}(k)$ 는 (m,i) 채널의 k 째 부반송파에서의 채널 주파수 응답으로 부반송파 간격이 $1/T$ 일 때 다음과 같다.

$$H_{m,i}(k) = \sum_{l=0}^{L_{m,i}-1} h_{m,i,l} e^{-j2\pi k \frac{\tau_{m,i,l}}{T}} \quad (4)$$

한편, $W_{R,m}(k)$ 와 $W_D(k)$ 는 m 째 릴레이 노드와 목적 노드에서의 배경 잡음으로 확률 분포가 각각 $CN(0, \sigma_1^2)$ 와 $CN(0, \sigma_2^2)$ 이다. DF 적용 시 릴레이 노드에서 복호가 올바르게면 $\hat{S}_m(k) = S(k)$ 이고, 복호 오류가 발생하면 $\hat{S}_m(k) \neq S(k)$ 이다. 한편 AF 전송 시 릴레이 송신 심볼은 수신 심볼을 단순 증폭한 결과로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\hat{S}_m(k) = \sqrt{\frac{1}{P_1|H_{m,1}(k)|^2 + \sigma_1^2}} Y_{R,m}(k) \quad (5)$$

상기 릴레이 시스템은 M 릴레이 노드가 모두 DF 방식을 또는 모두 AF 방식을 적용할 때에 대해 각각 상호정보량이 가장 큰 릴레이를 선택한다.

III. 성능 분석

3.1 상호정보

원천 노드에서 목적 노드까지 m 째 DF (AF) 릴레이를 거쳐 신호를 전달할 때의 상호정보를

I_m^{DF} (I_m^{AF})로 두면, 릴레이 선택에 의한 상호정보 I_{RS}^{DF} (I_{RS}^{AF})는 다음과 같다.

$$I_{RS}^a = \max_{1 \leq m \leq M} I_m^a, \quad a = DF, AF \quad (6)$$

시스템이 DF 릴레이로 구성된 경우 릴레이 노드와 목적 노드가 모두 정보를 올바르게 복호할 경우에만 정보 전송에 성공하므로^[3], m 째 릴레이를 통해 전달될 수 있는 상호정보는 다음과 같다.

$$I_m^{DF} = \frac{1}{2} \min(I_{m,1}, I_{m,2}) \quad (7)$$

여기서, 상수 $1/2$ 은 이중-홉 전송에 의한 손실을 반영하고, $I_{m,i}$ 는 (m,i) 채널의 상호정보로 k 째 부반송파에서의 수신 신호대잡음비

$$\mu_{m,i}(k) = P_i |H_{m,i}(k)|^2 / \sigma_i^2 \quad (8)$$

로부터 다음과 같이 얻을 수 있다^[13].

$$I_{m,i} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \log_2(1 + \mu_{m,i}(k)) \quad (9)$$

한편, 시스템이 AF 릴레이로 구성된 경우 목적 노드에서만 정보를 복호하므로 수신 심볼 (3)의 신호대잡음비

$$\lambda_m(k) = \frac{\mu_{m,1}(k)\mu_{m,2}(k)}{\mu_{m,1}(k) + \mu_{m,2}(k) + 1} \quad (10)$$

로부터 상호정보량이 다음과 같이 결정된다.

$$I_m^{AF} = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left(1 + \frac{\mu_{m,1}(k)\mu_{m,2}(k)}{\mu_{m,1}(k) + \mu_{m,2}(k) + 1} \right) \quad (11)$$

식 (9)에 대한 상한을

$$I_{m,i}^{UB} = \log_2 \left(1 + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mu_{m,i}(k) \right) \quad (12)$$

으로 정의하고, 이로부터 다음을 정의하면 정리 1을 얻을 수 있다.

$$I_m^{UB} = \frac{1}{2} \min(I_{m,1}^{UB}, I_{m,2}^{UB}) \quad (13)$$

정리 1. AF 릴레이와 DF 릴레이의 상호정보는 다음의 부등식을 만족한다.

$$I_m^{AF} \leq I_m^{DF} \leq I_m^{UB} \quad (14)$$

[증명] 먼저, 왼쪽 부등식 $I_m^{AF} \leq I_m^{DF}$ 를 보이기 위해 $I_m^{AF} - \frac{1}{2} I_{m,1}$ 와 $I_m^{AF} - \frac{1}{2} I_{m,2}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$I_m^{AF} - \frac{1}{2} I_{m,i} = \frac{1}{2N} \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left(\frac{1 + \mu_{m,i'}(k)}{1 + \mu_{m,1}(k) + \mu_{m,2}(k)} \right) \leq 0 \quad (15)$$

여기서, $(i, i') = (1, 2)$ 또는 $(2, 1)$ 이다. 식 (15)에서 로그 함수 안의 분자가 분모보다 항상 작거나 같기 때문에 로그 값은 항상 양이 아닌 값을 가진다. 즉, $I_m^{AF} \leq 0.5 I_{m,1}$ 와 $I_m^{AF} \leq 0.5 I_{m,2}$ 이므로 $I_m^{AF} \leq I_m^{DF} = 0.5 \min(I_{m,1}, I_{m,2})$ 이다. 한편, 식 (14)의 오른쪽 부등식 $I_m^{DF} \leq I_m^{UB}$ 는 Jensen 부등식에 의해 $I_{m,i} \leq I_{m,i}^{UB}$ 임이 자명하므로, 그에 따라 $I_m^{DF} = 0.5 \min(I_{m,1}, I_{m,2}) \leq I_m^{UB} = 0.5 \min(I_{m,1}^{UB}, I_{m,2}^{UB})$ 임을 쉽게 보일 수 있다.

3.2 아웃티지 성능

고려한 시스템에서 원천 노드가 전송률 R bps/Hz로 정보를 전송할 때 정보 전달에 실패할 아웃티지 확률은 다음과 같다.

$$P_{out}^a(R) = \Pr\{I_{RS}^a < R\} = \prod_{m=1}^M \Pr\{I_m^a < R\}, \quad (16)$$

$a = DF, AF$

이 때 $q\%$ 의 확률로 아웃티지를 일으키는 전송률을 $q\%$ 아웃티지 용량이라 하고 이는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{out,q} : P_{out}^a(R) = \Pr\{I_{RS}^a < C_{out,q}\} = q\% \quad (17)$$

이러한 아웃티지 확률과 아웃티지 용량은 I_m^{DF} 와 I_m^{AF} 의 복잡성에 의해 정확하게 구하기 어렵다. 이에 본 절에서는 정리 1로부터 얻은 I_m^{DF} 와 I_m^{AF} 의 상한

I_m^{UB} 을 적용하여 식 (16)에 대한 근사값으로 $P_{out}^a(R)$ 에 대한 하한을 다음과 같이 구하기로 한다.

$$P_{out}^{LB}(R) \triangleq \prod_{m=1}^M \Pr\{I_m^{UB} < R\} \leq P_{out}^a(R) \quad (18)$$

식 $\Pr\{I_m^{UB} < R\}$ 를 쉽게 유도할 수 있도록 부반송파별 신호대잡음비의 평균

$$X_{m,i} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mu_{m,i}(k) \quad (19)$$

를 정의하면, 식 (13)은

$$I_m^{UB} = 0.5 \log_2(1 + \min(X_{m,1}, X_{m,2})) \quad (20)$$

으로 다시 쓸 수 있고 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Pr\{I_m^{UB} < R\} = 1 - \prod_{i=1}^2 \Pr\{X_{m,i} > 2^{2R} - 1\} \quad (21)$$

따라서, 식 (18)은 다음과 같이 $X_{m,i}$ 의 누적분포함수 $F_{X_{m,i}}(\cdot)$ 로 나타낼 수 있다.

$$P_{out}^{LB}(R) = \prod_{m=1}^M \left[1 - \prod_{i=1}^2 \{1 - F_{X_{m,i}}(2^{2R} - 1)\} \right] \quad (22)$$

즉, $X_{m,i}$ 에 대한 분포를 알면 아웃티지 확률의 하한을 바로 얻을 수 있다.

본 논문에서는 Parseval 정리를 적용하여 $X_{m,i}$ 의 분포를 얻는다. 즉, 주파수 영역에서의 에너지의 합은 시간 영역에서의 에너지 합과 같음을 적용하면

$$X_{m,i} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mu_{m,i}(k) = \sum_{l=1}^{L_{m,i}} \eta_{m,i,l} \quad (23)$$

이고, 여기서 $\eta_{m,i,l} = P_i |h_{m,i,l}|^2 / \sigma_i^2$ 는 시간 영역에서 l 째 경로의 수신 신호대잡음비로 레일리 페이딩에서 평균이 $\bar{\eta}_{m,i,l} = P_i \zeta_{m,i,l} / \sigma_i^2$ 인 지수 분포를 갖는다. 즉, $X_{m,i}$ 는 $L_{m,i}$ 개의 독립인 지수 확률 변수의 합이며, 평균 $\rho_i = E\{X_{m,i}\} = P_i / \sigma_i^2$ 는 (m, i) 채널의 수신 신호대잡음비를 나타낸다.

실제 채널과 비슷한 채널 모형을 고려하기 위해 각 무선 채널의 다중경로 전력 분포가 비균일할 경우를 고려하면 (즉, $\bar{\eta}_{m,i,1} \neq \bar{\eta}_{m,i,2} \neq \dots \neq \bar{\eta}_{m,i,L}$), $X_{m,i}$ 의 적률생성함수는

$$M_{X_{m,i}}(s) = \prod_{l=1}^{L_{m,i}} \frac{1}{(1 - s\bar{\eta}_{m,i,l})} \quad (24)$$

이고, 그에 대한 누적분포 함수는 $x \geq 0$ 에 대해 다음과 같다^[14].

$$F_{X_{m,i}}(x) = \sum_{l=1}^{L_{m,i}} \prod_{n=1, n \neq l}^{L_{m,i}} \left(1 - \frac{\bar{\eta}_{m,i,l}}{\bar{\eta}_{m,i,n}} \right) (1 - e^{-x/\bar{\eta}_{m,i,l}}) \quad (25)$$

특별한 경우로 각 무선 채널의 다중경로 전력 분포가 균일할 경우 (즉, $\bar{\eta}_{m,i,l} = \rho_i/L_{m,i}$), 누적분포함수는 간단하게 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{X_{m,i}}(x) = \frac{\gamma(L_{m,i}, L_{m,i}x/\rho_i)}{\Gamma(L_{m,i})}, \quad x \geq 0 \quad (26)$$

여기서, $\gamma(\alpha, x) = \int_0^x u^{\alpha-1} e^{-u} du$ 는 불완전 감마 함수이고, $\Gamma(\alpha) = \gamma(\alpha, \infty)$ 는 완전 감마 함수이다. 따라서, 식 (22)에 식 (25) 또는 (26)를 대입하면 아웃지 확률의 하한을 얻을 수 있다.

3.3 획득 가능 다양성 차수

고려한 릴레이 시스템이 제공하는 최대 다양성 차수를 유도하기 위해, 모든 채널이 다중경로 전력 분포가 균일하고, 각 홉의 평균 신호대잡음비가 $\rho = \rho_i$ 로 같다고 가정하자. 이 경우 아웃지 확률의 하한은 다음과 같다.

$$P_{out}^{LB}(R) = \prod_{m=1}^M \left[\frac{\gamma\left(L_{m,1}, \frac{L_{m,1}x}{\rho}\right)}{\Gamma(L_{m,1})} + \frac{\gamma\left(L_{m,2}, \frac{L_{m,2}x}{\rho}\right)}{\Gamma(L_{m,2})} - \frac{\gamma\left(L_{m,1}, \frac{L_{m,1}x}{\rho}\right) \gamma\left(L_{m,2}, \frac{L_{m,2}x}{\rho}\right)}{\Gamma(L_{m,1}) \Gamma(L_{m,2})} \right] \quad (27)$$

여기서, 감마 함수 $\gamma(\alpha, x)$ 를 수열로 표현하면

$$\gamma(\alpha, x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{n+\alpha}}{n!(n+\alpha)} \quad (28)$$

이므로^[15], 신호대잡음비 ρ 가 매우 클 때 불완전 감마 함수는 $\gamma(\alpha, x) \approx x^\alpha/\alpha$ 로 근사화할 수 있다. 따라서, 신호대잡음비가 클 때의 아웃지 확률의 하한은 근사적으로

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} P_{out}^{LB}(R) \approx \prod_{m=1}^M \min(\rho^{-L_{m,1}}, \rho^{-L_{m,2}}) \quad (29)$$

이므로, 시스템이 제공하는 최대 다양성 차수 다음과 같이 주어진다.

$$d_o = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{-\log(P_{out}^{LB}(R))}{\log \rho} = \sum_{m=1}^M \min(L_{m,1}, L_{m,2}) \quad (30)$$

이는 기존 논문에서 쌍오류율로 구한 직접 경로가 없을 때의 최대 다양성 차수와 동일하다.

IV. 모의 실험

본 절에서는 OFDM 기반 다중 릴레이 시스템의 아웃지 성능을 모의실험과 성능 하한으로 살펴본다. OFDM 시스템 파라미터로 샘플링 주파수는 $f_s = 7.28$ MHz, 부반송파 수는 $N = 128$, 부반송파 주파수 간격은 $1/T = 60$ kHz로 두었다. 성능을 단순화하기 위해 본 논문에서는 모든 (m, i) 채널에 동일한 다중경로 전력 분포를 적용하였다 ($L = L_{m,i}$, $\zeta_l = \zeta_{m,i,l}$). 채널 모형은 다중경로 전력분포가 단일 경로로 구성된 플랫폼 페이딩인 경우 ($L = 1$), 주파수 선택성이 낮은 ITU-R 보행자 (Ped) A 인 경우 ($L = 4$), 주파수 선택성이 높은 ITU-R 차량 (Veh) A 인 경우 ($L = 6$)를 고려하였다^[16]. 또한, 각 홉의 평균 신호대잡음비는 $P/\sigma^2 = \rho_1 = \rho_2$ 로 동일하다고 가정하였다.

그림 2는 목표 전송률이 $R = 1$ bps/Hz이고 릴레이 노드가 하나일 때, 채널 모형에 따른 DF와 AF 릴레이 전송 방식의 아웃지 확률을 보인 것이다. 그림에서 ‘DF’와 ‘AF’는 모의실험 결과를 나타내고, ‘LB’는 이론적으로 얻은 하한 $P_{out}^{LB}(R)$ 를 나타낸다. 먼저 정리 1에서 이미 예측했듯이 OFDM 전송에서도 직접 경로가 없을 경우 DF 릴레이가 AF 릴레이보다 아웃지 성능이 더 좋으며, 본 논문에서 제공하는 이론적 하한이 두 릴레이 전송 방식이 제공 가능한 최대 성능 한

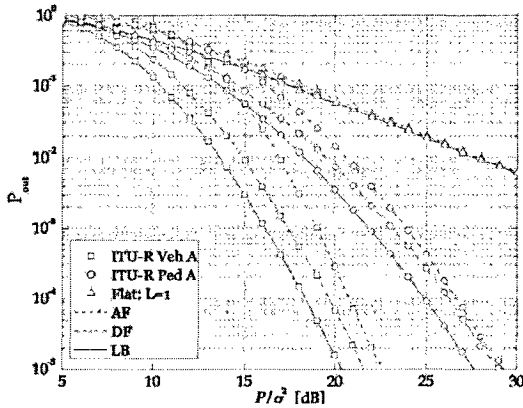


그림 2. 전송률 R=1 bps/Hz 일 때, 다양한 채널 모형에서 단일 릴레이가 존재하는 경우에 아웃티지 확률

계를 제공함을 알 수 있다. 기존의 플랫폼 페이딩 채널과는 달리 주파수 선택성 채널에서 OFDM 방식을 적용할 경우 DF 릴레이 성능이 AF 릴레이보다 성능 향상이 큰 것을 볼 수 있다. 특히, 다중경로 수가 많은 채널에서 ('ITU-R Veh A') DF의 성능 향상이 더욱 큼을 볼 수 있다. 이는 AF의 경우 부반송파별로 두 홉의 신호대잡음비가 작은 경로 성능이 결정되는 반면 DF는 두 홉의 성능 평균 가운데 작은 것으로 결정되기 때문이다.

한편, 릴레이 기법에 상관없이 아웃티지 확률 곡선의 기울기는 채널의 다중 경로 수에 따라 증가한다. 특히, 아웃티지 확률이 10^{-4} 이하이면 모의실험으로 얻은 아웃티지 확률 기울기가 릴레이 방식에 상관없이 이론적으로 얻은 성능 하한의 기울기와 비슷함을 볼 수 있는데, 이는 성능 하한으로 릴레이 방식에 상관없이 다양성 차수를 예측 가능함을 알려준다.

그림 3은 목표 전송률이 $R=1$ bps/Hz 일 때, ITU-R 보행자 A 채널에서, M 릴레이 가운데 최선 릴레이 선택을 적용했을 때의 아웃티지 확률을 보인 것이다. 아웃티지 확률 하한은 ('LB')은 DF 기반 릴레이 시스템의 성능을 잘 예측함을 볼 수 있다. 또한, 릴레이 후보 수 M 이 증가할수록 선택 다양성에 의해 성능이 크게 향상됨을 볼 수 있다. 즉, 성능 곡선 그래프의 기울기가 릴레이 시스템이 제공하는 다양성 차수 $4M$ 에 비례하여 가파르게 된다. 주파수 선택성 채널에서 OFDM을 적용할 경우 DF 릴레이의 신호대잡음비 이득이 AF 릴레이 보다 크고, 성능 이득은 릴레이 수가 늘어날수록 더욱 커짐을 볼 수 있다.

그림 4는 OFDM 기반 다중 DF 릴레이 시스템에서 다중경로 채널이 제공하는 채널 다양성과 릴레이 선

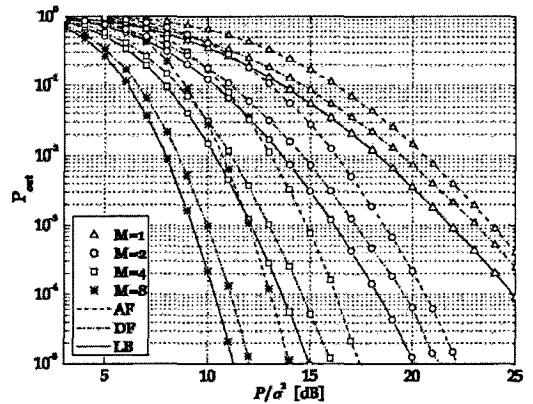


그림 3. 전송률이 R=1 bps/Hz 일 때, ITU-R 보행자 A 채널에서 다양한 릴레이 수에 대하여 릴레이 선택을 고려한 아웃티지 확률

택에 의한 선택 다양성에 따른 성능 영향을 보여준다. ITU-R 보행자 A 채널에서의 다양성 차수는 $4M$ 이고 ITU-R 차량 A 채널에서의 다양성 차수는 $6M$ 이므로, 그림에서 그래프 기울기 순으로 다양성 차수는 4, 6, 16, 24이다. 먼저 모의실험 결과와 성능 하한 차는 무선 채널의 다중경로 특성에 의해 결정되고 릴레이 선택과는 상관이 거의 없는 것을 볼 수 있다. 또한, 다중 경로 수가 적은 무선 채널에서 릴레이 선택에 의한 성능 향상은 더욱 큼을 볼 수 있다.

그림 5와 6은 그림 3과 4에서 고려한 조건 각각에 대해 1% 아웃티지 용량 $C_{out,1}$ 을 보여준다. 그림 5에서 DF가 AF보다 더 높은 전송률로 데이터 전송을 하면서 같은 신뢰도를 제공함을 알 수 있다. 또한 후보 릴레이 수 M 이 증가할수록 DF와 AF 간의 아웃티지

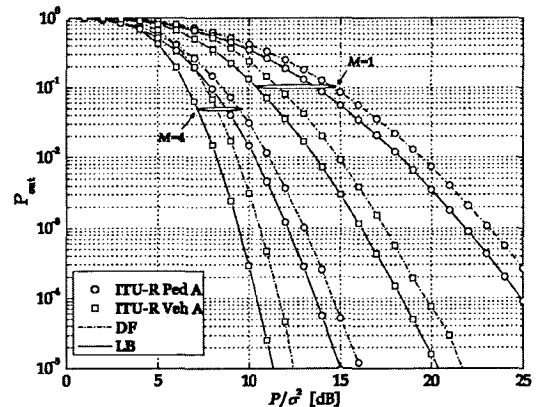


그림 4. 전송률이 R=1 bps/Hz 일 때, 다른 다양성 차수에 대하여 릴레이 선택을 고려한 아웃티지 확률

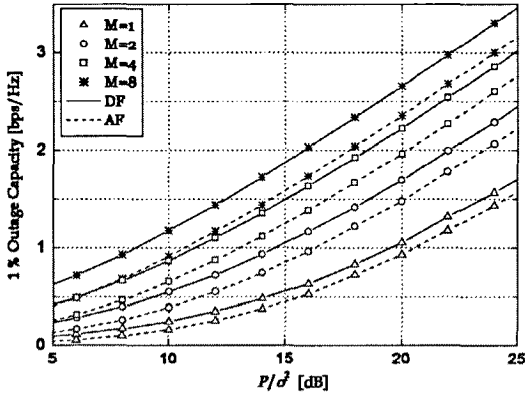


그림 5. ITU-R 보행자 A 채널에서 다양한 릴레이 수에 대하여 릴레이 선택을 고려하였을 때, 1% 아웃티지 확률을 만족시키는 아웃티지 용량

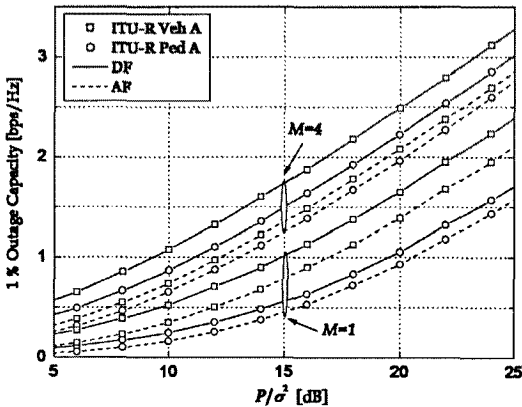


그림 6. 다른 다양성 차수에 대하여 릴레이 선택을 고려하였을 때, 1% 아웃티지 확률을 만족시키는 아웃티지 용량

용량 차가 점차 증가함을 알 수 있다. 한편, 그림 6에서 릴레이 후보 노드 수 M 이 같을 때, 아웃티지 용량은 채널의 주파수 다양성 차수가 높은 ITU-R 차량 A 채널이 ITU-R 보행자 A 채널보다 큰 것을 알 수 있다. 또한 DF가 AF보다 큰 아웃티지 용량을 제공하며, 후보 릴레이 노드 수 M 과 채널의 주파수 선택성이 높을수록 용량 차이가 커짐을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 여러 릴레이가 있는 OFDM 기반 릴레이 시스템에서 릴레이가 DF 또는 AF로 전송할 때 상호 정보량을 최대로 하는 단일 릴레이 선택 기법의 성능을 분석하고 비교하였다. 상기 시스템을 위해 유도한 아웃티지 확률의 하한은 임의의 다중경로 전력 분포

를 갖는 주파수 선택성 레일리 페이딩 채널에서 시스템이 제공 가능한 최대 부호화 성능과 획득 가능한 양성 차수 $\sum_{m=1}^M \min(L_{m,1}, L_{m,2})$ 에 대한 정보를 제공한다. 모의실험 결과 플랫 페이딩 채널에서는 DF와 AF 성능이 거의 비슷하지만, OFDM을 적용한 주파수 선택성 채널에서는 DF가 AF보다 아웃티지 성능이 우수하고 주파수 선택성이 커지거나 릴레이 선택 후보 수가 클수록 성능 이득이 더욱 증가함을 볼 수 있었다. 따라서, OFDM 기반의 다중 릴레이 시스템에서 단일 릴레이 선택을 적용할 경우 성능 측면에서 AF 릴레이보다는 DF 릴레이를 적용하는 것이 바람직하다.

참고 문헌

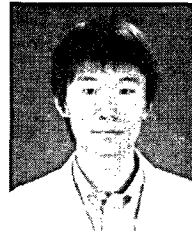
- [1] R. Pabst, et al., "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 42, No. 9, pp. 80-89, Sept. 2004.
- [2] D. Soldani and S. Dixit, "Wireless relays for broadband access," *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 46 No. 3, pp. 58-66, Mar. 2008.
- [3] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 49, No. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.
- [4] 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. 3062-3080, Dec. 2004.
- [5] A. Belta, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 24, No. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [6] Y. Jing and H. Jafarkhani, "Network beamforming using relays with perfect channel information," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 55, No. 6, pp. 2499-2517, June 2009.
- [7] S. Berger, M. Kuhn, and A. Wittneben, "Recent advances in amplify-and-forward two-hop relaying," *IEEE Commun. Mag.*,

Vol. 47, No. 7, pp. 50-56, July 2009.

- [8] M. Mheida, M. Uysal, and N. Al-Dhahir, "Equalization techniques for distributed space-time block codes with amplify-and-forward relaying," *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 55, No. 5, pp. 1839-1852, May 2007.
- [9] I. Hammerström and A. Wittneben, "Power allocation schemes for amplify-and-forward MIMO-OFDM relay links," *IEEE Wireless Commun.*, Vol. 11, No. 9, pp. 2798-2802, Aug. 2007.
- [10] H. A. Suraweera and J. Armstrong, "Performance of OFDM-based dual-hop amplify-and-forward relaying," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 11, No. 9, pp. 726-728, Sept. 2007.
- [11] M. Kaneko, K. Hayashi, P. Popovski, K. Ikeda, H. Sakai, and R. Prasad, "Amplify-and-forward cooperative diversity schemes for multi-carrier systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 7, No. 5, pp. 1845-1850, May 2008.
- [12] Y. Ding and M. Uysal, "Amplify-and-forward cooperative OFDM with multiple-relays: performance analysis and relay selection methods," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 8, No. 10, pp. 4963-4968, Oct. 2009.
- [13] M. R. McKay, R. J. Smith, H. A. Suraweera, and I. B. Collings, "On the mutual information distribution of OFDM-based spatial multiplexing: exact variance and outage approximation," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 54, No. 7, pp. 3260-3278, July 2008.
- [14] A. M. Mathai, "Storage capacity of a dam with gamma type inputs," *Annal Inst. Statist. Math. (Part A)*, Vol. 34, pp. 591-597, 1982.
- [15] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 7th Ed., Academic, Burlington, MA, 2007
- [16] Recommendation ITU-R M.1225, "Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000," 1997.

박재철 (Jae Cheol Park)

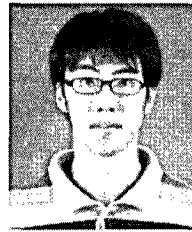
준회원



2009년 2월 경희대학교 전자공학과 공학사
 2009년 3월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정
 <관심분야> 이동/무선 통신, 통신이론

왕진수 (Jin Soo Wang)

준회원



2009년 2월 경희대학교 전자정보학부 공학사
 2009년 3월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정
 <관심분야> MIMO-OFDM, 부호화 협력, 이동통신

이지혜 (Ji Hye Lee)

준회원



2009년 2월 경희대학교 전자정보학부 공학사
 2009년 3월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정
 <관심분야> OFDM, 인지 라디오

김윤희 (Yun Hee Kim)

종신회원



1995년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학사
 1997년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 공학석사
 2000년 1월~2000년 4월 UCSD 방문 연구원
 2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과 박사
 2000년 9월~2004년 8월 한국전자통신연구원 선임 연구원
 2004년 9월~현재 경희대학교 전자정보학부 조교수, 부교수
 2006년 1월~현재 IEEE 준석학회원, 한국통신학회 논문지 편집위원
 <관심분야> 이동/무선 통신, 통신이론, 통계학적 신호처리, 부호이론