

<http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.2.215>

JIWIT 2012-2-27

수신가지수가 고정되어있을 때 DOT 릴레이 시스템의 최적전력할당

Optimal Power Allocation of DOT Relay System with Fixed Branch Receiver

황휘진*, 김남수**

Hwi-Jin Hwang, Nam-Soo Kim

요약 무선 Ad-Hoc 네트워크는 전력제한을 갖기 때문에 네트워크의 소모 전력을 최소화 하는 것이 최근의 연구 주제 중 하나이다. 본 논문은 최근에 제안된 수신가지 수가 제한된 이중기회전송 릴레이 시스템의 전력 소모를 줄이고, 시스템의 성능을 개선하기 위하여 각 송신 노드의 최적 전력 분배방식을 제안하고 시스템의 성능을 유도하였다. 분석결과 각 송신 노드가 동일한 전력으로 송신할 경우보다 각 송신노드에 최적의 전력을 할당한 경우가 오수신율이 항상 우수함을 보였고, 또한 평균 채널전력 이득이 작을 경우 평균 송신 릴레이 수를 증가시켜 다이버시티 이득을 크게 함으로써 오수신율을 최소화 하는 것을 알 수 있었다.

Abstract Recently, one of the research topics is wireless Ad-Hoc network minimizing power consumption because of limited power. We propose optimal power allocation scheme of each transmit node and derive performance analysis of system that recently designed Double opportunistic relay system which fixed branch receiver to use more than efficient power consumption. Optimal power location scheme is shown that outage probability has always better performance than equal power allocation. Furthermore, we are known that outage probability is minimized by increasing average transmit relays to obtain the diversity gain when average channel power gain is less.

Key Words : DOT relay system, Power allocation, Equal power allocation, Outage probability.

1. 서 론

최근에 기존의 협동 릴레이 시스템의 단점을 보완한 이중 기회전송 협동 릴레이 방식(DOT, Double Opportunistic Transmission System)은 소스-릴레이 및 릴레이-목적지 경로의 SNR이 임계치보다 높을 때만 전송함으로써 소스-릴레이간의 SNR만 고려하는 기존의

기회전송 협동 릴레이 방식보다 전력을 절약할 뿐만 아니라 통신의 신뢰성을 향상 시킬 수 있었다^[1].

Ad-hoc 네트워크는 전력제한을 갖기 때문에 네트워크의 소모 전력을 최소화 하는 것이 중요한데, 지금까지는 협동 릴레이 시스템의 전력이 제한된 경우, 각 송신노드에 최적의 전력 할당을 통해 전력효율과 성능 개선에 관한 연구만 진행되어 왔다^{[2],[3],[4],[5]}.

*준회원, 청주대학교 전자공학과

**정회원, 청주대학교 전자공학과

접수일자 2012.1.30, 수정일자 2012.3.15.

게재확정일자 2012.4.13.

Received: 30 January 2012; Revised: 15 March 2012

Accepted: 13 April 2012

*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

본 논문에서는 최근 고안된 DOT 시스템에서 목적지의 수신 가지 수가 고정되어있고, 전체 시스템의 전력이 제한되어있을 경우, 송신되는 평균 릴레이의 수를 수신 가지수와 동일하게 조정하는 방식을 사용하여, 이 때 목표로 하는 시스템의 오수신율을 만족시키기 위한 송신노드의 최적화 전력을 유도하였다.

본 논문의 구성은 제 II장에서는 DOT 시스템 모델을 설명하였으며, 제 III장에는 최적 전력 분배 방식을 유도하였다. 제 IV장은 성능분석으로 동일한 조건하에서 동일 전력할당 방식과 최적 전력할당 방식의 성능을 비교 분석을 하였다. 마지막으로 제 V장은 본 논문의 결론을 서술하였다.

II. 시스템 모델

1. 시스템 구성

1st time slot	2nd time slot	3th time slot
S Tx ⇒ R Rx	D Tx ⇒ R Rx	R Tx ⇒ D Rx

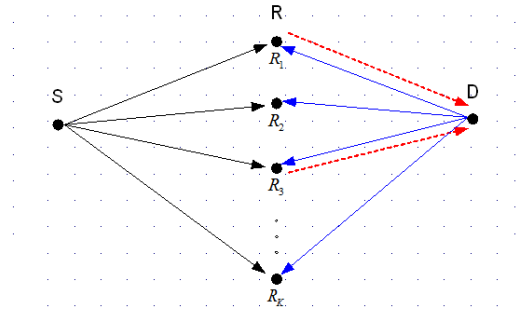


그림 1. 이중 기회전송 시스템(DOT) 모델
Fig. 1. System model of DOT

DOT 시스템은 Fig. 1로 나타난다. 여기서 S, R 그리고 D는 각각 소스, 릴레이 그리고 목적지를 나타낸다. R_k ($k = 1, 2, 3, \dots, K$)는 k 번째 릴레이를 나타낸다. Fig. 1에서 실선은 소스에서 릴레이로 송신 및 목적지에서 릴레이로 송신을 의미한다. 점선은 송신 조건을 만족시키는 릴레이가 목적지로 송신하는 것을 나타낸다 [1].

여기서 목적지에서 수신된 신호는 일반화 선택 결합 (GSC, Generalized selection diversity)이 된다^[6]. 1st time slot 동안 k 번째 릴레이 R_k ($k = 1, 2, 3, \dots, K$)가

수신한 신호, y_{SR_k} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{SR_k} = h_{SR_k}x + n_k \quad (1)$$

여기서 h_{SR_k} 는 소스와 k 번째 릴레이 사이의 채널이 득인데 Rayleigh 분포를 한다고 가정한다. n_k 는 잡음으로 평균이 0이고 분산이 N_0 인 가우시안(Gaussian)분포를 한다. x 는 송신 신호이며 송신전력은 P_S 이다. 그러므로 k 번째 릴레이가 수신한 SNR, γ_{SR_k} 는,

$$\gamma_{SR_k} = |h_{SR_k}|^2 \frac{P_S}{N_0} \quad (2)$$

이다.

임의의 수신기에서 수신한 SNR(γ), 이 임계값 SNR 보다 작은 경우를 오수신율(Outage probability)로 정의하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th}) \quad (3)$$

여기서 γ_{th} 는 사전에 정해진 임계값 SNR 이다.

2. 송신 릴레이의 결정

송신 릴레이 세트를 $|S|$ 로 나타내면 K 개의 릴레이 중 i 개의 릴레이가 송신할 확률 $\Pr(|S|=i)$ 는 다음과 같다.

$$\Pr(|S|=i) = \binom{K}{i} [\Pr(\gamma_{SR_k} > \Gamma_{SR}, \gamma_{DR_k} > \Gamma_{DR})]^i \times [1 - \Pr(\gamma_{SR_k} > \Gamma_{SR}, \gamma_{DR_k} > \Gamma_{DR})]^{K-i} \quad (4)$$

DOT 시스템에서 복조 후 전송(DF) 릴레이의 송신 확률은 독립이고 동일한 분포를 갖는 레일레이 페이딩의 경우 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{SR_k} > \Gamma_{SR}, \gamma_{DR_k} > \Gamma_{DR}) &= \Pr(\gamma_{SR_k} > \Gamma_{SR})\Pr(\gamma_{DR_k} > \Gamma_{DR}) \\ &= \exp\left[-\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR_k}} + \frac{\Gamma_{DR}}{\bar{\gamma}_{DR_k}}\right)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\gamma}_{SR_k}$ 와 $\bar{\gamma}_{DR_k}$ 는 각각 $S-R_k$ 경로와 $D-R_k$ 경로의 평균 SNR 이다.

식 (4)번과 (5)을 사용하면 평균 송신 릴레이 수를 다음과 같이 구할 수 있다^[7].

$$M_{DOT} = \sum_{k=0}^K k \binom{K}{k} [\Pr(\gamma_{R_kD} > \Gamma_{RD}, \gamma_{SR_k} > \Gamma_{SR})]^k \times (6) \\ [1 - \Pr(\gamma_{R_kD} > \Gamma_{RD}, \gamma_{SR_k} > \Gamma_{SR})]^{K-k} \\ = K \exp\left\{-\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR_k}} + \frac{\Gamma_{DR}}{\bar{\gamma}_{DR_k}}\right)\right\}$$

이 식에서 알 수 있듯이 평균 송신 릴레이 수는 평균 수신 SNR의 함수가 된다. 만일 수신기의 가지 수와 평균 송신 릴레이 수를 동일하게 조정한다면 송신전력의 절약 및 무선 자원의 효율성을 높일 수 있게 된다.

III. 최적 전력할당 유도

1. 오수신을 유도

만일 목적지 수신기의 가지 수가 N 개로 고정되어 있는 경우, 수신된 신호의 수 i 개가 N 개보다 작으면 입력된 모든 신호를 MRC하고, N 보다 크면 i 개의 신호 중 큰 SNR을 갖는 N 개의 신호만 선택하여 MRC하게 된다.

각각의 릴레이에서 수신한 평균 SNR이 동일하다고 가정하면 모든 k 에 대하여 $\bar{\gamma}_{SR_k} = \bar{\gamma}_{SR}$ 및 $\bar{\gamma}_{DR_k} = \bar{\gamma}_{DR}$ 로 쓸 수 있다. 그리고 R-D 경로와 D-R 경로가 가역적이라고 가정하면 $\bar{\gamma}_{RD} = \bar{\gamma}_{DR}$ 이 된다. GSC 한 후의 SNR이 임계값보다 작을 때 오수신이라고 정의하면, 목적지에서 오수신율은 다음과 같다^[7].

$$P_{out} = \sum_{n=0}^N \binom{K}{n} \left\{ e^{-\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}} + \frac{\Gamma_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right)n} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}} + \frac{\Gamma_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right)} \right\} \left[1 - e^{-\Gamma/\bar{\gamma}} \sum_{k=1}^n \frac{(\Gamma/\bar{\gamma})^{k-1}}{(k-1)!} \right] \right\} \\ + \sum_{n=N+1}^N \binom{K}{n} \left\{ e^{-\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}} + \frac{\Gamma_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right)n} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\bar{\gamma}_{SR}} + \frac{\Gamma_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right)} \right\}^{K-n} \right\} \\ \times \left[\binom{n}{N} \left\{ 1 - e^{-\Gamma/\bar{\gamma}} \sum_{l=0}^{N-1} \frac{(\Gamma/\bar{\gamma})^l}{l!} + \sum_{l=0}^{n-N} (-1)^{N+l-1} \binom{n-N}{l} \left(\frac{N}{l}\right)^{N-1} \right\} \right] \\ \times \left[\frac{1 - e^{-(1+l/N)(\Gamma/\bar{\gamma})}}{1+l/N} - \sum_{m=0}^{N-2} \left(-\frac{1}{N}\right)^m \left(1 - e^{-\Gamma/\bar{\gamma}} \sum_{j=0}^m \frac{(\Gamma/\bar{\gamma})^j}{j!} \right) \right] \quad (7)$$

2. 동일 송신전력

제 II장 시스템구성에서 설명한 $\bar{\gamma}_{SR_k}$ 와 $\bar{\gamma}_{R_kD}$ 는 각각 소스- k 번째 릴레이, k 번째 릴레이- 목적지 간의 평균 SNR이며 다음과 같다^[5].

$$\bar{\gamma}_{SR_k} = E[\gamma_{SR_k}] = E[|h_{SR_k}|^2] \frac{P_S}{N_0} = \Omega_{SR_k} \frac{P_S}{N_0} \quad (8)$$

$$\bar{\gamma}_{R_kD} = E[\gamma_{R_kD}] = E[|h_{R_kD}|^2] \frac{P_{Rk}}{N_0} = \Omega_{R_kD} \frac{P_{Rk}}{N_0}$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 평균을 의미하고, γ_{SR_k} 와 h_{SR_k} 는 식 (2)에 정의 되어있다. γ_{R_kD} 는 k 번째 릴레이가 송신할 때 목적지에서 수신한 SNR, h_{R_kD} 는 k 번째 릴레이와 목적지 사이의 채널이득(channel gain), 그리고 P_{Rk} 는 k 번째 릴레이의 송신전력이다. 또한 $\Omega_{R_kD} = E[|h_{SR_k}|^2]$, 그리고 $\Omega_{R_kD} = E[|h_{R_kD}|^2]$ 으로 각각 소스- k 번째 릴레이 및 k 번째 릴레이-목적지 간의 평균 채널전력 이득(Mean channel power gain)이다.

만일 전체 네트워크의 전력이 P_T 로 제한되어 있고, 각 노드의 송신전력이 동일하다고 가정하면, 각 노드의 송신전력은

$$P_S = P_{Rk} = \frac{P_T}{K+1} \quad (9)$$

이며, 식 (8)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{\gamma}_{SR_k,eq} = \Omega_{SR_k} \frac{P_T}{N_0(K+1)} \quad (10)$$

$$\bar{\gamma}_{R_kD,eq} = \Omega_{R_kD} \frac{P_T}{N_0(K+1)}$$

식 (10)을 식 (7)에 대입하면 end-to-end 오수신율을 얻을 수 있고, 식 (6)에 대입하면 모든 노드의 송신전력이 동일 할 때의 평균 송신 릴레이 수를 구할 수 있다^[5].

3. 최적 전력할당 유도

네트워크 전체의 송신전력은 소스의 송신전력과 릴레이들의 송신전력으로 이루어지므로,

$$P_T = P_S + P_R \quad (11)$$

으로 쓸 수 있고, 여기서 P_R 은 모든 송신 릴레이 전력의 합이다. 이때 소스 및 릴레이에서 최적의 전력을 할당하기 위해서 다음과 같이 고려한다.

식 (7)에서 P_{out} 을 최소화하는 것은 $-\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\gamma_{SR}} + \frac{\Gamma_{RD}}{\gamma_{RD}}\right)$ 를 최대화 시키는 것과 같으므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{MAX} \quad & -\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\gamma_{SR}} + \frac{\Gamma_{RD}}{\gamma_{RD}}\right) \\ \text{Subject to} \quad & P_T = P_S + P_R \\ & P_S, P_R > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

이제 Lagrange 곱 최대화 방식(Lagrange multiplier maximization method)을 이용하면, 목적함수는

$$J = -\left(\frac{\Gamma_{SR}}{\gamma_{SR}} + \frac{\Gamma_{DR}}{\gamma_{DR}}\right) - \lambda(P_S + P_R - P_T) \quad (13)$$

이 되고, 이 식에서 $\bar{\gamma}_{SR_k}$ 와 $\bar{\gamma}_{R_kD}$ 는 각각 식 (10)에 정의 되어 있다. 기회전송 시에는 송 수신 릴레이 전력 P_R 는 송신하는 릴레이에만 동일하게 나누어진다고 가정한다. 그리고 평균 송신 릴레이 수를 M_{DOT} 라고 할 때 각 릴레이의 송신전력 $P_{Rk,DOT}$ 는

$$P_{Rk,DOT} = \frac{P_R}{M_{DOT}} \quad (14)$$

이 된다. 식 (9)의 P_{Rk} 대신에 식 (14)의 $P_{Rk,DOT}$ 을 대입하고 정리하면, 식 (13)은

$$J = -\left(\frac{N_0 \Gamma_{SR}}{\Omega_{SR_k} P_S} + \frac{M_{DOT} N_0 \Gamma_{DR}}{\Omega_{R_kD} P_R}\right) - \lambda(P_S + P_R - P_T) \quad (15)$$

이 되고, P_S , P_R 그리고 λ 로 각각 편미분 하여 0으로 놓고 풀면, 소스 노드의 최적의 송신전력 P_S^* 와 P_R^* 는 각각 다음 식과 같이 유도된다.

$$P_S^* = P_T / \left(1 + \sqrt{\frac{M_{DOT} \Omega_{SR_k} \Gamma_{RD}}{\Omega_{kD} \Gamma_{SR}}}\right) \quad (16)$$

$$P_R^* = P_T / \left(1 + \sqrt{\frac{\Omega_{kD} \Gamma_{SR}}{M_{DOT} \Omega_{SR_k} \Gamma_{RD}}}\right) = P_T - P_S^*$$

그러므로 $\bar{\gamma}_{SR_k,DOT}$ 및 $\bar{\gamma}_{R_kD,DOT}$ 는

$$\bar{\gamma}_{SR_k,DOT} = \Omega_{SR_k} \frac{P_S^*}{N_0} \quad (17)$$

$$\bar{\gamma}_{R_kD,DOT} = \Omega_{R_kD} \frac{P_R^*}{N_0 M_{DOT}}$$

이 되고, 식 (17)를 식 (7)에 대입하면 종단간 오수신율을 얻을 수 있으며, 식 (6)에 대입하면 최적의 전력을 할당 한 경우 평균 송신 릴레이 수를 구할 수 있다.

IV. 성능분석

Fig. 2는 전체 네트워크의 신호 대 잡음비와 오수신율을 나타낸 것으로, 실선은 소스 노드 및 기회 송신하는 각 릴레이 노드의 송신전력이 동일한 경우와, 점선은 소스 노드 및 기회 송신하는 각 릴레이 노드에 최적 전력 할당이 된 경우이다. 전체 네트워크의 전력이 P_T 로 주어진 경우, 수신가지 수 $N=3$, 소스-릴레이간의 임계값은 $\Gamma_{SR}=1$, 릴레이-목적지간의 임계값은 $\Gamma_{RD}=1$ 일 때의 오수신율을 나타냈다. 목표로 하는 종단간 오수신율이 1×10^{-3} 을 유지하기 위해서는 평균 채널전력 이득이 $\Omega_{SR_k}=0.7, \Omega_{R_kD}=0.3$ 과 $\Omega_{SR_k}=0.5, \Omega_{R_kD}=0.5$ 일 때, $\Omega_{SR_k}=0.3, \Omega_{R_kD}=0.7$ 의 경우 최적 전력할당이 동일 할당일 경우보다 약 4.1dB, 4.2dB, 4.6dB 정도 전력이득이 있다. 즉, 최적 전력할당의 경우가 동일전력 할당보다 전력이득에 있어서 더욱 효과적이고, 결국 종단 간 오수신율이 감소하게 됨을 알 수 있다.

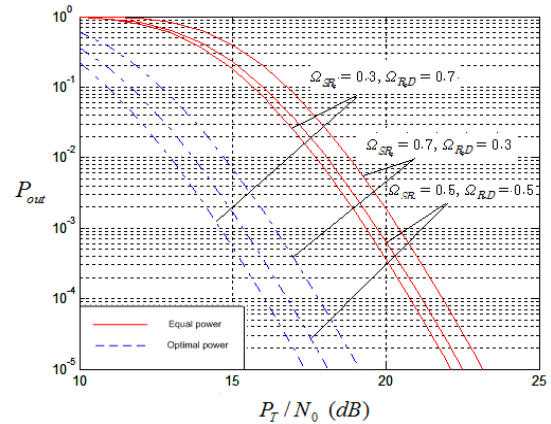


그림 2. 최적 전력 할당 신호 대 잡음비 대 오수신율
Fig. 2. SNR vs outage of optimal power allocation ($\Gamma_{SR}=1, \Gamma_{RD}=1, N=3$)

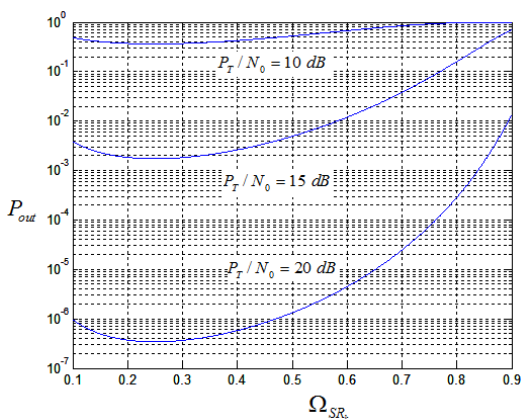


Fig. 3. 최소 오수신율
 Fig. 3. Minimum outage probability
 ($\Gamma_{SR} = 1, \Gamma_{RD} = 1, \Omega_{R_kD} = 1 - \Omega_{SR_k}$)

Fig. 3는 수신까지 수가 고정되었을 때 DOT 시스템의 소스와 k 번째 릴레이 간의 평균 전력(Ω_{SR_k})의 변화에 따른 오수신율의 변화를 나타낸 것이다($\Omega_{R_kD} = 1 - \Omega_{SR_k}$ 가정). P_T/N_0 가 각각 10, 15, 20dB 일 때 오수신율을 최소로 하는 Ω_{SR_k} 는 각각 0.3, 0.27, 0.25 정도였다. 전체 전력 P_T/N_0 가 클수록 성능은 좋아지며, 소스와 릴레이간의 평균 전력 Ω_{SR_k} 가 더 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

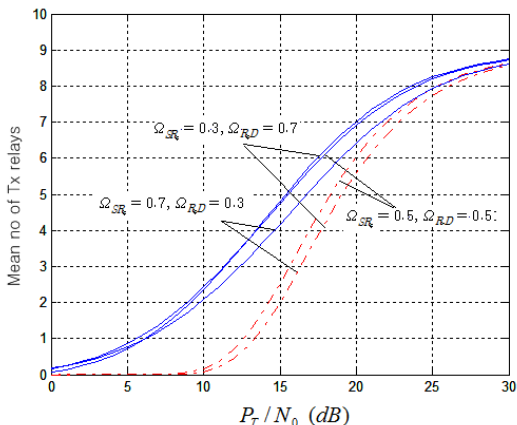


그림 4. SNR 대 평균 송신 릴레이 수
 Fig. 4. SNR vs Avg. Tx. relay No.
 ($\Gamma_{SR} = 1, \Gamma_{RD} = 1$)

Fig. 4는 전체 네트워크의 전력이 P_T 로 주어진 경우, 전력 분배방식에 따른 평균 송신 릴레이 수를 비교한 그

래프이다. 점선은 모든 송신 노드가 동일한 송신전력으로 송신하는 경우이며, 실선은 송신 노드가 최적 전력할당을 한 경우이다. 네트워크의 전력이 증가할수록 평균 송신 릴레이 수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 동일 전력할당 방식보다 최적전력할당 방식이 항상 송신 릴레이 수가 많다는 것을 알 수 있다.

전체 네트워크의 신호 대 잡음 비(P_T/N_0)가 15dB 경우, $\Omega_{SR_k} = 0.3, \Omega_{R_kD} = 0.7$ 일 때 송신 릴레이의 수는 최적 전력 할당의 경우 약 48개인데 반해, 동일전력 할당의 경우에는 2개로 약 2.8개가 차이가 난다. 결국 최적 전력 할당의 경우 소스-릴레이간의 거리가 멀어서 평균 채널전력 이득(Ω_{SR_k})이 작아 소스-릴레이간의 오수신율이 클 때에는 평균 송신 릴레이 수를 증가시켜 다이버시티 이득을 높인다는 것을 확인 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 중단 간 오수신율을 최소화하기 위해, 각 전송 노드들의 최적전력을 할당하는 방법을 유도하고 동일전력 할당 방식과 성능비교 분석하였다.

분석결과 각 송신노드에 동일전력 할당한 경우보다 최적 전력 할당한 경우가 성능이 좋게 나타났으며, 전체 전력 P_T/N_0 가 클수록 평균 릴레이 수가 증가되었다. 또한 소스와 릴레이 사이의 거리가 멀어 소스-릴레이 간 평균 채널전력 이득이 작은 경우에는 평균 송신 릴레이 수를 증가시켜 다이버시티 이득을 크게 함으로써 오수신율을 최소화하는 것을 확인 하였다.

즉, 최적 전력할당의 경우가 동일전력 할당보다 큰 공간 다이버시티 효과를 얻게 되고, 결국 중단 간 오수신율이 감소하게 됨을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] Nam-Soo Kim, Ye Hoon Lee, "Double opportunistic transmit relaying system with GSC for power saving in Rayleigh fading channel," in proceedings of COMM2010, Romania, pp.368-370, June 2010
 [2] N.C Beaulieu, and J. Hu, "A closed form

- expression for the outage probability of Decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 12, pp.813-815, Dec. 2006
- [3] M. O. Hasna, M-Slim Alouini, "Optimal power allocation for Relayed transmissions over Rayleigh-fading channels," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.3, no.6, pp.1999-2004, Nov. 2004
- [4] J. Luo, R.S. Blum, L. J. Cimini, L. J. Greenstein A. M. Haimovich, "Decode-and-Forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.6, no.3, pp.793-799, Mar. 2007
- [5] Nam-Soo Kim, "Optimal Power Allocation of Opportunistic Transmission Relay Systems in Rayleigh Fading Channel," *IWIT*, vol.9, no.3, Dec. 2009
- [6] Salama Ikki, Mohamed Ahmed, "Performance analysis of generalized selection combining for decode-and-forward cooperative-diversity networks," in *Proceedings of Vehicular Technology Conference*, Sep. 2010
- [7] Nam-Soo Kim, "Performance Analysis of DOT Cooperative Diversity System with Fixed Branch Receiver," *IWIT*, OA-3, pp.12-15. May 2011

※ 본 연구는 지식경제부의 지역산업기술개발사업의 일환으로 수행된 것입니다. (과제번호 A001100214)

저자 소개

황 휘 진(준회원)



- 2010.2 : 청주대학교 전자공학과 졸업
 - 2010.3-현재 : 청주대학교 전자공학과 석사과정
- <주관심분야 : Ad-Hoc 네트워크, 무선 이동통신 채널, 이동통신시스템 설계, 디지털 변복조 시스템 >

김 남 수(정회원)



- 1986.7-1994.2 : ETRI 이동통신 연구단 무선기술 연구실장 역임
 - 1991.2 : 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 - 1991.1-1991.10 : BNR(Bell Northern Reserach) 방문연구원
 - 2002.1-2003.1 : NJIT(New Jersey Institute of Technology) 교환교수
 - 1994.3-현재 : 청주대학교 전자공학과 교수
 - 2006.1-2007.12 : 청주대학교 학술정보처장
 - 2010.1-2010.12 : 청주대학교 입학처장
- <주관심분야 : 무선 이동통신 채널, 이동통신시스템 설계, 디지털 변복조시스템 >