

다중 홉 통신 시스템 성능 분석 및 최적화 기법

*장철희 **남응국 ***이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소

*jangch@snu.ac.kr

Performance analysis and optimization of a multi-hop communication system

*Chulhee Jang **Eunguk Nam ***Jae Hong Lee

Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

요약

본 논문에서는 하나의 타임 슬롯이 홉 수보다 적은 수의 페이즈로 분할되는 새로운 다중 홉 통신 시스템을 제안한다. 또한 제안한 시스템의 성능을 분석하고 최적화하는 방법을 제안한다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 시스템 성능 분석의 유효성을 확인할 수 있으며, 기존의 다중 홉 통신 시스템보다 향상된 성능을 확인할 수 있다. 특히, 경로 손실 지수가 증가할수록 성능 향상 폭이 큰 것을 확인할 수 있다.

1. Introduction

무선통신 환경에서는 다중 경로 페이딩(fading) 현상에 의해 신호 왜곡이 발생하고, 이로 인하여 심각한 성능 열화가 발생한다. 또한 빌딩, 산악지역 등으로 인해 음영지역이 발생한다. 다중 홉 통신(multi-hop communication) 기술은 이러한 단점을 극복하는 효율적인 기술로 알려져 있다.

1971년 Van der Meulen 이 다중 홉 통신의 간단한 형태인 중계(relaying) 기술의 개념을 최초로 소개하였으며[1], El Gamel 등이 이를 정보이론적으로 분석하였다[2]. 1998년 Sendonaris 등에 의해 다중 홉 통신의 특수 형태인 협력통신(cooperative communication)이 제안된 이후 관련된 많은 연구가 활발히 연구되어 왔다[3]. 간단한 형태의 중계기술과 협력통신의 연구가 이중 홉(dual-hop)에 치우치는 한계를 벗어나 중계기술 및 협력통신을 확장한 다중 홉 통신이 널리 연구되고 있다[4]-[6].

다중 홉 통신과 관련하여 연구가 활발히 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 홉 수가 정해져 있고 각 홉 간 통신이 직교 채널인 상황에서 진행되었다. 그러나 다중 홉 통신은 페이딩 현상에 의한 성능 열화를 극복할 수 있는 장점이 있는 반면, 하나의 시간 슬롯(time slot)이 홉 수와 동일한 수의 페이즈(phase)로 분할되어 사용되기 때문에 주파수 효율이 낮아지는 단점이 있다[7]. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위한 연구가 필요하다.

다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 본 논문에서 사용하는, 하나의 시간 슬롯이 홉 수보다 적은 수의 페이즈로 분할되는 새로운 통신 시스템을 제시한다. 또한 이러한 다중 홉 통신 시스템의 성능을 분석하고, 성능 향상을 위한 홉 수 및 전력 최적화 기법을 제시한다. 컴퓨터

모의실험을 통하여 제안한 최적화 기법의 성능을 확인한다.

2. System Model

본 논문에서는 송신기 T_0 , 수신기 T_K 및 $K-1$ 개의 중계기 $T_k, k=1, 2, \dots, K-1$ 로 구성된 멀티 홉 통신 시스템을 고려한다. 그림 1에 본 논문에서 제안하는 다중 홉 통신 프로토콜을 보인다. 기존의 다중 홉 통신 시스템에서 홉의 수와 동일한 K 개의 페이즈가 필요했던 것과 달리 제안하는 다중 홉 통신 시스템에서는 M 개의 페이즈가 필요하다. 이 때, M 은 $M \leq K \leq 2M$ 을 만족한다. 한 페이즈에 두 개의 노드가 동시에 전송을 하는 경우가 있을 때 다른 노드의 신호는 간섭(interference)으로 작용한다. 임의의 두 노드 T_i 와 T_j 사이의 채널 계수 $h_{i,j}$ 는 평균 0, 분산 $\sigma_{i,j}^2$ 인 원형 대칭 복합 정규 분포(circularly symmetric complex Gaussian random variable)를 따르며, 각 노드에서는 해당 노드와 다른 노드와의 채널 정보를 알고 있다고 가정한다. 또한 채널 분산은 $\sigma_{i,j}^2 = d_{i,j}^{-\alpha}$ 로 주어지며, 이 때 α 는 경로 손실 지수(path loss exponent), $d_{i,j}$ 는 T_i 와 T_j 사이의 거리이다. 편 의상 중계기로 쓸 수 있는 노드들이 많고, $d_{i,j} = |j-i|d_{0,K}/K$ 인 중계기들을 항상 찾을 수 있다고 가정한다. 자신보다 뒤 노드에서의 간섭은 신호와 채널 정보를 모두 알고 있기 때문에 제거할 수 있다. 간섭 제거 후 T_k 가 수신하는 신호는

$$y_k = \begin{cases} h_{k-1,k} s(n) + w_k, & k \leq M \\ h_{k-1,k} s(n-1) + h_{k-M-1,k} s(n) + w_k, & M < k \leq K \end{cases} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 이 때, w_k 는 평균 0, 분산 1인 AWGN이다.

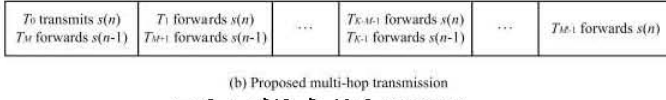
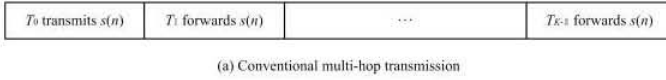


그림 1. 다중 홉 통신 프로토콜

3. Performance Analysis

먼저 M 보다 큰 k 를 고려한다. 수식 (1)로부터 신호대 간섭 및 잡음비는

$$\gamma_k = \frac{P_{k-1}|h_{k-1,k}|^2}{P_{k-M-1}|h_{k-M-1,k}|^2 + 1} \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 이 때, P_i 는 T_i 의 송신전력이다. 그러면 γ_k 의 CDF는

$$F_{\gamma_k}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{P_{k-1}\sigma_{k-1,k}^2}\right) \times \left(1 + \frac{P_{k-M-1}\sigma_{k-M-1,k}^2}{P_{k-1}\sigma_{k-1,k}^2}\right)^{-1} \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 또한 M 이하의 k 에 대해서는 γ_k 의 CDF는

$$F_{\gamma_k}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{P_{k-1}\sigma_{k-1,k}^2}\right) \quad (4)$$

와 같이 주어진다. 따라서 불능 확률은

$$P_{out}(R) = 1 - \Pr[\min(\gamma_k) < 2^{MR} - 1] \quad (5)$$

$$= 1 - \prod_{k=1}^K \{1 - F_{\gamma_k}(2^{MR} - 1)\}$$

$$= 1 - \prod_{k=1}^K \exp\left(-\frac{2^{MR} - 1}{P_{k-1}\sigma_{k-1,k}^2}\right) \times \prod_{k=M+1}^K \left(1 + \frac{P_{k-M-1}\sigma_{k-M-1,k}^2}{P_{k-1}\sigma_{k-1,k}^2}\right)^{-1}$$

와 같이 주어진다. 이 때 R 은 target rate 이다.

3. Optimization

가장 적은 불능 확률을 얻기 위해서 식 (5)가 최소가 되는 송신전력 P_k , 페이즈 수 M 및 홉 수 K 를 구해야 한다. 단 모든 노드에서 사용하는 총 전력이 P_{tot} 를 넘을 수 없다는 제약조건이 있다고 가정한다. 이를 위해 다음과 같이 경우를 나누어서 구한다.

1) $M=K$

이 경우는 기존의 다중 홉 통신 시스템을 의미한다. 식 (5)가

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_K \quad (6)$$

일 때 최소가 됨은 잘 알려져 있으며[8], 그 때 송신전력은

$$P_k = \frac{P_{tot}}{K} \quad (7)$$

과 같이 주어진다. 이를 (5)에 대입하여, 미분하여 정리하면,

$$K_1^* = \frac{\alpha - 2 + W[(2 - \alpha)\exp(2 - \alpha)]}{R \ln 2} \quad (8)$$

와 같이 주어진다.

2) $M < K \leq 2M$

이 경우 식 (6)을 풀면

$$P_0 = -K + \frac{\sqrt{K^2 + 4(K-M)\sigma_{0,M+1}^2 P_{tot}}}{2(K-M)\sigma_{0,M+1}^2} \quad (9)$$

와 같이 주어지며, (6)에 의해 (5)가

$$P_{out}(R) \approx 1 - \exp\left(-K \frac{2^{MR} - 1}{P_0 \sigma_{0,1}^2}\right) \quad (10)$$

로 근사화된다고 가정할 수 있다. (9)를 (10)에 대입하여 미분하여 구해보면, $K=M+1$ 또는 $K=2M$ 일 때 최소가 됨을 알 수 있다.

1)과 2)를 통하여 가능한 모든 K 와 M 의 쌍과 그 때의 송신전력 P_i 를 찾을 수 있다. 각 경우의 불능확률은 (5)에 대입하여 얻을 수 있으며, 가장 작은 불능확률을 보이는 K 와 M 의 쌍과 그 때의 송신전력 P_i 를 택하여 적용하면 된다.

4. Numerical Results

본 장에서는 시스템 성능 분석의 유효성을 확인하고, 기존 시스템과 성능을 비교한다. 송신기와 수신기 사이의 거리가 100m인 경우를 고려한다.

그림 1에 $\alpha = 4, 5, 6$ 에 대한 기존의 다중 홉 통신 시스템과 제안된 다중 홉 통신 시스템의 컴퓨터 모의실험 결과와 분석 결과의 그래프를 보인다. 제안된 시스템에 대하여 모의실험 결과와 분석 결과가 완벽히 일치함을 확인할 수 있다. 제안된 시스템이 기존의 시스템보다 향상된 성능을 보임을 확인할 수 있다. 특히 경로 손실 지수가 클수록 성능 향상 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 경로 손실 지수가 클수록 기존의 시스템보다 적은 페이즈를 사용함에서 오는 주파수 효율 이득이 간섭에 의한 손실보다 클 확률이 높기 때문인 것으로 분석된다.

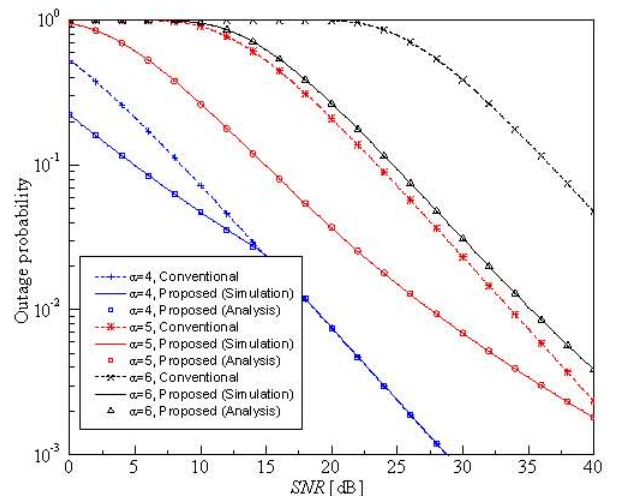


그림 1. 제안된 시스템의 불능 확률

4. 결론

본 논문에서는 새로운 다중 홉 통신 시스템을 제안하였다. 또한 제안한 시스템의 불능 확률을 분석하였으며, 불능 확률을 최소화하기 위한 최적화 기법을 소개하였다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 성능 분석의 유효성을 입증하였으며, 기존의 다중 홉 통신 시스템보다 제안한 다중 홉 통신 시스템이 더 낮은 불능 확률을 제공함을 확인하였다. 특히 경로 손실 지수가 클수록 불능 확률 감소 폭이 더 큰 것을 확인하였다.

Acknowledgement

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2012-0000919, 2012-0005692)

참고문헌

- [1] E. C. V. D. Meulen, "Three-terminal communication channels," *Applied Probability Trust, Advances in Applied Probability*, vol. 3, no. 1, pp. 120-154, 1971.
- [2] T. M. Cover and A. A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-25, pp. 572-584, Sep. 1979.
- [3] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity - Part I: System description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, Nov. 2003.
- [4] T. Issariyakul and E. Hossain, "Performance modeling and analysis of a class of ARQ protocols in multi-hop wireless network," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 12, pp. 3460-3468, Dec. 2006.
- [5] B. Gui, L. Dai, and L. J. Cimini, "Routing strategies in multihop cooperative networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 2, pp. 843-855, Feb. 2009.
- [6] Z. Yi and I.-M. Kim, "Relay ordering in a multi-hop cooperative diversity network," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 9, pp. 2590-2596, Sep. 2009.
- [7] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.
- [8] D. Bharadia, G. Bansal, P. Kaligineedi, and V. K. Bhargava, "Relay and power allocation schemes for OFDM-based cognitive radio systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 9, pp. 2812-2817, Sep. 2011.