

방송통신 시스템에서의 다중 홉 중계 경로 선택 알고리즘

*장철희 **이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소

*jangch@snu.ac.kr

Multi-hop Path Selection Algorithms for Broadcasting Systems

*Chulhee Jang **Jae Hong Lee

School of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

요약

최근 통신시스템에서 다중 홉(multi-hop)을 이용하여 셀 용량 증대, 셀 영역 확장 등을 달성하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 대부분 하나의 송신기와 하나의 수신기가 존재하는 환경을 가정하여, 다수의 수신기가 존재하는 방송통신 시스템에 직접적으로 적용하기에는 한계를 갖는다. 이에 본 논문에서는 다수의 수신기가 존재하는 방송통신 시스템에서의 시스템 성능 향상을 위한 중계 경로 선택 알고리즘을 연구한다. 최적 경로 선택 알고리즘을 제안하며, 최적 경로 선택 알고리즘과 같은 성능을 보이면서 낮은 복잡도를 갖는 알고리즘을 제안한다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안된 다중 홉 중계 경로 선택 알고리즘의 성능을 알아보도록 한다.

1. Introduction

무선통신 환경에서는 다중 경로 페이딩(fading) 현상에 의해 신호 왜곡이 발생하며 이로 인한 성능 열화가 심각한 수준이다. 또한 빌딩, 산악지역 등으로 인해 음영지역이 발생하는 단점을 갖고 있다. 중계(relaying) 기술은 이러한 단점을 극복하고, 셀 용량 증대, 셀 영역 확장을 달성하는 효율적인 기술로 알려져 있다.

Van der Meulen 에 의해 중계기술을 최초로 소개되었으며[1], El Gamel 등이 이를 정보이론적으로 분석하였다[2]. 또한 협력통신은 다중 홉 중계 기술의 특수 형태로 최근 활발히 연구되고 있다. 협력통신에서는 송신기와 주변의 중계기가 안테나, 주파수 대역 등 자원을 공유하여 가상안테나열을 형성함으로써 공간 다이버시티 이득을 얻어 채널 페이딩을 효율적으로 극복할 수 있다[3]. 최근에는 중계기술 및 협력통신을 확장한 다중 홉 통신(multi-hop communications)이 널리 연구되고 있다[4]-[6].

다중 홉 통신과 관련되어 연구가 활발히 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 하나의 송신기와 하나의 수신기가 대응되는 상황에서 진행되었다. 그러나 방송통신 시스템에서는 수신기들이 같은 정보를 수신해야 하므로, 기존의 연구를 직접 적용하기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 논문에서는 하나의 송신기와 여러 개의 수신기가 존재하는 상황에서 모든 수신기가 같은 정보를 수신하는 상황에서의 다중 홉 통신을 살펴보도록 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 하나의 송신기와 여러 개의 수신기가 존재하는 상황에서의 다중 홉 통신 모델을 제시한다. 또한, 이러한 다중 홉 통신 모델에서 효율적인 통신이 가능한 경로선택

알고리즘을 제시한다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제시한 알고리즘의 성능을 확인하도록 한다.

2. System Model

본 논문에서는 원형 셀을 고려하도록 한다. 셀의 중앙에 송신기(S)이 있으며, K 개의 수신기($D_i, i = 1, \dots, K$)가 셀 상의 임의의 위치에 존재하고, 모든 수신기는 중계기가 될 수 있다고 가정한다. 신호 전송은 다중 홉에 걸쳐 이루어지며 DF 중계방식[7]을 사용한다고 가정한다. 또한 신호 전송은 반이중 통신방식(half-duplex)으로 이루어지며, 수신기 및 송신기는 하나의 안테나를 가지고 있다고 가정한다.

임의의 두 노드 간의 거리를 $d_{i,j}$ (단, $i, j \in V, V = \{S, D_k | k = 1, \dots, K\}$ 는 모든 노드의 집합)라고 하자. 그러면 두 사용자 간의 채널 계수(channel coefficient)는

$$h_{i,j} = \left(\frac{d_{i,j}}{D}\right)^{-\alpha/2} \cdot \overline{h_{i,j}} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 이 때, D 는 reference distance, α 는 path loss exponent이고, $\overline{h_{i,j}}$ 는 평균이 0이고 분산이 1 인 circularly symmetric complex Gaussian random variable을 나타낸다. 임의의 한 노드가 여러 노드로부터 신호를 수신할 때, 수신 신호대잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)는

$$\gamma_i = \sum_j \frac{p_j \cdot |h_{j,i}|^2}{N_0} \quad (2)$$

와 같이 주어진다. 이 때, p_j 는 노드 j 에서의 송신 전력이며 N_0 는 AWGN 의 분산이다. 수신 SNR 이 γ_{th} 보다 클 때 신호를 성공적으로 수신한다고 가정한다. 또한 신호를 성공적으로 수신한 수신기가 중계

기가 될 수 있다고 가정한다.

이러한 다중 홉 통신은 그래프 $G=(V,E)$ 를 사용하여 나타낼 수 있으며[8], 이 때 E 는 다중 홉 통신에서 사용하는 통신 경로를 나타낸다.

3. Path Selection Algorithm

가. Optimal Algorithm

E 가 주어질 때 성공적으로 수신한 수신기의 개수를 L_E 라고 하자. 그러면 다음과 같이 최적(optimal)의 경로를 정할 수 있다.

Step 1. 가능한 모든 E 에 대하여 L_E 를 계산한다.

Step 2. $E^* = \min_E L_E$ 가 되는 E^* 를 선택한다.

임의의 두 수신기 i, j 를 고려할 때, i 에서 j 로 신호 전송이 이루어지거나 j 에서 i 로 신호 전송이 이루어지거나, 신호 전송이 이루어지지 않는다. 즉 임의의 두 수신기 사이의 경로 유무에는 세 가지 경우가 있으며, 따라서 전체적으로 exponentially increased complexity 를 갖는다.

나. Low-complexity Algorithm

어떤 두 노드 사이의 SNR이 γ_{th} 보다 클 때 두 노드 사이의 link 가 reliable link 라고 정의하며, $X \subset V$ 를 성공적으로 수신하는 수신기들의 집합으로 정의한다. 그리고 다음과 같은 알고리즘을 제안한다.

Step 1. E 를 reliable link 의 집합으로 초기화 하며, E 가 주어진 상태에서의 X 를 계산한다.

Step 2. $i \in V - X - \{D\}$ 에 대하여, $i^{(1)} = \arg \max_{j \in X} p_j \cdot |h_{j,i}|$

, $i^{(2)} = \arg \max_{j \in X - \{i^{(1)}\}} p_j \cdot |h_{j,i}|$ 와 같이 $i^{(j)}$ 를 정하고,

$\sum_{l=1}^m \frac{p_{i^{(l)}} \cdot |h_{i^{(l)},i}|^2}{N_0} > \gamma_{th}$ 를 만족하는 최소의 m 을 찾는다.

Step 3. Step 2 에서 m 을 찾을 수 있는 경우, 그 m 을 m^* 라고 하고, $Y_i = \{i^{(l)} | l = 1, \dots, m^*\}$ 로 정의한다. 노드 i 와 $j \in Y_i$ 사이의 link 를 E 에 추가하고, 노드 i 를 X 에 추가한다.

Step 4. Step 2 와 3 을 모든 $i \in V - X - \{D\}$ 에 대하여 m 이 존재하지 않을 때까지 반복한다.

X 의 원소의 개수를 n 개라고 하면, $V - X - \{D\}$ 에는 $K - n$ 개의 원소가 있으며, Step 2 에서 하나의 노드 i 에 대하여 $O(K - n)$ 의 computational complexity 를 갖으며, 모든 X 의 원소에 대하여 $O(n(K - n))$ 의 computational complexity 를 갖는다. Step 2 에서 적어도 1개의 원소에 대하여 조건을 만족하는 m 을 찾을 수 있을 때, Step 4 에서의 반복이 생길 수 있다. 따라서 전체 과정을 고려할 때, worst case complexity 는 $O\left(\sum_{n=1}^K n(K - n)\right) \approx O(K^3)$ 와 같이 주어진다. 이로부터 Low complexity Algorithm 은 Optimal

Algorithm 과 비교하여 굉장히 낮은 complexity를 갖음을 알 수 있다.

두 알고리즘의 성능은 다음 Lemma 를 통하여 확인할 수 있다.

Lemma 1. Optimal Algorithm 을 적용할 때 성공적으로 수신하는 수신기와 Low-complexity Algorithm 을 적용할 때 성공적으로 수신하는 수신기는 같다.

Proof Optimal Algorithm 을 적용할 때, 송신기로부터 t -hop 을 거친 후 성공적으로 수신하는 수신기를 $V^{(t)}$ 라 하자.

노드 $i \in V^{(1)}$ 는 송신기에서 direct transmission 만으로 성공적인 수신이 가능하다. 즉 노드 i 와 송신기 사이에는 reliable link가 존재하며, Low-complexity Algorithm 을 적용할 때 Step 1 에서 해당 link 가 E 에 포함되고, 노드 i 또한 X 에 포함된다.

$i \in \bigcup_{s=1}^t V^{(s)}$ 인 모든 노드가 Low-complexity Algorithm 을 적용할 때 성공적인 수신이 가능하다고 가정하자. 즉 $i \in X$ 라고 가정하자.

노드 $j \in V^{(t+1)}$ 의 경우 만약 노드 j 가 $\bigcup_{s=1}^t V^{(s)}$ 의 한 노드

i 와 reliable link 로 연결되었다면, 자명하게 $j \in X$ 가 된다. $\bigcup_{s=1}^t V^{(s)}$

의 노드와 reliable link 로 연결되지 않았더라도, $V^{(t+1)}$ 의 정의에 의

해 $\bigcup_{s=1}^t V^{(s)}$ 의 노드들로부터 전송되는 몇 개의 신호만으로 성공적인

수신이 가능함을 알 수 있다. 따라서 Low-complexity Algorithm 의 Step 2 와 3 의 과정에서 j 가 성공적으로 수신할 수 있도록 하는 link 들을 찾을 수 있다. 즉 $j \in X$ 가 된다.

이상에서 수학적 귀납법에 의해 Optimal Algorithm 을 적용할 때 성공적인 수신이 가능한 수신기는 Low-complexity Algorithm 을 적용할 때 성공적인 수신이 가능함을 보였다. 또한, 자명하게 Optimal Algorithm 을 적용할 때 성공적인 수신 가능한 수신기의 개수는 Low-complexity Algorithm 을 적용할 때 성공적인 수신 가능한 수신기의 개수보다 작거나 같다.

이상을 고려할 때 Optimal Algorithm 을 적용할 때 성공적으로 수신하는 수신기와 Low-complexity Algorithm 을 적용할 때 성공적으로 수신하는 수신기는 같음을 알 수 있다. ■

4. Simulation Results

본 장에서는 제안된 알고리즘의 성능을 확인한다.

그림 2에 다중 홉 통신을 사용하지 않은 경우, Optimal Algorithm 을 적용한 다중 홉 통신을 사용한 경우, Low-complexity Algorithm 을 적용한 다중 홉 통신을 사용한 경우의 불능 확률(outage probability)을 보이고 있다. 다중 홉 통신을 사용하는 경우 다중 홉 통신을 사용하지 않는 경우에 비하여 성능이 비약적으로 향상됨을 확인할 수 있다. 또한 앞 장에서의 증명한 바와 같이 Optimal Algorithm 과 Low-complexity Algorithm 을 사용한 경우의 성능이 같음을 확인할 수 있다.

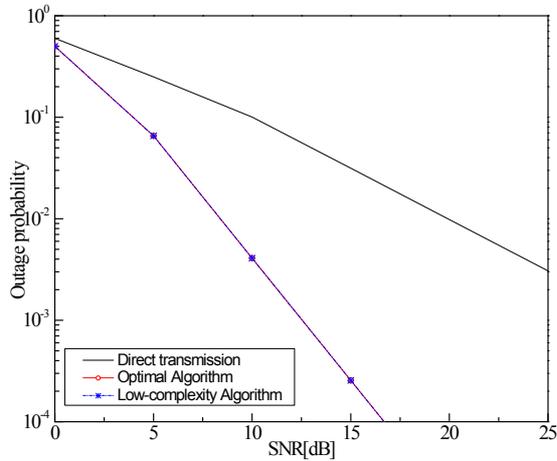


그림 2. 다중 홉 통신을 사용하지 않는 경우와 제안된 알고리즘을 적용한 다중 홉 통신을 사용하는 경우의 불능확률

4. 결론

본 논문에서는 셀 용량 증대, 셀 영역 확장을 달성하는 데 효율적인 기술로 알려진 다중 홉 통신의 방송통신 시스템에의 적용 기법을 살펴 보았다. 방송통신 시스템에 다중 홉 통신을 적용하는 모델을 소개하였으며, 성능 향상을 위한 경로 선택 알고리즘으로 Optimal Algorithm 과 Low-complexity Algorithm 을 제안하였다. Low-complexity 알고리즘은 Optimal Algorithm 에 비하여 상당히 낮은 복잡도를 갖는 것을 확인하였으며, 두 알고리즘을 적용할 때 성공적으로 수신하는 수신기가 같음을 보였다. 또한 모의실험 결과를 통하여 다중 홉 통신을 적용하여 비약적인 성능 향상을 얻음을 확인하였으며, 제안된 두 알고리즘의 불능 확률이 동일함을 확인하였다

Acknowledgement

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0083495).

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] J. N. Lanemann 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.
- [8] M. Saad, "Optimal spectrum-efficient routing in multihop wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 12, pp. 5822-5826, Dec. 2009.