

논문 2013-50-11-3

# 다중 홉 네트워크를 위한 적응 변조 기반 증분형 홉 선택 기법의 성능 분석

(Performance Analysis of Adaptive Modulation Based Incremental Hop Selection Scheme for Multi-Hop Networks)

이 범 수\*, 김 도 훈\*\*, 이 충 용\*\*\*

(Bumsoo Lee, Dohoon Kim, and Chungyong Lee<sup>©</sup>)

## 요 약

본 논문에서는 반이중 다중 홉 네트워크에서 스펙트럼 효율성 성능을 향상시킬 수 있는 적응 변조 기반의 증분형 홉 선택 기법을 제안하고 성능을 분석한다. 제안 하는 기법은 다중 홉 네트워크에서 동작하므로 넓은 네트워크 커버리지를 보장하면서도 반이중 방식에 따른 추가 시간 슬롯 사용의 빈도를 낮추어서 스펙트럼 효율성 손실을 막아준다. 우리는 본 논문에서는 제안하는 기법의 평균 스펙트럼 효율성 성능을 나카가미- $m$  채널에서 분석하였다. 모의실험 결과는 제안하는 기법의 우수성과 분석 된 성능의 정확함을 보여준다.

## Abstract

This paper proposes an adaptive modulation based incremental hop selection scheme which improves network coverage in half-duplex multi-hop networks. The proposed scheme guarantees wide coverage through the operation of multi-hop network while preventing spectral efficiency loss due to the usage of multiple time phases in the half-duplex protocol. Also, we evaluate the average spectral efficiency performance over Nakagami- $m$  fading channel. The simulation results show that the proposed scheme outperforms the existing schemes and the derived evaluation is valid.

**Keywords**: 다중 홉 네트워크, 적응 변조, 증분형 중계, 증폭 후 재전송, 스펙트럼 효율성

## I. 서 론

다수의 중계 노드를 사용하는 다중 홉 네트워크 (multi-hop networks)는 낮은 전력을 사용하여 네트워크의 커버리지를 넓힐 수 있기 때문에 광범위하게 연구가 이루어지고 있다<sup>[1~2]</sup>. 특히, 반이중 (half-duplex) 방식의 중계 방식은 단말기 구현이 간단하면서도, 효율적으

로 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있기 때문에 다중 홉 네트워크를 위한 기존의 많은 기법들이 반이중 방식을 기반으로 하여 제안 되었다.

그러나 반이중 중계 방식은 홉이 증가할수록 필요한 시간 슬롯이 커지게 되고 이는 전체 네트워크의 스펙트럼 효율성 (spectral efficiency) 손실을 가져오게 된다. 이를 극복하기 위해 최근 전이중 (full-duplex) 기반의 중계 기법들이 연구 되고 있으나, 단말 자체 간섭 (self-interference) 등의 문제로 인해 실제 네트워크에 적용하기 어려운 상황이다. 따라서 반이중 중계 네트워크에서 스펙트럼 효율성 손실 문제는 여전히 중요한 이슈로서 다루어지고 있다<sup>[3]</sup>.

적응 변조 (adaptive modulation) 기법은 심볼을 변

\* 학생회원, \*\*\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학부  
(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

\*\* 정회원, 전자부품연구원  
(Korea Electronics Technology Institute)

© Corresponding Author(E-mail: [cylee@yonsei.ac.kr](mailto:cylee@yonsei.ac.kr))

접수일자: 2013년8월10일, 수정완료일: 2013년10월25일

조할 때, 채널 상황에 맞추어 사전에 지정된 임계 성능을 만족시키는 최대의 변조 차수(modulation order)를 사용하여 변조하는 기법이다<sup>[4]</sup>. 이 적응 변조 기법은 단말에서 추가되는 연산량이 적으면서도 효율적으로 전체 네트워크의 스펙트럼 효율성을 향상시킬 수 있기 때문에 그동안 많은 연구가 있어왔다. 본 논문에서는 반이중 중계 네트워크의 스펙트럼 효율성 향상을 위해 각 노드에서 적응 변조 기법을 사용한다고 가정한다.

또한 반이중 중계 네트워크에서의 스펙트럼 효율성 손실을 막기 위해서 증분형 중계(incremental relaying, IR) 기법이 꾸준히 연구되고 있다<sup>[5-7]</sup>. 증분형 중계 기법이란 송신 노드와 수신 노드 사이의 직접 경로 채널의 상태가 사전에 설정된 SNR(signal-to-noise) 수준을 만족할 경우, 중계 노드의 도움 없이 하나의 시간 슬롯 동안 직접 통신을 수행하지만 반대로 직접 경로 채널이 열악할 경우에는 중계 노드의 도움을 받아 두 개의 시간 슬롯동안 중계 통신을 수행하는 기법이다. 이러한 증분형 중계 기법은 직접 경로 채널의 상태에 따라 중계 노드의 사용 여부를 조절할 수 있기 때문에 추가 시간 슬롯의 사용 횟수가 감소하므로 기존의 고정 중계 방식보다 스펙트럼 효율성을 높일 수 있다. 하지만 기존 대부분의 증분형 중계 기법은 이중 홉 네트워크(dual-hop networks)에서 직접 경로와 중계 경로를 이용하여 왔다. 이러한 경우, 두 경로의 독립성으로 인해 성능 분석이 비교적 간단하지만 본 논문에서 다루려고 하는 다중 홉 네트워크에 비해 네트워크 커버리지가 좁아진다는 단점이 있다<sup>[5]</sup>.

나아가 다수의 중계 노드가 존재하는 상황에서 최적의 중계 노드를 선택하여 증분형 중계 방식을 사용하는 증분형 기회적 중계(incremental opportunistic relaying) 기법이 제안되었다<sup>[6]</sup>. 즉, 직접 경로가 임계 수준을 만족하지 못할 경우, 다수의 독립적인 중계 경로 중, 최적의 중계 경로를 선택하여 통신을 수행하는 것이다. 이러한 기법은 증분형 중계 기법의 이득과 다수의 독립적인 중계 경로에서 오는 다이버시티 이득을 동시에 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 이러한 IOR 기법에 적응 변조 기법을 적용하여 추가적인 스펙트럼 효율성 성능 향상을 이끌어내었다. 그러나 다수의 중계 노드를 사용하긴 하지만 기존의 증분형 중계 기법과 마찬가지로 이중 홉 네트워크만을 고려하기 때문에 네트워크 커버리지 문제가 여전히 존재한다고 하겠다.

최근에는 다중 홉 반이중 중계 네트워크에 적합한 증분형 중계 기법이 제안되었지만 각 노드에서의 변조 차수를 하나로 고정하였다는 한계가 있었다<sup>[7]</sup>. 만약 이러한 증분형 기법에서 선택된 채널의 상황에 따라 송신되는 비트수를 적응적으로 조절할 수 있다면 추가적인 성능 향상이 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 다중 홉 반이중 중계 네트워크의 스펙트럼 효율성 향상을 위해서 적응 변조 기반 증분형 홉 선택(incremental hop selection, IHS) 기법을 제안하고 평균 스펙트럼 효율성을 분석한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 송신 노드(S)와 하나의 수신 노드(D) 사이에  $N-1$ 개의 중계 노드,  $R_i$  ( $i=1, \dots, N-1$ )가 존재하는  $N$ 홉 네트워크를 고려한다. 각 노드는 하나의 안테나를 가지고 있으며, 모든 중계 노드는 반이중 방식의 증폭 후 재전송(amplify-and-forward) 프로토콜을 사용한다. 본 논문에서는 기존의 다중 홉 네트워크와는 다르게 모든 중계 노드와 송신 노드는 다음 중계 노드까지의 경로뿐만 아니라 수신 노드까지의 직접 경로를 이용할 수 있다고 가정한다. 이때  $i$ 번째 중계 노드  $R_i$ 에서 다음 중계 노드  $R_{i+1}$ 까지의 채널을  $h_i$ 라고 하며,  $R_i$ 로부터 수신 노드까지의 채널을  $g_i$ 라고 표기한다. (표기상 편의를 위해 송신 노드는  $R_0$ 라고 간주하며,  $R_i$ 는  $R_{i+1}$ 보다 송신 노드에 인접해 있다고 가정한다.) 모든 채널은 나카가미- $m$  페이딩을 겪으며, 채널의 평균 절댓값은 거리의 역 4승법(inverse fourth power law)을 따른다<sup>[8]</sup>. 본 논문에서는 페이딩의 영향으로 각 중계 노드는 인접한 노드로부터의 정보 신호만을 수신하여 증폭할 수 있다

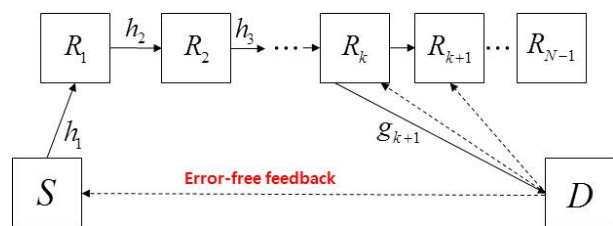


그림 1. 제안된 증분형 홉 선택 기법에 의한  $k+1$ 홉 네트워크

Fig. 1. The  $k+1$ -hop network applying the proposed incremental hop selection scheme.

고 가정한다. 각 노드에서는 채널  $h_i$  혹은  $g_i$ 를 통해 에너지  $E_s$ 를 사용하여 변조된 신호를 전송하며, 전송된 신호는 평균 0, 분산  $N_0$ 의 가우시안 잡음과 더해진다. 이 경우, 채널  $h_i, g_i$  대한 수신 SNR은 각각  $x_i = \rho|h_i|^2, y_i = \rho|g_i|^2$ 으로서 나타낼 수 있으며 여기서 송신 SNR  $\rho$ 는  $\rho = E_s/N_0$ 로 정의된다. 수신 노드에서는 1홉부터  $N$ 홉까지의 경로 중, 하나를 선택하여 심볼을 복조한다. 증폭 후 재전송 프로토콜에 따라 만약  $k$ 홉 경로가 선택 되었다면 수신 SNR은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$z_k = \left( \sum_{i=1}^{k-1} x_i^{-1} + y_k^{-1} \right)^{-1} \text{ for } k = 1, \dots, N \quad (1)$$

### III. 적응 변조 기반 증분형 홉 선택 기법

제안 기법에서는 현재 선택된 홉이  $k$ 홉 이라면 송신 노드부터  $R_{k-1}$ 까지의 중계 노드만을 사용하여,  $j$ 개의 비트를 변조 차수  $2^j$ 로 변조하여 전송한다. 만약 이 비트를 사전에 설정된 목표 BER (bit error rate) 이하로 수신할 수 있다면 통신은 완료 될 것이며 홉의 수와 변조 차수는 각각  $k$ 과  $2^j$ 로 결정 될 것이다. 따라서 항상  $N$ 개의 시간 슬롯을 사용하여 고정된 변조 차수로

전송하는 기존의 다중 홉 기법 대비 유사한 BER 성능을 확보하면서 스펙트럼 효율성을 향상시킬 수 있다.

그림 2는 제안하는 적응 변조 기반 홉 선택 기법의 흐름도 (flow chart)를 나타낸 것이다. 정보 심볼을 보내기 전 수신 노드는 먼저 1부터  $N$ 까지의 홉 중 하나의 홉을 선택한다. 즉, 만약  $k$ 홉에 의한 경로를 이용할 때 1비트를 전송할 때에도 임계 BER을 만족시키는 통신을 할 수 없는 outage가 발생한다면 중계 노드  $R_k$ 가 활성화되며 이때의 홉 수는  $k+1$ 로 증가한다. 그러나 만약  $k$ 홉에 의한 경로가 1비트 통신에 대해서는 목표 BER을 만족시키는 통신을 할 수 있다면 네트워크의 홉 수는  $k$ 로 결정되며, 수신 노드에서는 최적의 변조 차수를 계산한다. 이렇게 결정된 홉의 수와 변조 차수는 송신 노드와 중계 노드들에게 오류 없이 피드백되며, 이는 적은 비트를 통해서도 가능하기 때문에 큰 오버헤드 증가 없이 기존 기법 대비 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 수신 노드에서의 협력 프로세싱을 고려하지 않는다. 그러므로 만약  $k$ 홉 경로가 결정이 되었다면, 그 외의 경로는 수신 노드에서 무시된다. 따라서  $2^j$ 의 변조 차수와  $k$ 의 홉 수로 결정된 제안 기법의 수신 SNR은 다음과 같다.

$$\gamma_{IHS}^{AM} \in \{z_k | \gamma_{th}^j \leq z_k < \gamma_{th}^{j+1}, z_i < \gamma_{th}^1 \text{ for } i < k\} \quad (2)$$

즉,  $k$ 홉  $2^j$  변조 차수가 선택되기 위해서는  $k$ 홉 경로의 SNR이  $2^j$ 차 변조를 가능하게 하는 값보다는 크고  $2^{j+1}$ 차 변조를 위한 값보다는 작아야한다. 또한  $k$ 홉 이전의 모든 경로가 1비트의 통신도 불가능한 outage가 발생해야 한다. 위의 수식에서 quadrature amplitude modulation (QAM)에 대해서 SNR  $\gamma_{th}^j$ 는 변조 차수  $2^j$ 에 대한 임계값으로서 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

$$\gamma_{th}^j = \begin{cases} 0.5(Q^{-1}(P_{th}))^2 & j = 1 (BPSK) \\ (Q^{-1}(P_{th}))^2 & j = 2 (QPSK) \\ \frac{2^j - 1}{3} \left( Q^{-1} \left( \frac{j P_{th}}{4} \right) \right)^2 & 3 \leq j \leq J_{max} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $2^{J_{max}}$ 는 사전에 설정된 최대 변조 차수이며  $P_{th}$ 는 네트워크의 목표 BER이다.

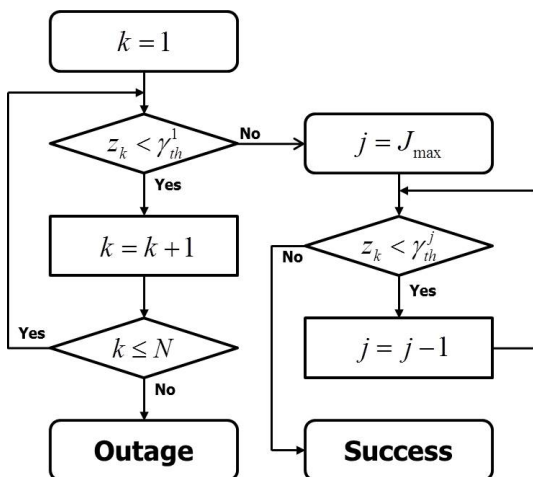


그림 2. 제안된 적응 변조 기반의 증분형 홉 선택 기법의 흐름도  
Fig. 2. A flow chart of the proposed adaptive modulation based incremental hop selection scheme.

### III. 스펙트럼 효율성 분석

#### 1. 평균 스펙트럼 효율성 정의

스펙트럼 효율성은 단위 대역폭을 이용하여 BER  $P_{th}$ 를 만족하면서 단위 시간 당 전송 시킬 수 있는 비트 수를 의미한다<sup>[6]</sup>. 본 논문에서는 변조 기법 외 다른 송신 기법은 고정되어 있다고 가정한다. 즉, 다중 홉의 수와 변조 차수를 각각  $k$ 와  $2^j$ 로 선택한다면  $k$  시간 슬롯 동안  $j$  비트를 송신 하였으므로 스펙트럼 효율성은  $R = j/k$  bps/Hz 라고 할 수 있다. 따라서 평균 스펙트럼 효율성  $\bar{R}$ 은 다음과 같다.

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{J_{\max}} \frac{j}{k} P_{j,k} \quad (4)$$

여기서  $P_{j,k}$ 는 변조 차수와 홉의 수가 각각  $2^j$ 와  $k$ 로 선택 될 확률이다.

#### 2. 변조 차수와 홉 선택의 확률 분석

본 단원에서는 앞 단원에서 언급한 확률  $P_{j,k}$ 를 분석한다.  $k$ 홉 경로와  $j$ 차 변조가 선택 될 확률,  $P_{j,k}$ 는 식 (2)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{j,k} = \Pr(\gamma_{th}^j \leq z_k \leq \gamma_{th}^{j+1}, z_i < \gamma_{th}^1 \text{ for } i < k) \quad (5)$$

위의 식에서  $k$ 개의  $z_i$ 는 독립적인 확률 변수라고 볼 수 없다. 따라서 위의 식 (5)를 closed-form 으로 구하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 위의 식 (5)의 정교한 하계 (lower bound)를 유도한다. 유도한 하계 값과 실제 확률 값의 오차는 높은 SNR 지역으로 갈수록 작아진다. 식 (1)에서  $k$ 홉 경로의 수신 SNR,  $z_k$ 는  $k$ 개 확률 변수의 조화 평균을  $k$ 로 나눈 값이다. 우리는 다음과 같은  $z_k$ 의 상계 (upper bound) 값을 이용한다.

$$z_k \leq \min(x_1, \dots, x_{k-1}, y_k) \leq y_k \quad (6)$$

식 (6)에서 왼쪽의 부등식은 다수의 논문에서 증명 되었으며 높은 SNR 영역으로 갈수록 값의 차가 작아진다<sup>[6],[7]</sup>. 또한 오른쪽 부등식은  $\min(\cdot)$  함수의 특성상 당연한 것이다. 일반적으로 채널의 절댓값은 노드간 거리가 멀수록 페이딩 등의 영향에 의해 감소한다. 특히 본 논문에서는 채널 분산은 거리의 역 4승법을 따른다고

가정하였다. 또한 다중 홉 네트워크에서 각 중계 노드 간 거리가 각각의 중계 노드부터 수신 노드까지의 거리보다 짧다는 가정은 합당하다. 즉,  $R_k$ 에서 수신 노드까지의 SNR  $y_k$ 는 각 중계 노드 사이의 SNR  $x_i$ 보다 일반적으로 작다고 볼 수 있다. 따라서 부등식은 타당하다고 볼 수 있으며 특히 채널의 거리에 따른 감쇠 인자가 클수록 차는 작아질 것이다. 식 (6)의 상계 값을 이용하면 식 (5)의 확률 값은 다음과 같이 하계로 나타낼 수 있다.

$$p_{j,k} \geq \Pr(\gamma_{th}^j \leq z_k \leq \gamma_{th}^{j+1}, y_i < \gamma_{th}^1 \text{ for } i < k) \quad (7)$$

위의 식에서 확률 변수  $y_k$ 는  $z_k$ 와는 다르게 각각 독립적이다. 그러므로 독립 확률 변수의 특성에 의해 식 (7)을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$p_{j,k} \geq (F_{z_k}(\gamma_{th}^{j+1}) - F_{z_k}(\gamma_{th}^j)) \prod_{i=1}^{k-1} F_{y_i}(\gamma_{th}^1) \quad (8)$$

본 논문에서는 모든 채널이 페이딩 인자  $m$ 을 갖는 나카가미- $m$  페이딩 채널을 가정하고 있으므로 채널  $g_i$ 에 대한 수신 SNR  $y_i$ 의 CDF (cumulative distribution function),  $F_{y_i}(\gamma)$ 는 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

$$F_{y_i}(\gamma) = 1 - \frac{\Gamma(m, m\gamma/\bar{y}_i)}{\Gamma(m)} \quad (9)$$

여기서 함수  $\Gamma(\cdot)$ 과  $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 은 각각 감마 함수와 상단 불완전 감마 함수를 의미한다. 또한, 식 (8)을 계산하기 위해서는  $k$ 홉 중계 채널에 대한 수신 SNR  $z_k$ 의 CDF,  $F_{z_k}(\gamma)$ 를 구해야 한다. 하지만 식 (1)에서 나타낸  $z_k$ 는  $k$ 개 확률 변수의 역을 모두 더한 뒤 다시 역을 취한 것으로 closed-form 형태의 PDF (probability density function)를 적분하여 CDF를 얻는 것은 매우 복잡하다. 본 논문에서는 확률 변수의 특성 함수 (characteristic function)를 이용한 무한급수를 사용하여 CDF,  $F_{z_k}(\gamma)$ 를 계산한다. 일반적으로 확률 변수의 특성 함수를 역 푸리에 변환 (inverse Fourier transform) 하면 해당 확률 변수의 CDF를 얻을 수 있다. 그런데 역 푸리에 변환은 확률 변수가 복잡할 경우 유도하는 것이 PDF를 통한 CDF 유도와 마찬가지로 매우 복잡하다. 따라서 본 논문에서는 무한급수의 일종인

Beaulieu 급수를 이용하여  $F_{z_k}(\gamma)$ 를 구한다<sup>[2]</sup>. Beaulieu 급수를 이용하면 확률 변수  $X$ 의 특성 함수를  $\phi_X(\omega)$ 라고 할 때, CDF를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_X(x) = \frac{1}{2} - \sum_{n=1, \text{odd}}^{n_{\max}} \frac{2\text{Im}(e^{-in\omega_0 x} \phi_X(n\omega_0))}{n\pi} \quad (10)$$

여기서  $\omega_0$ 와  $n_{\max}$ 는 각각 정교함과 수렴 속도를 결정하는 인자로서  $\omega_0$ 가 작을수록 정교한 CDF를 구할 수 있는 반면, 수렴을 위해 큰  $n_{\max}$ 가 필요하게 된다. Beaulieu 급수를 사용하면  $k$ 홉 채널에 대한 수신 SNR의 CDF,  $F_{z_k}(\gamma)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{z_k}(\gamma) = \text{Pr}\left(z_k^{-1} > \frac{1}{\gamma}\right) \quad (11)$$

$$= \frac{1}{2} + \sum_{n=1, \text{odd}}^{n_{\max}} \frac{2\text{Im}(e^{-in\omega_0/\gamma} \phi_{z_k^{-1}}(n\omega_0))}{n\pi}$$

위 식에서 확률 변수  $z_k^{-1}$ 에 대한 특성 함수는 확률 변수  $x_1, \dots, x_{k-1}, y_k$ 의 독립성에 의해 다음과 같다.

$$\phi_{z_k^{-1}}(\omega) = \phi_{y_k^{-1}}(\omega) \prod_{i=1}^{k-1} \phi_{x_i^{-1}}(\omega) \quad (12)$$

또한 나카가미- $m$  페이딩 채널에 대하여 확률 변수  $x_i^{-1}$ 의 특성 함수는 다음과 같다.

$$\phi_{x_i^{-1}}(\omega) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{-i\omega m}{x_i}\right)^{\frac{m}{2}} K_m\left(2\sqrt{\frac{-i\omega m}{x_i}}\right) \quad (13)$$

비슷한 방식으로  $y_k^{-1}$ 의 특성 함수도 구할 수 있으며 여기서  $K_m(\cdot)$ 은  $m$ 차 베셀 방정식이다.

#### IV. 모의 실험 결과

##### 1. 제안된 기법의 우수성

그림 3과 4는 제안된 적응 변조 기반 증분형 홉 선택 기법의 평균 스펙트럼 효율성 향상을 보여준다.  $N=3$ 이므로 3 홉 네트워크를 가정 하였으며, 직접 경로의 평균 절댓값  $\bar{g}_1$ 은  $-10$  또는  $-15\text{dB}$ 로 고정하였다. 각 중계 노드는 송신 노드부터 수신 노드 사이에 일렬로 등 간격 배치되어 있으며 중계 경로의 총 거리는 직

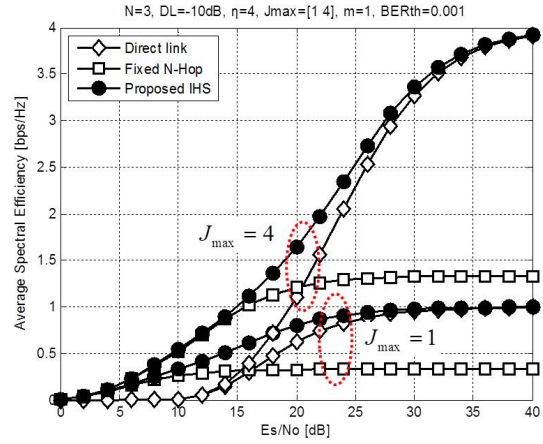


그림 3. 적응 변조 기법에 따른 평균 스펙트럼 효율성의 향상

Fig. 3. Average spectral efficiency improvement through the adaptive modulation.

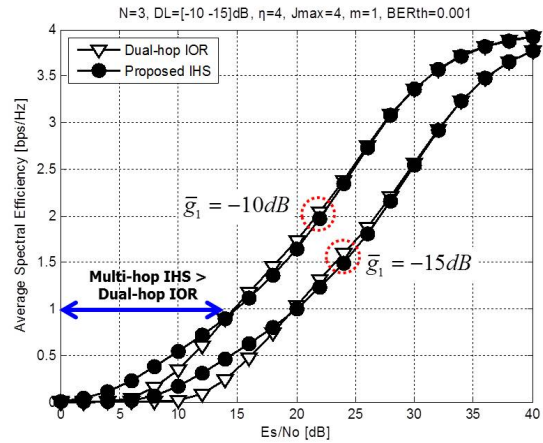


그림 4. 제안된 IHS 기법과 기존의 IOR 기법 간 평균 스펙트럼 효율성 비교

Fig. 4. Comparison of average spectral efficiency between the proposed IHS scheme and the conventional IOR scheme.

접 경로의 거리와 같다고 가정하였다. 즉, 각 중계 노드 사이의 거리는 직접 경로 거리의 1/3이다. 또한 각 채널의 페이딩 인수는  $m=1$ , 증분형 중계 기법을 위한 임계 BER은  $P_{th} = 10^{-3}$ 으로 가정하였다. 마지막으로 적응 변조 기법에서  $J_{\max}$ 는 1 또는 4로 설정하였다.

그림 3을 보면 적응 변조 기법과 무관하게 증분형 홉 선택 기법은 평균 스펙트럼 효율성의 향상을 가져온다는 것을 확인할 수 있다. 특히 SNR이 높은 지역에서는 기존의 고정된 다중 홉 네트워크와 비교했을 때, 시간 슬롯의 사용이 감소하므로 스펙트럼 효율성 성능의 이



특이 있다. 비록 높은 SNR 지역으로 갈수록 중계 경로 없이 직접 경로만 존재하는 네트워크와 유사한 성능을 보여주지만 이러한 네트워크는 낮은 SNR 지역에서 outage 확률이 크게 증가하기 때문에 다중 홉 네트워크에 비해 매우 열악한 성능을 보여준다. 즉 홉 선택 기법은 낮은 SNR 지역에서는 네트워크 outage에 강인하면서 높은 SNR 지역에서는 고정된 다중 홉 네트워크보다 우수한 스펙트럼 효율성을 보여준다고 하겠다. 또한, 적응 변조 기법이 홉 선택 기법에 적용된다면 예상대로 추가적인 스펙트럼 효율성 향상이 있음을 확인할 수 있다. 이는 적응 변조 기법의 최대 변조 차수가 클수록 확연히 나타난다.

그림 4에서는 다수의 중계 노드가 존재하는 네트워크에서 증분형 중계를 기반으로 하는 두 기법을 비교하였다. 서론에서도 언급한 이중 홉 IOR 기법은 송신 노드와 수신 노드 사이의 직접 경로가 임계 SNR을 만족하지 못할 경우에만 중계 경로를 활성화시킴으로써 스펙트럼 효율성을 향상 시킨다. 이때, 중계 경로는 다수의 중계 노드에 의해서 만들어지는 이중 홉 경로 중 가장 우수한 하나가 선택된다. 그림 4를 보면 IOR 기법은 다수의 독립적인 경로에 의해 획득할 수 있는 다이버시티 이득으로 인해 높은 SNR영역에서는 제안된 기법보다 우수한 성능을 보인다. 그러나 중계 경로가 이중 홉 네트워크로만 동작하기 때문에 낮은 SNR 영역에서는 다중 홉 네트워크로 운용되는 제안 기법보다 outage 확률이 높으며, 이는 제안 기법이 낮은 SNR 영역에서는 IOR 기법보다 우수한 스펙트럼 효율성을 갖는 것으로 확인된다. 또한 전체적인 경로의 성능이 열악할수록 네트워크의 outage 확률이 증가함에 따라, outage에 강인한 제안 기법은 직접 경로의 평균 절댓값이 더 낮을 때, 기존 기법 대비 성능 향상의 정도가 크다.

## 2. 분석된 성능의 정교함

그림 5는 본 논문에서 유도한 평균 스펙트럼 효율성 성능이 실제 모의실험 결과와 매우 유사함을 보이고 있다. 실험 환경은 그림 3과 4의 실험 환경과 동일하며 Beaulieu 급수를 위한 인수로서  $\omega_0 = 10^{-3}$ 을 가정하였다. 여기서는 최대 변조 차수,  $2^{J_{\max}}$ 와 페이딩 인수  $m$ 을 변화시켜 가면서 실험하였고, 실험 결과는 최대 변조 차수, 페이딩 인수와 상관없이 본 논문에서 유도한 결과가 정확하다는 것을 입증하고 있다.

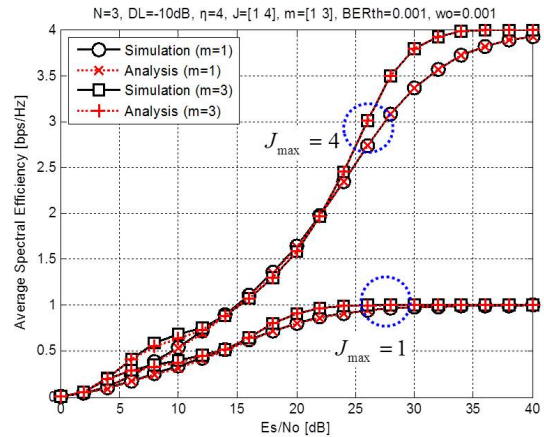


그림 5. 페이딩 인수와 최대 변조 차수에 따른 평균 스펙트럼 효율성의 이론적, 실험적 결과

Fig. 5. Theoretical and simulation results of average spectral efficiency for the fading parameters and maximum modulation orders.

## V. 결론

본 논문에서는 반이중 다중 홉 네트워크에서 스펙트럼 효율성을 향상시킬 수 있는 기법을 제안하였다. 제안한 기법에서는 채널 상황에 맞게 홉의 수와 변조 차수를 적응적으로 사용하기 때문에 outage에 강인하면서 스펙트럼 효율성을 향상시킬 수 있다. 또한, 유도한 평균 스펙트럼 효율성 성능은 실제 결과와 매우 유사하다는 것을 모의실험을 통해 입증하였다.

## REFERENCES

- [1] M. O. Hasna and M. Alouini, "Outage probability of multihop transmission over Nakagami fading channels," *IEEE Commun. Lett.*, Vol. 7, no. 5, pp. 216-218, May 2003.
- [2] G. Farhadi and N. C. Beaulieu, "Power-optimized amplify-and-forward multi-hop relaying systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 8, no. 9, pp. 4634-4643, Sep. 2009.
- [3] T. Riihonen, S. Werner and R. Wichman, "Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 10, no. 9, pp. 3074-3085, Sep. 2011.
- [4] A. J. Goldsmith and S.-G. Chua, "Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 45, no. 10, pp.

1218-1230, Oct. 1997.

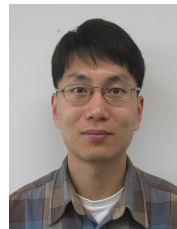
- [5] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks : efficient protocols and outage behavior, " IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 50, pp. 3026-3080, Dec. 2004.
- [6] K. Hwang, Y. Ko, and M. Alouini, "Performance analysis of incremental opportunistic relaying over identically and non-identically distributed cooperative paths," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol. 8, no. 4, pp. 1953-1961, Apr. 2009.
- [7] B. Lee, and C. Lee, "An incremental hop selection scheme for amplify-and-forward multi-hop networks," IEEE Commun. Lett., to be published.
- [8] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications, Cambridge Univ. Press, 2003.
- [9] A. J. Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge Univ. Press, 2005.

— 저 자 소 개 —



이 범 수(학생회원)  
2008년 연세대학교 전기전자  
공학과 학사 졸업.  
2008년~현재 연세대학교 전기  
전자공학과 석박사통합  
과정.

<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 멀티홉 시스템>



김 도 훈(정회원)  
1998년 POSTECH 전자전기  
공학과 학사 졸업.  
2000년 POSTECH 전자전기  
공학과 석사 졸업.  
2013년 연세대학교 전기전자  
공학과 박사 졸업.

2005년~현재 KETI 실감정보플랫폼연구센터  
책임연구원

<주관심분야 : 통신신호처리, 차세대 통신시스템,  
협력통신시스템>



이 충 용(정회원)-교신저자  
1987년 연세대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
1989년 연세대학교 전자공학과  
석사 졸업.  
1995년 Georgia Tech.  
전자공학과 박사 졸업.

1996년~1997년 삼성전자 선임연구원  
1997년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수.  
<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO, 협력통신  
시스템>