

# 중계기 시스템에서 비트 오류율 성능 향상을 위한 중계기 선택 및 전송 모드 결정 방법

정회원 서종필\*, 이명훈\*\*, 이윤주\*\*, 권동승\*\*, 종신회원 정재학\*

## A Relay and Transmission Mode Selection Scheme to Enhance the Bit Error Rate Performance in Relay Systems

Jongpil Seo\*, Myunghoon Lee\*\*, Yoonju Lee\*\*, Dongseung Kwon\*\* *Regular Members*,  
Jaehak Chung\*<sup>o</sup> *Lifelong Member*

### 요약

선택적 협력 공간 다중화 기술은 단일 안테나를 갖는 소스 노드, 다수의 중계기와 다중 안테나를 갖는 도착 노드가 있는 환경에서 공간 다중화 이득과 추가적인 선택적 다이버시티를 동시에 얻을 수 있다. 그러나 이 방법은 특정 중계기에서 전달된 심볼이 경로 손실에 의해 손실될 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하고 비트 오류율 성능을 향상시키기 위해 전체 중계기 중에서 고정된 수의 중계기를 선택하는 대신 주어진 데이터 전송률 이상의 채널 용량을 갖는 중계기를 기회적으로 선택하고 협력 단계에서 신호를 전달할 때 선택된 중계기와 수신단 사이의 채널을 고려하여 공간 다중화 전송 모드와 공간 다이버시티 전송 모드 중 하나를 결정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기존의 방법에 비해 추가적인 공간 다이버시티 이득을 얻음으로써 낮은 SNR 영역에서 약 1.5~2dB의 이득을 얻을 수 있다.

**Key Words** : Relay system, Decode and forward, Relay selection, Bit error rate

### ABSTRACT

In a cooperative communication system with a source node and multiple relays equipping single antenna and a destination node equipping multiple antennas, the selective cooperative spatial multiplexing scheme can obtain spatial multiplexing gain and additional selection diversity gain. But it can degrade a bit error rate performance because some received symbols forwarded from particular relays may be lost by attenuation due to path-loss. We propose a relay and transmission mode selection scheme which selects minimum number of multiple relays having the channel capacity larger than a given data rate and transmission mode which switches spatial multiplexing and spatial diversity mode in cooperation phase to enhance the bit error rate performance. The proposed scheme achieves 1.5~2dB gain at the low SNR range compared with the conventional scheme by obtaining additional spatial diversity gain.

### 1. 서론

차세대 이동 통신 시스템에서 중계기를 이용한 기

술은 시스템의 서비스 영역을 늘리고 채널 용량(channel capacity)을 증대시키기 위해 연구되어 왔다<sup>1,2</sup>. 최근 중계기를 이용한 다중 홉(multi-hop) 전송

※ 본 연구는 방위사업청/민군겸용기술센터와 지식경제부/산업기술평가관리원의 민군겸용기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [06-DU-LC-01, 네트워크 기반 다목적 견마형 로봇 기술 개발]

\* 인하대학교 IT 공과대학 전자공학 전자공학과(slavik@nate.com, jchung@inha.ac.kr), (° : 교신저자), \*\* 한국전자통신연구원 논문번호 : KICS2011-10-500, 접수일자 : 2011년 10월 27일, 최종논문접수일자 : 2011년 12월 2일

기술은 무선 환경에서의 성능을 향상시키기 위해 연구가 진행 중이며 IEEE802.16j 표준에서도 채택되었다<sup>2)</sup>. 대표적인 중계기 방식은 증폭 후 전달(AF: Amplify-and forward)방법과 복호 후 전달(DF: Decode-and-forward) 방법으로 구분할 수 있다<sup>3)</sup>. AF 방법은 소스 노드(source node)에서 중계기로 전송된 신호를 단순히 증폭하여 도착 노드(destination node)로 전달하는 역할을 한다. 반면 DF 방법은 중계기가 수신된 신호를 복호하고 이를 다시 변조하여 도착 노드로 전달한다. AF 방법은 하드웨어 구현 시 복잡도가 낮은 장점이 있으나 중계기에서 더해진 잡음이 함께 증폭되는 단점이 있다. DF 방법은 복호 과정으로 인해 복잡도가 증가하지만 AF 방법에 비해 전송 성능이 높은 장점이 있다.

이러한 기술을 바탕으로 공간 다이버시티 이득(spatial diversity gain)을 얻을 수 있는 협력 다이버시티(cooperative diversity) 기술이 연구되어 왔다<sup>4)5)</sup>. 이 방법은 소스 노드와 도착 노드 사이에 중계기를 이용하여 다중의 통신 경로를 생성하고 이를 통하여 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기술이다. 협력 다이버시티 기술 중 하나인 기회적 중계(opportunistic relaying) 기법은 모든 노드가 단일 안테나를 가지며 다수의 중계기가 있을 때 전송이 가능한 기회가 주어진 중계기만 선택적으로 전송하는 기법이다.<sup>6)7)</sup> 이 방법은 소스 노드-중계기 사이의 채널과 중계기-도착 노드 사이의 채널이 가장 좋은 중계기를 선택하는 방법으로 구현이 비교적 간단하고 추가적인 선택적 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

이와 유사하게 중계기를 이용하여 공간 다중화 이득(spatial multiplexing gain)을 얻을 수 있는 협력 공간 다중화(cooperative spatial multiplexing) 기술이 연구되어 왔다<sup>8)</sup>. 이 방법은 도착 노드가 다중 안테나를 가질 때 도착 노드 안테나 수와 같은 여러 개의 중계기가 전송 신호를 분할하여 전송함으로써 공간 다중화 이득을 얻을 수 있는 방법이다. 각 중계기는 소스 노드의 전송률에 비해 낮은 전송률로 신호를 전송함으로써 각 중계기의 전력 소모와 복잡도를 줄이는 장점이 있다. 이러한 협력 공간 다중화 기법과 기회적 중계 방법을 응용하여 도착 노드의 안테나 수 보다 많은 수의 중계기가 존재하는 환경에서 기회적으로 최적의 채널 용량을 갖는 고정된 개수의 중계기를 선택하는 방법이 제안되었다<sup>9)</sup>. 이 방법은 전체 중계기 중에서 선택 가능한 모든 경우의 수에 대해서 채널 용량을 비교하고 최대의 채널 용량을 갖는 중계기들을 선택하는 방법으로, 동일한 환경의 협력 다이버시티 기

법에 비해 향상된 오수신(outage) 성능을 갖는 장점이 있다.

그러나 이러한 협력 공간 다중화 기법은 데이터 전송 성능 측면에서 다음과 같은 문제점이 있다. 첫 번째로, 전체 시스템 측면에서 가급적 적은 수의 중계기를 선택할 필요가 있다. 두 번째로, 전송률이 고정된 데이터를 전송할 때 채널 상태와 수신기의 SNR(Signal-to-noise ratio)에 따라 공간 다중화 기법과 공간 다이버시티 기법을 적절하게 선택하면 비트 오류율 성능을 개선할 수 있다<sup>10,11)</sup>.

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위해 주어진 데이터 전송률을 만족하는 중계기를 선택하고 주어진 채널 상황에 적합한 중계기의 전송 모드 결정 방법을 제안한다. 제안된 방법은 첫 번째로 각 중계기와 도착 노드 사이의 채널 이득을 고려하여 주어진 전송률을 만족하는 채널 용량을 갖는 중계기를 기회적으로 선택한다. 두 번째로 선택된 중계기의 수와 채널을 이용하여 공간 다중화 기법과 공간 다이버시티 기법 중 낮은 비트 오류율 성능을 갖는 전송 방법을 결정한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 시스템 및 신호 모델과 선택적 협력 다중화 기법에 대해 설명하고 III장에서 비트 오류율 성능 향상을 위한 중계기 선택 및 전송 모드 결정 방법을 제안한다. IV장에서 전산 모의 실험을 통해 제안된 방법의 비트 오류율 성능 향상에 대해 보인다. 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델과 협력 공간 다중화 기술

### 2.1 중계기 시스템 모델

본 논문에서 고려하고 있는 중계기 환경은 그림 1과 같이 단일 송신 안테나를 갖는 소스 노드,  $N_R$ 개의 다중 수신 안테나를 갖는 도착 노드, 단일 송수신 안테나를 갖는  $M$ 개의 중계기로 구성된 시스템이다. 소스 노드와 도착 노드 사이의 거리는  $d_0$ 이다.  $h_{sm}$ 와  $h_{md}$ 는 각각 소스 노드-중계기의 채널 계수, 중계기-도착 노드의 채널 벡터이고 주파수 비 선택적 레일리 페이딩 채널(Rayleigh flat fading channel)이다. 이들 사이의 링크는 경로 손실 또는 지형에 의해 채널 이득이 작아서 소스 노드의 전송 심볼 복호가 불가능하다고 가정한다. 각 중계기는 복호 후 전달 모드로 동작한다.

각 중계기는 시 분할(TDD: Time Division Duplex) 중계 방식으로 동작한다. 따라서 각 전송 심볼 또는 프레임은 소스 노드에서 중계 노드로 전송하는 청취

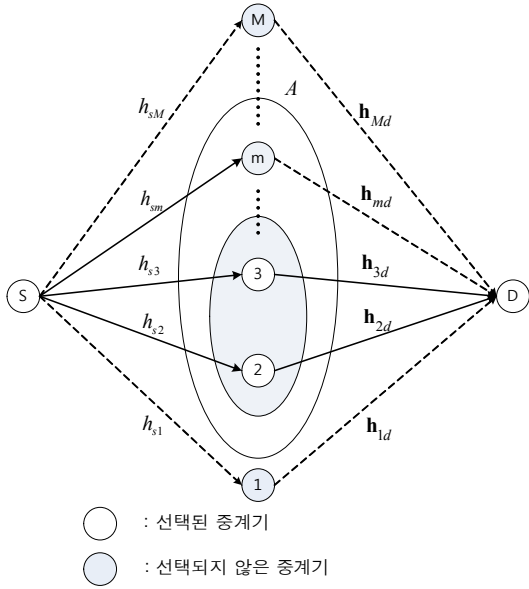


그림 1. 시스템 모델

단계와 중계기에서 도착 노드로 전달하는 협력 단계로 나뉘어 전송된다. 소스 노드에서는 어떠한 채널 정보(CSI: Channel State Information)도 알고 있지 않고 도착 노드에서는 중계기-도착 노드의 채널 정보를 완벽하게 알고 있다고 가정한다.

청취 단계에서 소스 노드는 고정된 전송률  $R$ 을 갖는 전송 심볼  $x$ 를  $P$ 의 전력으로 전송한다. 이때 중계기  $m$ 에서의 수신 신호  $y_{sm}$ 는 다음과 같다.

$$y_{sm} = \sqrt{P d_{sm}^{-\alpha}} h_{sm} x + n_m \quad (1)$$

$h_{si}$ 는 소스 노드와 중계기  $m$  사이의 채널이고 분산이 1인 레일리(Rayleigh) 분포를 따른다.  $d_{sm}$ 는 소스 노드와 중계기  $m$  사이의 거리이고  $\alpha$ 는 경로 손실 지수이다.  $n_m$ 는 중계기  $m$ 에서의 평균이 0이고 분산이  $\sigma_m^2$ 인 부가 가우시안 잡음이다.

청취 단계에서 소스 노드에서 중계기  $m$ 으로 전송된 신호의 신호 대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)는  $\gamma_{sm}$ 로 주어지며 다음의 식과 같다.

$$\gamma_{sm} = \frac{P d_{sm}^{-\alpha} |h_{sm}|^2}{\sigma_m^2} \quad (2)$$

각각의  $\gamma_{sm}$ 는 서로 독립적인(independent) 지수 분포(exponential distribution)을 따른다. 중계기 선택은

기회적인 방법으로 하며 자세한 방법은 3.1절에서 기술한다.

협력 단계에서는  $M$ 개의 중계기 중에서 적절한 중계기를 선택하고 복호된 신호를 동시에 전송한다. 본 논문에서는 모두 동일한 전력으로 전송한다고 가정한다. 이때 도착 노드에서 수신된 신호  $y_d$ 는 다음과 같다.

$$y_d = \mathbf{H}\mathbf{V}\mathbf{x} + \mathbf{n}_d \quad (3)$$

식 (3)에서  $\mathbf{H}$ 는  $N_R \times M$  행렬로 중계기들과 도착 노드 사이의 채널 행렬이고  $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_{1d}, \mathbf{h}_{2d}, \dots, \mathbf{h}_{Md}]$ 이다. 채널 행렬  $\mathbf{H}$ 의 각 열벡터  $\mathbf{h}_{md}$ 의 크기는  $N_R \times 1$ 이며 평균이 0이고 분산이  $\sigma_{md}^2$ 인 복소 가우시안 분포를 따른다. 이때  $\sigma_{md}^2 = d_{md}^{-\alpha}$ 이다.  $\mathbf{V}$ 는 크기가 중계기 선택 행렬로  $\mathbf{V} = \text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_M)$ 인 대각행렬이다. 이때  $m$ 번째 중계기가 선택되면  $v_m = 1$ 이고 그렇지 않으면  $v_m = 0$ 이다.  $\mathbf{x}$ 는 각 중계기에서 복호 후 전달하는 신호를 나타내고  $E[\|\mathbf{x}\|^2] = P$ 이다.  $\mathbf{n}_d$ 는 도착 노드에서의 부가 가우시안 잡음으로  $E[\mathbf{n}_d \mathbf{n}_d^H] = \sigma_d^2 \mathbf{I}_{N_R}$ 이며 여기서  $\mathbf{I}_{N_R}$ 은  $N_R \times N_R$  단위행렬을 의미한다. 소스 노드에서는 어떠한 채널 정보도 알고 있지 않고 도착 노드에서는 중계기-도착 노드의 채널 정보를 완벽하게 알고 있다고 가정한다. 그리고 소스 노드에서 전송하는 심볼의 전송률  $R$ 을 알고 있다고 가정한다.

### 2.2 일반적인 협력 공간 다중화 및 다중 중계기 선택 기법

협력 공간 다중화 기법은 그림 2와 같이 단일 안테나를 갖는 소스 노드와  $M$ 개의 중계 노드, 그리고  $N_R$ 개의 안테나를 갖는 도착 노드로 구성되어 있다. 첫 번째 단계로 소스 노드는 초당  $1/T$  심볼율로  $2^N$ -ary 변조된 심볼  $\mathbf{x}$ 를  $M$ 개의 중계기로 전송하며 이때 심볼  $\mathbf{x}$ 는  $N$ 개의 비트  $x_1, x_2, \dots, x_N$ 를 표현한다. 두 번째

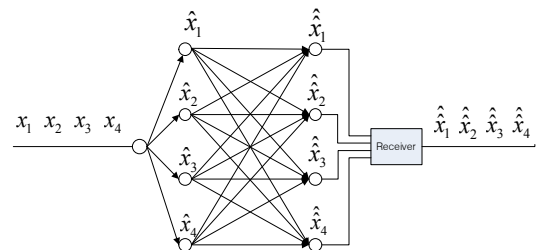


그림 2. 협력 공간 다중화 기술

째 단계로  $n$ 번째 중계기는 수신된 심볼 중에서  $n$ 번째 비트  $x_n$ 만을 복호하고 복호된 비트  $\hat{x}_n$ 를 재 부호화하여 초당  $1/T$ 의 심볼율로 도착 노드로 전송한다.

협력 공간 다중화 기법은 일반적으로 중계기의 수가 도착 노드의 안테나 수와 같거나 적을 때 적용 가능하다. 일반적인 MIMO 시스템도 마찬가지로 송신 안테나 수가 수신 안테나 수 보다 더 많은 경우 송신 안테나 수만큼의 공간 다중화 이득을 얻는 것은 불가능하다. 그러나 채널 상태를 고려하여 수신 안테나 수만큼의 적절한 송신 안테나를 선택함으로써 적은 공간 다중화 이득을 얻는 대신 추가적인 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기법이 제안되었다. 또한 협력 통신 기술에서는 이와 비슷하게 최상의 링크 품질을 갖는 중계기를 선택하는 기회적 중계 방법, 선택적 협력 공간 다중화 기법 등이 있다. 이러한 기술들은 다중 중계기 환경에서 선택적 다이버시티 이득을 얻음으로써 수신 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

선택적 협력 공간 다중화 기법은 도착 노드가  $N_R$ 개의 수신 안테나를 가지고 있을 때, 전체  $M$ 개의 중계기 중에서 최대의 채널 용량을 갖는  $N_R$ 개의 중계기를 선택하는 방법으로 동일한 환경의 협력 다이버시티 기법에 비해 향상된 오수신 성능을 갖는 장점이 있다. 그러나 최대의 채널 용량을 갖더라도 경로 손실이나 페이딩에 의한 영향으로 특정 중계기를 통해 전달된 신호는 복호가 불가능해질 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 전체  $M$ 개의 중계기 중 도착 노드의 수신 안테나 수  $N_R$ 에 상관없이 주어진 전송률을 만족하는 중계기를 기회적으로 선택하고, 비트 오류율 성능을 향상시키기 위해 선택된 중계기의 수와 채널에 따라 전송 모드를 결정하는 방법을 제안한다.

### III. 제안된 비트 오류율 성능 향상을 위한 중계기 선택 방법

본 장에서는 기존의 선택적 협력 공간 다중화 기법의 단점을 보완하기 위해 채널 상황에 따라 주어진 전송률을 만족하는 중계기를 기회적으로 선택하고 협력 단계에서 공간 다중화 기법과 공간 다이버시티 기법 중 낮은 비트 오류율 성능을 갖는 전송 모드 결정 방법을 제안한다.

#### 3.1 기회적 중계기 후보군 선택

선택적 중계기 시스템은 소스 노드-중계기 사이의 채널뿐만 아니라 중계기-도착 노드 사이의 채널 또한

고려되어야 한다. 일반적인 MIMO 시스템은 각 송신 안테나에서 전송된 신호가 겪는 경로 손실은 모두 동일하다. 반면 협력 통신에서는 각 중계기와 도착 노드 사이의 경로 손실이 모두 다르다. 따라서 중계기와 도착 노드 사이의 거리에 따라 주어진 전송률을 만족하는 최소한의 중계기의 수가 유동적으로 변하게 된다. 본 절에서는 각 중계기와 도착 노드 사이의 경로 손실을 고려하여 주어진 전송률을 만족하는 최소한의 중계기를 선택하는 방법을 제안한다.

소스 노드와 중계기 그리고 도착 노드 사이의 심볼 구간 당 전송률은 각각  $R$ 로 고정되어있다고 가정한다. 청취 단계에서 소스 노드는 한 심볼 주기 동안 송신 심볼을 전송한다. 이때 복호 가능한 중계기 집합  $A$ 는 다음과 같다.

$$A = \{ m \mid \log_2(1 + \gamma_{sm}) \geq R \} \quad (4)$$

각 중계기는 식 (4)에 따라 복호 가능 여부를 판단하여 이 정보를 도착 노드로 전송한다.

#### 3.2 주어진 전송률 이상의 채널 용량을 만족하는 중계기 선택

본 절에서는 기회적으로 선택된 중계기 후보군 중에서 주어진 전송률을 만족하는 최소한의 중계기를 선택하는 방법을 제안한다. 도착 노드는 소스 노드의 전송신호를 복호 가능한 중계기 정보와 채널 정보를 이용하여 가능한 모든 경우의 수에 대한 채널 용량을 계산한다.

$$C(\mathbf{H}, \mathbf{V}) = \log_2 \det \left( \mathbf{I}_{N_R} + \frac{P}{\sigma_d^2} \mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{H}^H \right) \quad (5)$$

식 (5)에서  $C(\mathbf{H}, \mathbf{V})$ 는 중계기와 도착 노드 사이의 채널  $\mathbf{H}$ 와 임의의 중계기 선택 행렬  $\mathbf{V}$ 가 주어졌을 때의 채널 용량이다. 이때 가능한 모든 중계기 선택 행렬의 집합은 다음과 같다.

$$\Omega = \{ \mathbf{V} = \text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_M) \mid v_m \in \{0, 1\} \text{ if } m \in A, v_m = 0, \text{ otherwise.} \} \quad (6)$$

도착 노드는  $\Omega$  내의 모든  $\mathbf{V} \in \Omega$ 에 대하여 식 (5)의 채널 용량을 계산하고 다음의 식 (7)과 같이 주어진 전송률  $R$ 보다 큰 채널 용량을 갖는 최소한의 중계기를 선택한다.

$$\mathbf{V}^* = \arg \min_{\mathbf{V} \in \Omega, C(\mathbf{H}, \mathbf{V}) \geq R} \text{tr}(\mathbf{V}) \quad (7)$$

만약 모든  $\mathbf{V}$  중에서  $C(\mathbf{H}, \mathbf{V}) \geq R$ 을 만족하는  $\mathbf{V}$ 가 존재하지 않는 경우에는 식 (7)을 이용한 중계기 선택 행렬을 구할 수 없다. 이때에는 채널 용량이 최대인  $R$ 에 근접하도록 집합  $A$ 의 모든 중계기를 선택한다.

### 3.3 중계기-도착 노드 간 채널 환경을 고려한 전송 모드 결정

앞에서 제안된 방법은 중계기의 위치와 채널 상황에 따라 주어진 전송률을 만족하는 중계기를 적극적으로 선택한다. 따라서 선택된 중계기의 수  $\text{tr}(\mathbf{V}^*)$ 는 각각의  $\|\mathbf{h}_{md}\|^2$ 과 SNR에 따라서 유동적으로 변화하게 된다. 특정 중계기와 도착 노드 사이의 SNR이 높은 경우 하나의 중계기만을 사용하더라도 주어진 전송률보다 높은 채널 용량을 얻을 수 있기 때문에 다수의 중계기를 사용하지 않더라도 안정적인 데이터 전송이 가능하다. 반면 선택 가능한 모든 중계기와 도착 노드 사이의 SNR이 상대적으로 낮은 경우에는 도착 노드의 안테나 수보다 많은 수의 중계기가 선택될 수 있다. 이때에는 선택된 중계기의 수만큼 공간 다중화 이득을 얻을 수 없기 때문에 추가적인 이득을 얻을 수 있는 방법이 필요하다. 본 절에서는 선택된 중계기 수에 따라 각각 다른 전송 모드 결정 방법에 대해 설명한다.

#### 3.3.1 $\text{tr}(\mathbf{V}^*)=1$ 일 때의 전송 모드 결정

선택된 중계기의 수가 하나일 때에는 공간 다중화 기법으로 전송하는 것은 불가능하다. 따라서 이때에는 소스 노드에서 전송된 심볼을 복호 후 그대로 도착 노드로 전달한다. 이는 단일 중계기 방법과 동일하며 이때 중계기에서 전달하는 심볼의 전송률은 소스 노드에서의 전송률과 동일하거나 크게 할 수 있다. 도착 노드는 다중 안테나를 가지므로 최대 비율 결합(MRC: Maximum Ratio Combining)을 이용하여 중계기로부터 전달된 심볼을 수신한다.

#### 3.3.2 $1 < \text{tr}(\mathbf{V}^*) \leq N_R$ 일 때의 전송 모드 결정

선택된 중계기의 수가 도착 노드의 안테나의 수보다 같거나 적은 경우 선택된 중계기의 수만큼 공간 다중화 이득을 얻을 수 있다. 그러나 각 중계기에 의한  $P\sigma_{id}^2/\text{tr}(\mathbf{V})\sigma^2$  값에 따라 해당 중계기에서 전달된 신호의 비트 오류율 성능이 낮아진다. 이를 보완하기 위해 공간 다중화 모드와 송신 다이버시티 모드를 스위칭하여 전송한다. 이 방법은 [10]과 [11]에서 연구되었다. 이러한 공간 다중화와 공간 다이버시티 기법의

선택 방법은 주어진 MIMO 채널환경에서 최소의 비트 오류율 성능을 갖도록 한다. 중계기-도착 노드 사이의 유효 채널  $\mathbf{H}\mathbf{V}^*$ 의 특이값(singular value)을 이용하여 다음과 같은 조건을 만족할 때 공간 다중화 기법으로 전송한다.

$$\frac{\lambda_{\max}(\mathbf{H}\mathbf{V}^*)}{\lambda_{\min}(\mathbf{H}\mathbf{V}^*)} \leq \frac{d_{\min}(\text{tr}(\mathbf{V}^*), R)}{d_{\min}(1, R)} \quad (8)$$

여기서  $\lambda_{\max}(\mathbf{H}\mathbf{V}^*)$ 와  $\lambda_{\min}(\mathbf{H}\mathbf{V}^*)$ 은 각각 유효 채널 행렬  $\mathbf{H}\mathbf{V}^*$ 의 최대 및 최소 특이값을 의미한다.  $d_{\min}(\text{tr}(\mathbf{V}^*), R)$ 은 전체 전송률이  $R$ 이고 크기가  $\text{tr}(\mathbf{V}^*) \times 1$ 인 벡터 심볼을 생성하는데 사용되는 성상도(constellation)의 최소 유클리드(Euclidean) 거리이고  $d_{\min}(1, R)$ 은 전체 전송률이  $R$ 인 스칼라 심볼에 대한 최소 유클리드 거리이다. 채널 상태에 따라 식 (7)을 만족하는 경우 각 중계기는 공간 다중화 기법을 적용하여 별도의 전처리(pre-processing) 없이 자신에게 할당된 심볼만을  $R^* = R/\text{tr}(\mathbf{V}^*)$ 의 전송률로 도착 노드로 전달한다.

반대로 식 (7)을 만족하지 않는 경우 공간 다이버시티 모드로 전환하고 다양한 송신 다이버시티 방법<sup>[12,13]</sup>을 이용하여 전송률  $R$ 로 전달한다.

#### 3.3.3 $\text{tr}(\mathbf{V}^*) > N_R$ 일 때의 전송 모드 결정

선택된 중계기의 수가 도착 노드의 안테나 수보다 많은 경우 얻을 수 있는 공간 다중화 이득은  $N_R$ 로 제한된다. 이때 여분의 중계기를 통해 공간 다중화 기법과 공간 다이버시티 기법을 결합하여 전송함으로써  $N_R$ 의 공간 다중화 이득 이외에 추가적인 공간 다이버시티 이득을 얻어서 비트 오류율 성능을 향상시킬 수 있다<sup>[14,15]</sup>.

협력 단계에서 도착 노드는  $1 < m^* \leq N_R$ 일 때와 마찬가지로 선택된 중계기와 도착 노드 사이의 채널 정보와 식 (8)을 이용하여 전송 모드를 결정한다.

공간 다중화 전송 모드로 결정되었을 때 각 중계기의 전송 모드는 해당 중계기와 도착 노드 사이의  $\|\mathbf{h}_{md}\|^2$ 에 따라 결정된다. 경로 손실에 의해 상대적으로 도착 노드와 가까이 위치한 중계기에서 전달된 심볼은 높은 SNR을 갖고 멀리 위치한 중계기에서 전달된 심볼은 상대적으로 낮은 SNR을 갖기 때문에 멀리 위치한 중계기들을 그룹(group)화 하고 STBC 부호화<sup>[12,13,16]</sup>를 함으로써 공간 다중화 이득에 추가적인 공

간 다이버시티 이득을 얻음으로써 기존의 방법보다 향상된 비트 오류율 성능을 기대할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법을 요약하면 다음과 같다.

**Step 1: 청취 단계**

소스 노드에서 전송률  $R$ 의 심볼을  $M$ 개의 중계기로 전송.

**Step 2: 기회적 중계기 후보군 선택 단계**

각 중계기에서 식 (4)를 이용하여 복호 가능 여부를 판단하고 이를 도착 노드에 보고

**Step 3: 중계기 선택 단계**

도착 노드에서 식 (5)~(7)을 이용하여 전송률  $R$ 을 만족하는 최소한의 중계기 집합 선택.

**Step 4: 중계기에서의 전송 모드 결정**

$\text{tr}(\mathbf{V}^*) = 1$ 인 경우 복호된 심볼을 그대로 전달.

$\text{tr}(\mathbf{V}^*) > 1$ 인 경우 식 (8)을 이용하여 중계기에서의 전송 방법을 공간 다중화와 공간 다이버시티 중 낮은 비트 오류율을 갖는 방법으로 결정.

$\text{tr}(\mathbf{V}^*) > N_R$ 이고 공간 다중화 전송 모드인 경우 공간 다중화-공간 다이버시티 혼합 기법으로 결정.

**Step 5: 협력 단계**

결정된 전송 모드로 선택된 중계기에서 복호된 심볼을 전달.

**IV. 전산 모의 실험**

본 장에서는 제안된 중계기 선택 방법을 적용했을 때 평균 비트 오류율 성능을 확인하고 기존의 다중 중계기 선택 방법의 비교를 위해 전산 모의 실험을 수행하였다.

소스 노드와 중계기는 각각 하나의 안테나를 가지며 도착 노드는  $N_R$ 개의 다중 안테나를 갖는다. 채널은 단일 경로 레일리 페이딩 채널(Single path Rayleigh fading channel)이며 채널은 한 심볼 구간 또는 프레임 동안 변하지 않는 블록 페이딩(block fading)을 가정하였다. 각 심볼 구간 당 전송률은  $R$ 로 고정하였고 변조 방법은 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)을 사용하였다. 그리고 채널 부호화 기법은 적용하지 않았다.

전체 중계기의 수가 각각 4, 6, 8개가 존재하고 도착 노드의 수신 안테나 수가 2개인 환경을 가정하였다. 그리고 모든 중계기는 소스 노드의 전송 심볼을 복호가능하다고 가정하였고 도착 노드에서 각 중계기의 전송 심볼에 의한 평균 SNR은 모두 같다고 가정

하였다. 각 심볼 구간 당 전송률은  $R = 4\text{bps/Hz}$ 이고 소스 노드에서는 심볼을 16QAM으로 변조하여 전송하였다. 각 중계기에서는 전송 모드에 따라 16QAM 또는 4QAM으로 복호된 심볼을 전달하였고 도착 노드에서의 채널 추정 오차는 없다고 가정하였다. 수신된 신호 검출기는 ML(Maximum Likelihood) 검출기를 사용하였다.

그림 3은 제안된 방법에서 선택된 중계기 수의 평균을 나타낸다. 가로축의 SNR은 선택된 중계기의 송신 전력의 합  $P$ 와 도착 노드의 잡음 전력  $\sigma_d^2$ 의 비를 의미한다. 전체 중계기의 수  $M$ 이 증가할수록 기회적 중계기 선택 방법에 의해 선택적 다이버시티 이득을 얻기 때문에 동일한 SNR 영역에서 선택된 중계기 수가 줄어든다. SNR이 2dB일 때  $M$ 에 따라 선택된 중계기는 각각 3.4, 3.1, 2.6개로 이는  $M=4$ 일 때 비해  $M=8$ 일 때 선택되는 중계기의 수에 의한 전체 시스템 복잡도가 약 24% 감소했음을 의미한다. 한편 SNR이 증가할수록 그림 3에서 보이듯이 선택되는 중계기의 수는 SNR이 약 16dB일 때 1로 수렴한다. 만일 전송률  $R$ 이 증가하면 선택된 중계기의 수가 1로 수렴하는 SNR값은 16dB보다 더 높아질 것이다.

그림 4는 제안된 방법의 비트 오류율 성능을 나타내었다. 실선은 본 논문에서 제안된 중계기 선택 및 전송 모드 결정 방법을 적용했을 때의 비트 오류율이고 점선은 기존의 협력 다중화를 위한 다중 중계기 선택 방법의 평균 비트 오류율이다. SNR이 5dB 이하인 영역에서 선택되는 중계기의 수는 그림 3에서 나타난 바와 같이 도착 노드의 안테나 수  $N_R = 2$ 보다 많다. 이때 공간 다중화 전송 모드로 결정되면 선택된 중계기에서는 공간 다중화 기법과 공간 다이버시티 기법

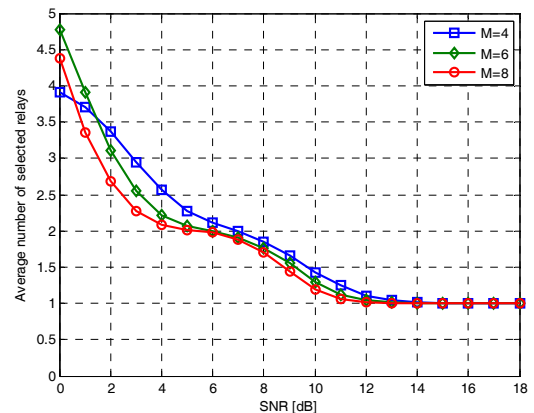


그림 3. 도착 노드의 안테나가 2개이고 전송률  $R = 4$ 일 때 선택되는 중계기 수의 평균

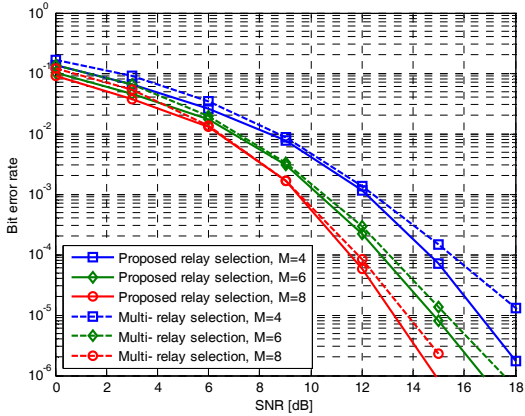


그림 4. 제안된 방법과 기존의 협력 다중화를 위한 다중 중계기 선택 방법의 비트 오류율 성능 비교

을 결합하여 복호된 심볼을 전달하므로 추가적인 공간 다이버시티 이득을 얻는다. 따라서 낮은 SNR 영역에서는 기존의 다중 중계기 선택 방법에 비해 약 1.5~2dB의 이득을 얻는다. 한편 6dB 이상의 SNR 영역에서는 선택하는 중계기의 수가 기존의 방법과 비슷하나 이때의 비트 오류율 성능은 기존의 방법에 비해 향상된다. 식 (8)에 의해 채널 상황에 따라 더 낮은 비트 오류율을 갖는 전송 방법으로 결정함으로써 보다 향상된 비트 오류율 성능을 갖는다.

그림 5는  $M=6$ 일 때 제안된 방법과 기존의 협력 다중화를 위한 다중 중계기 선택 방법, 그리고 기회적 중계 기법의 비트 오류율 성능을 나타내었다. 레일리 페이딩 채널 환경에서 다이버시티 오더는 높은 SNR에서의 비트 오류율 성능의 기울기를 결정한다. 기존

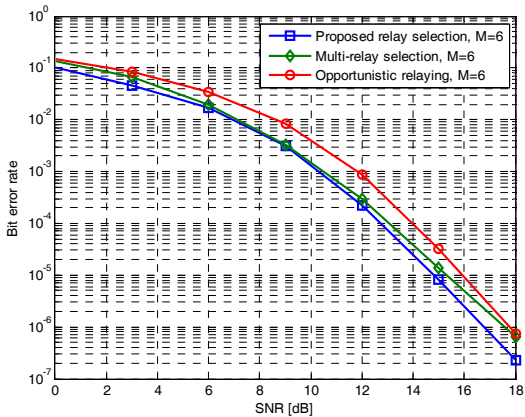


그림 5.  $M=6$ 일 때 제안된 방법과 기존의 협력 다중화를 위한 다중 중계기 선택 방법 및 기회적 중계 기법의 비트 오류율 성능 비교

의 방법은 다이버시티 오더가  $M/N_r \times N_r = M^2$ 이지만 기회적 중계 기법과 같이 하나의 중계기만을 선택하는 경우 다이버시티 오더는  $MN_r$ 이다. SNR이 10dB 이상일 때 기존의 다중 중계기 선택 방법에 비해 제안된 방법이 얻는 이득은 점차 증가한다. 제안된 방법은 채널 상황에 따라 선택되는 중계기의 수와 전송 방법이 달라지므로 다이버시티 오더는  $M$ 과  $MN_r$  사이의 값을 갖는다. 한편 기회적 중계 기법은  $MN_r$ 의 다이버시티 오더를 갖기 때문에 20dB 이상의 매우 높은 SNR 영역에서는 제안된 방법과 거의 동일한 비트 오류율 성능을 갖는다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 다중 중계기가 존재하는 환경에서 선택적 협력 다중화 기법에서 발생할 수 있는 특정 중계기에 의해 전달된 신호의 경로 손실로 인해 비트 오류율 성능이 저하되는 단점을 보완하기 위해 주어진 데이터 전송률을 만족하는 중계기를 선택하고 주어진 채널 상황에 적합한 중계기의 전송 모드 결정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 각 중계기와 도착 노드 사이의 채널 이득을 고려하여 주어진 전송률을 만족하는 채널 용량을 갖는 중계기를 기회적으로 선택하고 선택된 중계기의 수와 채널을 이용하여 공간 다중화 기법과 공간 다이버시티 기법 중 낮은 비트 오류율 성능을 갖는 전송 방법으로 결정하는 방법이다. SNR과 채널 상황에 따라 선택된 중계기 수와 전송 방법을 달리함으로써 기존의 방법에 비해 전체 시스템 측면에서의 복잡도가 낮아지고 동시에 비트 오류율 성능을 향상시킬 수 있다. 전산 모의 실험을 통해 제안된 방법의 평균 비트 오류율이 기존의 방법에 비해 향상되었음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang "User cooperation diversity, Part I: system description," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 51, No. 11, pp. 1927-1938, Nov. 2003.
- [2] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang "User cooperation diversity, Part II: Implementation aspects and performance analysis," *IEEE Trans. on Communications*, Vol. 51, No. 11, pp. 1939-1948, Nov. 2003.

- [3] M. Yu, J. Li and H. Sadjadpour, "Amplify-forward and decode-forward: The impact of location and capacity contour," *IEEE MILCOM Conf.*, Oct. 2005.
- [4] J. Laneman, D. Tse and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 50, No. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [5] D. Chen and J. Laneman, "Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 5, No. 7, pp.1785-1794, Sep. 2007.
- [6] A. Bletsas, H. Shin and M. Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 9, pp.3450-3460, Sep. 2007.
- [7] A. Bletsas, A. Khisti, D. Reed and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas Comm*, Vol. 24, No. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [8] S.W. Kim, "Cooperative spatial multiplexing in ad hoc networks," *IEEE International Conf. Mobile Ad hoc and Wireless Sensor Systems*, Nov. 2005.
- [9] S. Zhang and V. K. N. Lau, "Multi-relay selection design and analysis for multi-stream cooperative communications," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol.10, No. 4, pp.1082-1089, Apr. 2011.
- [10] R.W Heath and J. Paulraj, "Switching between diversity and multiplexing in MIMO systems," *IEEE Trans. on Communications*, Vol.53, No. 6, pp.1082-1089, Jun. 2005.
- [11] R.W Heath and D. J. Love, "Multimode antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol.53, No. 8, pp.1082-1089, Aug. 2005.
- [12] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 45, No. 5, pp. 1456-1467, Jul. 1999.
- [13] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Comm*, Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [14] T. Mao and M. Motani, "STBC-VBLAST for MIMO wireless communication systems," *IEEE International Conf. Communications*, Vol. 4, pp. 2266-2270, Sep. 2005.
- [15] W. C. Freitas, F. R. P. Cavalcanti and R. R. Lopes, "Hybrid transceiver schemes for spatial multiplexing and diversity in MIMO systems," *Journal of Communication and Information Systems*, Vol. 20, No. 3, pp. 63-76, Dec. 2005.
- [16] E. N. Onggosanusi, A. G. Dabak and T. M. Schmidl, "High rate space-time coded scheme: performance and improvement in correlated fading channels," *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Vol. 1, pp. 194-199, Mar. 2002.

서 종 필 (Jong-pil Seo)

정회원



2009년 인하대학교 전자공학과  
학사 졸업  
2011년 인하대학교 전자공학과  
석사 졸업  
2011년~현재 인하대학교 전자  
공학과 박사과정  
<관심분야> OFDM시스템, MIMO,

Cognitive radio, LTE-Advanced

이 명 훈 (Myunghoon Lee)

정회원



2004년 순천대학교 정보통신공  
학과 학사 졸업  
2006년 순천대학교 정보통신공  
학과 석사 졸업  
2005년~2010년 순천대학교  
ITRC 연구원  
2010년~현재 한국전자통신연  
구원

<관심분야> WMN, USN, WiBro



이 윤 주 (Yoonju Lee)

정회원



1974년 숭실대학교 전자공학과  
학사 졸업  
1989년 숭실대학교 전자공학과  
석사 졸업  
1998년 숭실대학교 전자공학과  
박사 졸업  
1975년~1978년 (주) 대한통신

1979년~현재 한국전자통신연구원

<관심분야> 디지털 스위칭, 데이터 통신, 차세대 이  
동통신

정 재 학 (Jaehak Chung)

종신회원



1988년 2월 연세대학교 전자공  
학과  
1990년 2월 연세대학교 전자공  
학과 석사  
2000년 University of Texas at  
Austin 전기전산 학과 박사  
2000년~2001년 post doctoral

fellow, University of Texas at Austin

2001년~2005년 삼성종합기술원 수석연구원

2005년~현재 인하대학교 부교수

<관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통  
신, MIMO-OFDM, UWB, Cross layer설계

권 동 승 (Dongseung Kwon)

정회원



1985년 연세대학교 전자공학과  
학사 졸업  
1987년 연세대학교 전자공학과  
석사 졸업  
2004년 연세대학교 전자공학과  
박사 졸업  
1975년~현재 한국전자통신연  
구원

<관심분야> 디지털 스위칭, 데이터 통신, 차세대 이  
동통신