

Multi-hop Relay 기반 협력 통신 기술

유병욱* | 이규하** | 박원우* | 김현도** | 이충용*
연세대학교*, 삼성탈레스**

요약

MIMO 기술은 데이터 전송률을 증대시키고 수신 성능을 향상시킬 수 있는 다중 안테나 기술로써 각광받아왔다. 그러나 단말 크기의 제한으로 인하여 구현에 큰 어려움이 따르게 되었고 이를 해결하기 위해서 하나의 안테나를 갖고 있는 단말간 서로 협력(cooperation) 하여 데이터 전송률을 높이고 수신 성능을 향상시키기 위한 연구가 논의되고 있다. 특히 ad-hoc 이나 mesh 네트워크에서의 다중 홉 기술을 기반으로 단말간 서로 협력하여 채널 용량을 늘리고 수신 성능을 향상시키기 위한 다양한 연구가 진행 중이다.

본 고에서는 다중 홉 중계 기술에 대한 기본적인 개념과 협력 통신 기술, 그리고 IEEE 802.16j 표준화 동향에 대해 살펴본다. 이론적인 채널 용량 분석과 중계(relay)의 목적에 대해 알아보고 중계 기법에 따른 채널 용량을 분석한다. 더 나아가 다중 홉 중계 전송 기법의 성능을 분석하고 다중 홉 지원을 위한 표준화 동향 및 프레임 구조를 알아본다. 마지막으로 다이버시티 이득과 다중화 이득을 얻을 수 있는 협력 통신 기술에 대해 살펴본다.

1. 서론

최근의 무선 이동통신 기술에서는 대용량 및 고품질의 다양한 멀티 미디어 서비스가 요구되고 있고, 이를 만족시키기 위한 다양한 연구가 진행 중이다. 이 중에서 multiple-

input multiple-output (MIMO) 기술은 송수신 단에 여러 개의 안테나가 존재하는 다중 안테나 기술로써 기존의 기술과 동일한 송신 파워와 대역폭을 사용함에도 불구하고 데이터 전송률을 높이거나 데이터 수신 성능을 높일 수 있는 기술이다[1][2]. 데이터 전송률을 높이기 위한 공간 다중화 (SM: spatial multiplexing) 기법은 각 송신 안테나마다 서로 독립적인 데이터를 보냄으로써 송신 안테나 개수만큼의 다중화 이득 (multiplexing gain) 을 얻을 수 있으며, 데이터 수신 성능을 높이기 위한 송신 다이버시티 (TD: transmit diversity) 기법은 송신 신호의 시공간 부호화 (STC: space-time coding)를 통하여 최대 송신 안테나 개수와 수신 안테나 개수의 곱만큼의 다이버시티 이득 (diversity gain)을 얻을 수 있다[3]. 그리고 trade-off 관계인 다중화 이득과 다이버시티 이득을 둘 다 얻을 수 있는 하이브리드 기법 및 full-rate full-diversity (FDFR) 기법에 대한 연구도 진행되어 왔다. 또한 수신 단에서 채널의 정보를 송신단으로 피드백하고 이를 이용하여 송신단에서 각 안테나 별로 파워와 변조 및 부호화 기법을 적응적으로 달리 할 수 있는 pre-coding 기법에 대한 연구도 활발히 연구되어 왔다[4].

MIMO 기술은 다중화 이득과 다이버시티 이득을 통하여 데이터 전송률을 높이거나 수신 성능을 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있으나 장비 구현 차원에서의 여러 가지 어려움을 가지고 있다. 첫째, 공간 다중화 기법 같은 경우, 가장 간단한 zero-forcing (ZF) 수신기를 이용한다 하더라도 채널의 역 행렬을 구하는 연산을 수행해야 한다. 안테나 수가 증가하게 되면 그 연산량은 기하급수적으로 증가하게 된다. 둘째, 단말의 크기도 MIMO 장비 구현에 장애가 된다. 무선

이동단말의 크기가 점차 소형화되는 추세에서 단말에 두 개 이상의 안테나를 탑재할 수 없으며, 다중 안테나를 설치한다 하더라도 안테나간 공간적 상관도 때문에 수신 성능은 상당히 열화 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 하나의 안테나를 갖고 있는 단말이 다른 단말의 안테나를 이용하여 다중 안테나와 유사하게 데이터를 전송하는 협력 통신이 등장하였다[5][6].

협력 통신은 정보 이론에서 등장한 중계 채널을 기반으로 발전한 통신 기술로서 데이터를 주고 받는 송신기와 수신기 사이에 중계 역할을 하는 단말을 이용하여 채널 용량을 증가시키고 경로손실(path-loss)을 줄임으로써 수신 성능도 향상시킬 수 있는 기술이다. 최근에 각광받고 있는 ad-hoc 네트워크와 mesh 네트워크, 센서 네트워크에서도 기존의 다중 홉(multi-hop) 기법과 더불어 협력 통신 기술을 이용하고 있으며, IEEE 802.16 표준에서도 셀 커버리지 확장과 음영지역 해소 및 데이터 전송률을 증가시키기 위해 중계국이 도입된 IEEE 802.16j 표준화가 진행 중이다[7].

본 고에서는 최근 많은 연구가 진행되고 있는 다중 홉 중계 기술과 협력 통신에 대해 살펴보도록 한다. II장에서는 다중 홉 중계 기술과 현재 진행되고 있는 IEEE 802.16j 표준화 현황에 대해 살펴본다. III장에서는 다중 홉 중계 기반 협력 통신과 표준화에 적용된 예를 살펴보고 IV장에서 결론을 맺는다.

II. Multi-hop Relay 기술

최근 이슈가 되고 있는 ad-hoc과 mesh 네트워크는 기간 망이 존재하지 않는 상황에서 단말간 직접 통신을 할 수 있는 네트워크이다. 이러한 상황에서 데이터의 전송은 다중 홉에 의해 수행된다. 다중 홉은 송신하는 단말의 커버리지 내에 수신 단말이 없을 경우, 그 중간에 위치한 다수의 단말을 통하여 데이터를 전송하는 기법으로 단일 홉에 비해 파워 소모가 적고 데이터 전송률을 높일 수 있다는 장점을 갖는다. 이러한 다중 홉 중계 기법은 기간 망이 존재하는 상황에서도 적용될 수 있다. 기지국에서 전송하는 신호가 도달하기 어려운 음영지역이나 셀 경계 지역의 단말을 중계국을

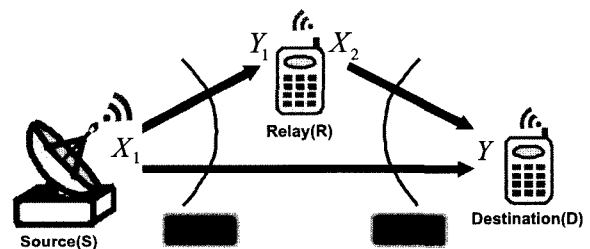
통하여 서비스 할 수 있으며 경로 손실의 감소로 인해 데이터 전송률을 높일 수 있다. 본 장에서는 이러한 장점을 갖는 다중 홉 중계 기술에 대해 살펴보도록 한다.

1. 중계 채널

중계 채널은 정보 이론에서 채널 용량을 분석하기 위한 가상적인 채널 모델로서 등장하였다. 일반적으로 두 개의 단말이 통신하는 것에 비하여 세 개의 단말이 통신을 함으로써 채널 용량을 증가시킬 수 있다는 사실이 밝혀지면서 그것의 채널 용량을 구하는 많은 연구가 진행되었다[8]-[10].

기본적인 중계 채널은 (그림 1)과 같이 데이터를 송신하는 단말(S : source), 데이터를 수신하는 단말(D : destination), 그리고 이들의 통신에 관여하여 성능 향상을 도모하기 위한 단말(R : relay), 이 세 단말간의 채널로 구성된다. S는 전송하고자 하는 데이터를 D 뿐 아니라 R 에게도 전달하고, R은 수신한 신호를 적절한 신호처리를 통하여 다음 시간 슬롯에 D에게 전송한다. 만약 S → D간 채널 상황이 좋지 않아도 R을 통하여 데이터를 전송할 수 있고, S → D간 채널 상황이 좋다면 D에서는 두 경로로 수신되는 신호를 결합하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

(그림 1)의 중계 채널은 크게 두 가지로 나뉜다. 송신하는 관점에서, S는 R과 D 모두에게 데이터를 전송하므로 방송 채널 (BC : broadcasting channel)이 형성되며, 수신하는 관점에서, S와 R의 데이터가 하나의 수신기 D에 수신되므로 다중 접속 채널 (MAC : multiple access channel)이 형성된다. 그러므로, 중계 채널의 용량은 BC와 MAC의 채널 용량 중 작은 값으로 표현된다. BC와 MAC의 상호 정보량을 이용하여 중계 채널의 채널 용량을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[9].



(그림 1) Relay channel

$$C = \max_{p(x_1, x_2)} \min \{ I(X_1; Y_1 | X_2), I(X_1; X_2; Y) \} \quad (1)$$

여기서 앞에 위치한 상호 정보량은 BC의 상호 정보량이며, 뒤의 것은 MAC의 상호 정보량이다.

2. 중계국의 목적

기존의 기간망이 존재하는 시스템에서, 특히 최근 이슈가 되고 있는 IEEE 802.16j 시스템에서 중계국은 셀 커버리지를 확장하고 throughput을 증가시키기 위한 역할을 수행한다. 셀 커버리지의 확장을 위해서 (그림 2)와 같이 기지국의 신호를 수신할 수 없는 음영지역이나 셀 경계 지역, 또는 서비스를 제공 받지 못했던 셀 경계 외부까지도 중계국 이용하여 서비스를 제공할 수 있다.

셀의 외부에 있는 단말은 (그림 3)과 같이 기지국으로부터 전송되는 신호의 경로 손실이 크기 때문에 QPSK와 같이 전송률이 낮은 변조 기법을 이용해야 한다. 셀 경계에 위치한 단말로 인하여 셀 전체의 throughput이 저하되는 것을 피하기 위하여 중계국 이용하여 셀 경계 지역의 단말이 64QAM과 같이 전송률이 높은 변조 기법으로 서비스 받을 수 있고 이로 인하여 셀 전체의 throughput을 높일 수 있다[11].

3. 중계 기법

(1) 고정 중계 기법

고정 중계 기법은 R이 항상 S의 데이터를 수신하여 D에게 전송해주는 기법으로 R은 채널 상황에 대해 고려하지 않는다. 고정 중계 기법은 크게 두 가지로 나뉜다.

① Amplify-and-Forward (AF) 기법

AF 기법은 R에서 수신되는 신호의 파워만 증폭시켜 재 전송하는 기법이다. 수신 신호의 파워를 정규화하고 이를 R에서 전송할 수 있는 파워 레벨로 증폭시켜 전송하는 것으로 구현 측면에서는 간단하나 부가된 잡음이 증폭되는 단점을 지니고 있다[12]. S로부터 전송된 신호를 x 라 할 때 AF 기법을 이용하는 R을 통하여 D에 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_D = \sqrt{\frac{E_{SR} E_{RD}}{|h_{SR}|^2 E_{SR} + N_0}} h_{SR} h_{RD} x + \sqrt{\frac{E_{RD}}{|h_{SR}|^2 E_{SR} + N_0}} h_{RD} n_R + n_D \quad (2)$$

여기서 h_{SR} 과 h_{RD} 는 각각 S→R 과 R→D간 채널이고, n_R 과 n_D 는 각각 R과 D의 수신 안테나에 부가되는 잡음으로 동일한 분포를 가지나 서로 독립인 관계이다. 식 (2)에서 수신 신호의 유효 SNR, ρ_{eff} 은 다음과 같다.

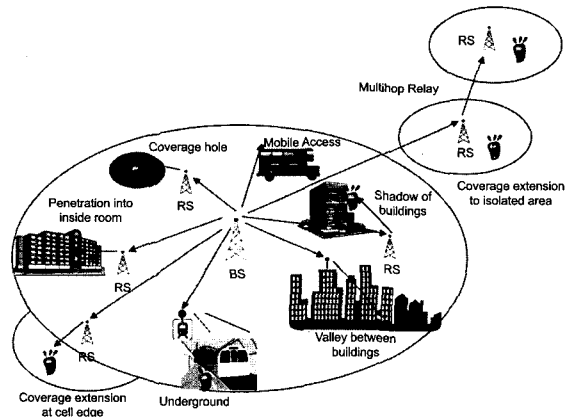
$$\rho_{eff} = \frac{\rho_{SR} \cdot \rho_{RD}}{1 + \rho_{SR} + \rho_{RD}} \quad (3)$$

여기서 ρ_{SR} 은 S→R, ρ_{RD} 는 R→D 간 유효 SNR 이다. 식 (3)에서 AF 기법을 이용하는 경우 유효 SNR은 ρ_{SR} 과 ρ_{RD} 보다 감소됨을 알 수 있다. 만약 ρ_{SR} 과 ρ_{RD} 가 같고 SNR이 클 경우, 유효 SNR은 $\rho_{SR}/2$ 가 되어 성능 면에서 3dB의 손해를 가지게 됨을 알 수 있다. 이는 R에서 파워의 증폭으로 인하여 상대적으로 부가 잡음의 파워가 증가함으로써 발생한 결과이다. 위 결과를 이용하여 AF 기법의 채널 용량은 다음과 같이 구할 수 있다[12].

$$C_{AF} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho_{SR} \cdot \rho_{RD}}{1 + \rho_{SR} + \rho_{RD}} \right) \quad (4)$$

② Decode-and-Forward (DF) 기법

앞서 살펴 보았던 AF 기법이 아날로그 신호 처리 기법인 반면, DF 기법은 디지털 신호 처리 기법이다. DF 기법은 수신 신호를 비트 단위까지 복호화하고 이를 다시 부호화 및 변조하여 재전송하는 기법이다[12]. AF 기법에 비해 연산량 측면에서 복잡한 기법이나 대부분의 통신 단말에 변복조기와 부호복호화기가 탑재되어 있음을 감안하면 현실적으로



(그림 2) RS를 이용한 셀 커버리지 확장의 예

구현 가능한 기법이라 하겠다. DF 기법을 이용하는 R은 수신한 신호를 복호화하고 재 부호화 및 변조한 신호를 D에 전송하며, 이 때 D에 수신된 신호는 다음과 같다.

$$y_D = h_{RD}\hat{x} + n_D \quad (5)$$

여기서 \hat{x} 은 DF에 의해 재 부호화 및 변조된 R에서의 송신 신호이다.

DF 기법이 적용된 시스템의 채널 용량은 S → R 간, R → D 간 두 채널 중 SNR이 작은 쪽의 채널 용량이 되며 다음과 같이 표현할 수 있다[12].

$$C_{DF} = \min \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \rho_{SR}), \frac{1}{2} \log_2(1 + \rho_{RD}) \right\} \quad (6)$$

두 채널의 유효 SNR이 동일할 경우, (4)의 AF 기법의 채널 용량과 비교하여 DF 기법의 채널 용량이 3dB의 이득이 있음을 확인할 수 있다.

(2) 선택 중계 기법

선택 중계 기법은 R이 S로부터 수신된 신호의 전송 여부를 채널 이득을 통하여 결정하는 기법으로 관심을 갖는 채널 이득에 따라 두 가지로 나뉠 수 있다[12].

① S → R 간 채널 이득 관점

이 기법은 S → R 간 채널 상황이 좋지 못할 경우, 그릇된 정보를 중계 하는 것을 막기 위한 것으로 R이 S → R 간 채널 이득을 측정하여 그 값을 S에게 피드백하는 기법이다. 만약 채널 이득이 특정 임계치 이상일 경우, R은 AF나 DF 기법을 이용하여 D에 재 전송을 해주며 임계치 이하일 경우, R은 동작하지 않고 S에서 반복 부호화나 강력한 채널 부호화 기법을 이용하여 D로 직접 전송하도록 하는 기법이다.

이 기법은 낮은 SNR 로 인한 그릇된 정보의 재 전송을 미리 제거해주며, R의 파워 소모를 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있으나, S → D 간 채널 상황이 고려되지 않으므로 직접 경로의 채널 이득이 낮을 경우 채널 용량과 수신 성능 면에서 손해를 볼 수 있다는 단점을 가지고 있다.

② R → D 간 채널 이득 관점

이 기법은 앞에서 언급한 기법의 단점을 보완하는 기법으

로 S → D 간 채널 이득이 고려된다. D는 S → D간 채널 이득을 측정하여 이것이 특정 임계치 이상일 경우는 ACK를 그렇지 않으면 NAK을 S와 R에 전송을 한다.

만약 ACK를 받았을 경우, R은 동작하지 않고 S → D 간 통신만 이루어지며, NAK을 받았을 경우, R이 중간에 개입하여 원활한 통신을 위해 동작하게 된다. 필요에 따라서 S → D간 채널 이득이 좋은 경우, D는 S와 R에서 동일한 데이터를 수신하여 신호를 검출하는 다이버시티 기법을 적용할 수 있다. 앞서 살펴본 기법과 마찬가지로 R의 파워 소모를 줄일 수 있고 더불어 다이버시티 기법을 적용하여 수신 성능을 개선할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

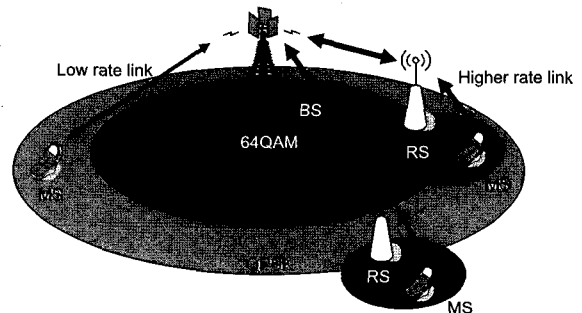
4. 다중 홉, 다중 경로 전송 기법

본 절에서는 ad-hoc 네트워크에서의 전송 기법으로 사용되는 다중 홉 기법과 다중 경로 (multi-branch) 전송 기법에 대해 소개하고 AF 기법을 적용하였을 때의 성능을 살펴본다.

(1) 2 홉 중계 전송

다중 홉 전송은 ad-hoc 네트워크에서 가장 기본이 되는 전송 기법으로 송신 단말의 커버리지 외부에 수신 단말이 있을 경우, 중간에 다수의 단말을 거쳐서 데이터를 전송하는 방법이다. 단일 홉에 비하여 경로 손실이 적어지므로 수신 성능을 개선할 수 있으나 신호의 간섭에 의하여 데이터를 동시에 전송할 수 없으므로 채널 용량 측면에서 손실이 발생할 수 있다.

일반적인 N 홉 전송을 살펴보기 앞서, (그림 4)의 2 홉 중계 전송에 대해 살펴보도록 하겠다. 이 경우, 수신 단말, N_2 에서



(그림 3) RS를 이용한 throughput 증가의 예



(그림 4) 2-hop relay 구조

의 유효 SNR은 식 (3)과 같다. 만약 두 채널의 SNR이 충분히 크다고 가정하면 유효 SNR은 두 채널간의 SNR의 조화평균의 절반으로 단순화할 수 있다.

만약 모든 채널이 일반적인 Nakagami-m 페이딩이고 SNR이 동일하며, 변조 방식이 differential phase shift keying (DPSK)일 경우 moment generating function (MGF)을 이용하여 다음과 같이 bit error rate (BER)를 구할 수 있다[13].

$$P_b = \left(\frac{m}{m + \bar{\rho}} \right)^m - \frac{1}{2} \left(\frac{m}{m + \bar{\rho}} \right)^{2m} \quad (7)$$

여기서 m 은 Nakagami-m 페이딩의 파라미터로서 $m=1$ 이면 Rayleigh 페이딩과 동일하다. (그림 5)는 식 (7)을 바탕으로 Nakagami-m 페이딩 하에서의 2 홉 중계 전송의 성능을 도시한 것이다. m 값의 증가에 따라 BER 곡선의 기울기가 급해짐을 알 수 있다. 이것은 m 값이 커질수록 다이버시티 이득도 증가한다는 것을 의미한다.

(2) 다중 홉 중계 전송

다수의 중간 단말을 통하여 데이터 전송이 이루어지는 다중 홉 중계 전송은 앞서 살펴보았던 2 홉 중계 전송의 일반적인 형태로써 N 홉일 경우, (그림 6)와 같은 구조를 갖는다.

각 중간 단말에서의 송신 파워를 1로 하고 i 번째 단말은 채널 계수 h_i 를 정확히 알고 있다고 가정하고 증폭 계수 β_{i+1} 을 $1/h_i$ 로 가정하면 최종 수신 단말에서 수신한 신호와 이를 정규화한 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_{N+1} = h_N x_0 + h_N \sum_{i=1}^N \beta_i n_i + n_{N+1}$$

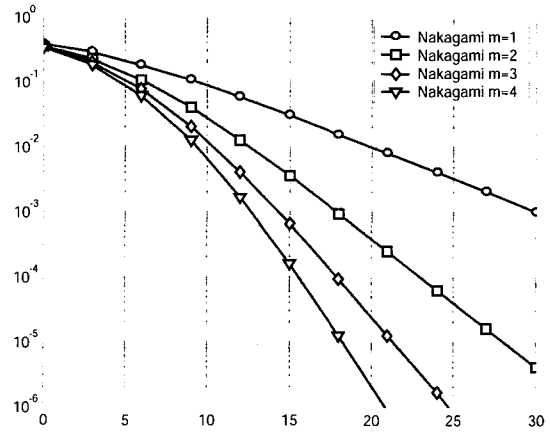
$$x_{N+1} = x_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i n_i + \beta_{N+1} n_{N+1} \quad (8)$$

여기서 최종적인 수신 신호의 SNR은 다음과 같다.

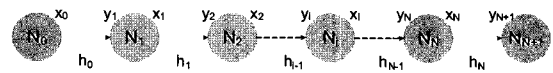
$$\rho_{MH} = \frac{\rho_0 \rho_1 L \rho_N}{\sum_{i=0}^N \rho_0 \rho_1 L \rho_{i-1} \rho_{i+1} L \rho_N} \quad (9)$$

이와 같은 경우 Ricean 채널에 대한 평균 symbol error rate (SER)는 다음과 같이 표현된다[14].

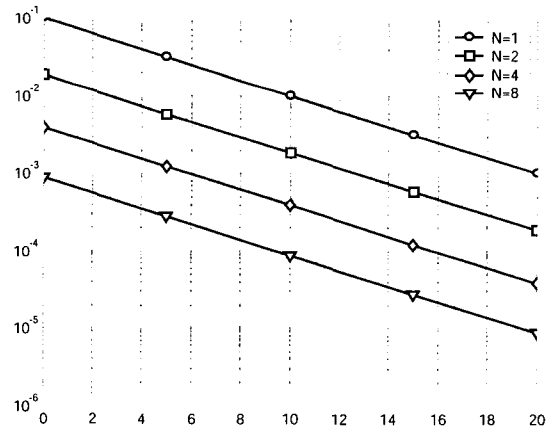
$$\bar{P}_e \approx \frac{(K+1)e^{-K}}{2k} \sum_{i=0}^N \frac{1}{\bar{\rho}_i} \quad (10)$$



(그림 5) 2-hop relay 기법의 BER 성능



(그림 6) Multi-hop relay 구조



(그림 7) Multi-hop relay 전송의 홉 수(N)에 따른 SER 성능

여기서 K 는 Ricean factor이고, k 는 변조 기법에 대한 파라미터이다.

(그림 7)은 식 (10)의 결과로부터 Ricean 페이딩 환경하에서 $K=3$ 이고 PSK 변조 기법을 적용하였을 경우, 다중 홉 중계 전송의 평균 SER 성능을 보여준다. 여기서 송신 단말과 최종 수신 단말 사이의 거리가 1이라 가정할 때 홉 간 거리는 균일하게 $1/N$ 으로 가정하였고 거리에 따른 감쇄상수는 3으로 하였다. 그리고 모든 수신 SNR은 동일하다고 가정하였다. 이 경우 다중 홉 중계 전송 기법은 다이버시티 이득을 얻지는 못하지만 홉 수가 증가함에 따라 경로 손실의 감소로 인하여 SNR이 증가하게 되어 수신 성능이 개선되는 결과를 확인하였다.

(3) 다중 경로 중계 전송

다중 경로 중계 전송 기법은 하나의 송신 단말이 수신 단말과 다수의 중계 단말에 동일한 데이터를 전송하고 그 다음 시간 슬롯에 다수의 중계 단말이 하나의 수신 단말에 데이터를 재 전송해 주는 기법으로 다중 경로에 의한 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 기법이다. 기본적인 구조는 (그림 8)과 같다.

다중 경로 중계 전송 기법의 유효 SNR은 모든 경로의 SNR의 합으로 표현된다. 중계 역할을 수행하는 단말의 수를 M 이라 할 경우, 다음과 같이 유효 SNR은 주어진다[14].

$$\rho_{MB} = \sum_{i=0}^N \frac{\rho_{SR_i} \cdot \rho_{R_iD}}{\rho_{SR_i} + \rho_{R_iD}} + \rho_{SD} \approx \sum_{i=0}^N \frac{\rho_{SR_i} \cdot \rho_{R_iD}}{\rho_{SR_i} + \rho_{R_iD}} + \rho_{SD} \quad (11)$$

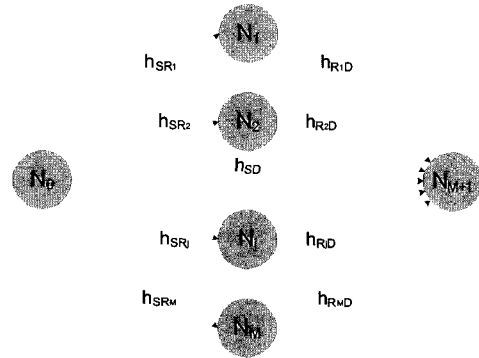
이를 이용하여 다음과 같이 Ricean 페이딩 환경에서의 평균 SER를 표현할 수 있다[14].

$$\bar{P}_e \approx C(M)(K+1)^{M+1} 2^M e^{-(M+1)K} \frac{1}{\bar{\rho}_{SD}} \prod_{i=1}^M \left(\frac{1}{\bar{\rho}_{SR_i}} + \frac{1}{\bar{\rho}_{R_iD}} \right) \quad (12)$$

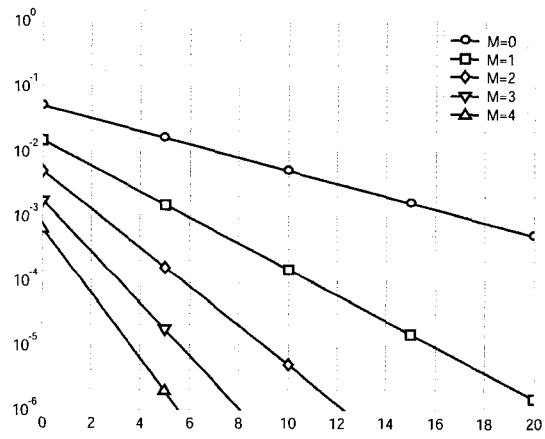
식 (12)의 결과를 바탕으로 $K=3$ 인 경우의 다중 경로 중계 기법의 SER를 (그림 9)에 도시하였다. 중계 단말의 수, 즉, 전송하는 경로의 수가 증가할수록 SER의 기울기가 점차 증가하는 다이버시티 이득이 발생하는 사실을 확인하였다.

(4) 다중 홉, 다중 경로 중계 전송

다중 홉, 다중 경로 중계 전송은 앞서 살펴보았던 다중 홉



(그림 8) Multi-branch relay 구조



(그림 9) Multi-branch relay 전송의 SER 성능

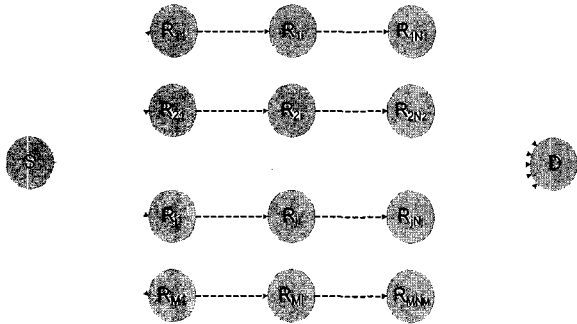
중계 전송과 다중 경로 중계 전송의 결합된 전송 형태로서 (그림 10)과 같은 구조를 갖는다.

마찬가지로 다중 홉, 다중 경로 중계 전송의 성능은 그 두 전송 기법의 성능의 결합된 형태로 표현되며 앞서와 동일하게 Ricean 페이딩을 고려하였을 경우 다음과 같이 평균 SER를 구할 수 있다[14].

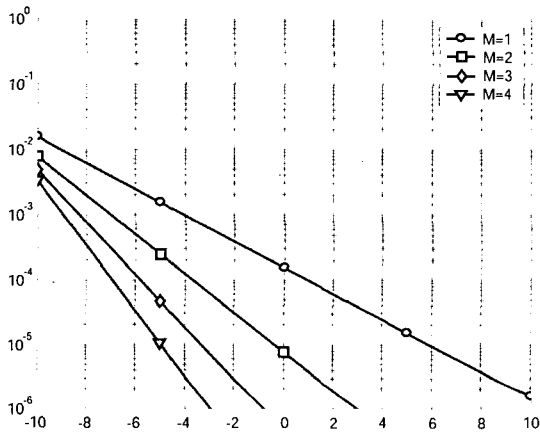
$$\bar{P}_e \approx C(M)(K+1)^{M+1} 2^M e^{-(M+1)K} \frac{1}{\bar{\rho}_{SD}} \prod_{j=1}^M \left(\sum_{i=0}^N \frac{1}{\bar{\rho}_{j,i}} \right) \quad (13)$$

식 (13)의 결과를 바탕으로 $K=3$ 이고 모든 수신 신호의 SNR이 동일하며 모든 경로마다 2 홉을 가정하였을 때, (그림 11)은 경로 수를 1부터 4까지 증가시켰을 때의 평균 SER 성능을 보여준다.

앞서 살펴본 다중 경로 중계 전송의 결과와 비교하여 SER



(그림 10) Multi-hop, Multi-branch relay 구조



(그림 11) Multi-hop, Multi-branch relay 전송의 경로 수(N)에 따른 SER 성능

꼭선의 기울기가 동일함으로 전송 경로의 수가 증가할 경우 동일한 다이버시티 이득을 얻을 수 있고, 다중 홉 중계 전송 기법의 장점인 SNR에서의 이득까지 얻을 수 있어 수신 성능 측면에서 상당한 이득을 얻을 수 있는 기법이다.

5. IEEE 802.16j Mobile Multi-hop Relay 표준화

IEEE 802.16에서는 고정 가입자 단말을 위한 IEEE 802.16-2004와 이동성 지원을 위한 IEEE 802.16e-2005 표준화 제정 후, multi-hop relay 지원 규격을 위한 16j TG (Task Group)가 활동 중이다. IEEE 802.16j는 2005년 7월에 SG (Study Group), 2006년 3월 PAR (Project Authorization Request) 승인 이후 Relay TG명의 정식 프로젝트 그룹화 되었다. PAR에서는 서비스 영역 확장과 전송률 향상의 목적으로 OFDMA

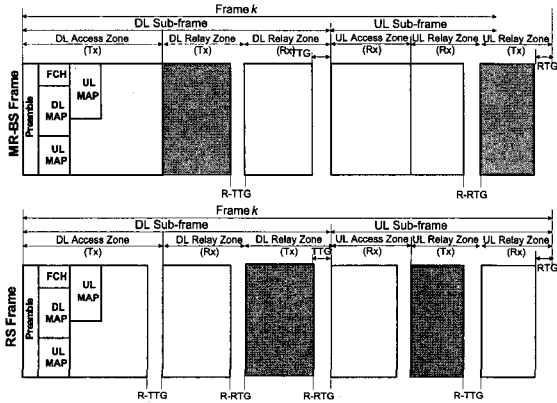
시스템을 기반으로 기 정의된 단말에 대한 규격 변경 없이 기지국 및 새로 도입되는 RS에 대한 새로운 규격 정의를 규정하고 있다. 2006년 9월 두 번째 TG 회의에서 사용자 모델 및 기술적 요구사항, 용어, 평가 방안에 대한 baseline 문서가 승인되고, 현재 기술적 기고에 대해 논의되고 있다. 기술 분야는 relay 방법의 근간인 프레임 구조를 비롯, 다중 홉 지원, 네트워크 형성 및 진입, 경로 관리, 이동성을 비롯하여 cooperative relay가 포함된 기타 PHY 및 MAC 기술을 다루고 있으며, 2008년 3월 표준 발간을 목표로 하고 있다.

RS는 크게 transparent RS (TR-RS)와 non-transparent RS (NTR-RS) 두 가지 방식으로 나뉘어 진다. TR-RS는 단말들이 프리앰플 등의 제어 정보는 기지국에서 수신하고, RS를 통해 데이터만을 중계하는 방식이고, NTR-RS는 RS가 자신의 제어 정보를 생성하여 단말로 내려 보내는 방식이다.

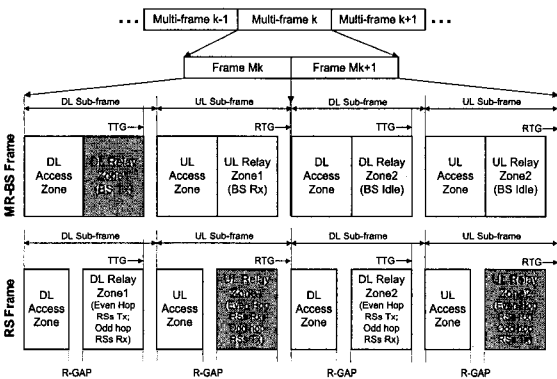
또한 자원에 대한 관리 방안으로 중앙 집중형과 분산형으로 나뉘어진다. 두 가지 방식은 자원 관리의 수월성과 자원의 재사용성에 대해 상반된 장점을 갖는다. TR-RS는 중앙 집중형만 가능하나 NTR-RS는 중앙 집중형과 분산형 모두 수용 가능하다.

이러한 특징을 바탕으로 다중 홉을 지원하기 위한 전송 프레임 구조는 (그림 12)와 같다. 다중 홉에서의 RS들은 동시에 송신을 하면 서로 충돌로 상호간 통신이 불가능하므로, 시분할로 송수신을 나누는 방식으로 접근된다. 분할 전송 방법은 relay 영역을 나누어 각 홉마다 번갈아 자원을 재사용하여 다중 홉을 지원하고, 다중 프레임 전송 방법은 프레임 별로 송수신을 구분하여 자원을 재사용하여 다중 홉을 지원하는 방법이다.

아울러 다음 장에서 다룰 기술로서, 다중의 신호원인 BS와 다중 RS들을 협동으로 이용하는 cooperative relay 분야에 대해 RF combine기반의 협동 신호원 다이버시티, 기존 IEEE 802.16e에서 정의된 시공간 부호화 기반의 전송 다이버시티를 확장시킨 협동 전송 다이버시티, 그리고 두 가지 방식을 혼합시켜 시공간 부호화 확장 없이 다이버시티 이득을 얻는 협동 복합 다이버시티 방법이 채택되었다. 또한 IEEE 802.16e의 시공간 다중화를 확장시킨 협동 시공간 다중화 기법도 논의되고 있다.



(a) 분할 전송에 의한 다중 홉 지원



(b) 다중 프레임 전송에 의한 다중 홉 지원
(그림 12) 다중 홉 지원의 IEEE 802.16j 프레임 구조

여 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 협동 다이버시티에 대해 기술하도록 한다[15].

(1) 협동 자원 다이버시티

협동 자원 다이버시티는 시간/주파수/부호 등의 무선 자원에 대해 다중 홉 중계 전송에서 원신호원 및 중계 신호원 등이 서로 다른 무선 자원을 이용하여 동일한 데이터 신호를 전송함으로써 다이버시티 이득을 얻도록 한다. (그림 13(a))에 주어진 협동 시간-자원 다이버시티는 다중 홉 중계가 다중 시간 슬롯으로 목적지에 전송되는 것을 기반으로 한다. 원신호원에서 중계신호원으로 데이터를 전송 시 목적지에 동일한 무선 자원을 이용하여 동시에 전송하고, 다음 시간 슬롯에서 중계 신호원에서 목적지로 전송하여 목적지에서는 두 시간 슬롯에 걸쳐 동일한 데이터에 대한 신호를 서로 다른 채널을 통하여 수신하게 되므로 다이버시티 이득을 얻게 된다. (그림 13(b))의 협동 주파수-자원 다이버시티는 다중 신호원에서 동시에 서로 다른 주파수-자원에 동일한 데이터를 실어 전송함으로써 다이버시티 이득을 얻는 것으로, 2 홉의 경우, 원신호원에서 중계 신호원에 전송 후, 중계 신호원에서 목적지에 송신시에 원신호원에서도 동시에 다른 주파수-자원으로 전송함으로써 협동 다이버시티를 수행한다. 이 밖에 (그림 13(c))와 같은 협동 부호-자원 다이버시티의 경우는 협동 주파수-자원 다이버시티와 동일한 방식으로 중계 신호원에서 전송 시에 적용된다.

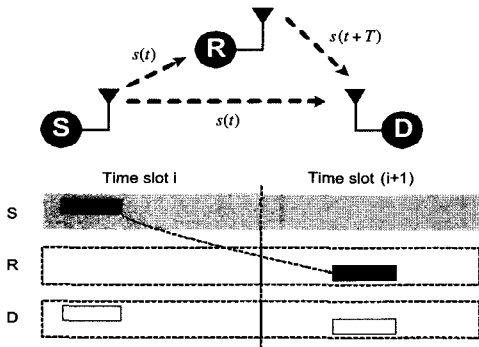
(2) 협동 신호원 다이버시티

협동 신호원 다이버시티는 동일한 신호를 동일한 무선 자원에 대해 동시에 다중 신호원에서 송신하여 무선 신호의 결합에 의한 다이버시티 이득을 얻는 것으로, 광의의 의미에서 전송 다이버시티에 해당한다. 협동 신호원 다이버시티는 최종 수신단인 목적지에서의 잡음은 일정하나 다중 신호원에 의해 신호의 송신 출력을 증가시킨 효과를 가져온다. 그러나, 전제 조건으로 신호원들에 있어 동기가 정확하게 같거나 채널추정에 의한 채널 등화가 요구된다. 실제 무선 환경에서 신호원간 정확한 동기는 불가능하므로, 다중 경로로 입사되는 다중 신호원의 신호를 채널 등화에 의한 결합으로 다이버시티 이득을 얻는다. 이에 대한 예가 (그림 14)에 주어졌다.

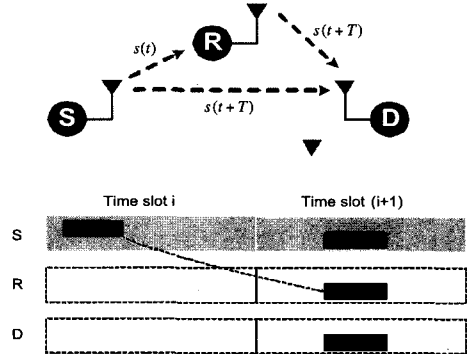
III. Cooperative Relay

1. 협동 다이버시티

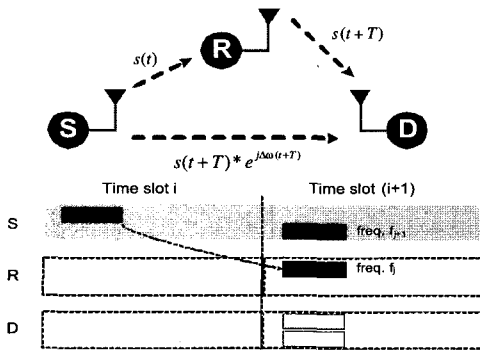
채널의 페이딩 현상을 극복하기 위한 다이버시티 기법은 시간 축, 주파수 축 외에도 공간 축에 적용되었다. 특히 다중 안테나를 이용하는 MIMO 시스템에서는 이론적으로 안테나 수에 비례하여 다이버시티 이득이 선형적으로 증가된다는 사실이 알려졌다. 그러나 이러한 다이버시티는 다중의 안테나를 갖는 시스템에서만 적용 가능하다. 하지만 하나의 안테나를 가지고 있는 신호원이 다른 신호원과 서로 협동하여 다중 안테나와 동일한 다이버시티 효과를 얻고자 하는 연구가 진행되고 있다. 본 절에서는 신호원간 협동 통신을 통하



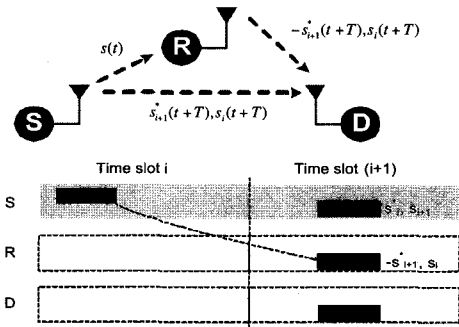
(a) 협동 시간-자원 다이버시티



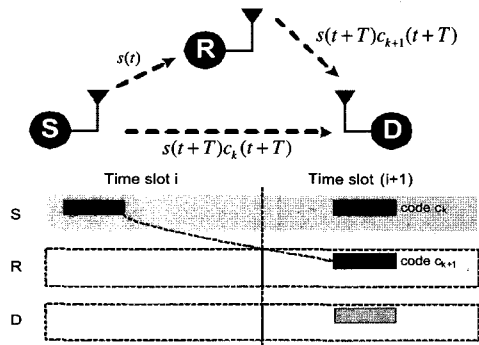
(그림 14) 협동 신호원 다이버시티의 전송 예



(b) 협동 주파수-자원 다이버시티



(그림 15) 협동 전송 다이버시티의 전송 예



(c) 협동 부호-자원 다이버시티
(그림 13) 협동 자원 다이버시티의 전송 예

(3) 협동 전송 다이버시티

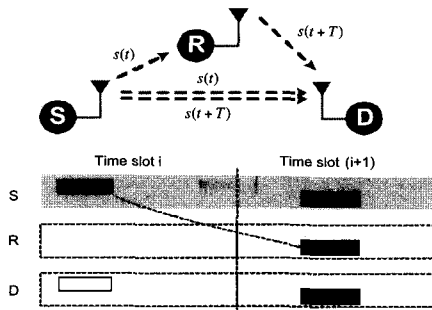
일반적으로 전송 다이버시티는 시공간 부호화에 의한 다중 안테나에서의 송신에 의한 다이버시티를 의미한다. 그러나 앞 절에서 언급한 바와 같이 광의의 의미에서 다중 신호원에 의한 다이버시티 이득을 함께 포함한다. 협동 전송 다

이버시티는 다중 안테나 기반 MIMO 시스템에서의 시공간 부호화에 의한 다이버시티를 다중 신호원으로 확장시킨 것이다.

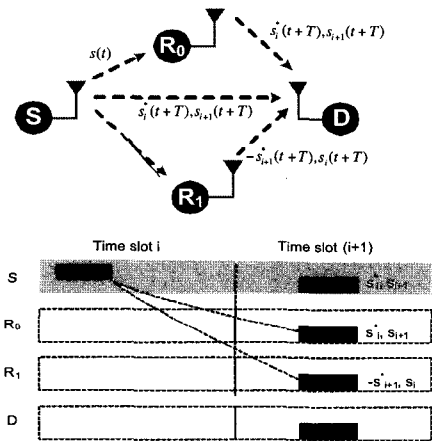
예를 들면, 2개의 안테나에 전송하는 Alamouti 시공간 부호화 기법[3]에 대해 기존의 전송다이버시티는 각각 다른 안테나에 서로 다른 부호화된 신호를 전송하였으나, 협동 전송 다이버시티에서는 한 개의 안테나를 갖는 서로 다른 신호원에서 서로 다른 부호화된 신호를 각각 전송함으로써 목적지에서 수신시에 동시에 수신하여 시공간 부호화에 의한 다이버시티 이득을 얻게 된다. (그림 15)는 협동 전송 다이버시티의 예를 보여준다.

(4) 협동 복합 다이버시티

협동 복합 다이버시티는 앞에서 언급된 협동 자원/신호원/전송 다이버시티를 복합적으로 적용하는 방법이다. 일반적



(a) 협동 자원-신호원 다이버시티



(b) 협동 신호원-전송 다이버시티
(그림 16) 협동 복합 다이버시티의 전송 예

으로 다중접속 기반 무선 통신에서는 신호원간에

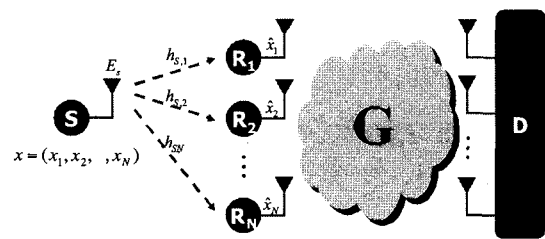
자원을 직교하게 이용한다. 이 직교된 자원들을 다중으로 활용해 다이버시티 이득을 얻는 방식이 협동 자원 다이버시티이다. 이때, 할당된 동일한 자원에서 대해 다중 신호원에서 동일한 신호를 전송하는 협동 신호원 다이버시티를 함께 적용하거나, 서로 다른 시공간 부호화 신호를 전송하는 협동 전송 다이버시티를 함께 적용하여 협동 복합 다이버시티에 의한 이득을 얻을 수 있다. 아울러, 협동 전송 다이버시티에서 다중 신호원이 시공간 부호의 전송 안테나 수보다 많을 경우 동일한 시공간 부호를 중복으로 전송하는 협동 신호원 다이버시티에 의한 협동 복합 다이버시티를 적용할 수 있다. 이러한 협동 복합 다이버시티의 이득은 각각의 다이버시티 이득의 복합적으로 얻는다. 이에 대한 예가 (그림 16)에 주어졌다.

현재 MMR에 대한 표준화를 다루는 IEEE 802.16j에서는 협동 신호원 다이버시티, 협동 전송 다이버시티, 협동 복합 다이버시티가 채택되었다[15]. 기존에 정의된 단말 규격의 호환성으로 인해 협동 자원 다이버시티는 다중 홉의 중계국에서만 적용이 가능하고, 전송 효율성으로 인해 협동 시간-자원 다이버시티만으로 제한된다.

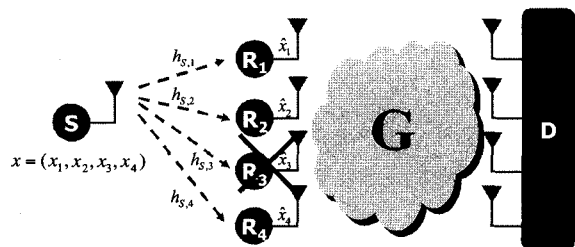
2. 협동 공간다중화

협동 공간 다중화 기법은 하나의 안테나를 갖고 있는 단말들과 다중 안테나를 갖고 있는 기지국이 있는 경우 다수의 relay를 이용하여 독립적인 데이터를 가상의 다중 안테나로 기지국에 전송하여 기존의 MIMO 시스템과 동일한 다중화 이득을 얻을 수 있는 기법이다. (그림 17)은 협동 공간 다중화 기법의 구조를 보여준다[16].

S는 x_1 부터 x_N 까지의 데이터를 N 개의 R에 전송을 한다. R은 N 개의 데이터 중에서 자신에게 할당된 데이터만 선택을 하고 DF 기법을 이용하여 다른 R과 동시에 전송한다. 이것은 가상으로 N 개의 송신 안테나로 서로 독립적인 데이터를 전송하는 공간 다중화 기법이 되며, D의 수신 안테나의 수가 N 개 이상일 경우, 다양한 MIMO 수신기를 이용하여 데이터를 검출할 수 있다. 협동 다이버시티 기법을 이용하여



(그림 17) Cooperative SM 기법의 구조



(그림 18) 적응 전송 기법이 적용된 Cooperative SM 기법의 구조

D가 N 개의 데이터를 수신하기 위해서는 $2N$ 심볼 시간이 소요되므로 실제적인 spatial rate는 $1/2$ 이 된다. 하지만, 협동 공간 다중화 기법을 이용함으로써 인하여 $N+1$ 심볼 시간 동안 N 개의 심볼을 전송할 수 있으므로 spatial rate는 $N/(N+1)$ 이 되므로 동일한 시간 동안 더 많은 데이터를 전송할 수 있어 데이터 전송률을 높이는 데 효과적이다. 하지만, S와 R간 채널이 열악할 경우, R에서의 심볼 검출 에러가 발생하기 되어 수신 성능이 열화 되고 데이터 전송률이 감소되는 문제점이 발생하게 된다.

이를 해결하기 위하여 적응 전송 기법이 제안되었다. 적응 전송 기법은 (그림 18)과 같은 구조를 갖는다[17]. 적응 전송 기법은 R에서 수신 SNR이 특정 임계치보다 클 경우만 데이터를 재 전송하는 기법이다. 수신 SNR이 임계치보다 작아 전송되지 못한 심볼의 경우는 D에서 채널 부호화의 평차령과 동일한 개념으로 검출될 수 있다. 이 기법은 가상의 송신 안테나의 수가 수신 안테나 수보다 상대적으로 적어짐으로 인하여 ZF나 minimum mean square error (MMSE) 같은 linear MIMO detector를 이용하는 경우에도 다이버시티 이득을 얻을 수 있다는 장점을 갖는다. 그렇지만 데이터 송수신 이전에 R를 선정하고 그것들의 순서를 결정하는 control 신호의 양이 많아지게 되며 이것으로 인하여 데이터 전송률에 손해를 가져오게 된다.

3. 협동 중계 기법의 성능 평가

(1) 협동 중계 기법의 프로토콜

본 절에서는 협동 중계 기법의 성능 평가를 위해 2 홉 전송 예제에 대해 다루도록 한다. 원신호원S에서 중계 신호원R로, R에서 목적지D로 전송하는 2 홉 중계 전송은 채널 용량을 증가시키고 송신 출력을 감소시킬 수 있는 장점이 있으나, 수신 성능의 개선에 대해서는 기대할 수 없다. 그러므로, 이를 해결하기 위하여 S가 R뿐 아니라 D에게도 동일한 신호를 전송하고 D는 S와 R의 신호를 결합하는 다이버시티 기법을 적용한다. 아울러 D에 송신되는 동시에 서로 다른 데이터 신호를 전송하는 공간 다중화 기법을 함께 적용하여 전송률에서의 이득을 함께 고려하도록 한다.

하나의 중계 신호원R이 존재할 경우, 협동 자원 다이버시티인 협동 시간-자원 다이버시티의 경우에 대해 (표 1)과

같이 세 가지 경우의 프로토콜이 존재할 수 있다[18].

〈표 1〉 협동 중계 전송을 위한 프로토콜

	프로토콜 1	프로토콜 2	프로토콜 3
시간슬롯 1	S→R, S→D	S→R, S→D	S→R
시간슬롯 2	S→D, R→D	R→D	S→D, R→D

〈표 1〉에서 프로토콜 1의 경우, 첫 번째 시간 슬롯에서는 S가 R과 D에게 동시에 x_1 이란 데이터를 전송하고 두 번째 시간 슬롯에서는 R이 신호 처리된 x_1 을, S가 새로운 x_2 란 데이터를 전송한다. 두 개의 시간 슬롯 동안 S는 두 개의 독립적인 데이터를 전송하여 데이터 전송률에서 손해를 보지 않으면서도 첫 번째와 두 번째 시간 슬롯에 전송된 x_1 은 수신기에서 결합되어 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 프로토콜 2의 경우, 첫 번째 시간 슬롯 동안은 프로토콜 1과 동일하나, 두 번째 시간 슬롯 동안 R만 D로 데이터를 전송한다. 프로토콜 1과 동일하게 프로토콜 2는 x_1 을 D에서 결합하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있고 S의 파워 소모를 반으로 감소시킬 수 있다는 장점을 갖는다.

하지만, 두 시간 슬롯 동안 데이터는 하나만 전송되게 되므로 데이터 전송률에서 손해를 보게 되는 단점을 갖는다. 프로토콜 3은 프로토콜 1과 비교하여 첫 번째 시간 슬롯에서 S가 R에게만 데이터를 전송한다는 차이점을 갖는다. 이 경우, 데이터 전송률에서 손해를 보지 않으나 처음 송신되는 x_1 도 D에서 결합될 수 없으므로 다이버시티 이득을 얻을 수 없는 단점을 지닌다.

(2) 협동 중계 기법 프로토콜의 성능 분석

협동 중계 기법을 위한 프로토콜의 성능을 채널 용량과 더불어 outage 확률을 이용한 다이버시티 차수로 비교, 분석한다.

① AF 기법을 이용한 협동 중계 기법

D에서 두 시간 슬롯 동안 수신한 신호를 벡터와 행렬 형태로 표현하면 프로토콜 1의 경우는 2×2 MIMO 시스템, 프로토콜 2의 경우는 1×2 SIMO 시스템, 그리고 프로토콜 3의 경우는 2×1 MISO 시스템의 수신 신호와 동일하게 모델링되고, 이를 이용하여 구한 각 프로토콜 별 상호 정보량의 대소 관계는 다음과 같다[18].

$$I_1^{AF} \geq I_2^{AF} \geq I_3^{AF} \quad (14)$$

프로토콜 1의 경우 가장 좋은 성능을 보이며, 프로토콜 2의 경우는 두 번째 시간 슬롯 동안 S에서의 신호 전송이 없으므로 상호 정보량에서 손해를 보게 된다. 프로토콜 3의 경우는 데이터 전송률에서 손해를 보는 프로토콜 2에 비해서 상호 정보량이 오히려 더 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 D에서 잡음이 증폭된 신호를 결합 기법 없이 수신함으로 인하여 수신 성능이 나빠지게 되고 이로 인하여 데이터 전송률이 저하되게 된다.

AF 기법을 이용하는 중계 기법의 outage 확률은 다음과 같이 간략화 된다.

$$P_{out}^{AF,i} = \Pr\{I_i^{AF} \leq R\} \leq \left(\frac{2^{2R} - 1}{\beta_i^{AF}}\right)^2 \quad (15)$$

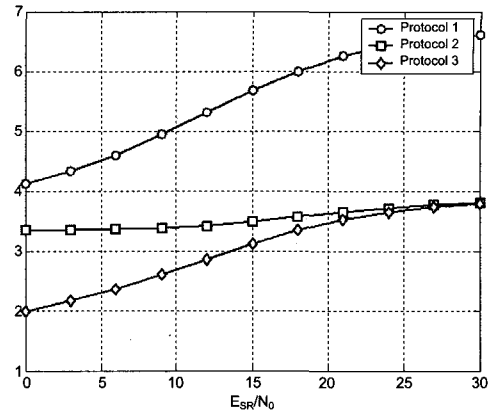
여기서 i 는 프로토콜 인덱스를 의미하며, β 는 $S \rightarrow D$ 채널과 $S \rightarrow R$ 채널간 유효 SNR 중 작은 값으로 정의된다. 다이버시티 차수는 outage 확률에서 SNR의 역수에 대한 지수 값으로 정의되며, 이 경우 AF 기법을 이용한 협동 중계 기법의 다이버시티 차수는 2로 정의된다. 이것으로부터 위의 세 가지 프로토콜은 각각 2×2 MIMO, 1×2 SIMO, 2×1 MISO 시스템과 동일한 다이버시티 차수를 갖고 있음을 확인할 수 있다.

② DF 기법을 이용한 협동 중계 기법

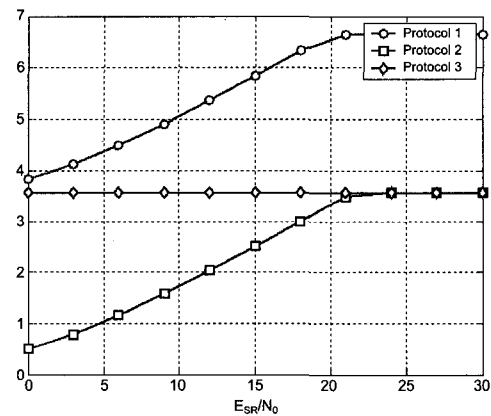
DF 기법은 AF 기법과 달리 R에서 채널 복호화를 거친 후 다시 채널 부호화 및 심볼 변조를 하여 재 전송하는 것이므로 AF 기법과 같이 단순한 성능 분석을 할 수 없다. 그러므로 DF 기법이 적용된 협동 다이버시티 기법은 achievable rate를 이용하여 성능을 분석하게 된다. 이를 적용할 경우, 다음과 같이 각 프로토콜의 상호 정보량의 대소를 확인할 수 있다[18].

$$I_1^{DF} \geq I_3^{DF} \geq I_2^{DF} \quad (16)$$

식 (16)으로부터 AF 기법과는 다르게 DF 기법에서는 프로토콜 2에서 x_2 를 전송하지 않는 것이 상호 정보량에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 상호 정보량을 바탕으로 outage 확률을 통한 다이버시티 차수는 프로토콜 1과 3의 경우 2가 되



(그림 19) AF 기반 Cooperative diversity의 채널 용량



(그림 20) DF 기반 Cooperative diversity의 채널 용량

지만 프로토콜 2는 1밖에 얻지 못하는 결과를 초래한다.

(그림 19)와 (그림 20)은 위의 결과를 기반으로 하여 얻은 협동 다이버시티 기법의 채널 용량을 보여준다. $S \rightarrow D$, $R \rightarrow D$ 간 SNR은 20dB로 고정하였고 $S \rightarrow R$ 간의 SNR을 0~30dB까지 변화를 시켜 채널 용량의 변화를 관찰하였다. AF의 경우, SNR이 낮은 경우에서 프로토콜 1과 2의 성능 차이는 작으나 SNR이 증가할수록 프로토콜 2의 성능은 거의 변화가 없으며 프로토콜 3의 성능은 프로토콜 2와 유사하게 된다. DF의 경우, SNR이 낮은 영역에서 프로토콜 1과 3은 유사한 결과를 보이나, SNR이 증가할수록 프로토콜 3의 변화는 거의 없고 프로토콜 2의 성능은 프로토콜 3과 유사해진다.

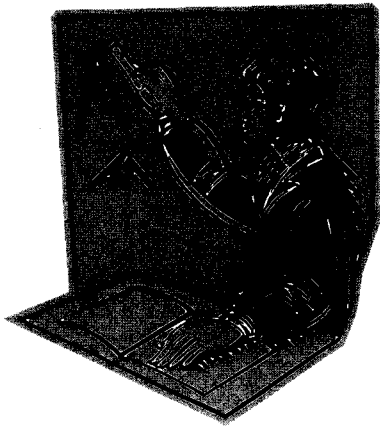
IV. 결 론

본 고에서는 relay에 대한 기본적인 개념과 목적, 다중 홉 중계 전송에 관련된 다양한 기술들, 그리고 협력 통신에 대해 정리하였고 IEEE 802.16j 표준화 동향에 대해 살펴보았다. 다중 홉 중계 전송과 협동 다이버시티 기법을 이용하여 데이터 전송률을 증가시키고 수신 성능 향상을 얻을 수 있다. 특히 협동 다이버시티 기법은 현재 진행중인 IEEE 802.16j 표준화에도 채택이 되었으며, RS를 이용하여 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 다양한 기법들이 제안되고 있다. Relay와 협동 다이버시티에 관련된 현재까지의 다양한 연구들은 주로 이론적인 것으로 채널 용량과 성능 분석에 많이 국한되어 있지만 물리 계층과 MAC 계층간, 또는 상위 계층간 cross-layer co-work을 통하여 성능을 최적화하고 실질적인 구현 측면도 고려한 다양한 연구가 진행될 것으로 전망한다.



- [1] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," Technical memorandum, AT&T Bell Laboratories, Jun. 1995.
- [2] G. J. Goschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 331-335, Mar. 1998
- [3] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE JSAC*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [4] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, Introduction to space-time wireless communications, Cambridge Univ. Press, 2003.
- [5] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity, Part I : System description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 1927-1938, Nov. 2003.
- [6] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity, Part II: Implementation aspects and performance analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, pp. 1939-1948, Nov. 2003.
- [7] IEEE 802.16j-06/026r2, "Baseline document for draft standard for local and metropolitan area networks, Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems, Multihop relay specification", Feb. 2007.
- [8] E. Meulen, "Three-terminal communication channels," *Adv. Appl. Prob.*, vol. 3, pp. 120-154, 1971.
- [9] T. Cover and A. El Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, vol. IT-25, pp. 572-584, Sep. 1979.
- [10] T. Cover and J. Thomas, *Elements of Information Theory*, New York: Wiley, 1991.
- [11] IEEE C802.16j-06/043, "Harmonized contribution on 802.16j (Mobile multihop relay) usage models," Jun. 2006
- [12] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [13] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, pp. 130-135, Jan. 2004.
- [14] A. Ribeiro, X. Cai, and G. B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 1264-1273, May 2005.
- [15] IEEE C802.16j-07/242r2, "Clarifications on cooperative relaying," Mar. 2007.
- [16] S. W. Kim, "Adaptive forwarding and coding in cooperative spatial multiplexing system," *IEEE VTC*, vol. 4, pp. 2418-2422, Sep. 2005.
- [17] S. W. Kim, "Cooperative spatial multiplexing in mobile ad hoc networks," *IEEE International Conf. Mobile Ad hoc and Wireless Sensor Systems*, Nov. 2005.

[18] R. U. Nabar, H. Bolcskei, and F. W. Kneubuhler, "Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design," *IEEE JSAC*, vol. 22, pp. 1099-1109, Aug. 2004.



약 력



2004년 연세대학교 기계전자공학부 학사
2006년 연세대학교 전기전자공학과 석사
2006년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
관심분야: 이동통신 시스템, MIMO 시스템, Relay 시스템

유 병 옥



1997년 연세대학교 전자공학과(공학사)
1999년 연세대학교 전기전자공학과(공학석사)
2005년 연세대학교 전기전자공학과(공학박사)
1997년 ~ 2001년 연세대학교 신호처리연구센터 연구원
2001년 ~ 현재 삼성탈레스 기술연구소 통신시스템그룹 책임연구원
관심 분야: 통신 신호처리, 디지털 신호처리, 통신시스템, SDR

이 규 하



2006년 연세대학교 전기전자공학과 학사
2006년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
관심분야: 이동통신 시스템, MIMO 시스템, Relay 시스템

박 원 우



1982년 연세대학교 전자공학과 학사
1984년 연세대학교 전자공학과 석사
1984년 ~ 2000년년 ㈜대우통신 부장
2000년 ~ 2003년 ㈜머큐리 기술연구소 그룹장
2003년 ~ 현재 삼성탈레스 기술연구소 통신시스템그룹 그룹장
관심분야: 위성 통신, 무선 통신, 이동통신 시스템

김 현 도



1987년 연세대학교 전자공학과 학사
1989년 연세대학교 전자공학과 석사
1995년 Georgia Institute of Technology 전자공학과 박사
1996년 ~ 1997년 삼성전자 선임연구원
1997년 ~ 2000년 연세대학교 전기전자공학과 조교수
2000년 ~ 2005년 연세대학교 전기전자공학과 부교수
2005년 ~ 현재 연세대학교 전기전자공학과 정교수
관심분야: 통신 신호처리, MIMO 시스템

이 충 용