

분산형 무선 네트워크에서의 Cooperative 통신기술

서정욱*, 이경택*, 백종호*, 전원기*, 김동구**

*KETI DxB·통신융합연구센터, **연세대학교 전기전자공학과

목 차

- I. 서 론
- II. MIMO 및 Relaying 기술의 특성
- III. Cooperative 통신의 개념 및 특성
- IV. Cooperative 프로토콜 및 성능
- V. 결 론

I. 서 론

차세대 무선 통신시스템은 음성 위주의 서비스를 탈피하여 다양한 멀티미디어 서비스를 제공하기 위해 진화하고 있다. 데이터 전송률을 높이고 미디어에 따라 요구되는 QoS(Quality of Service)를 보장하기 위해 보다 진보된 형태의 신호처리 알고리즘과 기술들이 사용될 것으로 보인다. 특히 다이버시티(diversity) 기술은 무선 네트워크 환경에서 매우 중요한 기술이라고 할 수 있다. 신호의 다중경로 전파에 의해 발생하는 페이딩은 가장 심각한 채널 열화현상이며 동일한 신호를 독립적으로 전송하는 다이버시티 기술을 사용하면 이를 효과적으로 극복할 수 있다. 잘 알려진 다이버시티 기술로는 시간 다이버시티, 주파수 다이버시티, 공간 다이버시티 등이 있다[1]. 공간 또는 다중 안테나 다이버시티는 공간적으로 분리된 송신기들을 통해 신호를 전송하거나 공간적으로 분리된 수신기들을 통해 신호를 수신하여 독립적인 페이딩을 겪은 신호들을 적절히 결합하여 성능 이득을 얻는 기술을 말한다. 공간 다이버시티 기술은 다른 다이버시티 기술과 결합되어 사용될 수 있으며 다른 다이버시티 기술을 사용할 수 없는 상황에서도 충분히 좋은 성능을 제공할 수 있다[2]. 이러한 이유로 송신기 혹은 수신기에서 다수의 안테나를 사용하는 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 기술이 활발히 연구되고 있으며 차세대 무선통신 시스템의 표준으로도 채택되고 있다 [3],[4]. MIMO 기술 중 송신 다이버시티는 셀룰러 기

지국에서 사용되기에 매우 유용하다. 그러나 사이즈, 소비전력, 가격, 또는 하드웨어의 한계 등으로 인해 핸드폰(이동국)이나 무선 센서 네트워크 노드 등의 무선 에이전트에서는 사용되기 어렵다.

본 고에서는 무선 에이전트에서도 MIMO 시스템의 장점을 실현할 수 있는 cooperative 통신기술에 대해 소개한다[5]-[10]. 특히, 참고문헌 [5]와 [6]의 내용을 중심으로 설명한다. Cooperative 통신의 기본적인 아이디어는 다중 사용자 환경에서 단일 안테나를 가진 에이전트들이 가상의 MIMO 시스템을 형성하도록 그들의 안테나를 공유하여 서로의 정보를 중계(relay) 하자는 것이다. 각 무선 에이전트는 하나의 안테나를 사용함에도 cooperative 에이전트(또는 파트너)가 자신의 정보를 중계해줌으로써 공간 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 본 고의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 MIMO 기술과 relaying 기술의 특성을 살펴본다. 3절에서는 cooperative 통신기술의 개념과 특성에 대해 설명한다. 4절에서는 기본적인 cooperative 프로토콜에 대해 소개하고 그 성능에 대해 살펴본다. 끝으로 5절에서 본 고에 대한 결론을 맺도록 한다.

II. MIMO 및 Relaying 기술의 특성

무선 디바이스의 증가와 데이터 전송률이 높은 애플리케이션의 출현 등으로 인해 시스템 용량에 대한 요구는 날로 증가하고 있다. 그러나 가용 주파수 스펙

트럼이 불충분하고 최대 송신전력이 제한되어 있어 그러한 요구를 충족시키기에는 역부족이다. 주파수 효율을 높이기 위해서 MIMO 시스템을 사용할 수 있으나 이 또한 높은 전송 전력이 필요하기 때문에 여러 이론적 논문들에서 제시한 용량을 실제 시스템에서 얻기 어렵다. 통신에 관련된 주요한 연구 이슈 중 하나는 이러한 시스템 용량을 증가시키는 것이다. 가장 손쉬운 해결방법으로는 기지국 또는 액세스 포인트들을 늘리는 것인데 이는 많은 비용이 소요된다. 보다 높은 주파수 효율을 전력 효율적으로 얻기 위해서 중계 터미널(relaying terminal)과 MIMO 기술의 장점을 합친 cooperative 통신기술이 여러 가지 방식으로 제안되고 있다. 본 절에서는 cooperative 통신기술에 앞서 MIMO 기술과 Relaying 기술에 대해 간략히 살펴본다.

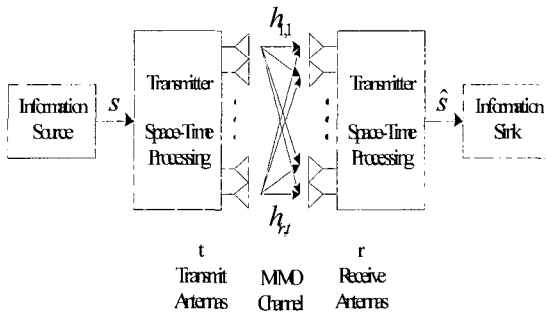


그림 1. MIMO 송수신 구조

MIMO 기술은 그림 1에서처럼 t개의 송신 안테나를 통해 신호를 전송하고 r개의 수신 안테나를 통해 페이딩과 잡음에 의해 열화된 신호를 수신하는 시스템을 말한다. STBC(Space-Time Block Coding), STTC(Space-Time Trellis Coding), SM(Spatial Multiplexing), Beamforming 등이 옵션으로 사용될 수 있다. STBC는 송신기에서 채널정보를 알 필요가 없으며 다이버시티 이득을 얻을 수 있고 간섭에 강한 특성이 있다. STTC는 다이버시티 및 코딩 이득을 얻을 수 있으나 STBC에 비해서 수신기가 복잡하다. 이것 역시 송신기에서 채널정보를 필요로 하지 않으며 간섭에 강한 특성을 갖는다. SM은 송신기에서 채널정보가 요구되며 다중화 이득을 얻을 수 있으나 간섭의 영향을 받기 쉽다.

Beamforming은 송신기에서 채널정보를 필요로 하며 전력 이득을 얻을 수 있고 간섭을 최소화하는 특성이 있다. MIMO 기술의 장점은 높은 스펙트럼 효율을 제공하고 다양한 복잡도를 가진 인코딩(encoding) 기법들이 사용될 수 있다는데 있다. 단점은 동기검파의 경우 많은 채널계수들을 추정해야 하고 안테나 간에 상관도가 낮아야 한다는 것이다. 또한 단말기에서는 다중 안테나를 구현하기 어렵다.

전형적인 Relaying은 그림 2에서와 같이 소스로부터 싱크에 이르기까지 단일 링크를 형성하는 기술을 말한다. 이때 RF는 동일 주파수 대역에서 동일한 시간에 듣기(listen)와 말하기(talk)를 할 수 없다.

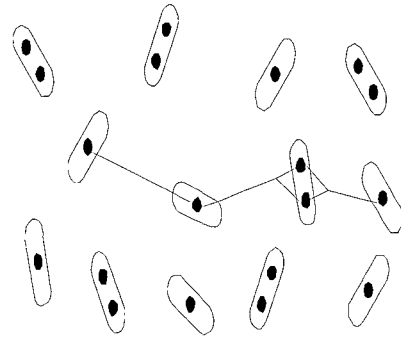


그림 2. 전형적인 Relaying 네트워크

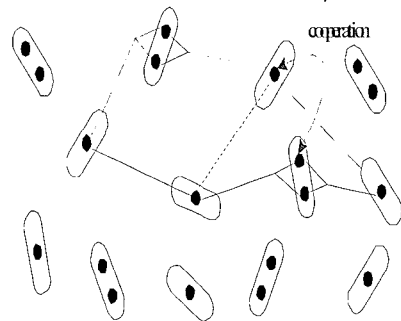


그림 3. 분산된 Cooperative Relaying

PHY는 통과(transparent), 재생성(regenerative), 또는 하이브리드(hybrid) 중계 메카니즘을 사용할 수 있으며 MAC은 예약 기반(reservation-based) 혹은 랜덤 액세스(randomized access) 기법을 사용할 수 있다. Relaying 시스템의 장점은 기지국이나 액세스 포인트

의 커버리지 영역을 확장할 수 있으며 셀룰러 네트워크나 ad-hoc 네트워크를 구성할 수 있다는 것이다. 뿐만 아니라 멀티 홉(multi-hop)을 통해 송수신을 수행하기 때문에 직접(direct) 링크 방식보다 전체 경로손실(path loss)이 적어 송신전력을 낮추거나 데이터 전송률을 높일 수 있다. 그러나 중계기능으로 인해 송수신기 구조나 동기 및 접속방식이 복잡하고, 더 많은 트래픽 혹은 간섭이 발생할 수 있으며, 종단간(end-to-end) 시간지연이 증가한다는 단점이 있다.

III. Cooperative 통신의 개념 및 특성

분산된(distributed) cooperative 네트워크 구조는 그림 3과 같다. 여러 개의 병렬 링크들이 소스와 싱크 사이에 형성되며, 병렬 노드들 간에 서로 협력(cooperate)하여 가상의 MIMO 시스템을 구성한다. MIMO와 relaying 기술로 최적화된 cooperative 시스템은 relaying 기술의 장점인 커버리지 확장뿐만 아니라, 가상의 MIMO를 통해 relay를 사용하지 않는 경우 보다 송신 전력의 소모가 적고 데이터 전송률이 높은 서비스를 제공할 수 있다.

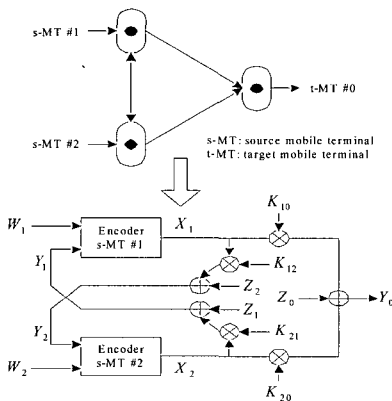


그림 4. Cooperative 통신모델

또한 인프라(infrastructure)가 없는 경우에도 쉽게 사용될 수 있다. 서로 떨어져 있는 노드들 통해 MIMO 시스템을 구성하기 때문에 상관특성이 낮아 다이버시티나 다중화 이득을 얻기 쉽다. 단점은 간섭이나 종단간 시간지연이 여전히 높을 수 있고 네트워크

크 유지를 위한 복잡도가 높다는 것이다.

Cooperative 통신에 의해 달성될 수 있는 전송률 영역(achievable rate region)과 서비스 중단 확률(outage probabilities)을 살펴보기 위해 그림 4와 같이 단순화된 통신모델을 가정한다. 각 터미널에서의 수신 신호는 아래의 식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$Y_0 = K_{10}X_1 + K_{20}X_2 + Z_0 \quad (1)$$

$$Y_1 = K_{21}X_2 + Z_1 \quad (2)$$

$$Y_2 = K_{12}X_1 + Z_2 \quad (3)$$

여기서, Y_0, Y_1, Y_2 는 각각 t-MT(target-Mobile Terminal), s-MT(source-Mobile Terminal) #1, s-MT #2에서의 수신신호를 나타내고, X_1 과 X_2 는 각각 특정 시간 t 에서 s-MT #1과 #2에서 송신된 신호를 나타낸다. Z_0, Z_1, Z_2 는 각각 분산이 σ_i^2 ($i=0, 1, 2$)인 복소 가우시안 잡음을 나타내고 i.i.d.(independent and identically distributed)성질을 갖는다. 터미널 i 와 터미널 j 사이의 채널은 복소 가우시안 채널이득 K_{ij} 를 갖는 주파수 비선택성 레일리(Rayleigh) 페이딩이라고 가정한다. 따라서 K_{10} 은 s-MT #1과 t-MT사이의 채널이득을, K_{20} 은 s-MT #2에서 t-MT사이의 채널이득을, K_{12} 은 s-MT #1과 s-MT #2 사이의 채널이득을 나타낸다. 이들은 서로 다른 링크이므로 서로 독립이다. K_{12} 과 K_{21} 의 관계는 두 파트너(s-MT #1과 s-MT #2) 간의 채널 접속방식에 따라 달라진다. 본 고에서는 $K_{12} = K_{21}$ 이라고 가정한다. 달성 가능한 전송률 영역으로 에르고딕 용량(ergodic capacity)을 사용한다. 즉 채널이 에르고딕 랜덤 프로세서가 된다고 가정한다. 서비스 중단 확률을 위해서는 채널이 천천히 변하고 통신 세션(session)동안 일정하다고 가정한다. 두 파트너는 모두 동시에 송신과 수신을 하며 완벽하게 에코를 제거한다고 가정한다. 이 가정을 통해 Y_1 은 X_1 으로부터, Y_2 는 X_2 로부터 영향을 받지 않는다. 편의상 두 파트너는 동기 되어 있으며 채널을 완벽하게 알고 있다고 가정한다. 또한 두 파트너의 송신기에서

복소 채널이득 K_{10} 과 K_{20} 의 위상에 대한 정보를 알고 있다고 가정한다. 이 가정으로 인해 두 파트너는 t-MT에서 동기결합(coherently combine)될 수 있는 신호를 생성할 수 있다.

먼저, 달성 가능한 전송률 영역에 대해서 살펴본다. 두 터미널은 중첩된 블록 마르코프 인코딩(superposition block Markov encoding)을 통해 cooperative 통신을 위한 송신신호를 생성하고, 터미널 t-MT에서는 역방향 디코딩(backward decoding)에 의해 수신된 신호를 복호한다. 길이가 n 인 B 개의 블록을 송신기가 전송하고 n 과 B 는 모두 크다고 가정한다. 특히 n 은 에르고딕 용량을 고려할 수 있도록 서로 다른 페이딩 레벨이 관찰될 수 있을 만큼 충분히 크다고 가정한다. 각 블록마다 새로운 메시지가 전송되며, 각 터미널은 시스템 인과성(causality)을 갖는다고 가정한다.

예를 들어, j ($1 \leq j \leq B$)번째 블록에서 s-MT #1로부터 전송된 신호는 그 블록에 있는 메시지 $W_1(j)$ 와 $(Y_1(1), \dots, Y_1(j-1))$ 의 1~($j-1$)까지 블록에서 수신된 신호에 의해 결정된다. s-MT #1에서 인코딩을 통해 출력되는 신호는 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$X_1 = X_{10} + X_{12} + U_1 \quad (4)$$

여기서, X_{10} 은 s-MT #1이 t-MT로 전송하는 메시지 W_{10} 을 부호화한 결과이고, X_{12} 는 s-MT #1이 s-MT #2로 보내는 메시지 W_{12} 를 부호화한 결과이다. U_1 은 s-MT #2로부터 수신된 Y_1 을 부호화한 cooperative 정보를 나타낸다. 각 메시지를 위한 부분 전력은 P_{10} , P_{12} , P_{U1} 로 표현된다. 메시지 W_{10} , W_{12} 의 전송률은 각각 R_{10} , R_{12} 로 나타낸다. s-MT #2로부터 출력되는 신호도 동일한 방법으로 표현될 수 있다. 식 (1)-(3)에 주어진 cooperative 시스템의 달성 가능한 전송률 영역은 모든 점 (R_1, R_2) 의 convex hull의 폐포(closure)이다. 여기서, $R_1 = R_{10} + R_{12}$, $R_2 = R_{20} + R_{21}$ 이고 다음의 조건을 만족한다.

$$R_{12} < E \left\{ C \left(\frac{|K_{12}|^2 P_{12}}{|K_{12}|^2 P_{10} + \sigma_1^2} \right) \right\} \quad (5)$$

$$R_{21} < E \left\{ C \left(\frac{|K_{21}|^2 P_{21}}{|K_{21}|^2 P_{20} + \sigma_2^2} \right) \right\} \quad (6)$$

$$R_{10} < E \left\{ C \left(\frac{|K_{10}|^2 P_{10}}{\sigma_0^2} \right) \right\} \quad (7)$$

$$R_{20} < E \left\{ C \left(\frac{|K_{20}|^2 P_{20}}{\sigma_0^2} \right) \right\} \quad (8)$$

$$R_{10} + R_{20} < E \left\{ C \left(\frac{|K_{10}|^2 P_{10} + |K_{20}|^2 P_{20}}{\sigma_0^2} \right) \right\} \quad (9)$$

$$R_{10} + R_{20} + R_{12} + R_{21} < E \left\{ C \left(\frac{|K_{10}|^2 P_{10}}{\sigma_0^2} + \frac{|K_{20}|^2 P_{20}}{\sigma_0^2} + \frac{2|K_{10}||K_{20}|\sqrt{P_{U1}P_{U2}}}{\sigma_0^2} \right) \right\} \quad (10)$$

여기서, $C(x) = 0.5 \cdot \log(1+x)$ 로 표현되며 신호대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio) x 에 대한 가우시안 잡음 채널의 용량을 나타낸다. $E\{\cdot\}$ 는 페이딩 파라미터 K_{ij} 에 대한 평균(expectation)을 나타낸다. 그림 5와 그림 6은 위의 정리를 토대로 얻은 결과이다.

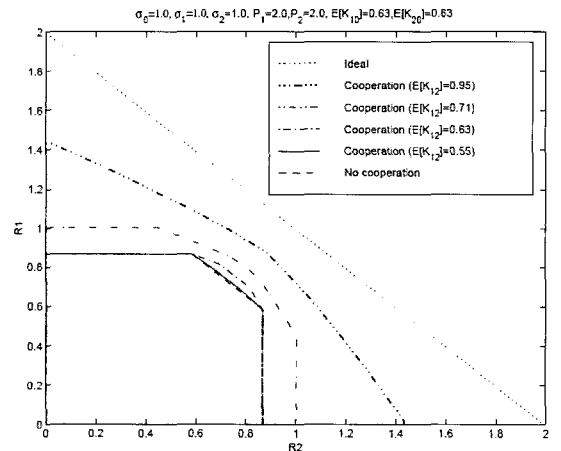


그림 5. 두 터미널의 cooperation에 대한 달성 가능한 전송률 영역 (채널이 평균적으로 유사함)

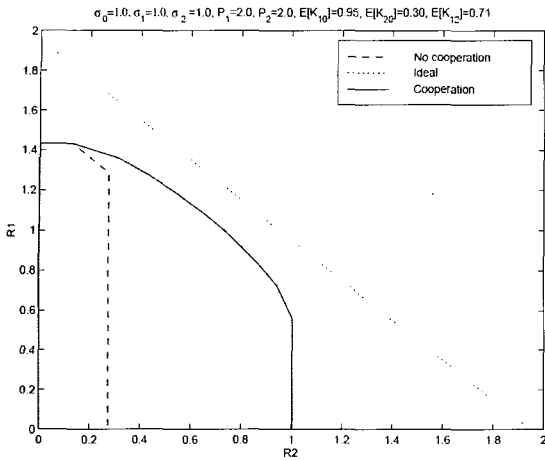


그림 6. 두 터미널의 cooperation에 대한 달성 가능한 전송률 영역 (채널이 평균적으로 다름)

그림 5를 먼저 살펴보자. "No cooperation"은 통상의 가우시안 페이딩 다중 접속 채널에 해당한다. "Ideal"은 사용자간 채널을 완벽히 알 경우를 말한다. 즉, 채널의 위상 정보를 완벽히 알고 있을 때의 전체 전력이 $P_1 + P_2$ 인 두개의 안테나 시스템에 대한 용량이라고 할 수 있다. 여기서, $P_1 = P_{10} + P_{12}$ 이고 $P_2 = P_{20} + P_{21}$ 이다. 두 터미널 s-MT #1과 s-MT #2는 동일한 전력을 갖고, 각 터미널과 t-MT사이의 채널 품질은 동일하다고 가정한다. 즉, $E\{K_{10}\} = E\{K_{20}\}$. 그림에서 보듯이 다양한 품질의 사용자간 채널, $E\{K_{12}\}$ 에 따라 달성 가능한 전송률 영역이 도시되어 있다. 사용자간 채널 품질이 클수록 좋은 채널을 나타낸다. 사용자간 채널 품질이 각 터미널과 t-MT사이의 채널 품질과 비슷하거나 나쁠 경우에도 cooperation에 의해 전송률을 증가시킬 수 있다. 사용자간 채널의 품질이 개선될수록 달성 가능한 전송률 영역이 크게 향상되어 "Ideal"에 근접해감을 알 수 있다.

그림 6은 두 터미널 s-MT #1과 s-MT #2의 채널 품질이 다를 때의 성능을 나타낸다. 즉, $E\{K_{10}\} > E\{K_{20}\}$. 이 경우는 s-MT #1이 s-MT #2보다 t-MT에 더 근접해있을 때라고 생각할 수 있다. Cooperation을 통해 전송률 점 (R_1, R_2) 이 증가됨을 알 수 있다. 심각한 페이딩을 겪는(또는 페이딩 평균이 낮은) 터미널에게 cooperation이 더 유리하긴 하지만, 동일한 전송률

$(R_1 = R_2)$ 점과 최대 전송률 합 $(R_1 + R_2)$ 의 점에 cooperation을 통해 증가됨을 알 수 있다. Fairness나 throughput을 최대화하는 등의 시스템 요구조건에 따라 채널 품질이 좋은 사용자도 cooperation으로 이득을 얻을 수 있다. 그림 5와 그림 6에서 $R_1 = 0$ 또는 $R_2 = 0$ 은 relay 채널에 해당한다. 즉, 전송률 곡선이 그림의 x축 또는 y축과 만나는 점은 해당 relay 채널의 달성 가능한 전송률을 나타낸다. $R_1 = 0$ 과 $R_2 = 0$ 인 점을 포함한 선보다 Cooperation 곡선이 위에 있으므로 두 relay 사이의 시간을 공유하는 방식보다 cooperation 방식의 전송률이 더 우수함을 알 수 있다.

다음으로 서비스 중단 확률에 대해 살펴보자. 우리는 앞서 언급한 달성 가능한 전송률 영역 또는 에르고딕 용량을 통해 장기간(long-term)의 평균 throughput을 알 수 있다. 반면 서비스 중단 확률을 통해 우리는 채널의 시간적인 변화에 대한 시스템의 강건성(robustness)을 알 수 있다. 서비스 중단 확률을 계산하기 위해 페이딩이 천천히 변하고 B개의 블록 동안 일정하다고 가정한다. 이럴 경우 달성 가능한 전송률 영역은 현재 페이딩 레벨값 K_{ij} 에 의존하게 되고 랜덤한 특성을 갖는다. 송신신호의 구조와 디코딩 방식이 앞서 언급한 것과 동일하다고 가정하면, 평균 기호($E\{\cdot\}$)를 제거한 식 (5)-(10)이 달성 가능한 전송률 영역을 결정한다. 그림 5에서의 가정을 사용하고 cooperation에 의해 유지되는 가장 큰 동일 전송률 동작점(operating point) $R_1 = R_2 = R_{max}$ 을 고려한다. 서비스 중단 확률 $P_{out} = P(R_{max} < r)$ 을 통해 cooperation으로 두 터미널이 동일한 동작 전송률(r)을 유지할 확률을 알 수 있다.

그림 7은 동작 전송률에 따른 cooperation 기법의 서비스 중단 확률을 나타낸다. 그림에서 "Cooperation"에 의한 서비스 중단 확률이 "No cooperation"에 비해 더 낮게 나타남을 알 수 있다. Cooperation을 통해 달성 가능한 전송률을 많이 증가시키지 못하는 경우라 할지라도 채널 변화에 대한 강건성은 여전히 증가시킬 수 있다. 이것은 cooperation에 의한 공간 다이버시티 효과로써 자신의 링크 품질이 떨어지더라도 품질이 좋은 파트너의 링크를 사용할 수 있기 때문이다.

그림 8은 $r=0.18$ 일 때 SNR에 따른 동일 전송률에 대한 서비스 중단 확률을 나타낸다. 그림에서 "Cooperation" 곡선이 "No cooperation" 곡선보다 더 가파르게 떨어지고 "Ideal"과 평행하게 됨을 볼 수 있다. 높은 SNR에 대한 이 곡선의 기울기가 다이버시티 레벨을 나타내기 때문에 cooperation이 두 개의 안테나를 가진 시스템과 대등한 다이버시티를 제공한다고 말할 수 있다. 사용자간 채널의 품질이 떨어 졌을 때 ($E\{K_{12}\}=0.45$)에도 다이버시티 이득이 존재한다.

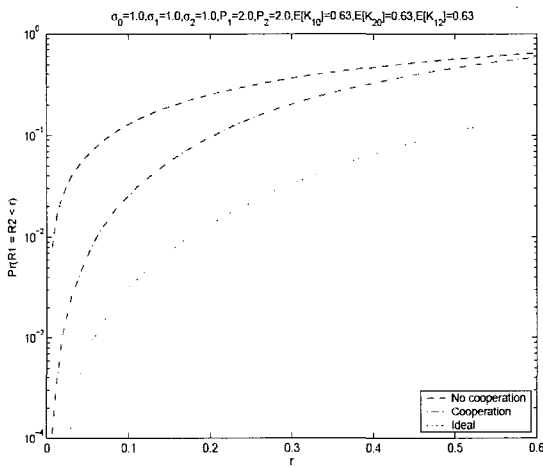


그림 7. 두 터미널의 공통 전송률 r에 대한 서비스 중단 확률(채널이 평균적으로 유사함)

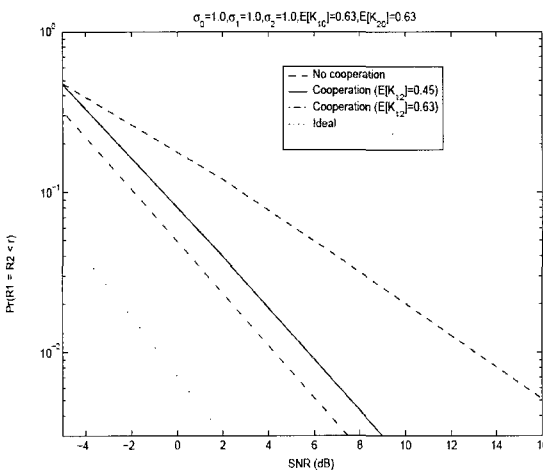


그림 8. SNR에 대한 서비스 중단 확률(채널이 평균적으로 유사함, 공통 동작 전송률 $r=0.18$)

IV. Cooperative 프로토콜 및 성능

본 절에서는 기본적인 cooperative 프로토콜에 대해 소개한다. 설명의 편의를 위해 이동통신환경에서 두 명의 사용자(또는 터미널)가 cooperation을 위해 서로의 파 트너가 되고, 하나의 기지국과 통신을 한다고 가정한다.

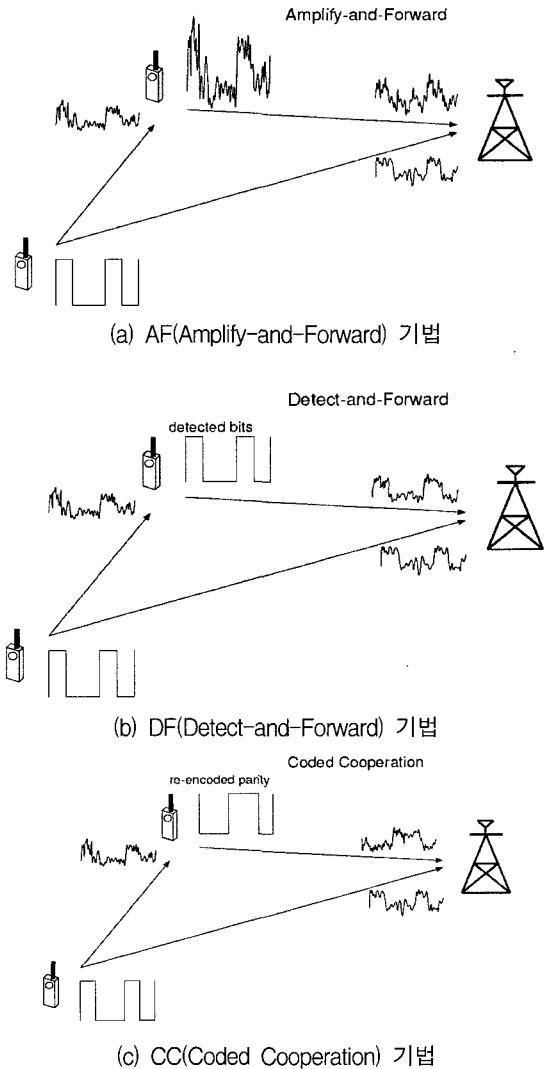


그림 9. Cooperative 프로토콜

그림 9는 세 가지 대표적인 cooperation 프로토콜을 나타낸다[6]. 그림 9.(a)는 AF(Ampify-and Forward) 기

법으로 cooperative 프로토콜 중 개념적으로 가장 단순한 방식이다. 이 방식에서는 각 사용자가 잡음으로 열화된 파트너의 송신신호를 수신하고 이 신호를 증폭한 후 재전송한다. 기지국은 그 사용자와 파트너에 의해 전송된 정보를 결합하고 전송비트를 최종 판별(decision)한다. 파트너의 잡음이 증폭되기는 하지만 기지국은 여전히 두 개의 독립된 페이딩 신호를 수신할 수 있어 전송비트에 대해 더 나은 판별을 수행할 수 있다. 이 방식의 문제점은 아날로그 값을 샘플링하고 증폭하고 재전송하는 것이 기술적으로 그리 쉬운 일이 아니라는 데 있다. 그러나 AF 기법은 방식이 단순하고 분석하기 쉬워 cooperative 통신 시스템을 이해하는데 많은 도움이 된다.

그림 9.(b)는 DF(Detect-and-Forward) 기법으로 전형적인 relay 기술에 가장 유사한 방식이라고 할 수 있다. 이 방식에서는 사용자가 파트너의 정보비트를 판별하고 추정된 정보비트를 재전송한다. DF 기법의 예는 참고문헌 [5]에서 찾을 수 있는데, DF기법이 적용된 CDMA 시스템을 제시하고 이론적으로 잘 분석하였다. 그 예에 대해 간략히 설명한다. 두 사용자는 자신의 고유한 확산 코드(spreading code), $c_1(t)$ 와 $c_2(t)$ 를 가진다. 두 사용자의 정보비트는 $b_i^{(n)}, i = 1, 2$ 로 나타낸다. 여기서, i 는 사용자 인덱스를, n 은 시간 인덱스를 나타낸다. $\hat{b}_i^{(n)}$ 는 사용자 i 의 비트를 파트너가 경판정(hard-decision)으로 추정된 값을 나타낸다. a_{ij} 는 신호의 진폭을 나타내고 이를 통해 시그널링(signaling) 기간 동안 전력 배분(power allocation)을 수행한다. 각 시그널링 기간은 세 개의 비트 구간과 같다. 사용자 1에 의해 전송되는 신호를 $X_1(t)$ 로, 사용자 2에 의해 전송되는 신호를 $X_2(t)$ 로 표시하고 아래의 식과 같이 나타낸다.

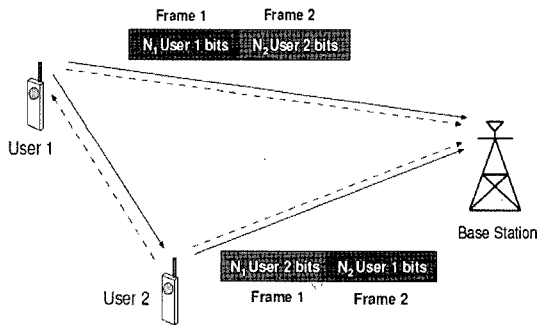
$$X_1(t) = [a_{11}b_1^{(1)}c_1(t), a_{12}b_1^{(2)}c_1(t), a_{13}b_1^{(2)}c_1(t) + a_{14}b_2^{(2)}c_2(t)] \quad (11)$$

$$X_2(t) = [a_{21}b_2^{(1)}c_2(t), a_{22}b_2^{(2)}c_2(t), a_{23}b_1^{(2)}c_1(t) + a_{24}b_2^{(2)}c_2(t)] \quad (12)$$

위 식을 통해 첫 번째와 두 번째 비트 구간에서 각 사용자가 자신의 비트를 전송함을 알 수 있다. 그 후 각 사용자는 파트너의 두 번째 비트를 판별하고 세 번째 비트 구간에서 자신의 두 번째 비트와 추정된 파트너의 두 번째 비트를 선형 결합(linear combination)하여 전송한다. 이 때 각 비트에는 해당 확산 코드가 곱해진다. 각 비트 구간동안 송신전력이 변할 수 있어 상향링크 채널이나 사용자간 채널의 상태에 따라 상대적인 전력을 적응적으로 최적화할 수 있다. 송신전력은 a_{ij} 에 의해 할당되며 평균전력은 일정하게 유지된다. 대략적으로 말하면, 사용자간 채널의 품질이 좋을 때는 더 많은 전력을 cooperation을 위해 할당하고 그렇지 못할 경우에는 전력을 줄이는 방식이다. DF 기법을 사용하게 되면 잘못 추정된 파트너의 비트가 기지국으로 전송되어 최종 판별을 수행할 때 나쁜 영향을 끼칠 수 있다. 뿐만 아니라, 기지국이 최적의 검파기법(maximum-likelihood detection)을 사용할 경우 사용자간 채널의 오류 확률을 알아야 한다. 파트너에 의한 오류 전파(error propagation) 문제를 해결하기 위해 하이브리드(hybrid) DF 기법이 제안되었다. 페이딩 채널이 높은 순시 SNR을 나타내면 cooperation을 수행하고, 낮은 SNR을 나타내면 cooperation을 중지하는 방식이다.

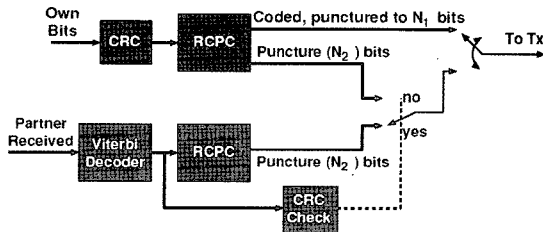
그림 9.(c)는 CC(Coded Cooperation) 기법을 나타낸다[6],[7]. 이 방식은 cooperation과 채널 코딩기술을 결합하여 사용한다. 각 사용자는 코드워드(codeword)의 서로 다른 부분을 두 개의 독립적인 페이딩 경로로 전송한다. 즉, 각 사용자는 증분 잉여정보(incremental redundancy)를 파트너에게 전송함으로써 cooperation을 시도하고 이것이 불가능할 경우 자동적으로 자신의 모드를 non-cooperation으로 전환한다. CC 기법의 효율성은 피드백 정보 없이 코드 디자인만으로 cooperation 모드가 자동적으로 전환된다는 데 있다. 이 방식을 간략히 설명하면 다음과 같다. 각 사용자는 소스 데이터를 블록 단위로 분할하고 CRC(Cyclic Redundancy Check) 코드를 붙인다. 각 데이터는 코드워드가 되도록 부호화되고 두 개의 세그먼트로 나누어진다. 두 세그먼트는 각각 N_1 과 N_2 개의 비트로 이루어진다. 세그먼트를 분할(partitioning)하기 위해 여러 가지 방법이 사용될 수 있으나, 설명의 편의를 위해 다음과 같

은 방법을 사용한다. $N_1 + N_2$ 개의 비트로 이루어진 코드워드가 있다고 가정하자. 이 코드워드를 임의의 방식으로 천공(puncturing)하여 N_1 개의 비트로 이루어진 코드워드(weaker codeword)를 생성하고 N_2 개의 천공된 비트를 모아 또 다른 코드워드를 생성한다. 데이터 전송기간은 두 개의 시간 세그먼트(N_1 과 N_2)로 분리되고, 각 세그먼트를 프레임이라고 정의한다. 처음 프레임 동안 각 사용자는 N_1 개의 비트로 분할된 코드워드를 전송한다. 그 후, 파트너의 코드워드를 복호한다. 복호가 성공적일 경우(CRC 체크 사용), 두 번째 프레임에서 파트너의 N_2 개의 비트로 분할된 코드워드를 추정하고 전송한다. 그렇지 않을 경우, 자신의 N_2 개의 비트로 분할된 코드워드를 전송한다.



(a) CC 기법의 프레임 구조

Frame 1: Encode bits with CRC and RCPC code. Puncture and transmit N_1 code bits.



Frame 2: Receive and decode partner. If CRC checks, transmit partner's N_2 puncture bits. Otherwise, transmit own N_2 puncture bits.

(b) RCPC를 사용하는 CC 기법의 동작

그림 10. CC(Coded Cooperation) 기법의 예

그림 10.(a)에 나타난 것처럼 각 사용자는 소스 블록당 $N = N_1 + N_2$ 개의 비트를 두 프레임 동안 전송한다(non-cooperation일 때와 평균전력과 전송률이 동일함). N_2/N 을 cooperation 레벨로 정의한다. CC 기법을 위해 블록코드, 터보코드 등의 다양한 채널 코딩이 사용될 수 있으나, 그림 10.(b)에 나타난 RCPC (Rate-Compatible Punctured Convolutional) 코드가 사용된다고 가정한다. 각 사용자들은 자신의 첫 번째 프레임이 올바르게 복호되었는지 아닌지에 관계없이 두 번째 프레임에서는 독립적으로 행동한다. 따라서 네 가지 cooperation 방식이 가능하다. (1) 두 사용자 모두 cooperation하는 경우, (2) 둘 모두 cooperation을 하지 않는 경우, (3) 사용자 1은 cooperation을 하고 사용자 2가 하지 않는 경우, (4) (3)과 반대의 경우 등이 존재한다.

그림 11과 그림 12는 앞서 설명한 cooperation 프로토콜의 성능을 나타낸다. DF 기법으로 하이브리드 방식이 사용된다고 가정한다. 변조를 위해 BPSK(Binary Phase Shift Keying)를 사용하였다. AF 기법이나 DF 기법과는 달리 CC 기법에서는 채널 코딩이 사용된다. 공정한 비교를 위해서 모든 프로토콜("No cooperation" 포함)에 대해 전체 코드율이 1/4인 코딩 시스템이 사용된다고 가정한다. 또한 각 프로토콜의 사용자당 평균 송신전력은 "No cooperation"과 동일하다고 가정한다. 하이브리드 DF와 AF 기법에서의 각 사용자는 초기에 코드율이 1/2인 코드워드를 전송하고 파트너는 이 코드워드를 반복하여 전체 코드율이 1/4로 되도록 한다. CC 기법에서는 25%의 cooperation 레벨이 사용된다. 각 사용자는 처음 프레임에서 코드율 1/3로 천공된 코드워드를 전송하고 두 번째 프레임에서 첫 번째 프레임에서 천공된 비트를 증계한다. 따라서 각 사용자에게 수신된 전체 비트는 코드율이 1/4인 코드워드가 된다.

그림 11은 두 사용자의 상향링크 채널의 평균 SNR이 동일하고, 사용자간 채널의 평균 SNR이 상향링크에 비해 10dB 낮을 때의 결과이다. Cooperation에 의한 공간 다이버시티 효과로 인해 "No cooperation"에 비해 BER(Block Error Rate) 성능이 우수함을 알 수 있다. 높은 SNR에서의 BER의 기울기는 다이버시티 레벨을 나타내며 두 개의 송신 또는 수신 안테나를 가진 시스템에 의해 제공되는 다이버시티 레벨과

동일하다. 또한 위 그림을 통해 사용자간 채널이 나쁜 더라도 cooperation을 통해 오류 발생률을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

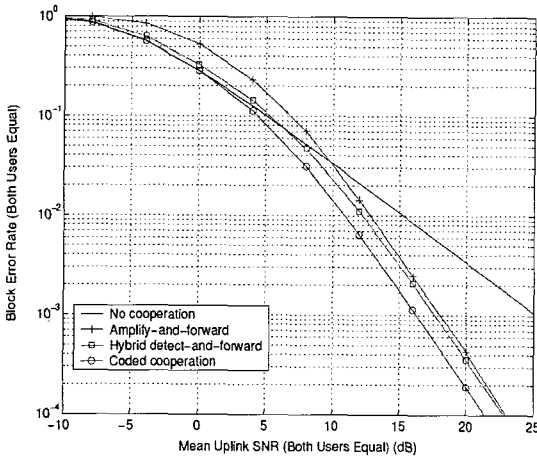


그림 11. Cooperative 프로토콜의 성능비교

(두 사용자의 상향링크 평균 SNR이 같고, 사용자간 채널의 평균 SNR이 상향링크보다 10dB 낮음)

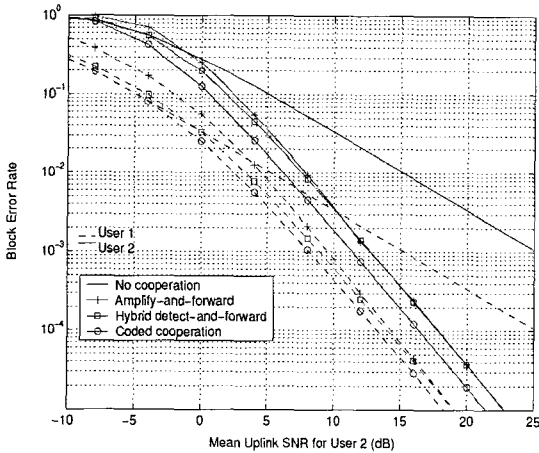


그림 12. Cooperative 프로토콜의 성능비교

(사용자 1의 상향링크 평균 SNR이 사용자 2보다 10dB 높고, 사용자간 채널의 평균 SNR이 사용자 2와 같음)

그림 12는 사용자 1의 상향링크 평균 SNR이 사용자 2에 비해 10dB 높고, 사용자간 평균 SNR이 사용자 2와 동일한 경우의 성능을 나타낸다. 채널 품질이 나쁜 사용자 2는 cooperation을 통해 성능 개선효과를

얻을 수 있음을 알 수 있다. 특히 채널 품질이 좋은 사용자 1도 사용자 2와의 cooperation을 통해 성능이 개선됨을 알 수 있다. 또한 사용자 1과 사용자 2의 성능 차이가 cooperation을 통해 줄어들게 됨을 알 수 있다. 이를 통해 cooperation이 시스템 자원을 보다 효과적으로 재배분할 수 있음을 알 수 있다. 세 가지 cooperation 프로토콜을 비교해보면 AF 기법과 하이브리드 DF 기법은 낮은 SNR에서 별로 효과가 없음을 알 수 있다. 이것은 두 기법이 반복 코딩(repetition coding)과 유사한 방식이기 때문이다. 특히 AF 기법은 잡음을 증폭시키기 때문에 성능이 더욱 나쁘게 나타난다. CC 기법의 경우 모든 SNR에서 성능이 우수하게 나타남을 알 수 있다. 본 절에서 살펴본 기본적인 프로토콜 외에도 시공간 부호(STC: Space-Time Coding)나 멀티 스테이지(multi-stage) 또는 멀티 홉을 고려한 기법들도 제안되었다[8]-[10].

V. 결론

본 고에서는 차세대 통신기술로 연구되고 있는 cooperative 통신기술에 대해 살펴보았다. Cooperative 통신은 네트워크에 존재하는 둘 혹은 그 이상의 사용자들이 그들의 정보를 공유하고 해당 메시지를 서로 다른 채널을 통해 공동으로 전송함으로써 개개인이 통신할 때 보다 더 큰 신뢰성과 효율성을 제공해주는 기술이다. 이러한 기술에 대한 이해를 돕기 위해 간단한 통신모델을 설정하여 달성 가능한 전송률 영역과 서비스 중단 확률에 대해 알아보았다. 사용자간 채널의 품질이 나쁜 경우에도 cooperation을 통해 더 큰 전송률 영역을 얻을 수 있으며 사용자간 채널 품질이 개선될수록 이상적인 결과에 근접해감을 알 수 있었다. 두 사용자의 채널 품질이 다를 경우에도 fairness와 throughput 면에서 두 사용자 모두에게 이득이 발생함을 알 수 있었다. 또한 cooperation에 의한 서비스 중단 확률이 non-cooperation에 의한 확률보다 더 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 cooperative 통신이 채널 변화에 대한 강건성을 갖기 때문이다. 또한 기본적으로 대표적인 cooperative 프로토콜과 그들의 BER 성능에 대해서도 살펴보았다. Cooperation을 통해 공간 다이버시티 효과가 나타나므로 non-cooperation

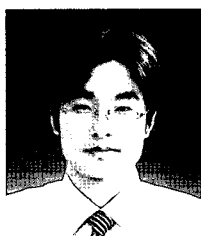
일 때보다 우수한 BER 성능을 얻을 수 있었다. 사용자간 채널이 나쁠 경우에도 오류 발생률을 개선하는 효과가 있으며, 채널의 품질이 사용자마다 다르더라도 모두에게 성능 개선 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 분산된 무선 네트워크에서의 cooperative 통신 기술을 통해 송신전력의 소모를 줄이고 높은 데이터 전송률을 얻을 수 있으며 커버리지 영역을 확대시킬 수 있다. 또한 다이버시티나 다중화 이득도 얻을 수 있다. 그러나 아직 간섭이나 종단간 시간지연, 채널모델 및 추정기법, 동기방식, 전력제어 등의 문제점이 남아 있다. 특히 cooperation 파트너를 어떻게 할당하고 관리할 것인가에 대한 문제는 많은 논의가 필요하다. 따라서 cooperation 통신 분야에 대한 지속적인 관심과 보다 심도 있는 연구가 요구된다.

참고문헌

[1] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 2000.
 [2] A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2003.
 [3] IEEE Std 802.16e™, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks; Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," Feb. 2006.

[4] H. Ekström, A. Furuskär, J. Karlsson, M. Meyer, S. Parkvall, J. Torsner, and M. Wahlqvist, "Technical solutions for the 3G long-term evolution," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, pp. 38-45, March 2006.
 [5] 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.
 [6] A. Nostratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, pp. 74-80, Oct. 2004.
 [7] T. E. Hunter and A. Nostratinia, "Diversity through coded cooperation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, pp. 283-289, Feb. 2006.
 [8] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
 [9] J. N. Laneman and G. W. Wornell, "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Oct. 2003.
 [10] M. Dohler and H. Aghvami, "Distributed cooperative communication networks - with application to cellular, ad hoc and sensor networks," *IEEE Proc. VTC2006-Spring Tutorials*, May 2006.

저자소개



서정욱

1999년: 한국항공대학교 통신정보공학과 졸업(공학사)
 2001년: 한국항공대학교 대학원 통신정보공학과 졸업(공학석사)
 2001년 1월~현재: KETI, DxB·통신융합연구센터 근무(전임연구원)

2005년~현재: 연세대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정
 ※관심 분야: 통신 신호처리, 디지털 방송 및 통신 융합시스템



이경택

1994년: 인하대학교 전자재료공학과 졸업(공학사)
 1996년: 인하대학교 대학원 전자재료공학과 졸업(공학석사)
 1996년 3월~1998년 8월: 해태전자통신기술연구소

1998년 9월~2001년 11월: (주)아이앤씨테크놀로지 팀장
 2002년 2월~현재: KETI, DxB·통신융합연구센터 근무(전임연구원)

2004년~현재: 연세대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정
 ※관심 분야: 디지털 방송 및 통신 융합시스템

백종호



1994년: 중앙대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1997년: 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)
2004년: 중앙대학교 대학원 전자전기공학부 박사수료

1997년 1월~2003년 2월: KETI, 뉴미디어 통신연구센터 (선임연구원)

2003년 3월~2005년 1월: KETI, DMB 개발사업단 단장

2005년 2월~현재: KETI, DxB·통신융합연구센터 센터장

※관심 분야: 차세대 디지털 방송통신 시스템, 유무선 영상통신 융합 시스템

김동구



1983년: 한국항공대학교 통신공학과 졸업(공학사)
1985년: U.S.C. Dept. of Electrical Engineering(공학석사)
1992년: U.S.C. Dept. of Electrical Engineering(공학박사)

1999년~현재: 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 부교수

※관심 분야: CDMA 이동통신, 다중접속 기술, 변조 및 채널 부호화 기술, Scheduling/MAC 기술, MIMO 및 Beamforming 기술, UWB 시스템

전원기



1994년: 중앙대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1996년: 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
1999년: 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

2001년 7월: 중앙대학교 전자전기공학부 BK21 계약교수

2001년 8월~현재: KETI, DxB·통신융합연구센터 근무 (책임연구원)

※관심 분야: OFDM 기반 무선통신 시스템, 디지털 방송 및 통신 융합시스템