

간섭 제한적인 환경에서의 OFDM 시스템의 다이버시티 기술의 비교

종신회원 임 민 중*, 정회원 김 홍 석**

Comparisons of Diversity Techniques for OFDM Systems in Interference-Limited Environments

Min-Joong Rim* *Lifelong Member*, Hongseog Kim** *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 간섭 제한적인 환경의 OFDM 시스템에서 시공간 부호화 기술과 순환지연 다이버시티 기술의 성능을 비교한다. 통신 시스템은 다이버시티 기술을 보통 자신의 성능을 향상시키기 위하여 사용하지만 시스템이 간섭 제한적인 환경에서 동작된다면 다른 사용자에게 미치는 영향도 함께 고려해야 한다. 다른 사용자와의 간섭을 고려하지 않을 때 시공간 부호화 기술은 순환지연 다이버시티 기술보다 우수한 성능을 보이지만 다른 사용자에게 미치는 영향을 함께 고려할 때는 순환지연 다이버시티를 사용하는 것이 더 우수한 성능을 보일 수 있다.

Key Words : OFDM, Space Time Coding, Cyclic Delay Diversity, Interference, Diversity

ABSTRACT

This paper compares the performances with space time coding and cyclic delay diversity techniques for OFDM systems in interference-limited environments. While a communication system usually use a diversity technique to improve its own performance, it is also necessary to consider the interference effects to other users as well if the system is operated in interference-limited environments. When there is no interference from or to other users, space time coding technique results in better performance than cyclic delay diversity. However, cyclic delay diversity can be better than space time coding if interferences to other users are considered.

I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 주파수 선택적 페이딩 채널에서 낮은 복잡도를 유지하면서 우수한 성능을 얻을 수 있으므로 광대역 무선통신 및 이동통신 시스템에서 널리 사용되고 있다^{[1][2]}. 무선통신 및 이동통신 시스템에서는 페이딩 채널에서의 성능을 향상시키기 위하여 다양한 형태의 다이버시티 기술이 적용된다. 다이버시티는 채널의 시간축에서의 변화 및 주파수축에서의 변화

에 의해서도 발생하며 다중안테나를 적용함으로써 다이버시티를 증가시킬 수 있다^{[3][4]}.

OFDM 시스템에서 사용되는 다이버시티 기술 중 대표적인 것으로는 시공간 부호화 기술과 순환지연 다이버시티 기술이 있다^[3-7]. 본 논문에서는 OFDM 셀룰러 시스템의 셀 경계 등 간섭 제한적인 환경에서 충분한 수준의 채널 부호화가 적용이 되었으며 채널추정 등 동기가 완벽하다고 가정할 때 시공간 부호화 기술과 순환지연 다이버시티 기술의 성능을 비교한다. 일반적으로 다이버시티 기술은 자신의 성

* 동국대학교 정보통신공학과 (minjoong@dongguk.edu), ** 배재대학교 전자공학과 부교수
논문번호 : KICS2008-05-219, 접수일자 : 2008년 5월 19일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 13일

능을 향상시키기 위하여 사용되지만 간섭 제한적인 환경에서는 다른 사용자에게 미치는 영향도 함께 고려해야 한다. 본 논문에서는 다이버시티 기술이 자신의 성능에 미치는 영향과 함께 다른 사용자에게 미치는 영향을 고려하여 어떠한 기술이 적용되는 것이 유리한지 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 다이버시티에 의한 성능 향상 및 간섭의 영향에 대해서 논하며 III장에서는 OFDM 시스템의 대표적인 다이버시티 기술인 시공간 블록 부호화(Space Time Block Coding) 기술과 순환지연 다이버시티(Cyclic Delay Diversity) 기술에 대해서 논한다. IV장에서는 모의실험을 통하여 다이버시티 기술에 의한 성능 향상 및 간섭의 영향을 확인하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. 다이버시티와 성능

2.1 OFDM 시스템의 다이버시티와 성능

OFDM 시스템에서 채널부호화 및 변조가 된 N 개의 전송신호가 N 개의 채널을 통해서 전송된다고 하자. 평균 에너지 1의 전송되는 데이터 심벌을 $X_n (n=1, \dots, N)$, 해당되는 주파수 응답을 $H_n (n=1, \dots, N)$, σ^2 의 분산을 가지는 잡음을 $W_n (n=1, \dots, N)$ 이라고 하자. 다른 사용자로부터의 간섭신호는 N 개의 평균 에너지 1의 송신신호 $Z_n (n=1, \dots, N)$ 이 N 개의 채널 $G_n (n=1, \dots, N)$ 을 통해서 전송된다고 하자. 이 때 수신된 신호 $R_n (n=1, \dots, N)$ 는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$R_n = H_n X_n + G_n Z_n + W_n \quad (1)$$

수신된 신호 R_n 의 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)은 다음과 같다.

$$\gamma_n = \frac{|H_n|^2}{|G_n|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

본 논문에서 신호의 심벌 다이버시티 계수 D_{Symbol} 을 다음과 같이 정의한다.

$$D_{Symbol} = \frac{\text{var}\{|H_n|^2\}}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{var}\{|H_n|^2\}} \quad (3)$$

위 식에서 H 는 다이버시티 기술이 적용되기 전의 Rayleigh 페이딩 채널을 의미한다. 본 논문에서 채

널복호기로 입력되기 전의 수신신호에 대한 심벌 수준의 불능률은 다음 식과 같이 γ_n 이 임계치 $\Gamma_{Symbol} (< E\{\gamma_n\})$ 보다 작은 값을 가지는 확률로 정의한다.

$$Outage_{Symbol} = P(\gamma_n < \Gamma_{Symbol}) \quad (4)$$

간섭을 고려하지 않고 $E\{\gamma_n\}$ 이 고정되어 있을 때 다이버시티 기술이 적용되어 D_{Symbol} 이 커지면, 즉 $\text{var}\{\gamma_n\}$ 이 작아지면 $Outage_{Symbol}$ 이 개선되는 경향을 가지며 BER(Bit Error Rate)이 줄어들 수 있다. SINR의 평균이 같은 임의의 두 개의 SINR의 분포를 비교할 경우 SINR의 분산이 작다는 것이 항상 심벌 수준의 불능률을 작게 한다는 것을 보장할 수는 없으나 본 논문에서는 다이버시티 기술을 적용하여 SINR의 평균이 일정하고 분산이 작아지는 경우에는 심벌 수준의 불능률이 작아질 수 있다고 가정한다.

주어진 변조 및 부호화 방법 및 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널에서 FER(Frame Error Rate)이 SNR(Signal to Noise Ratio) γ 에 대한 함수 $\Phi(\gamma)$ 로 주어졌다고 하자. γ_n 의 SNR을 가지는 N 개의 페이딩 채널을 이용하여 전송하였을 때의 FER은 다음과 같은 방법으로 유효 SNR γ_{eff} 를 구한 뒤 $\Phi(\gamma_{eff})$ 를 구함으로써 얻을 수 있다^[8].

$$\gamma_{eff} = -\beta \log \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \exp \left(-\frac{\gamma_n}{\beta} \right) \right) \quad (5)$$

위 식에서 β 값은 변조방식에 따라서 결정되는 값으로 변조차수가 커질수록 큰 값을 가진다^[8]. 프레임의 평균 SINR은 다음과 같다.

$$\gamma_{Frame} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H_n|^2}{|G_n|^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

식 (5)는 Jensen의 부등식에 의하여 다음과 같이 쓰일 수 있다^[9].

$$\gamma_{eff} \leq -\beta \log \left(\exp \left(-\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\gamma_n}{\beta} \right) \right) = \gamma_{Frame} \quad (7)$$

만일 주어진 환경에서 상대적으로 높은 변조방식과 낮은 부호화율이 적용되었다면 $E\{\gamma_n / \beta\}$ 가 작은 값을 가지고 γ_n / β 의 변화가 작아지므로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\gamma_{eff} \approx \gamma_{Frame} \quad (8)$$

본 논문에서는 낮은 부호화율이 적용되었다는 가

정 하에서 신호의 프레임 다이버시티 계수 D_{Frame} 을 다음과 같이 정의한다.

$$D_{Frame} \equiv \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{var} \{ |H_n|^2 \}}{\text{var} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_n|^2 \right\}} \quad (9)$$

전체 다이버시티 계수 D 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D = \frac{\text{var} \{ |H|^2 \}}{\text{var} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_n|^2 \right\}} = D_{Symbol} D_{Frame} \quad (10)$$

본 논문에서는 심벌 수준의 다이버시티 계수를 증가시키는 다이버시티 기술을 심벌 수준의 다이버시티 기술, 프레임 수준의 다이버시티 계수를 증가시키는 다이버시티 기술을 프레임 수준의 다이버시티 기술이라고 부른다. 프레임 수준의 다이버시티 기술은 부호화 다이버시티 (coded diversity) 기술이라고도 부른다³⁾.

프레임 수준의 불능률을 프레임의 평균 SINR γ_{Frame} 이 임계치 Γ_{Frame} ($< E\{\gamma_{Frame}\}$)보다 작은 확률로 정의해보자.

$$Outage_{Frame} \equiv P(\gamma_{Frame} < \Gamma_{Frame}) \quad (11)$$

간섭을 고려하지 않고 $E\{\gamma_{Frame}\}$ 이 고정되어 있을 때 심벌 수준의 다이버시티 혹은 프레임 수준의 다이버시티 기술을 적용하여 $\text{var}\{\gamma_{Frame}\}$ 가 줄어들면 $Outage_{Frame}$ 이 개선되는 경향을 가지며 FER이 줄어들 수 있다. γ_{Frame} 의 평균이 같은 임의의 두 개의 γ_{Frame} 의 분포를 비교할 경우 γ_{Frame} 의 분산이 작다는 것이 항상 프레임 수준의 불능률을 작게 한다는 것을 보장할 수는 없으나 본 논문에서는 다이버시티 기술을 적용하여 γ_{Frame} 의 평균이 일정하고 분산이 작아지는 경우에는 프레임 수준의 불능률이 작아진다고 가정한다.

2.2 신호의 심벌 수준의 다이버시티

만일 간섭을 일으키는 사용자는 채널이 모든 부반송파에 일정하여 $G_n = G$ ($n=1, \dots, N$)로 주어졌으며 데이터를 전송하는 사용자의 채널 \tilde{H}_n 은 주어진 채널 H_n 에서 심벌 다이버시티 계수를 $D_{Symbol} (>1)$ 만큼 증가시키는 다이버시티 기술을 적용하여 다음

과 같은 식을 만족한다고 하자.

$$\begin{aligned} E\{|\tilde{H}_n|^2\} &= E\{|H_n|^2\} \\ \text{var}\{|\tilde{H}_n|^2\} &= \frac{\text{var}\{|H_n|^2\}}{D_{Symbol}} \\ \text{var}\left\{\sum_{n=1}^N |\tilde{H}_n|^2\right\} &= \frac{\text{var}\left\{\sum_{n=1}^N |H_n|^2\right\}}{D_{Symbol}} \end{aligned} \quad (12)$$

심벌 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때의 불능률 $\widetilde{Outage}_{Symbol}$ 은 다이버시티 기술을 적용하기 전의 불능률 $Outage_{Symbol}$ 에 대비하여 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} \widetilde{Outage}_{Symbol} &= P\left\{ \frac{|\tilde{H}_n|^2}{|G|^2 + \sigma^2} < \Gamma_{Symbol} \right\} \\ &= P\left\{ |\tilde{H}_n|^2 < \Gamma_{Symbol} (|G|^2 + \sigma^2) \right\} \\ &< P\left\{ |H_n|^2 < \Gamma_{Symbol} (|G|^2 + \sigma^2) \right\} \\ &= Outage_{Symbol} \end{aligned} \quad (13)$$

심벌 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때의 불능률 $\widetilde{Outage}_{Frame}$ 은 다이버시티 기술을 적용하기 전의 불능률 $Outage_{Frame}$ 에 대비하여 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} \widetilde{Outage}_{Frame} &= P\left\{ \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\tilde{H}_n|^2}{|G|^2 + \sigma^2} < \Gamma_{Frame} \right\} \\ &= P\left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\tilde{H}_n|^2 < \Gamma_{Frame} (|G|^2 + \sigma^2) \right\} \\ &< P\left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_n|^2 < \Gamma_{Frame} (|G|^2 + \sigma^2) \right\} \\ &= Outage_{Frame} \end{aligned} \quad (14)$$

심벌 수준의 다이버시티 기술은 $\widetilde{Outage}_{Symbol}, \widetilde{Outage}_{Frame}$ 을 모두 개선하며 따라서 BER과 FER을 모두 개선시킬 수 있다.

2.3 신호의 프레임 수준의 다이버시티

만일 간섭을 일으키는 사용자는 채널이 모든 부반송파에 일정하여 $G_n = G$ ($n=1, \dots, N$)로 주어졌으며 데이터를 전송하는 사용자의 채널 \tilde{H}_n 은 주어진 채널 H_n 에서 프레임 다이버시티 계수를 $D_{Frame} (>1)$ 만큼 증가시키는 다이버시티 기술을 적용하여 다음

과 같은 식을 만족한다고 하자.

$$\begin{aligned} E\left\{|\bar{H}_n|^2\right\} &= E\left\{|H_n|^2\right\} \\ \text{var}\left\{|\bar{H}_n|^2\right\} &= \text{var}\left\{|H_n|^2\right\} \\ \text{var}\left\{\sum_{n=1}^N|\bar{H}_n|^2\right\} &= \frac{\text{var}\left\{\sum_{n=1}^N|H_n|^2\right\}}{D_{\text{Symbol}}} \end{aligned} \quad (15)$$

프레임 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때의 불능률 $\overline{\text{Outage}}_{\text{Symbol}}$ 은 다이버시티 기술을 적용하기 전의 불능률 $\text{Outage}_{\text{Symbol}}$ 에 대비하여 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} \overline{\text{Outage}}_{\text{Symbol}} &= P\left\{\frac{|\bar{H}_n|^2}{|G|^2 + \sigma^2} < \Gamma_{\text{Symbol}}\right\} \\ &= P\left\{|\bar{H}_n|^2 < \Gamma_{\text{Symbol}}(|G|^2 + \sigma^2)\right\} \\ &= P\left\{|H_n|^2 < \Gamma_{\text{Symbol}}(|G|^2 + \sigma^2)\right\} \\ &= \text{Outage}_{\text{Symbol}} \end{aligned} \quad (16)$$

프레임 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때의 불능률 $\overline{\text{Outage}}_{\text{Frame}}$ 은 다이버시티 기술을 적용하기 전의 불능률 $\text{Outage}_{\text{Frame}}$ 에 대비하여 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} \overline{\text{Outage}}_{\text{Frame}} &= P\left\{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N|\bar{H}_n|^2 < \Gamma_{\text{Frame}}\right\} \\ &= P\left\{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N|\bar{H}_n|^2 < \Gamma_{\text{Frame}}(|G|^2 + \sigma^2)\right\} \\ &< P\left\{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N|H_n|^2 < \Gamma_{\text{Frame}}(|G|^2 + \sigma^2)\right\} \\ &= \text{Outage}_{\text{Frame}} \end{aligned} \quad (17)$$

프레임 수준의 다이버시티 기술은 $\overline{\text{Outage}}_{\text{Symbol}}$ 은 개선하지 못하지만 $\overline{\text{Outage}}_{\text{Frame}}$ 은 개선한다. 따라서 BER은 줄이지 못하지만 FER은 줄일 수 있다.

2.4 간섭의 심벌 수준의 다이버시티

만일 데이터를 전송하는 사용자의 채널이 모든 부반송파에 일정하여 $H_n = H (n=1, \dots, N)$ 로 주어졌으며 간섭을 일으키는 사용자의 채널 \tilde{G}_n 은 주어진 채널 $G_n (n=1, \dots, N)$ 에서 심벌 다이버시티 계수를 $D_{\text{Symbol}} (>1)$ 만큼 증가시키는 다이버시티 기술을 사

용하여 다음과 같은 식을 만족한다고 하자.

$$\begin{aligned} E\left\{|\tilde{G}_n|^2\right\} &= E\left\{|G_n|^2\right\} \\ \text{var}\left\{|\tilde{G}_n|^2\right\} &= \frac{\text{var}\left\{|G_n|^2\right\}}{D_{\text{Symbol}}} \\ \text{var}\left\{\sum_{n=1}^N|\tilde{G}_n|^2\right\} &= \frac{\text{var}\left\{\sum_{n=1}^N|G_n|^2\right\}}{D_{\text{Symbol}}} \end{aligned} \quad (18)$$

간섭을 일으키는 사용자에 심벌 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때의 불능률 $\overline{\text{Outage}}_{\text{Symbol}}$ 은 다이버시티 기술을 적용하기 전의 불능률 $\text{Outage}_{\text{Symbol}}$ 에 대비하여 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} \overline{\text{Outage}}_{\text{Symbol}} &= P\left\{\frac{|H|^2}{|\tilde{G}_n|^2 + \sigma^2} < \Gamma_{\text{Symbol}}\right\} \\ &= P\left\{|\tilde{G}_n|^2 > \frac{|H|^2 - \sigma^2\Gamma_{\text{Symbol}}}{\Gamma_{\text{Symbol}}}\right\} \\ &< P\left\{|G_n|^2 > \frac{|H|^2 - \sigma^2\Gamma_{\text{Symbol}}}{\Gamma_{\text{Symbol}}}\right\} \\ &= \text{Outage}_{\text{Symbol}} \end{aligned} \quad (19)$$

간섭을 일으키는 사용자가 심벌 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때 평균 SINR $\tilde{\gamma}_{\text{Frame}}$ 의 평균과 분산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E\left\{\tilde{\gamma}_{\text{Frame}}\right\} &= E\left\{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N\frac{|H|^2}{|\tilde{G}_n|^2 + \sigma^2}\right\} \\ &= \frac{|H|^2}{N}\sum_{n=1}^N E\left\{\frac{1}{|\tilde{G}_n|^2 + \sigma^2}\right\} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{var}\left\{\tilde{\gamma}_{\text{Frame}}\right\} = \text{var}\left\{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^N\frac{|H|^2}{|\tilde{G}_n|^2 + \sigma^2}\right\} \quad (21)$$

$\tilde{\gamma}_{\text{Frame}}$ 의 평균과 분산에서 분모에 있는 $|\tilde{G}_n|^2$ 의 분산이 감소하였으므로 $|\tilde{G}_n|^2$ 의 분포에 따라서 차이가 있을 수는 있으나 평균과 분산 모두 감소하는 경향을 가질 것이다. $\tilde{\gamma}_{\text{Frame}}$ 은 분산이 감소할 수는 있으나 평균도 감소할 수 있으므로 불능률 $\overline{\text{Outage}}_{\text{Frame}}$ 이 개선되는 것을 보장할 수 없다. 특히 채널에 이미 충분한 프레임 수준의 다이버시티가 있어서 $\tilde{\gamma}_{\text{Frame}}$ 이 분산이 작은 경우에는 분산을 더 줄이는 것은 큰

의미가 없는 반면 $\bar{\gamma}_{Frame}$ 의 평균을 감소시키는 것은 무시할 수 없는 성능의 저하를 가져올 수 있다. 서로 간섭을 미치는 사용자들이 심벌 수준의 다이버시티 기술을 사용하는 것은 자신의 성능은 개선하지만 다른 사용자의 성능을 떨어뜨릴 가능성이 있으므로 성능 증대를 보장할 수 없다. 간섭이 있는 환경에서 심벌 수준의 다이버시티를 증가시키는 것은 BER을 줄일 수는 있지만 FER을 줄인다는 보장은 없다. BER을 줄이는 것과 FER을 줄이는 것은 일치하지 않으며 BER을 줄이는 기술이 FER도 줄여서 시스템 성능을 개선한다는 것을 보장할 수는 없다.

2.5 간섭의 프레임 수준의 다이버시티

만일 데이터를 전송하는 사용자의 채널이 H 로 주어졌으며 간섭을 일으키는 사용자의 채널 \bar{G}_n 은 주어진 채널 G_n 에서 프레임 다이버시티 계수를 $D_{Frame} (>1)$ 만큼 증가시키는 다이버시티 기술을 사용하여 다음과 같은 식을 만족한다고 하자.

$$\begin{aligned} E\left\{\left|\bar{G}_n\right|^2\right\} &= E\left\{\left|G_n\right|^2\right\} \\ \text{var}\left\{\left|\bar{G}_n\right|^2\right\} &= \text{var}\left\{\left|G_n\right|^2\right\} \\ \text{var}\left\{\sum_{n=1}^N\left|\bar{G}_n\right|^2\right\} &= \frac{\text{var}\left\{\sum_{n=1}^N\left|G_n\right|^2\right\}}{D_{Frame}} \end{aligned} \quad (22)$$

간섭을 일으키는 사용자에 프레임 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때의 불능률 $\overline{Outage}_{Symbol}$ 은 다이버시티 기술을 적용하기 전의 불능률 $Outage_{Symbol}$ 에 대비하여 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} \overline{Outage}_{Symbol} &= P\left\{\frac{|H|^2}{\left|\bar{G}_n\right|^2 + \sigma^2} < \Gamma_{Symbol}\right\} \\ &= P\left\{\left|\bar{G}_n\right|^2 > \frac{|H|^2 - \sigma^2 \Gamma_{Symbol}}{\Gamma_{Symbol}}\right\} \\ &= P\left\{\left|G_n\right|^2 > \frac{|H|^2 - \sigma^2 \Gamma_{Symbol}}{\Gamma_{Symbol}}\right\} \\ &= Outage_{Symbol} \end{aligned} \quad (23)$$

간섭을 일으키는 사용자가 프레임 수준의 다이버시티 기술을 적용하였을 때의 $\bar{\gamma}_{Frame}$ 은 다이버시티 기술을 적용하기 전의 γ_{Frame} 에 대비하여 평균값은

변하지 않는다.

$$\begin{aligned} E\left\{\bar{\gamma}_{Frame}\right\} &= E\left\{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H|^2}{\left|\bar{G}_n\right|^2 + \sigma^2}\right\} \\ &= \frac{|H|^2}{N} \sum_{n=1}^N E\left\{\frac{1}{\left|\bar{G}_n\right|^2 + \sigma^2}\right\} \\ &= \frac{|H|^2}{N} \sum_{n=1}^N E\left\{\frac{1}{\left|G_n\right|^2 + \sigma^2}\right\} \\ &= E\left\{\gamma_{Frame}\right\} \end{aligned} \quad (24)$$

이에 반해서 분산은 간섭을 일으키는 채널들의 독립성이 커짐에 따라서 감소하는 경향을 가질 것을 예측할 수 있다. 따라서 프레임 수준의 불능률 $\overline{Outage}_{Frame}$ 은 감소하는 경향을 가질 것이다. 프레임 수준의 다이버시티 기술의 적용은 자신의 성능을 개선할 뿐만 아니라 간섭을 미치는 다른 사용자의 성능도 증대시킬 수 있다. 서로 간섭을 미치는 사용자들이 프레임 수준의 다이버시티를 증대시키는 기술을 사용하는 것은 자신의 성능과 상대방의 성능을 모두 증대시켜 효과적으로 FER을 줄일 수 있다.

III. OFDM 시스템의 다이버시티 기술

3.1 안테나와 상관없는 다이버시티

OFDM 시스템에서 분석을 간단히 하기 위하여 한 부호화 블록 내에서 채널의 시간축의 변화는 없다고 가정하여 주파수와 안테나에 의한 다이버시티만 고려해보자. N 개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템에서 주파수축의 채널을 $H_n (n=1, \dots, N)$ 라고 할 때 프레임 수준의 다이버시티 계수 $D_{Frame}^{Original}$ 은 다음과 같다.

$$D_{Frame}^{Original} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{var}\left\{\left|H_n\right|^2\right\}}{\text{var}\left\{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left|H_n\right|^2\right\}} \quad (25)$$

T 를 샘플 구간, L 을 다중경로의 수, p_l 를 l 번째 다중경로의 평균 채널값이라고 할 때 시간축의 다중경로 채널이 다음과 같이 정의되어 있다고 하자.

$$\begin{aligned} channel(t) &= \sum_{l=1}^L p_l h_l \delta(t - lT) \\ &\left(\sum_{l=1}^L p_l^2 = 1\right) \end{aligned} \quad (26)$$

만일 각 경로의 채널이 독립적이라고 가정한다면 Parseval의 정리를 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_{Frame}^{Original} = \frac{\text{var}\{|h|^2\}}{\text{var}\left\{\sum_{l=1}^L p_l^2 |h_l|^2\right\}} = \frac{1}{\sum_{l=1}^L p_l^4} \quad (27)$$

3.2 시공간 부호화 기술

두 개의 안테나를 사용한다고 할 때 T 를 샘플 구간, L 을 다중경로의 수, $p_{1,l}$ 및 $p_{2,l}$ 를 각 안테나의 l 번째 다중경로의 평균 채널값이라고 할 때 시간축의 다중경로 채널이 다음과 같이 정의되어 있다고 하자.

$$\begin{aligned} channel_1(t) &= \sum_{l=1}^L p_{1,l} h_{1,l} \delta(t-lT) \\ channel_2(t) &= \sum_{l=1}^L p_{2,l} h_{2,l} \delta(t-lT) \\ \left(\sum_{l=1}^L p_{1,l}^2 &= 1, \sum_{l=1}^L p_{2,l}^2 = 1 \right) \end{aligned} \quad (28)$$

OFDM 시스템에서 대표적인 시공간 블록 부호화 기술인 Alamouti 코드를 적용하였을 때 n 번째 부반송파에서 두 개의 송신신호를 $(1/\sqrt{2})X_{1,n}$ 및 $(1/\sqrt{2})X_{2,n}$, 시간축의 연속된 두 개의 수신신호를 $R_{1,n}$ 및 $R_{2,n}$, 두 개의 안테나에 의해서 생성된 채널을 $H_{1,n}$ 및 $H_{2,n}$, σ^2 의 분산을 가지는 잡음을 $W_{1,n}$ 및 $W_{2,n}$ 라고 하자^{[3][4]}. 수신신호는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} R_{1,n} &= H_{1,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{1,n} + H_{2,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{2,n} + W_{1,n} \\ R_{2,n} &= -H_{1,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{2,n}^* + H_{2,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{1,n}^* + W_{2,n} \end{aligned} \quad (29)$$

채널 보상된 신호 $Y_{1,n}$ 및 $Y_{2,n}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Y_{1,n} &= H_{1,n}^* R_{1,n} + H_{2,n} R_{2,n}^* \\ Y_{2,n} &= H_{2,n} R_{1,n}^* - H_{1,n}^* R_{2,n} \end{aligned} \quad (30)$$

이 때의 SINR은 다음과 같다.

$$\gamma_n = \frac{|H_{1,n}|^2 + |H_{2,n}|^2}{2\sigma^2} \quad (31)$$

따라서 심벌 수준의 다이버시티 계수는 다음과 같다.

$$D_{Symbol}^{STBC} = 2 \quad (32)$$

프레임 수준의 다이버시티 계수는 다음과 같이 써질 수 있다.

$$\begin{aligned} D_{Frame}^{STBC} &= \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{var}\left\{\frac{|H_{1,n}|^2 + |H_{2,n}|^2}{2}\right\}}{\text{var}\left\{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H_{1,n}|^2 + |H_{2,n}|^2}{2}\right\}} \\ &= \frac{2 \text{var}\{|h|^2\}}{\text{var}\left\{\sum_{l=1}^L p_{1,l}^2 |h_{1,l}|^2 + \sum_{l=1}^L p_{2,l}^2 |h_{2,l}|^2\right\}} \\ &= \frac{2}{\sum_{l=1}^L p_{1,l}^4 + \sum_{l=1}^L p_{2,l}^4} \end{aligned} \quad (33)$$

만일 $p_{1,l} = p_{2,l} = p_l$ 이 성립한다면 위 식은 다음과 같이 써질 수 있다.

$$D_{Frame}^{STBC} = D_{Frame}^{Original} \quad (34)$$

시공간 부호화 기술은 심벌 수준의 다이버시티를 증대시키는 기술이다.

3.3 순환지연 다이버시티 기술

OFDM 시스템에서 다중안테나를 이용한 간단한 다이버시티 기술 중 하나는 순환지연 다이버시티 이다^{[5][6][7]}. 두 개의 안테나를 이용하는 순환지연 다이버시티를 적용하여 시간축의 다중경로 채널이 다음과 같이 만들어졌다고 하자.

$$\begin{aligned} channel_{CDD}(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{l=1}^L p_{1,l} h_{1,l} \delta(t-lT) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{l=L+1}^{2L} p_{2,l-L} h_{2,l-L} \delta(t-lT) \end{aligned} \quad (35)$$

순환지연 다이버시티는 안테나 다이버시티를 주파수 다이버시티로 바꾸는 기술로서 각 심벌의 분포는 변화시키지 않는다^{[5][6][7]}.

$$D_{Symbol}^{CDD} = 1 \quad (36)$$

순환지연 다이버시티를 적용하였을 때의 프레임 수준의 다이버시티 계수는 만일 각 경로의 채널이 독립적이라고 가정한다면 다음과 같이 써질 수 있다.

$$D_{Frame}^{CDD} = \frac{4}{\sum_{l=1}^L p_{1,l}^4 + \sum_{l=1}^L p_{2,l}^4} \quad (37)$$

만일 $P_{1,l} = P_{2,l} = P_l$ 이 성립한다면 위 식은 다음과 같이 써질 수 있다.

$$D_{Frame}^{CDD} = \frac{2}{\sum_{l=1}^L P_l^4} = 2D_{Frame}^{Original} \quad (38)$$

순환지연 다이버시티는 심벌 수준의 다이버시티는 증가시키지 않으면서 프레임 수준의 다이버시티를 증가시킨다.

시공간 부호화 기술은 각 부반송파의 SNR의 분산을 줄임으로써 BER 및 FER을 줄일 수 있는 기술이다. 이에 반해서 순환지연 다이버시티는 각 부반송파의 SNR의 분산은 변하지 않으면서 부반송파들을 더 독립적으로 만들어서 BER은 변화시키지 않으면서 FER을 줄일 수 있는 기술이다. 두 기술 모두 FER을 감소시키지만 식 (8)의 근사화를 고려할 때 프레임 수준의 다이버시티를 증대시키는 것은 심벌 수준의 다이버시티를 증대시키는 것에 비해서 다소 성능이 떨어질 수 있다. 채널추정 등이 완벽하다고 가정하고 간섭을 고려하지 않을 때 시공간 부호화 기술이 순환지연 다이버시티 기술보다 우수한 성능을 보일 수 있다.

3.4 시공간 부호화 기술의 간섭

사용자 B가 사용자 A에게 간섭을 미치는 환경에서 두 사용자 모두 Alamouti 코드를 사용하며 두 사용자는 동기가 맞아 있다고 가정하자. n 번째 부반송파에서 사용자 A의 두 개의 송신신호를 $(1/\sqrt{2})X_{1,n}$ 및 $(1/\sqrt{2})X_{2,n}$, 시간축의 연속된 두 개의 수신신호를 $R_{1,n}$ 및 $R_{2,n}$, 두 개의 안테나에 의해서 생성된 채널을 $H_{1,n}$ 및 $H_{2,n}$, σ^2 의 분산을 가지는 잡음을 $W_{1,n}$ 및 $W_{2,n}$ 라고 하자. 또한 간섭을 일으키는 사용자 B의 송신신호를 $(1/\sqrt{2})Z_{1,n}$ 및 $(1/\sqrt{2})Z_{2,n}$, 두 개의 안테나에 의해서 생성된 채널을 $G_{1,n}$ 및 $G_{2,n}$ 라고 할 때 수신 신호는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} R_{1,n} &= H_{1,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{1,n} + H_{2,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{2,n} \\ &\quad + G_{1,n} \frac{1}{\sqrt{2}} Z_{1,n} + G_{2,n} \frac{1}{\sqrt{2}} Z_{2,n} + W_{1,n} \\ R_{2,n} &= -H_{1,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{2,n}^* + H_{2,n} \frac{1}{\sqrt{2}} X_{1,n}^* \\ &\quad - G_{1,n} \frac{1}{\sqrt{2}} Z_{2,n}^* + G_{2,n} \frac{1}{\sqrt{2}} Z_{1,n}^* + W_{2,n} \end{aligned} \quad (39)$$

채널보상된 신호 $Y_{1,n}$ 및 $Y_{2,n}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Y_{1,n} &= H_{1,n}^* R_{1,n} + H_{2,n} R_{2,n}^* \\ Y_{2,n} &= H_{2,n} R_{1,n}^* - H_{2,n}^* R_{2,n} \end{aligned} \quad (40)$$

이때의 SINR은 다음과 같다.

$$\gamma_n = \frac{|H_{1,n}|^2 + |H_{2,n}|^2}{|G_{1,n}|^2 + |G_{2,n}|^2 + 2\sigma^2} \quad (41)$$

따라서 평균 SINR은 다음과 같다.

$$\gamma_{Frame} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H_{1,n}|^2 + |H_{2,n}|^2}{|G_{1,n}|^2 + |G_{2,n}|^2 + 2\sigma^2} \quad (42)$$

시공간 부호화는 각 부반송파의 에너지의 분산을 줄인다. 따라서 사용자 A에 시공간 부호화를 적용하면 $E\{\gamma_{Frame}\}$ 은 유지되고 $\text{var}\{\gamma_{Frame}\}$ 은 감소하여 성능의 증대를 가져온다. 그러나 사용자 B에 시공간 부호화를 적용하는 것은 사용자 A에 대해서 $\text{var}\{\gamma_{Frame}\}$ 의 감소를 가져올 수 있지만 $E\{\gamma_{Frame}\}$ 의 감소도 같이 발생할 수 있기 때문에 성능의 증대를 보장하지 않는다. 간섭을 일으키는 사용자들이 시공간 부호화를 같이 사용하는 것은 자신의 성능을 높이는 반면 상대방의 성능을 떨어뜨릴 수 있으므로 성능 증대에 효과적이지 않을 수 있다.

3.5 순환지연 다이버시티의 간섭

사용자 B가 사용자 A에게 간섭을 미치는 환경에서 사용자 A의 채널을 H_n ($n=1, \dots, N$), 간섭을 미치는 사용자 B의 채널을 G_n ($n=1, \dots, N$), 잡음의 분산을 σ^2 라고 한다면 사용자 A의 평균 SINR은 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_{Frame} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|H_n|^2}{|G_n|^2 + \sigma^2} \quad (43)$$

순환지연 다이버시티는 각 부반송파에서의 분산은 유지한 채 부반송파들을 더 독립적으로 만들어서 프레임 다이버시티 계수를 증가시킨다. 따라서 사용자 A에 순환지연 다이버시티를 적용하면 $E\{\gamma_{Frame}\}$ 은 유지되고 $\text{var}\{\gamma_{Frame}\}$ 은 감소하여 성능의 증대를 가져온다. 또한 사용자 B에 순환지연 다이버시티를 적용하여 프레임 다이버시티 계수가 증가하면 사용자 A의 $E\{\gamma_{Frame}\}$ 은 유지되고

$\text{var}\{y_{Frame}\}$ 은 감소하는 경향을 가져서 성능의 향상을 가져온다. 순환지연 다이버시티는 자신의 성능뿐만 아니라 다른 사용자의 성능을 향상시키는데 도움이 될 수 있다.

IV. 모의 실험

실험에서는 다이버시티 기술을 사용하지 않을 때, 시공간 부호화 기술을 사용하였을 때, 순환지연 다이버시티 기술을 사용하였을 때의 세 가지 경우를 비교하였다. 64개의 부반송파를 가지는 OFDM 시스템을 고려하였으며 채널은 0.5590 샘플의 RMS(Root Mean Square) 지연확산을 가지는 지수 함수 (Exponential) 분포를 사용하였고 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조방식과 부호화율 1/2의 길쌈부호를 사용하였다. 간섭이 없이 잡음만 있는 경우의 BER 및 FER 성능은 각각 그림 1과 2에서 볼 수 있다. 그림 1에서 BER 성능은 다이버시티 기술을 사용하지 않은 경우와 순환지연

다이버시티 기술을 사용한 경우가 같으며 시공간 부호화 기술을 사용한 경우에는 상당한 성능 향상을 얻는 것을 볼 수 있다. 그림 2에서 FER 성능은 순환지연 다이버시티 기술을 사용한 경우가 다이버시티 기술을 사용하지 않은 경우에 비해서 우수하며 시공간 부호화 기술을 사용한 경우는 더 우수하다. 시공간 부호화 기술은 BER과 FER을 향상시키는데 반해서 순환지연 다이버시티 기술은 BER은 향상시키지 못하고 FER만 향상시킨다.

그림 3 및 4는 잡음은 없고 두 사용자가 같은 다이버시티 기술을 사용하면서 간섭을 일으킬 때의 BER 및 FER 성능을 나타낸 것이다. 그림 3을 보면 간섭을 일으키는 사용자가 같은 다이버시티 기술을 사용할 때의 BER 성능에서는 간섭이 없는 경우와 별반 차이가 없다. 그러나 그림 4의 FER 성능에서는 시공간 부호화 기술을 사용하는 경우보다 순환지연 다이버시티 기술을 사용하는 경우가 더 성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 시공간 부호화는 자신의 성능을 향상시키는 데는 우수하지만 다른

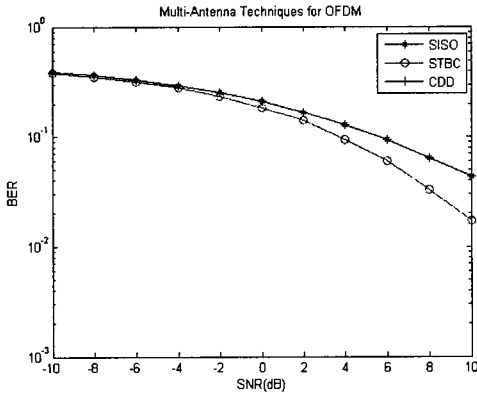


그림 1. 간섭이 없을 때의 BER 성능

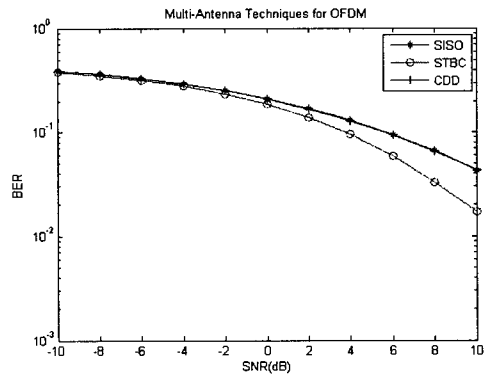


그림 3. 간섭이 있을 때의 BER 성능

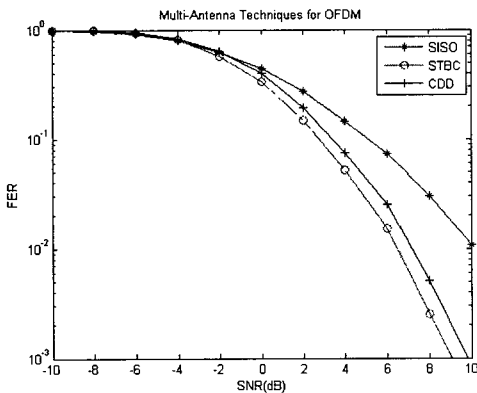


그림 2. 간섭이 없을 때의 FER 성능

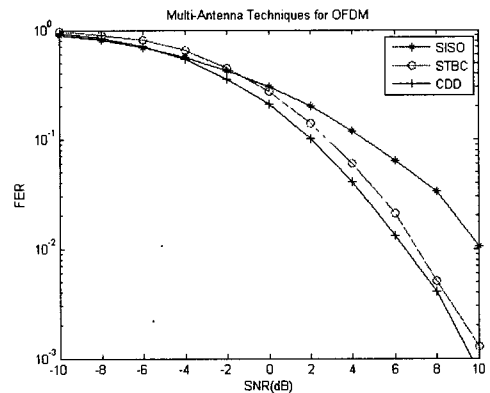


그림 4. 간섭이 있을 때의 FER 성능

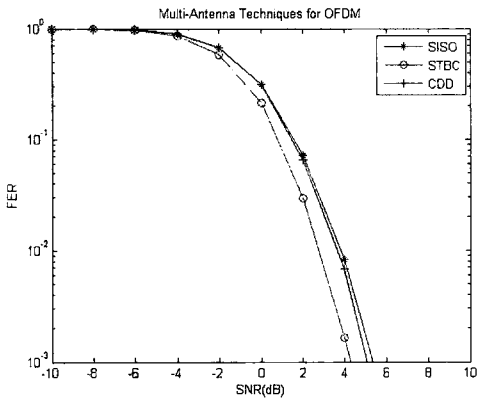


그림 5. 충분한 주파수 다이버시티가 있으며 간섭이 없을 때의 FER 성능

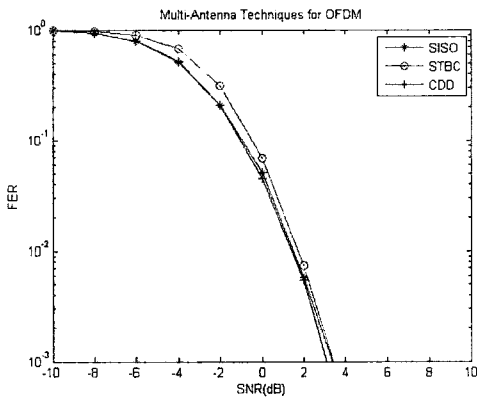


그림 6. 충분한 주파수 다이버시티가 있고 간섭이 있을 때의 FER 성능

사용자의 성능을 향상시키는 데는 우수하지 않기 때문에 간섭 제한적인 환경에서는 순환지연 다이버시티와 비교할 때 열등한 성능을 보일 수 있다.

만일 시간축 및 주파수축에서 충분한 다이버시티가 있다면 다이버시티에 의한 이득이 포화상태에 이르러 순환지연 다이버시티에 의한 이득이 미미해진다. 그림 5는 충분한 주파수 다이버시티가 있고 간섭이 없을 때의 FER 성능이다. 순환지연 다이버시티는 프레임 수준의 다이버시티를 증대시키는 기술이므로 다이버시티 기술을 사용하지 않은 경우에 비해서 성능을 거의 향상시키지 못하지만 시공간 부호화 기술은 심벌 수준의 다이버시티를 증가시키므로 성능 증대 효과를 얻을 수 있다. 그림 6은 충분한 주파수 다이버시티가 있고 동일한 다이버시티 기술을 사용하는 사용자가 간섭을 일으킬 때의 FER 성능을 보여주고 있다. 다이버시티 기술을 사용하지 않는 경우에 비해서 시공간 부호화 기술을 사용하는 경우에는 오히려 성능이 저하되고 있다. 간섭을

고려할 때에는 다이버시티 기술을 적용하는 것이 반드시 성능을 향상시키는 것은 아니다.

V. 결 론

이동통신 및 무선통신 시스템은 제한된 공간에서 다수의 사용자가 통신을 함으로써 발생하는 간섭을 피할 수 없다. 따라서 자신의 성능을 향상시키는 것 뿐만 아니라 간섭을 주는 다른 사용자의 성능도 같이 향상될 수 있는 기술을 사용하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 간섭 제한적인 환경에서 시공간 부호화 기술 및 순환지연 다이버시티 기술이 다른 사용자에게 어떻게 영향을 미치는지 살펴보았다. 간섭을 고려하지 않을 때에는 시공간 부호화 기술이 순환지연 다이버시티 기술보다 더 우수한 성능을 보이지만 간섭을 고려할 경우에는 순환지연 다이버시티 기술이 더 우수한 성능을 보일 수 있다.

채널에 이미 충분한 시간 및 주파수 다이버시티가 있는 경우에는 순환지연 다이버시티 기술을 통해 주파수 다이버시티를 더 증대시키는 것은 의미를 가지지 못하므로 순환지연 다이버시티 기술로 인한 성능 향상은 미미하다. 이러한 환경에서 간섭이 없는 경우는 시공간 부호화 기술을 통해서 성능 향상을 이룰 수 있다. 그러나 같은 기술을 사용하는 다른 사용자의 간섭을 고려할 때에는 시공간 부호화 기술을 사용하는 것이 다이버시티 기술을 사용하지 않는 경우보다 열등한 성능을 보일 수도 있다. 간섭이 있는 환경에서는 다이버시티 기술의 적용이 성능의 향상을 보장하지는 않으므로 다이버시티 기술을 적용할 때 주의가 필요하다.

참 고 문 헌

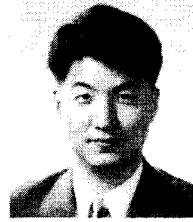
- [1] Z. Wang, G. B. Giannakis, "Wireless Multicarrier Communications," IEEE Signal Processing Magazine, Vol.17, No.3, pp.29-48, May 2000.
- [2] H. Liu, G. Li, OFDM-Based Broadband Wireless Networks, John Wiley & Sons Inc. 2005.
- [3] A. Paulraj, R. Nabar, D. Gore, Introduction to Space-Time Wireless Communications, Cambridge University Press, 2003.
- [4] D. Gesbert, M. Shafi, D.S. Shiu, P.J. Smith, A. Nagueib, "From Theory to Practice: An

Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.21, No.3, pp.281-302, April 2003.

- [5] G. Bauch, J.S. Malik, “Orthogonal Frequency Division Multiple Access with Cyclic Delay Diversity”, Smart Antennas, 2004. ITG Workshop, pp.17-24, March 2004.
- [6] A. Huebner, F. Schuehlein, M. Bossert, E. Costa, H. Haas, “A Simple Space-Frequency Coding Scheme with Cyclic Delay Diversity for OFDM,” Personal Mobile Communications Conference, 5th European, pp.106-110, April 2003.
- [7] G. Bauch, and J. S. Malik, “Cyclic delay diversity with bit-interleaved coded modulation in orthogonal frequency division multiple access”, IEEE Trans. Wireless Communications, Vol.5, No.8, pp.2092-2100, Aug. 2006.
- [8] R1-031303, Ericsson, “System-level evaluation of OFDM - further considerations,” 3GPP RAN WG1 #35, Lisbon, Portugal, November 2003.
- [9] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elementary of Information Theory, Wiley, New York, 1991.

임민중 (Min-Joong Rim)

종신회원



1987년 서울대학교 전자공학과 학사

1993년 University of Wisconsin-Madison, Electrical and Computer Engineering 박사

1993년~2000년 삼성전자 선임 연구원

2000년~현재 동국대학교 정보통신공학과 부교수
<관심분야> 이동통신, 무선통신, 통신 VLSI, 통신 소프트웨어

김홍석 (Hongseog Kim)

정회원



1985년 서울대학교 전자공학과 졸업

1989년 노스캐롤라이나 주립대 공학석사

1996년 노스캐롤라이나 주립대 공학박사

1996년~2000년 현대전자 책임 연구원

2000년~현재 배재대학교 전자공학과 부교수
<관심분야> 전자공학, 통신공학