DBpia

OFDM 셀룰러 시스템에서 부반송파 기반의 가상 다중안테나 기법

정회원 이 규 인*, 고 현 수*, 우 경 수*, 고 요 한*,
정회원 김 영 준*, 안 재 영**, 종신회원 조 용 수*

A Subcarrier-based Virtual Multiple Antenna Technique for OFDM Cellular Systems

Kyu In Lee*, Hyun Soo Ko*, Kyung Soo Woo*, Yo-han Ko* ***Regular Members***,
Yeong Jun Kim*, Jae Young Ahn** ***Regular Members***, Yong Soo Cho* ***Lifelong Member***

요 약

본 논문에서는 OFDM 기반의 셀룰러 시스템에서 실제 다중 수신안테나를 사용하지 않고 부반송파를 가상의 다중 수신안테나로 간주하여 MIMO 기법을 적용할 수 있는 부반송파 기반 가상 수신안테나 기법을 기술한다. 부반송파 기반 가상 안테나 기법은 단일 수신안테나에서도 셀간 간섭 제거 또는 SDMA를 수행할 수 있는 기법으로 송수신단에서 다중 안테나를 사용하는 경우에도 쉽게 확장가능하다. 부반송파 기반 가상 안테나 기법은 스마트 안테나 기법을 적용한 가상 스마트 안테나 기법과 MIMO 기법을 적용한 가상 다중 안테나 기법으로 분류된다. 특히 수신단이 주파수 재 사용률이 1인 셀 경계지역에 있을 때 인접 셀의 간섭을 효과적으로 제거할 수 있는 기법으로 간섭의 정도에 따라 유동적으로 자원할당이 가능한 방법이다. 모의실험을 통해 동일한 데이터 전송률에서 기존 셀간 간섭 제거 기법보다 부반송파 기반 가상 안테나 기법이 우수함을 보인다.

Key Words : OFDM, SV-MIMO, STBC, interference cancellation, Smart antenna

ABSTRACT

In this paper, we introduce the concept of a subcarrier-based virtual multiple antennas (SV-MIMO) for OFDM cellular systems, where the multiple antenna techniques are performed on a set of subcarriers, not on the actual multiple antennas. The virtual multiple antenna system can support multiple users simultaneously as well as reduce inter-cell interference (ICI) form adjacent cells with a single antenna. Also, this technique is easily extended to multiple antenna environments. The virtual multiple antenna techniques can be divided into a virtual smart antenna technique and a virtual MIMO technique. Especially, this method effectively reduces ICI at cell boundary with frequency reuse factor equal to 1, and can support flexible resource allocation depending on the amount of interference. It is shown by simulation that the proposed method is superior to conventional method under the same condition of data transmission.

※ 본 연구는 ETRI와 Ubiquitous Autonomic Computing and Network Project, MIC 21st Century Frontier R&D Program, 서울시 R&D Program, Nano IP/Soc Promotion Group의 지원에 의한 결과임.
* 중앙대학교 디지털통신 연구실 (yscho@cau.ac.kr), ** 한국전자통신연구원 차세대무선전송연구팀 (jyahn@etri.re.kr)
논문번호 : KICS2006-05-250, 접수일자 : 2006년 5월 31일, 최종논문접수일자 : 2006년 10월 9일

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

OFDM 방식은 주파수 효율이 높고, 간단한 단일 탭 등화기로 고속 전송 시 급격히 증가하는 심볼간 간섭의 보상이 가능하며, FFT를 사용하여 고속으로 구현할 수 있기 때문에 유·무선 채널에서 고속 데이터 통신을 위한 전송방식으로 채택되었다. WiBro, 3GPP LTE 하향링크 등의 차세대 이동통신 시스템의 전송방식으로 채택된 OFDM 전송방식은 위의 장점과 셀내 간섭이 존재하지 않는다는 장점이 있다. 그러나 셀룰러 환경에서 셀간 간섭의 영향으로 셀 경계에 존재하는 사용자는 성능이 크게 열화되어 수용 가능한 용량과 전송속도에서 크게 제한을 받게 된다. 따라서 셀룰러 환경의 4G에서 요구하는 requirtment를 만족하기 위하여 최근에 간섭을 회피하는 기법, 간섭의 영향을 평균하는 기법 등 OFDM 기반의 셀룰러 시스템에서 셀 간 간섭을 억제하는 기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[1]. 현재 WiBro 시스템은 셀 경계지역의 사용자를 위해서는 일부 자원만 사용하는 partial loading 과 낮은 부호율을 갖는 코딩기법이 적용된다[1-2]. 또한 송·수신단에 다중안테나를 사용하여 셀간 간섭을 제거할 수 있는 기법도 활발히 연구 중이나 수신단에 다중안테나를 사용하는 기법은 단말의 크기, 전력소모 등의 제약으로 실제 시스템에 적용하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 이와 같은 OFDM 기반 시스템의 단점을 개선하기 위하여 부반송파 기반의 가상 다중 안테나 기법을 이용한 셀간 간섭 감쇄 기법과 다중 사용자를 위한 SDMA 기법을 제안한다. 제안된 기법의 성능분석은 공정한 비교를 위하여 동일한 전송속도를 갖는 기존의 기법들과 성능을 비교한다. 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 수신단에서 단일안테나 또는 다중안테나를 갖는 환경에서 가상 다중 안테나 기법을 소개하고, 3장에서 부반송파 기반의 가상 수신안테나 기법을 이용한 SDMA 기법을 제안한다. 그리고 4장에서는 부반송파 기반의 가상 수신안테나 기법을 이용한 ICI 제거 기법을 제안한다. 또한 5장에서 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 분석한 후, 6장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 부반송파 기반의 가상 다중 안테나 기법

2.1 가상 스마트 안테나 기법

가상 스마트 안테나 기법은 수신단에서 다중 안테나를 사용하고 스마트 안테나 기법을 적용하여 신호의 DoA (Direction of Arrival)에 따른 간섭신호를 제거하는 것과 유사하게 수신단에서 단일 안테나를 사용하고 타겟 신호와 간섭신호의 심볼옵셋 차이를 이용하여 간섭신호를 효과적으로 제거하는 기법이다.

그림 1은 타겟 신호와 간섭 신호의 심볼 타이밍 옵셋을 보여준다. 수신신호는 심볼 옵셋에 따라 주파수 영역에서 위상회전이 발생하며, 위상이 회전된 신호를 시간영역에서 DoA에 따른 위상회전으로 간주하여 주파수영역 스마트 안테나 기법을 적용하여 간섭신호를 제거할 수 있다. 그림 1과 같이 심볼 타이밍 옵셋이 발생할 때 수신단에 수신된 m번째 자원으로 구성된 주파수영역 신호 $\boldsymbol{Y}(m)$은 B개의 송신단에서 송신된 신호의 합과 잡음의 합으로 나타낼 수 있다[2].

$$\boldsymbol{Y}(m)=\overline{\boldsymbol{H}}(m)\boldsymbol{X}(m)+\boldsymbol{N}_{\boldsymbol{w}}(m), m\in\{0,1,\cdots,M-1\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{Y}(m)&=[Y(G\cdot m),\ \cdots, Y(M\cdot m+G-1)]^T\\
\overline{\boldsymbol{H}}(m)&=[\overline{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{1}}(m),\overline{\boldsymbol{H}}_2(m),\cdots,\overline{\boldsymbol{H}}_B(m)]\\
\boldsymbol{X}(m)&=[\widetilde{X_1}(m),\widetilde{X_2}(m),\cdots,\widetilde{X_B}(m)]^T\\
\overline{\boldsymbol{H}}_i(m)&=[H_i(G\cdot m),\ \cdots, H_i(G\cdot m+G-1)]^T\\
&\quad\odot\boldsymbol{\alpha}(\delta_i)e^{-j2\pi\delta_i Gm/N}\\
\boldsymbol{\alpha}(\delta_i)&=[1, e^{-j2\pi\delta_i/N},\ \cdots, e^{-j2\pi\delta_i(G-1)/N}]^T
\end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\overline{\boldsymbol{H}}_i(m)$은 심볼 옵셋을 포함하지 않은 i번째 송신단과 수신단의 채널 응답을 나타내고, $\boldsymbol{\alpha}(\delta_i)$는 심볼 타이밍 옵셋 δ_i에 의한 위상회전을 나타낸다. 그리고 N은 전체 부반송파수를 나타내고 G는 한 자원을 구성하는 부반송파 수를 나타내며, M은 한 심볼을 구성하는 자원을 수로 $M=N/G$의 관계를 갖는다. 또한 $\odot$은 Hardmard 곱을 나타낸다. 여기서 m번째 자원으로 구성된 수신신호 벡터를 G개의 다중 수신안테나를 갖는 스마트 안테나로 간주하여 기존의 스마트 안테나 DoA 추정기법 및 빔 형성 기법을 유사하게 적용할 수 있다. SRB(Spatial Reference based BF) 기반의 스마트 안테나 기법은 다중 수신안테나의 채널이 동일한 경우를 가정하므로 가상 스마트 안테나 기법에서도 상관이 1에 근접한 채널로 구성된 자원을 구성하기 위하여 한 자원의 부반송파를 식 (2)와 같이 인접한 부반송파(클러스터 타입)로 구성한다. 식 (2)를 이용하여 MUSIC 기법, Delay and Sum 기법 등을 적용하여 간섭신호의 제거가 가능하며, 위 기법들의 자세한

www.dbpia.co.kr

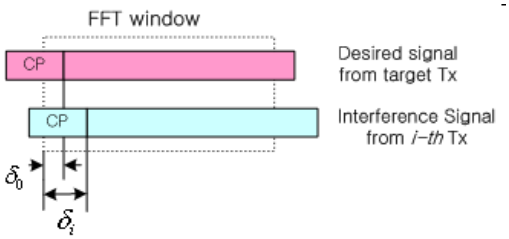


그림 1. 두개의 인접 기지국에서 동시에 수신된 신호
Fig. 1. The received signal form target and interference BS at cell boundary

적용방법은 [2]를 참고한다.

2.2 가상 다중 안테나 기법

그림 2는 가상 다중안테나 기법의 개념을 보여주고 있다. 주파수 영역에서 G개의 부채널을 수신단에서 G개의 수신 안테나를 사용한 경우로 가정하여 개의 부채널로 구성된 채널을 이용하여 신호를 송수신 하는 것을 보여준다. B개의 송신신호를 가정할 때, OFDM 기반의 셀룰러 시스템에서 수신단에 수신되는 m번째 자원의 OFDM 신호 $\boldsymbol{Y}(m)$은 다음과 같이 주어진다[3].

$$\boldsymbol{Y}(m)=\tilde{\boldsymbol{H}}(m)\boldsymbol{X}(m)+\boldsymbol{N_w}(m), m\in\{0,1,\cdots,M-1\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{Y}(m)&=[Y(J_{m1}),Y(J_{m2}),\cdots,Y(J_{mG})]^T\\
\tilde{\boldsymbol{H}}(m)&=[\tilde{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{1}}(m),\tilde{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{2}}(m),\cdots,\tilde{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{B}}(m)]\\
\boldsymbol{X}(m)&=[\tilde{X}_1(m),\tilde{X}_2(m),\cdots,\tilde{X}_B(m)]^T\\
\boldsymbol{N_w}(m)&=[N_w(J_{m1}),N_w(J_{m2}),\cdots,N_w(J_{mG})]^T\\
\tilde{\boldsymbol{H}}_{\boldsymbol{i}}(m)&=[H_i(J_{m1}),H_i(J_{m2}),\cdots,H_i(J_{mG})]^T
\end{aligned} \quad (4)$$

여기서 m은 자원 인덱스를 나타내며, J_{mg}는 m번째 자원의 g번째 부반송파 위치를 나타낸다. 또한 $\tilde{\boldsymbol{H}}_i(m)$은 i번째 송신단과 수신단의 m번째 자원인덱스로 이루어진 채널응답을 나타내고 $\tilde{X}_i(m)$은 i번째 송신단에서 m번째 자원에 송신한 신호를 나타낸다. 자원할당 방식은 J_{mg}의 값에 따라 블록 타입, 인터리브드 타입, 블록 랜덤타입이 가능하며, 그림 3은 블록 타입, 인터리브드 타입, 블록 랜덤 타입의 자원할당 방식을 나타내고 있다. 다음은 각 자원할당 방식의 부반송파 위치 J_{mg}을 나타내고 있다.

$$\boldsymbol{J}_{mg}=G\cdot m+g-1 \quad (5)$$

$$\boldsymbol{J}_{mg}=M\cdot(g-1)+m \quad (6)$$

$$\boldsymbol{J}_{mg}=M\cdot(g-1)+Permut(m,g) \quad (7)$$

여기서 $Permut(m,g)$는 0부터 $m-1$까지의 랜덤 순열 중 m번째 랜덤순열의 g번째 값을 나타낸다. 식 (5), (6), (7)는 각각 블록 타입, 인터리브드 타입, 블록 랜덤타입의 부반송파 위치를 나타낸다. 블록타입의 경우 어레이 이득을 얻을 수 있고, 인터리브드 타입과 블록 랜덤타입의 경우 $\tilde{\boldsymbol{H}}_i(m)$의 채널벡터가 랜덤한 채널응답으로 구성되므로 다이버시티 이득을 추가로 얻을 수 있다. m번째 자원의 i번째 송신단과 수신단 사이에 형성된 채널 응답인 $\tilde{\boldsymbol{H}}_i(m)$벡터가 할당된 자원간 독립적이고, 여러 송신단과 수신단 사이에 형성된 채널이 독립적일 경우 기존 다중안테나 기법을 적용하여 간섭 신호의 제거 또는 동시 복조가 가능하다. 다중안테나 기법은 선형기법인 LS(Least Square), MMSE(Minimum Mean Square Error) 기법과 비선형기법인 SIC(Successive Interference Cancellation) ML(Maximum Likelihood) 기법 등을 적용할 수 있다. 다음은 LS 기법과 ML 기법을 적용한 경우의 결과를 보여준다[4].

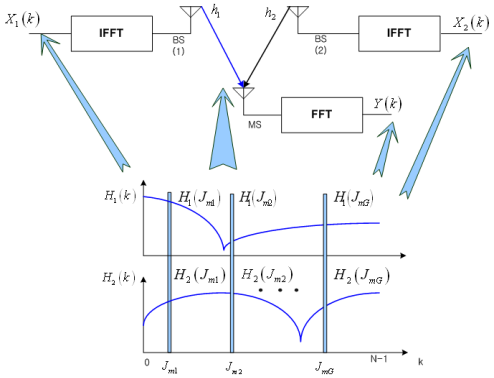


그림 2. 부반송파 기반 가상 다중 안테나 시스템 개념도
Fig. 2. The concept of subcarrier-based virtual multiple antenna system.

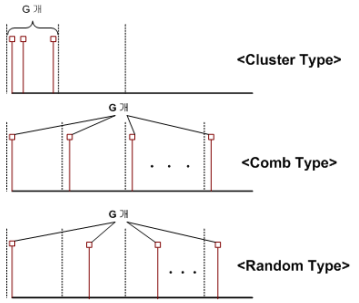


그림 3. OFDM 시스템의 자원할당 방식
Fig. 3. Three type of resource allocation method

www.dbpia.co.kr

$$\hat{\boldsymbol{X}}(m) = (\bar{\boldsymbol{H}}(m)^H \bar{\boldsymbol{H}}(m))^{-1} \bar{\boldsymbol{H}}(m)^H \boldsymbol{Y}(m) \quad (8)$$

$$\hat{\boldsymbol{X}}(m) = arg \min_{\overline{\boldsymbol{X}}(m)} (\sum_{g=1}^{G} |Y(J_{mg}) - \sum_{i=1}^{N_r} H_i(J_{mg}) \overline{X_i}(m)|^2) \quad (9)$$

여기서 $\boldsymbol{H}^H$는 Hermitian Transpose를 나타낸다. 식 (8), (9)는 ZF, ML 복조기법을 각각 나타낸다. 여기서 송수신단의 거리차이에 따라 발생되는 심볼 타이밍 옵셋이 다른 경우에도 기지국에서 채널 추정 시 심볼 옵셋에 의한 위상회전 성분까지 포함하게 되어 인접 기지국의 심볼 타이밍 옵셋에 의한 성능열화가 발생되지 않는다. 또한 [3]에서와 동일하게 VSR(Virtual Signature Randomizer) 블록을 적용할 수 있다. 채널응답 행렬에 상관성이 있는 경우 최대의 다이버시티 이득을 얻지 못하거나 다중 사용자의 간섭 신호를 효과적으로 제거하지 못하게 되지만, VSR 블록을 적용하는 경우 송신단에서 독립적인 가중치를 곱하여 물리적 채널응답을 가중치가 곱해진 채널응답으로 간주하여 수신단에서 더 효과적으로 간섭신호를 제거할 수 있다.

2.3 MIMO 환경에서 가상 다중 안테나 기법

고속 데이터 전송 시 요구되는 높은 Link Budget을 해결하기 위하여 송수신단에 다중안테나를 사용함으로써 송신 안테나마다 다른 신호를 전송하여 전송속도를 크게 향상시키는 MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 1998년에 제안된 V-BLAST 기법은 송신단에서 다중안테나를 이용하여 독립적인 신호를 전송하고 수신단에 다중안테나를 사용하여 신호를 검출한다[5]. 이때 수신단의 안테나 수가 송신단보다 같거나 많은 경우 신호의 복조가 가능하다. 하지만 간섭신호가 존재할 경우 간섭신호를 제거하기 위하여 수신단에서는 (각 송신단의 송신안테나 수 × 간섭 신호의 수) 만큼의 수신안테나가 필요하게 된다. 이 경우 가상 다중 안테나 기법을 적용하여 한 자원의 부반송파 수 G가 간섭의 수 보다 크거나 같을 경우에는 수신단의 다중안테나 수를 증가시키지 않아도 간섭의 효과적인 제거가 가능하게 된다.

본 절에서는 여러 개의 송신단에서 다중안테나를 사용하고 수신단에서 또한 다중안테나를 사용하는 경우에 가상 다중 안테나 기법을 적용하는 방법을 살펴본다. 각 송신단에서 T개의 다중 안테나를 사용하고 수신단에서 R개의 다중안테나를 사용하며 B개의 간섭신호가 존재할 때 m번째 자원의 수신신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{Y}(m) = \bar{\boldsymbol{H}}(m)\boldsymbol{X}(m) + \boldsymbol{N_w}(m), m \in \{0,1,\cdots,M-1\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
\boldsymbol{Y}(m) &= [Y_1(J_{m1}),\cdots, Y_1(J_{mG}),\cdots, \\
&\quad Y_R(J_{m1}),\cdots, Y_R(J_{mG})]^T \\
\bar{\boldsymbol{H}}(m) &= [\bar{\boldsymbol{H}}_{1,1}(m),\cdots,\bar{\boldsymbol{H}}_{B,1}(m),\cdots, \\
&\quad \bar{\boldsymbol{H}}_{1,T}(m),\cdots,\bar{\boldsymbol{H}}_{B,T}(m)] \\
\boldsymbol{X}(m) &= [\bar{X}_{1,1}(m),\cdots ,\bar{X}_{B,1}(m),\cdots, \\
&\quad \bar{X}_{1,T}(m),\cdots,\bar{X}_{B,T}(m)]^T \\
\boldsymbol{N_w}(m) &= [N_{w,1}(J_{m1}),\cdots ,N_{w,1}(J_{mG}),\cdots, \\
&\quad N_{w,R}(J_{m1}),\cdots,N_{w,R}(J_{mG})]^T \\
\bar{\boldsymbol{H}}_{b,t}(m) &= [H_{b,t,1}(J_{m1}),\cdots ,H_{b,t,1}(J_{mG}),\cdots, \\
&\quad H_{b,t,R}(J_{m1}),\cdots,H_{b,t,R}(J_{mG})]^T
\end{aligned} \quad (11)$$

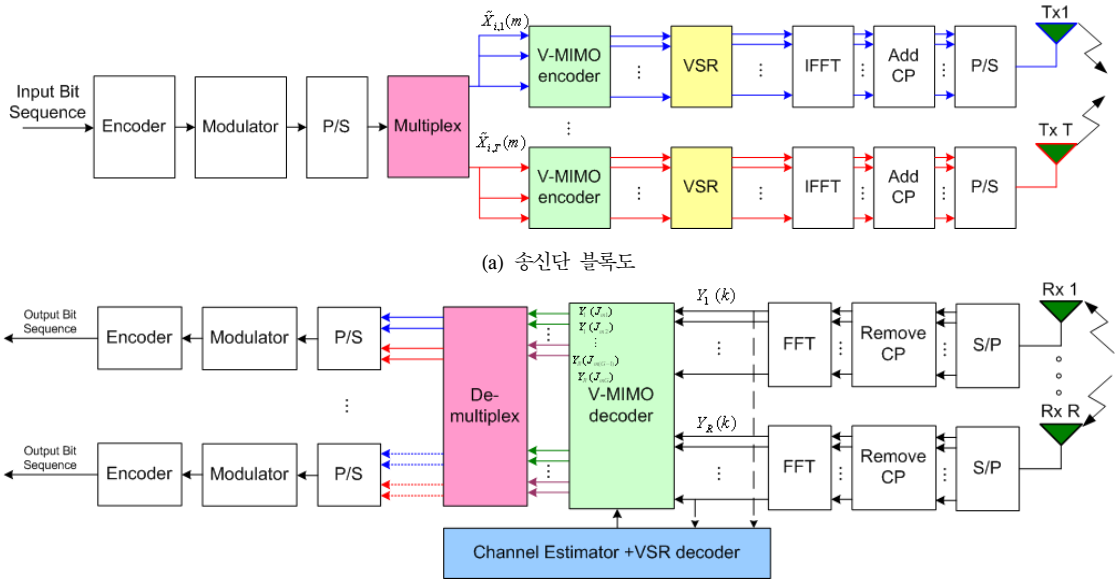
여기서 $Y_i(J_{mg})$는 i번째 수신안테나의 m번째 자원과 g번째 부반송파에 수신된 신호를 나타내며, $\bar{X}_{b,t}(m)$는 b번째 송신단의 t번째 안테나에서 송신한 m번째 자원의 신호를 나타낸다. 그리고 $H_{b,t,r}(J_{mg})$는 b번째 송신단의 t번째 송신안테나와 수신단의 r번째 수신안테나 사이에 형성된 m번째 자원의 g번째 부반송파의 채널응답을 나타낸다. 식 (10)에서 각 송신안테나와 각 송신단에서의 자원할당은 동일한 방식으로 이루어져야 한다. $\bar{\boldsymbol{H}}(m)$ 행렬은 $(R\times G)\times(B\times T)$로 구성되며 송·수신단에서 단일안테나를 사용하는 경우와 유사하게 선형, 비선형 검출방식을 이용하여 신호를 복조할 수 있다. 이 경우 다이버시티 차수 (Diversity Order)는 $(R\times G)-(B\times T)+1$로 주어진다. 송신안테나 수$(T)$와 수신안테나 수$(R)$가 동일한 경우 한 자원의 부반송파 수$(G)$가 간섭의 수$(B)$ 보다 큰 경우에는 다이버시티 차수가 증가되며 동일한 경우에는 이득이 없게 된다. MIMO 환경에서도 앞 절에서 기술한 VSR 코드를 적용하여 가상 다중 안테나 기법의 성능을 증가시킬 수 있다. VSR 코드는 한 송신단의 모든 송신안테나에 동일한 코드를 적용한다.

그림 4는 MIMO환경에서 가상 다중 안테나 기법의 송·수신단 블록도를 보여준다. 송신단의 송신안테나 마다 동일한 자원인덱스를 이용하여 가상 다중 안테나 변조를 수행하고 VSR 블록을 적용하는 것을 볼 수 있다.

Ⅲ. 부반송파 기반의 가상 다중 안테나 기법에서의 SDMA

SDMA(Spatial Division Multiple Access) 기술

www.dbpia.co.kr



(a) 송신단 블록도

(b) 수신단 블록도

그림 4. MIMO 환경에서의 가상 다중 안테나 기법 블록도
Fig. 4. The block diagram of subcarrier-based vurtual multiple antenna system at MIMO

은 다중 안테나를 갖는 기지국에서 같은 시간 슬롯에 동일 주파수 대역을 사용하는 다중 사용자의 독특한 Spatial Signature를 이용하여 다중 사용자를 구별하는 기술로써, 주파수 자원을 증가 시키지 않고 다중 안테나를 사용하는 것 만으로 주파수 효율을 높일 수 있으며 시스템의 용량을 증가시킬 수 있다. SDMA 기법과 OFDM 방식을 결합한 OFDM/SDMA 기법은 각 방식의 장점을 결합할 수 있으며, 높은 용량을 요구하는 시스템에 적용할 수 있다. OFDM에 SDMA를 적용하는 경우 주파수 영역에서 부반송파 마다 SDMA를 수행할 수 있다. 하지만 다중 수신 안테나를 갖는 환경에서 SDMA 기법을 적용할 수 있다는 제약이 있다.

본 논문에서 제안하는 가상 다중 안테나 기법은 단일 안테나 환경 (또는 다중 안테나 환경)에서도 SDMA 기법을 적용할 수 있는 장점이 있다. 본 장에서는 셀룰러 환경에서 기지국에 가상 다중 안테나 기법을 적용하여 SDMA를 수행하는 방법에 대하여 살펴본다. 그림 5는 사용자가 B명인 셀룰러 환경에서 상향링크와 하향링크를 보여준다.

3.1 가상 다중 안테나 기법을 적용한 상향링크 SDMA 기법

그림 5와 같은 셀룰러 환경에서는 Ⅱ장에서 기술한 송신단과 수신단은 단말과 기지국으로 간주할 수 있다. 기지국에서 단일안테나를 사용하거나 기지국과 단말 모두 다중안테나를 사용하는 경우 가상 다중 안테나 기법을 적용하여 SDMA를 수행한다. 다중 안테나 기법의 한 자원의 부반송파 수(G)가 다중사용자 수(U)보다 크거나 같을 경우 2장에서 살펴본 것과 같이 신호의 동시 복조가 가능하므로 SDMA 기법을 적용할 수 있다. 또한 VSR 코드는 사용자마다 다른 코드를 사용하며 셀내 다중 사용자는 동일하게 자원을 할당받아야 한다.

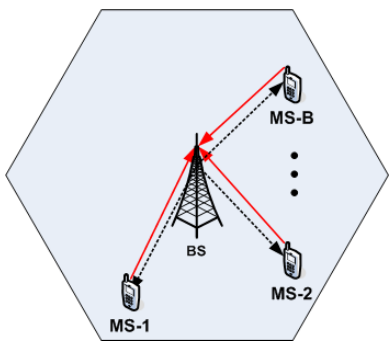


그림 5. 부반송파 기반의 가상 다중안테나 기법을 이용한 SDMA
Fig. 5. SDMA using subcarrier-based virtual multiple antenna.

www.dbpia.co.kr

3.2 가상 스마트 안테나 기법을 적용한 상향링크 SDMA 기법

가상 스마트 안테나 기법을 적용한 SDMA 기법 역시 Ⅱ장에서 기술한 바와 같이 가상 스마트안테나 기법을 적용한 기법으로 송신단과 수신단은 여러 개의 단말과 기지국으로 구성된다. 셀내 심볼동기를 맞추지 않을 경우 다중 사용자의 송신신호가 기지국에 도달하는 시간은 다르게 되며 전파지연에 의해 발생된 다른 심볼 옵셋값을 이용하여 가상 스마트안테나 기법을 적용할 수 있다. 가상 스마트 안테나 기법 또한 한 자원의 부반송파수가 다중 사용자수보다 크거나 같을 경우 적용이 가능하며 각 사용자에 해당하는 가중치벡터를 이용하여 SDMA를 수행한다.

3.3 가상 다중 안테나 기법을 적용한 하향링크 SDMA 기법

하향링크의 경우 기지국에서 가상 다중 안테나 기법을 적용하기 위해서는 각 사용자의 채널정보를 이용하여 precoding이 이루어져야 한다. 그림 6은 하향링크의 경우 기지국에서 수행되는 precoding 블록도를 나타내고 있다. 각 자원별로 precoding을 수행하여 신호를 전송하는 것을 보여준다. 여기서 m 번째 자원의 precoding 행렬 $\boldsymbol{F}(m)$은 다음과 같이 주어진다.

$$\boldsymbol{F}(m)=\begin{cases}(\widetilde{\boldsymbol{H}^{T}}(m))^{+} & \text{if } U<G\\ (\widetilde{\boldsymbol{H}^{T}}(m))^{-1} & \text{if } U=G\end{cases} \tag{12}$$

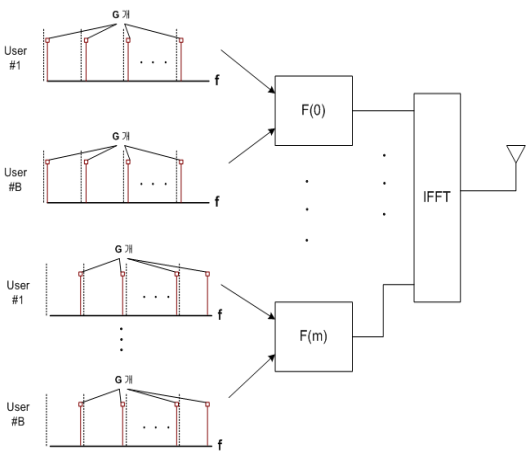


그림 6. 가상 다중안테나 기법을 적용한 하향링크 블록도
Fig. 6. The block diagram of downlink employing subcarrier-based virtual multiple antenna.

$\boldsymbol{F}(m)$의 precoding 행렬을 이용하여 precoding 된 송신신호 $\boldsymbol{Z}(m)$은 다음과 같이 주어진다.

$$\boldsymbol{Z}(m)=\boldsymbol{F}(m)\boldsymbol{X}(m) \tag{13}$$

여기서

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Z}(m)&=[\ Z(J_{m1}),\ \cdots,\ Z(J_{mG})\ ]^{T}\\ \boldsymbol{X}(m)&=[\ X_{1}(m),\ \cdots,\ X_{U}(m)\ ]^{T}\end{aligned} \tag{14}$$

식 (12)는 채널행렬의 역행렬을 이용한 precoding의 예로 MIMO 환경에서 개발된 기존의 precoding 기법인 DPC(Dirty Paper coding), vector precoding 기법 등 많은 기법의 적용이 가능하다[4].

Ⅳ. 부반송파 기반의 가상 다중 안테나 기법에서의 ICI 제거기법

주파수 재 사용률이 1인 셀룰러 환경에서 단말이 셀 경계지역에 있을 때 인접 셀에서 수신된 신호의 간섭에 의해 단말의 수신 성능이 크게 열화된다. 셀간 간섭 회피기법, 간섭 제거기법, 간섭 평균기법 등 많은 연구가 수행되었지만 셀간 간섭 회피기법의 경우 인접 셀의 자원할당 상황을 실시간으로 기지국에서 알고 있어야 하기 때문에 셀룰러환경에서 적용하기 어려운 단점이 있으며, 셀간 간섭 평균기법인 랜덤 자원할당방식에 FEC coding을 적용하는 방법 또한 주파수 재 사용률이 1인 환경에서 모든 자원에 충돌이 발생하기 때문에 원하는 성능을 기대하기 어렵다. 그리고 MC-CDMA 기법을 적용한 셀간 간섭 제거기법의 경우 셀간 심볼옵셋, 반송파 옵셋 등 동기에 민감하다는 단점이 있다. 하지만 본 논문에서 기술한 가상 다중 안테나 기법의 적용 시 단말이 셀 경계지역에 존재하는 경우에도 인접 셀의 간섭신호를 효과적으로 제거할 수 있다. 그림 7은 셀룰러 환경에서 인접 셀에서 수신되는 간섭신호를 보여준다.

4.1 가상 다중 안테나 기법을 적용한 하향링크 ICI 제거 기법

이 기법은 단말이 셀 경계지역에 있는 경우 단말에서 가상 다중 안테나 기법을 적용하여 인접셀의 간섭신호를 제거하거나 빠른 핸드오프를 위하여 동시 복조를 수행하는 방법이다. 이 경우 Ⅱ장에서 기술한 송신단과 수신단은 다중 기지국과 단말로 구성되며 한 자원의 부반송파 수(G)가 인접기지국의

www.dbpia.co.kr

수($B-1$) 보다 크거나 같은 경우 단말에서 단일 수신안테나 또는 다중 안테나를 사용하고 가상 다중 안테나 기법을 적용하여 효과적으로 인접 셀의 간섭신호의 제거가 가능하다. 이 경우 셀간 자원할당 방식이 동일해야 하며 VSR 코드는 셀마다 할당된 코드를 사용한다.

4.2 가상 스마트 안테나 기법을 적용한 하향링크 ICI 제거 기법

단말이 셀 경계지역에 있는 경우 단말에 수신되는 타겟 기지국과 간섭 기지국의 신호는 심볼 옵셋이 발생하게 된다. 이 경우 셀 경계지역에 있는 단말은 Ⅱ장에서 기술한 가상 스마트 안테나 기법을 적용하여 인접셀의 간섭을 제거할 수 있다. 이때 Ⅱ장에서의 송신단은 기지국이 되고 수신단은 단말이 되며 인접 기지국의 수($B-1$)가 한 자원의 부반송파 수(G) 보다 작거나 같은 경우에 간섭 신호의 제거가 가능하다.

4.3 가상 다중 안테나 기법을 적용한 상향링크 ICI 제거 기법

이 기법은 상향링크의 경우 기지국에서 인접 셀에 속한 단말의 간섭신호를 제거하는 기법으로 Ⅲ장에서 SDMA 기법과 유사하다. 기지국에서는 인접셀의 간섭신호를 고려하여 셀 경계지역에 충분히 적은 사용자를 같은 자원에 할당하여 SDMA를 수행한다. 이때 인접 기지국에서도 셀 경계에 위치한 사용자를 동일한 자원으로 할당한다. 셀 경계지역에 동일자원에 할당된 사용자의 총 수를 B라고 할 때 한 자원의 부반송파 수 G 가 B보다 크거나 같은 경우 SDMA 기법과 유사하게 인접 셀에서의 간섭신호의 효과적인 제거가 가능해진다. 여기서 VSR 코드는 단말별로 할당된다.

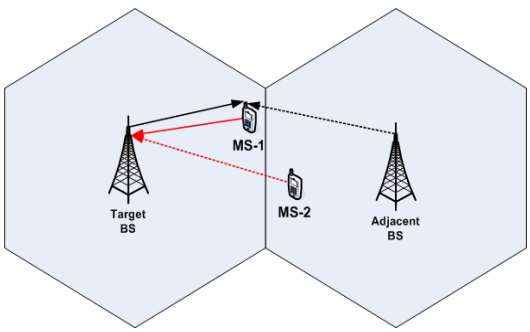


그림 7. 셀룰러 환경에서 인접 셀간의 간섭
Fig. 7. Inter-cell interference at cellular system

4.4 가상 스마트 안테나 기법을 적용한 상향링크 ICI 제거 기법

그림 7에서와 같이 인접셀에 속한 사용자의 송신신호는 타겟 기지국까지의 전달지연이 더 크게 발생되며 이때 발생되는 단말간의 심볼 옵셋 차이를 이용하여 Ⅱ장에서 기술한 가상 스마트 안테나 기법의 적용이 가능하다. Ⅲ장에서 셀내 사용자간 SDMA를 수행하기 위해 사용자간 타이밍 동기가 이루어지지 않아야하는 제약이 있었지만 인접 셀 단말의 경우 타이밍 동기를 인접 셀의 기지국과 맞추기 때문에 ICI 기법에서는 SDMA와 같은 제약조건이 없다. 본 환경에서도 셀 경계지역에서 동일한 자원을 할당받은 총 사용자의 수(B)가 한 자원의 부반송파 수(G)보다 작거나 같을 경우 효과적인 간섭신호의 제거가 가능하다.

Ⅴ. 모의실험

본 논문에서 제안된 부반송파 기반 가상 수신안테나 기법의 성능을 분석하기 위해 Ⅲ장과 Ⅳ장에서 기술한 환경에서 모의실험을 수행하였다. 시스템 파라미터는 QPSK 변조, 1024 FFT, 256 CP, 2.3GHz 대역에 10MHz의 대역폭을 가정하였다. 또한 간섭신호 혹은 SDMA의 다중 사용자의 신호의 크기는 타겟 신호의 크기와 같은 경우를 가정하였다.

그림 8은 셀 경계지역에서 간섭신호 제거 성능을 분석하기 위하여 본 논문에서 기술한 가상 다중 안테나 기법 (V-MU-MIMO)과 인접셀간 직교 코드를 할당한 MC-CDMA 기법의 성능을 보여준다. 여기서 G는 4인 경우를 가정하였고, MC-CDMA에서는 길이가 4인 Walsh 코드를 이용하였으며 SDMA 동시 사용자가 한명인 경우를 가정하였다. 또한 ITU-PA (Pedestrian A) 채널상황을 가정하였다. 여기서 δ_{diff}는 간섭기지국과 타겟 기지국의 전체 부반송파 수로 정규화된 심볼 옵셋 차이를 나타낸다. δ_{diff} 값이 커짐에 따라 MC-CDMA 기법의 성능이 급격히 열화되는 것을 볼 수 있다. 이는 심볼 옵셋에 의한 위상회전으로 코드간의 직교성이 사라지기 때문에 심볼 옵셋이 발생됨에 따라 간섭신호의 제거가 불가하기 때문이다. 하지만 가상 다중 안테나 기법에서는 채널 추정 시 심볼 옵셋에 의한 위상회전 성분까지 추정되기 때문에 심볼 옵셋의 차이에 의한 성능열화가 발생되지 않음을 확인할 수 있다. 여기서 가상 다중 안테나 기법의 자원할당은 랜덤 타입을 사용했으며, MC-CDMA 기법의 자원할당은

www.dbpia.co.kr

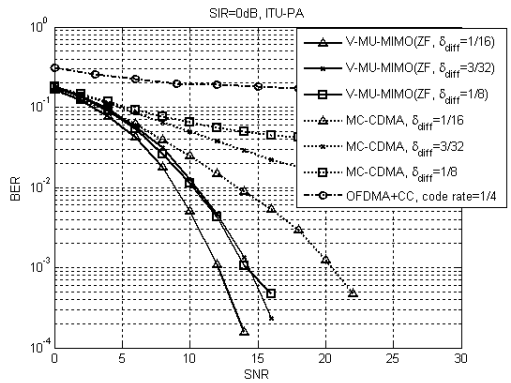


그림 8. 가상 다중 안테나 기법을 이용한 상향링크 SDMA 기법
Fig. 8. The simulation result of uplink SDMA method using subcarrier-based virtual multiple antenna

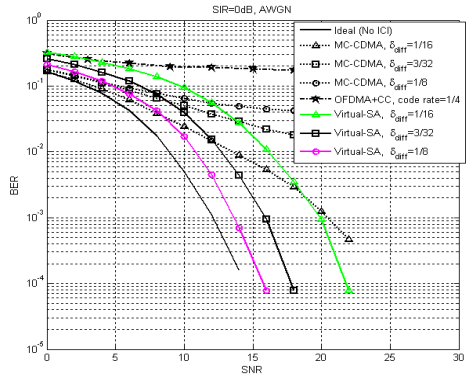


그림 9. 가상 스마트 안테나 기법을 이용한 하향링크 ICI 제거 기법
Fig. 9. The simulation result of downlink ICI cancellation method usign virtual smart antenna

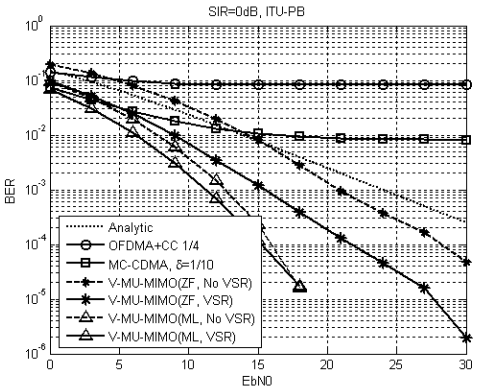


그림 10. 가상 다중 안테나 기법을 이용한 하향링크 ICI 제거 기법
Fig. 10. The simulation result of downlink ICI cancellation method usign subcarrier-based virtual multiple antenna

클러스터 타입을 가정하였다. MC-CDMA 기법에서 랜덤타입으로 자원을 할당하게 되면 채널의 영향에 의해 코드의 직교성이 더 왜곡되기 때문에 성능이 더욱 열화된다. 본 모의실험에서 가정한 모든 기법의 데이터 전송율은 동일한 경우이다.

그림 9는 가상 스마트 안테나 기법과 MC-CDMA 기법, 그리고 convolutional coding과 랜덤 자원할당 방식을 이용한 기법의 성능을 비교하여 보여준다. Convolutional code의 code rate는 $1/4$을 가정하였고 AWGN 채널환경을 가정하였다. MC-CDMA 기법의 성능은 그림 8에서의 결과와 유사하며 convolutional code기법을 이용한 경우 인접 셀에서 주파수 재 사용률이 1인 경우에는 모든 자원에서 충돌이 발생하기 때문에 코딩에 의한 성능이득이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 가상 스마트 안테나 기법을 적용한 경우 δ_{diff}가 커짐에 따라 성능이 우수하게 나타나는 것을 알 수 있다. δ_{diff}가 $1/8$인 경우 이상적인 BER 곡선에서 약 $3dB$정도 성능열화가 발생되지만, $1/16$인 경우에는 $9dB$정도의 성능열화가 발생되는 것을 볼 수 있다. 이는 자원의 수가 4인 경우를 가정하였기 때문에 심볼 옵셋에 따른 빔 폭이 커서 심볼 옵셋 차이가 커질수록 효과적으로 간섭신호를 제거하기 때문이다.

그림 10은 가상 다중 안테나 기법의 VSR 코드에 따른 ICI 제거 기법의 성능을 보여준다. 여기서 TU-PB(Pedestrian B) 채널상황을 가정하였고, 간섭이 한명인 경우를 가정하였다. Convolutional coding 기법과 MC-CDMA 기법의 경우 위에서 설명한 것과 같은 이유로 error floor 현상이 발생되며, VSR 코드를 적용한 경우 ML 기법을 적용하면 그 성능이득이 크지 않지만 ZF 기법을 적용하는 경우 $6dB$ 이상의 성능이득이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 가상 다중 안테나 기법의 성능은 모두 SISO 환경에서의 이상적인 BER 성능보다 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 가상 다중 안테나 기법 적용에 따른 다이버시티 이득이 발생하기 때문이다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 부반송파 기반 가상 다중안테나 기법을 제안하고 셀룰러 환경에서 가상 다중 안테나 기법의 적용 방법에 대하여 살펴보았다. 부반송파 기반 가상 다중안테나 기법은 OFDM의 부반송파를 가상의 다중 수신안테나로 간주하여 수신 안

www.dbpia.co.kr

테나가 하나인 경우에도 다중 안테나 기법을 적용하는 것으로 특히 간섭이 존재하는 셀 경계지역에서 우수한 성능을 나타낸다. 부반송파 기반 가상 다중 안테나 기법은 다중 안테나 기법을 적용한 가상 다중 안테나 기법과 스마트 안테나 기법을 적용한 가상 스마트 안테나 기법으로 나뉘며 가상 다중 안테나 기법은 자원의 할당에 따라 다이버시티 이득까지 추가적으로 얻을 수 있는 기법이다. 제안된 기법은 셀 경계지역에서 동일한 전송률을 갖는 기존의 간섭 제거기법 보다 성능이 크게 우수함을 확인하였다. 또한 부반송파 기반 가상 다중 안테나 기법은 간섭의 양에 따라 그룹크기를 조절할 수 있어 유동성 있는 적용이 가능하며 심볼 옵셋 등 동기 오차에 강건한 방법이다.

참 고 문 헌

〔1〕 J. G. Andrews, "Interference cancellation for cellular systems: a contemporary overview," *IEEE Wireless Commun. Magazine,* vol. 12, pp. 19-29, Apr. 2005.

〔2〕 K. W. Park, K. I. Lee, J. Y. Ahn, and Y. S. Cho., "An Intercell Interference Cancellation Method for OFDM-Based Cellular Systems Using a Virtual Smart Antenna," *Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC2005)*, Sep. 2005.

〔3〕 K. I. Lee, H. S. J. Y. Ahn, and Y. S. Cho., "An Inter-cell Interference Cancellation Method for OFDM-based Cellular Systems Using a Virtual MIMO," *VTC 2006-Fall*, Sep. 2006.

〔4〕 P. Vandenameele, L. V. D. Perre, and M. Engels, *Space Divsion Multiple Access for Wireless Local Area Networks, Boston*: Kluwer Academic Publishers, 2001.

〔5〕 A. F. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Applications of space-time block codes and interference suppression for high capacity and high data rate wireless systems," *in Proc. 32nd Asilomar Conf. Signals, Systems, and Computers,* vol. 2, pp. 1803-1810, Nov. 1998.

〔6〕 P. W. Wolniansky, C. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecutre for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," *Proc. IEEE ISSSE-98*, pp. 295-300, Sept. 1998.

이 규 인 (Kyu In Lee) 정회원

2001년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업

2003년 2월 중앙대학교 대학원 전자전기공학부 졸업

2003년 3월~현재 중앙대학교 대학원 전자전기공학부 박사과정

<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, OFDM, MIMO

고 현 수 (Hyun Soo Ko) 정회원

2004년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업

2006년 2월 중앙대학교 대학원 전자전기공학부 졸업

2006년 3월~현재 LG전자 연구원

<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, OFDM, MIMO

우 경 수 (Kyung Soo Woo) 정회원

2004년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업

2006년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 석사

2006년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정

<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, OFDM, MIMO

고 요 한 (Yo-han Ko) 준회원

2005년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업

2005년 3월~현재 중앙대학교 대학원 전자전기공학부 석사과정

<관심분야> 디지털통신, 이동통신, OFDM, MIMO

www.dbpia.co.kr

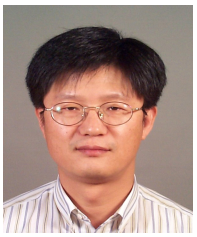
김 영 준 (Yeong Jun Kim) 준회원

2005년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업

1994년 2월~현재 중앙대학교 대학원 전자전기 공학부 석사과정

<관심분야> 디지털통신, 무선 모뎀, OFDM MIMO

안 재 영 (Jae Yong Ahn) 정회원



1983년 연세대학교 전기공학과 학사 졸업

1985년 연세대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업

1989년 연세대학교 대학원 전기공학과 박사 졸업

1989년 3월~현재 한국전자통신연구원 이동통신 연구단 차세대 무선전송연구팀 팀장

<관심분야> 디지털 무선전송, 무선 MAC 프로토콜, 이동통신 네트워크

조 용 수 (Yong Soo Cho) 종신회원

1984년 2월 중앙대학교 전자공학과 졸업(학사)

1987년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업 (석사)

1991년 2월 The University of Texas at Austin 공학박사

1992년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학과 교수

2003년 8월~현재 TTA 휴대인터넷 프로젝트 그룹(PG302) 무선접속 실무반 의장

<관심분야> 디지털통신, OFDM 모뎀 설계, MIMO-OFDM 모뎀

www.dbpia.co.kr