

다중 셀 다중 안테나 하향링크 채널에서의 간섭 정렬 송수신기 설계

이 현 호*, 고 영 채^o

Design on the Interference Alignment Transceiver for Multi-Cell MIMO Downlink Channels

Hyun-Ho Lee*, Young-Chai Ko^o

요 약

본 논문에서는 임의의 셀 수 혹은 셀 당 임의의 사용자 수를 가지는 다중 셀 다중 안테나 하향링크 채널에 적용 가능한 간섭 정렬 기반 송수신기 설계를 제안한다. 타 셀로부터 오는 간섭 신호를 유효 타 셀 간섭 채널로 정렬시키는 수신 빔포머를 설계한 후, 해당 기지국으로부터 야기되는 모든 간섭 신호를 제거할 수 있는 송신 프리코더를 설계한다. 제안된 송수신기 설계는 사용자 당 전송하는 데이터 스트림 수 만큼의 자유도를 획득할 수 있고 이를 위한 안테나 조건을 구한다. 모의 실험 결과를 통하여 기지국과 사용자의 안테나 수가 동일한 조건 하에서 제안된 송수신기 설계가 기존의 기법보다 높은 자유도를 얻음을 확인한다.

Key Words : interference alignment, MIMO, 간섭 정렬, 하향링크 네트워크

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel interference alignment transceiver for multi-cell MIMO downlink channels with arbitrary number of cells and users per cell. We design the receive beamformer to align the interference from undesired base stations to the effective inter-cell interference (ICI) channels. Subsequently, we design the transmit precoder which can nullify the interference from the corresponding base station. The proposed transceiver design can attain the degrees of freedom (DOF) equal to the number of streams per user. Accordingly, we investigate conditions for the antenna configuration. From numerical results, we confirm that the proposed transceiver design can achieve higher DOF than the conventional scheme under equal antenna configuration.

I. 서 론

다중 셀룰러 하향링크 네트워크에서는 무선 자원의 효율성을 극대화시키기 위하여 동일한 무선 자원 (시간, 주파수, 혹은 코드)을 활용하여 각 기지국이 다수의 사용자들에게 동시에 신호를 전송하기 때문에 셀 내의 사용자 간 간섭 신호 (inter-user

interference, IUI) 뿐만 아니라 타 셀의 기지국으로부터의 간섭 신호 (inter-cell interference, ICI)의 영향으로 인해 전체 네트워크의 성능이 크게 악화될 수 있다. 다중 셀룰러 하향링크 네트워크에서의 전송률을 향상시키기 위해, 완벽한 채널 정보 및 메시지를 각 기지국이 공유하는 협력 다중 셀 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다¹⁻⁶⁾. 하지만,

※ 본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2012-004494)

• 주저자 : 고려대학교 전자전기공학과 통신시스템 연구실, hh2432@korea.ac.kr, 정회원

o 교신저자 : 고려대학교 전자전기공학과 통신시스템 연구실, koyc@korea.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-08-349, 접수일자 : 2012년 8월 3일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 8일

이 같은 연구들은 기지국 간의 협력을 필요로 하기 때문에 막대한 양의 백홀 인프라가 구축되어야 하기 때문에 실제 구현에 있어서 바람직하지 않다.

다중 사용자 간섭 채널 혹은 무선 X 채널에서 간섭 신호들을 확보 가능한 신호 공간 중 일부의 부분 공간에 제한함으로써 원하는 신호를 위한 공간을 확보하는 간섭 정렬 (interference alignment) 기법에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있다^[7-9]. 최근에는 이러한 간섭 정렬 기법을 활용하여 다중 셀 다중 안테나 하향링크 채널에서 자유도를 향상시키는 방안에 대한 연구가 이루어졌다^[10-12]. 하지만, 이들 연구는 2개의 셀 구조에 한정되어 있거나^[10], 최적의 자유도를 획득하기 위한 구체적인 송수신기 설계에 대해서 언급하지 않았으며^[11], 셀 당 사용자의 수가 2명으로 제한되어 있는 한계점을 가지고 있다^[12].

본 논문에서는 다중 셀 하향링크 네트워크에서 셀의 개수와 셀 내 사용자의 수가 제한되지 않는 일반적인 상황에 적용 가능한 간섭 정렬 송수신기 설계에 대해 연구하였다. 제안하는 송수신기 설계 기법은 비반복 알고리즘 (non-iterative algorithm) 기반이고 기지국 간의 협력을 필요로 하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 먼저 유효 ICI 채널을 정의하고 타 셀로부터 오는 ICI를 유효 ICI 채널에 효과적으로 정렬시키는 수신 빔포밍 행렬을 구한다. 이어서 특정 사용자에게 다수의 스트림을 전송할 때 야기될 수 있는 스트림 간 간섭 신호 (inter-stream interference, ISI)와 IUI, ICI를 제거할 수 있는 송신 프리코딩 행렬을 계산한다. 이러한 과정을 통해 제안하는 송수신기 설계가 사용자 당 전송되는 데이터 스트림의 수만큼 자유도를 달성할 수 있음을 보였다. 모의 실험을 통하여 제안된 기법이 달성 가능한 자유도를 알아보고, 시분할다중접속 시스템과 다중 사용자 하향링크 네트워크에서 사용되는 블록 대각화 (block diagonalization) 기법을 사용하여 간섭 신호를 제거하는 기존의 기술에 비해 우수한 자유도 성능을 보임을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2절에서는 시스템 모델을 정의한다. 3절에서는 간섭 정렬 기반 송수신기 설계를 제안하고 이에 따른 안테나 수에 대해서 논의한다. 이어서 4절에서는 모의 실험을 통하여 제안한 송수신기 설계의 우수성을 보이고 5절에서는 본 논문에 대한 간단한 결론을 내리며 마무리를 짓는다.

본 논문에서는 다음과 같은 표기법을 따른다. 볼

드체 대문자와 소문자는 각각 행렬과 벡터를 의미한다. $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$, $[\cdot]$, $\text{tr}\{\cdot\}$, $E[\cdot]$ 는 각각 행렬의 transpose와 conjugate transpose, 소수점 이하 올림, trace, 그리고 확률 변수의 평균 값을 계산하는 연산자를 나타낸다. \mathbf{I} 와 $\mathbf{0}$ 은 각각 단위행렬과 영행렬을 의미한다. 임의의 행렬 \mathbf{A} 에 대해 $\text{span}(\mathbf{A})$, $\text{null}(\mathbf{A})$ 는 행렬 \mathbf{A} 의 열을 스캔하는 공간과 영공간을 각각 의미한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 C 개의 셀로 이루어진 다중 셀 다중 안테나 하향링크 채널을 고려한다. i 번째 셀은 M_i 개의 안테나를 가진 하나의 기지국과 N_i 개의 안테나를 가진 K_i 명의 사용자로 구성된다. i 번째 기지국과 j 번째 셀의 k 번째 사용자 간의 채널 행렬을 $\mathbf{H}_i^{[k,j]}$ 라고 할 때, 채널은 1) flat fading 채널을 가정하고, 2) 독립적이고 동일한 평균 0, 분산 1의 복소 가우시안 분포를 가진다고 가정하며, 3) 모든 기지국과 사용자들은 채널을 안다고 가정한다. 여기서 채널정보는 broadcasting feedback을 통해 단말이 자신이 속해있는 셀뿐 아니라 다른 셀로 직접적으로 피드백 가능하다고 가정한다. i 번째 기지국이 각 사용자 당 d 개의 스트림을 전송한다고 할 때, i 번째 셀의 k 번째 사용자가 받는 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{[k,i]} &= \mathbf{U}^{[k,i]H} \mathbf{H}_i^{[k,i]} \mathbf{V}^{[k,i]} \mathbf{x}^{[k,i]} \\ &+ \mathbf{U}^{[k,i]H} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{K_i} \mathbf{H}_i^{[k,i]} \mathbf{V}^{[l,i]} \mathbf{x}^{[l,i]} \\ &+ \mathbf{U}^{[k,i]H} \sum_{j=1}^C \sum_{\substack{l=1 \\ j \neq i}}^{K_j} \mathbf{H}_j^{[k,i]} \mathbf{V}^{[l,j]} \mathbf{x}^{[l,j]} \\ &+ \mathbf{U}^{[k,i]H} \mathbf{n}^{[k,i]} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{V}^{[k,i]}$ 는 단위 열벡터 $\mathbf{v}_m^{[k,i]}$ 로 이루어진 송신 프리코딩 행렬, $\mathbf{U}^{[k,i]}$ 는 열벡터 $\mathbf{u}_m^{[k,i]}$ 로 이루어진 수신 빔포밍 행렬, $\mathbf{x}^{[k,i]}$ 는 i 번째 셀의 k 번째 사용자를 위한 데이터 심볼, $\mathbf{n}^{[k,i]}$ 는 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 잡음벡터를 각각 의미한다. P 는 각 기지국의 전송 전력을 의미하

고 $E \left[\sum_{k=1}^K \|\mathbf{V}^{[k,i]} \mathbf{x}^{[k,i]}\|^2 \right] \leq P$ 이다. i 번째 셀의 k 번째 사용자에게 해당하는 총 전송률은 다음과 같다.

$$R^{[k,i]} = \sum_{m=1}^d \log_2 \left(1 + \frac{\frac{P}{K_i d} |\mathbf{u}_m^{[k,i]H} \mathbf{H}_i^{[k,i]} \mathbf{v}_m^{[k,i]}|^2}{\frac{1}{\sigma^2} \|\mathbf{u}_m^{[k,i]}\|^2 + I_m^{[k,i]}} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서, $I_m^{[k,i]}$ 는 다음과 같이 주어지며

$$\begin{aligned} I_m^{[k,i]} &= \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^d \frac{P}{K_i d} |\mathbf{u}_m^{[k,i]H} \mathbf{H}_i^{[k,i]} \mathbf{v}_n^{[k,i]}|^2 \\ &+ \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^{K_i} \sum_{n=1}^d \frac{P}{K_i d} |\mathbf{u}_m^{[k,i]H} \mathbf{H}_i^{[k,i]} \mathbf{v}_n^{[l,i]}|^2 \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^C \sum_{l=1}^{K_j} \sum_{n=1}^d \frac{P}{K_j d} |\mathbf{u}_m^{[k,i]H} \mathbf{H}_j^{[k,i]} \mathbf{v}_n^{[l,j]}|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

i 번째 셀의 k 번째 사용자의 m 번째 스트림에 해당하는 간섭 신호의 총 전력에 해당한다.

III. 제안하는 간섭 정렬 기반 송수신기 설계

제안하는 간섭 정렬 기반 송수신기 설계는 두 단계로 구성된다. 먼저 타 셀의 기지국들로부터 오는 ICI를 정렬시키는 수신 빔포밍 행렬을 구하고, 이를 이용하여 ISI, IUI, ICI를 제거하는 송신 프리코딩 행렬을 계산하게 된다. 본 장에서는 송수신기 설계의 구체적인 설명과 이에 필요한 안테나의 수를 수학적으로 유도한다.

3.1. 수신 빔포밍 행렬 설계

j 번째 셀의 사용자들은 타 셀의 기지국들로부터 총 $(C-1)K_j$ 개의 ICI를 수신하게 된다. 수신 빔포밍 행렬 설계의 목표는 이 ICI들을 유효 ICI 채널로 어떻게 효과적으로 정렬시키는가에 있다. j 번째 셀의 사용자들에 해당하는 유효 ICI 채널의 개수를 S_j 라고 정의한다. i 번째 기지국으로부터 j 번째 셀의 사용자들로 향하는 유효 ICI 채널의 수

를 $t_{j,i}$ 로 나타내면 $\sum_{i=1, i \neq j}^C t_{j,i} = S_j$ 가 되고, 다시 말해서 i 번째 기지국으로부터 오는 K_j 개의 ICI가 $t_{j,i}$ 개의 유효 ICI 채널로 정렬된다고 말할 수 있다. 따라서, K_j 개의 ICI가 너무 적은 수의 유효 ICI 채널로 정렬되어 불필요하게 기지국의 안테나를 사용하는 경우가 생기지 않도록 $t_{j,i}$ 를 적절히 정해야 한다. i 번째 기지국으로부터 j 번째 셀의 사용자들로 향하는 s 번째 유효 ICI 채널의 m 번째 기저 벡터를 $\mathbf{q}_{j,i,m}^{(s)}$ 라고 하고 $\mathbf{q}_{j,i,m}^{(s)}$ 에 정렬되는 ICI의 개수를 $n_{j,i}^{(s)}$ 라고 하면 다음의 조건을 만족하도록 $n_{j,i}^{(s)}$ 를 설정하여 항상 수신 빔포밍 행렬 설계가 가능하게 한다.

$$\begin{aligned} n_{j,i}^{(s)} + \sum_{f_1=1}^{s-1} n_{j,i}^{(f_1)} &< \sum_{f_2=1}^{\tilde{s}-1} n_{j,\tilde{i}}^{(f_2)} + 2 \\ \text{if } \sum_{f_1=1}^{s-1} n_{j,i}^{(f_1)} &\leq \sum_{f_2=1}^{\tilde{s}-1} n_{j,\tilde{i}}^{(f_2)} + 1 \text{ and } \sum_{f_2=1}^{\tilde{s}-1} n_{j,\tilde{i}}^{(f_2)} > 1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\tilde{s} \neq s, \tilde{i} \neq i$ 이다. 향후 설계될 간섭 정렬 조건을 항상 만족시키는 수신 빔포밍 행렬이 존재하기 위해서는 (4)의 조건을 만족시키는 $t_{j,i}$ 와 $n_{j,i}^{(s)}$ 를 결정해야 하고 이를 위한 알고리즘은 다음과 같다.

```

For  $j = 1 : C$ 
  If  $\frac{S_j}{C-1}$  is a natural number
     $t_{j,i} = \frac{S_j}{C-1}$  for  $i = 1, \dots, C$  and  $i \neq j$ 
  Otherwise
    Initialize  $t_{j,i} = \lceil \frac{S_j}{C-1} \rceil - 1$  for  $i = 1, \dots, C$  and  $i \neq j$ 
    Initialize  $Z = \{1, 2, \dots, C\}$ 
    For  $i \in Z$ 
      For  $i \in Z$ 
         $1 : S_j - (C-1) \left( \lceil \frac{S_j}{C-1} \rceil - 1 \right)$ 
    loop=
  
```

```

        i_{max} = \arg \max_{i \in Z, i \neq j} K_i

Z = Z - \{i_{max}\}, t_{j, i_{max}} = t_{j, i_{max}} + 1
    End
End
idx = 1
For i = 1 : C and i \neq j
    Initialize n_{j,i}^{(s)} = 1 for s = 1, \dots, t_{j,i}
    Set n_{j,i}^{(idx)} = n_{j,i}^{(idx)} + (K_j - t_{j,i})
    idx = idx + (K_j - t_{j,i})
End
End
    
```

여기서 $\sum_{s=1}^{t_{j,i}} n_{j,i}^{(s)} = K_j$ 이고, $\mathbf{q}_{j,i,m}^{(s)}$ 는 $s \neq t$ 에 대해 $\mathbf{q}_{j,i,m}^{(t)}$ 에서 선택되었던 ICI는 선택하지 않도록 설정된다. 이러한 조건들을 만족하는 간섭 정렬 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{span}(\mathbf{q}_{j,i,m}^{(1)}) &= \text{span}(\mathbf{H}_i^{[1,j]H} \mathbf{u}_m^{[1,j]}) \\
 &= \dots = \text{span}(\mathbf{H}_i^{[n_{j,i}^{(1)},j]H} \mathbf{u}_m^{[n_{j,i}^{(1)},j]}) \\
 \text{span}(\mathbf{q}_{j,i,m}^{(2)}) &= \text{span}(\mathbf{H}_i^{[n_{j,i}^{(1)}+1,j]H} \mathbf{u}_m^{[n_{j,i}^{(1)}+1,j]}) \\
 &= \dots = \text{span}(\mathbf{H}_i^{[n_{j,i}^{(1)}+n_{j,i}^{(2)},j]H} \mathbf{u}_m^{[n_{j,i}^{(1)}+n_{j,i}^{(2)},j]}) \\
 &\vdots
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 \text{span}(\mathbf{q}_{j,i,m}^{(t_{j,i})}) &= \text{span}(\mathbf{H}_i^{[\sum_{s=1}^{t_{j,i}-1} n_{j,i}^{(s)}+1,j]H} \mathbf{u}_m^{[\sum_{s=1}^{t_{j,i}-1} n_{j,i}^{(s)}+1,j]}) \\
 &= \dots = \text{span}(\mathbf{H}_i^{[K_j,j]H} \mathbf{u}_m^{[K_j,j]})
 \end{aligned}$$

(5)의 조건들은 i 번째 기지국으로부터 j 번째 셀의 사용자들로 향하는 K_j 개의 ICI가 수신 빔포밍 행렬들에 의해 $t_{j,i}$ 개의 유효 ICI 채널로 정렬되는 것을 의미한다. 식 (5)는 다음의 행렬식으로 다시 표현할 수 있다.

$$[\bar{\mathbf{A}}_j \bar{\mathbf{H}}_j] \bar{\mathbf{Q}}_j = \mathbf{0} \tag{6}$$

여기서

$$\bar{\mathbf{Q}}_{j,1}^{(s)} = [\mathbf{q}_{j,i,1}^{(s)} \dots \mathbf{q}_{j,i,d}^{(s)}] \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{j,i}^{(1)} &= [\mathbf{I} \dots \mathbf{I} \mathbf{0} \dots \mathbf{0}]^T \in \mathbb{C}^{K_j M_i \times M_i} \\
 \mathbf{A}_{j,i}^{(2)} &= [\mathbf{0} \dots \mathbf{0} \mathbf{I} \dots \mathbf{I} \mathbf{0} \dots \mathbf{0}]^T \in \mathbb{C}^{K_j M_i \times M_i} \\
 &\vdots \\
 \mathbf{A}_{j,i}^{(t_{j,i})} &= [\mathbf{0} \dots \mathbf{0} \mathbf{I} \dots \mathbf{I}]^T \in \mathbb{C}^{K_j M_i \times M_i}
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$\mathbf{A}_{j,i} = [\mathbf{A}_{j,i}^{(1)} \dots \mathbf{A}_{j,i}^{(t_{j,i})}] \tag{9}$$

$$\bar{\mathbf{A}}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{j,1} & \mathbf{0} & & \dots & & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & & & & \\ & & \mathbf{A}_{j,j-1} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \mathbf{A}_{j,j+1} & & \\ \mathbf{0} & \dots & & & \ddots & \mathbf{0} \\ & & & & & \mathbf{0} \mathbf{A}_{j,C} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\bar{\mathbf{H}}_j = \begin{bmatrix} -\mathbf{H}_1^{[1,j]H} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & & & -\mathbf{H}_1^{[K_j,j]H} & \\ & & & & \vdots & \\ -\mathbf{H}_{j-1}^{[1,j]H} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & & & -\mathbf{H}_{j-1}^{[K_j,j]H} & \\ -\mathbf{H}_{j+1}^{[1,j]H} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & & & -\mathbf{H}_{j+1}^{[K_j,j]H} & \\ -\mathbf{H}_C^{[1,j]H} & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & & & -\mathbf{H}_C^{[K_j,j]H} & \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\overline{\mathbf{Q}}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{j,1}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{j,1}^{(t_{j,1})} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{j,j-1}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{j,j-1}^{(t_{j,j-1})} \\ \mathbf{Q}_{j,j+1}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{j,j+1}^{(t_{j,j+1})} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{j,C}^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_{j,C}^{(t_{j,C})} \\ \mathbf{U}^{[1,j]} \\ \vdots \\ \mathbf{U}^{[K,j]} \end{bmatrix} \quad (12)$$

이다. $[\overline{\mathbf{A}}_j, \overline{\mathbf{H}}_j]$ 를 \mathbf{F}_j 라고 하면, \mathbf{F}_j 의 영공간을 구함으로써 j 번째 셀의 사용자들에 해당하는 수신 빔포밍 행렬과 유효 ICI 채널을 계산할 수 있다. \mathbf{F}_j 가 d 이상의 차원을 가지는 영공간을 확보하기 위해서는 다음의 식을 항상 만족해야 한다.

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^C t_{j,i} M_i + K_j N_j - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^C K_j M_i \geq d \quad (13)$$

3.2. 송신 프리코딩 행렬 설계

앞 절에서 설계된 수신 빔포밍 행렬을 토대로 ISI, IUI, 유효 ICI 채널들로 이루어진 신호 공간의 영공간에 송신 프리코딩 행렬을 놓이게 함으로써 각 사용자들에게 미치게 되는 모든 간섭 채널을 제거할 수 있다. $\mathbf{W}_i^{[k,j]} = \mathbf{H}_i^{[k,j]H} \mathbf{U}^{[k,j]}$, $\mathbf{w}_{i,m}^{[k,j]} = \mathbf{H}_i^{[k,j]H} \mathbf{u}_m^{[k,j]}$ 이라고 정의하면, i 번째 셀의 k 번째 사용자의 m 번째 스트림에 해당하는 송신 프리코딩 벡터는 다음의 식으로 계산할 수 있다.

$$\mathbf{v}_m^{[k,i]} \subset \text{null}([\text{ISI IUI ICI}]^H) \quad (14)$$

여기서

$$\text{ISI} = [\mathbf{w}_{i,1}^{[k,i]} \cdots \mathbf{w}_{i,m-1}^{[k,i]} \mathbf{w}_{i,m+1}^{[k,i]} \cdots \mathbf{w}_{i,d}^{[k,i]}]$$

$$\text{IUI} = [\mathbf{W}_i^{[1,i]} \cdots \mathbf{W}_i^{[k-1,i]} \mathbf{W}_i^{[k+1,i]} \cdots \mathbf{W}_i^{[K,i]}]$$

$$\text{ICI} = [\mathbf{Q}_{1,i}^{(1)} \cdots \mathbf{Q}_{i-1,i}^{(t_{i-1,i})} \mathbf{Q}_{i+1,i}^{(1)} \cdots \mathbf{Q}_{C,i}^{(t_{C,i})}]$$

이다. 식 (14)에서 $[\text{ISI IUI ICI}]^H$ 가 영공간을 가지기 위해서는 다음의 식을 만족해야 한다.

$$M_i - \left\{ d(K_i - 1) + d \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^C t_{j,i} + (d - 1) \right\} \geq 1 \quad (15)$$

3.3. 송수신기 설계를 위한 안테나 조건

본 절에서는 III-1과 III-2절에서 제안된 송수신기 설계를 위해 필요로 하는 기지국과 사용자의 안테나 수에 대해 논의한다. 식 (15)로부터 i 번째 셀의 기지국에 해당하는 안테나 조건은 다음의 식으로 표현된다.

$$M_i \geq d \left\{ (K_i - 1) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^C t_{j,i} + 1 \right\} \quad (16)$$

식 (13)으로부터 j 번째 셀의 사용자에 해당하는 안테나 조건은 다음의 식으로 표현된다.

$$N_j \geq \frac{\left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^C K_j M_i \right\} - \left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^C t_{j,i} M_i \right\} + d}{K_j} \quad (17)$$

실제 셀룰러 네트워크를 고려했을 때, 기지국은 일반적으로 사용자보다 많은 수의 안테나를 가지기 때문에 $\min M_i \geq N_j$ 인 다중 셀 하향링크 채널을 가정한다. 기지국의 안테나 수 중 최소값을 $M_{\min} = \min M_i$ 라고 하면,

식 (17)은 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$M_{\min} \geq N_j \geq \frac{\left\{ \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^C (K_j - t_{j,i}) M_{\min} \right\} + d}{K_j} = \frac{\{(C - 1)K_j - S_j\} M_{\min} + d}{K_j} \quad (18)$$

식 (18)로부터 S_j 의 하한값을 다음과 같이 도출해 낼 수 있다.

$$S_j \geq (C-2)K_j + \frac{d}{M_{\min}} \quad (19)$$

j 번째 셀에 해당하는 유효 ICI 채널의 수인 S_j 가 나머지 셀의 기지국들로부터 오는 ICI의 총 개수인 $(C-1)K_j$ 보다 클 수 없다는 명확한 이유로부터 S_j 의 상한과 하한을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(C-2)K_j + \frac{d}{M_{\min}} \leq S_j \leq (C-1)K_j \quad (20)$$

식 (16)으로부터 M_i 는 모든 i 에 대해서 d 보다 크고, S_j 는 자연수이기 때문에 식 (20)보다 좀 더 견고한 상한과 하한을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(C-2)K_j + 1 \leq S_j \leq (C-1)K_j \quad (21)$$

결과적으로, 식 (21)로부터 S_j 를 결정하고 이를 바탕으로 식 (16)과 (17)을 이용하여 III-1과 III-2절에서 제안된 송수신기 설계를 위해 필요로 하는 기지국과 사용자의 안테나 수를 정할 수 있다.

위의 결과를 바탕으로 자유도 계산을 위해 먼저, 식 (2)로부터 다중 셀 다중 안테나 하향링크 채널에서의 자유도를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i,k} R^{[i,k]}}{\log_2 \rho} \quad (22)$$

여기서 $\rho = \frac{P}{\sigma^2}$ 는 기지국 송신 전력 대 사용자 안테나 당 잡음 전력 비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 의미한다. 기지국과 사용자의 안테나 수가 식 (16)과 (17)을 이용하여 결정되는 한, 제안된 송수신기 설계는 ISI, IUI, ICI를 모두 제거할 수 있고 따라서 다중 셀 다중 안테나 하향링크 채널에서 $\sum_{i=1}^C K_i d$ 만큼의 자유도를 항상 보장할 수 있다.

IV. 모의 실험 결과

본 장에서는 제안된 송수신기 설계의 자유도 성능을 보이기 위해 모의 실험 결과를 확인하였다. 먼저 C 개의 기지국과 i 번째 셀에 K_i 명의 사용자가 존재하고 각 사용자 당 d 개의 데이터 스트림을 전송하는 다중 셀 다중 안테나 하향링크 채널을 $(C, [K_1, \dots, K_C], d)$ 라고 명명한다. 모든 모의 실험 결과에 대해, 기지국과 사용자의 안테나 수는 식 (16)과 (17)을 따른다고 가정하였다.

그림 1에서는 기지국의 수 혹은 사용자의 수의 변화에 따른 평균 총 전송률을 도시하였다. 그림 2에서는 데이터 스트림의 수의 변화에 따른 평균 총 전송률을 도시하였다. 그림 1과 2에서, 기지국과 사용자의 안테나 수가 식 (16)과 (17)을 이용하여 결정되었을 때 제안된 송수신기 설계는 $\sum_{i=1}^C K_i d$ 만큼의 자유도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

제안된 송수신기 설계의 우수성을 입증하기 위하여 기존 시스템과의 성능 차이를 모의 실험 결과를 통하여 확인하였다. 본 논문에서는 각 기지국이 자신에게 할당된 시간에만 자신의 셀에 속해있는 사용자들에게 신호를 전송하는 시분할다중접속 시스템으로 고려하였다. 이 때, 사용자 간의 IUI를 효과적으로 제거하기 위하여 다중 사용자 하향링크 네트워크에서 사용되는 블록 대각화 (block diagonalization) 기법을 사용하였다^[13]. 이 경우 각 기지국은 자신에게 할당된 시간동안 신호를 전송하므로 ICI가 발생하지 않게 된다. 여기서 모든 i 에 대해 $M = M_i$, $K = K_i$, $N = N_i$ 라고 가정하면 달성 가능한 총 자유도는 $\min(M, KN)$ 이 된다^[14-15]. $C = 3$, $K = 3$ 인 경우, 식 (16)과 (17)로부터 기지국과 사용자의 안테나 수는 각각 $M = 7$, $N = 5$ 가 된다. 따라서 제안하는 송수신기 설계를 사용할 경우 달성 가능한 자유도는 9인 반면에 블록 대각화를 고려하는 시분할다중접속 시스템의 경우 달성 가능한 자유도는 7이 된다. 그림 3에서는 이와 같은 분석 결과가 모의 실험의 결과와 일치함을 볼 수 있다. 기지국과 사용자의 안테나 수가 동일한 조건 하에서 제안된 송수신기 설계는 블록 대각화를 고려하는 시분할다중접속 시스템에 비해 약 28.6%의 자유도 향상이 있음을 확인할 수 있다.

표 1. 그림 2에서 사용된 송수신기의 안테나 수
Table 1. Number of antennas for transceiver in Fig. 2.

Number of data streams	Number of antennas for a base station	Number of antennas for an user
1	7, 6, 8	5, 4, 5
2	14, 12, 16	10, 8, 10
3	21, 18, 24	15, 12, 15

V. 결론

본 논문에서는 임의의 셀 개수와 셀 당 사용자의 수에 적용 가능한 간섭 정렬 기반 송수신기 설계에 대해 제안하였다. 기지국의 안테나 수가 사용자의 안테나 수보다 크다는 제한 조건 아래, 제안된 송수신기 설계에 필요로 하는 기지국과 사용자의 안테나 수를 유도하였다. 모의 실험 결과를 통하여 제안된 송수신기 설계는 기지국과 사용자의 안테나 수

가 유도된 조건을 충족할 경우 $\sum_{i=1}^C K_i d$ 만큼의 자유

도를 달성함을 확인할 수 있었다. 또한 제안된 송수신기 설계는 기지국과 사용자의 안테나 수가 동일한 조건 하에서 블록 대각화를 고려하는 시분할다중접속 시스템에 비해 자유도 성능이 우수함을 보였다. 향후 이 결과를 토대로 각 사용자의 데이터 스트림이 동일하지 않게 할당되는 다중 셀 다중 안테나 하향링크 시스템의 송수신기를 설계할 예정이다.

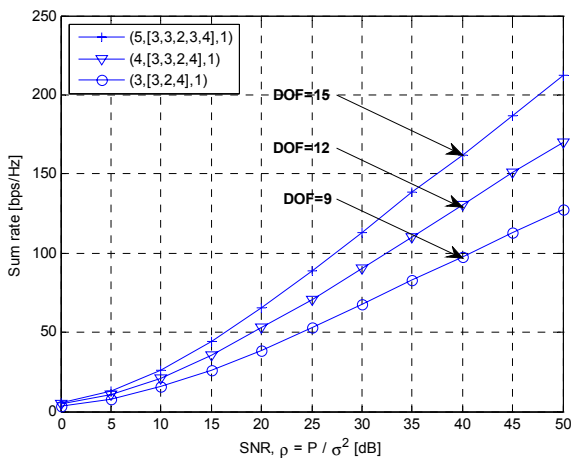


그림 1. 기지국의 수와 사용자의 수의 변화에 따른 평균 총 전송률
Fig. 1. Average sum rate with varying the number of base stations and users

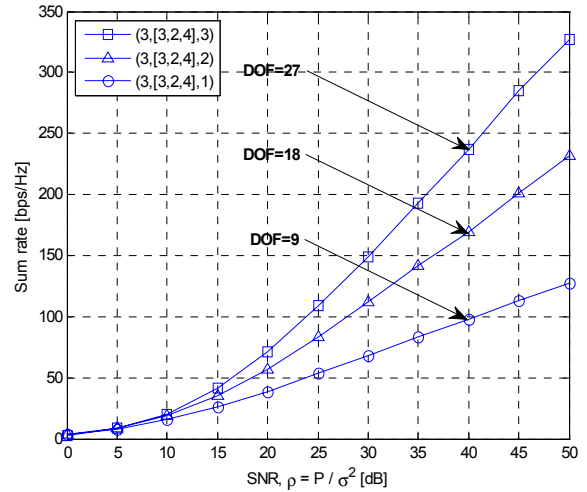


그림 2. 데이터 스트림의 수의 변화에 따른 평균 총 전송률
Fig. 2. Average sum rate with respect to the number of data streams

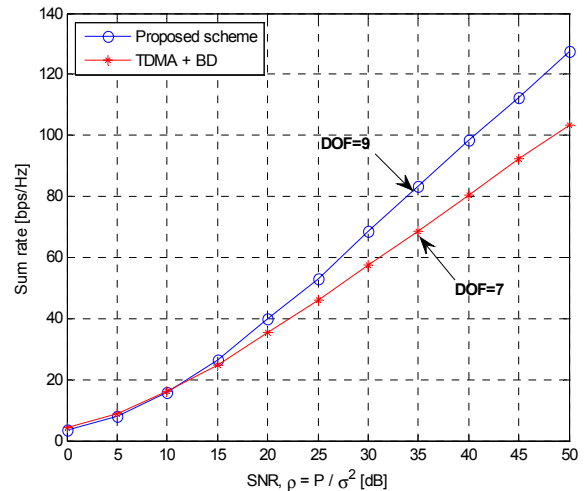


그림 3. (3, [3, 3, 3], 1)인 하향링크 시스템에서의 제안된 송수신기 설계와 블록 대각화를 고려하는 시분할다중접속 시스템과의 성능 비교

Fig. 3. Comparison between the proposed scheme and time division multiple access with block diagonalization in (3, [3, 3, 3], 1) downlink system

References

- [1] M. Karakayali, G. Foschini, and R. Valenzuela, "Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 13, no. 4, pp. 56-61, Aug. 2006.
- [2] B. L. Ng, J. Evans, S. Hanly, and D. Aktas, "Distributed downlink beamforming with

cooperative base stations,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 12, pp. 5491 - 5499, Dec. 2008.

[3] L. Venturino, N. Prasad, and X. Wang, “Coordinated linear beamforming in downlink multi-cell wireless networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 4, pp. 1451 - 1461, Apr. 2010.

[4] H. Dahrouj and W. Yu, “Coordinated beamforming for the multicell multi-antenna wireless system,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 5, pp. 1748 - 1759, May 2010.

[5] R. Zhang, “Cooperative multi-cell block diagonalization with per-base-station power constraints,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 9, pp. 1435 - 1445, Dec. 2010.

[6] Jaesin Kim, “Analysis of Spatial Multiplexing Gain in a Two-Cell MIMO Environment with Coordinated Base Stations,” *The Journal of Korea Information and Communications Society (J-KICS)*, vol. 37C, no. 05, pp. 376-383, May 2012.

[7] M. Maddah-Ali, A. Motahari, and A. Khandani, “Communication over MIMO X channels: Interference alignment, decomposition, and performance analysis,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3457 - 3470, Aug. 2008.

[8] V. Cadambe and S. Jafar, “Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425 - 3441, Aug. 2008.

[9] V. Cadambe and S. Jafar, “Interference alignment and the degrees of freedom of wireless X networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 3893 - 3908, Sep. 2009.

[10] W. Shin, N. Lee, J.-B. Lim, C. Shin, and K. Jang, “On the design of interference alignment scheme for two-cell MIMO interfering broadcast channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 2, pp. 437 - 442, Feb. 2011.

[11] C. Suh, M. Ho, and D. Tse, “Downlink interference alignment,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 9, pp. 2616 - 2626, Sep. 2011.

[12] A. Mobasher, A. Bayesteh, and Y. Jia, “Mixed-rank compound MIMO-X interference alignment for multi-user systems,” in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1 - 6, Houston, TX, USA, Dec. 2011.

[13] Q. Spencer, A. Swindlehurst, and M. Haardt, “Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 461 - 471, Feb. 2004.

[14] P. Viswanath and D. Tse, “Sum capacity of the vector gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 8, pp. 1912 - 1921, Aug. 2003.

[15] W. Yu and J. Cioffi, “Sum capacity of gaussian vector broadcast channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 9, pp. 1875 - 1892, Sep. 2004.

이 현 호 (Hyun-Ho Lee)

정회원



2007년 2월 고려대학교 전기 전자전파공학부 학사
2007년 3월~현재 고려대학교 전자전기공학과 석박사 통합 과정
<관심분야> 전자공학, 통신공학

고 영 채 (Young-Chai Ko)

종신회원



1997년 2월 한양대학교 전자통신공학과 학사
1999년 5월 University of Minnesota, Minneapolis, USA, 전자공학과 석사
2001년 10월 University of Minnesota, Minneapolis, USA, 전자공학과 박사

2004년 3월 고려대학교 전기전자전파공학부 조교수
2008년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수
<관심분야> 전자공학, 통신공학