

부분공간 간섭 정렬에서 셀 용량 최대화를 위한 최적 레퍼런스 벡터 설정 기법

준회원 한 동 결*, 정회원 회 빙*, 종신회원 장 경 희*, 구 본 태**

Optimal Selection of Reference Vector in Sub-space Interference Alignment for Cell Capacity Maximization

DongKeol Han* Associate Member, Bing Hui* Regular Member,
KyungHi Chang*, BonTae Koo** Lifelong Members

요 약

본 논문에서는 다중 셀 환경에서 전체 셀 용량을 향상시키기 위하여 부분공간 간섭 정렬 (Sub-space Interference Alignment) 기법을 위한 새로운 레퍼런스 벡터 설정 알고리즘을 제안한다. 송신단에서 임의의 동일한 레퍼런스 벡터를 사용하여 전송 벡터를 생성하고, 수신단에서 이와 직교하는 벡터를 사용하여 정렬된 간섭 신호를 제거하는 기존의 부분공간 간섭 정렬 기법의 경우, 사용되는 레퍼런스 벡터 및 채널 상황에 따라 전체 시스템 용량이 달라지는 문제점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 레퍼런스 벡터와 채널의 변화에 의해 전체 시스템의 합용량이 변화하는 문제점 및 레퍼런스 벡터 원소들의 크기 분산이 작아질수록 합용량이 향상되는 경향을 보임을 분석한다. 이러한 분석을 바탕으로 새로운 레퍼런스 벡터 설정 방법으로 레퍼런스 벡터 원소들의 크기 분산을 고려하여 설정하는 알고리즘을 제안하며, 모의실험을 통해 기존 알고리즘과 비교하여 제안된 알고리즘이 평균적으로 약 50% 정도 향상된 합용량을 나타냄을 확인한다.

Key Words : Interference Alignment, Sub-space Interference Alignment, Reference Vector, Sum-rate, Multi-cell

ABSTRACT

In this paper, novel sub-space interference alignment algorithms are proposed to boost the capacity in multi-cell environment. In the case of conventional sub-space alignment, arbitrary reference vectors have been adopted as transmitting vectors at the transmitter side, and the inter-cell interference among users are eliminated by using orthogonal vectors of the chosen reference vectors at the receiver side. However, in this case, sum-rate varies using different reference vectors even though the channel values keep constant, and vice versa. Therefore, the relationship between reference vectors and channel values are analyzed in this paper, and novel interference alignment algorithms are proposed to increase multi-cell capacity. Reference vectors with similar magnitude are adopted in the proposed algorithm. Simulation results show that the proposed algorithms provide about 50 % higher sum-rate than conventional algorithm.

* 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2008-000-20333-0).
* 본 논문은 지식경제부의 출연금으로 수행하고 있는 한국전자통신연구원의 정보통신연구개발사업(과제번호:KI002109) 위탁 연구과제 연구결과입니다.

* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신연구실 (xellos1982@naver.com, huibing_zxo@163.com, khchang@inha.ac.kr)

** 한국전자통신연구원 통방융합SoC연구팀 (koobr@etri.re.kr)

논문번호 : KICS2010-12-625, 접수일자 : 2010년 12월 23일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 2일

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템에서는 사용자의 고속 데이터에 대한 요구를 충족시키고자 펨토셀과 같은 초소형 기지국을 사용자가 원하는 시간과 장소에 설치해 사용하는 방안이 검토되고 있다. 펨토셀은 낮은 전력을 사용하기 때문에 수십 미터 정도의 매우 작은 커버리지를 갖지만, 임의의 시간과 장소에 설치되기 때문에 다른 네트워크 장치에 매우 강력한 간섭을 미칠 수 있다. 또한, 다중 셀 네트워크 환경에서 셀 경계에 위치한 사용자는 인접한 셀의 기지국 및 사용자로부터 간섭의 영향을 많이 받게 된다. 특히 모든 셀이 같은 주파수 대역을 사용하는 통신 시스템의 경우 그렇지 않은 시스템에 비해 인접 셀로 인한 간섭의 영향이 더욱 커지게 되고, 이로 인해 전체 시스템의 용량 감소 및 사용자의 QoS (Quality of Service)가 감소하게 된다^[1]. 따라서 차세대 무선 통신 시스템에서는 간섭을 효과적으로 관리하는 것이 매우 중요한 문제로 대두되고 있고, 이러한 간섭 문제를 효과적으로 제어하기 위한 간섭 제어 기술들이 활발히 연구되고 있다^{[2]-[4]}.

최근 여러 사용자가 존재하는 채널 환경에서 주어진 자원 내의 특정 영역에 다른 사용자들의 간섭 신호를 정렬시킴으로써 전체 시스템의 용량을 향상시키는 간섭 정렬 (Interference Alignment) 기법이 제안되었다^[5]. 이 방법은 모든 사용자가 다른 사용자로부터의 간섭 신호를 사용 가능한 자유도의 절반 내에 위치시킴으로써 나머지 반에서는 간섭이 없는 통신을 제공하는 기술이다. 그러나 간섭 정렬 기법은 각 사용자가 네트워크 내의 모든 채널 정보를 알고 있어야 적용이 가능하며, 다중 셀 환경에 적용하기 어려운 문제점이 있다.

이러한 다중 셀 환경에서의 적용이 어려운 점을 보완하기 위해 부분공간 간섭정렬 기법이 제안되었다^[6]. 이 방법은 각 사용자가 채널 행렬을 크로네커 (Kronecker) 곱 형태를 갖는 행렬로 분리하여 인접 셀로부터의 간섭을 전체 수신 신호 공간 내에서 다차원을 갖는 부분공간으로 정렬하는 방법이다. 그러나 간섭 신호를 정렬하기 위해 사용되는 레퍼런스 벡터에 따라 전체 합용량이 크게 달라지는 문제점을 나타내고 있다.

따라서 본 논문에서는 다중 셀 환경에서 부분공간 간섭정렬 기법을 적용함에 있어, 간섭을 정렬하기 위해 사용하는 전송 벡터를 생성하는데 사용되는 레퍼런스 벡터에 따라 전체 시스템의 용량이 달라지는 문제점을 확인하고, 이를 위해 전체 시스템의 용량을 향

상시키기 위한 레퍼런스 벡터 설정 방법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 부분공간 간섭 정렬 기법에 대하여 살펴보고, III장에서는 레퍼런스 벡터와 채널에 의한 합용량 변화를 분석한다. 4장에서는 다중 셀 환경에서 셀 용량을 향상시키기 위한 레퍼런스 벡터 설정 방법을 제안하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 부분공간 간섭 정렬

Jafar와 Cadambe가 발표한 간섭 정렬 알고리즘의 경우 각 송신단이 네트워크내의 모든 채널 정보를 알고 있어야 한다는 점과 더불어 한 네트워크에 대한 간섭 정렬이 다른 네트워크에 대한 간섭 정렬을 보장하지 않는 문제점 때문에 다중 셀 환경에 적용하기에는 어려움이 있다.

부분공간 간섭 정렬 알고리즘은 이러한 문제점을 보완한 기법으로, 전체 신호 공간 내에 다차원의 부분공간을 형성하여 인접 셀로부터의 간섭을 그 부분공간에 정렬하는 방법이다. 각 사용자는 네트워크 내의 모든 채널 정보를 필요로 하지 않고 오직 각 사용자가 인접 셀의 기지국에 미치는 채널 정보만을 알고 있으면 적용할 수 있다.

부분공간 간섭 정렬 알고리즘은 원하는 신호 공간의 차원 K 와 전체 신호 공간의 차원인 $(G-\sqrt{K}+1)^{G-1}$ 의 비를 Interference-free 자유도라 정의하고 식 (1)로 나타낸다.

$$\frac{K}{(G-\sqrt{K}+1)^{G-1}} \rightarrow 1 \text{ as } K \rightarrow \infty \quad (1)$$

여기서 G 는 셀의 개수, K 는 각 셀 내 사용자 수이다. 식 (1)을 통해 셀과 사용자 수가 증가하여도 원하는 신호공간을 위한 간섭이 없는 자유도 1을 제공할 수 있다.

본 논문은 그림 1과 같은 3개의 셀에 K 명의 사용자가 존재하는 상향링크 시스템을 고려하였다. 3-셀 환경의 경우, 전체 신호 공간은 $(\sqrt{K}+1)^2$ 이 되고, 인접 셀들로부터의 간섭 신호를 $\sqrt{K}+1$ 의 차원으로 정렬한다. 셀 a 의 사용자는 셀 β 에 대해서 부분공간 1에 간섭이 정렬되고 동시에 셀 γ 에 대해서 부분공간 2에 간섭이 정렬된다. 다른 셀의 사용자들 역시 마찬가지로 두 셀에 대하여 각각의 부분공간에 동시에 간섭이 정렬하게 된다.

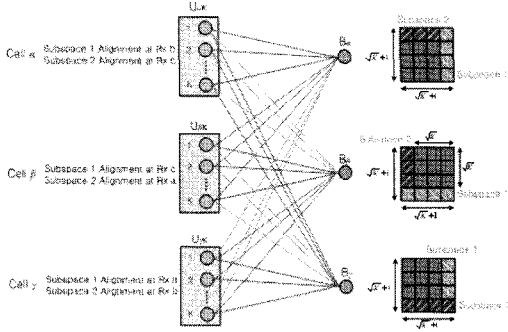


그림 1. 3-셀 환경에서의 부분공간 간섭 정렬

위와 같은 3개의 셀이 존재하는 상향링크 시스템에서 셀 a 의 수신단 B_a 에서의 수신 신호는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$y^{Ba} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\alpha k}^{Ba} \mathbf{v}_{\alpha k} x_{\alpha k} + \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\beta k}^{Ba} \mathbf{v}_{\beta k} x_{\beta k} + \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\gamma k}^{Ba} \mathbf{v}_{\gamma k} x_{\gamma k} + \mathbf{w}^{Ba} \quad (2)$$

여기서, K 는 각 셀 내 사용자의 수이며, $\mathbf{H}_{ik}^{Bj} \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 는 셀 i 에 속한 사용자 k 로부터 수신단 B_j 로의 채널이다. 또한, $\mathbf{v}_{ik} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ 은 셀 i 의 사용자 k 의 송신벡터이고, $\mathbf{w}^{Bj} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ 은 수신단 B_j 에서의 복소 가우시안 잡음 벡터이다. 이때, $n = (\sqrt{K} + 1)$ 을 나타낸다.

식 (2)와 같은 수신 신호 식에서 채널 \mathbf{H}_{ik}^{Bj} 를 식 (3)과 같이 분리한다.

$$\mathbf{H}_{ik}^{Bj} = \mathbf{H}_{ik}^{Bj,2} \otimes \mathbf{H}_{ik}^{Bj,1} \quad (3)$$

여기서 \otimes 는 크로네커 곱을 의미하며, 식 (4)와 같이 정의된다.

$$A \otimes B = \begin{pmatrix} a_{11}B & \cdots & a_{1n}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}B & \cdots & a_{mn}B \end{pmatrix} \quad (4)$$

행렬 \mathbf{A} 는 $m \times n$ 행렬로써, a_{ij} 는 행렬 \mathbf{A} 의 원소를 나타낸다. 또한 크로네커 곱은 식 (5)와 같은 혼합 법칙을 갖고 있다.

$$(A \otimes B)(C \otimes D) = (AC) \otimes (BD) \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)의 크로네커 곱의 법칙을 이용하여,

$$y^{Ba} = \sum_{k=1}^K (\mathbf{H}_{\alpha k}^{Ba,2} \mathbf{v}_{\alpha k}^2) \otimes (\mathbf{H}_{\alpha k}^{Ba,1} \mathbf{v}_{\alpha k}^1) x_{\alpha k} + \sum_{k=1}^K (\mathbf{H}_{\beta k}^{Ba,2} \mathbf{v}_{\beta k}^2) \otimes (\mathbf{H}_{\beta k}^{Ba,1} \mathbf{v}_{\beta k}^1) x_{\beta k} + \sum_{k=1}^K (\mathbf{H}_{\gamma k}^{Ba,2} \mathbf{v}_{\gamma k}^2) \otimes (\mathbf{H}_{\gamma k}^{Ba,1} \mathbf{v}_{\gamma k}^1) x_{\gamma k} + \mathbf{w}^{Ba} \quad (6)$$

식 (3)과 같이 채널을 분리하여 식 (2)의 수신 신호를 정리하면, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 나머지 송신 벡터들도 이와 같은 방법으로 설정하게 되면 각 송신 벡터들은 식 (7)과 같이 설정된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\alpha k}^1 &= (\mathbf{H}_{\beta k}^{B\alpha,1})^{-1} \mathbf{v}_r, & \mathbf{v}_{\alpha k}^2 &= (\mathbf{H}_{\gamma k}^{B\alpha,2})^{-1} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{v}_{\beta k}^1 &= (\mathbf{H}_{\gamma k}^{B\beta,1})^{-1} \mathbf{v}_r, & \mathbf{v}_{\beta k}^2 &= (\mathbf{H}_{\alpha k}^{B\beta,2})^{-1} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{v}_{\gamma k}^1 &= (\mathbf{H}_{\alpha k}^{B\gamma,1})^{-1} \mathbf{v}_r, & \mathbf{v}_{\gamma k}^2 &= (\mathbf{H}_{\beta k}^{B\gamma,2})^{-1} \mathbf{v}_r \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\mathbf{v}_r \in \mathbb{C}^{\sqrt{n}}$ 은 임의의 레퍼런스 벡터를 나타낸다. 식 (7)의 송신 벡터들은 식 (6)에 대입하여 정리 하면 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$y^{Ba} = \sum_{k=1}^K \left[\left\{ (\mathbf{H}_{\alpha k}^{Ba,2}) (\mathbf{H}_{\alpha k}^{B\alpha,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \left\{ (\mathbf{H}_{\alpha k}^{Ba,1}) (\mathbf{H}_{\alpha k}^{B\alpha,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right] x_{\alpha k} + \sum_{k=1}^K \left[\mathbf{v}_r \otimes \left\{ (\mathbf{H}_{\beta k}^{Ba,1}) (\mathbf{H}_{\beta k}^{B\beta,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right] x_{\beta k} + \sum_{k=1}^K \left[\left\{ (\mathbf{H}_{\gamma k}^{Ba,2}) (\mathbf{H}_{\gamma k}^{B\gamma,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \mathbf{v}_r \right] x_{\gamma k} + \mathbf{w}^{Ba} \quad (8)$$

식 (8)에서 첫 번째항은 원하는 신호이며, 두 번째 및 세 번째 항은 인접 셀로부터의 간섭 신호이며, 수신단 B_a 에서 유효한 채널 행렬들은 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다. 수신단에서 레퍼런스 벡터 \mathbf{v}_r 과 직교하는 벡터를 이용함으로써 간섭을 제거할 수 있다.

III. 레퍼런스 벡터에 의한 합용량 분석

사용자 간 임의의 동일한 레퍼런스 벡터를 사용하는 기존 부분공간 간섭 정렬 기법의 경우 사용되는 레퍼런스 벡터에 의해 합용량이 크게 변화하는 문제점을 갖고 있다^[7]. 따라서 본 장에서는 다양한 채널 환경에서 부분공간 간섭 정렬 기법을 적용하여 레퍼런스

벡터 변화에 의한 합용량 변화의 문제점을 확인하고, 사용하는 레퍼런스 벡터 원소들의 크기의 분산에 의한 합용량 변화를 분석한다.

3.1 채널 및 레퍼런스 벡터 변화에 의한 합용량 분석

$$C_{\alpha} = \sum_{k \in \{1, \dots, K\}} \log_2 \left(1 + \frac{P_{U_{\alpha k}}^{B_{\alpha}} \|\mathbf{u}^H \mathbf{H}_{U_{\alpha k}}^{B_{\alpha}} \mathbf{v}_{\alpha k}\|^2}{\sum_{i \neq j, k, l=1}^K \|\mathbf{u}^H \mathbf{H}_{U_{j k}}^{B_i} \mathbf{v}_{\alpha k}\|^2 + N_0} \right) \quad (9)$$

일반적으로 채널의 용량은 Shannon-Hartley 이론에 따라 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 부분공간 간섭 정렬 알고리즘을 적용하였을 경우 임의의 셀 α 에서의 합용량은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이때, P 는 송신 전력을 나타내며, 본 논문에서는 1로 가정한다. $\mathbf{H}_{U_{ik}}^{B_i}$ 는 셀 i 의 k 번째 사용자와 기지국 B_i 간 채널을 나타내며, $\mathbf{v}_{\alpha k}$ 는 셀 α 의 사용자 k 의 송신벡터를 나타낸다. 간섭 정렬 기법을 적용할 경우 간섭은 제거된다고 볼 수 있으므로, 식 (9)에서 시스템의 합용량은 레퍼런스 벡터와 채널값에 의존적임을 알 수 있다.

먼저 직교 채널에서 레퍼런스 변화에 의한 합용량의 변화를 살펴본다. 직교 채널 행렬은 대각 행렬을 이용하거나 Gram-Schmidt 방법을 이용하여 생성할 수 있다^[5]. 또한, condition number에 따라 행렬은 well-condition과 ill-condition으로 나누어 볼 수 있으며, condition number가 1에 근접한 경우 well-condition, condition number가 상대적으로 큰 경우 ill-condition으로 정의한다.

그림 2는 well-condition의 직교 채널에서 부분 공

간 간섭 정렬기법을 적용하였을 경우 시스템의 합용량을 나타내고 있는 결과이며, 그림 3은 ill-condition 채널에서 부분 공간 간섭 정렬기법을 적용하였을 경우 합용량을 나타내고 있는 결과이다. 모의실험 결과들은 3개의 셀에 3명의 사용자가 있는 상향링크 시스템에서 사전에 채널 정보를 알고 있음을 가정한다. 이후의 모의실험들도 같은 상황을 가정한다.

그림 2와 그림 3의 Fixed R.V.1과 Fixed R.V.2는 각각 같은 레퍼런스 벡터이며, Random R.V.의 경우 랜덤한 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우로 해당 채널에서의 평균적인 합용량을 나타낸다.

결과 그래프를 보면 부분공간 간섭 정렬기법을 적용함에 있어 같은 채널 환경에서 레퍼런스 벡터에 따라 시스템의 합용량이 다르게 나타남을 확인할 수 있으며, 더불어 같은 레퍼런스 벡터를 사용하더라도 채널이 변화함에 따라 전체 시스템의 합용량이 달라짐을 확인할 수 있다. 또한, 채널 행렬에서 유사한 고유값을 갖고 있어 원하는 신호의 세기가 더 높게 나타나는 well-condition에서의 합용량이 ill-condition의 경우보다 높게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 4와 그림 5는 간섭 채널에서 사용되는 레퍼런스 벡터에 의한 전체 합용량 변화를 나타내고 있는 결과 그래프이다. 결과를 보면 부분공간 간섭 정렬 알고리즘을 적용하였을 경우의 합용량이 적용하지 않았을 경우보다 상당히 높은 합용량을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 간섭이 존재하는 채널에서 간섭 정렬 알고리즘을 적용할 경우 간섭 정렬 알고리즘에 의해 간섭이 제거되어 간섭의 영향을 받지 않기 때문이며, 적용하지 않은 경우는 간섭의 영향을 크게 받아 상당히 낮은 합용량을 나타내게 된다. 또한, 직교 채널의 결과와 마찬가지로 채널 및 사용되는 레퍼런

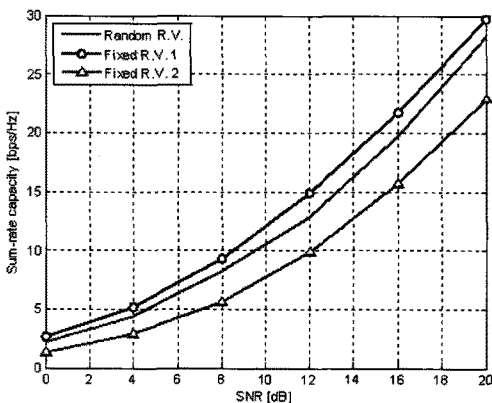


그림 2. Well-conditioned 직교채널에서의 합용량

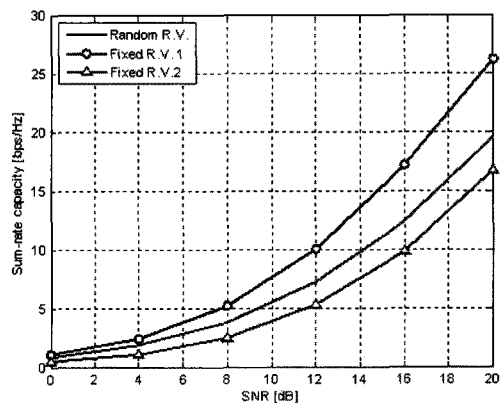


그림 3. Ill-conditioned 직교채널에서의 합용량

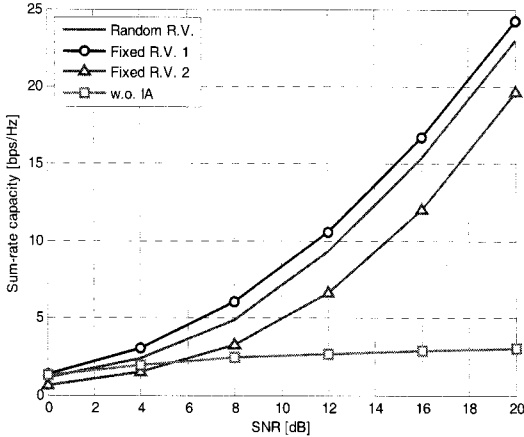


그림 4. Well-conditioned 간섭 채널에서 부분공간 간섭 정렬 기법 적용에 의한 합용량

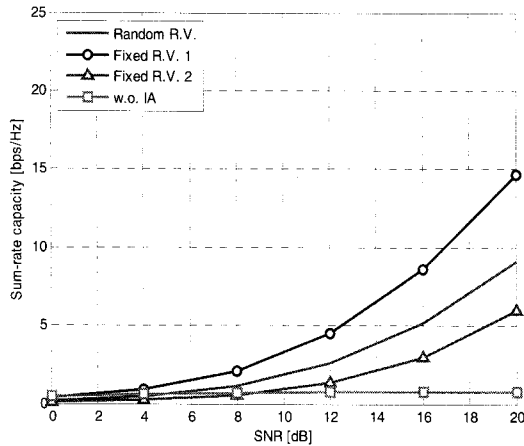


그림 5. Ill-conditioned 간섭 채널에서 부분공간 간섭정렬 기법 적용에 의한 합용량

스 벡터에 의해 전체 합용량이 달라짐을 확인할 수 있다. 다음은 채널의 correlation coefficient에 의한 합용량 변화에 대한 분석이다.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[XY] - \mu_X \mu_Y}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (10)$$

where μ : mean
 σ : standard deviation

이때, cov는 임의의 두 변수 X와 Y의 공분산을 나타낸다. 두 변수가 완벽히 uncorrelation 된 상태라면 correlation coefficient는 0이며, 완벽히 correlation 된 상태라면 correlation coefficient는 1이 된다^[8]. 위와 같이 정의한 correlation coefficient에 의한 채널 생성은 [9]에 소개된 방법에 따라 생성할 수 있다.

Correlation coefficient가 0인 채널은 직교 채널로 간주할 수 있으며, 또한 correlation coefficient가 1인 채널은 간섭 채널로 볼 수 있다. 결과 그림 6과 7을 보면 앞의 결과들과 마찬가지로, 사용하는 레퍼런스 벡터와 채널에 따라 합용량이 변화됨을 확인할 수 있다. 또한 correlation coefficient가 1인 채널은 간섭 채널로 간섭 정렬 기법을 적용하지 않았을 경우, 간섭의 영향으로 인해 상당히 낮은 합용량을 나타내고 있음을 알 수 있다.

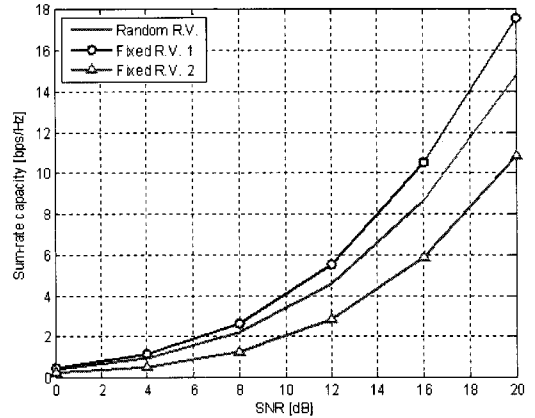


그림 6. 부분공간 간섭정렬 기법 적용에 의한 합용량 (Correlation Coefficient = 0)

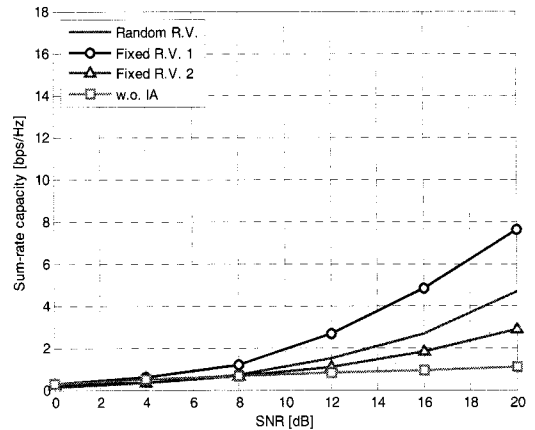


그림 7. 부분공간 간섭정렬 기법 적용에 의한 합용량 (Correlation Coefficient = 1)

3.2 레퍼런스 벡터 원소들의 크기 분산에 의한 합용량 변화

이번 절에서는 사용되는 레퍼런스 벡터 원소들의 크기의 분산에 의해 합용량이 변화함을 모의실험 결과를 통해 확인한다.

그림 8은 레퍼런스 벡터 원소들의 크기 분산에 의한 합용량을 나타내는 결과이다. 결과로부터 분산의 크기가 작아질수록 합용량이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 분산의 크기와 합용량과의 관계를 다음의 결과 그림 9로부터 더욱 명확하게 알 수 있다.

그림 9의 결과를 보면 다소 fluctuation은 있지만 대체적으로 분산이 작아질수록 합용량이 높아지는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 따라서 다음 장에서는 이러한 레퍼런스 벡터 원소의 크기의 분산이 작아질수록 합용량이 향상되는 경향을 이용한 레퍼런스 벡터 설정 알고리즘을 제안한다.

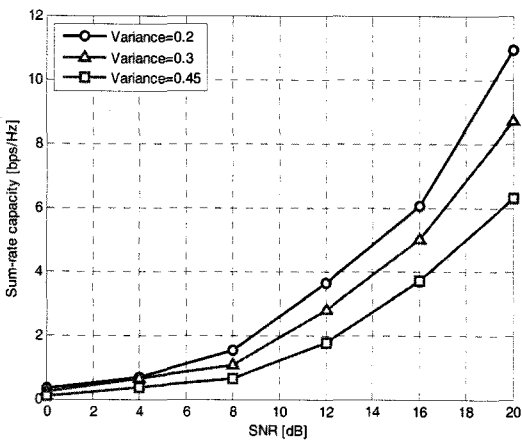


그림 8. 분산에 의한 합용량 변화

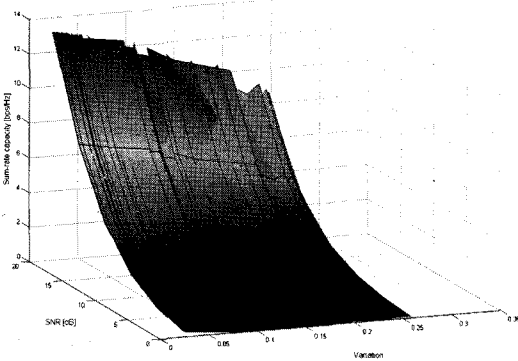


그림 9. 분산 및 SNR 변화에 의한 합용량 변화

IV. 제안된 벡터 원소들의 크기 분산을 고려한 레퍼런스 벡터 설정 기법

3장의 결과들을 통해 사용되는 레퍼런스 벡터와 채널 환경에 따라 시스템 전체의 합용량이 변화함을 확인하였으며, 사용되는 레퍼런스 벡터 원소들의 크기 분산이 작아짐에 의해 전체 합용량이 향상되는 경향이 있음을 확인하였다. 따라서 이번 장에서는 다중 셀 환경에서 부분공간 간섭정렬 기법 적용 시 셀 용량을 향상시킬 수 있는 벡터 원소들의 크기 분산을 고려한 새로운 레퍼런스 벡터 설정 알고리즘을 제안한다.

부분공간 간섭 정렬 기법을 적용하였을 경우, 셀 a 에서의 합용량은 식 (9)는 식(11)로 다시 정리 할 수 있다.

부분공간 간섭 정렬 기법을 적용하였을 경우, 셀 a 에서의 합용량은 식 (9)는 식(11)로 다시 정리 할 수 있다.

$$C_a = \sum_{i=1}^{K_a} \log_2 \left(1 + \frac{\|(\mathbf{v}_i^a)^H (\mathbf{H}_{Ua}^{Ba})^H \mathbf{v}_i^a\|^2}{\sum_{i=1}^{K_a} \left(\|(\mathbf{v}_i^a - \mathbf{v}_i^a)^H (\mathbf{H}_{Ua}^{Ba})^H \mathbf{v}_i^a\|^2 + \|(\mathbf{v}_i^a)^H (\mathbf{H}_{Ua}^{Ba})^H \mathbf{v}_i^a\|^2 \right) + \text{Noise}} \right) \quad (11)$$

이때, \mathbf{u} 는 수신단에 간섭을 제거하기 위해 사용하는 벡터이며, \mathbf{v}_{ik} 는 셀 i 의 k 번째 사용자의 송신 벡터를 나타낸다. \mathbf{H}_{Uik}^{By} 는 셀 i 의 k 번째 사용자와 기지국 By 간 채널을 나타낸다. $\mathbf{H}_{Uik}^{By,j}$ 는 채널 \mathbf{H}_{Uik}^{By} 를 크로네커 곱 형태로 분리한 j 번째 행렬을 나타내며, \mathbf{v}_i^a 는 레퍼런스 벡터, \mathbf{v}_i^a 은 레퍼런스 벡터에 직교하는 벡터를 나타낸다.

식 (11)의 셀 a 에서의 합용량에 관한 식에서, 분모의 간섭항은 간섭 정렬 알고리즘을 적용하면 제거할 수 있다. 따라서 간섭 정렬 알고리즘 적용 시 합용량을 향상시키기 위해서는 신호항의 $\|\mathbf{u}^H \mathbf{H}_{Uak}^{Ba} \mathbf{v}_{ak}\|^2$ 를 최대화 시키는 방법을 생각해 볼 수 있다. 따라서 식 (11)에 따라 셀 a 에서의 합용량은 레퍼런스 벡터와 채널의 두 가지 변수에 의해 변하게 됨을 알 수 있고, 채널은 조절할 수 있는 사항이 아니므로, 결국 레퍼런스 벡터의 설정 방법에 의해 합용량을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

식 (11)의 신호항을 행렬 형태로 표현하면 식 (12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left\{ \begin{matrix} [u_1 & u_2 & u_3] \\ \vdots \\ \end{matrix} \begin{matrix} \begin{bmatrix} a_{11}^{Ba,2} & a_{12}^{Ba,2} & a_{13}^{Ba,2} & c_{11}^{Ba,2} & c_{12}^{Ba,2} & c_{13}^{Ba,2} \\ a_{21}^{Ba,2} & a_{22}^{Ba,2} & a_{23}^{Ba,2} & c_{21}^{Ba,2} & c_{22}^{Ba,2} & c_{23}^{Ba,2} \\ a_{31}^{Ba,2} & a_{32}^{Ba,2} & a_{33}^{Ba,2} & c_{31}^{Ba,2} & c_{32}^{Ba,2} & c_{33}^{Ba,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_{Ua}^{Ba} \\ \mathbf{v}_{ak} \end{matrix} \right\} \otimes \left\{ \begin{matrix} [u_1 & u_2 & u_3] \\ \vdots \\ \end{matrix} \begin{matrix} \begin{bmatrix} a_{11}^{Ba,1} & a_{12}^{Ba,1} & a_{13}^{Ba,1} & b_{11}^{Ba,1} & b_{12}^{Ba,1} & b_{13}^{Ba,1} \\ a_{21}^{Ba,1} & a_{22}^{Ba,1} & a_{23}^{Ba,1} & b_{21}^{Ba,1} & b_{22}^{Ba,1} & b_{23}^{Ba,1} \\ a_{31}^{Ba,1} & a_{32}^{Ba,1} & a_{33}^{Ba,1} & b_{31}^{Ba,1} & b_{32}^{Ba,1} & b_{33}^{Ba,1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H}_{Ua}^{Ba} \\ \mathbf{v}_{ak} \end{matrix} \right\} \quad (12)$$

이때, v_i 는 레퍼런스 벡터의 i 번째 원소를 나타내며, u_i 는 레퍼런스 벡터에 직교하는 벡터의 i 번째 원소를 나타낸다. 또한, $a_{ij}^{Br,k}$ 및 $c_{ij}^{Br,k}$ 는 각각 크로네커 곱 형태로 분리된 채널의 i 번째 행의 j 번째 열 원소를 나타낸다.

식 (12)를 살펴보면, 각 행렬들의 곱의 norm을 크게 함으로써 신호항의 크기를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \cdot v_1 \\ a_{22} \cdot v_2 \\ a_{33} \cdot v_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

간단한 예로 식 (13)과 같은 3×3 대각행렬의 경우를 살펴보면, 행렬 곱의 norm이 큰 경우는 각 원소들이 곱해질 때 큰 값을 갖는 원소들은 큰 값을 갖는 원소들끼리, 작은 값을 갖는 원소들은 작은 값을 갖는 원소들끼리 곱해지는 경우가 norm이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0.01 \\ 0.0001 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0.01 \\ 0.0001 \end{bmatrix} &\Rightarrow norm=1.0001 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.01 \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.01 \\ 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix} &\Rightarrow norm=0.0173 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5802 \\ 0.5802 \\ 0.005802 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.5802 \\ 0.05802 \\ 0.005802 \end{bmatrix} &\Rightarrow norm=0.5831 \end{aligned} \quad (14)$$

예를 들어, 식 (14)의 경우를 살펴보면 큰 값을 갖는 원소들끼리 곱해지는 경우인 첫 번째 경우가 가장 큰 norm을 갖게 됨을 확인할 수 있으며, 작은 값과 큰 값이 곱해지는 두 번째의 경우 가장 작은 norm을 갖게 됨을 볼 수 있다. 또한, 같은 값을 갖는 원소가 곱해지는 세 번째의 경우 상대적으로 중간 정도 크기의 norm을 갖게 됨을 확인할 수 있다.

위 예에서 알 수 있듯이, 신호항의 크기를 최대화시키기 위해서는 채널 행렬에서 채널값이 큰 원소에 큰 값을 갖는 레퍼런스 벡터의 원소가 곱해지도록 설정해야 한다.

그러나 실제 시스템의 경우 채널의 상황이 계속 변하기 때문에 채널 행렬의 값을 고려하여 레퍼런스 벡터의 값을 최적화시키기는 사실상 불가능하다. 또한, 끊임없이 변화하는 채널 상황에서 벡터 원소들의 크기의 편차가 큰 벡터를 레퍼런스 벡터로 사용할 경우 식 (14)의 경우와 같이 상대적으로 결과값이 작아지는

경우가 많이 발생한다.

따라서 본 논문에서는 벡터 원소들의 크기의 분산이 작은 벡터를 레퍼런스 벡터로 사용하는 알고리즘을 제안한다. 레퍼런스 벡터 원소들의 크기가 비슷한 값을 갖는 경우 식 (14)의 경우에서 알 수 있듯이 평균적으로 높은 합용량을 보장 받을 수 있게 된다. 제안하고 있는 알고리즘의 절차를 그림 10에 나타내었다.

먼저, 정규화된 복소 벡터를 i 개를 생성한 후, 생성된 i 개의 벡터 원소들의 크기를 계산한다. 각각의 벡터를 마다 계산된 크기들의 분산을 계산한 후, 분산이 작은 벡터들을 레퍼런스 벡터의 후보 벡터로 선정한다. 선정된 후보 벡터들은 각각의 원소들의 크기가 비슷하므로, 어느 채널 환경에서든 평균적으로 높은 합용량을 나타내게 된다. 그 후, 선정된 후보 벡터들 중 가장 높은 합용량을 나타내는 벡터를 레퍼런스 벡터로 선정하여 모든 사용자들이 동일하게 선정된 레퍼런스 벡터를 사용한다.

위와 같은 절차를 통해 수많은 랜덤한 벡터들 중 어느 채널 환경에서든 높은 합용량을 나타내는 레퍼런스 벡터를 간단히 설정할 수 있게 된다.

1. i 개의 Normalization된 Complex 벡터 생성

$$V_1 = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_i]^T$$

$$V_2 = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_i]^T$$

$$\vdots$$

$$V_i = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_i]^T$$

where $a_k, b_k, z_k = k$ -th element of each vector

2. 생성된 각 벡터 원소들의 크기 계산

$$V_1 = [|a_1| \ |a_2| \ \dots \ |a_i|]^T$$

$$V_2 = [|b_1| \ |b_2| \ \dots \ |b_i|]^T$$

$$\vdots$$

$$V_i = [|z_1| \ |z_2| \ \dots \ |z_i|]^T$$

3. 원소들의 크기의 분산이 작은 벡터들을 후보 레퍼런스 벡터로 선정

$$\text{var}[V_i] < T_i$$

where $\text{var}[V_i]$: Magnitude Variance of Each Vector Elements
 T_i : Threshold

4. 후보 레퍼런스 벡터들 중 높은 합용량을 나타내는 레퍼런스 벡터 선정

$$\max \left(\sum_{i=1}^M \left(\sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{|u^H H_{i,k}^H V_i|^2}{\text{Interference} + N_0} \right) \right) \right)$$

$$= \max \left(\sum_{i=1}^M C_i \right)$$

where C_i : Total sum-rate using reference vector V_i

5. 모든 사용자는 선정된 레퍼런스 벡터 사용

그림 10. 제안된 알고리즘의 절차

V. 모의실험 및 결과 분석

3개의 셀에 3명의 사용자가 존재하는 셀룰러 시스템

템에서 제안된 알고리즘을 적용하였을 경우 시뮬레이션을 통해 찾은 가장 높은 합용량을 나타내는 최적화된 레퍼런스 벡터는 표 1과 같다.

표 1에서 제안한 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우의 합용량 결과는 그림 11과 같다. 결과로부터 제안된 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우 임의의 동일한 레퍼런스 벡터를 사용하는 기존 알고리즘보다 평균적으로 약 50% 정도 높은 합용량을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우 다양한 채널 변화에 대하여 평균적으로 높은 합용량을 보장 받을 수 있게 된다.

한편, 분산이 0인 레퍼런스 벡터와 비교한 결과 그래프를 그림 12, 그림 13, 그림 14에 나타내었다. 그림 12와 그림 13은 랜덤하게 생성한 한 채널 샘플에서의 합용량을 나타내는 결과로써 두 결과 그래프를 비교하여 보면, 두 경우 모두 임의의 동일한 레퍼런스 벡터를 사용하는 기존의 알고리즘보다는 높은 합용량을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 그림 12의 경우 제안한 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우의 합용량이 분산이 0인 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우의 합용량보다 높은 합용량을 나타내고 있지만, 그림 13의 결과를 보면 분산이 0인 레퍼런스 벡터를 사용하였을

표 1. 3개의 셀에 3명의 사용자가 존재하는 셀룰러 시스템을 위하여 제안된 레퍼런스 벡터

Proposed Reference Vector
-0.50734 - 0.47464i
-0.41045 + 0.48503i
-0.33074 - 0.06487i
Variance = 0.03

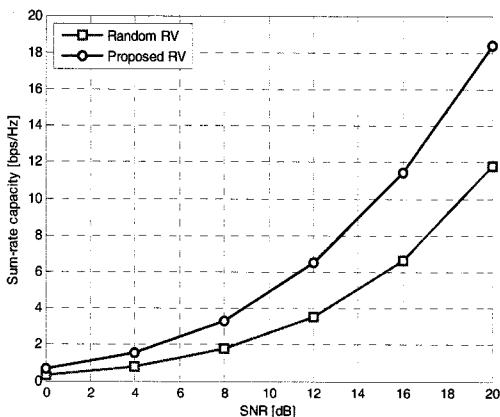


그림 11. 제안된 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우의 합용량

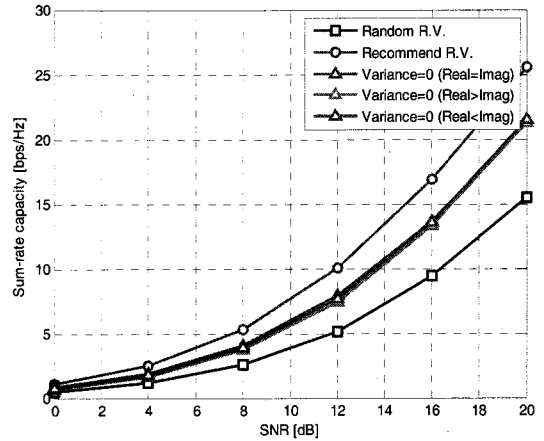


그림 12. 한 채널 샘플1에서의 합용량

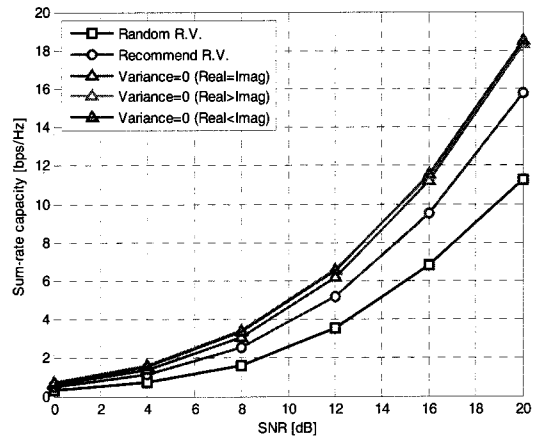


그림 13. 한 채널 샘플2에서의 합용량

경우의 합용량이 더 높게 나타나고 있다. 이를 통해 채널 상황이 변할 때 마다 다른 결과를 나타냄을 알 수 있다.

그림 14는 ensemble 채널에서의 평균적인 합용량으로 제안한 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우 임의의 레퍼런스 벡터를 사용하는 경우에 비하여 약 50% 정도, 분산이 0인 레퍼런스 벡터를 사용하는 경우에 비해서는 약 30% 정도 높은 합용량을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 3개의 셀에 3명의 사용자가 존재하는 셀룰러 시스템에서 제안한 레퍼런스 벡터를 사용하였을 경우, 다양한 채널 환경에서 평균적으로 높은 합용량을 보장 받을 수 있게 된다. 또한, 분산이 작을수록 합용량이 높아지는 경향이 있기는 하지만, 그림 9의 결과에서 fluctuation이 나타나는 것처럼, 분산이 가장 작은 벡터가 언제나 가장 높은 합용량을 제공하지는 않음을 알 수 있다.

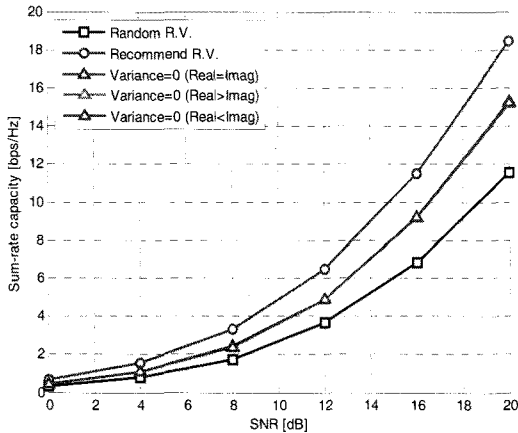


그림 14. Ensemble 채널에서의 평균적인 합용량

VI. 결 론

본 논문에서는 다중 셀 환경에서 셀 간 간섭을 완화시키기 위한 방법으로 부분공간 간섭 정렬을 적용하였을 경우, 높은 합용량을 제공하는 레퍼런스 벡터 설정 알고리즘을 제안하였다. 모든 사용자가 임의의 동일한 레퍼런스 벡터를 사용하는 기존 알고리즘은 사용되는 레퍼런스 벡터 및 채널 상황에 따라 전체 합용량이 크게 변하는 문제점을 갖고 있다. 이에 본 논문에서는 레퍼런스 벡터와 채널 변화에 의한 시스템의 합용량을 분석하고, 레퍼런스 벡터의 크기 분산이 작아질수록 합용량이 높아지는 경향이 있음을 확인하였다. 이러한 분석을 바탕으로 제안된 알고리즘은 벡터 원소들의 크기 분산을 고려하여 레퍼런스 벡터를 선정함으로써 다양한 채널 환경에서 평균적으로 높은 합용량을 제공한다. 3개의 셀에 3명의 사용자가 존재하는 셀룰러 시스템에서 제안된 알고리즘에 의한 레퍼런스 벡터를 사용할 경우, 기존 알고리즘과 비교하여 평균적으로 약 50% 이상 향상된 합용량을 제공함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] X. Zhang, C. He, L. Jiang and J. Xu, "Inter-cell Interference Coordination based on Softer Frequency Reuse in OFDMA Cellular Systems," in *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing*, Jun. 2008, pp.270-275.

[2] 3GPP, R1-082896, "Coordinated Multi-cell Transmission for LTE-Advanced Downlink,"

ETRI.

[3] O. Somekh, O. Simeone, Y. Bar-Ness, A. M. Haimovich, U. Spagnolini, and S. S. (Shitz), *Distributed Antenna Systems: Open Architecture for Future Wireless Communications, ch. An Information Theoretic View of Distributed Antenna Processing in Cellular Systems*, Auerbach Publications, CRC Press, May. 2007.

[4] Rahman M., Yanikomeroglu H., "Inter-Cell Interference Coordination in OFDMA Networks: A Novel Approach Based on Integer Programming," in *Proc. VTC-Spring*, May. 2010, pp.1-5.

[5] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-User Interference Channel," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol.54, No.8, pp.3424-3441, Aug. 2008.

[6] Changho Suh and David Tse, "Interference alignment for cellular networks," in *Proc. Allerton Conf. on Commun., Control and Computing*, Sep. 2008, pp.23-26.

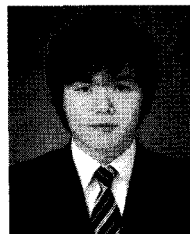
[7] 한동걸, 휘빙, 장경희, 구본태, "부분공간 간섭 정렬 기법의 레퍼런스 벡터와 채널에 따른 시스템 합용량 변화," *한국통신학회 추계종합학술발표회*, 2010. 11, session 6C-5.

[8] Howard Anton and Robert C. Busby, *Contemporary Linear Algebra*, sep. 2002, John Wiley & Sons, Inc.

[9] A. Paulraj et.al, *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, 2003, Cambridge.

한 동 걸 (DongKeol Han)

준회원



2009년 2월 인하대학교 전자공학과(공학사)

2011년 2월 인하대학교 정보통신대학원(공학석사)

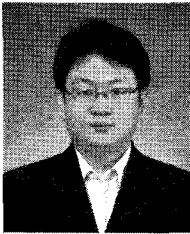
2011년~현재 LG U+ 데이터 서비스 개발팀

<관심분야> MIMO Detection,

Interference Manage -ment, 4G 이동통신

회 빙 (Bing Hui)

정회원



2005년 7월 중국 동북대학교
정보통신공학과(공학사)
2009년 8월 인하대학교 정보통신
대학원(공학석사)
2009년~현재 인하대학교 정보
통신 대학원 박사과정
<관심분야> OFDM / MIMO

Systems, MIMO Detection algorithm, WiMAX,
3GPP LTE

구 본 태 (BonTae Koo)

중신회원



1989년 2월 고려대학교 전자공
학과 (공학사)
1991년 2월 고려대학교 대학원
전자공학과 (공학석사)
1991년~1997년 현대전자
1999년~현재 한국전자통신연구
원 통방융합 SoC연구팀 팀장

장 경 희 (KyungHi Chang)

중신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공
학과(공학사)
1987년 2월 연세대학교 전자공
학과(공학석사)
1992년 8월 Texas A & M
Univ., EE Dept. (Ph.D.)
1989년~1990년 삼성종합기술원
주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구
소 무선전송방식연구팀장 (책임연구원)

2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수

<관심분야> 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선전
송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술,
Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooper-
ative Relaying System, RFID/USN Systems,
Mobile Ad-hoc Network, 해상수중 통신 등