

다중셀 간섭 네트워크와 중첩된 D2D 통신을 위한 효과적인 간섭 정렬 기법

추 신^{*}, 강 충 구[°]

Effective Interference Alignment for Device-to-Device Communication Underlaid in Multi-Cell Interference Network

Xin Qu^{*}, Chung Gu Kang[°]

요 약

K 개의 셀과 각 셀에서 2개의 단말간 직접 통신(device-to-device communication: D2D communication) 링크 간에 셀룰러 하향 링크 자원을 재사용하는 다중셀 간섭 시스템에 중첩되어 있는 D2D 통신 모델을 고려한다. 본 논문에서는 현재의 셀 또는 인접 셀에 간섭을 미치지 않는 다수 개의 링크를 선택하거나 또는 전력 제어를 통해 다수 개의 링크가 어떤 기지국에도 간섭을 미치지 않는다고 가정했을 때, 간섭 정렬(interference alignment: IA)를 통해 셀간 및 셀 내의 하향링크 간섭을 효과적으로 없앨 수 있다는 것을 보인다. 특히, 2개의 D2D 통신 쌍에 대해서는 간섭 채널에서 이론적으로 가능한 최대 자유도를 실현할 수 있는 방법을 제시하며, 기지국과 모든 단말의 송신 및 수신 안테나 개수가 각각 M 일 때 그 자유도는 $(K+1)M$ 로 주어지는 것을 보인다.

Key Words : Device-to-Device (D2D) Communication, Cellular System, Interference Alignment, Degree of Freedom (DOF)

ABSTRACT

We consider the device-to-device (D2D) communication underlying multi-cell interference system, in which the cellular downlink (DL) resource is reused by K cells and two D2D transmission links within each cell. In this paper, it has been shown that the downlink intra-cell and inter-cell interference can be effectively handled by interference alignment (IA) technique, as long as the simultaneous D2D links are properly selected or power-controlled so that they may not incur interference to the base stations in the same and neighbor cells. In particular, we provides the IA technique that can achieve the theoretically maximum possible degree of freedom (DOF), demonstrating that a total of $(K+1)M$ degrees of freedom (DOFs) can be achieved for K -cell interference system with two underlying D2D links, where base stations, cellular UE's, and D2D UE's all have M transmit and receive antennas.

I. 서 론

동일대역(inband) D2D 통신은 셀룰러 네트워크 위에서 underlay 또는 overlay 형태로 구현될 수 있다. 동일대역 내의 underlying 형태는 D2D 링크들이 셀룰러 링크와 동일한 주파수 자원을 중첩하여 공유하는 방식이다. 따라서, underlying 방식에서는 D2D 링크의 성능을 일정 값으로 유지하면서, 셀룰러 링크에 특정 임계값 이하의 제한된 간섭이 미치도록 해야 한다^[1]. 본 논문에서는 하향링크 셀룰러 자원을 underlying 형태로 공유하는 D2D 통신 기법에 대해 살펴보고자 한다. 기지국은 D2D 단말에 비해 상대적으로 높은 송신 전력을 사용하기 때문에 D2D 단말에게 큰 간섭을 미칠 수 있고, D2D 단말은 위치에 따라 셀룰러 단말에게 심각한 간섭을 미칠 수 있다. 기존의 연구에서는 D2D 단말이 셀룰러 단말에게 미치는 간섭을 줄이기 위해 전력제어를 주로 고려하며, 여러 가

* This research was supported by the KCC (Korea Communications Commission), Korea, under the R&D program supervised by the KCA (Korea Communications Agency) (KCA-2012-08-911-05-001).

• First Author : 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, quxin@korea.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : 고려대학교 전기전자전파공학과 무선정보시스템공학 연구실, ccgkang@korea.ac.kr, 중신회원
 논문번호 : KICS2013-12-546, Received December 22, 2013; Reviewed January 8, 2014; Accepted March 3, 2014

지 형태의 전력제어 방식이 있다. 하지만, 셀룰러 링크가 D2D 단말에 미치는 간섭을 제어할 수 있는 방법은 간단하지 않다.

본 논문에서는 D2D 링크들이 중첩되어 있는 다중 셀 간섭 시스템에서 구현 가능한 IA 기법을 제안한다. [2]에서 K 명 사용자의 SISO 간섭 채널에 대한 IA 개념을 처음 소개했으며, 이를 통해 $K/2$ 의 DOF (즉, 사용자당 $1/2$ 의 DOF)를 실현할 수 있다는 것을 보였다. 한편, MIMO 채널의 경우에는 송수신단에서 각각 M 개의 안테나를 사용하는 symmetric-square 조건에서 K 개의 송수신단 쌍이 각각 d 의 DOF를 요구한다고 가정했을 때, $M \geq d(K+1)/2$ 이면 IA의 해가 존재하는 것이 증명되었다^[3]. 이 결과에 따르면, symmetric-square 조건에서는 최대 $2MK/(K+1)$ 의 DOF를 얻을 수 있다. 반면에, 본 논문에서는 두 개의 D2D 통신 쌍들이 현재 셀 및 인접 셀에 간섭을 미치지 않게끔 적절히 선택되거나 전력 조절이 되었다고 가정했을 때, 2개의 D2D 링크에 대해서 간섭 채널에서 이론적으로 가능한 최대 자유도를 실현할 수 있는 방법을 제시하였다 또한, 이 때 그 자유도는 $(K+1)/M$ 가 되는 것을 증명하였다.

II. 시스템 모델

각 셀의 경계에 하나의 셀룰러 단말이 존재할 때 모든 자원을 서로 재사용하면서 공유하는 K 개 셀의 간섭 네트워크를 고려하자. 또한, 각 셀에는 셀룰러 하향 링크와 자원을 공유하는 다수 개의 D2D 링크가 선택된다고 가정하자. 이때 모든 기지국, 셀룰러 단말, 그리고 D2D 단말은 모두 M 개의 안테나를 사용한다. k 번째 셀의 셀룰러 단말은 CUE_k , k 번째 셀의 l 번째 D2D 단말은 $DUE_l^{[k]}$ 라고 표기하자. 본 논문에서는 $K=3$ 일 때, D2D 링크의 송신 전력을 제어함으로써 셀룰러 단말에 미치는 간섭이 정해진 임계값을 넘지 않도록 하거나 또는 셀룰러 단말에 간섭이 미치지 않는 D2D 링크를 선택한다고 가정한다. 본 논문에서는 2개의 D2D 링크를 선택하는 시나리오에만 국한하며, 다수의 D2D 링크로 여전히 확장이 가능하다. 셀룰러 링크가 우선적으로 보호 받는 채널이므로, 이렇게 되면 기지국이 D2D 링크에 치명적인 간섭을 미치는 상황이 된다. 따라서, 본 논문에서는 기지국이 D2D 링크에 미치는 간섭에 초점을 맞춘다. 또한, 각 셀 내에서 선택된 2개의 D2D 링크 상호간 간섭도 고려되어야 한다. 따라서, 이러한 두 가지 형태의 셀 내 간섭을

다룬다. 추가적으로 인접 셀의 기지국 및 D2D 링크로부터 현재 셀의 셀룰러 단말 및 D2D 링크로 각각 수신되는 셀 간의 간섭도 고려되어야 한다.

III. 제안하는 IA 기법

3.1 셀 내 간섭 시나리오

먼저 단일 셀에서 셀 내의 간섭 시나리오를 살펴보면, BS_1 은 CUE_1 으로, $DUE_1^{[1]}$ 은 $DUE_3^{[1]}$ 으로, $DUE_2^{[1]}$ 은 $DUE_4^{[1]}$ 로 각각 신호를 송신한다고 하자. 2개 D2D 쌍은 CUE_1 으로 심각한 간섭을 미치지 않는 단말들로 선택되거나 또는 전력 제어 메커니즘을 통해 특정한 임계값 이하의 간섭을 미친다고 가정한다. 그러면, 셀 내의 간섭은 2개 D2D 링크간 간섭과 기지국이 D2D 링크에 미치는 간섭으로 각각 구분된다. BS_1 , $DUE_1^{[1]}$, $DUE_3^{[1]}$ 이 전송하고 있는 패킷의 수를 각각 $d_1 \equiv M/3$, $d_1^{[1]} \equiv M/3$, $d_3^{[1]} \equiv 2M/3$ 이라고 가정하자. BS_1 과 CUE_1 , BS_1 과 $\{DUE_3^{[1]}\}_{l=2,4}$ 간의 채널을 각각 $M \times M$ 채널 행렬 \mathbf{G}_{11} 와 $\mathbf{H}_{1l}^{[1]}$ 로 나타낸다. 그리고, $\mathbf{F}_{l_2}^{[1]}$ 은 $DUE_{l_2}^{[1]}$ 과 $DUE_2^{[1]}$ 간의 $M \times M$ 채널 행렬을 나타낸다. 또한, $M \times d_1$ 행렬 \mathbf{V}_1 과 $M \times d_1^{[1]}$ 행렬 $\mathbf{W}_l^{[1]}$ 는 각각 BS_1 과 $\{DUE_{l_1}^{[1]}\}_{l_1=1,3}$ 의 송신 pre-coding 행렬을 의미한다.

검출이 성공적으로 수행되기 위해서는 신호 공간과 간섭 공간 차원의 합이 각 단말의 수신 안테나 개수인 M 을 초과할 수 없다. 따라서, $DUE_2^{[1]}$ 에서 $d_1^{[1]} \equiv M/3$ 개의 신호 패킷이 온전히 검출되기 위해서는 간섭 공간의 차원이 $2M/3$ 을 넘어서는 안 된다. 이와 마찬가지로, $DUE_4^{[1]}$ 또한 간섭 공간의 차원이 $M/3$ 을 초과할 수 없다. 이 결과를 바탕으로, 수신 단말인 $DUE_2^{[1]}$ 과 $DUE_4^{[1]}$ 에서 얻어지는 IA 식은 각각 다음과 같다.

$$\text{span}(\mathbf{H}_{21}^{[1]} \mathbf{V}_1) \subset \text{span}(\mathbf{F}_{23}^{[1]} \mathbf{W}_3^{[1]}) \quad (1)$$

$$\text{span}(\mathbf{H}_{41}^{[1]} \mathbf{V}_1) \subset \text{span}(\mathbf{F}_{41}^{[1]} \mathbf{W}_1^{[1]}) \quad (2)$$

(2) 식에서 좌변과 우변의 차원은 $\dim(\mathbf{H}_{41}^{[1]} \mathbf{V}_1) = \dim(\mathbf{F}_{41}^{[1]} \mathbf{W}_1^{[1]}) = M/3$ 이므로, (2)식은

$\mathbf{W}_1^{[1]} = (\mathbf{F}_{41}^{[1]})^{-1} \mathbf{H}_{41}^{[1]} \mathbf{V}_1$ 으로 다시 쓸 수 있다. 여기서 M -차원 공간을 스캔할 수 있는 M 개의 단위 기저벡터가 있다고 가정하자. 만약 M 개 중 $M/3$ 개의 기저벡터를 사용하여 $\mathbf{V}_1 = [\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_{M/3}]$ 을 구성한다면, $\mathbf{W}_1^{[1]}$ 은 \mathbf{V}_1 으로부터 직접 구할 수 있다.

다음으로 $\mathbf{W}_3^{[1]}$ 의 랭크는 $\text{rank}(\mathbf{W}_3^{[1]}) = 2M/3$ 으로 주어지는데, 이를 $\mathbf{W}_3^{[1]} = [\mathbf{W}_{31}^{[1]} \ \mathbf{W}_{32}^{[1]}]$ 과 같이 두 부분으로 나눌 수 있다. 이는 $\mathbf{W}_{31}^{[1]} \cap \mathbf{W}_{32}^{[1]} = \emptyset$ 이고, $\text{rank}(\mathbf{W}_{31}^{[1]}) = \text{rank}(\mathbf{W}_{32}^{[1]}) = M/3$ 을 의미한다. 그러므로, $\mathbf{W}_{31}^{[1]}$ 의 측면에서 (1)을 고려하면 $\text{span}(\mathbf{H}_{21}^{[1]} \mathbf{V}_1) = \text{span}(\mathbf{F}_{23}^{[1]} \mathbf{W}_{31}^{[1]})$ 이라고 할 수 있고, 결과적으로 $\mathbf{W}_{31}^{[1]} = (\mathbf{F}_{23}^{[1]})^{-1} \mathbf{H}_{21}^{[1]} \mathbf{V}_1$ 으로 주어진다. 앞에서 $\mathbf{W}_{32}^{[1]}$ 는 $\mathbf{W}_{31}^{[1]}$ 과 독립적이라고 하였으므로, $\mathbf{W}_{31}^{[1]}$ 의 직교공공간에서 임의의 벡터를 선택함으로써 $\mathbf{W}_{32}^{[1]}$ 도 구할 수 있다. 결론적으로, $\mathbf{V}_1, \mathbf{W}_1^{[1]}, \mathbf{W}_3^{[1]}$ 은 (1)과 (2)식을 통해 구할 수 있고, 그 결과 모든 셀 내의 간섭이 정렬되어 원하는 신호 패킷을 성공적으로 검출할 수 있게 된다.

3.2 셀간 간섭 시나리오

$K=3$ 인 경우에 셀간 간섭 모델을 살펴본다. 일반적으로 한 개 셀에서 동시에 전송하는 패킷이 증가하면 다른 모든 셀에 추가적인 간섭이 발생하므로, 각 셀에서 실현 가능한 DOF는 감소하게 된다. 하지만, D2D 링크가 인접 셀에 간섭을 미치지 않도록 적절히 선택된다면 추가적인 용량 증대가 가능하다. 즉, 셀간 간섭 모델에서는 오직 셀간의 셀룰러 링크 간섭만을 고려할 수 있다. \mathbf{G}_{ji} 는 BS_i 와 CUE_j 간의 $M \times M$ 채널 행렬을 나타낸다 ($i, j = 1, 2, 3$). 셀 내 간섭 시나리오에서 언급했던 것처럼 BS_i 는 $d_i = M/3$ 개의 신호 패킷을 CUE_j 에게 송신하고, pre-coding 행렬 \mathbf{V}_i 는 이전 과정을 통해 이미 결정되어 있는 상태이다. 즉, CUE_j 에서는 총 $\sum_{i=1}^3 d_i = M$ 의 패킷을 수신하게 된다. 따라서, 각각의 CUE_j 는 수신 안테나 수와 동일한 수의 패킷을 수신하게 되므로, 자신의 신호 패킷을 별도의 작업 없이 검출할 수 있다. 결과적으로 $K=3$ 인 경우에는 총 $DOF = (M + M/3) \cdot 3$ 의 DOF를 얻을 수 있다. 이 결과는 K 개의 셀로 바로 일반화할 수 있다. 각 BS_k 는 총 $d_k = M/K$ 의 신호 패킷을 CUE_k 에게 전송한다고 가정하자 ($k = 1, 2, \dots, K$). k 번째 셀

내에서는 2개의 D2D 링크에 대해 (1) 및 (2)식과 같은 방법으로 IA 식을 세움으로써 총 M 개의 신호 패킷을 동시에 전송 가능하다. 이때, pre-coding 행렬 \mathbf{V}_k 및 $\mathbf{W}_i^{[k]}$ 는 (1)과 (2)식을 통해 구할 수 있다. 결과적으로, 일반적인 K 개 셀의 경우에는 총 $(M + M/K)K = (K+1)M$ 의 DOF를 얻을 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 D2D 링크가 셀룰러 링크와 중첩되어 있는 K 개 셀간 간섭 모델에 대해서 제안하는 IA 기법을 사용하여 $(K+1)M$ 의 DOF를 얻을 수 있다는 것을 보였다. D2D 링크가 없는 MIMO 환경에서 최대 $2MK/(K+1)$ 의 DOF를 얻을 수 있다는 기존 결과에 대비하여, 제안한 방식은 $(K+1)^2/(2K)$ 배 또는, 개략적으로 $(K+1)/2$ 배의 DOF 이득을 얻을 수 있다. 또한, 제안하는 IA 방식은 오직 셀 내의 간섭을 제어하는 데에만 사용되므로 셀 간에 채널 상태 정보 및 pre-coding 행렬에 관한 정보를 별도로 교환할 필요가 없어 오버헤드를 줄일 수 있다.

References

- [1] Y. J. Hwang, K. W. Sung, S.-L. Kim, "Feasibility of Massive Device-to-Device Communications in Cellular Networks," *J. KICS*, vol. 37B, no. 12, pp. 1091-1101, Dec. 2012.
- [2] V. Cadambe and S. Jafar, "Interference alignment and the degrees of freedom of the K user interference channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- [3] G. Bresler, D. Cartwright, and D. Tse, "Settling the feasibility of interference alignment for the MIMO interference channel: the symmetric square case," preprint, <http://arxiv.org/abs/1104.0888>, Apr. 2011.