

레이다와 통신시스템의 주파수 공유를 위한 간섭정렬 기술

김 동 환*, 윤 장 혁*, 정 방 철^o

Interference Alignment for Spectrum Sharing between Radar and Communication Systems

Dong-Hwan Kim*, Janghyuk Youn*,
Bang Chul Jung^o

요 약

본 논문은 레이다와 통신시스템 사이의 주파수 공유를 위해 간섭정렬기술을 제안한다. 제안한 간섭정렬 기술에서 기지국은 자신의 신호 공간 정보를 방송하고 레이다는 통신시스템 기지국의 간섭 공간에 송신 신호를 투영(Projection)하여 통신시스템에 미치는 간섭을 제거한다. 제안한 간섭정렬기술에서 레이다 시스템은 신호 투사로 인한 탐지성능의 저하가 크지 않고 통신 시스템에서는 레이다가 주는 간섭이 제거되어 전송률에 영향을 받지 않는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

Key Words : Interference alignment, Radar, Spectrum sharing, Beamforming

ABSTRACT

In this letter, we propose a novel interference alignment with radar (IAR) technique for spectrum sharing between radar and communication systems. In the IAR, each base station broadcasts its signal space, and then the radar system projects its signal into interference space of base stations so that the

inter-system interference (ISI) is eliminated at the communication system. It is shown that detection performance of radar system is not severely degraded, while the sum-rate performance of communication system is not effected by the radar system at all.

1. 서 론

차세대 이동통신을 일컫는 Beyond 5G (B5G)에서는 인터넷에 연결되는 단말의 수가 폭발적으로 증가함에 따라, 요구되는 주파수 대역폭 또한 증가할 것이다. 폭발적인 주파수 대역폭 요구량을 만족하기 위하여 최근 주파수를 공유하는 시스템이 활발히 연구되고 있다¹⁾. 특히 레이다의 경우 특정 주기에만 잠시 신호를 전송하고, 다음 주기까지 신호를 전송하지 않아 주파수 이용률이 매우 낮은 것으로 알려져 있다²⁾. 이런 레이다 시스템의 특성을 이용하여 이동통신 시스템이 레이다 시스템의 주파수를 공유하여 통신하는 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다³⁾.

그러나 레이다와의 주파수 공유를 고려할 때, 가장 큰 문제가 되는 것은 레이다와 통신시스템 사이의 시스템 간 간섭 (Inter-system interference: ISI)이다. 레이다의 송신 전력은 인근의 통신시스템에 큰 간섭으로 작용할 수 있기 때문에 레이다 신호의 통신시스템에 미치는 간섭은 반드시 관리되어야 한다. 이와 같은 ISI를 관리하기 위하여, 제안된 기술 중에는 Null space projection (NSP) 기술이 있다⁴⁾. NSP 기술은 ISI를 제거하기 위하여 레이다의 신호를 기지국과의 간섭 채널의 Null space에 투사할 때, 레이다의 탐지성능 저하에 미치는 영향이 가장 적은 기지국을 선택하는 기술이다. 하지만, 이 기술에서는 인접 셀 간에 미치는 간섭을 고려하지 않아 즉, 기지국들이 서로 다른 주파수를 사용하고 있다는 것을 가정하며, 이는 여전히 주파수 효율성의 저하를 초래한다.

따라서 본 논문에서는 모든 기지국이 동일한 주파수 대역을 사용하는 환경에서 레이다와 통신시스템의 주파수를 공유하기 위해 [5]의 Opportunistic

※ 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019-0-00964, 스펙트럼 쉐어링을 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발)

• First Author : (ORCID:0000-0002-2089-4318)Department of Electronics Engineering, Chungnam National University; Aircraft Radar System PMO, Agency for Defense Development, dhkim0812@gmail.com, 정희원

◦ Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4485-9592)Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 증신희원

* (ORCID:0000-0002-7486-8270)Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, jhyoon@o.cnu.ac.kr, 학생희원
논문번호 : 202007-151-A-LU, Received July 13, 2020; Revised July 30, 2020; Accepted July 30, 2020

interference alignment (OIA)의 개념을 적용하여, Interference alignment with Radar (IAR) 기술을 제안한다. 제안하는 기술에서 통신시스템은 OIA에서와 같이 임의의 신호 공간을 생성하여 방송하며, 레이다는 이를 수신한 뒤 레이다 송신 신호를 간섭 공간에 투사하여, 전체 통신시스템에 미치는 간섭을 제거한다.

II. 레이다-통신 간 주파수 공유를 위한 간섭정렬

2.1 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 전체 시스템은 그림 1과 같이 레이다와 통신시스템이 공존하는 상황을 고려하였다. 전체 시스템은 Y 개의 배열안테나를 가지는 MIMO 레이다 시스템과 M 개의 안테나를 가지는 K 개의 기지국, 그리고 각 셀마다 L 개의 안테나를 갖는 N 개의 사용자 단말 (UE)로 구성되어 있다. 단, 통신시스템은 [5]의 OIA 기술을 기반으로 동작한다. 이때, 레이다와 레이다의 탐지 목표 사이에는 Line of sight (LoS)가 보장된다고 가정하며, 따라서 레이다의 송신 및 수신 조향 벡터는 동일하게 다음과 같이 정의할 수 있다

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-i\pi\sin(\theta)}, \dots, e^{-i(Y-1)\pi\sin(\theta)}]^T. \quad (1)$$

θ 는 레이다의 송신 또는 수신 조향각을 나타낸다. 본 논문에서는 레이다와 탐지 목표 사이의 LoS가 보장된다고 가정하였으므로, 송신 조향각과 수신 조향각은 θ_R 로 같다고 가정한다. 즉, 송신 및 수신 조향 벡터 모두 $\mathbf{a}(\theta_R)$ 로 정의한다. $\mathbf{H}_k^R \in \mathbb{C}^{M \times Y}$ 은 레이다로부터 k 번째 기지국 사이의 채널을 나타내며, $\mathbf{H}_k^{[i,j]}$

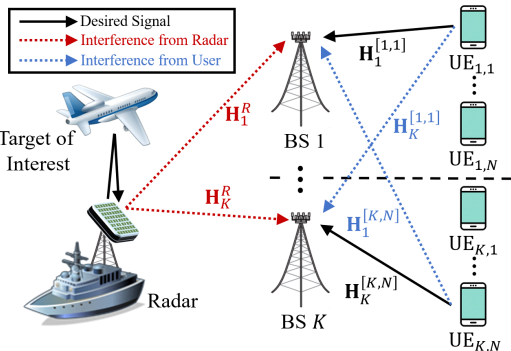


그림 1. 간섭 정렬 기반 레이다와 통신시스템의 주파수 공유 시스템 모델
Fig. 1. Interference Alignment based spectrum sharing system model of radar and communication systems

$\in \mathbb{C}^{M \times L}$ 는 i 번째 셀의 j 번째 송신 UE와 k 번째 기지국 사이의 채널을 말한다. 이때, 모든 채널의 각 성분은 서로 독립이며, 동일한 independent, identically distributed $CM(0,1)$ 의 분포를 따른다고 가정하였다.

2.2 기지국의 신호 및 간섭 공간 생성

첫째로, 통신시스템의 k 번째 기지국의 간섭 공간을 \mathbf{Q}_k 로 정의하고 다음과 같이 생성한다.

$$\mathbf{Q}_k = [\mathbf{q}_{k,1}, \dots, \mathbf{q}_{k,M-S}] \in \mathbb{C}^{M \times (M-S)}, \quad (2)$$

여기서 S 는 기지국이 통신하는 단말의 수, 또는 신호 공간 차원이며, $\mathbf{q}_{k,i}$, $i \in \{1,2,\dots,M-S\}$ 은 크기가 1인 무작위로 생성된 벡터이다. k 번째 기지국은 \mathbf{Q}_k 를 이용하여 신호 공간(\mathbf{U}_k)을 다음과 같이 생성한다.

$$\mathbf{U}_k = \text{null}(\mathbf{Q}_k) \in \mathbb{C}^{M \times S}. \quad (3)$$

위와 같이 각각의 공간을 생성한 이후에 모든 기지국은 생성한 신호 공간에 대한 정보를 방송하며, 레이다는 기지국의 신호 공간과 채널이 곱해진 값을 유효 채널로써 수신한다.

2.3 레이다 신호 투사 행렬 생성

레이다는 통신시스템의 기지국으로부터 수신한 유효 채널을 통해 간섭 행렬(\mathbf{G})을 생성한다.

$$\mathbf{G} = [(\mathbf{U}_1^H \mathbf{H}_1^R)^T, \dots, (\mathbf{U}_K^H \mathbf{H}_K^R)^T]^T \in \mathbb{C}^{KS \times Y}, \quad (4)$$

이는 레이다가 통신시스템의 전체 기지국에 미치는 간섭을 나타내며, \mathbf{G} 를 Singular Value Decomposition (SVD) 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{G} = \mathbf{ohm} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H, \quad (5)$$

여기서 \mathbf{V} 는 Right Singular Vector (RSV)로 이루어진 행렬로 다음과 같이 표현된다

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_Y] \in \mathbb{C}^{Y \times Y}. \quad (6)$$

레이다는 통신시스템에 미치는 간섭을 최소화하기 위해 RSV를 이용하여 투사 행렬을 다음과 같이 계산한다

$$\mathbf{W} = [\mathbf{v}_{KS+1}, \dots, \mathbf{v}_Y] \times [\mathbf{v}_{KS+1}, \dots, \mathbf{v}_Y]^H. \quad (7)$$

III. 레이더 탐지 확률 및 ISI

기준에 제안된 NSP와 같이 레이더의 탐지확률은 자유도가 2인 Inverse Central chi-square 누적 분포함수와 목표로 하는 오탐지확률(P_{FA})을 통해 Threshold 값을 구한 후, 이 Threshold 값과 자유도가 2인 Noncentral chi-square 누적 분포함수를 통해 구할 수 있다. 이는 수식으로 표현하면 다음과 같다⁴⁾

$$P_D = 1 - F_{\chi^2_2(\rho)}\left(F_{\chi^2_2}^{-1}(1 - P_{FA})\right). \quad (11)$$

위 식에서 $F_{\chi^2_2}^{-1}$ 는 자유도가 2인 Central chi-square 누적 분포함수의 역함수이고, $F_{\chi^2_2(\rho)}$ 는 ρ 를 Noncentral parameter로 하는 자유도가 2인 Noncentral chi-square 누적 분포함수를 의미한다. 여기에서 Noncentral parameter, ρ 는 다음과 같이 주어진다

$$\rho = P_R \left| \mathbf{a}(\theta_R)^H \mathbf{W} \mathbf{x} \mathbf{x}^H \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_R) \right|^2, \quad (12)$$

여기서 P_R 은 레이더 신호의 수신 SNR을 나타낸다.

또한, 레이더 신호가 k 번째 기지국에 미치는 간섭은

$$I_R = P_R^* \mathbf{f}_{k,s}^H \mathbf{U}_k^H \mathbf{H}_k^R \mathbf{W} \mathbf{x}, \quad (13)$$

와 같이 계산된다. 여기서 $\mathbf{f}_{k,s}$ 는 k 번째 기지국의 s 번째로 선택된 UE에 대한 Zero forcing 벡터이며⁵⁾, P_R^* 는 통신시스템 기지국에서의 레이더 신호의 의한 INR을 나타낸다.

IV. 모의실험 결과

본 절에서는 기준에 제안되었던 NSP 기술과 제안한 간섭 정렬 기반의 주파수 공유 기술을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교 분석한다. Independent는 레이더 시스템과 통신시스템이 분리되어 ISI가 존재하지 않는 환경에서의 성능을 나타낸다. 본 절에서 설명하는 시뮬레이션 결과들은 $K=3$, $M=4$, $Y=32$, $P_{FA} = 10^{-5}$, $N=20$ 의 환경에서 진행되었다. 여기서 S 는 [5]의 OIA에서 N 대 중 신호 전송을 위해 선택되

는 UE의 수를 말한다.

그림 2는 각 기술의 레이더 탐지확률 성능을 레이더 신호 수신 SNR에 대해 그린 것이다. $S=1$ 일 때 제안하는 기술과 기존 NSP 기술은 모두 투사 행렬에 의해 레이더의 Y 개 공간 차원 중 1개 차원을 손해보기 때문에 동일한 성능을 보인다. 또한, S 가 늘어날수록 IAR 기술의 레이더 탐지 확률이 약화되는 것을 볼 수 있으나, S 당 1dB 정도의 SNR이 더 필요한 정도이며, 이는 송신 전력이 큰 실제 레이더 환경에서는 큰 부담으로 작용하지 않는다.

한편, 그림 3은 통신시스템 UE 신호의 기지국 수신 SNR이 10 dB일 때, 레이더 신호 INR에 따른 통신시스템 총합 전송률을 나타낸다. NSP 기술과 달리 IAR 기술은 ISI의 완전 제거를 통해 항상 일정한 성능을 유지하며, 특히 통신시스템이 독립적으로 동작할

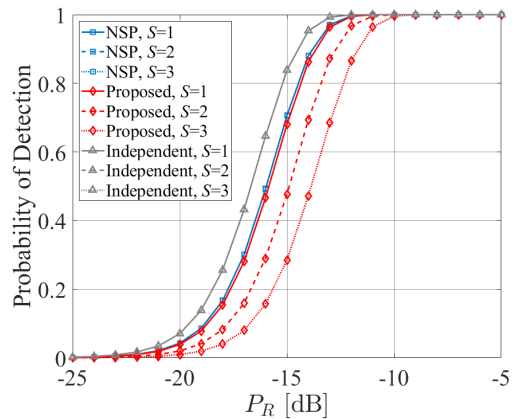


그림 2. 레이더 수신 신호 SNR 대비 레이더 탐지확률
Fig. 2. Radar detection probability according to received SNR of radar signal

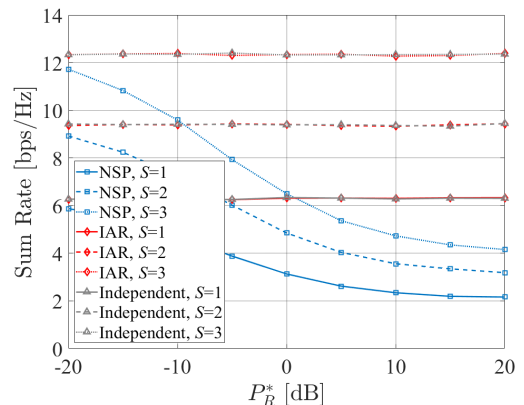


그림 3. 레이더 신호 INR 대비 통신시스템 총합 전송률
Fig. 3. Sum rate according to received SNR of radar signal

때의 성능과 동일한 성능을 보인다. 이는 $Y > KS$ 일 때 간섭을 완벽하게 제거할 수 있는 간섭 정렬 기술을 통해 가능하며, 안테나 수가 많은 MIMO 레이더의 특성상 레이더의 간섭 정렬은 통신시스템과의 주파수 공유에 효과적인 기술임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 레이더와 통신시스템 간 주파수 공유를 위한 간섭 정렬 기반 Interference alignment for radar (IAR) 기술을 제안하였다. IAR은 통신시스템 기지국에 미치는 간섭을 정렬하는 간섭 정렬 기술을 통해 기존의 주파수 공유를 위해 제안되었던 Null space projection 기술과 비슷한 레이더 탐지확률 성능을 달성하면서 레이더가 기지국에 미치는 간섭을 제거하여 통신시스템의 성능 열화가 없는 것을 확인하였다.

References

- [1] F. Hu, B. Chen, and K. Zhu, "Full spectrum sharing in cognitive radio networks toward 5G: A survey," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15754-15776, 2018.
- [2] *Connecting America: The national broadband plan* (2010), Federal Communications Commission (FCC), <https://www.fcc.gov/general/national-broadband-plan>
- [3] M. Labib, V. Marojevic, A. F. Martone, J. H. Reed, and A. I. Zaghoul, "Coexistence between communications and radar systems: A survey," *URSI Radio Sci. Bulletin*, vol. 2017, no. 362, pp. 74-82, Sep. 2017.
- [4] A. Khawar, A. Abdelhadi, and C. Clancy, "Target detection performance of spectrum sharing MIMO radars," *IEEE Sensors J.*, vol. 15, no. 9, pp. 4928-4940, Sep. 2015.
- [5] H. J. Yang, W.-Y. Shin, B. C. Jung, and A. Paulraj, "Opportunistic interference alignment for MIMO interfering multiple-access channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2180-2192, May 2013.