

통합 센싱 및 통신을 위한 SVD 기반 레이더 보강 신호 설계

김주현, 최계원*

성균관대학교

zookson@g.skku.edu, *kaewonchoi@skku.edu

SVD-Based Radar Augmentation Signal Design for Integrated Sensing and Communication

Kim Ju Hyeon, Choi Kae Won*

Sungkyunkwan University

요약

통합 센싱 및 통신(ISAC) 시스템에서는 통신과 레이더 기능을 동시에 만족하는 송신 신호 설계가 핵심 과제이다. 기존의 null space 기반 설계는 통신 간섭을 억제할 수 있으나, singular value 구조를 왜곡시켜 레이더 채널 추정 성능을 저하시킬 수 있다. 본 연구에서는 통신 성분에 대해 SVD를 수행한 후, 잔여 서브 공간에 레이더 보강 신호를 삽입함으로써 full-rank 조건을 유지하고 왜곡을 최소화하는 방법을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안한 방식은 기존 방식 대비 우수한 레이더 센싱 성능을 나타낸다.

I. 서론

통합 센싱 및 통신(ISAC, Integrated Sensing and Communication)은 하나의 무선 플랫폼에서 레이더 센싱과 데이터 통신을 동시에 수행할 수 있도록 설계된 차세대 기술로, 자율주행, 무인이동체, 스마트시티 등 다양한 응용 분야에서 주목받고 있다. ISAC 시스템은 하드웨어 자원과 주파수 대역을 공유함으로써 스펙트럼 효율을 향상시키고, 시스템 복잡도를 줄이며, 주변 환경에 대한 실시간 인지 기능을 제공한다.[1]

ISAC의 핵심 과제 중 하나는 통신과 센싱을 동시에 수행할 수 있는 송신 신호를 설계하는 것이다. 특히, 통신용 페이로드 신호와 레이더용 탐지 신호 간의 간섭을 최소화하여 양측의 성능을 모두 보장하는 것이 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 송신 신호 X 를 두 구성 요소로 분해하는 방식을 고려했다. 즉, 통신용 신호 P 와 레이더 보강 신호 Q 로 나누며, Q 는 PX 에 간섭을 주지 않도록 직교(orthogonal)하게 설계된다.

본 논문에서는 통신 신호 PX 에 대한 특이값 분해(SVD, Singular Value Decomposition) 기반의 레이더 신호 Q 설계 기법을 제안한다. 특히, PX 의 특이값 중 값이 거의 0에 가까운 잔여 부분(residual subspace)을 활용하여 Q 를 구성함으로써, 두 신호 간의 직교성을 유지하면서도 통신 성능의 저하 없이 레이더 센싱 기능을 동시에 수행할 수 있음을 보였다.

II. 본론

본 연구에서는 시간 및 주파수 영역에서 파일럿, 데이터, 레이더 신호를 유연하게 할당할 수 있도록, 블록 단위의 그리드 구조를 사용하였다. 각 블록은 K 개의 서브캐리어와 L 개의 OFDM 심볼로 구성되며, 이에 따라 하나의 블록은 총 $B = K \times L$ 개의 자원 요소(Resource Element)를 포함한다. 따라서 채널 또한 블록 단위로 정의되며, 각 블록 (k, ℓ) 에 대해 통신 및 레이더 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{k,\ell} = G_{k,\ell} X_{k,\ell} + \eta_{k,\ell} \quad (1)$$

$$Z_{k,\ell} = H_{k,\ell} X_{k,\ell} + \zeta_{k,\ell} \quad (2)$$

여기서, $X_{k,\ell}$ 은 블록 (k, ℓ) 에서 송신되는 신호, $G_{k,\ell}$ 은 통신채널 행렬, $H_{k,\ell}$ 는 레이더 채널 행렬을 의미하며, $\eta_{k,\ell}$ 와 $\zeta_{k,\ell}$ 는 각각 통신 및 레

이다 수신기의 잡음을 나타낸다.

송신 신호 $X_{k,\ell}$ 은 통신 성분 $X_{k,\ell}^{\text{comm}}$ 과 레이더 성분 $Q_{k,\ell}$ 로 구성된다.

$$X_{k,\ell} = X_{k,\ell}^{\text{comm}} + Q_{k,\ell} \quad (3)$$

통신 성분 $X_{k,\ell}^{\text{comm}}$ 은 통신 데이터 심볼 행렬 $S_{k,\ell} \in \mathbb{C}^{M \times B}$ 에 precoding 행렬 $P_{k,\ell}$ 의 행렬곱으로 구성되며 사용자 간 간섭을 최소화하기 위해 precoding 행렬 $P_{k,\ell}$ 은 통신채널 $G_{k,\ell}$ 의 의사역행렬(pseudo-inverse)에 기반한 Zero-Forcing precoding 방식으로 설계된다.

$$X_{k,\ell}^{\text{comm}} = P_{k,\ell} S_{k,\ell} \quad (4)$$

$$P_{k,\ell} = G_{k,\ell}^H (G_{k,\ell} G_{k,\ell}^H)^{-1} \quad (5)$$

레이더 센싱을 수행하기 위해서는 레이더 채널 행렬 $H_{k,\ell}$ 의 추정이 필요하다. 레이더 수신기에서 관측된 수신 신호는 다음과 같이 표현된다:

$$Z_{k,\ell} = H_{k,\ell} X_{k,\ell} + \zeta_{k,\ell}$$

이로부터 레이더 채널 행렬 $H_{k,\ell}$ 는 송신 신호 $X_{k,\ell}$ 의 의사역행렬(pseudo-inverse)을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$H_{k,\ell} = Z_{k,\ell} X_{k,\ell}^H (X_{k,\ell} X_{k,\ell}^H)^{-1} \quad (6)$$

위 식이 성립하기 위해서는 $X_{k,\ell}$ 가 full-rank 행렬이어야 하며, 이를 만족시키기 위해 본 연구에서는 레이더 보강 신호 $Q_{k,\ell}$ 를 적절히 설계하였다. 기존의 null space 기반의 $Q_{k,\ell}$ 설계 방식은 $X_{k,\ell}^{\text{comm}}$ 과의 직교성을 보장함으로써 $X_{k,\ell}$ 의 full-rank 조건을 만족시킬 수 있었으나 [2], $X_{k,\ell}$ 의 특이값(singular value) 구조를 왜곡할 수 있다는 한계가 있다. 이는 $Q_{k,\ell}$ 가 통신 성분의 특이 벡터 방향과 정렬되지 않은 상태로 삽입되기 때문에 발생하며, 특히 이러한 특이값(singular value)의 왜곡은 채널 추정 과정에서 잡음 성분이 강화되고 센싱 성능이 저하되는 문제를 초래할

수 있다.

이러한 문제를 보완하기 위해, 본 연구에서는 통신 성분에 대한 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 기반으로 한 레이더 보강 신호 $\mathbf{Q}_{k,\ell}$ 설계 기법을 제안한다.

이를 위해, 먼저 통신 성분 $\mathbf{X}_{k,\ell}^{\text{comm}} = \mathbf{P}_{k,\ell} \mathbf{S}_{k,\ell}$ 에 대한 특이값 분해(SVD)를 수행한다.

$$\mathbf{X}_{k,\ell}^{\text{comm}} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{U} \in \mathbb{C}^{N_{\text{tx}} \times N_{\text{tx}}}$, $\mathbf{\Sigma} \in \mathbb{C}^{N_{\text{tx}} \times B}$, $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{B \times B}$ 는 각각 송신 안테나 공간상의 직교 기저, 특이값 대각 행렬, 그리고 송신 방향의 스펙트럼 정보를 의미한다. 이때, $\mathbf{\Sigma}$ 가 0에 해당하지 않는 \mathbf{U} 와 \mathbf{V} 의 열 벡터들은 통신 성분의 주요 에너지 방향을 정의하며, 나머지 열 벡터들은 통신 성분과 직교하는 영역으로, 잔여 서브공간(residual subspace)이라 할 수 있다. 우리는 이 잔여 서브공간을 기반으로 레이더 보강 신호 $\mathbf{Q}_{k,\ell}$ 를 구성한다. 즉, \mathbf{U} 와 \mathbf{V} 에서 주성분 공간에 해당하는 벡터들을 제외한 나머지 열 벡터들로 구성된 기저 \mathbf{U}_r 및 \mathbf{V}_r 를 추출하고, 이 기저 위에 전력 제약 조건을 만족하는 대각 행렬 \mathbf{D} 를 곱함으로써 $\mathbf{Q}_{k,\ell}$ 를 다음과 같이 생성한다.

$$\mathbf{Q}_{k,\ell} = \mathbf{U}_r \mathbf{D} \mathbf{V}_r^H \quad (8)$$

여기서, $\mathbf{U}_r \in \mathbb{C}^{N_{\text{tx}} \times d}$, $\mathbf{V}_r \in \mathbb{C}^{B \times d}$ ($d = N_{\text{tx}} - r$)는 통신 성분의 rank를 제외한 잔여 차원이며, $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{d \times d}$ 는 레이더 전력 분포를 조절하는 대각 행렬이다.

최종적으로 송신 신호 $\mathbf{X}_{k,\ell}$ 은 Full rank를 유지하면서도 통신 성분의 특이값(singular value) 분포를 보존하여 구조적인 왜곡을 최소화할 수 있도록 한다. 이를 통해 레이더 채널 추정 시의 안정성을 확보하고, 잡음 증폭에 의한 센싱 성능 저하를 방지할 수 있으며, 통신 및 센싱 수신단에서 각각 다음과 같은 형태의 수신 신호 모델이 유도된다.

- 통신 채널 : $\mathbf{Z}_{k,\ell} = \mathbf{G}_{k,\ell} \mathbf{X}_{k,\ell} = \mathbf{G}_{k,\ell} (\mathbf{X}_{k,\ell}^{\text{comm}} + \mathbf{Q}_{k,\ell})$
 $= \mathbf{G}_{k,\ell} (\mathbf{P}_{k,\ell} \mathbf{S}_{k,\ell} + \mathbf{Q}_{k,\ell}) = \mathbf{S}_{k,\ell}$
- 레이더 채널 : $\mathbf{Y}_{k,\ell} = \mathbf{H}_{k,\ell} \mathbf{X}_{k,\ell}$
 $\rightarrow \mathbf{Y}_{k,\ell} \mathbf{X}_{k,\ell}^H (\mathbf{X}_{k,\ell} \mathbf{X}_{k,\ell}^H)^{-1} = \mathbf{H}_{k,\ell}$

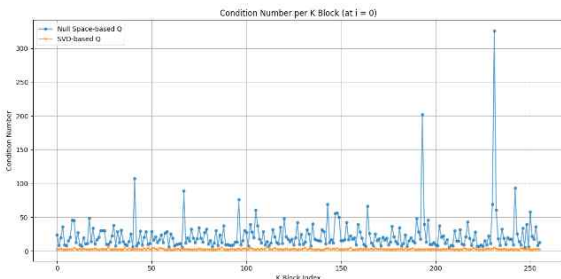


그림. 1. Null Space 기반 Q와 SVD분해 기반 Q에 대한 블록별 condition number 비교

그림.1.에서 보듯이 SVD 기반 방식은 대부분의 블록에서 condition number가 약 3~4 수준으로 일정하게 유지되는 반면, null space 기반 방

식은 condition number가 상대적으로 크고 블록 간 변동이 크게 나타난다. 이는 SVD방식이 수치적으로 더 안정적인 레이더 채널 추정을 가능하게 함을 의미한다.

III. 결론

본 논문에서는 통합 센싱 및 통신(ISAC) 시스템에서 통신 성능을 유지하면서도 레이더 채널 추정의 안정성을 확보할 수 있는 송신 신호 설계 기법을 제안하였다. 기존의 null space 기반 방식은 통신 간섭을 효과적으로 제거할 수 있으나, 전체 송신 신호의 특이값 구조를 왜곡시켜 레이더 채널 추정 시 수치적 불안정성을 유발하는 한계가 있다.

이를 극복하기 위해, 본 연구에서는 통신 성분에 대한 특이값 분해(SVD)를 수행한 후, 잔여 서브 공간에 레이더 보강 신호를 삽입하는 방식을 제안하였다. 제안한 기법은 송신 신호의 rank를 유지하면서도 통신 성분의 특이값 분포를 보존하여, 잡음 증폭 없이 안정적인 레이더 채널 추정을 가능하게 한다.

시뮬레이션 결과, 제안한 SVD 기반 방식은 기존 null space 기반 방식 대비 레이더 센싱 성능에서 우수한 결과를 보였으며, ISAC 시스템에서 통신과 센싱 기능 간의 성능 균형을 효과적으로 달성할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 UE 간 데이터의 유사성이나 위치 근접성에 따른 condition number 저하 현상을 집중적으로 분석할 예정이다. 특히, 통신 신호 간의 상관성이 높을수록 송신 행렬의 rank가 감소하고, 그로 인해 수치적 불안정성과 센싱 성능 저하가 발생할 수 있다. 이러한 환경에서도 안정적인 성능을 보장할 수 있는 precoding 및 레이더 신호 보강 기법에 대해 확장 연구를 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the BK21 FOUR Project

참 고 문 헌

- [1] D. K. P. Tan, J. He, Y. Li, A. Bayesteh, Y. Chen, and Y. Liu, "Integrated sensing and communication in 6G: Motivations, use cases, requirements, challenges and future directions," in Proc. 1st IEEE Int. Online Symp. Joint Commun. & Sensing (JC&S), Feb. 2021, pp. 1 - 6
- [2] B. Lee, H. Kim, D. J. Love, and J. V. Krogmeier, "Spatial-Division ISAC: A Practical Waveform Design Strategy via Null-Space Superimposition," arXiv preprint arXiv:2412.10541, 2024.