

동적 사용자가 포함된 IRS 보조 레이더-통신 융합 시스템에서 다중 사용자의 합 전송률 최적화에 관한 연구

김상민, 이인규
고려대학교 전기전자공학과
{smgeem, inkyu}@korea.ac.kr

Sum-rate Maximization Methods for Integrated Sensing and Communication System with Mobile Targets

Sangmin Kim, and Inkyu Lee

School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

차세대 통신에서는 다양한 사물과 동적 사용자가 증가함에 따라 레이더와 통신 대역이 겹치게 되었고, 이를 해결하기 위해 레이더-통신 융합 시스템이 등장하였다. 그러나 레이더-통신 융합 시스템에서는 동적 사용자 감지를 위해 강한 신호를 전달할 경우, 정적 사용자의 전송률 저하와 다중 사용자 간 간섭 문제가 발생한다. 본 논문은 지능형 반사표면을 활용하여 간섭을 억제하고 통신 성능을 향상하면서, 동적 사용자의 감지 성능을 동시에 보장하는 기법을 제안한다.

I. 서론

차세대 통신에서는 여러 사물 간 연결성이 확대되고, 차량 또는 무인 항공기 등 동적 사용자들을 감지 및 통신하는 상황도 더 자주 발생한다. 이에 따라 차세대 통신에서 요구하는 레이더 및 통신 대역폭은 점점 넓어지며, 두 시스템의 대역이 점차 겹치게 되었다. 이에 대한 해결책으로 한 대역에서 레이더와 통신 기능을 동시에 수행할 수 있는 시스템인 레이더-통신 융합 시스템(Integrated Sensing and Communication, ISAC)[1]이 등장하였으며, 동적 사용자의 위치를 빠르게 감지함과 동시에 동적 및 정적 사용자들에게 정보를 전달하여 효율성을 입증받았다.

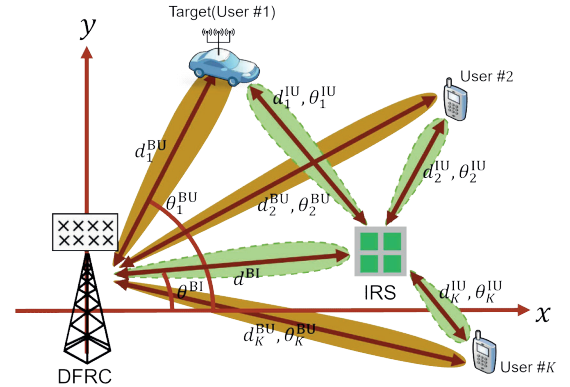
ISAC 시스템이 동적 사용자의 위치를 감지하기 위해서는 해당 사용자를 향해 강한 파워로 신호를 전달해야 한다. 이때, 동적 사용자가 아닌 정적 사용자에게는 상대적으로 적은 파워가 전달되어 통신 전송률이 저하되는 문제가 발생하며, 특히 다중 사용자들을 동시에 지원하는 경우 사용자 사이의 간섭이 제어되지 못하는 문제로 발생한다. 이때, 지능형 반사표면(Intelligent Reflecting Surface, IRS)[2]를 설치하면 신호를 지능적으로 반사하여 사용자들 사이의 간섭 신호를 억제하며, 정적 사용자들에게 적은 파워가 전달되더라도 효율적인 간섭 제어를 통해 통신 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 IRS를 사용하여 동적 사용자와 정적 사용자의 합 전송률을 최대화하면서, 동적 사용자의 레이더 신호 대 잡음 비율을 만족하여 감지 성능도 유지하는 기법을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 안테나 기지국, IRS 패널, 그리고 K 명의 통신 사용자로 구성된 ISAC 시스템을 고려한다. K 명의 통신 사용자들은 1명의 동적 사용자와 $K-1$ 명의 정적 사용자들로 구성되어 있다.

기지국은 M_{BS} 개의 안테나를 통하여 신호 \mathbf{x} 를 사용자에게 전달한다. 이 신호는 아래의 <식 1>처럼 k 번째 사용자에게 대응하는 프리코더 \mathbf{f}_k 와 심볼 s_k 를 이용하여 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_k s_k \quad \text{<식 1>}$$



<그림 1>: IRS가 포함된 레이더-통신 융합 시스템

이때 K 명의 사용자들은 단일 안테나를 통하여 기지국으로부터 신호 y_k 를 받으며, 이 신호는 <식 2>처럼 기지국으로부터 직접 전달 받은 신호와 IRS에 반사되어 받은 신호의 합으로 구성되어 있다.

$$y_k = (\mathbf{h}_k^H + \mathbf{g}_k^H \Phi^H \mathbf{G}) \mathbf{x} + z_k \quad \text{<식 2>}$$

여기서 채널 \mathbf{h}_k , \mathbf{G} , \mathbf{g}_k 는 각각 기지국과 k 번째 사용자 사이의 채널, 기지국과 IRS 사이의 채널, IRS와 k 번째 사용자 사이의 채널을 의미하며, 모두 Rician 분포를 따른다고 가정하였다. Φ 는 IRS의 반사각을 지칭하는 행렬이다.

한편, 기지국은 동적인 사용자 1명의 위치를 파악하기 위해 레이더 신호를 같이 전달한다. 기지국은 동적 사용자로부터 반사되는 신호 <식 3>을 통하여 동적 사용자의 위치를 추정한다.

$$\mathbf{y}_R(t) = \beta e^{j2\pi\mu t} \mathbf{a}_{BS}(\theta_1^{BU}) \mathbf{a}_{BS}^H(\theta_1^{BU}) \mathbf{x}(t - \tau) + \mathbf{z}_R(t) \quad \text{<식 3>}$$

여기서 \mathbf{a}_{BS} 는 기지국 안테나 벡터를 의미하며, θ_1^{BU} 는 동적 사용자의 위상을 의미한다. 그리고 μ 와 τ 는 각각 동적 사용자에게 의한 도플러 효과 및 신호 도달 딜레이 시간을 지칭한다.

본 논문에서는 동적 사용자와의 센싱 성능을 유지하면서 K 명의 다중 사

용자의 총 전송률을 최대화하는 문제를 최적화한다. 타겟 검출 성능은 동적 사용자로부터 반사된 후 돌아오는 신호의 신호 대 잡음 비율 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)로 잡았다. 해당 문제는 아래 (P)와 같이 표현할 수 있다.

$$(P) \max_{\{\mathbf{f}_k\}, \Phi} \sum_{k=1}^K \log \left(1 + \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{l \neq k} |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_l|^2 + \sigma_k^2} \right) \quad (1a)$$

$$\text{subject to } \frac{|\beta|^2}{\sigma_R^2} P(\theta_1^{\text{BU}}) \geq \gamma_R \quad (1b)$$

$$\sum_{k=1}^K \mathbf{f}_k^H \mathbf{f}_k \leq P_t \quad (1c)$$

$$\phi_m \in [0, 2\pi), \forall m = 1, 2, \dots, M_{\text{IRS}} \quad (1d)$$

문제 (P)는 레이더 SNR에 의한 제약조건 (1b)와 IRS 반사표면에 의한 제약조건 (1d)에 의해 볼록하지 않아 직접 풀기 어렵다. 이에 따라서 본 논문에서는 (P)와 등가인 (P1)을 대신 풀며, 매 반복마다 다른 변수들을 고정 한 채 한 변수를 최적화하는 블록 강하 기법(Block Coordinate Descent, BCD)[3]을 이용하여 풀었다.

$$(P1) \max_{\{q_k\}, \{w_k\}, \{\mathbf{f}_k\}, \Phi} \sum_{k=1}^K -q_k e_k + \log q_k \quad (2a)$$

$$\text{subject to} \quad (1b), (1c), (1d) \quad (2b)$$

$$q_k > 0, \forall k = 1, 2, \dots, K$$

(P1)은 보조변수들 q_k 와 w_k 에 대해서는 볼록하므로 솔루션을 바로 도출할 수 있다. 최적 q_k 와 w_k 아래의 <식 4>와 같이 표현할 수 있다.

$$q_k^{\text{opt}} = \left(1 - w_k^* \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k - w_k \hat{\mathbf{f}}_k^H \hat{\mathbf{h}}_k + \left(\sum_{l=1}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_l|^2 + \sigma_k^2 \right) |w_k|^2 \right)^{-1}$$

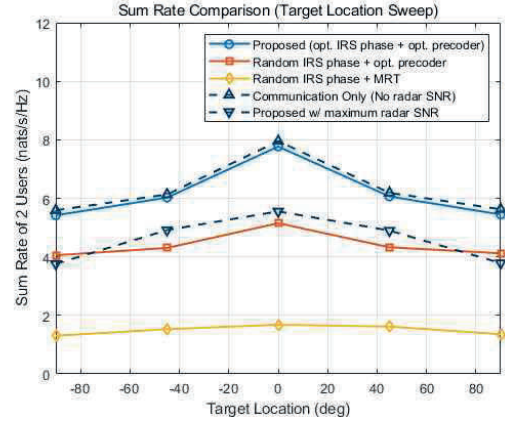
$$w_k^{\text{opt}} = \frac{\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k}{\left(\sum_{l=1}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_l|^2 \right) + \sigma_k^2} \quad \text{<식 4>}$$

(P1)은 프리코더 \mathbf{f}_k 와 IRS 반사각 Φ 에 대하여 여전히 볼록하지 않다.

본 논문에서는 프로코더의 비볼록성을 semidefinite relaxation[4]을 이용하여 볼록한 형태로 변환 후 솔루션을 도출하였으며, 반사각의 비볼록성은 majorization-minimization algorithm[5]를 이용하여 해결하였다.

본 논문에서는 다음의 환경에서 실험을 진행하였다. 기지국의 송수신 안테나 수는 2개로 설정하였으며, IRS 반사표면의 반사물질 개수는 12개로 설정하였다. 기지국은 총 2명의 사용자를 서비스하고 있으며, 동적 사용자는 1명, 정적 사용자는 1명으로 설정하였다. 정적 사용자는 중심이 (10m, 5m)이고 반지름이 2m인 원 내부에 랜덤하게 위치한다고 가정하였다. 동적 사용자는 기지국으로부터 거리가 8m이며, x 축과의 각도가 -90° 에서 $+90^\circ$ 까지 움직이는 상황에서 실험을 진행하였다.

<그림 2>는 제안하는 기법과 여러 다른 기법들과의 성능을 비교한 그래프이다. IRS 반사각이 랜덤인 기법(IRS random phase)과 IRS 반사각이 랜덤이면서 프리코더가 MRT (Maximum Ratio Transmission)를 사용하는 기법(MRT + IRS random phase)과 비교하였다. <그림 2>를 통하여 제안하는 기법은 IRS 반사각을 조절함에 따라 여러 통신 사용자의 합 전송량을 효과적으로 최대화함을 확인할 수 있다. 또한, 제안하는 기법은 MRT 기법 대비 동일한 동적 타겟의 레이더 SNR 대비 더 높은 합 전송량을 만족하는 것을 통해 프리코더를 효과적으로 최적화함을 확인할 수 있다.



<그림 2>: 동적 사용자의 위치에 따른 전송률 합 성능 비교

III. 결론

본 논문에서는 증폭 릴레이가 들어간 레이더-통신 융합 시스템(ISAC)에서 동적 사용자와 정적 사용자의 합 전송량을 최대화하는 기법을 제안하였다. 제안하는 최적화 기법은 동적 사용자의 레이더 SNR 제약조건을 만족함으로써 감지 성능을 유지하면서 IRS 반사표면의 각도조절을 통해 전송률 합이 저하되는 문제를 해결하였다. 실험 결과를 통해 IRS의 반사표면 각도 조절 효과 및 프리코더 최적화 효과를 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단 및 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2022-NR070834, RS-2024-00436887)

참고 문헌

- [1] J. A. Zhang *et al.*, "An Overview of Signal Processing Techniques for Joint Communication and Radar Sensing," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1295-1315, Nov. 2021, doi: 10.1109/JSTSP.2021.3113120.
- [2] A. M. Elbir, K. V. Mishra, M. R. B. Shankar and S. Chatzinotas, "The Rise of Intelligent Reflecting Surfaces in Integrated Sensing and Communications Paradigms," in *IEEE Network*, vol. 37, no. 6, pp. 224-231, Nov. 2023, doi: 10.1109/MNET.128.2200446.
- [3] A. Beck and L. Teturashvili, "On the Convergence of Block Coordinate Descent Methods," in *SIAM Journal on Optimization*, vol. 23, pp. 2037-2060, Oct. 2013, doi: 10.1137/120887679
- [4] Z. -q. Luo, W. -k. Ma, A. M. -c. So, Y. Ye and S. Zhang, "Semidefinite Relaxation of Quadratic Optimization Problems," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 27, no. 3, pp. 20-34, May 2010, doi: 10.1109/MSP.2010.936019.
- [5] Y. Sun, P. Babu, and D. P. Palomar, "Majorization-minimization Algorithms in Signal Processing, Communications, and Machine Learning," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, pp. 794-816, Feb. 2017, doi: 10.1109/tsp.2016.2601299