

증폭 릴레이를 이용한 레이더-통신 융합 시스템에서 에너지 효율 최적화에 관한 연구

김상민, 김윤수, 이인규

고려대학교 전기전자공학과

{smgeem, chrisbig, inkyu}@korea.ac.kr

A Study on the Energy Efficiency in Relay-aided Integrated Sensing and Communication System

Sangmin Kim, Yunsoo Kim, Inkyu Lee

School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

레이더-통신 융합 시스템에서는 레이더 타겟 검출을 위해 타겟 근방 메인로브 구역으로 파워를 집중하여 신호를 전달하며, 이로 인하여 통신 사용자가 사이드로브에 위치한 경우 전송률 성능 저하를 유도할 수 있다. 증폭 릴레이를 통해서 전송률을 보충하는 경우, 사용자의 위치에 따라 에너지 효율성이 감소하는 문제가 있다. 본 논문에서는 레이더 타겟 검출 성능과 사용자의 통신 성능을 일정 수준 보장하면서, 증폭 릴레이에서 소모하는 파워를 최소화하는 기법을 제안함으로써 증폭 릴레이의 에너지 효율을 최적화한다.

I. 서론

과거의 레이더와 통신은 서로 다른 목표를 갖고 각자의 영역에서 연구되었으며, 서로 다른 대역을 사용하였기 때문에 두 플랫폼 사이의 간섭이 생기지 않았다. 그러나, 차세대 통신에서 기기 간 연결성이 점점 커짐에 따라 레이더와 통신은 더 넓은 대역폭을 사용하게 되었으며, 레이더와 통신 플랫폼의 대역이 불가피하게 겹치게 되었다. 레이더-통신 융합 시스템(ISAC, Integrated Sensing and Communication)은 같은 대역에서 레이더와 통신을 동시에 수행함으로써 위 문제를 해결하였으며, 같은 대역에서 레이더와 통신 자원을 어떻게 분배할지가 과제로 남아있다.[1]

레이더는 타겟을 검출하기 위해 타겟 근방 메인로브(mainlobe) 구역으로 파워를 집중하여 신호를 전달한다.[2] 그러나, 타겟쪽으로 파워를 투자하게 되면 사이드로브(sidelobe)에 위치한 통신 사용자에게 파워가 전달되지 않아 통신 성능이 저하된다. 이때, 증폭 릴레이(AF Relay, Amplify-and-Forward Relay)를 활용한다면 해당 사용자에게 파워를 증폭하여 통신 성능을 보장할 수 있지만, 통신 사용자가 메인로브에 위치하여 전달되는 파워가 충분하다면 에너지 관점에서는 비효율적인 문제가 있다. 이에 따라서 본 논문에서는 레이더와 통신 성능을 보장하면서 증폭 릴레이의 파워를 최소화하는 시스템을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 안테나 기지국, 레이더 타겟 1개, 통신 사용자 1명, 그리고 증폭 릴레이 1개로 구성된 레이더-통신 시스템을 고려한다. 기지국은 N_T 개의 송신 안테나를 통하여 신호 $\tilde{\mathbf{s}}(t)$ 를 타겟, 릴레이와 사용자에게 동시에 전송한다. 이 신호는 프리코더 \mathbf{F} 와 전송 심볼 $\mathbf{s}(t)$ 의 곱으로 표현한다.

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{F}\mathbf{s}(t)$$

타겟에게 전달한 신호는 반사되어 다시 기지국으로 돌아오며, 기지국은 N_R 개의 수신 안테나를 통하여 해당 신호를 검출한다. 이때, 검출한 신호 $\mathbf{x}(t)$ 는 아래 <식 1>과 같이 표현할 수 있다.

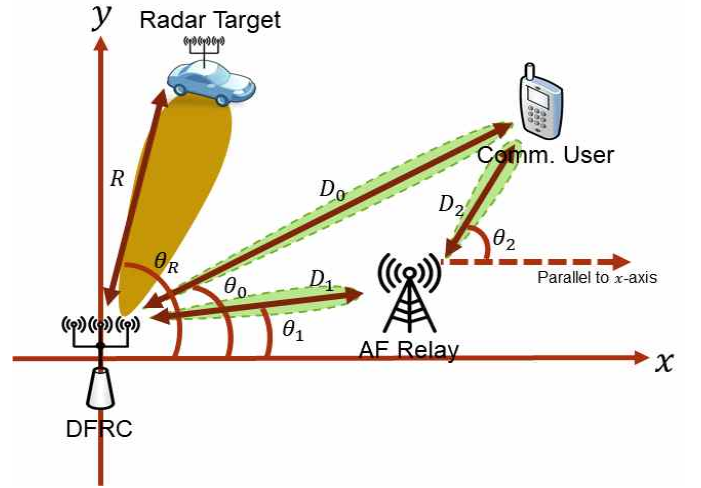


그림 1. 릴레이 노드가 포함된 레이더-통신 융합 시스템(ISAC)

$$\mathbf{x}(t) = \beta \mathbf{a}_R(\theta_R) \mathbf{a}_T^H(\theta_R) \tilde{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{z}(t) \quad (1)$$

사용자는 M_U 개의 안테나를 통해 기지국의 신호를 받는다. 사용자 수신 신호는 <그림 1>처럼 기지국으로부터 직접 받는 신호와 증폭 릴레이를 통해 받는 신호로 구성되어있다. 직접 받은 신호 $\mathbf{y}_0(t)$ 는 <식 2>처럼 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}_0(t) = \alpha_0 \mathbf{b}_U(\theta_0) \mathbf{a}_T^H(\theta_0) \tilde{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{n}_0(t) \quad (2)$$

한편, 증폭 릴레이는 M_R 개의 안테나를 통해 신호 $\mathbf{y}_1(t)$ 를 받으며, 받은 신호를 \mathbf{W} 만큼 증폭한 후에 사용자에게 신호 $\mathbf{y}_2(t)$ 전달한다. $\mathbf{y}_1(t)$ 와 $\mathbf{y}_2(t)$ 는 각각 <식 3a>와 <식 3b>처럼 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}_1(t) = \alpha_1 \mathbf{b}_R(\theta_1) \mathbf{a}_T^H(\theta_1) \tilde{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{n}_1(t) \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_2(t) &= \alpha_2 \mathbf{b}_U(\theta_2) \mathbf{b}_R^H(\theta_2) \mathbf{W} \mathbf{y}_1(t) + \mathbf{n}_2(t) \\ &= \alpha_2 \alpha_1 \mathbf{b}_U(\theta_2) \mathbf{b}_R^H(\theta_2) \mathbf{W} \mathbf{b}_R(\theta_1) \mathbf{a}_T^H(\theta_1) \tilde{\mathbf{s}}(t) + \alpha_2 \mathbf{b}_U(\theta_2) \mathbf{b}_R^H(\theta_2) \mathbf{W} \mathbf{n}_1(t) + \mathbf{n}_2(t) \end{aligned} \quad (3b)$$

사용자가 받은 신호 $\mathbf{y}(t)$ 는 두 신호 $\mathbf{y}_0(t)$ 와 $\mathbf{y}_2(t)$ 를 병렬로 정렬한 형태로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0(t) \\ \mathbf{y}_2(t) \end{bmatrix} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{s}}(t) + \mathbf{n}(t)$$

본 논문에서는 레이더 타겟 검출 성능과 사용자의 통신 성능을 일정 수준 보장하면서, 증폭 릴레이에서 소모하는 파워를 최소화하는 문제를 최적화한다. 타겟 검출 성능은 레이더가 타겟 위치를 가장 잘 파악하는 분산 행렬 \mathbf{R}_d 를 기준으로 잡았으며, 통신 성능은 사용자의 전송률로 잡았다. 해당 문제는 아래 (P)와 같이 표현할 수 있다.

$$(P) \min_{\mathbf{F}, \mathbf{W}} f(\mathbf{F}, \mathbf{W}) = \min_{\mathbf{F}, \mathbf{W}} E[\|\mathbf{W}\mathbf{y}_1\|^2] \\ = \min_{\mathbf{F}, \mathbf{W}} [\alpha_1^2 (\mathbf{a}_R^H(\theta_1) \mathbf{F} \mathbf{R}_s \mathbf{F}^H \mathbf{a}_R(\theta_1)) \cdot \mathbf{b}_R^H(\theta_1) \mathbf{W} \mathbf{W}^H \mathbf{b}_R(\theta_1) + \sigma_1^2 \text{tr}(\mathbf{W} \mathbf{W}^H)]$$

$$\text{subject to } \mathbf{F} \mathbf{R}_s \mathbf{F}^H = \mathbf{R}_d \\ \log[\mathbf{I} + \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F} \mathbf{R}_s \mathbf{F}^H \mathbf{H}^H] \geq \gamma$$

문제 (P)의 첫 제약조건을 목표 함수 $f(\mathbf{F}, \mathbf{W})$ 에 대입하게 되면 (P)는 프리코더 \mathbf{F} 에 무관한 형태로 표현할 수 있다. 두 제약조건을 정리하면 본문 문제는 (P1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(P1) \min_{\mathbf{W}} f(\mathbf{W}) = \min_{\mathbf{W}} [\alpha_1^2 (\mathbf{a}_R^H(\theta_1) \mathbf{R}_d \mathbf{a}_R(\theta_1)) \cdot \mathbf{b}_R^H(\theta_1) \mathbf{W} \mathbf{W}^H \mathbf{b}_R(\theta_1) + \sigma_1^2 \text{tr}(\mathbf{W} \mathbf{W}^H)]$$

$$\text{subject to } \frac{[\alpha_1^2 |\mathbf{b}_R^H(\theta_2) \mathbf{W} \mathbf{b}_R(\theta_2)|^2]}{\sigma_1^2 \|\mathbf{W} \mathbf{W}^H \mathbf{b}_R(\theta_2)\|^2 + \frac{1}{M_d} \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}} \geq \frac{e^\gamma - 1}{P(\theta_1)} - M_d \cdot \frac{|\alpha_0|^2}{\sigma_0^2} = \zeta$$

(P1)은 제약조건 우변인 ζ 은 주어진 문제 (P1)의 feasibility를 결정하는 변수이다. ζ 는 사용자 성능 하한값인 γ 이 커질수록, 릴레이에게 도달하는 파워 $P(\theta_1)$ 가 작을수록 그 값이 커진다.

첫 번째로 $\zeta \geq M_R \frac{|\alpha_1|^2}{\sigma_1^2}$ 인 경우, 주어진 문제는 infeasible하다. 이는

최소 통신조건 γ 가 지나치게 높거나, 릴레이 도달 파워 $P(\theta_1)$ 가 지나치게 작다면 주어진 통신 전송률을 만족하는 릴레이 프리코더 \mathbf{W} 가 존재하지 않음을 의미한다. 두 번째로 $\zeta < 0$ 인 경우, 주어진 문제는 $\mathbf{W} = \mathbf{0}$ 인 경우에도 여전히 feasible함을 확인할 수 있다. 주어진 통신 전송률이 증폭 릴레이 없이 달성 가능하며, 이에 따라 증폭 릴레이에 할당되는 파워가

0임을 알 수 있다. 마지막으로 $0 \leq \zeta < M_R \frac{|\alpha_1|^2}{\sigma_1^2}$ 인 경우, 주어진 문제

는 feasible하며, nonconvex QCQP 형태로 표현된다. 본 논문에서는 이를 SDR(semidefinite relaxation)을 통해 문제를 convex하게 변형한다.[3] 그리고 SDR을 통해 도출한 솔루션을 randomization을 통해 근사하여 본 문제의 솔루션을 도출하였다.

본 논문에서는 다음의 환경에서 실험을 진행하였다. 기지국의 송수신 안테나, 사용자의 수신 안테나, 그리고 증폭 릴레이의 안테나 수는 모두 5개로 설정하였다. 최소 통신 전송률 γ 는 3.5nats/s/Hz로 설정하였다. 증폭 릴레이가 (150m,0m), 사용자가 (300m,0m)에 위치해있고, 타겟이 기지국으로부터 300m 떨어져있는 환경에서 진행하였다. 레이더 타겟과 x 축 사이의 각도를 -80° 부터 $+80^\circ$ 까지 스윙하였을 때, 릴레이 유무에 따른 사용자의 전송률을 관찰하였다.

<그림 2>는 증폭 릴레이 유무 및 타겟의 각도에 따른 사용자 전송률을 나타낸 그래프이다. 이를 통해 사용자가 최소 통신 전송률을 만족하는 경우에는 증폭 릴레이가 파워를 할당하지 않음을 확인할 수 있다. 반면, 사용자가 최소 통신 전송률을 만족하지 못 하는 경우, 전송률을 만족하도록 증폭 릴레이가 사용자에게 파워를 보충하는 것을 확인할 수 있다.

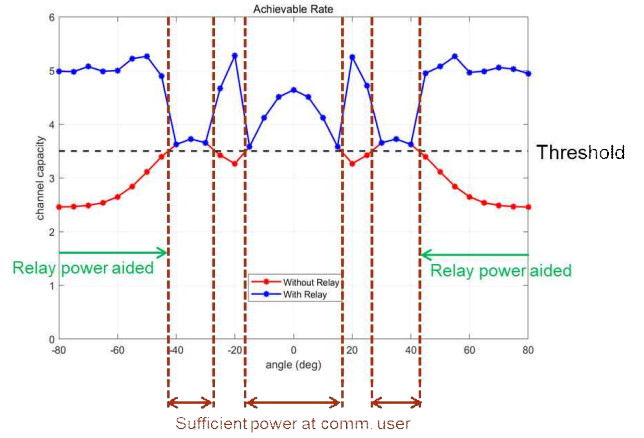


그림 2. 증폭 릴레이 유무 및 타겟 위치에 따른 채널 용량 변화

III. 결론

본 논문에서는 증폭 릴레이가 들어간 레이더-통신 융합 시스템(ISAC)에서 효율적인 에너지 사용을 위해 증폭 릴레이의 파워를 최소화하는 기법을 제안하였다. 제안하는 파워 최적화 기법은 음영 지역에 위치한 사용자에게 증폭 릴레이를 통해 전송률을 보충하면서, 기존 사이드로브에서 통신 성능이 저하되는 문제를 해결하였다. 또한, 제안하는 기법은 사용자가 메인로브에 위치해 전송률이 충분한 상황에서는 증폭 릴레이 파워를 제한함으로써 에너지 효율을 같이 최적화하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2022R1A5A1027646)

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] L. Chen, F. Liu, W. Wang and C. Masouros, "Joint Radar-Communication Transmission: A Generalized Pareto Optimization Framework," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 69, pp. 2752–2765, 2021, doi: 10.1109/TSP.2021.3077307
- [3] 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.