

통합 센싱 및 통신 시스템에서 간섭관리 및 송수신 빔포밍 고려사항

김근영, 장갑석, 고영조
한국전자통신연구원

kykim12@etri.re.kr, kschang@etri.re.kr, koyj@etri.re.kr

Considerations on Interference Management and Transmit/Receive Beamforming in Integrated Sensing and Communication Systems

Keunyoung Kim, Kapseok Chang, Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

기존 데이터 교환이 주된 목적이던 통신시스템은 센싱 기능을 도입하여 다양한 서비스를 제공하려 한다. 통신 기능과 센싱 기능을 효율적으로 제공하기 위해서는 동일 무선자원을 활용하는 것이 유리하다. 하지만, 이는 다중사용자 간섭, 클러터 등 기존 간섭과는 다른, 상호 간섭, 자기 간섭 및 교차링크 간섭 등 새로운 간섭을 유발한다. 본 논문에서는 각 간섭에 대해 소개하고, 송수신 빔포밍 모델링 방안을 소개한다.

I. 서 론

이동통신시스템은 데이터 교환을 통해 연결을 제공하는 수준을 넘어서 주변을 감지하고 위치를 탐지하여 가상과 현실을 넘나드는 새로운 서비스 제공을 위한 플랫폼으로 발전을 도모하고 있다. 이를 위해서는 기존 이동통신시스템에 센싱을 위한 레이더 기능이 추가로 필요하다. 통신 기능과 센싱 기능을 별개의 시스템으로 구현하여 별도의 주파수를 활용하여 동일한 무선 전파 환경에서 공존하도록 하는 방안은 두 시스템간 간섭 없이 안정적으로 운용할 수 있다. 하지만, 주파수 및 하드웨어 등 다양한 측면에서 비효율적이다. 따라서, 통신과 센싱을 동일한 주파수와 하드웨어를 공유하는 통합 센싱 및 통신 시스템이 차세대 이동통신시스템으로 많은 관심을 받고 있으며, 이를 효율적으로 구현하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다[1].

통신과 센싱이 동일한 주파수를 공유하고자 하는 시도는 기존과는 다른 새로운 간섭문제를 발생한다. 이동통신시스템에서는 다중사용자간 간섭 문제, 레이더 시스템에서는 원하는 목표물 이외 주변 환경에서 발생하는 클러터 문제를 해결하는 것이 주요한 목표였다. 하지만, 통신 기능과 센싱 기능이 동일한 주파수를 공유하고자 하면, 통신 신호와 센싱 신호간 간섭 등 새로운 형태의 간섭이 존재한다.

본 논문에서는 통합 센싱 및 통신 시스템에서 발생하는 간섭을 소개하고 이를 해결하기 위한 방안으로 송수신 빔포밍 방안에 대해 고려사항을 소개한다.

II. 본론

이동통신시스템에서는 다중사용자 간섭, 레이더 시스템에서는 클러터가 주요한 간섭이었다. 통신과 센싱이 통합됨에 따라, 상호간섭, 자기간섭, 교차링크간섭

등 새로운 간섭이 발생한다[2, 3]. 각 간섭의 발생 원인은 다음과 같다.

- 다중사용자 간섭: 각 사용자별 신호를 동시에 송수신하여 발생하는 각 사용자별 신호간 간섭
- 클러터: 센싱 신호가 관심 대상이 아닌 물체와 주변 환경에 반사되어 수신되는 간섭
- 상호 간섭: 통신 신호와 센싱 신호를 별개로 사용하여, 센싱 신호가 통신사용자에게 미치는 간섭과 통신 신호가 반사되어 센싱 수신기에 미치는 간섭
- 자기 간섭: 반사된 신호를 수신하기 위해 송수신이 동시에 이루어져야 하는 상황에서, 송신 신호가 센싱 수신기 직접 수신되어 발생하는 간섭
- 교차링크 간섭: 다수의 노드가 통신과 센싱을 하는 상황에서 노드 간 발생하는 간섭

상호 간섭은 동일한 무선자원에서 통신 신호와 센싱 신호를 별개로 사용하여 발생하는 간섭이다. 센싱 신호 송신과 수신이 동일한 장소에서 이루어지는 모노스테틱 센싱의 경우, 센싱 수신기는 송신되는 신호를 파악할 수 있으므로, 별도의 센싱 신호 없이 통신 신호만으로도 센싱이 가능하다[4]. CP-OFDM (cyclic prior orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 사용하여 센싱하는 경우에는 반사되어 수신신호를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역 신호로 변환하고, 변환된 신호 각각을 송신신호로 나누고, 이 신호를 주파수와 시간 영역에서 역푸리에 및 푸리에 변환을 수행하여 range-Doppler 맵을 만들 수 있다. 일반적으로 range-Doppler 맵에는 반사되어 수신된 신호들의 지연된 시간과 변화된 주파수 위치에서 큰 신호가 수신된다. DFT-S-OFDM (discrete Fourier transform spread OFDM) 신호는 주파수 영역의 신호는 이미 푸리에 변환되어 여러 개의 신호가 더해진 형태이다. 따라서, 더해진 신호가 원점 근처의 가우시안 분포를 가지면, 경우에 따라 0 근처의 매우 작은 값을 가질 수 있다. 이로 인해, CP-OFDM 에서 처리하는 방식처럼 바로 나누는 연산을 수행할 경우, 잡음이 크게 증폭될 수 있다. 주파수 영역에서 나누기 연산을

대처하기 위해, 시간 영역에서 cyclic cross-correlation 을 하는 방식이 제안되었다[5]. 이 방식은 시간 영역에서의 cross-correlation 을 주파수 영역에서 등가 방식인 반사 신호의 주파수 영역 신호와 송신 신호의 주파수 영역 신호의 켈레복소수를 곱하고, 주파수와 시간 영역에서 역푸리에 및 푸리에 변환을 수행하여 range-Doppler 맵을 만들 수 있다.

별도의 센싱 신호 없이 통신 신호만으로 센싱을 수행하면, 상호 간섭이 없는 장점이 있으나, 레이더 빔 형태에 영향을 미치는 자유도(degrees of freedom) 관점에서 손해를 볼 수 있다[6]. 이동통신시스템 하향링크에서 단말의 안테나가 하나인 경우 자유도는 기지국 안테나 수와 단말 수 중 작은 수로 결정된다. 단말 수가 기지국 안테나 수에 비해 작은 경우, 레이더 빔 형태에서 손해가 발생한다. 이러한 손해는 원하는 빔 형태와 실제 생성되는 빔 형태간 차이로 표현되며, 이 차이를 일정 수준 이하로 규정하는 유사도 제한조건을 시스템 성능 요구사항으로 설정할 수 있다[7]. 통신 신호와 센싱 신호를 송신 빔포밍(프리코딩)한 송신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다[8].

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_{c,k}} s_{c,k} \mathbf{w}_{c,k} + \sum_{l=1}^L \sqrt{p_{s,l}} s_{s,l} \mathbf{w}_{s,l} = \mathbf{W}_c \sqrt{\mathbf{P}_c} \mathbf{s}_c + \mathbf{W}_s \sqrt{\mathbf{P}_s} \mathbf{s}_s \quad (1)$$

여기서 s_k^c 와 s_l^s 는 각각 통신 신호와 센싱 신호, p_k^c 와 p_l^s 는 각각 통신 신호와 센싱 신호에 할당된 전력, \mathbf{t}_k 와 \mathbf{w}_k 는 각각 통신 신호와 센싱 신호용 송신 빔포밍 벡터를 의미한다. 더 일반적인 표현으로는 송신 빔포밍시 송신 전력과 송신 빔포밍을 분리하지 않고, 송신 빔포밍 벡터의 l^2 -norm 이 전력이 되지만, 여기서는, $\|\mathbf{t}_k\|_2^2 = \|\mathbf{w}_k\|_2^2 = 1$ 로 정의하고, 전력할당과 빔포밍을 분리하였다.

각도 θ 위치에서 보이는 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{a}_t^H(\theta) \mathbf{x} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{a}_t 는 송신 조향 벡터로 직선 상에 간격 d 로 균등하게 배치된 N 개 안테나의 경우 다음과 같다.

$$\mathbf{a}_t(\theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta}, \dots, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} (N-1) \sin \theta} \right]^T \quad (3)$$

모너스태틱 센싱처럼 송수신기가 동일한 위치에 있어 송신과 수신 각도가 동일한 경우, 반사되어 수신되는 센싱 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_s = \sum_{p=1}^P \alpha_p \mathbf{a}_r^*(\theta_p) \mathbf{a}_t^H(\theta_p) \mathbf{x} + \mathbf{z}_s \quad (4)$$

여기서 P 는 반사를 유발한 목표물의 총 개수, α_p 는 목표물의 복소 진폭 크기이며, \mathbf{n}_s 는 순환대칭복소 가우시안 잡음이다. 수신 조향 벡터 \mathbf{a}_r 은 송수신 안테나 수가 동일한 경우, 송신 조향 벡터와 동일하다고 가정한다. 수신 빔포밍(센싱 필터)를 거친 센싱 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_p^H \mathbf{y}_s. \quad (5)$$

목표물 p 에 대한 SCNR(signal to clutter and noise ratio)는 다음과 같다.

$$\text{SCNR}_p = \frac{|\alpha_p|^2 |\mathbf{f}_p^H \mathbf{a}_r^*(\theta_p) \mathbf{a}_t^H(\theta_p) \mathbf{x}|^2}{\sum_{i=1, i \neq p}^K |\alpha_i|^2 |\mathbf{f}_p^H \mathbf{a}_r^*(\theta_i) \mathbf{a}_t^H(\theta_i) \mathbf{x}|^2 + \sigma^2}. \quad (6)$$

각 통신 사용자가 수신한 신호를 벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_c = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix} = \mathbf{H}^H \left(\mathbf{W}_c \sqrt{\mathbf{P}_c} \mathbf{s}_c + \mathbf{W}_s \sqrt{\mathbf{P}_s} \mathbf{s}_s \right) + \mathbf{z}_c. \quad (7)$$

각 통신 사용자의 성능을 결정하는 SINR(signal to interference and noise ratio)는 다음과 같다.

$$\text{SINR}_k = \frac{p_k |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{c,k}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K p_i |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{c,i}|^2 + \sum_{l=1}^L p_l |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{s,l}|^2 + \sigma_k^2}. \quad (8)$$

통신 성능과 센싱 성능을 높이기 위해서는 SCNR 과

SINR 을 최대화하는 송수신 빔포밍을 설계해야 한다.

안테나 수가 충분히 많고, 송수신기 간 채널을 파악할 수 있다면, 채널의 null space 를 활용하는 빔포밍 방식으로 자기 간섭과 교차링크 간섭도 제거할 수 있다.

III. 결론

통합 센싱 및 통신 시스템에서 새로운 간섭을 분류하였다. 특히, 통신 신호와 별도로 센싱 신호를 도입할 경우 상호 간섭과 자유도 측면에서 장단점이 있으며, 이를 도입한 신호와 송수신 빔포밍 방식을 소개하였다. 안테나 수가 충분히 많고, 채널을 파악할 수 있다면, 다중 사용자 간섭, 클러터, 상호 간섭, 자기 간섭, 교차링크 간섭 등을 효과적으로 제거할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2018-II180218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실).

참 고 문 헌

- [1] F. Liu et al. "Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond," IEEE JSAC, vol. 40, no. 6, pp. 1728-1767, June 2022.
- [2] D. Xu et al. "Interference Mitigation for Network-Level ISAC: An Optimization Perspective," IEEE Comm. Mag. Vol. 62, no. 9, pp. 28-34, Sept. 2024.
- [3] Y. Niu et al. "Interference Management for Integrated Sensing and Communication Systems: A Survey," IEEE IoT Journal, vol. 12, no. 7, pp. 8110-8134, Apr. 2025.
- [4] K. Wu et al. "Integrating Low-Complexity and Flexible Sensing Into Communication Systems," IEEE JSAC, vol. 40, no. 6, pp. 1873-1889, June 2022.
- [5] Y. Zeng et al. "Joint radar-communication with cyclic prefixed single carrier waveforms," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 69, no. 4, pp. 4069-4079, Apr. 2020.
- [6] X. Liu et al. "Joint Transmit Beamforming for Multiuser MIMO Communications and MIMO Radar," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 68, pp. 3929-3944, 2020.
- [7] C. Tsinos et al. "Joint Transmit Waveform and Receive Filter Design for Dual-Function Radar-Communication Systems," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 15, no. 6, pp. 1378-1392, Nov. 2021.
- [8] H. Hua et al. "Optimal Transmit Beamforming for Integrated Sensing and Communication," Trans. Veh. Technol. vol. 72, no. 8, pp. 10588-10603, Aug. 2023.