

빔포커싱을 사용한 근거리장 통합 센싱 및 통신의 효과에 관한 연구

양시윤, 채찬병*

연세대학교

siyun.yang@yonsei.ac.kr, *cbchae@yonsei.ac.kr

A Study on the Effect of Near-field Integrated Sensing and Communications with Beamfocusing

Siyun Yang, Chan-Byoung chae*

Yonsei Univ.

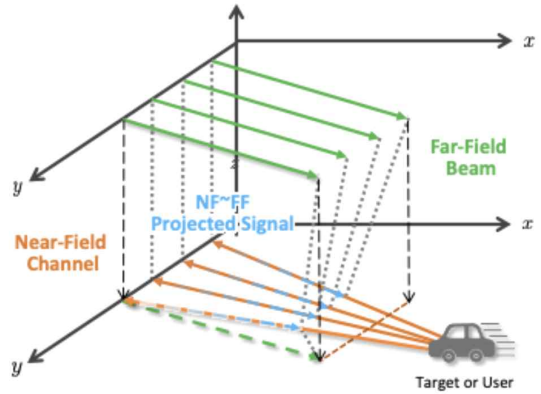
요약

본 논문에서는 근거리(NF) 영역에 위치한 통합 감지 및 통신(ISAC) 시스템의 복잡성을 탐구한다. 우리는 최신 통신 기술과 함께 지각이 가능한 모바일 네트워크(PMN)라는 혁신적인 개념을 도입하고자 한다. NF 영역을 포괄적으로 커버하기 위해서는 하향 링크 사용자와 센싱 대상에 서비스를 제공하는 빔포커싱이 필수적이다. 따라서, 우리는 NF 빔포커싱이 ISAC 시스템의 성능에 미치는 영향에 대해 설명한다.

I. 서론

통합 센싱 및 통신(ISAC)에서는 하향 링크(DL) 또는 상향 링크(UL) 통신 작업과 동시에 센싱 활동을 수행한다[1]. 전송 전에 파형 최적화가 이루어진다. ISAC은 기존 레이더의 연속파(CW) 기반 파형과 달리 직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 기반 파형을 사용한다[2]. 무선 통신의 추세는 밀리미터파(mmWave)에서 테라헤르츠(THz)에 이르는 높은 주파수로 이동하고 있으며, 이는 초광대역(UWB)의 중요성을 강조한다. 근거리(NF) 영역에서는 극대 배열(XLarray) 및 다중입력 다중출력(MIMO) 안테나를 지원하는 빔포커싱 기술이 중요해지고 있다. 이는 전통적인 원거리(FF) 빔스터어링 기술을 확장하여 NF 영역에서 통신 성능을 향상시킨다는 것을 [3]에서 언급하였다. 비록 레이더 연구가 고주파수 NF 조건에 맞춰 조정되었지만, ISAC은 특히 파형과 관련하여 특정 변화를 요구한다. 본 논문에서는 이에 관한 수학적 특징에 대해 탐구하였다.

가 감소하는 경향을 보인다. 이미 현대 ISAC 설계의 핵심 요소인 자체 간섭(SI)을 고려하고 있지만, NF 빔포커싱을 통합하면 에코와 신호를 강화하는 것부터 간섭 처리에 이르기까지 추가적인 문제점이 제시된다[4].



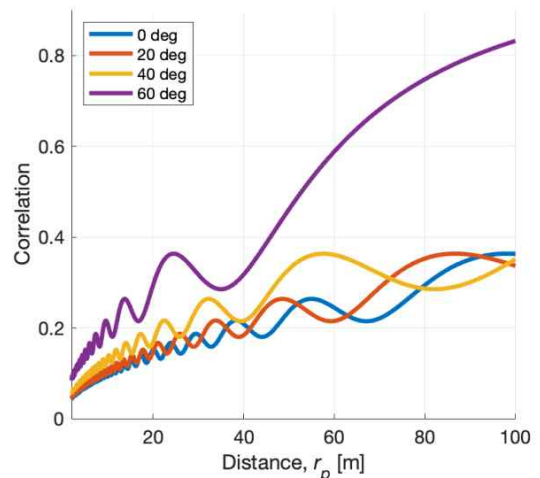
[그림 1] 근거리장 채널에서 원거리장 빔포밍의 효과

II. 본론

ISAC의 통합 발전은 특히 NF 영역 내 빔포커싱의 혁신에 의해 강조된다. 전통적코드북을 사용하여 아날로그 빔포밍을 사용하게 한다. 하지만, NF 영역 내 프라운인 하이브리드 빔포밍, 특히 아날로그 유형에서 일반적인 가정은 배열 채널이 평면파로 간주된다는 것이다. 이 가정은 공간 각도 영역을 위해 설계된 호퍼 거리의 사이에서 FF 빔포밍은 그림 1에서 보여지는 바와 같이 이득이 감소한다. 이러한 차이는 기존 코드북에만 의존하는 것이 NF 도메인의 센싱 및 통신을 위한 빔포밍의 효율성을 저해할 수 있다는 것을 시사한다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

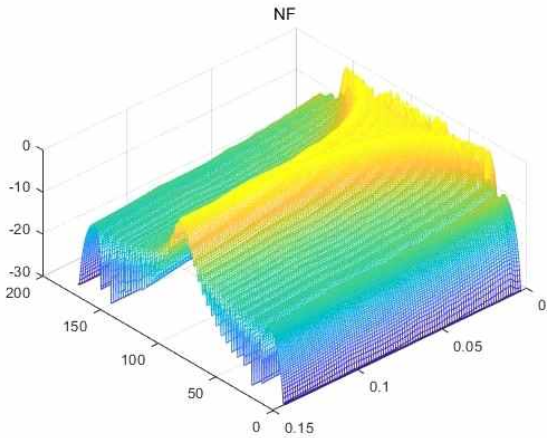
$$\mathbf{a}^H(\phi, f_c)\mathbf{a}(r, \phi, f_c) = \frac{1}{D} \int_{-\frac{D}{2}}^{\frac{D}{2}} e^{-\frac{j2\pi}{c_0} f_c \frac{\cos^2(\phi)}{2r} y^2} dy \quad (1)$$

이러한 통찰로 인해 빔포커싱 개념이 도입되었다[3]. 중심 주파수가 증가함에 따라 NF 영역이 확장되어, 기존 코드북 기반 빔포밍은 센싱 정확도

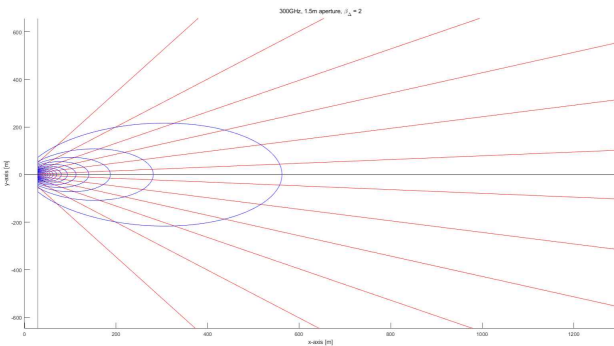


[그림 2] 임의의 각도에서 배열 응답 벡터 간의 상관 관계

이를 해결하기 위해서 먼저 NF가 ISAC 시스템에 주는 영향을 수학적으로 분석하였고 이를 [그림3, 4]로 시각화하였다.



[그림 3] 정규화된 Near-field 매니폴드 평면



[그림 4] 직교 널링 지점 그리드

[그림 3]를 보면 2차원 공간에서의 Uniform Liemar Array 구조의 안테나의 NF 매니폴드 평면을 그린 것이다. 이를 통해 단순한 각도에 대한 연산만으로 간단하게 구성되는 것이 아닌 거리에 대한 연산이 복잡하게 얽혀 있는 것을 확인할 수 있다. 이를 실제 통신과 레이더 센싱 관점에서 직관적으로 확인해 보기위해 2차원 공간에서의 센싱 그리드를 [그림 4]로 구현했다. [그림 4]를 보면 각도에 대해서만 직교 지점이 존재하는 것이 아닌 거리에 따른 영향도 동시에 고려해야 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 ISAC 시스템이 특정 포커싱 포인트에 대해서만 유효하므로 이를 보정해주는 설계가 필요하다.

III. 결론

본 논문에서는 ISAC 관점에서의 NF 설정에서의 센싱 성능을 탐구하였다. 그러나 빔포커싱은 복잡성을 도입한다. 우리는 빔포커싱의 초점이 변화함에 따라 결과에 영향을 미칠 수 있으며, 재교정이 필요함을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 지원(No. 2021-0-00486, No. 2021-0-02208)과 2023년도 두뇌한국21사업(4단계 BK21 사업)의 지원을 받아 수행된 연구임

(School of Integrated Technology / BK21 Graduate Program in IST).

참고 문헌

- [1] J. A. Zhang, M. L. Rahman, K. Wu, X. Huang, Y. J. Guo, S. Chen, and J. Yuan, "Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 24, no. 1, pp. 306 - 345, Firstquarter 2022
- [2] Z. Xiao and Y. Zeng, "Waveform design and performance analysis for full-duplex integrated sensing and communication," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1823 - 1837, Jun. 2022
- [3] M. Cui, Z. Wu, Y. Lu, X. Wei, and L. Dai, "Near-field MIMO communications for 6G: Fundamentals, challenges, potentials, and future directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 61, no. 1, pp. 40 - 46, Jan. 2023.
- [4] H. Zhang, N. Shlezinger, F. Guidi, D. Dardari, and Y. C. Eldar, "6G wireless communications: From far-field beam steering to near-field beam focusing," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 61, no. 4, pp. 72 - 77, Apr. 2023