

# Near-Field Hybrid-RIS 시스템에서 이론적 측위 하한 분석

전종현, 강정완, 김선우  
한양대학교 융합전자공학부

{danny0418, rkdwdhks77, remero}@hanyang.ac.kr

## Analysis on Localization Performance for HRIS-aided Near-Field System

Jonghyun Jeon, Jeongwan Kang, Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

### 요약

본 논문에서는 NF (Near-Field) 시스템에서 HRIS(Hybrid Reconfigurable Intelligent Surface)와 단말 측위의 크래머-라오 하한(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB)을 유도/분석한다. CRLB 유도를 위하여 HRIS와 기지국, 단말 사이의 측위 파라미터(거리, 각도)에 대한 정보를 FIM(Fisher Information Matrix)을 통하여 분석한다. 시뮬레이션을 통하여 NF 시스템에서 HRIS의 배열 크기와 TSNR(Transmitted Signal to Noise Ratio)에 따른 HRIS와 단말 측위 성능을 확인하였다.

### I. 서론

RIS(Reconfigurable Intelligent Surface)는 6G 시스템에서 측위를 위한 유망한 기술이다 [1]. 6G 시스템에서 대규모 안테나 배열과 고주파수 대역이 고려되므로 NF (Near-Field) 통신은 필수 고려사항이다 [2]. NF에서 신호의 곡률 정보를 활용한 RIS 지원 단말 측위 연구들이 수행되었다 [2], [3]. [3]에서는 NF 시스템에서 신호의 센싱, 반사가 동시에 가능한 HRIS(Hybrid RIS)를 사용하여 단말의 이론적 측위 하한을 분석하였다. [4]는 far-field 시스템에서 기지국과 HRIS 사이의 컨트롤 링크가 미존재할 때 HRIS와 단말 측위 알고리즘을 제안하였다. 본 논문은 NF 시스템에서 HRIS와 단말의 이론적 측위 하한을 분석한다. 이를 위하여 HRIS와 단말 측위 파라미터(거리, 각도)의 크래머-라오 하한(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB)을 분석한다. 시뮬레이션을 통하여 TSNR(Transmitted Signal to Noise Ratio)과 HRIS 배열 크기에 따른 측위 파라미터 CRLB를 비교/분석하였다.

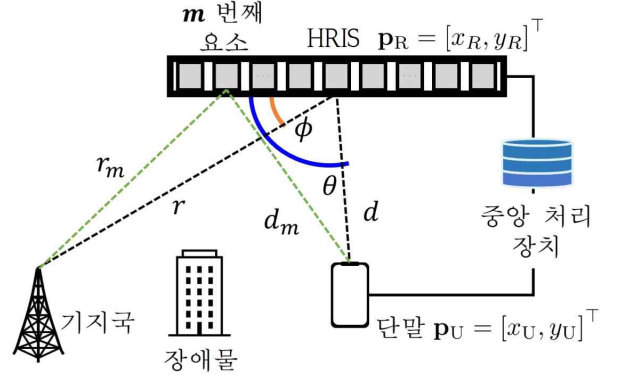


그림 1 NF SISO 시스템 HRIS와 단말 측위 시나리오

$\Delta_R, \Delta_U$ 은 각각 HRIS와 단말의 기지국에 대한 시계 바이어스이며, 본 논문은 기지국, HRIS, 단말 간의 완벽한 동기를 가정한다.  $n$  번째 부반송파에 대한 HRIS의 센싱 신호  $y_n^R$  과 단말이 수신한 HRIS 반사 신호  $y_n^U$  는 각각 다음과 같다.

$$y_n^R = \frac{\lambda}{4\pi r} \sum_{m=-M}^M (1-\rho_m) a_m e^{j\psi_m} s_n(\tau_m^R) x_n + w_n^R, \quad (3)$$

$$y_n^U = \frac{\lambda}{4\pi(d+r)} \sum_{m=-M}^M \rho_m b_m e^{j\omega_m} a_m s_n(\tau_m^U) x_n + w_n^U, \quad (4)$$

$\lambda$ 는 송신 신호 파장이며,  $\rho_m, \psi_m, \omega_m$ 은 각각 HRIS  $m$  번째 요소의 전력 분배 상수, 수신 위상 천이, 반사 위상 천이이다.  $w_n^i, i \in \{R, U\}$ 은 각각 HRIS와 단말의 잡음이며,  $CN(0, N_0)$ 의 분포를 따른다.  $\mu_n^R, \mu_n^U$ 은 각각 HRIS와 단말에서의 비잡음 관측을 나타낸다.  $a_m, b_m$ 은 각각  $e^{-j(2\pi/\lambda)\Delta r_m}, e^{-j(2\pi/\lambda)\Delta d_m}$  값을 가진다. 이때  $\Delta r_m$ 과  $\Delta d_m$ 는 HRIS 요소 간격  $\delta$ 에 대하여 2차 Taylor 근사를 사용하여 각각 다음과 같다.

$$\Delta r_m \approx -m\delta \cos\phi + \frac{(m\delta)^2}{2r} \sin^2\phi, \quad (5)$$

$$\Delta d_m \approx -m\delta \cos\theta + \frac{(m\delta)^2}{2d} \sin^2\theta, \quad (6)$$

### II. 시스템 모델

본 논문은 NF SISO (Single Input Single Output) 시스템에서 다운링크 시나리오를 고려한다. 그림 1은 시나리오와 구성 요소 간의 기하학적 관계를 보여준다. 기지국은 원점에 위치하며, HRIS와 단말의 위치는 각각  $\mathbf{p}_R = [x_R, y_R]^T \in \mathbb{R}^2, \mathbf{p}_U = [x_U, y_U]^T \in \mathbb{R}^2$ 이다.  $r, d, \phi, \theta$ 는 각각 기지국과 HRIS 거리, HRIS와 단말의 거리, HRIS에서 신호의 도래각 (Angle of Arrival, AoA), 출발각(Angle of Departure, AoD)이다. HRIS는 하나의 수신 RF (Radio Frequency) 체인과  $2M+1$  개의 안테나 요소로 구성된다. 기지국과 HRIS 사이에는 컨트롤 링크가 미존재하며 HRIS와 단말은 같은 중앙 처리 장치를 공유한다 [4].

기지국은  $N$  개의 부반송파를 이용하여 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호를 송신한다.  $n$  번째 부반송파에 대한 OFDM 신호  $x_n$ 은 다음과 같다.

$$x_n = \sqrt{\frac{P}{N}} e^{j2\pi n \Delta_f}, \quad (1)$$

$P$ 는 송신 전력이며,  $\Delta_f$ 는 부반송파 간격이다. HRIS의  $m$  번째 요소와 기지국, 단말 사이의 ToA (Time of Arrival)  $\tau_m^R, \tau_m^U$ 은 각각 다음과 같다. 이때  $m$ 은  $\{-M, \dots, M\}$ 의 값을 갖는다.

$$\tau_m^R = \frac{r_m}{c} + \Delta_R, \tau_m^U = \frac{r_m + d_m}{c} + \Delta_U, \quad (2)$$

$r_m, d_m$ 은 각각 기지국, 단말과 HRIS  $m$  번째 요소 사이의 거리이다.

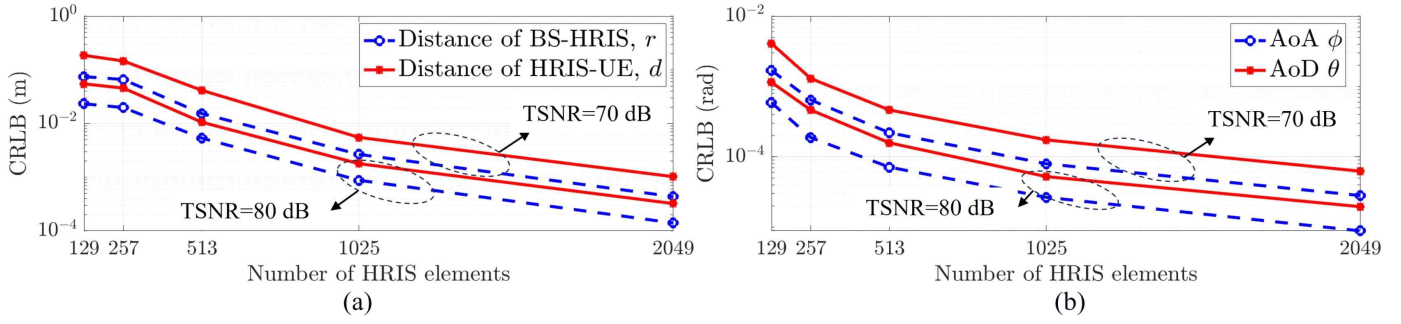


그림 2 HRIS 배열 크기, TSNR에 따른 (a)  $r$ ,  $d$  (b)  $\phi$ ,  $\theta$  의 CRLB

표 1 시뮬레이션 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
$\mathbf{p}_R$	$[3, 4]^T m$	$N_0$	$8.00 \times 10^{-10} mW$
$\mathbf{p}_U$	$[6, 0]^T m$	$\omega_m$	$U[0, 2\pi)$
$N$	1,000	$\rho_m$	$\{0, 1\}$
$\Delta_f$	200 kHz	$\psi_m$	$U(-\pi, \pi)$

$s_n(\tau)$ ,  $\tau \in \{\tau_m^R, \tau_m^U\}$  는 다음과 같이 나타난다.

$$s_n(\tau) = e^{-j2\pi\tau(n-1)\Delta_f}. \quad (7)$$

### III. HRIS와 단말 측위 CRLB

CRLB는 추정치 공분산의 이론적 하한이며, 추정 성능을 나타내는 지표이다 [5]. 본 섹션은 HRIS와 단말 측위 파라미터(거리, 각도)에 대한 CRLB를 유도한다.  $n$  번째 부반송파에 대한 비잡음 관측 벡터  $\mu_n$  은  $[\mu_n^R, \mu_n^U]^T \in \mathbb{C}^2$  이며, HRIS와 단말 측위 파라미터 벡터  $\eta$  는  $[r, d, \phi, \theta]^T \in \mathbb{R}^4$  이다.  $\mathbf{J}_\eta$  은  $\eta$  의 FIM(Fisher Information Matrix)이며 다음과 같이 나타난다.

$$\mathbf{J}_\eta = \sum_{n=1}^N \mathbf{J}_{\eta,n} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad (8)$$

$\mathbf{J}_{\eta,n}$  은  $n$  번째 부반송파에 대한  $\eta$  의 FIM이며 행렬 원소의 실수 부분을 나타내는 연산자  $\text{real}(\cdot)$  을 사용하여 다음과 같다.

$$\mathbf{J}_{\eta,n} = \frac{2}{N_0} \text{real} \left\{ \left( \frac{\partial \mu_n}{\partial \eta} \right)^H \left( \frac{\partial \mu_n}{\partial \eta} \right) \right\} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, \quad (9)$$

측위 파라미터  $r$ ,  $d$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  에 대한 각 CRLB는  $\mathbf{J}_\eta$  을 통하여 구해지며 각각 다음과 같다.

$$\text{CRLB}_r = \sqrt{[(\mathbf{J}_\eta)^{-1}]_{1,1}}, \quad (10)$$

$$\text{CRLB}_d = \sqrt{[(\mathbf{J}_\eta)^{-1}]_{2,2}}, \quad (11)$$

$$\text{CRLB}_\phi = \sqrt{[(\mathbf{J}_\eta)^{-1}]_{3,3}}, \quad (12)$$

$$\text{CRLB}_\theta = \sqrt{[(\mathbf{J}_\eta)^{-1}]_{4,4}}. \quad (13)$$

### IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

NF HRIS 시스템 시나리오에서 기지국이 송신하는 OFDM 신호의 중심 주파수는 28 GHz이며  $\lambda$  는 약 0.01 m이다. 표 1은 시뮬레이션에 사용한 파라미터이다. HRIS의 배열은 반파장 등간격으로 배치된다. 시뮬레이션 환경에서  $M$  은  $\{2^6, \dots, 2^{10}\}$  의 값을 가지며, 모든 경우 단말, 기지국은 HRIS의 NF 내에 존재한다. TSNR은 송신 전력과 HRIS,

UE에서 잡음 사이의 비로 정의한다 (i.e.,  $\text{TSNR} = 10 \log_{10}(P/N_0)$ ).

그림 2는 각 시뮬레이션 환경에서 측위 파라미터의 CRLB를 보여준다. 모든 파라미터에 대하여 HRIS 배열 크기가 증가할수록 CRLB가 감소한다. 이는 배열 크기가 커질수록 NF 효과가 커지며 센싱 및 반사 신호에 대한 이득이 커지기 때문이다. 또한 모든 파라미터가 TSNR=80 dB일 때 더 낮은 CRLB를 갖는다. 모든 시뮬레이션 환경에서 단말의 측위 파라미터  $d$ ,  $\theta$  는 각각 HRIS의 측위 파라미터  $r$ ,  $\phi$  보다 더 높은 CRLB를 갖는다. 이는 단말이 수신 신호에서 추정하는  $d$ ,  $\theta$  가  $r$ ,  $\phi$  의 추정 오차에 영향을 받기 때문이다. CRLB가 가장 높은 HRIS의 요소 수 129, TSNR=70 dB인 상황에서  $d$ ,  $\theta$  의 CRLB는 각각 약 0.24 m, 0.004 rad이다. 따라서 NF 시스템에서 기지국, HRIS 컨트롤 링크가 미존재할 때 HRIS와 단말의 측위가 가능함을 확인할 수 있다.

### V. 결론

본 논문은 NF 시스템에서 HRIS와 단말의 이론적 측위 하한을 분석하였다. 측위 하한은 HRIS와 단말의 측위 관련 파라미터(거리, 각도)에 대한 CRLB 유도를 통하여 확인한다. 시뮬레이션을 통하여 NF 시스템에서 HRIS와 단말의 측위 파라미터 추정 성능을 확인하였다. 향후 실제적인 측위 알고리즘 연구 및 비동기 상황에서 측위 성능 분석이 필요하다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

### 참고 문헌

- [1] K. Keykhosravi, et al., "Leveraging ris-enabled smart signal propagation for solving infeasible localization problems: Scenarios, key research directions, and open challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 18, no. 2, pp. 20 - 28, 2023.
- [2] Y. Pan, et al., "Ris-aided near-field localization and channel estimation for the terahertz system," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 17, no. 4, pp. 878 - 892, 2023.
- [3] X. Zhang and H. Zhang, "Hybrid reconfigurable intelligent surfaces-assisted near-field localization," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 135 - 139, 2023.
- [4] R. Ghazalian, et al., "Joint user localization and location calibration of a hybrid reconfigurable intelligent surface," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 1, pp. 1435 - 1440, 2024.
- [5] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Estimation Theory*, vol. 1. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 1993.