

밀리미터파 MISO 브로드캐스트 채널에서 유저 협력 무선 측위 기법

석근영*, 윤우진*, 이정훈^o

Cooperative Wireless Localization in mmWave MISO Broadcast Channels

Keun Young Seok*, Woojin Yun*, Jung Hoon Lee^o

요 약

무선 통신 시스템이 발전함에 따라, 무선 측위 기술이 제공하는 위치 정보의 정확도가 향상될 것으로 기대되고 있으며, 따라서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 mmWave를 사용하는 multiple-input and single-output(MISO) 브로드캐스트 채널에서 인접한 유저들이 협력하여 위치 정보의 정확도를 높이는 무선 측위 기법을 제안한다. 이때 인접 유저들은 서로의 위치(상대위치)를 정확히 알 수 있으며, 관련 정보를 공유할 수 있다고 가정한다. 이러한 가정하에 제안하는 기법에서는 인접 유저들이 협력하여 유저 위치들의 무게중심을 구하고, 각 유저는 무게중심으로부터 자신의 위치를 구한다. 제안한 기법의 성능 분석을 위해 위치 오차에 대한 이론적 하한인 Cramer-Rao lower bound(CRLB)를 분석하고, 유저들이 독립적으로 측위를 수행하는 기존 기법과 비교한다.

Key Words : Wireless positioning, location accuracy, mmWave, multiple-input and single-output (MISO) broadcast channels, cooperative localization, Cramer-Rao lower bound (CRLB)

ABSTRACT

As wireless communication systems evolve, the accuracy of a wireless positioning scheme is expected to be improved, so the related researches are being actively conducted. In this paper, we consider mmWave multiple-input and single-output (MISO) broadcast channels and propose a cooperative wireless positioning scheme among adjacent users to increase the location accuracy. In this case, we assume that the adjacent users can exactly know their relative positions and share the related information. Under these assumptions, in our proposed scheme, the adjacent users cooperatively find their centroid, and each user obtain its own position from the centroid. We analyze the accuracy of our proposed scheme via Cramer-Rao lower bound (CRLB), which is a theoretical lower bound for estimation error. Then, we compare our proposed scheme with a conventional scheme, where each user independently estimates its own position.

※ This work was supported by Hankuk University of Foreign Studies Research Fund of 2019 and by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2016R1C1B2010281).

♦ First Author : Department of Electronics Engineering and Applied Communications Research Center, Hankuk University of Foreign Studies, tjrrmsdud17@hufs.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of Electronics Engineering and Applied Communications Research Center, Hankuk University of Foreign Studies, tantheta@hufs.ac.kr, 정회원

* Department of Electronics Engineering, Chungnam National University and National Nanofab Center, woojinyun@nncf.re.kr
논문번호 : 201910-251-A-RN, Received October 24, 2019; Revised October 31, 2019; Accepted November 6, 2019

I. 서론

최근 자율주행 자동차, 드론 등의 무인 이동체를 비롯하여, 위치 정보를 필요로 하는 다양한 분야를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 때 위치기반서비스(LBS: location-based service)를 위해 더 정확하고 신뢰성 있는 위치 정보가 요구된다^[1]. 내비게이션 등에서 일반적으로 사용되는 global positioning system(GPS)은 전 세계적으로 널리 사용되고 있지만, 가시경로(LoS: line-of-sight) 확보가 비교적 쉬운 실외 환경에 사용이 국한되어 있고, 위치 오차는 10 ~ 20m로 차세대 통신시스템에서 사용하기엔 오차가 크다^[2]. 특히, 앞서 말한 자율주행 자동차, 드론 등 무인 이동체의 충돌을 방지하기 위해서는 보다 정밀한 측위 기술이 필요하다.

무선 통신 시스템을 기반으로 하는 측위 기술, 즉 무선 측위 기술은 GPS의 한계를 극복하기 위한 강력한 대안으로 떠오르고 있다^[3]. 무선 측위 기술은 휴대전화 등의 무선 단말로부터의 무선 주파수(RF: radio frequency)를 이용하여 기지국(BS: base station), 액세스 포인트(AP: access point) 등에서 무선 단말의 위치를 추정하는 기술이다. 무선 측위 기술은 수신 신호 세기(RSS: received signal strength), 신호 도래 각(AoA: angle of arrival) 등 무선 신호의 측정값과 다양한 추정 방식에 따라 여러 가지 기법들로 나눌 수 있다^[3]. 무선 측위 기술은 기존의 통신 네트워크와 무선 단말을 사용하므로 위치 추정을 위한 추가적인 인프라 구축비용을 절감할 수 있는데, 통신 시스템의 성능에 따라 위치 추정의 성능, 즉 위치 정확도도 달라질 수 있다. 그러므로 5G/6G, mmWave, massive MIMO 등 무선 통신시스템이 발전함에 따라, 보다 정밀한 측위 기술의 가능성이 제시되고 있다^[4-5].

본 논문은 mmWave를 사용하는 multiple-input and single-output(MISO) 브로드캐스트 채널에서 유저 간 협력 측위를 통해 위치 정확도를 향상시키는 기법을 제안한다. 본 논문에서는 mmWave의 높은 주파수 대역 통신 시스템을 고려하여, 가시 경로(LoS)가 확보되는 실외 환경을 가정한다. 따라서, 수신 신호의 도달 시간(ToA: time of arrival)을 기반으로 하는 위치 추정 기법을 사용할 수 있다. 또한, 인접한 유저들끼리 서로의 상대 위치를 확인할 수 있으며, 이를 공유할 수 있다고 가정한다. 이러한 가정하에 제안하는 기법에서는 인접 유저들이 협력하여 유저 위치들의 무게중심을 구하고, 각 유저는 무게중심으로부터 자신의 위치를 구한다. 제안한 기법의 성능 분석을 위해

위치 오차에 대한 이론적 하한인 Cramer-Rao lower bound(CRLB)를 분석하고, 유저들이 독립적으로 측위를 수행하는 기존 기법과 비교한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서 무선 측위 기법에 대해 간단히 소개하고, III장에서 고려하는 시스템 모델을 설명한다. IV장에서 제안하는 기법에 대해 설명하고, V장에서 기존 기법과 제안하는 기법의 위치 오차 하한에 대해 설명한다. VI장에서 성능 분석을 통해 기존 기법과 제안하는 기법을 비교 및 분석 후 VII장에서 결론을 맺는다.

II. 무선 측위 기법

이번 장에서는 무선 측위 기법들에 대해 소개한다.

2.1 Time of arrival(ToA) 기법

Time of arrival(ToA) 기법은 수신 신호의 도달 시간으로부터 신호원의 위치를 추정하는 기법이다. 도달 시간으로부터 신호원의 위치를 추정하는 경우, 모든 신호원들과 수신기들은 동기화가 이루어져야 한다^[6-7]. 신호원과 수신기간의 비동기 모델에서도 도달 시간을 이용한 위치 추정 기법이 연구되었지만^[8-9], 이번 절에서는 일반적인 동기 모델에서의 ToA 기법을 소개한다.

그림 1에 2차원 공간에서 ToA 기법을 사용한 위치 추정 예시를 나타내었다. 세 개의 기지국과 한 명의 유저가 있으며, 세 개의 기지국들이 유저의 위치, 즉 (X, Y) 를 추정하고자 한다. 기지국들의 위치는 각각 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_3)$ 이다. i 번째 기지국으로부터 유저까지의 도달 시간을 τ_i 라고 할 때, i 번째 기지

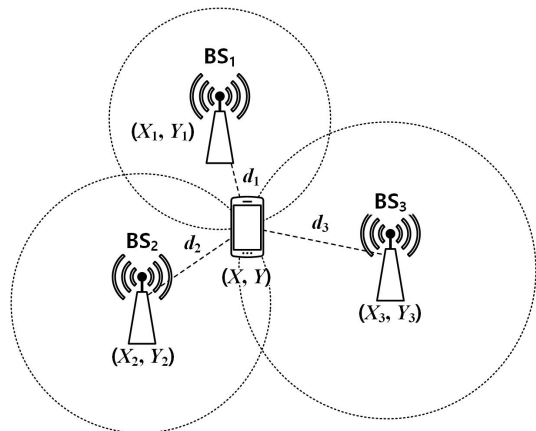


그림 1. Time of arrival(ToA) 기법
Fig. 1. Time of arrival(ToA) scheme

국과 유저간의 거리는 다음과 같다.

$$d_i = c\tau_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도($3 \times 10^8 m/s$)이다. 이 때 유저의 위치 (X, Y) 는 다음을 만족한다.

$$\sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2} = d_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2)$$

즉, 유저의 위치는 각 기지국을 중심으로 하는 원들의 교차점에 있기 때문에, 기지국들은 유저의 위치를 추정할 수 있다. 또한, 2차원 공간에서 ToA 기법은 기지국 또는 송신 안테나가 최소 세 개 이상이어야 위치 추정이 가능하다.

2.2 기타 무선 측위 기법

앞서 설명한 ToA 기반의 위치 추정 기법 외에도 다양한 무선 측위 기법들이 있다. 수신 신호 세기(RSS)로부터의 기지국과 유저 간 거리를 이용하여 유저의 위치를 추정하는 기법^[10-11], 신호의 도래 각(AoA)으로부터 유저의 위치를 추정하는 기법^[12-13], 신호의 도달 시간 차이(TDoA: time difference of arrival)로부터 유저의 위치를 추정하는 기법^[14] 등이 있다. 또한, 수신 신호의 측정값(수신 신호 세기, 도래 각 등)을 두 개 이상 사용하여 수신기의 위치를 추정하는 hybrid 기법도 활발히 연구되고 있다^[15-17].

수신 신호의 측정값을 직접적으로 위치 추정에 사용하는 방법 외에도 몇 가지 무선 측위 기법들이 있는데, 대표적으로 fingerprinting 기법이 있다. Fingerprinting 기법은 특정 범위의 공간에 대해 신호의 측정값(수신 신호 세기 등)들을 저장하여 데이터베이스를 구축한다. 그 후, 수신된 신호를 미리 수집된 데이터베이스와 비교하여 수신기의 위치를 추정하는 방법으로, 신호의 왜곡이 심한 실내 환경 등에서 많이 활용된다^[18].

III. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 그림 2에 나타내었다. 송신단으로서 $N_t (\geq 4)$ 개의 다중 안테나를 가지는 한 개의 기지국이 있고, 수신단으로서 단일 안테나를 가지는 K 명의 유저가 있는 MISO 브로드캐스트 채널 모델을 고려한다.

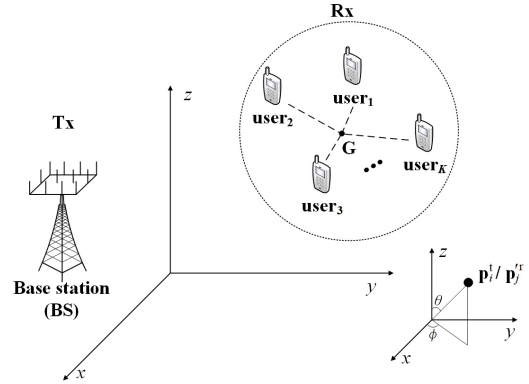


그림 2. 시스템 모델
Fig. 2. System model

3.1 안테나 모델

3차원 공간에서 기지국과 유저들의 위치를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}^t &\triangleq [x^t, y^t, z^t]^T, \\ \mathbf{p}_i^r &\triangleq [x_i^r, y_i^r, z_i^r]^T, \quad i = 1, \dots, K. \end{aligned} \quad (3)$$

이 때, 기지국과 유저간의 거리는 유저들 간의 거리에 비해 훨씬 길다고 가정한다. 즉,

$$D_i \triangleq \|\mathbf{p}^t - \mathbf{p}_i^r\| \gg d_{ij} \triangleq \|\mathbf{p}_i^r - \mathbf{p}_j^r\|, \quad i, j = 1, \dots, K. \quad (4)$$

본 논문에서는 고정된 안테나 모델을 고려한다. 따라서 그림 2에서 방위각과 고각을 각각 ϕ, θ 라고 할 때, 기지국의 각 안테나 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p}_i^t = \mathbf{p}^t + \begin{bmatrix} \sin(\theta_i^t) \cos(\phi_i^t) \\ \sin(\theta_i^t) \sin(\phi_i^t) \\ \cos(\theta_i^t) \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, N_t. \quad (5)$$

각 유저들의 안테나 위치는 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_i^r = \mathbf{p}_i^r + \begin{bmatrix} \sin(\theta_i^r) \cos(\phi_i^r) \\ \sin(\theta_i^r) \sin(\phi_i^r) \\ \cos(\theta_i^r) \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, K. \quad (6)$$

기지국의 한 개 안테나와 유저 간 신호의 도달 시간(ToA)은 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = \frac{\|\mathbf{p}'_i - \mathbf{p}'_j\|}{c}, \quad i = 1, \dots, K, \quad j = 1, \dots, N_t. \quad (7)$$

여기서 c 는 빛의 속도($3 \times 10^8 m/s$)이다.

3.2 신호 모델

3차원 공간에서 기지국의 각 안테나의 송신 신호는 다음과 같다.

$$s_i(t), \quad i = 1, \dots, N_t. \quad (8)$$

전체 송신 전력이 E_t 일 때, 한 개 안테나의 송신 전력은 $E[s_i(t)^2] = E_t/N_t$ 로 모든 송신 안테나에 대해 동일한 송신 전력을 할당한다. i 번째 유저와 l 번째 송신 안테나의 채널을 다음과 같이 모델링한다.

$$h_{il} = a_{il} \exp[j(\psi_{il} + 2\pi f_c \tau_{il})], \quad i = 1, \dots, K, \quad l = 1, \dots, N_t. \quad (9)$$

여기서 a_{il} 은 채널의 진폭, ψ_{il} 는 송신 시점에서의 채널 위상, f_c 는 채널의 중심 주파수를 나타낸다. 즉, 송신 시점에서의 채널 위상 ψ_{il} 에 대해 수신단에서 $2\pi f_c \tau_{il}$ 만큼의 위상 천이가 발생한다. 식 (8)과 (9)를 이용하여 i 번째 유저의 수신 신호를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{N_t} h_{ij} s_j(t - \tau_{ij}) + n_i(t), \quad i = 1, \dots, K. \quad (10)$$

여기서 $n_i(t) \sim CN(0, \sigma^2)$ 는 i 번째 유저의 additive white Gaussian noise(AWGN)이다. 본 논문에서는 가시 경로(LoS)가 확보되는 실외 환경을 고려한다. 그러므로 mmWave 신호 모델을 고려할 수 있고, 이 신호 모델의 ToA를 사용할 수 있다.

IV. 제안하는 기법

본 논문에서 수신단의 인접한 유저들은 다른 유저들과의 상대적인 위치를 알고 있고, 이를 통해 유저들의 무게 중심을 알 수 있다고 가정한다. 또, 유저들은 자신의 수신 신호의 신호 대 잡음비(SNR: signal-to-noise power ratio)를 인접한 유저들과 공유

한다고 가정한다.

식 (3)에서 각 유저의 위치는 다음과 같다.

$$\mathbf{p}'_i = [x_i^r, y_i^r, z_i^r]^T, \quad i = 1, \dots, K. \quad (11)$$

이 때, 인접한 유저들은 서로의 위치 정보를 공유하므로, i 번째 유저가 알 수 있는 다른 유저와의 상대적인 위치를 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta_{ij} \triangleq [x_i^r - x_j^r, y_i^r - y_j^r, z_i^r - z_j^r]^T, \quad i, j = 1, \dots, K. \quad (12)$$

i 번째 유저는 자신과의 상대적인 위치, 즉 $\Delta_{ii} = 0$ 도 알 수 있으므로, 식 (12)를 이용하여 다음을 알 수 있다.

$$\sum_{j=1}^K \Delta_{ij} = \Delta_{i1} + \dots + \Delta_{ii} + \dots + \Delta_{iK} = \begin{bmatrix} (-x_1^r) + \dots + (K-1)x_i^r + \dots + (-x_K^r) \\ (-y_1^r) + \dots + (K-1)y_i^r + \dots + (-y_K^r) \\ (-z_1^r) + \dots + (K-1)z_i^r + \dots + (-z_K^r) \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, K. \quad (13)$$

한편 K 명의 유저 위치에 대한 무게중심의 위치는 다음과 같이 주어지는데

$$\mathbf{G} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{p}'_i = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K [x_i^r, y_i^r, z_i^r]^T, \quad (14)$$

따라서 (13)과 (14)를 이용하여 다음의 수식을 구할 수 있다.

$$K\mathbf{G} + \sum_{j=1}^K \Delta_{ij} = [Kx_i^r, Ky_i^r, Kz_i^r]^T, \quad i = 1, \dots, K. \quad (15)$$

식 (15)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[x_i^r, y_i^r, z_i^r]^T = \frac{K\mathbf{G} + \Delta_{i1} + \dots + \Delta_{iK}}{K} = \mathbf{G} + \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \Delta_{ij}, \quad i = 1, \dots, K. \quad (16)$$

식 (16)은 i 번째 사용자가 알고 있는 다른 유저와의 상대적 위치와 유저들의 무게중심 위치를 이용하여 자신의 위치를 표현한 식이다. 즉, 다른 유저들의 상대적인 위치를 알고 있으면, 그 상대적인 위치와 무게중심을 이용하여 자신의 위치도 알 수 있다. 따라서 수신단의 모든 유저의 위치를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p}_i^r = \mathbf{G} + \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \Delta_{ij}, \quad i = 1, \dots, K. \quad (17)$$

또, 각 유저들의 안테나 위치, 즉 식 (6)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p}_{i'}^{r'} = \mathbf{G} + \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \Delta_{ij} + \begin{bmatrix} \sin(\theta_i^r) \cos(\phi_i^r) \\ \sin(\theta_i^r) \sin(\phi_i^r) \\ \cos(\theta_i^r) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$i = 1, \dots, K.$

예를 들어 수신단에 세 명의 유저가 있을 때, 각 유저의 위치는 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_i^r = [x_i^r, y_i^r, z_i^r]^T, \quad i = 1, 2, 3. \quad (19)$$

이 때, 첫 번째 유저가 알 수 있는 다른 유저와의 상대적인 위치, 즉 두 번째 유저와 세 번째 유저와의 상대적인 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta_{12} &= [x_1^r - x_2^r, y_1^r - y_2^r, z_1^r - z_2^r]^T, \\ \Delta_{13} &= [x_1^r - x_3^r, y_1^r - y_3^r, z_1^r - z_3^r]^T. \end{aligned} \quad (20)$$

첫 번째 유저는 자신과의 상대적인 위치 Δ_{11} 도 알 수 있으므로, 식 (20)을 이용하여 다음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta_{11} + \Delta_{12} + \Delta_{13} \\ = [2x_1^r - x_2^r - x_3^r, 2y_1^r - y_2^r - y_3^r, 2z_1^r - z_2^r - z_3^r]^T. \end{aligned} \quad (21)$$

세 명의 유저 위치에 대한 무게중심은 다음과 같다.

$$\mathbf{G} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \mathbf{p}_i^r = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [x_i^r, y_i^r, z_i^r]^T. \quad (22)$$

식 (21)과 (22)를 이용하여 첫 번째 유저의 위치와

안테나 위치를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1^r &= [x_1^r, y_1^r, z_1^r]^T = \frac{3\mathbf{G} + \Delta_{11} + \Delta_{12} + \Delta_{13}}{3} \\ &= \mathbf{G} + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta_{1i}. \end{aligned} \quad (23)$$

$$\mathbf{p}_{1'}^{r'} = \mathbf{G} + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta_{1i} + \begin{bmatrix} \sin(\theta_1^r) \cos(\phi_1^r) \\ \sin(\theta_1^r) \sin(\phi_1^r) \\ \cos(\theta_1^r) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

제안하는 기법은 수신단의 인접한 모든 유저들이 알 수 있는 유저들의 상대적인 위치 Δ 와 무게중심 \mathbf{G} 를 이용함으로써 위치 추정을 위한 추가적인 정보를 얻을 수 있고, 유저들이 독립적으로 자신의 위치를 추정하는 기존 방식보다 위치 정확도를 높일 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 본 논문에서는 기존 기법과 제안하는 기법에 대해 ToA기반의 위치 추정 기법을 사용한다.

V. 위치 오차 하한

본 논문에서는 위치 오차의 이론적 하한, 즉 위치 오차에 대한 Cramer-Rao lower bound(CRLB)를 이용하여 제안하는 기법의 성능을 평가한다. CRLB는 추정의 성능을 나타내는 지표 중 하나로서, 추정하고자 하는 값에 대한 분산의 이론적인 하한을 제공한다. 즉, CRLB를 사용하면 추정 값에 대한 오차의 이론적인 하한을 통해 알 수 없는 값에 대한 추정 정확도를 구할 수 있고, 이를 가지고 추정 성능을 평가할 수 있다. CRLB는 대상의 확률 밀도 함수(PDF: probability density function)를 바탕으로 구할 수 있으며, 통신 분야에서는 주로 AWGN이 있는 신호 모델에 적용하여 사용한다¹⁹⁾.

추정하고자하는 유저의 위치에 대해, 알 수 없는 파라미터 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{u} \triangleq [(\mathbf{p}^r)^T, \boldsymbol{\psi}^T]^T. \quad (25)$$

여기서 $\mathbf{p}^r = [\mathbf{p}_1^r, \dots, \mathbf{p}_K^r]^T$, 즉 수신단 유저들의 위치 벡터이고, $\boldsymbol{\psi} = [\boldsymbol{\psi}_1, \dots, \boldsymbol{\psi}_{N_i}]^T$, 즉 송신 시점에서의 채널 위상 벡터이고, $\boldsymbol{\psi}_i = [\psi_{i1}, \dots, \psi_{iK}]^T$, $i = 1, \dots, N_i$ 이다.

식 (25)에 대한 CRLB는 다음과 같다.

$$E[(\hat{\mathbf{u}}-\mathbf{u})(\hat{\mathbf{u}}-\mathbf{u})^H] \geq \mathbf{M}(\mathbf{u})^{-1}. \quad (26)$$

여기서 $\hat{\mathbf{u}}$ 는 \mathbf{u} 의 불편 추정량, $\mathbf{M}(\mathbf{u})$ 는 \mathbf{u} 의 Fisher information matrix(FIM)이며 다음과 같다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{u}) = -E\left[\frac{\partial^2 \ln p(\mathbf{y}; \mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}^2}\right]. \quad (27)$$

여기서 $\mathbf{y} = [y_1^r, \dots, y_K^r]^T$ 는 유저들의 수신 신호 벡터이고, $\ln p(\mathbf{y}; \mathbf{u})$ 는 \mathbf{u} 에 대한 \mathbf{y} 의 log-likelihood 함수이다. 이 때, likelihood 함수는 다음과 같다.

$$p(\mathbf{y}; \mathbf{u}) = \prod_{i=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(y_i(t) - x_i(t))^2\right] \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K (y_i(t) - x_i(t))^2\right]. \quad (28)$$

여기서 $x_i(t)$ 는 i 번째 수신 신호에서 AWGN을 뺀 유효한 수신 신호, 즉 $x_i(t) = y_i(t) - n_i(t)$, $i = 1, \dots, K$ 이다. 따라서 $\ln p(\mathbf{y}; \mathbf{u})$ 는 다음과 같다.

$$\ln p(\mathbf{y}; \mathbf{u}) \\ = -\frac{K}{2} \ln(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^K (y_i(t) - x_i(t))^2. \quad (29)$$

본 논문에서는 ToA기반의 위치 추정 기법을 고려하고, 식 (25)의 추정하는 파라미터는 수신 신호의 ToA와 관련이 있다. 따라서 다음과 같은 알 수 없는 파라미터 벡터를 정의할 수 있다.

$$\mathbf{u}' \triangleq [\boldsymbol{\tau}^T, \boldsymbol{\psi}^T]^T. \quad (30)$$

여기서 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_K]^T$, 즉 수신단 유저들의 ToA 벡터이고, $\tau_i = [\tau_{i1}, \dots, \tau_{iN_i}]^T$, $i = 1, \dots, K$ 이다.

식 (25)와 (30)은 서로 연관성이 있으므로, 연쇄 법칙을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{u}) = \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial \mathbf{u} \partial \mathbf{u}}\right) \mathbf{M}(\mathbf{u}') \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial \mathbf{u} \partial \mathbf{u}}\right)^H. \quad (31)$$

식 (31)을 이용하여 구하고자하는 Fisher infor-

mation matrix, 즉 식 (27)을 구할 수 있다. 식 (31)의 우측 항들을 풀면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial \mathbf{u} \partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \mathbf{p}^r}, \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \boldsymbol{\psi}} \\ \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \mathbf{p}^r}, \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \boldsymbol{\psi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \mathbf{p}^r}, 0 \\ 0, \mathbf{I} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

$$\mathbf{M}(\mathbf{u}') \\ = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^K \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\tau}} \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\tau}}, \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\psi}} \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\psi}} \\ \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\psi}} \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\tau}}, \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\psi}} \frac{\partial x_i(t)}{\partial \boldsymbol{\psi}} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}'}{\partial \mathbf{u} \partial \mathbf{u}}\right)^H = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \mathbf{p}^r}, \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \boldsymbol{\psi}} \\ \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \mathbf{p}^r}, \frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \boldsymbol{\psi}} \end{bmatrix}^H = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \mathbf{p}^r}\right)^H, \left(\frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \mathbf{p}^r}\right)^H \\ \left(\frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \boldsymbol{\psi}}\right)^H, \left(\frac{\partial \boldsymbol{\psi}}{\partial \boldsymbol{\psi}}\right)^H \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \mathbf{p}^r}\right)^H, 0 \\ 0, \mathbf{I} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

식 (32)~(34)를 이용하여 $\mathbf{M}(\mathbf{u})$ 를 구하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{u}) = 8\pi^2 \text{SNR}(\beta^2 + f_c^2) \mathbf{P}. \quad (35)$$

여기서 SNR은 송신 신호의 SNR, β 는 유효 신호 대역폭, \mathbf{P} 는 3차원 공간에서 수신단 유저들에 대한 geometric matrix이다. 따라서 제안하는 기법에 대한 위치 오차 하한은 다음과 같다.

$$\text{CRLB}_{\text{proposed}} = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{M}(\mathbf{u})^{-1})} \\ = \sqrt{\frac{\text{tr}(\mathbf{P}^{-1})}{8\pi^2 \text{SNR}(\beta^2 + f_c^2)}}. \quad (36)$$

여기서 $\text{tr}(\cdot)$ 은 행렬의 대각 합(trace) 연산이다.

기존 기법에서 유저들은 독립적으로 측위를 수행하기 때문에 ToA 기반의 위치 오차 하한은 다음과 같다 [19].

$$\text{CRLB}_{\text{conventional}} = \sqrt{\frac{c^2}{8\pi^2 \text{SNR}(\beta^2 + f_c^2)}}. \quad (37)$$

VI. 성능 분석

본 논문에서는 가시 경로가 확보되는 실외 환경을 고려하므로 mmWave 신호 모델을 사용한다. 표 1에 성능 분석을 위해 본 논문에서 고려하는 파라미터 값을 나타내었다. 기지국의 전체 송신 SNR을 10dB로 설정하였다. 주파수 대역은 3.5GHz와 28GHz 두 가지 대역의 신호 모델을 고려하였다. 기지국의 위치, 즉 $\mathbf{p}^t = [0, 0, 0]^T$ 으로 설정하고, 송수신단간의 거리를 [30, 50] 사이의 균일한 임의의 값으로 설정하였다. 또, 수신단에서 유저들이 위치한 지역의 반경을 5m로 설정하고, 송신단과 수신단의 유저들의 안테나에 대한 방위각과 고각은 각각 $\phi \sim U(0, 2\pi)$, $\theta \sim U(0, \pi)$ 의 값으로 설정했다. 그리고 제안하는 기법에 대해 1000개의 위치 데이터를 생성 후, 다음과 같이 시뮬레이션을 진행하였다.

$$\text{CRLB}_{\text{proposed}} = \sum_{i=1}^{1000} \text{CRLB}_{\text{proposed}}^{(i)}(\mathbf{u}\mathbf{p}^r) \Pr(\mathbf{p}^r). \quad (38)$$

여기서 $\Pr(\mathbf{p}^r)$ 는 유저의 위치 \mathbf{p}^r 을 가질 확률이다. 그림 3에 기존 기법과 제안하는 기법에 대한 유저 수 대비 위치 오차 하한을 나타내었다. 기지국의 안테나 수는 $N_t = 5$ 로 설정했고, 표 1의 두 가지 대역에 대해 각각 나타내었다. 그림 3을 보면, 기존 기법과 제안하는 기법 모두 높은 주파수 대역에서 더 낮은 위치 오차 하한을 갖는 것을 확인할 수 있다. 하지만 기존 기법의 경우, 유저 수에 관계없이 위치 오차 하한이 일정한 것을 볼 수 있다. 반면, 제안하는 기법은 유저들이 서로의 위치 정보를 공유하여 협력하므로, 유저 수가 증가함에 따라 위치 오차 하한이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또, 수신단에 유저가 두 명 이상 있을 때, 기존 기법의 28GHz 대역 신호에 대한 위치 오차 하한 보다 제안하는 기법의 3.5GHz 대역 신호에 대한 위치 오차 하한이 더 낮은 것으로 보아 제안

표 1. 성능 분석을 위한 가정
Table 1. Assumptions for performance analysis

Parameter	Value 1	Value 2
Transmit SNR(SNR)	10dB	
Center frequency(f_c)	3.5GHz	28GHz
Effective bandwidth(β)	300MHz	1GHz
Azimuth angle(ϕ)	$U(0, 2\pi)$	
Elevation angle(θ)	$U(0, \pi)$	

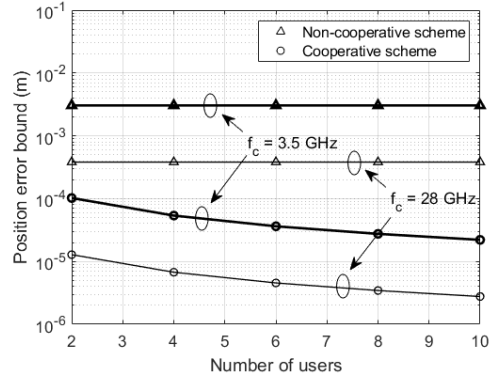


그림 3. 유저 수 대비 위치 오차 하한($N_t = 5$)
Fig. 3. Number of users versus position error bound ($N_t = 5$)

하는 기법은 유저가 최소 두 명 이상일 때, 어느 정도 낮은 주파수 대역에서도 기존 기법보다 더 좋은 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 송신 안테나 수 대비 위치 오차 하한을 나타낸 그래프이다. 수신단의 유저 수, 즉 $K=5$ 로 설정했고, 그림 3과 마찬가지로 두 가지 주파수 대역에 대한 기존 기법과 제안하는 기법의 결과를 나타내었다. 그림 4를 보면, 그림 3과 같이 높은 주파수 대역에서 더 낮은 위치 오차 하한을 갖는 것을 알 수 있다. 기존 기법과 제안하는 기법을 비교해보면, 기존 기법은 송신 안테나 수에 관계없이 위치 오차 하한이 일정한 반면, 제안하는 기법은 송신 안테나의 수가 증가할수록 위치 오차 하한이 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 3, 4의 두 가지 경우에서 보인 것과 같이, 수신단의 유저들이 독립적으로 측위를 수행하는 기존

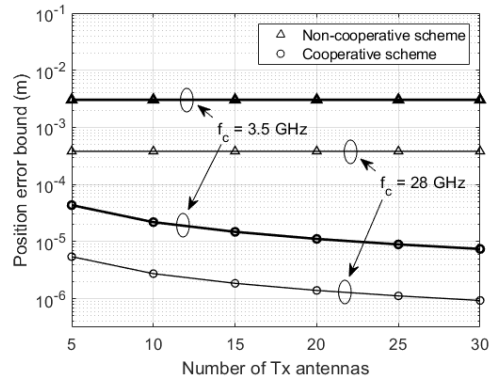


그림 4. 송신 안테나 수 대비 위치 오차 하한($K=5$)
Fig. 4. Number of Tx antennas versus position error bound ($K=5$)

기법은 유저 수와 송신 안테나 수에 관계없이 위치 오차 하한, 즉 위치 정확도가 일정한 것으로 나타났다. 하지만, 제안하는 기법은 수신단의 유저들이 자신의 위치 정보를 공유하여 협력 측위를 수행하기 때문에 유저 수와 송신 안테나 수가 위치 정확도에 직접적으로 관련이 있고, 그 수가 증가할수록 위치 정확도도 증가하는 것을 볼 수 있다.

VII. 결 론

본 논문은 mmWave를 사용하는 MISO 브로드캐스트 채널에서 유저들의 협력 측위를 통해 위치 정확도를 향상시키는 기법을 제안하였다. 성능 분석을 통해 유저들이 독립적으로 측위를 수행하는 기존 기법은 수신단의 유저 수와 송신 안테나 수에 관계없이 위치 정확도가 일정하지만, 제안하는 기법은 수신단 유저가 최소 두 명 이상인 환경에서 기존 기법에 비해 위치 정확도가 높은 것을 보였다. 또한, 수신단의 유저 수와 송신 안테나 수가 증가할수록 위치 정확도가 증가하는 것을 보였다.

본 논문에서는 수신단에서의 위상 천이 오차만 고려하였으므로 위치 오차 하한이 낮지만, 실제 환경에서는 다중경로 등으로 인한 신호의 왜곡 때문에 위치 오차 하한은 더 높게 나올 것으로 예상할 수 있다. 추후에는 다중경로 등으로 인한 신호의 왜곡뿐만 아니라 송수신단 간의 동기 오차, 빔포밍으로 인한 오차 등 실제 환경에 더 가까운 채널 모델에 대한 위치 오차 하한을 연구할 예정이다.

References

- [1] X. Cui, T. A. Gulliver, J. Li, and H. Zhang, "Vehicle positioning using 5G millimeter-wave systems," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6964-6973, 2016.
- [2] N. M. Drawil, H. M. Amar, and O. A. Basir, "GPS localization accuracy classification: A context-based approach," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 262-273, Mar. 2013.
- [3] A. Tahat, G. Kaddoum, S. Yousefi, S. Valaee, and F. Gagnon, "A look at the recent wireless positioning techniques with a focus on algorithms for moving receivers," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6652-6680, 2016.
- [4] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, "Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1G to 5G," *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 20, no. 2, pp. 1124-1148, Second Quart. 2018.
- [5] P. Zhang, J. Lu, Y. Wang, and Q. Wang, "Cooperative localization in 5G networks: A survey," *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 27-32, 2017.
- [6] S. R. Go, "Effective ToA-based indoor localization method considering accuracy in wireless sensor networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 6, pp. 640-651, Jun. 2016.
- [7] S. R. Go, "An effective ToA-based localization method with adaptive bias computation," *J. Korean Inst. Electrical and Electronic Mater. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 1-8, Mar. 2016.
- [8] R. M. Vaghefi and R. M. Buehrer, "Cooperative joint synchronization and localization in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 63, no. 14, Jul. 2015.
- [9] F. Ricciato, S. Sciancalepore, F. Gringoli, N. Facchi, and G. Boggia, "Position and velocity estimation of a non-cooperative source from asynchronous packet arrival time measurements," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 9, pp. 2166-2179, Sep. 2018.
- [10] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, and M. Z. Win, "Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments," in *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 404-426, Feb. 2009.
- [11] Y. Shen and M. Z. Win, "Fundamental limits of wideband localization— Part I: A general framework," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 10, pp. 4956-4980, Oct. 2010.
- [12] A. Fascista, G. Ciccacese, A. Coluccia, and G. Ricci, "Angle of arrival-based cooperative positioning for smart vehicles," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 19, no. 9, pp. 2880-2892, Sep. 2018.
- [13] A. Guerra, F. Guidi, and D. Dardari, "Single-anchor localization and orientation

performance limits using massive arrays: MIMO vs. beamforming,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 8, pp. 5241-5255, Aug. 2018.

- [14] S. H. Cho, S. R. Yeo, H. H. Choi, C. Park, and S. J. Lee, “A design of synchronization method for TDOA-based positioning system,” in *Proc. 2012 12th Int. Conf. Control, Automat. and Syst.*, pp. 1373-1375, Jeju Island, 2012.
- [15] L. Cong and W. Zhuang, “Hybrid TDOA/AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 1, no. 3, pp. 439-447, Jul. 2002.
- [16] A. Coluccia and A. Fascista, “On the hybrid TOA/RSS range estimation in wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 361-371, Jan. 2018.
- [17] S. Tomic, M. Beko, R. Dinis, and P. Montezuma, “A closed-form solution for RSS/AoA target localization by spherical coordinates conversion,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 680-683, Dec. 2016.
- [18] S. He and S. H. G. Chan, “Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons,” *IEEE Commun. Surv. & Tuts.*, vol. 18, no. 1, pp. 466-490, Jan. 2016.
- [19] S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.

석근영 (Keun Young Seok)



2018년 2월 : 한국외국어대학교
공학사
2018년 2월~현재 : 한국외국어
대학교 공학석사과정
<관심분야> 무선 측위, 추정
이론, 무선 통신 시스템, 머
신러닝

[ORCID:0000-0001-5924-127X]

윤우진 (Woojin Yun)



2000년 2월 : 충남대학교 공학사
2003년 8월 : 한국과학기술원 공
학석사
2016년 3월~현재 : 충남대학교
공학박사과정
2003년 5월~2006년 4월 : 광전
자 AUK

2007년 4월~2012년 6월 : 파이칩스

2012년 7월~현재 : 나노융합기술원 선임연구원

<관심분야> 무선 통신 시스템, MEMS 센서, 바이
오센서

[ORCID:0000-0002-4227-8065]

이정훈 (Jung Hoon Lee)



2006년 6월 : 한국과학기술원 공
학사

2008년 8월 : 한국과학기술원 공
학석사

2013년 8월 : 한국과학기술원 공
학박사

2013년 9월~2014년 4월 : 한국
과학기술원 박사후연구원

2014년 8월~2015년 8월 : 미국 노스캐롤라이나 주립대
학교 박사후연구원

2015년 9월~2016년 8월 : 국립제주대학교 전자공학과
조교수

2016년 9월~현재 : 한국외국어대학교 전자공학과 조
교수

<관심분야> 채널 피드백, 간섭 제어, 무선 통신 시스템,
머신러닝

[ORCID:0000-0002-7875-2398]