

Beam squint 현상을 이용한 무선신호 위치 측위 기법에 관한 연구

장승준, 고승우
인하대학교, 인하대학교

sjjang@inha.edu, swko@inha.ac.kr

A Study on Exploiting the Beam Squint Effect for Radio Based Localization Systems

Seung-June Jang, Seung-Woo Ko
Inha Univ., Inha Univ.

요약

Beam squint 현상이란, 광대역 통신에서 subcarrier 들이 한 곳으로 집중되지 않고, 여러 방향으로 분산되는 현상이다[1]. 일반적으로 통신에 있어서 beam squint effect 는 극복해야 될 문제이다. 하지만 본 논문에서는 beam squint effect 를 활용하여 일정 범위 안에 있는 물체의 위치를 추정하고자 한다. True time delay lines(TTDs)와 phase shifter 값의 조절을 통해 신호가 퍼지는 범위를 설정하고, 각각의 범위내에서 gain 이 가장 높은 subcarrier 에 해당하는 각도가 기지국과 물체의 각도에 해당하게 된다. 이 각도와 기지국과 물체 사이의 거리를 사용한 least square method 를 통해 물체의 위치를 확인하는 위치측위 알고리즘을 구현하였다.

I. 서론

광대역 신호의 문제점 중 하나로 beam squint 현상이 있다. Beam squint 현상이란 광대역 신호에서 subcarrier 들의 신호가 한 곳으로 집중되지 않고 여러 곳으로 퍼지는 것을 말한다[1]. Beam squint 현상이 일어나게 되면 beam gain 의 peak 이 서서히 사라진다. 이로 인해 각도 측정의 추정 능력이 떨어지게 된다. 이를 해결하고자 true time delay lines (TTDs) 를 통해 신호를 한 위치로 집중시킨다. 하지만 본 논문에서는 TTDS 를 통해 beam squint 현상을 해결하는 것이 아니라, sensing 범위 설정에 활용하여 일정 범위 안에 있는 물체의 위치를 추정하고자 한다. 3 개의 기지국에서 각각 물체에 대한 각도를 측정하고, 각도와 거리를 이용하여 least square method 를 통해 물체의 위치를 확인하고자 한다. 그 결과 일정 수준 이상의 SNR 이 확보된다면 유효한 위치 측위가 가능함을 보인다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 L 개의 기지국과 한 개의 물체가 존재하는 시나리오를 고려한다. 광대역 상황에서 각 BS 에서는 설정한 sensing 범위 ($\theta_{start}, \theta_{end}$) 안에 존재하는 동적 물체에 대한 Angle Of Arrival (AOA)를 측정하여 위치 추정을 수행한다. 각 기지국에는 N 개의 안테나가 존재한다. 신호의 대역폭은 W 이고, subcarrier 는 M+1 개가 존재한다. 따라서 신호의 passband frequency range 는 $[f_c - \frac{W}{2}, f_c + \frac{W}{2}]$ 이다. 이때 $f_0 = f_c - \frac{W}{2}$ 이며, m 번째 subcarrier frequency 는 $f_m = f_0 + m \frac{W}{M}$ 이다. 이로부터 m 번째 subcarrier 의 baseband frequency 는 $\tilde{f}_m = m \frac{W}{M}$ 임을 알 수 있다. 또한, 각 기지국에서 물체로 보내지는 신호는 OFDM 신호이며

안테나 사이의 간격은 $d = \frac{\lambda}{2}$ 이다. 2 개의 기지국 사이의 OFDM 신호들은 overlap 되지 않으며, 각각의 기지국은 full duplex mode 이고, 완벽하게 self-interference cancellation 되었다고 가정한다.

III. Beam Squint effect 기반 위치 측위 기법

물체와 기지국 사이의 거리와 각도가 (r_l, θ_l) 이고, 1 번째 기지국의 m 번째 subcarrier 의 echo channel 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$H_{l,m} = \alpha e^{-j2\pi f_{l,m} \frac{2r_l}{c}} \mathbf{a}_{l,m} \mathbf{a}_{l,m}^T$$

여기서 α 는 pathloss 이며, $\mathbf{a}_{l,m}$ 은 steering vector 로 $[\mathbf{a}_{b,m}]_n = e^{j\frac{2\pi f_{l,m} n d \sin \theta_l}{c}}$ 이다. Beamforming vector 를 $\mathbf{w}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{j\frac{2\pi f_{l,m} n d \sin \theta_l}{c}}$ 이라고 하면, 신호의 beam gain 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_l = \sum_{m=0}^{m=M} |\mathbf{w}_n^H H_{l,m} (\mathbf{w}_n^H)^T|$$
$$= \sum_{m=0}^{m=M} \left| \frac{1}{N} \alpha e^{j\frac{2\pi}{c} (-2f_c n d \sin \theta_l + f_m n d \sin \theta_l + 2f_m r_l)} \right|$$

이로부터 subcarrier 가 한 곳으로 집중되지 않고 여러 방향으로 퍼지게 됨을 알 수 있다.



[그림 1] beam squint effect

이러한 현상은 대역폭이 넓은 광대역 통신에서 더욱 분명하게 나타날 것이다. 보통 이러한 문제는 TTDs 를 적용하여 해결하지만, 본 논문에서는 물체 sensing 에 있어서 이 현상을 사용하고자 한다. TTDs 를 적용했을 때의 beamforming vectors 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{\mathbf{w}}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j2\pi\phi_n} e^{-j2\pi\tilde{f}_n t_n}$$

이 때 g_m 은 $\phi_n + \tilde{f}_m t_n + f_m \frac{nds \sin\theta}{c} = 0$ 일 때 최대값을 갖는다. $f_m = f_0, \theta = \theta_{start}$ 로부터 phase 를, $f_m = f_M, \theta = \theta_{end}$ 로부터 TTD line 을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_n = -\frac{f_0 n d s \sin\theta_{start}}{c}, t_n = -\frac{\phi_n}{W} - \frac{(f_0 + W) n d s \sin\theta_{end}}{Wc}$$

subcarrier 들은 $(\theta_{start}, \theta_{end})$ 의 범위 안으로 향하게 되며, 이때 angle resolution 은 $\frac{\theta_{end} - \theta_{start}}{M}$ 이다. 이로부터 m 번째 subcarrier 의 received echo signal 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_{l,m} = \tilde{\mathbf{w}}^H H_{l,m} (\tilde{\mathbf{w}}^H)^T$$

이 신호의 세기는 $g_{l,m} = |\mathbf{y}_{l,m}|$ 으로 표현된다. 신호의 세기가 가장 큰 subcarrier 를 m^* 라고 하자.

$$m^* = \operatorname{argmax}_m (g_{l,m})$$

기지국과 물체 사이의 각도 θ_l 은 다음과 같다.

$$\theta_l = \theta_{start} + m^* \frac{\theta_{end} - \theta_{start}}{M}$$

IV. Least Square Solution

물체는 (x_k, y_k) , 각 기지국은 (x_i, y_i) 에 위치해 있다. 기지국과 물체 사이의 거리를 각각 r_i , 측정된 각도를 β_i 라고 하자. 물체의 위치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1. 기지국과 물체 사이의 각도가 x 축 기준인 경우

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \pm r_i \cos\beta_i \\ y_i \pm r_i \sin\beta_i \end{bmatrix}$$

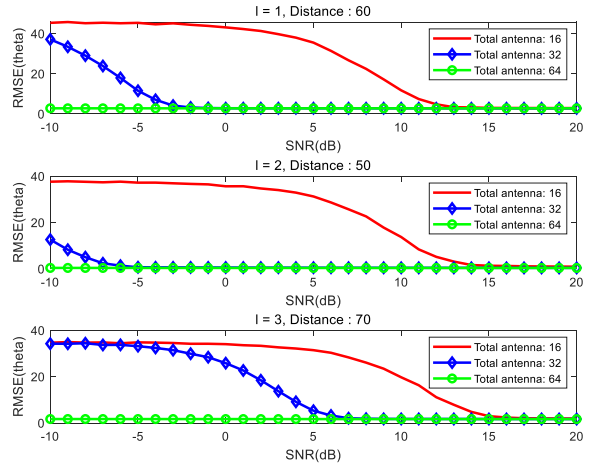
2. 기지국과 물체 사이의 각도가 y 축 기준인 경우

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \pm r_i \sin\beta_i \\ y_i \pm r_i \cos\beta_i \end{bmatrix}$$

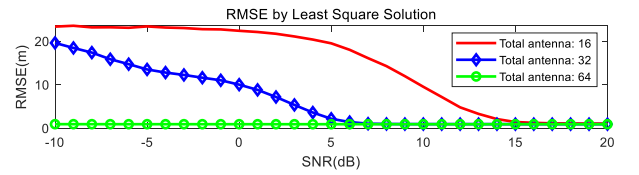
다음과 같은 관계식을 통해 노이즈가 있는 상황에서도 Least Square Method (LS)를 통해 물체의 위치를 추정할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서, 3 개의 기지국이 존재하고, 물체와 l 번째 기지국 사이의 거리는 각각 (60m, 50m, 70m)이다. 대역폭은 22GHz 이며, Subcarrier 의 총 개수는 2048 개, $f_0 = 220\text{GHz}$ 이다. $[\theta_{start}, \theta_{end}] = [-60^\circ, 60^\circ]$ 이고, 노이즈는 평균 0 분산 1 의 complex Gaussian noise 를 따른다고 가정하자. 각 기지국마다 안테나가 16 개, 32 개, 64 개인 경우에 대해 시뮬레이션을 진행하였고, SNR 의 범위는 $[-10\text{dB}, 20\text{dB}]$ 로 설정하였다. 시뮬레이션에서의 오차는 Root Mean Square Error (RMSE)를 사용하였다. 그 결과 SNR 이 일정 수준 이상이 된다면 RMSE 는 급격히 감소하였고, 물체와 기지국 사이의 거리가 60m 와 50m 인 경우에는 (-) 의 SNR 에서도 상당히 정확한 각도 추정이 가능했다. 추정된 각도와 기지국과 물체 사이의 거리를 이용하여 LSS 을 적용한 결과 안테나가 16 개인 경우에는 SNR 이 12dB 이상인 경우, 안테나가 32 개인 경우에는 SNR 이 3dB 이상인 경우에 5m 이내의 오차를 보였고, 안테나가 64 개인 경우에는 SNR 이 -10dB 인 경우에도 1m 이내의 오차를 보였다.



[그림 1] 기지국 별 안테나 개수에 따른 각도 RMSE



[그림 2] 안테나 개수 별 LS 의 RMSE

V. 결론

본 논문에서는 beam squint 현상을 활용한 위치 측위 알고리즘을 구현했다. Beam squint 현상과 Least Square Solution 을 활용하여 일정 범위 안에 있는 물체의 위치를 측위할 수 있었다. 향후 연구에서는 고주파 신호의 산란 특성을 이용하여 bistatic sensing 을 통해 위치 측위의 오차를 줄일 수 있는 방법에 대해 연구할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2022R1F1A1072911).

참고 문헌

- [1] W. Hao, X. You, F. Zhou, Z. Chu, G. Sun, and P. Xiao, "The far-/nearfield beam squint and solutions for THz intelligent reflecting surface communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 72, no. 8, Aug. 2023.
- [2] H. Luo, F. Gao, H. Lin, S. Ma, H. V. Poor, "YOLO: An Efficient Terahertz Band Integrated Sensing and Communications Scheme with Beam Squint," arXiv 2023, arXiv:2305.12064.
- [3] A. H. Sayed, A. Tarighat, N. Khajehnouri "Network-Based Wireless Location [Challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information]," IEEE Signal Process. Mag., vol. 22, no. 4, Jul. 2005