

배열 안테나의 움직임을 고려한 최적의 빔폭 탐색

김지혜, 현성환, 김성철
서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소
{jihyekim224, shhyun, sckim}@maxwell.snu.ac.kr

Optimizing Beamwidth of Array Antenna in the Presence of Swaying Movements

Jihye Kim, Seong-Hwan Hyun, Seong-Cheol Kim
Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National University

요약

본 논문은 배열 안테나가 설치된 가로등이 바람 등 외부 환경으로 인해 흔들리는 경우에 최적의 빔폭이 존재함을 확인하고 그 최적 값을 탐색한다. 시뮬레이션을 통해 평균 데이터율을 최대로 하는 빔폭을 찾고, 끊김 없는 통신을 보장하는 최소의 빔폭을 계산하였으며, 두 결과가 약 $0.0001^\circ \sim 0.0004^\circ$ 의 평균 제공된 오차(RMSE)를 가짐을 확인하였다.

I. 서론

5G 이후의 통신에서는 대역폭의 부족 문제를 해결하고 높은 데이터 전송률을 얻기 위해 밀리미터파 대역의 전파를 사용한다. 해당 주파수 대역의 전파는 큰 경로 손실을 겪기 때문에 이를 상쇄하고자 배열 안테나 기반 빔포밍 기술을 사용하여 원하는 방향으로 높은 파워의 신호를 전송하며 또한 많은 기지국과 중계기를 이용하여 근거리 통신이 가능하게 한다[1]. 이때 많은 장비들이 새롭게 설치되어야 하기에 이미 곳곳에 존재하는 가로등에 안테나를 설치하여 가까운 사용자에게 통신망을 제공하도록 하는 방안이 제기되어 왔다[2]. 하지만 얇고 긴 가로등의 특성상 바람 등의 외부 환경에 취약해 흔들림이 발생할 수 있으며 사용자를 향하던 빔이 움직임에 의해 오정렬될 가능성이 존재한다. 이처럼 바람의 영향이 있는 경우에 빔 정렬의 상관 시간과 안테나 배열의 크기 사이에 상쇄 관계(trade-off)가 있음이 연구된 바 있다[3]. 따라서 빔의 정렬이 확실시되지 않는 상황에서는 무조건 얇은 빔을 사용하는 것이 데이터율의 증가로 이어지지 않을 것이며 주어진 환경에 따른 최적의 빔폭이 존재할 것이다.

본 논문에서는 가로등의 움직임에 대한 사용자의 평균 데이터율을 최대로 만드는 빔폭을 구하고, 이때 최대의 데이터율을 달성하는 빔폭이 완벽한 커버리지를 위해 필요한 최소의 빔폭과 유사하며 매우 작은 오차율을 갖는다는 것을 보인다.

II. 본론

가) 시스템 모델

본 논문에서는 도로 위에 배치된 가로등에 배열안테나가 설치되어 있으며, 해당 배열안테나는 다음과 같이 이

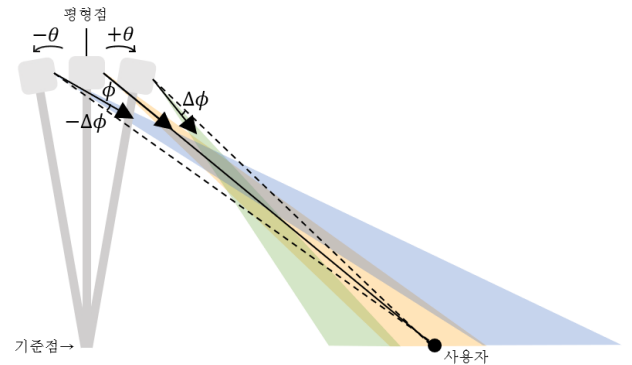


그림 1 시스템 모델

상적인 사각과 형태의 빔패턴을 가정한다.

$$P_s(\xi) = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{ele}}, & -\frac{\theta_{ele}}{2} \leq \xi \leq \frac{\theta_{ele}}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

가로등의 움직임은 그림 1 과 같이 지면에 닿아 있는 부분을 기준점으로 진자 운동을 따른다고 가정하며, 평형점을 기준으로 가로등이 움직인 각도는

$$\theta(t) = \theta_{max} \cos \omega t \quad (2)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 이때, θ_{max} 는 최대 회전각이고, ω 는 왕복 운동의 각주파수이다. 또한, 빔이 사용자를 향해 정확한 각도 ϕ 로 정렬되어 있다고 가정한다.

가로등이 평형점으로부터 θ 만큼 움직인 경우, 사용자를 향하던 빔의 정렬이 흐트러지게 되고 기하학적 분석에 따라 식 (3)의 $\Delta\phi$ 만큼 정렬각의 차이가 발생한다.

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\{(\tan \phi - \sin \theta) / \cos \theta\} + \theta - \phi \quad (3)$$

유저의 통신 서비스 성능 보장을 위해 빔폭은 $|\Delta\phi| \leq \frac{\theta_{ele}}{2}$ 조건을 만족해야 한다. 가로등이 외부요인에 의해 θ 만큼 움직였을 때 사용자가 얻을 수 있는 데이터율은

$$R = \log_2 \left(1 + \frac{1/\theta_{ele}}{P_n} \right) \cdot 1 \quad (4)$$

과 같으며, 이때, P_n 은 잡음 파워, 1는 $|\Delta\phi| \leq \frac{\theta_{ele}}{2}$ 의 식별자 함수로, 해당 조건을 충족하면 1, 그렇지 않으면 0이다.

나) 최적 빔폭 탐색

아래의 두 가지의 목적 함수를 이용하여 최적의 빔폭을 탐색한다. 첫 번째로 최대의 평균 데이터율을 달성하는 빔폭을, 두 번째로 가능한 모든 회전각에 대하여 완벽한 커버리지를 보장하는 빔폭을 고려한다.

A. 최대 평균 데이터율

가능한 θ 의 범위 및 분포를 고려하여 사용자 평균 데이터율을 구할 수 있으며, 그것을 최대로 만드는 빔폭은

$$\theta_{ele}^* = \arg \max_{\theta_{ele}} \int_{-\theta_{max}}^{\theta_{max}} f(\theta) \log_2 \left(1 + \frac{1/\theta_{ele}}{P_n} \right) \cdot 1 d\theta \quad (5)$$

과 같이 구할 수 있다. 이때 $f(\theta)$ 은 θ 의 확률 밀도 함수이다.

B. 완벽 커버리지

모든 θ 의 범위에서 완벽한 커버리지를 갖도록 하는 상황을 고려해본다. 가장 변동이 큰 시점에 통신이 보장된다면 커버리지가 완벽하다고 할 수 있으므로, $\theta = \theta_{max}$ 에서 $\Delta\phi \leq \frac{\theta_{ele}}{2}$ 이고, 동시에 $\theta = -\theta_{max}$ 에서 $\Delta\phi \geq -\frac{\theta_{ele}}{2}$ 이어야 한다. 앞의 등호를 성립시키는 빔폭을 각각 θ_{1ele} 와 θ_{2ele} 라고 했을 때, 완벽 커버리지를 위한 최소의 빔폭 $\theta_{ele,PC}$ 은 아래와 같다.

$$\theta_{ele,PC} = \max(\theta_{1ele}, \theta_{2ele}) \quad (6)$$

where

$$\theta_{1ele} = 2[\tan^{-1}\{(\tan \phi - \sin \theta_{max})/\cos \theta_{max}\} + \theta_{max} - \phi],$$

$$\theta_{2ele} = 2[-\tan^{-1}\{(\tan \phi + \sin \theta_{max})/\cos \theta_{max}\} + \theta_{max} + \phi]$$

θ_{1ele} 와 θ_{2ele} 는 대략 $\phi = \pi/4$ 을 기점으로 그보다 큰 각도로 정렬된 경우에는 θ_{1ele} 가 더 큰 값을, 더 작은 각도의 경우에는 θ_{2ele} 가 더 큰 값을 가짐을 확인하였다.

다) 시뮬레이션

식 (5)의 최적 빔폭을 찾기 위해 시뮬레이션을 통해 θ_{ele} 값에 대한 평균 데이터율을 구하였으며, 사용한 파라미터는 $\phi = \pi/3$, $\theta_{max} = \pi/50$, $P_n = 10^{-5}$ 이다. 평균 데이터율의 최댓값을 갖는 지점은 그림 2와 같이 약 5.46° 에서 나타났다.

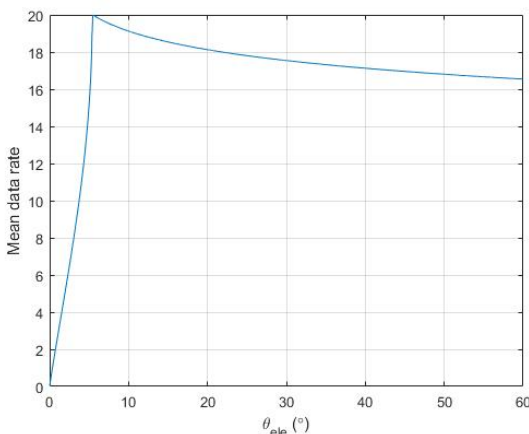


그림 2 빔폭에 대해 얻어지는 평균 데이터율

그림 3은 안테나의 움직임 결정하는 θ_{max} 를 달리 하며 두 가지 최적의 빔폭 θ_{ele}^* 와 $\theta_{ele,PC}$ 을 그래프로 나타냈다. θ_{ele}^* 은 $0^\circ \sim 60^\circ$ 범위를 500000개의 샘플로 나누

어 평균 데이터율을 계산한 후 가장 큰 값이 얻어지는 지점으로 구하였고, $\theta_{ele,PC}$ 은 식 (6)을 이용하였다. 두 그래프는 거의 같은 값으로 나타났으며, $\phi = \pi/6, \pi/4, \pi/3$ 에서 평균 제곱근 오차(RMSE)는 각각 약 0.00011° , 0.00024° , 0.00042° 로 매우 작은 값을 가졌다.

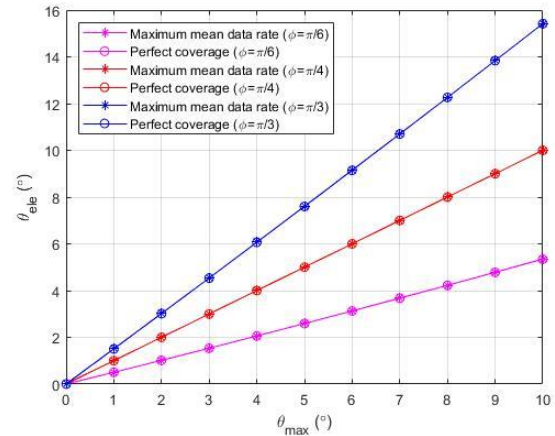


그림 3 가로등 최대 회전각에 대한 최적 빔폭 값

시뮬레이션 결과 빔의 오정렬이 발생하는 환경에서는 매우 좁은 빔폭을 사용하여 빔포밍 이득을 증가시키는 것보다 특정 빔폭을 선택함으로써 통신 성능의 향상을 가져올 수 있다. 또한 가로등의 회전각이 커짐에 따라, 더 큰 빔폭을 사용하여 완벽한 커버리지를 달성해야 하며, 유저의 위치가 가로등으로부터 멀어질수록 안테나 각도 변화의 영향이 크게 작용하기에 더 큰 빔폭을 사용해야 한다.

III. 결론

본 논문에서는 가로등에 설치된 배열안테나가 외부요인에 의해 흔들리는 경우 데이터율을 최대화 하기 위한 빔폭을 도출하였다. 시뮬레이션을 통해 평균 데이터율을 최대화 하는 빔폭과 완벽한 커버리지를 달성하기 위한 빔폭은 유사함을 확인하였으며, 향후 다양한 빔패턴을 고려한 최적 빔폭에 대해 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 두뇌한국 21 플러스사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

- [1] Wei, Lili, et al. "Key elements to enable millimeter wave communications for 5G wireless systems." IEEE Wireless Communications 21.6 (2014): 136-143.
- [2] Gatzianas, M., et al. "Downlink coordinated beamforming policies for 5G millimeter wave dense networks." 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). IEEE, 2019.
- [3] Hur, Sooyoung, et al. "Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks." IEEE transactions on communications 61.10 (2013): 4391-4403.