

유저 이동성을 고려한 최적의 빔 재정렬 시점에 관한 연구

현성환, 김근우, 김성철
서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소
Email {shhyun,kimkeunwoo15,sckim}@maxwell.snu.ac.kr

A Study on Beam Re-Alignment Considering User Mobility

Seong-Hwan Hyun, Keun-Woo Kim and Seong-Cheol Kim
Institute of New Media and Communications (INMC), Seoul National University, Seoul, Korea

Abstract—유저가 움직이는 환경에서 매 순간 빔 정렬은 오버헤드가 높아 빔 추적 방식이 적합하다. 다만, 빔 추적 오차는 시간에 따라 누적되며, 데이터 전송률은 점차 낮아진다. 본 논문에서는 빔 재정렬에 필요한 시간이 주어졌을 때 데이터 전송률을 최대화 하는 최적의 빔 재정렬 시점을 도출하였다. 분석을 위해 빔 추적 오차를 선형 모델로 단순화하여 최적화 시점을 구하였다. 시뮬레이션 결과는 안테나 개수 및 추적 오차의 증가는 빔 재정렬 시점이 빨라져야 하며, 제한한 재정렬 시점을 고려할 때의 최대 데이터 전송률을 제시한다.

I. 서론

최근 무선 데이터 전송 요구의 급증에 따라 높은 데이터 전송율을 위해 밀리미터 대역이 주목받고 있다. 이 대역은 기존 UHF(Ultra High Frequency) 대역 보다 파장이 짧아 배열 안테나 폼팩터가 작아 빔포밍에 용이하며, 송신 및 수신기의 전파 신호에 이득을 증가시켜 밀리미터 채널의 높은 경로 손실을 특성을 극복할 수 있다[1][2].

빔포밍 효율을 극대화 하기 위해 송수신되는 전파의 정확한 각도 등의 채널 정보가 필요하며, 이를 위한 채널 추정 은 일반적으로 높은 오버헤드를 수반한다[3]. 또한 차량간 통신과 같이 타깃들이 빠르게 움직이는 환경에서는 빔 재정렬 주기가 짧아야 하며, 이는 데이터 전송률이 저하를 초래한다. 이를 해결하기 위해 칼만 필터를 적용한 낮은 빈도의 빔 정렬을 통해 오버헤드를 낮추는 기법이 연구되었다[4][5]. 다만, 이 방식은 시간이 지남에 따라 빔 추적 오차가 누적되며, 일정 시간 이후에 빔 재정렬이 필요하다. 최근까지 최적의 빔 재정렬 시점 연구는 진행된 바 없으며, 이에 최적의 문턱값 설정을 통한 통신 시스템 효율 향상 위한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 칼만 필터의 추적 오차를 선형 모델링하고 빔 정렬에 필요한 시간을 고정했을 때, 데이터 전송률을 최대화 하는 최적의 빔 재정렬 시점과 이에 상응하는 데이터 전송률을 제시한다.

II. 시스템 모델

무선 채널은 시변-기하 채널 모델을 바탕으로 하며[6], 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H[i] = \sum_{n=1}^{N[i]} \alpha_n[i] \mathbf{a}_r(\phi_{n,A}[i]) \mathbf{a}_t^*(\phi_{n,D}[i]) \quad (1)$$

이때 $()^*$ 는 켤레 전치, $\alpha_n[i]$ 는 경로의 이득, $N[i]$ 는 시간 인덱스 i 에서의 경로의 개수, $\phi_{n,D}$ 와 $\phi_{n,A}$ 는 각각 n 번째

경로의 출발각과 도래각을 의미한다. $\mathbf{a}()$ 는 배열 안테나의 조향 벡터이며 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{a}(\phi) = [1 \quad e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\phi)} \quad \dots \quad e^{j(M-1)\frac{2\pi}{\lambda} d \cos(\phi)}] \quad (2)$$

이때 λ 는 파장의 길이, d 는 각 안테나의 이격 거리, M 은 안테나의 총 개수를 의미한다. 문제를 단순하게 하기 위해 2D 채널의 1차원 배열 안테나를 사용하였지만, 3D 채널의 2차원 배열 안테나로 쉽게 확장 가능하다. 또한 송신 및 수신 측은 전체 채널 정보가 주어지며, 시간 인덱스 i 구간동안 채널이 변하지 않음을 가정한다.

III. 최적의 빔 재정렬 시점

일반적으로 밀리미터 대역에서 유 의미한 경로의 개수는 적으며, 소수의 두드러진 경로를 독립적으로 추적 할 수 있다. 특정 한 방향의 빔 포밍은 프리코더 \mathbf{f} 와 컴바이너 \mathbf{w} 를 사용하며, 빔 정렬 및 추적단계를 위한 사전에 정의한 신호는 공유되어있다. 또한 다른 방향에 의한 간섭은 충분히 작아 무시할 수 있음을 가정할 때, 수신된 신호 $r[i]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r[i] &= \alpha_j[i] \mathbf{w}^* \mathbf{a}_r(\phi_{n,A}[i]) \mathbf{a}_t^*(\phi_{n,D}[i]) \mathbf{f} \\ &+ \sum_{n \neq j} \alpha_n[i] \mathbf{w}^* \mathbf{a}_r(\phi_{n,A}[i]) \mathbf{a}_t^*(\phi_{n,D}[i]) \mathbf{f} + v[i] \\ &\simeq \alpha_j[i] \mathbf{w}^* \mathbf{a}_r(\phi_{n,A}[i]) \mathbf{a}_t^*(\phi_{n,D}[i]) \mathbf{f} + v[i] \end{aligned} \quad (3)$$

이때 $v[i]$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 가우시안 잡음이다.

칼만 필터 빔 추적 방식은 시간이 지남에 따라 추적 오차가 증가한다[3]. 즉, 추정하는 빔 방향과 최적의 빔 방향의 차이는 시간이 지남에 따라 누적되며 데이터 전송률은 점차 감소한다. 따라서 특정 시점에서 빔 재정렬이 필수적이며, 분석을 위해 추적 오차를 $\hat{\theta}_{i+1}[i] = \hat{\theta}_i[i] + C$ (이때, C 는 상수)

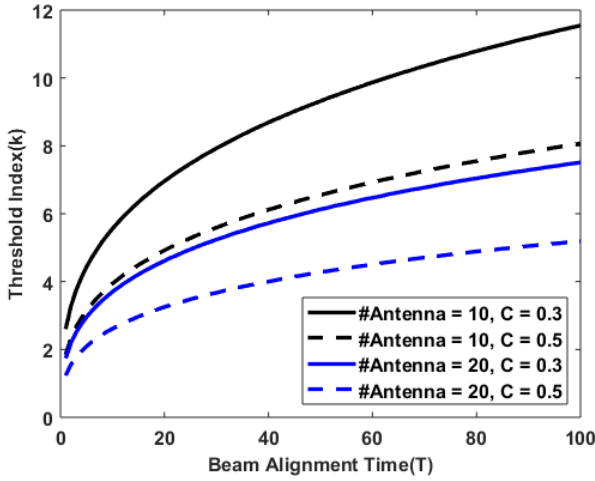


Fig. 1: 재정렬에 필요한 시간 축 대비 빔 정렬 시점

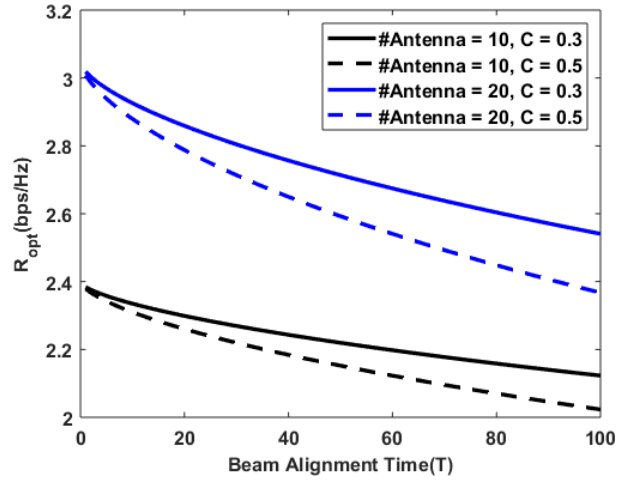


Fig. 2: 재정렬에 필요한 시간 축 대비 최대 전송률

과 같이 선형으로 모델링한다. 이때, 재정렬 시간 동안 데이터 전송은 불가하고, 필요한 시간을 T 라하면, 다음과 같은 최적화 문제로 나타낼 수 있다.

$$k^* = \underset{k}{\operatorname{argmax}} \frac{1}{k+T} E \left[\sum_{l=1}^k R(\tilde{\theta}_l) \right] \quad (4)$$

subject to $\tilde{\theta}_{l+1}[i] = \tilde{\theta}_l[i] + C$

이때 $R = \log(1 + \text{SNR})$ 을 나타낸다. 추적하는 과정에서 단위시간 당 k 번째 전송률까지의 합을 계산하며, 데이터 전송률이 최대가 되는 인덱스가 최적의 재정렬 시점이다. 최적화 해답을 얻기 위해 무작위 대입방식을 사용하였으며, 여러 번의 시행을 통한 시-평균으로 대체할 수 있다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 최적의 빔 재정렬 시점 확인을 위한 시뮬레이션을 진행하였으며, 파라미터는 다음과 같다. $M = (10, 15, 20)$, $d = \lambda/2$ 이며, AoD의 시작점은 30° , 추적 오차는 $0.3^\circ, 0.5^\circ$ 로 두 가지 경우를 고려하였다. 빔 재정렬에 필요한 시간 T 는 슬롯 시간의 최대 100배까지 설정하였다. 또한 송신 측에서의 영향에 집중하기 위해 수신 측은 완벽한 빔 정렬을 가정하였다.

그림.1은 재정렬에 필요한 시간 축 대비 최대의 전송률을 달성하기 위한 빔 재정렬 시점을 나타낸다. 안테나 개수가 늘어나면 빔 재정렬 시점은 짧아진다. 이는 안테나 수의 증가는 좁은 빔 폭을 생성하며, 약간의 오차도 좁은 빔 폭 관점에서는 상대적으로 유의미한 오차를 보이기 때문이다. 또한 추적 오차의 증가 폭이 커질수록 빔 정렬 시점이 빨라짐을 확인할 수 있다. 재정렬에 필요한 시간이 늘어남에 따라 선형적 증가가 아닌 로그적으로 증가하며, 이는 데이터 전송률이 빔 정렬 오차에 따라 급격하게 감소하기 때문이다. 예를 들어, 빔 정렬이 최대 100 슬롯 타임이 걸림에도, 상대적으로 이른 11번째 슬롯에서 빔 재정렬하는 것이 데이터 전송률의 합을 최대화하기 위한 최적의 시점임을 의미한다.

그림.2는 재정렬에 필요한 시간 축 대비 최대 전송률을 나타낸다. 최적의 빔 재정렬 시점을 적용한 후 달성 가능한

최대 전송률을 나타내며, 빔 정렬에 필요한 시간이 늘어남에 따라 달성 가능한 최대전송률은 점차 낮아진다. 안테나 개수의 증가는 높은 신호 대 잡음 비를 확보할 수 있어 데이터 전송률이 높아지지만, 앞서 언급한대로 잦은 재정렬이 필요하다. 또한, 같은 안테나 갯수를 사용하고 상대적으로 작은 추적 오차를 가지는 경우 최대 전송률이 높아 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 빔 추적 오차가 증가하는 상황에서 최대의 데이터 전송률을 달성하기 위한 빔 재정렬 시점을 도출하였다. 이를 위해 추적 오차를 선형으로 모델링하였으며, 주어진 빔 재정렬 시간에 대해 최적화 문제를 상정하여 분석하였다. 안테나 개수 및 추적 오차의 증가는 재정렬 시점을 앞당기며, 해당 시점에 상응하는 데이터 전송률을 분석하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 2020년 교통물류연구사업(20TLRP-B146733-03, 자율주행기반 대중교통시스템 실증 연구)의 지원을 받아 연구되었음

REFERENCES

- [1] Pi, Zhouyue, and Farooq Khan. "An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems." IEEE communications magazine 49.6 (2011): 101-107.
- [2] Love, David James, and Robert W. Heath. "Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing systems." IEEE Transactions on Information theory 51.8 (2005): 2967-2976.
- [3] Hosoya, Ken'ichi, et al. "Multiple sector ID capture (MIDC): A novel beamforming technique for 60-GHz band multi-Gbps WLAN/PAN systems." IEEE Transactions on Antennas and Propagation 63.1 (2014): 81-96.
- [4] Va, Vutha, Haris Vikalo, and Robert W. Heath. "Beam tracking for mobile millimeter wave communication systems." 2016 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2016.
- [5] Larew, Stephen G., and David J. Love. "Adaptive beam tracking with the unscented kalman filter for millimeter wave communication." IEEE Signal Processing Letters 26.11 (2019): 1658-1662.
- [6] Sayeed, Akbar M. "Deconstructing multiantenna fading channels." IEEE Transactions on Signal processing 50.10 (2002): 2563-2579.