

# 밀리미터파 차량간 통신에서 칼만 필터 기반 빔 추적 시 GPS 성능에 따른 최적 빔 폭 분석

김근우, 현성환, 김성철

서울대학교 전기 정보 공학부, 뉴미디어 통신 공동 연구소

{kimkeunwoo15, shhyun, sckim} @ maxwell.snu.ac.kr

## Analysis on the optimal beam width according to GPS performance in Kalman Filter based beam tracking in mmWave V2V communication systems

Keunwoo Kim, Seong-Hwan Hyun, Seong-Cheol Kim

Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.

### 요 약

밀리미터파 대역 차량간 통신 시스템에서는 높은 주파수로 인한 신호 감쇄를 보상하고자 다중 입출력 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 안테나의 빔 포밍이 사용된다. 하지만 빠르게 변하는 채널에서 통신 성능을 유지하기 위해서는 잦은 빔 트레이닝이 필요하고 이로 인해 큰 오버헤드가 발생한다. 이러한 오버헤드를 줄이는 방안으로 차량간 공유된 위치 및 속도 정보를 이용한 빔 추적이 있다. 하지만 이 방식의 경우 GPS 성능에 따라 빔 추적 성능이 민감하게 반응하여 통신 성능을 최대화 하는데 어려움을 겪게 된다. 본 논문에서는 밀리미터파 차량간 통신에서 칼만 필터를 기반으로 한 빔 추적 시 GPS 성능에 따라 변하는 빔 추적 성능을 최대화하는 최적의 빔 폭을 모의실험을 통해 찾아내었고 그 결과 최적의 빔 폭은 속도 측정 성능 및 차량간 거리에 영향을 받는다는 사실을 확인하였다.

### I. 서론

밀리미터파 대역을 이용한 차량간 통신은 높은 데이터 전송량을 얻을 수 있다는 점에서 많은 주목을 받고있다. 하지만, 밀리미터파 대역의 높은 신호 감쇄로 인해 다중 입출력 안테나를 이용한 빔 포밍과 빔의 방향을 조절하는 빔 추적 기술이 필요하다[1]. 이러한 빔 추적은 많은 오버헤드를 발생시키며 이를 줄이기 위한 방안으로 차량의 위치 및 속도 정보를 공유하여 빔 추적을 시행하는 방법이 제시되었다[2]. 하지만 이 경우 빔 추적 성능은 GPS를 통해 획득하는 차량의 위치, 속도 측정 성능에 큰 영향을 받는다. 따라서 최적의 통신 성능을 얻기 위해선 GPS의 성능에 따른 최적의 빔 폭을 알아내는 것이 필요하다. 본 논문에서는 밀리미터파 차량간 통신에서 차량의 위치 및 속도 정보를 바탕으로 한 빔 추적 시 GPS의 위치 및 속도 측정 성능에 따른 최적의 빔 폭을 분석하는 연구를 진행하였다.

### II. 본론

#### 가. 시스템 모델

본 논문에서는 차량 간에 가시선이 확보된 상태 (LOS)를 가정하며 차량 간의 채널은 slow fading을 보이는 라이시안 분포를 따른다고 가정한다. 이때 각 차량이 받는 신호는 아래 식과 같이 표현된다.

$$y = hx + n.$$

$y$ 는 각 차량의 수신 신호,  $x$ 는 각 차량의 송신 신호,  $h$ 는 두 차량 사이의 채널,  $n$ 은 가우시안 잡음을 나타낸다. 이때  $\alpha = |h|^2 SNR$ 이라 하면 채널 용량  $C$  (bps)는 다음과 같이 표시된다.

$$C(\alpha) = \log_2(1 + \alpha).$$

전송 실패율 (Outage probability)  $P_{out}$ 은 채널 용량이 목표 데이터 전송률  $R_{th}$ 보다 작을 확률을 나타내며 이는 다음과 같이 표시된다.

$$P_{out} = P\{\log_2(1 + \alpha) < R_{th}\}.$$

본 논문에서는 채널이 라이시안 분포를 따른다고 가정하므로  $\alpha$ 는 다음과 같은 확률 분포를 따르게 된다.

$$p_{\alpha}(\alpha) = \frac{(1+K)e^{-K}}{SNR} e^{-\frac{(1+K)\alpha}{SNR}} I_0 \left( 2 \sqrt{\frac{K(1+K)\alpha}{SNR}} \right).$$

$K$ 는 Rician K factor이며  $SNR$ 은 채널의 평균 신호 대 잡음 비,  $I_0$ 는 modified bessel function of the first kind with order zero를 나타낸다. 채널의 평균 신호 대 잡음 비  $SNR$ (dB)은 다음과 같이 표현된다.

$$SNR = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - PL - P_n.$$

$P_{tx}$ 는 송신 파워,  $PL$ 은 Pathloss,  $P_n$ 은 잡음 파워,  $G_{tx}$ 와  $G_{rx}$ 은 각각 송신 및 수신 안테나 이득을 나타낸다. 본 논문에서는  $G_{tx} = G_{rx} = G$ 를 가정하며 신호의 반 파장만큼 떨어진  $N$ 개의 안테나 요소로 이루어진 선형 안테나 배열을 가정한다. 이때 수신 신호의 각도  $\phi$ 에 따른 안테나 이득은 다음과 같이 주어진다 가정한다.

$$G(\phi) = \frac{\sin(N(\pi \sin(\phi) + \delta)/2)}{\sin((\pi \sin(\phi) + \delta)/2)}$$

이때  $\delta$ 는 임의로 가하는 위상이다. 빔 폭을 Half Power Beam Width (HPBW)  $\phi_h$ 로 정의할 경우  $\phi_h$ 는 아래의 식을 만족한다.

$$G(\phi_h) = \frac{\sin(N(\pi \sin(\phi_h/2) + \delta)/2)}{\sin((\pi \sin(\phi_h/2) + \delta)/2)} = \frac{N}{\sqrt{2}}$$

#### 나. 차량의 위치, 속도 정보를 통한 칼만 필터 기반 빔 추적 방식

통신 중인 두 차량은 각각의 위치 및 속도 정보를 공유한다 가정하고 이때 두 차량의  $x$  축과  $y$  축 방향의 위치와 속도를

$x_i, y_i, v_{xi}, v_{yi}$  ( $i = 1, 2$ )라 한다. 이 두 차량의 거리와 상대 속도를 나타내는 상태 벡터를  $\mathbf{x} = [x_2 - x_1, y_2 - y_1, v_{x2} - v_{x1}, v_{y2} - v_{y1}]^T$ 라 할 경우 다음과 같은 칼만 필터를 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_k^- &= AP_{k-1}^+ A^T + Q \\ K_k &= P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_k^- &= A\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^+ + K_k(\hat{\mathbf{y}}_k - H\hat{\mathbf{x}}_k^-) \\ P_k^+ &= P_k^- - K_k H P_k^- \end{aligned}$$

이때,  $k$ 는 measurement index,  $P$ 는 추정 값의 공분산 행렬,  $Q$ 는 시스템 잡음 공분산 행렬을 나타내며  $-$ ,  $+$ 는 각각 선행 및 후시 상태를 나타낸다.  $A$ 는 상태 전이 행렬,  $H$ 는 측정 행렬,  $R$ 은 측정 잡음 공분산 행렬,  $\hat{\mathbf{x}}$ 는 측정 벡터이다. 이는 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_v & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_v \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 2\sigma_l^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\sigma_l^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\sigma_v^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sigma_v^2 \end{bmatrix}$$

$T_v$ 는 GPS 측정 시간 간격을 나타내고  $\sigma_l$ 과  $\sigma_v$ 는 각각 GPS를 통해 측정한 위치 및 속도 측정 오차의 표준편차를 나타낸다. 본 논문에서는 편의를 위해  $x$  축과  $y$  축의 측정 오차의 표준편차는 동일하고 평균이 0인 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 주어진 칼만 필터를 통해 Index  $k$  때의 위치를 추정하면 이를 통해 빔의 방위각  $\phi$ 를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$$

#### 다. 모의 실험 설정

본 논문의 나. 에서 보인 바와 같이 칼만 필터를 이용해 추정된 빔의 방위각은 GPS의 위치 및 속도 측정 성능에 영향을 받게 된다. 그리고 추정된 빔 방위각 오차로 인해 안테나 이득이 줄어들게 된다. 오차로 인한 안테나 이득을 최대화하여 전송 실패율을 최소화하는 안테나 빔 폭을 구하고자 다음의 모의 실험을 설정하였다. 60 GHz 주파수 대역에서 200 MHz의 대역폭을 가지는 신호로 LOS 상태의 두 차량이 10 초간 통신을 진행한다고 가정한다. 이때 송신 파워  $P_{tx} = 10$  (dBm), Rician K factor  $K = 9$ , 목표 데이터 전송률  $R_{th} = 10$  (bps)이다. Pathloss는 Free Space Path Loss model (FSPL)을 사용한다. 또한, GPS의 측정 간격  $T_v = 100$  ms, GPS의 위치 측정 오차  $\sigma_l = [0.1\text{m}, 1\text{m}, 2\text{m}]$ , 속도 측정 오차  $\sigma_v = [0.01\text{ m/s}, 0.2\text{m/s}]$ 라 가정하였다. 칼만 필터의 추정값 및 시스템 잡음 공분산 행렬의 초기값은  $P_0 = 10^2 I$ ,  $Q_0 = 10^{-6} I$ 로 설정하였다. 두 차량의 시작 거리는 각각 단거리 (5m), 중거리 (50m), 장거리 (500m)로 설정하였으며 두 차량의 상대속도는 아래의 형태를 따른다고 가정하였고 step size 2ms를 곱하여 두 차량간의 거리를 나타내었다. 모든 모의 실험은 각 100번의 몬테카를로 방법을 통해 진행되었다.

$$v_{x2}(t) - v_{x1}(t) = 5\sin(0.2\pi t).$$

$$v_{y2}(t) - v_{y1}(t) = \begin{cases} -6.29\sin(\pi(t - 10/3)), & 10/3 < t \leq 13/3 \\ -6.29\sin(\pi(t - 20/3)), & 20/3 < t \leq 23/3 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

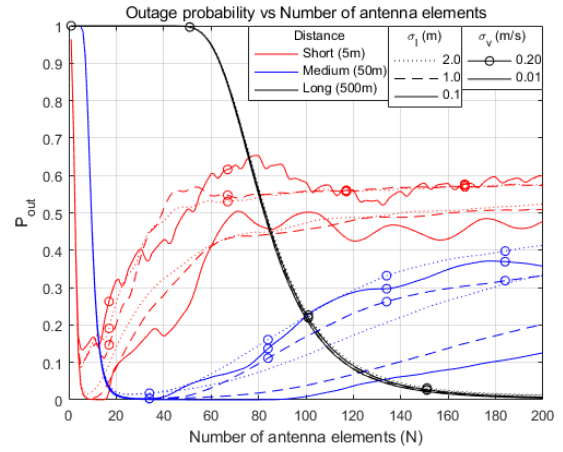


그림 1. 안테나 요소 수  $N$ 에 따른 전송 실패율  $P_{out}$

모의 실험 결과는 그림 1과 같다. 중거리와 장거리 차량간 통신의 경우 GPS의 측정 성능에 상관 없이 전송 실패율을 최소화하는 안테나 요소의 수가 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 하지만 단거리 차량간 통신의 경우 GPS의 속도 측정 오차에 의해 전송 실패율을 최소화하는 안테나 요소의 수가 많이 변하게 되는데 이는 단거리 통신에서는 작은 위치 측정 오차가 큰 방위각 추정 오차를 야기하기 때문이다.

속도 측정 오차  $\sigma_v = 0.2\text{ m/s}$ 를 기준으로 전송 실패율을 최소화하는 빔 폭은 단거리의 경우  $\phi_h \approx 10^\circ$ , 중거리의 경우  $\phi_h \approx 2^\circ$ , 장거리의 경우  $\phi_h \approx 0.1^\circ$ 인 것을 확인할 수 있다. 이는 차량간의 거리 짧은 경우 빔 방위각 추정 오차가 커지게 되므로 빔 폭이 좁은 경우보다 빔 폭이 넓은 경우에 안테나 최대 이득은 줄어들더라도 빔 방위각 추정 오차로 인해 발생하는 안테나 이득 손실을 줄일 수 있기 때문이다.

#### III. 결론

본 논문에서는 밀리미터파 차량간 통신에서 차량의 위치 및 속도 정보를 바탕으로 한 빔 추적 시 GPS의 측정 성능에 따른 최적의 빔 폭을 분석하는 연구를 진행하였다. 모의 실험 결과 최적의 빔 폭은 GPS의 속도 측정 성능 및 차량간 거리와 큰 상관 관계가 있음이 확인되었다. 이를 통해 차량간의 거리에 따라 최적의 빔 폭이 크게 변하므로 차량간 거리에 따른 유동적인 빔 폭 조절이 필요하다는 사실을 확인할 수 있었다. 추후에는 차량간 거리에 따라 빔 폭을 최적으로 맞추는 방식의 알고리즘을 개발하여 차량간 통신에서의 통신 성능을 더욱 높이는 방법에 대하여 연구를 진행할 계획이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 두뇌한국 21 플러스사업에 의하여 지원되었음.

#### 참고 문헌

- [1] Perfecto, Cristina, Javier Del Ser, and Mehdi Bennis. "Millimeter-wave V2V communications: Distributed association and beam alignment." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 35.9 (2017): 2148-2162.
- [2] Brambilla, Mattia, et al. "Sensor and Map-Aided Cooperative Beam Tracking for Optical V2V Communications." *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*. IEEE, 2020.