

UAM 환경의 밀리미터파 OFDM 시스템에서 도플러 효과 보상과 빔 추적

김동휘, 고영채*

고려대학교

{kdh605, koyc}@korea.ac.kr

A Study on the Doppler Shift Compensation and Beam Tracking in mmwave OFDM systems for UAM Communications

Dong-Hwee Kim, Young-Chai Ko *
Korea Univ.

요 약

다중 경로 환경에서 OFDM 시스템을 사용할 때 도플러 효과가 발생하면 부반송파 간의 직교성을 파괴시켜 부반송파 간섭(ICI: Inter-Carrier Interference)을 야기한다. 본 논문은 다중 경로에서 단말이 높은 속도를 가질 때 발생하는 도플러 효과를 선행 보상을 한 후, 모노펄스 비를 통해 칼만 필터로 빔을 추적하는 알고리즘을 mmwave 를 사용하는 UAM 환경에 적용시켰고, 시뮬레이션을 통해 도플러 효과 보상이 이뤄진 이후 SNR 에 따른 BER 과 빔 추적을 나타냈다.

I. 서 론

직교 주파수 분할 다중 방식 (OFDM) 은 다중 경로 환경에서 주파수 선택적 채널을 해결하기에 효과적이다. 하지만, 단말의 빠른 속도로 인해 발생하는 도플러 효과에 영향을 받게 되면 부반송파 간의 직교성이 파괴되어 ICI 가 발생하게 된다. 이로 인해, 이중 선택적 채널을 겪어 성능이 저하되고 빔포밍에 사용되는 각도를 추정하는데 어려움이 발생한다.

밀리미터파의 경우 가시선(LOS: Line-of-Sight)이 주로 고려되는 UAV 와 UAM 통신에서 효율적으로 사용되지만 적은 수의 다중 경로가 존재한다. 따라서 도플러 효과에 대한 보상이 이루어지지 않는다면 성능의 저하를 야기할 수 있다.

본 논문에서는 밀리미터파 환경에서 발생하는 다중 경로로 다중 안테나를 통해 얇은 다중 빔[1]을 생성하여 송신단에서 도플러 효과를 선행 보상하고 칼만 필터로 각도를 추정하는 빔 추적 알고리즘[2] 연구를 진행하였다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본논문에서는 다중 경로에서 도플러 효과가 발생하는 3-D 업링크 상황을 가정하였다. 밀리미터파를 사용해 다중 경로의 개수가 적은 편이고 OFDM 시스템은 N_c 개의 부반송파를 갖는다. 송신단은 UPA(uniform planar array)를 사용하고 이 때 x 축 방향으로 N_x , y 축 방향으로 N_y , 총 $N_t = N_x \times N_y$ 개의 안테나를 사용한다. 전송 심볼들을 $\{x_0, x_1, \dots, x_{N_c-1}\}$ 라 할 때, N_c -points 의 IFFT 와 N_{cp} 길이의 cyclic prefix 를 거친 시간 영역의 심볼들은

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N_c}} \sum_{k=0}^{N_c-1} x_k e^{j \frac{2\pi kn}{N_c}}, \quad -N_{cp} \leq n \leq N_c - 1$$

이고, 이 때 L 개의 다중 경로 채널은 다음과 같다.

$$h(n, n') = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{j2\pi f_l(n-d_l)T_s} \delta(n' - d_l)$$

α_l 는 채널 복소수 이득, T_s 는 샘플링 간격, d_l 은 l 번째 경로의 딜레이 시간을 의미한다. l 번째 경로의 도플러 효과로 인한 도플러 주파수 편이 (DFO: Doppler frequency offset)값을 f_l 라고 할 때 $f_l = f_d \cos \phi_l$ 이고, f_d 는 최대 도플러 편이 값, ϕ_l 은 l 번째 경로의 출발 각도(AoD)이다.

출발 각도 ϕ_l 에 대한 송신 안테나 배열 \mathbf{a}_t 를 x 축과 y 축으로 각각 분리하면

$$\mathbf{a}_x(u_l) = [1 e^{-ju_l} \dots e^{-j(N_x-1)u_l}]^T$$

$$\mathbf{a}_y(v_l) = [1 e^{-jv_l} \dots e^{-j(N_y-1)v_l}]^T$$

이고, $u_l = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \phi_l \sin \theta_l$ 과 $v_{k,l} = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \phi_l \sin \theta_l$ 은 l 번째 경로에 해당하는 x 축과 y 축 단위 방향 각도이고 ϕ_l 과 θ_l 은 각각 방위각과 고도각을 의미하며, $\mathbf{a}_t(\mathbf{x}_l) = \text{vec}(\mathbf{a}_x(u_l)\mathbf{a}_y(v_l)^H)$, $\mathbf{x}_l = \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \end{bmatrix}$ 이다. 따라서 송신 안테나 배열을 고려한 채널을 지나 수신단에 도착한 후 cyclic prefix 를 제거한 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_t(\mathbf{x}_l) \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_l) \mathbf{S}(d_l) \Phi(l) + \mathbf{z}$$

$\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_l) = \mathbf{a}_t(\hat{\mathbf{x}}_l)^H$ 는 빔포밍 벡터이고 $\hat{\mathbf{x}}_l$ 은 \mathbf{x}_l 의 추정 값이다. 또한 $\mathbf{y} = [y(0) \dots y(N_c - 1)]^T$, $\mathbf{S}(d_l) = [s(0 - d_l) \dots s(N_c - d_l - 1)]^T$ 을 의미하고 $\Phi(l) = \text{diag}\{e^{j2\pi f_l(0-d_l)T_s} \dots e^{j2\pi f_l(N_c-d_l-1)T_s}\}$ 이다. $\mathbf{z} = [z(0) \dots z(N_c - 1)]^T$ 는 가우시안 노이즈이다.

여기에 송신단에서 DFO 에 대한 선행 보상을 진행하면 위의 식은 다음과 같이 변경되고

$$\mathbf{y} = \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_l(\mathbf{x}_l) \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_l) \hat{\mathbf{S}}(d_l) \Phi(l) + \mathbf{z}$$

이 때,

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{S}}(d_l) &= \mathbf{S}(d_l) \Psi(d_l) \\ \Psi(d_l) &= \text{diag}\{e^{-j2\pi\hat{f}_l(0-d_l)T_s} \dots e^{-j2\pi\hat{f}_l(N_c-d_l-1)T_s}\} \end{aligned}$$

로 표기한다.

2. 칼만 필터를 통한 빔 추적 알고리즘

처음 각도는 알고 있고, 한 OFDM 프레임 내에서의 각도는 유지된다고 가정했다. 매우 적은 경로를 갖는 상황에서 l 번째 슬롯에서 해당 경로의 각도를 DFO 선행보상한 후 추적하고, 이후의 슬롯에서 OFDM 데이터 전송을 진행한다. 이 때, NLoS 경로의 각도는 처음 해당 경로의 각도에서 노이즈가 심하게 상수로 추가되었다고 가정하였다.

각 경로에서 k 번째 프레임에 대한 state model 이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \begin{bmatrix} u_{k+1} \\ v_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{u,k} \\ \omega_{v,k} \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{n}_{p,k} \end{aligned}$$

$\omega_{u,k}$ 와 $\omega_{v,k}$ 는 각각 σ_u^2 , σ_v^2 을 분산으로 갖는 프로세스 노이즈이다. c_i 는 단말의 이동 경로와 속도를 반영한 프레임마다 이동하는 단위 방향 각도 값이다.

Measurement model 은 모노펄스 비를 이용해 다음과 같고

$$\mathbf{r}_k = \begin{bmatrix} \tan \frac{u_k}{2} \\ \tan \frac{v_k}{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{u,k} \\ n_{v,k} \end{bmatrix} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_{m,k}$$

$n_{u,k}$ 와 $n_{v,k}$ 는 σ_n^2 의 분산을 갖는 measurement 노이즈이다.

칼만 필터의 진행은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^- &= \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \\ \mathbf{P}_k^- &= \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}_{p,k} \\ \tilde{\mathbf{r}}_k &= \mathbf{r}_k - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) = \mathbf{g}(\mathbf{x}_k) - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}_k^-) \\ &\approx \mathbf{G}\mathbf{x}_k + \mathbf{n}_{m,k} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{x}}_k^- \end{aligned}$$

여기서 \mathbf{G} 는 \mathbf{g} 의 자코비안 행렬로 $\left. \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_k^-} \approx 0.5\mathbf{I}_2$ 이다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_k &= \mathbf{G}\mathbf{P}_k^- \mathbf{G}^T + \mathbf{Q}_{n,k} \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_k^- \mathbf{G}^T \mathbf{S}_k^{-1} \end{aligned}$$

최종적으로 다음 과정을 거쳐 업데이트 된다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{r}}_k \\ \mathbf{P}_k &= \mathbf{P}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{S}_k \mathbf{K}_k^T \end{aligned}$$

3. 시뮬레이션 결과

$L = 2$, $f_c = 28\text{GHz}$, 속도는 360km/h 라고 가정했다. 그림 1. 은 각 경로의 u_l 과 v_l 이 랜덤한 각도로 주어졌을 때 한 프레임 내에서 $N_t = 4 \times 4, 8 \times 8$, DFO 보상이 되지 않은 비트 에러 확률을 비교한 그림이다. 채널은 레일리 채널을 가정하였고, $N_c = 1024$, $N_{cp} = L - 1$ 이다. DFO 선행 보상이 잘 이뤄진 것을 확인할 수 있었다.

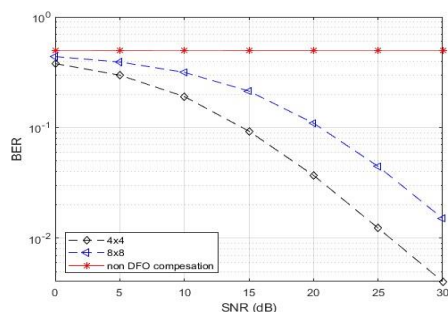


그림 1. 도플러 효과 보상 이후 SNR 에 따른 비트 에러 확률

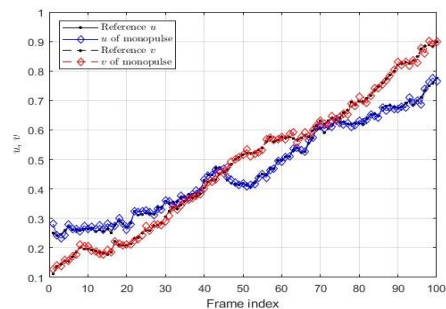


그림 2. SNR=10dB 일 때 LoS 경로 각도 추적

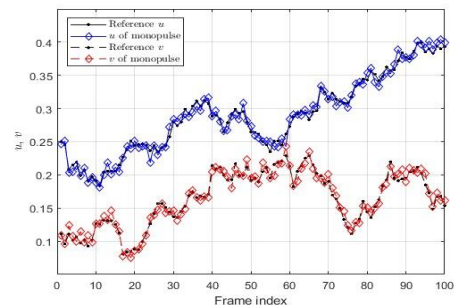


그림 3. SNR=10dB 일 때 NLoS 경로 각도 추적

이어서 그림 2. 와 그림 3. 은 고정된 SNR 에서 프레임의 변화에 따라 각 경로에서 빔 추적이 잘 진행되는지를 확인했다. 이때 LoS 경로는 단말이 지정된 경로를 따라 움직이므로 c_1, c_2 를 고정된 값을 사용했지만 NLoS 경로는 이 값을 매 프레임마다 랜덤으로 설정해 변동성을 크게 설정했다. 모노펄스의 경우 \tan 함수로 근사 할 수 있고 이에 대한 자코비안 값이 0.5 로 근사 되어 때문에 선형적으로 작동해 칼만 필터에서 빔 추적의 오류와 복잡도를 줄일 수 있었다.

III. 결론

본 논문에서는 mmwave 를 사용하는 UAM 환경에서 단말이 높은 속도를 가질 때 다중 경로에서 발생하는 도플러 효과를 선행 보상한 후에, 모노펄스 비를 통해 칼만 필터로 빔을 추적하는 알고리즘을 적용시켰고, 시뮬레이션 결과 도플러 효과 보상을 적용 시켰을 때 비트 에러 확률과 빔 추적이 잘 진행됨을 확인했다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] H. -L. Song and Y. -C. Ko, "Robust and Low Complexity Beam Tracking With Monopulse Signal for UAV Communications," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 4, pp. 3505-3513, April 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3065081.
- [2] W. Guo, W. Zhang, P. Mu, F. Gao and H. Lin, "High-Mobility Wideband Massive MIMO Communications: Doppler Compensation, Analysis and Scaling Laws," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 6, pp. 3177-3191, June 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2911508.