

5G TDOA, DOA 기반 초고속 열차 측위 기술

고 경 준[°], 변 일 무^{*}, 최 상 원^{*}, 안 우 진^{*}

High Speed Train Positioning Based on 5G TDOA and DOA

Kyeong-jun Ko[°], Il-mu Byun^{*}, Sang-won Choi^{*}, Woo-jin Ahn^{*}

요 약

열차 제어에서 가장 중요한 것 중에 하나가 열차 측위이다. 측위에 의해 관제는 열차들의 간격 조절, 선로 전환 등을 수행한다. 실제 상황에서 열차 측위는 궤도회로, RF 태그, 타코미터 등을 이용하는 데에 반해, 측위의 정확도가 떨어지거나(궤도회로), 설치 및 유지보수의 어려움(RF 태그)이 있기 때문에 새로운 열차 측위에 대한 필요성이 크게 대두되고 있다. 무선 통신에 의한 측위 기술은 활발히 연구가 되고 있는 분야이고 특히, 최근에 상용화가 이루어진 5G 시스템은 광대역에 의한 high sampling rate, 그리고 촘촘한 기지국 간격 때문에 측위 정확도가 LTE 보다 우수하다. 따라서 본 논문에서는 5G 통신 기반 초고속 열차 측위 기술을 제안하고 성능을 검증한다.

키워드 : 초고속 열차, 5G, 측위, TDOA, DOA

Key Words : High speed train, 5G, Positioning, TDOA, DOA

ABSTRACT

One of the most important things in train control system is the train positioning. The train control center performs interval control, line transfer, and so on by train positioning. A new train positioning scheme is needed because train positioning exploits track circuit, RF tag(balise, PSM), tachometer, and so on but positioning accuracy is low (track circuit) or difficulty of installation and maintenance (RF tag). The positioning scheme by wireless communication has been actively studied, especially, 5G system serviced recently is superior to LTE with respect to positioning accuracy because of high sampling rage by broad bandwidth and dence baseband installation. Therefore we propose high speed train positioning schemes based on 5G and verify performance of the proposed schemes.

1. 서 론

2004년 운행 최대 속도 300km/h인 KTX가 국내에 도입된 이래로 전국이 반나절 생활권에 접어들게 되었고 국민들의 생활 편의성을 크게 증진시켜 왔다. 고속 철도의 큰 성공으로 인해 KTX 이상의 속도를 달성하는 초고속 열차에 대한 관심이 커졌고 2013년에

최대속도 430km/h인 HEMU-430X를 국내 기술로 개발하였다. 그리고 최근에는 1,000km/h 이상의 하이퍼 튜브 열차도 전 세계적으로 활발히 연구가 진행 중에 있다.

열차를 제어하는 기술 중에서 가장 중요한 것 중에 하나가 열차 측위이다. 열차 측위는 열차 간격 제어, 선로 전환기 제어 등에 필요하며 열차 제어 정보는 안

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

•[°] First Author and Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, kkj8000@krii.re.kr, 선임연구원, 정희원

* Korea Railroad Research Institute, ilmubyun@krii.re.kr, 선임연구원, 정희원; swchoi@krii.re.kr, 선임연구원; woojin.ahn@krii.re.kr, 선임연구원

논문번호 : 202007-164-C-RN, Received July 23, 2020; Revised August 3, 2020; Accepted August 4, 2020

전과 직결되기 때문에 정확성이 매우 중요하다. 현재는 궤도회로나 RF 태그 등을 이용하여 열차의 위치를 획득하고 있으나, 궤도회로는 정확도가 많이 떨어지고 RF 태그는 가격이 비싸고 유지 보수가 힘들기 때문에 새로운 열차 측위 기술을 개발할 필요가 있다.

무선 통신은 정보 전송이라는 본연의 목적 이외에 부가적인 정보들을 이용하여 측위를 할 수 있기 때문에 열차 측위에 활용될 수 있다. 가장 대표적인 측위 기술은 실외에서 매우 널리 사용되는 GPS와 실내에서 많이 사용되는 와이파이나 근거리 통신 등이 있다. LTE 같은 무선 통신 시스템도 학계에서 많은 연구가 이루어지고 있지만 LOS 미확보 가능성이 큰 관계로 오차가 많이 발생하여 실제 거의 사용되지 않고 있다.

하지만 최근에 상용화된 5G 시스템은 LTE보다 넓은 대역폭으로 인해 sampling rate이 높아지고, 촘촘한 기지국 간 간격에 의해 LOS 확보가 용이하기 때문에 좋은 성능을 나타낸다^[18]. 따라서 5G 시스템을 열차 측위에 적용하는 것은 현재의 열차 측위 기술의 단점을 극복할 수 있는 방법이 될 수 있다. 특히 무선 통신을 열차 측위에 적용하는 것에는 두 가지의 이점이 있다. 첫째, 열차는 일정한 노선을 따라 움직이므로 고정적이고 예측 가능한 움직임을 가진다. 둘째, 2차원이나 3차원을 고려해야 하는 기존 무선 통신 측위 기술에 비해 열차 환경은 1차원만 고려하면 되기 때문에 고려해야 될 변수가 줄어든다. 이처럼, 열차 환경은 일반적인 모바일 시스템에 비해 간단하게 모델링 되기 때문에 측위 측면에서 무선 통신과 열차 시스템과의 조합은 큰 효과를 볼 수 있는 가능성이 높다. 따라서 본 논문에서는 5G를 이용한 열차 측위 기술에 대해 제안하고 성능을 검증한다.

II. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 RRH(Remote Radio Antenna) 간 간격이 550m, 선로(track)와 RRH와의 간격이 10m, 열차의 최고속도가 500km/h이고 업링크에서 열차 측위를 하는 시스템을 가정한다. 그림 1은 시스템 모델을 도식화한 것이고 RRH가 선로를 기준으로 지그재그 형태로 설치가 되어 있는 특징이 있다.

2.1.1 채널 모델

본 논문에서는 3GPP TR 38.901 문서에 나와 있는 채널 모델링을 이용한다^[9]. 중심주파수 $f_c = 30\text{GHz}$, Delay Profile은 CDL-D, Ricean K factor, $K = 13.3$,

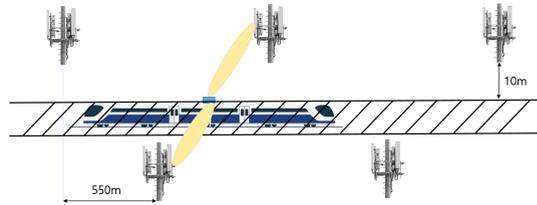


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

[9]의 Table 7.7.3-1에서 short delay spread = 30ns를 가정한다. 그리고 안테나는 [9]에 나와 있는 대로, (M_g, N_g, M, N, P) 형태인 rectangular panel을 사용한다.

2.1.2 시스템 모델

본 논문에서는 열차 통신 단말에서 5G 기지국 간의 업링크 신호를 이용해서 열차 위치를 측정하는 것을 가정한다. 그러면 k번째 RRH가 열차 통신 단말로 부터 받는 m번째 수신 신호는, $z_k[m]$, 다음과 같다.

$$z_k[m] = \frac{\sqrt{P_T}}{\sqrt{P_{PL,k}}} u^* H_k[m] v s[m] + n_k[m], \quad (1)$$

여기서 P_T 는 송신파워, $P_{PL,k}$ 는 k번째 RRH와 열차 통신 단말 사이의 pathloss에 의한 전파감쇄, u 와 v 는 각각 receiver combining vector, transmit beamforming vector, $H_k[m]$ 는 m번째 수신 신호에 대한 k번째 RRH와 열차 통신 단말 사이의 $N_r \times N_t$ (N_r : 수신단 안테나 수, N_t : 송신단 안테나 수) fast fading 채널, $s[m]$ 은 m번째 송신 데이터, $n_k[m]$ 는 m번째 수신 신호에 대한 k번째 RRH에서의 노이즈이다. 본 논문에서는 u 와 v 는 각각 random vector로 가정한다.

$$u = \frac{1}{\sqrt{N_r}} \text{randn}(N_r, 1) \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{N_t}} \text{randn}(N_t, 1) \quad (3)$$

본 논문에서의 기본적인 프레임 구조는 3GPP의 TS 38.211 문서를 기반으로 한다^[10]. 그리고 1024 FFT 사이즈를 가지는 OFDM 시스템을 가정하고 실제 데이터를 포함하는 subcarrier는 725-1024, 2-301

이라고 가정한다. 송신 신호 $s[m]$ 는 14개의 OFDM 심볼로 구성되어 있는 하나의 slot에서 11번째 OFDM 심볼 내에 실제 데이터를 포함하는 subcarrier의 짝수 번째 subcarrier에 SRS 신호를 실어서 보낸다.

(1)에서 pathloss에 의한 전력 손실과 관련된 항목, $\sqrt{P_{PL,k}}$ 는 [9]의 Table 7.4.1-1의 UMi-StreetCanyon (LOS)를 참조하였다.

2.1.3 제안한 알고리즘

본 논문에서는 RRH간에 완벽한 동기화가 이루어 지는 것을 가정한다¹⁻³⁾.

(1) TDOA 기반 열차 측위 알고리즘

TDOA(Time Difference Of Arrival)는 다음과 같이 열차 통신 단말에서 reference RRH와 k번째 RRH까지의 전파 도달 시간의 차이를 계산하여 구한다¹¹⁾.

$$TDOA_{k,ref} = \frac{\sqrt{(x_t - x_k)^2 + (y_t - y_k)^2} / c - \sqrt{(x_t - x_{ref})^2 + (y_t - y_{ref})^2} / c}{(T_k - T_{ref}) + (e_k - e_{ref})} \quad (4)$$

여기서 x_t 와 y_t 는 열차의 x좌표, y좌표이고, x_{ref} 와 y_{ref} 는 reference RRH의 x좌표, y좌표, c 는 빛의 속도, T_k 는 k번째 RRH에 대한 time offset, e_k 는 k번째 RRH에서의 measurement error이다. 본 논문에서는 모든 RRH가 동기화가 되는 것을 가정하고 있기 때문에 $T_k - T_{ref} = 0$ 이다. 만약 RRH 간에 동기화가 되어 있지 않다고 가정하면, TDOA를 구할 때 노이즈가 추가되므로 측위 성능이 열화될 수 있다.

그럼 1에서 RRH가 지그재그 형태로 구축되어 있고 본 논문에서는 high speed train을 가정하기 때문에 선로가 직선이라고 간주할 수 있다. 그러므로 $y_t = 0$

이고 $y_k = \begin{cases} -10, & k = \text{even} \\ 10, & k = \text{odd} \end{cases}$ 이기 때문에 y축 관련한 항은 변수가 아니고 상수라고 볼 수 있다. 따라서 변수는 x축만 포함되고 1차원 모델로 간단히 표현할 수 있다.

TDOA를 구하기 위해 우선적으로 다음과 같이 각각의 RRH에서 SRS 신호와 수신 신호와의 cross-correlation을 계산한다.

$$\eta_k[l] = \sum_{j=0}^{N_{slot}-1} s^*[j-l]z_k[j] \quad (5)$$

여기서 $s[j]$ 은 SRS 신호에서의 j번째 데이터, N_{slot} 은 하나의 slot에서의 데이터 길이를 의미한다.

그러면 열차 통신 단말과 k번째 RRH와의 propagation delay를 위한 최적 샘플 인덱스, \hat{l}_k 는 다음과 같다.

$$\hat{l}_k = \operatorname{argmax}_l |\eta_k[l]| \quad (6)$$

따라서 계산된 propagation delay, $\hat{\delta}_k$ 는 다음과 같다.

$$\hat{\delta}_k = \frac{\hat{l}_k}{F_s} = \frac{l_k}{F_s} + e_k \quad (7)$$

여기서 l_k 는 measurement error가 없을 때의 propagation delay이고, F_s 는 sampling rate을 의미한다.

그러면 m번째 time instant에서, reference RRH, k_m^+ 는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$k_m^+ = \operatorname{argmax}_{k \in \Omega_m} |\eta_k[\hat{l}_k]| \quad (8)$$

여기에서, $\Omega_m \equiv \{k_{m-1}^+ - 1, k_{m-1}^+, k_{m-1}^+ + 1\}$ 이고 m-1번째 time instant에서의 reference RRH, k_{m-1}^+ 을 포함하여 k_{m-1}^+ 의 바로 전후의 RRH를 candidate RRH, Ω_m 으로 정의한다.

일반적인 모바일 환경에서, TDOA기반의 측위 알고리즘은 [12]에 설명되어 있다. 본 논문에서는 기존의 TDOA 기반 측위 알고리즘을 열차 환경에 적합하게 변형한 알고리즘을 제안한다.

표 1은 TDOA에 의한 열차 측위 알고리즘을 보여 준다. 우선 TDOA를 계산하기 위해 candidate reference RRH의 집합 Ω_m 에서 reference RRH, k_m^+ 와 k_m^+ 을 제외한 나머지 RRH중에 cross-correlation, $|\eta_k[\hat{l}_k]|$ 이 가장 큰 RRH, i 를 선택한다. 그리고 k_m^+ 과 i 의 RRH와 열차 통신 단말 사이의 propagation delay를 측정하고 이를 이용하는 방법으로 측위를 진행한다. 여기서 reference RRH를 제외하고 단 하나의 RRH만 선택한 이유는 high speed train에서는 1차원 좌표만 계산하면 되기 때문이다.

제안하는 TDOA 기법은 1차원 환경을 고려하고 특

정한 방향으로 움직이는 특성을 고려하여 설계되었다.

(2) DOA 기반 열차 측위 알고리즘

DOA(Direction Of Angle) 기반 열차 측위 알고리즘은 5G의 가장 중요한 특징 중 하나인, beamforming을 이용한다. 본 논문에서는 업링크 신호와 수신단(RRH)에서 beam selection을 한다고 가정한다.

그림 2는 이와 같은 열차 환경에서의 DOA 모델을 보여준다. 그림에서 θ 는 beam의 angle을 의미한다.

수신단에서의 beam을 사전에 결정하기 위해, 우선적으로 각 RRH의 영역을 미리 설정한다. RRH간의 간격을 D 라고 두면, k 번째 RRH의 x 축에서의 영역, R_k 및 $R_{k,1}$, $R_{k,2}$ 는 (9)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} (k-1)D - D/2 &\leq R_k < (k-1)D + D/2 \\ (k-1)D - D/2 &\leq R_{k,1} < (k-1)D \\ (k-1)D &\leq R_{k,2} < (k-1)D + D/2 \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 R_k 에서 다음과 같이 x 축 좌표로 beam의 개수만큼 균등하게 나눈 방식으로 beam을 설정한다.

$$(k-1)D - \frac{D}{2} + \frac{D}{G}(g-1) \leq B_{k,g} < (k-1)D - \frac{D}{2} + \frac{D}{G}g \quad (10)$$

여기서 $B_{k,g}$ 는 k 번째 RRH의 g ($1 \leq g \leq G$) 번째 beam에 대한 영역이다. 그러면 $B_{k,g}$ 에서의 g 번째 beam의 각도, $a_{k,g}$ 는 다음과 같이 정의한다. 우선 $-D/2 + D/G/2 + (g-1)D/G < 0$ ($R_{k,1}$)일 때 다음과 같이 두 가지 경우가 ($a_{k,g,1}$, $a_{k,g,2}$) 생길 수 있다.

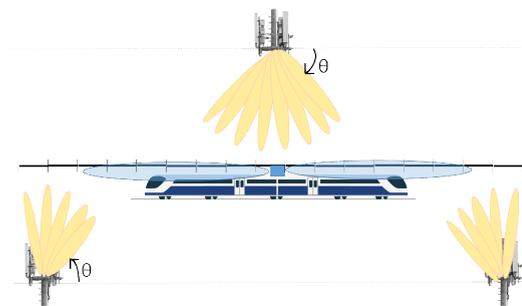


그림 2. 열차 환경에서의 DOA 모델
Fig. 2. DOA model in train environment

$$\begin{aligned} a_{k,g,1} &= \tan^{-1} \left(\frac{|y_k|}{-D/2 + D/G/2 + (g-1)D/G} \right) \\ a_{k,g,2} &= \tan^{-1} \left(\frac{|y_k|}{-D/2 + D/G/2 + (g-1)D/G} \right) + \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

표 1. TDOA에 의한 열차 측위 알고리즘
Table 1. Train positioning algorithm by TDOA

1. : $m=1$, $k_m^+ = 1$, $x = 0$, temp = 100000
2. : (8)에 의해 reference RRH, k_m^+ 를 찾는다.
3. : $i = \operatorname{argmax}_{k \in \Omega_m - \{k_m^+\}} |\eta_k[\hat{l}_k]|$ 를 구한다.
4. : Loop (5-11)
5. : $d_{k_m^+,i} = \sqrt{(x - x_{k_m^+})^2 + (y - y_{k_m^+})^2} - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \equiv d_{k_m^+} - d_i$ 를 구한다.
6. : $h = \frac{x - x_{k_m^+}}{d_{k_m^+}} - \frac{x - x_i}{d_i}$ 를 구한다.
7. : $J = \hat{\delta}_{k_m^+} - \hat{\delta}_i - (d_{k_m^+} - d_i)$ 를 구한다.
8. : $x^+ = x + J/h$ 라고 두면,
if $x^+ < 0$ and $|J/h| > \text{temp}$
 $x^+ = x_{k_m^+} + 10 * \text{randn}$
end
9. : if $|x^+ - x| \leq 0.1$
if $x_{k_m^+} < x_i$
if $x^+ < x_{k_m^+}$
 $x^+ = x_{k_m^+}$
end
elseif $x_{k_m^+} > x_i$
if $x^+ > x_{k_m^+}$
 $x^+ = x_{k_m^+}$
end
end
break; (13으로 이동)
end
10. : temp = $|J/h|$
11. : $x = x^+$
12. : 5번으로 이동
13. : $\hat{x}_m = x^+$ (\hat{x}_m : TDOA에 의한 예측된 위치)
14. : $m = m+1$, temp = 100000, 2번으로 이동

$-D/2 + D/G/2 + (g-1)D/G > 0 (R_{k,2})$ 일 때도 마찬가지로 (12)와 같이 두 가지 경우가 ($a_{k,g,1}, a_{k,g,2}$) 생길 수 있다.

$$a_{k,g,1} = \tan^{-1} \left(\frac{|y_k|}{-D/2 + D/G/2 + (g-1)D/G} \right) - \frac{\pi}{2}$$

$$a_{k,g,2} = \tan^{-1} \left(\frac{|y_k|}{-D/2 + D/G/2 + (g-1)D/G} \right) \quad (12)$$

본 논문에서는 이를 바탕으로 DOA 기반의 열차 측위 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 beam을 x축 방향으로 균등한 거리가 되도록 설정을 하고 E개의 최적의 beam을 선택하여 가중치를 구해서 정밀한 beam 방향을 찾은 후에 그것을 이용하여 위치를 계산하는 것이다. 표 2의 7번의 $\sum_{j=1}^E p_j a_{k_m^+, g_j^+}$ 부분이 각 beam의 가중치를 이용하여 정밀한 beam 방향을 선택하는 것으로서, 제안한 알고리즘의 핵심이 된다.

제안하는 DOA 기법은 움직임이 일정하지 않은 일반적인 모바일 환경에서는 적용하기 힘들지만, 고정된 루트를 움직이고 RRH와 선로와의 거리가 일정한 열차 환경에서는 잘 동작할 수 있는 특징이 있다.

III. 실험

본 논문에서는 최고속도 500km/h이고 그림 3의 speed profile을 따르는 high speed train을 고려한다. Speed profile에서 가속도는 $4/9 \text{ m/s}^2$, 감속도는 $-10/9 \text{ m/s}^2$ 라고 가정한다. 그리고 열차 통신 단말의 송신 파워는 33 dBm, 각 수신단(RRH)에서의 noise figure는 5 dB, 기본적인 thermal noise power density는 -174 dBm/Hz , SRS interval이 100ms, OFDM에서의 subcarrier spacing은 30 kHz이다. 또한 열차 통신 단말의 안테나는 (2,2,2,2,2) = 32개이고 각 RRH의 단말의 개수는 (2,2,2,2,1) = 16개이고, RRH의 높이는 10m, 열차 통신 단말의 높이는 4m라고 가정한다.

DOA에 의한 열차 측위 과정에서 홀수번째 RRH는 -180° 에서 0° 사이의 방향값을 가지고, 짝수번째 RRH는 0° 에서 180° 사이의 방향값을 가진다. 1024 point FFT를 사용하고 30 kHz의 subcarrier spacing을 가정하기 때문에 sampling rate, $F_s = 30.72 \text{ MHz}$ 이다.

표 2. DOA에 의한 열차 측위 알고리즘
Table 2. Train positioning algorithm by DOA

<p>: m=1</p> <p>: (8)에 의해 최적의 RRH, k_m^+를 찾는다.</p> <p>: (11)과 (12)에 의해 $a_{k_m^+, g}$ ($1 \leq g \leq G$)를 구한다.</p> <p>: k_m^+에서의 수신 신호를 이용하여 g에 대해 $b_{k_m^+, g}^* z_{k_m^+}^*[m] ^2$의 값 중 가장 큰 E개의 beam을 선택한다. 그리고 선택한 beam 인덱스 집합을 $\Phi = \{g_1^+, g_2^+, \dots, g_E^+\}$라고 정의한다.</p> <p>: if k_m^+이 홀수</p> <p style="padding-left: 40px;">$a_{k_m^+, g} = a_{k_m^+, g, 1}$</p> <p style="padding-left: 40px;">elseif k_m^+이 짝수</p> <p style="padding-left: 40px;">$a_{k_m^+, g} = a_{k_m^+, g, 2}$</p> <p style="padding-left: 40px;">end</p> <p>: 각 빔에 대한 가중치 p_j를 다음과 같이 계산한다.</p> $p_j = \frac{ b_{k_m^+, g_j^+}^* z_{k_m^+}^*[m] ^2}{\sum_{f=1}^E b_{k_m^+, g_f^+}^* z_{k_m^+}^*[m] ^2}$ <p>7. : DOA에 의한 위치 \hat{x}_m를 다음과 같이 구한다.</p> $\hat{x}_m = x_{k_m^+} - \frac{y_{k_m^+}}{\tan \left(\sum_{j=1}^E p_j a_{k_m^+, g_j^+} \right)}$ <p>8. : m = m+1, 2번으로 이동</p>
--

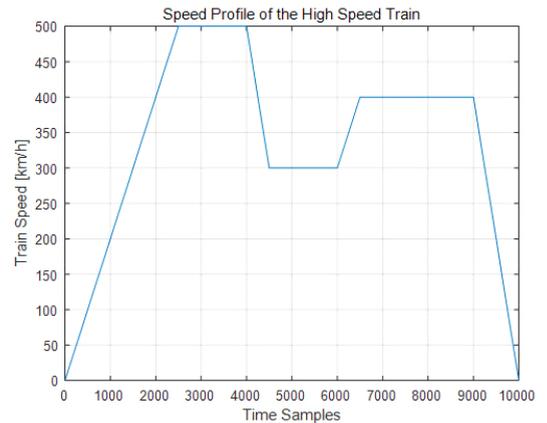


그림 3. High speed train에서의 speed profile
Fig. 3. Speed profile of high speed train

그림 4와 그림 5는 measurement error, $e = randn/F_s$ 일 때의 TDOA와 $G=32, B=5$ 일 때의 DOA를 이용한 열차 측위 오차 결과를 보여준다. 그리고 표 3에서 TDOA와 DOA를 이용한 열차 측위 오차 평균 및 worst 5%의 결과에 대한 상세값을 나타낸다. TDOA와 DOA에 의한 측위 결과를 비교해 보면 TDOA를 이용하는 것은 시간이 지남에 따라 측위 오

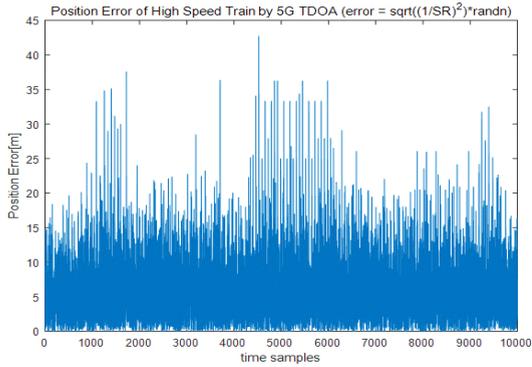


그림 4. TDOA에 의한 열차 측위 오차 결과 ($e = randn/F_s$)
Fig. 4. Position error of high speed train by TDOA ($e = randn/F_s$)

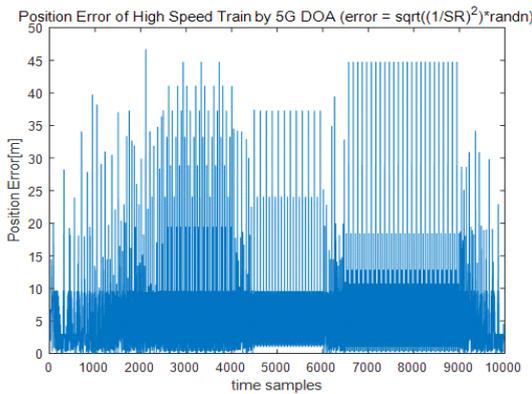


그림 5. DOA에 의한 열차 측위 오차 결과($G=32, E=5$)
Fig. 5. Position error of high speed train by TDOA ($G=32, E=5$)

표 3. 그림 4와 그림 5에서의 열차 측위 오차 평균 및 worst 5% 결과
Table 3. Results of mean and worst 5% of position errors for high speed train in Fig. 4 and Fig. 5.

	TDOA(m)	DOA(m)
mean	6.0357	4.8217
worst 5%	15.1193	10.7198

차 분포가 일정한 패턴을 가지지 않음을 보이는 반면에 DOA를 이용한 것을 보면 측위 오차의 분포가 같은 패턴을 가지고 있는 부분을 많이 볼 수 있는 특징이 있다.

그림 6과 그림 7은 measurement error, $e = 2 \times randn/F_s$ 일 때의 TDOA와 $G=16, E=5$ 일

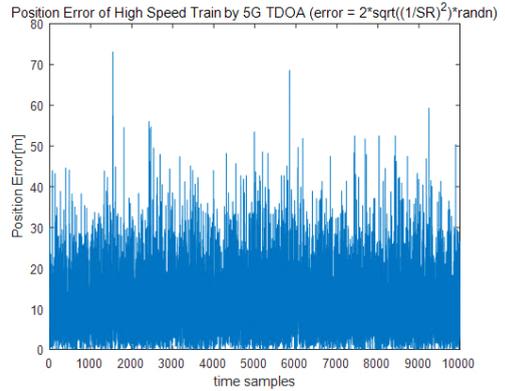


그림 6. TDOA에 의한 열차 측위 오차 결과 ($e = 2 \times randn/F_s$)
Fig. 6. Position error of high speed train by TDOA ($e = 2 \times randn/F_s$)

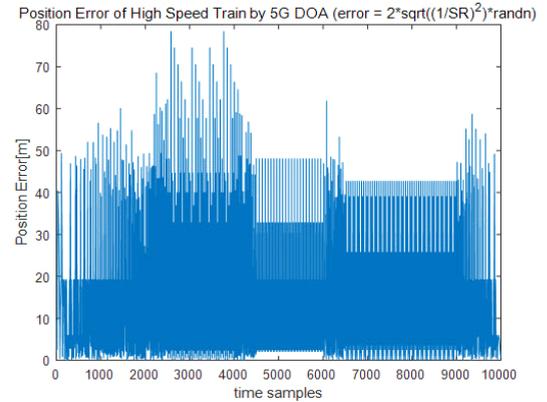


그림 7. DOA에 의한 열차 측위 오차 결과($G=16, E=5$)
Fig. 7. Position error of high speed train by TDOA ($G=16, E=5$)

표 4. 그림 6과 그림 7에서의 열차 측위 오차 평균 및 worst 5% 결과
Table 4. Results of mean and worst 5% of position errors for high speed train in Fig. 6 and Fig. 7.

	TDOA(m)	DOA(m)
mean	11.5191	13.3582
worst 5%	28.2562	35.9774

때의 DOA를 이용한 열차 측위 오차 결과를 보여준다. 그리고 표 4에서 TDOA와 DOA를 이용한 열차 측위 오차 평균 및 worst 5%의 결과에 대한 상세값을 나타낸다.

우선 그림 6은 그림 4와 비교하여 TDOA의 measurement error가 2배 증가한 환경을 가정하였다. 측위 오차를 분석해 보면 measurement error가 2배 증가함에 따라 측위 오차의 평균과 worst 5% 경우가 각각 약 2배 정도 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 7과 표 4에서의 DOA에 의한 열차 측위 알고리즘은 G=16일 경우를 가정하였다. 결과를 보면 이전의 G=32일 경우와 비교하여 측위 오차의 평균과 worst 5% 경우가 각각 약 3배 정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 RRH 간격이 일정할 때, beam의 개수가 증가할수록 하나의 beam이 속해 있는 영역이 줄어들기 때문이다. 예를 들어 RRH 간격이 100m, beam의 개수가 10개이고 beam을 하나만 선택한다고 가정하면 하나의 beam은 10m의 영역을 가지게 되고 측위 오차는 최대 10m가 된다. 그리고 beam을 여러 개 선택할 수 있으면 표현할 수 있는 beam direction이 많아지기 때문에 측위 오차는 좀 더 줄어들 수 있다. 따라서 G=16인 경우가 G=32인 경우보다 조합할 수 있는 beam direction이 적어지고 그로 인해 측위의 정밀도가 떨어진다.

IV. 결 론

본 논문에서는 5G 기반의 high speed train 측위 알고리즘을 제안하였다. 측위 알고리즘은 5G 신호의 TDOA와 DOA를 사용하는 두 가지 방안을 제시하였다.

열차 환경은 일정한 루트를 따라 움직이기 때문에 일반적인 모바일 환경에 비해서 움직임이 예측 가능하다. 특히 high speed train에서는 직선 선로가 대부분이기 때문에 (고속으로 움직이려면 선로가 직선이어야 함) 2차원이나 3차원 측위를 해야되는 일반적인 모바일 환경에 비해 1차원만 고려하면 되기 때문에 고려해야 할 변수가 줄어드는 이점이 있다.

우선 제안된 TDOA 기반의 열차 측위 알고리즘은 열차 통신 단말의 업링크 SRS 신호와 각 RRH의 수신신호 사이의 cross-correlation을 이용하여 구한 propagation delay의 차이를 기반으로 계산된다. (1)에서의 RRH 하드웨어 자체에서 생산되는 노이즈 이외에 (4)에서 나타난 propagation delay의 오류까지 고려하여도 10m 내외의 측위 오차를 만족하는 것을 알

수 있다. 현재 실제 환경에서는 케도회로나 RF 태그 등을 이용하여 열차 측위를 진행하는데, 실제 현장에서는 10m 정도의 측위 오차면 실제 열차 환경에서 사용할 수 있다고 알려져 있다.

두 번째로 제안한 DOA 기반 열차 측위 알고리즘은 정해진 루트를 움직이는 열차의 특징을 이용하는 것이다. 열차는 고정된 1차원 상의 선로를 따라 움직이고, 이에 따라 beam을 미리 설정해 놓으면, RRH가 최적의 beam들을 선택하는 방식으로 측위를 진행한다. 실험결과를 보면 candidate beam의 개수가 클수록 성능이 좋아지는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 측정 주기에 관한 측위 오차, RRH 간에 동기화가 되지 않을 때의 경우에 대한 내용은 포함되어 있지 않은데, 이에 대한 내용은 추후 연구를 통해 진행하도록 하겠다.

References

- [1] J. Talvitie, T. Levanen, M. Koivisto, K. Pajukoski, M. Renfors, and M. Valkama, "Positioning of high-speed trains using 5G new radio synchronization signals," *IEEE Wirel. Commun. and Netw. Conf.*, Apr. 2018.
- [2] J. Talvitie, T. Levanen, M. Koivisto, T. Ihalainen, K. Pajukoski, M. Renfors, and M. Valkama, "Positioning and location-based beamforming for high speed trains in 5G NR networks," *IEEE Globecom Wkshps.*, Dec. 2018.
- [3] J. Talvitie, T. Levanen, M. Koivisto, T. Ihalainen, K. Pajukoski, and M. Valkama, "Positioning and location-aware communications for modern railways with 5G new radio," arxiv.org/abs/1905.01154
- [4] X. Cui, T. A. Gulliver, J. Li, and H. Zhang, "Vehicle positioning using 5G millimeter-wave systems," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6964-6973, Oct. 2016.
- [5] H. Wymeersch, G. S. Granados, G. Destino, D. Dardari, and F. Tufvesson, "5G MmWave positioning for vehicular networks," *IEEE Wireless Commun.*, pp. 80-86, Dec. 2017.
- [6] Y. Liu, X. Shi, S. He, and Z. Shi, "Prospective positioning architecture and technologies in 5G networks," *IEEE Network*

pp. 115-121, Nov. 2017.

- [7] Z. Chaloupka, "Technology and standardization gaps for high accuracy positioning in 5G," *IEEE Commun. Standards Mag.*, pp. 59-65, Mar. 2017.
- [8] M. Kim, H. Kim, and S. Lee, "Probabilistic approach for efficient distributed positioning system in V2V networks," *J. KICS*, vol. 44, no. 12, pp. 2284-2287, Dec. 2019.
- [9] 3GPP TR 38.901, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Rel. 16)."
- [10] 3GPP TS 38.211, "Physical channels and modulation (Rel. 16)."
- [11] S. Fischer, "Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA) Positioning in 3GPP LTE," Qualcomm Technologies, Inc., Jun. 2014.
- [12] C. Y. Chen and W. R. Wu, "Three-dimensional positioning for LTE systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, pp. 3220-3234, Jul. 2016.

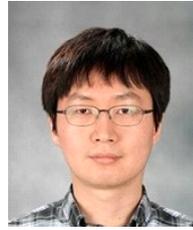
고 경 준 (Kyeong-jun Ko)



2006년 2월 : 서울대학교 전기공학부 학사
 2012년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 2013년 9월~현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야> 통신공학, 기계학습, 빅데이터
 [ORCID:0000-0001-7575-864X]

변 일 무 (Il-mu Byun)



2005년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 학사
 2007년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 석사
 2013년 2월 : 연세대학교 전기전자공학 박사
 2013년 1월~2017년 11월 : LG 전자 차세대표준연구소

2017년 11월~현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
 <관심분야> 5G URLLC, Channel coding, SC-PTM
 [ORCID:0000-0003-1241-4756]

최 상 원 (Sang-won Choi)



2002년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
 2004년 2월 : KAIST 전기전자공학 석사
 2010년 1월 : KAIST 전기전자공학 박사
 2010년 2월~2014년 3월 : 삼성전자 무선사업부

2014년 4월~현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
 <관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 통신 신호처리, 특수 목적 통신, 공공 안전망, 단말 알고리즘
 [ORCID:0000-0002-5464-5766]

안 우 진 (Woo-jin Ahn)



2016년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 박사
 2016년 3월~2019년 8월 : 윌러스표준기술연구소
 2019년 9월~현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야> 열차제어통신네트워크, 무선랜
 [ORCID:0000-0001-9892-9069]