

무선통신 도플러 주파수를 이용한 고속열차 위치 추정에 관한 연구

김정태

한국철도기술연구원 광역도시교통본부

A Study on the High Speed Train Localization Using Doppler Frequency in the Wireless Communication

Jungtai Kim

Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 열차의 위치를 정확하게 추정하는 것은 열차제어를 위해 필수적이며 선로변에 시스템을 설치하지 않고 열차의 위치를 추정하기 많은 연구가 있었다. 열차는 선로 위를 움직이므로 위치 추정을 일차원적으로 검색이 가능하며 그 선로 또한 위치 정보를 미리 알 수 있다는 특징이 있다. 특히 고속열차의 경우 속도가 커서 도플러 주파수가 비교적 크며 선로 모양도 직선 혹은 반경이 큰 곡선으로 되어 있다. 본 연구에서는 이를 활용하여 두 지점(기지국)에서 송신한 신호의 도플러 주파수를 이용하여 열차의 위치를 추정하는 방법에 대하여 제안한다. 직선과 곡선, 직곡선 혼합 선로 구간에 대하여 위치를 추정하는 수식을 도출한다. 일반적으로 도플러 레이더는 속도를 측정하는데 사용되나 여기에서는 속도와 위치를 모르는 상태에서 두 신호의 도플러 주파수 비율을 이용하여 위치와 속도를 순차적으로 구한다. 시뮬레이션을 통해 열차 위치 및 측정 오차 수준에 따른 추정 오차의 변화를 구한다. 제안하는 방안과 기존 방안에서의 목표 추정 오차 수준을 얻기 위한 조건과 측정 오차가 커짐에 따른 오차의 증가량을 비교함으로써 성능과 강인성 면에서 제안하는 방안의 우수성을 보인다.

Abstract It is important to localize trains precisely for the purpose of controlling them and there have been many studies designed to accomplish this without the need for wayside systems. Since trains run on fixed railway lines, it is possible to search in one direction to localize them. Moreover, it is also possible to know the shape of the line in advance. In the case of high speed trains, their speed and, therefore, their Doppler frequency is relatively high and the railway line is either linear or circular with a large radius. In this study, we utilize these features and propose a train localization method using the Doppler frequency of the signals transmitted from two points (base stations). We derive localization equations for a linear line, circular line, and mixed line (linear plus circular) respectively. Though Doppler radars are usually used to measure speed, the proposed method obtains the location information and the speed successively using the ratio of the doppler frequencies of two signals without knowing the location information or the speed. Computer simulations are performed to show the variation of the estimation error according to the train's location and the measurement error level. The conditions required to obtain the target error level and the increase in the estimation error according to the measurement error are compared between the proposed and conventional methods. The results show the superior performance and robustness of the proposed method.

Keywords : Doppler Frequency, High Speed Train, Line Shape, Train Localization, Wireless Communication

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jungtai Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5722 email: jtkim@krii.re.kr

Received September 29, 2017

Revised (1st October 18, 2017, 2nd October 30, 2017)

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

1. 서론

열차제어는 열차의 안전하고 효율적인 운행을 위해 열차 간 간격과 열차의 진행 경로를 제어하는 것이다[1]. 이 중 간격제어에서는 선행 열차와 후행 열차의 위치 정보를 바탕으로 추돌이 일어나지 않도록 후행 열차의 이동 권한이 부여되고 이에 따라 후행 열차는 속도를 조절하게 된다. 여기서 열차의 위치를 실시간으로 정확하게 알수록 이에 맞는 이동권한을 계산하여 열차 간 간격을 줄일 수 있다. 이 간격은 선로 효율과 밀접한 관련이 있으므로[2] 열차의 위치를 빠르고 정확하게 추정하기 위한 연구와 시스템 개발이 지속적으로 수행되어 왔다[3]. 기존의 궤도회로 시스템대신 CBTC(Communication Based Train Control) [4]나 ETCS L3(European Train Control System Level 3) [5]에서는 발리스 등을 이용하여 열차가 자신의 위치를 정밀하고 정확하게 추정하고 이를 무선통신으로 중앙관제시스템에 전송하게 된다.

궤도회로를 사용하지 않는 것은 또한 설치 및 유지보수 비용을 절감하여 경제성도 향상 시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러므로 궁극적으로는 발리스와 같은 지상 시스템 없이 열차의 위치를 추정하는 연구가 국내외로 많이 수행되고 있다. 유럽의 선진 열차제어시스템 개발 로드맵인 Shift2Rail[6]에서는 GPS를 주로 이용하여 열차의 위치를 추정하는 방안을 제안하고 있다. 그러나 GPS를 이용한 방법은 터널과 지하 구간이 많은 국내 철도 환경에는 적합하지 않다. 영상을 이용하는 방법도 연구되고 있는데[7] 장치의 가격이 올라가고 데이터를 확보하기 까지 많은 시간이 걸린다는 단점이 있다.

열차의 제어를 무선통신으로 수행하는 시스템이 개발되면서 이를 이용한 여러 가지 위치 추정 방법이 제안되었다. 여러 개의 기지국에서 들어오는 신호의 세기를 이용하여 각 기지국과의 거리를 추정하고 이를 이용하여 열차의 위치를 추정하는 방식[8]도 있는데 이는 전파 감쇄에 따라 오차가 커질 수 있으며 이를 방지하기 위해 감쇄비율에 대한 데이터베이스를 구축해야 한다는 단점이 있다[9]. 각 기지국에서 들어오는 신호의 지연 시간을 이용하여 거리를 구하고 이에 따라 열차의 위치를 추정하는 방식[10]도 제안되었다. 그러나 이 방식을 적용하기 위해서는 차상 통신장치 및 이와 통신을 수행하는 모든 기지국이 시간적으로 동기화되어 있어야 한다. LTE 및 5G 통신 시스템의 경우 시간 동기를 항상 보장하는

것은 아니므로 이러한 방식을 사용할 수 없게 된다.

본 논문에서는 무선통신 시 고속열차의 이동에 의하여 발생하는 도플러효과를 이용하여 열차의 위치를 추정하는 방안을 제안한다. 기존에 도플러를 이용하는 방법은 위치 측정 시 보조 수단으로 사용되거나[11] GPS 등 속도를 정확히 알고 있는 경우를 가정하였으나[12] 제안하는 방법에서는 열차의 속도를 모르는 상황에서 선로의 지리적 정보를 이용하여 열차의 위치와 함께 속도도 구할 수 있다. 특히 고속열차의 경우 열차 속도가 커서 도플러 주파수가 비교적 크고 선로 모양도 직선 또는 선로 회전 반경이 큰 곡선 형태로되어 있어 도플러 주파수와 기하학을 이용한 수식 도출이 가능하다. 다양한 선로 모양 및 기지국 위치에 대하여 위치 추정 수식을 도출하고 시뮬레이션을 통해 도출된 위치 추정 방법의 성능을 구한다. 또한 주파수 측정 오차의 변화에 따른 위치 추정 오차범위도 구한다. 이를 통하여 실제 시스템을 구현하기 위한 검토사항을 도출하여 기술한다.

2. 위치 및 속도 추정 방안

본 논문에서는 제안하는 방법은 두 기지국에서 수신되는 신호의 도플러 주파수를 측정하고 선로 위치정보를 이용하여 열차 특히 고속으로 이동 중인 고속열차의 위치를 빠르고 정확하게 측정하는 방법이다. 도플러 효과를 이용하여 위치를 측정하는 기존 기술에서는 속도 정보를 알고 있다고 가정하고 위치를 추정하나[12] 열차에서 타코미터로 측정하는 속도는 오차가 비교적 크기 때문에 위치 추정에 사용될 경우 마찬가지로 오차가 커진다. 본 연구에서 제안하는 방법에서는 속도를 미지수로 놓고 위치를 먼저 추정한 후 이 값을 가지고 다시 속도를 추정하게 된다.

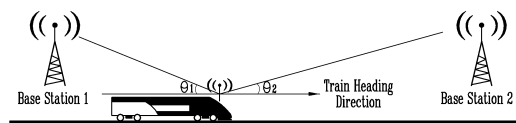


Fig. 1. A train running between two base stations and the angle form train heading direction

2.1 도플러 주파수 측정

Fig. 1과 같이 열차가 2개의 기지국 사이에서 좌에서 우로 진행하고 진행방향이 각각의 기지국과 이루는 각이 θ_1, θ_2 일 때 열차에서 각각의 기지국(1, 2)으로부터 받는 신호 주파수는 다음과 같다.

$$f_1' = \frac{c - v \cos \theta_1}{c} f_c \quad (1)$$

$$f_2' = \frac{c + v \cos \theta_2}{c} f_c \quad (2)$$

여기서 c 는 광속이고, v 는 열차의 속도이며 f_c 는 통신의 캐리어 주파수이다. 측정값과 주어진 값을 이용하면 $v \cos \theta_1$ 과 $v \cos \theta_2$ 를 얻을 수 있다. v 를 알지 못하므로 $\cos \theta_1$ 과 $\cos \theta_2$ 의 정확한 값은 모르나 그 비율은 알 수 있으며 이를 $a : b$ 라 하자. 그러면 $b \cos \theta_1 = a \cos \theta_2$ 가 성립한다.

이후 열차가 이동하는 선로 구간의 특성을 이용하여 위치를 추정한다. 고속철도 선로는 최소회전 반경이 7km로 크며 따라서 직선, 곡선, 직곡선 혼합으로 나눌 수 있다. 다음 절에는 각각의 경우에 대하여 열차의 위치를 구하는 수식에 대하여 기술한다.

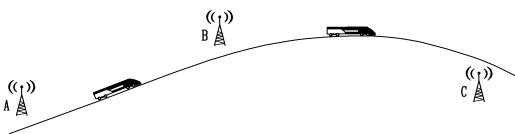


Fig. 2. A train runs on line with different shape (linear or circular)

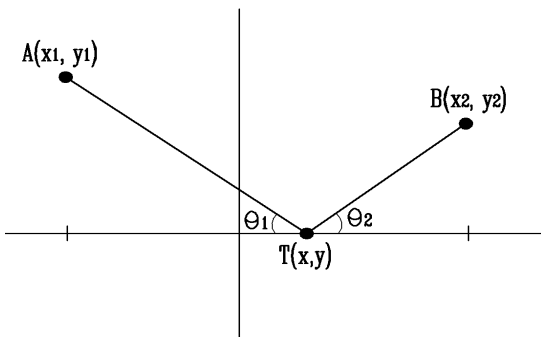


Fig. 3. Coordinate representations of base stations (A and B) and train

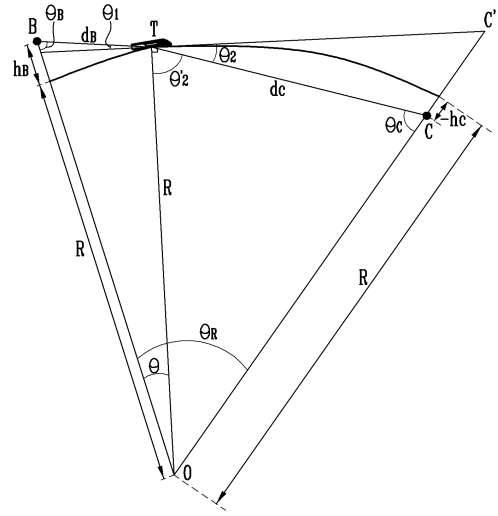


Fig. 4. A train on circular line and the relations between angles and distances

2.2 직선 구간

열차가 직선 구간을 이동할 경우 (Fig. 2에서 기지국 1과 2사이) Fig. 3와 같이 직선 선로를 x 축으로 하고 선로의 중간 지점을 원점으로 하는 좌표평면을 가정하고 기지국과 선로의 상대적인 위치로 기지국의 좌표를 구할 수 있다. 이 경우 열차는 x 축 위를 이동하므로 열차는 $y = 0$ ($x_1 \leq x \leq x_2$) 직선 위의 한 점에 존재한다. 이를 $C(x, 0)$ 라 할 때,

$$\cos \theta_1 = \frac{(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} \quad (3)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{(x_2 - x)}{\sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}} \quad (4)$$

를 얻을 수 있다. $b \cdot \cos \theta_1 = a \cdot \cos \theta_2$ 로부터,

$$\frac{b(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} = \frac{a(x_2 - x)}{\sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}} \quad (5)$$

가 성립하게 되며 $f(x)$ 를

$$f(x) = \left(\frac{b(x - x_1)}{\sqrt{(x - x_1)^2 + y_1^2}} - \frac{a(x_2 - x)}{\sqrt{(x - x_2)^2 + y_2^2}} \right)^2 \quad (6)$$

이라 할 때, 해는

$$\operatorname{argmin}_{x_1 \leq x \leq x_2} f(x) \quad (7)$$

가 된다. 그러므로 $x = x_1$ 에서 출발하여 Δx 씩 x 를 증가시켜가면서 $f(x)$ 가 최소가 되는 점을 찾으면 Δx 의 해상도로 x 를 구할 수 있다.

2.3 곡선 구간

곡선 구간에서는 Fig. 4와 같이 곡선의 중심 O 를 기준으로 하는 원호를 열차가 움직인다고 가정하고 원점에서 지지국 B 를 향하는 직선과 원점에서 열차를 향하는 직선 사이의 θ 로 하고 θ 에 대하여 구한다. 먼저 ΔTOB 에 대하여 cosine 제2 법칙을 이용하면 열차와 지지국 B 와의 직선거리 d_B 는 다음과 같다.

$$d_B = \sqrt{(R+h_B)^2 + R^2 - 2R(R+h_B)\cos\theta} \quad (8)$$

여기서 R 은 곡선 반경이고 h_B 는 선로와 지지국 B 사이의 거리이다. Cosine 제1 법칙을 이용하면 다음 식이 성립한다.

$$R+h_B = d_B \cdot \cos\theta_B + R\cos\theta \quad (9)$$

따라서,

$$\theta_B = \arccos \frac{R+h_B - R\cos\theta}{d_B} \quad (10)$$

가 성립한다. ΔTOB 의 내각의 합은 π 이므로 $\theta_1 = \pi/2 - \theta_B - \theta$ 가 된다. 여기서 d_B 와 θ_B 는 θ 의 함수이므로 θ_1 또한 θ 의 함수로 표현할 수 있다. 즉 $\theta_1 = \gamma_1(\theta)$ 이다.

마찬가지로 ΔTOC 에 대하여 cosine 제2 법칙을 이용하면 열차와 지지국 C 와의 직선거리 d_C 는 다음과 같다.

$$d_C = \sqrt{(R+h_C)^2 + R^2 - 2R(R+h_C)\cos(\theta_R - \theta)} \quad (11)$$

여기서 h_C 는 선로와 지지국 C 사이의 거리이다. Cosine 제1 법칙을 이용하면

$$R - h_C = d_C \cdot \cos\theta_C + R\cos(\theta_R - \theta) \quad (12)$$

$$\theta_C = \arccos \frac{R - h_C - R\cos(\theta_R - \theta)}{d_C} \quad (13)$$

를 구할 수 있다. ΔTOC 에 대한 내각의 합을 고려하면 다음 식을 얻게 된다.

$$\theta_2' = 180^\circ - \theta_C - \theta_R + \theta \quad (14)$$

$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_2' = 90 + \theta_c + \theta_R - \theta = \gamma_2(\theta) \quad (15)$$

따라서 해를 구하는 수식은 다음과 같다.

$$\operatorname{argmin}_{0 \leq \theta \leq \theta_R} (b\cos(\gamma_1(\theta)) - a\cos(\gamma_2(\theta)))^2 \quad (16)$$

여기서 지지국 B 와 C 의 위치는 편의상 B 는 원호의 위에, C 는 원호의 아래에 위치하였다고 가정하였으나 반대의 경우에도 cosine 제1법칙과 제2법칙을 적용하여 θ 에 대한 최적화 수식으로 유도 가능하다.

2.4 직곡선 혼합구간

직곡선 혼합구간에서는 Fig. 5와 같이 직선의 연장선과 원호의 연장선을 가정하고 이후 직선 위에 있는 경우의 해와 곡선 위에 있는 경우의 해를 구한 후 최적값을 선택한다.

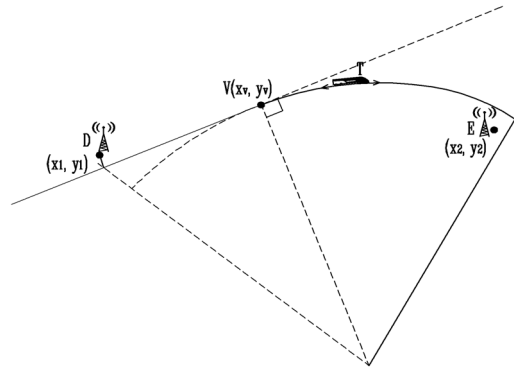


Fig. 5. A train on mixed line of linear and circular line

먼저 열차가 직선 DV위에 있다고 가정하면 \overline{DV} 를 $y = \alpha x + \beta$ 라(선로 정보로 α, β 를 구함)하는 가상의 직선으로 가정할 수 있으며 직선에서 D, E와의 거리 d_D, d_E 는 다음과 같다.

$$d_D = \frac{|\alpha x_1 - y_1 + \beta|}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} \quad (17)$$

$$d_E = \frac{|\alpha x_2 - y_2 + \beta|}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} \quad (18)$$

따라서, 열차의 진행방향과 각 기지국을 향하는 방향 사이의 각 θ_1, θ_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sin\theta_1 &= \frac{d_D}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}} \\ &= \frac{d_D}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (\alpha x + \beta - y_1)^2}} \equiv f_1(x) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\sin\theta_2 = \frac{d_E}{\sqrt{(x-x_2)^2 + (\alpha x + \beta - y_2)^2}} \equiv f_2(x) \quad (20)$$

따라서 $\theta_1 = \arcsin f_1(x), \theta_2 = \arcsin f_2(x)$ 이며 해를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\operatorname{argmin}_{x_1 \leq x \leq x_2} (b \cos \theta_1 - a \cos \theta_2)^2 \quad (21)$$

열차가 곡선 위에 있다고 가정할 경우 앞에서 구한 바와 같이 중심 O와 이를 중심으로 하는 원호를 가정하고 cosine 제1법칙과 제2법칙을 이용하여 해를 구한다. 이때 θ 의 범위는 곡선 시작 부분부터 끝 부분에 해당하는 각이 된다. 즉, 해가 되는 θ 는

$$\theta_D \leq \theta \leq \theta_R (b \cos(\gamma_1(\theta)) - a \cos(\gamma_2(\theta)))^2 \quad (22)$$

가 된다.

그러므로 $\theta = \theta_D$ 에서 출발하여 $\Delta\theta$ 만큼 증가시켜가면서 최솟값을 찾으면 $R \cdot \Delta\theta$ 의 해상도로 위치 추정 가능하다. 직곡선 혼합구간에서는 (21)과 (22)의 해를 비교하여 $(b \cos \theta_1 - a \cos \theta_2)^2$ 이 최소가 되는 지점을 최종 열차 위치 추정값으로 한다. 곡선에서 직선으로 변하는 구간도 마찬가지로의 방법으로 열차 위치를 추정할 수 있

Table 1. Basic parameters used in the simulation

Parameters	Symbol	Value
Train speed	v	300km/h
Carrier frequency	f_c	1.8GHz
Distance between base stations (linear line)	d_{AB}	2km
Angle between base stations (curved line)	$\angle BC$	0.2rad
Curve radius	R	7km

다. 위치를 구하면 θ_1 과 θ_2 를 알 수 있고 식 (1)과 (2)를 이용하여 v 를 구할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 분석

앞에서 도출한 수식을 이용하여 열차 위치를 추정하는 시뮬레이션을 수행한다. Table. 1은 시뮬레이션에서 사용한 열차 및 통신 관련 수치를 정리한 것이다. 기본적인 수치는 한국 고속철도의 열차와 선로 조건을 반영하였으며 통신 규격은 LTE를 가정하여 구하였다. Fig. 1과 식 (1)-(2)에 보인 바와 같이 도플러 주파수는 열차의 이동 방향과 기지국과의 각도 및 열차의 속도에 따라 결정된다. 본 논문에서 제안하는 방식은 선로의 기하학적 특징을 이용하여 열차의 위치를 추정하는 것이므로 열차의 속도보다는 위치에 따른 오차 분포를 살펴볼 필요가 있다. 따라서 시뮬레이션에서는 고정된 속도에서 열차 위치에 따른 추정 오차를 도출하였으며 이 때 열차의 속도는 300km/h(한국고속열차 최고속도)로 고정하였다. 직선 구간과 곡선 구간에 대하여 나누어 수행하였으며 결과는 아래 절에 기술한다.

3.1 직선 구간

열차가 직선 구간을 이동할 때 위치 추정 결과에 대하여 시뮬레이션을 수행한다. Fig. 6은 열차 위치에 따른 위치 추정 오차의 분포를 나타낸 것이다. 제안한 방법을 활용하여 위치 추정을 수행한 결과와 함께 수신 신호 크기를 바탕으로 거리를 추정하고 이를 바탕으로 열차 위치를 추정하는 방법을 적용한 결과를 나타내었다. 제안하는 방법과 비교 방법 모두 기하학적 구조를 이용하여 위치를 추정하는 것이므로 열차의 위치에 따라 오차의 수준이 달라지며 본 시뮬레이션은 이러한 오차의 경향을 살펴보기 위함이다. 수신 신호 크기에 대한 잡음은 최대

수신 신호의 -20dB , 주파수 측정 시 오차는 1Hz 의 랜덤 노이즈를 가정하였다. 기지국 A와 B의 수직 위치는 선로를 기준으로 각각 $-1,000\text{미터}$ 에서 $1,000\text{미터}$ 까지 100미터 단위로 변화시켜가면서 총 $1,000$ 회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

전반적으로 제안한 방법의 성능이 좋으나 기지국 사이의 중간 지점에서는 제안한 방법의 오차가 크다. 반면 신호 크기를 이용한 방법은 특히 기지국 주변에서 오차가 커지는 경향을 보인다. 또한 무선통신에서는 통신 환경에 따라 각 기지국에서 들어오는 신호의 감쇄율에 차이가 있으며 또한 기지국 별로 신호 크기를 조절하므로 두 기지국에서의 수신 신호 크기를 이용하는 방법은 사용하기 어렵다. 대신 신호의 감쇄율을 데이터베이스화하여 사용하는 방법이 있으나[8] 구축비용이 많이 든다는 단점이 있다.

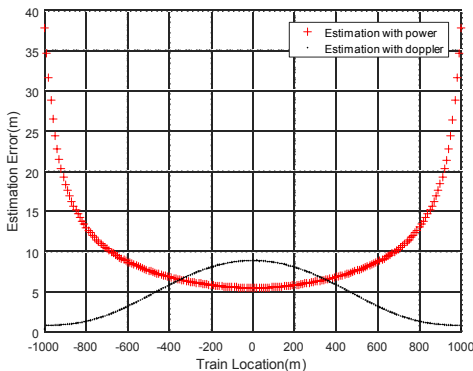


Fig. 6. Estimation error according to the train location for linear line

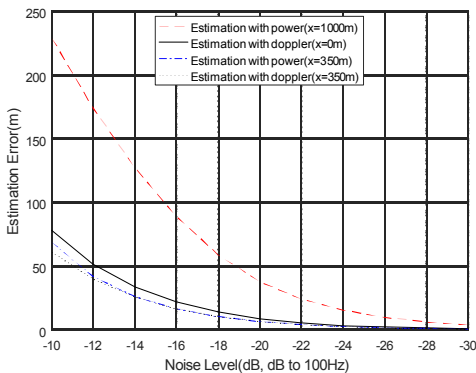


Fig. 7. Estimation error according to the noise level in the received signal power and the doppler frequency for linear line

Fig. 7은 측정 오차의 변화에 따른 위치 추정 오차를 나타낸 것이다. 수신 신호 크기를 이용하는 방법에서는 신호 대 잡음비를 -10dB 에서 -30dB 로 변화시켜가면서 위치 추정 오차를 구하고 도플러 주파수를 이용하는 방법에서는 주파수 측정 오차를 10Hz 에서 0.1Hz 로 변화시켜가면서 오차의 변화를 나타내었다. 이 때 열차의 위치는 위치 추정 오차가 최대가 되는 지점으로 가정하였으며 이에 따라 제안 방안은 중간 지점(0m), 신호 크기를 이용한 방법은 끝 지점(1000m)에 있는 열차를 대상으로 구하였다. 또한 오차 경향 비교를 위해 Fig. 6에서 두 방법의 위치 추정 오차가 동일한 지점인 350m 위치의 열차에 대해서도 각각 오차의 변화 추이를 나타내었다. 이 때, 기지국 A와 B의 수직 위치는 Fig. 6의 시뮬레이션과 동일하며 마찬가지로 $1,000$ 회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

전반적으로 제안하는 방법의 오차 수준이 신호 크기를 이용하는 방법보다 낮다. 그러나 한국형 무선통신 열차제어시스템(KRTCS)에서 제시하는 열차 위치 추정 오차 6.25m 보다 작은 값을 제시하기 위해서는 비교 방안에서는 -28dB 의 신호 대 잡음 수준이 필요하며 제안 방법으로는 0.7Hz 의 주파수 오차 수준이 필요하므로 두 경우 모두 높은 기술적 수준이 요구된다. 아울러 Fig. 6에서 두 방법의 오차 수준이 동일한 지점인 350m 에서는 잡음 수준이나 주파수 측정 오차 수준에 따라 위치 추정 오차의 변화 추이도 유사하나 제안하는 방법이 측정 오차가 큰 환경에서도 위치 추정 오차가 작음을 확인할 수 있으며 이는 보다 강한 추정이 가능함을 의미한다.

3.2 곡선 구간

Fig. 8는 곡선 구간에서 열차 위치에 따른 위치 추정 오차의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6과 마찬가지로 오차가 곡선 구간에서 열차의 위치에 따라 얼마나 달라지는지 살펴보기 위한 시뮬레이션이며 Fig. 4의 도면에서 θ 가 0 rad 에서 0.2 rad 까지 변화할 때의 열차 위치를 추정하였다. 신호 크기 및 주파수 측정 시의 오차와 기지국의 위치 변화, 몬테카를로 시뮬레이션 수행 횟수는 앞에서의 시뮬레이션과 동일하다.

마찬가지로 제안하는 방법의 전반적인 오차 수준이 낮다. 또한 두 가지 방법 모두 직선 구간보다는 곡선 구간에서의 오차 수준이 낮는데 이는 신호 크기 오차와 도플러 주파수 측정 오차가 위치 추정 오차에 영향을 끼치

는 기하학적인 특성에 기인한다. 제안하는 방법의 오차 경향을 볼 때 오차가 $\theta = 0.1$ 인 선에 대하여 대칭인 모습이 아니라 $\theta > 0.1$ 에서 오차가 더 커지는 현상을 나타낸다. 이는 곡선 구간에서의 위치 추정하는 과정에서 (Fig. 4 및 식 (8)-(16)) θ 를 기지국 B를 바라보는 각도를 0으로 설정하고 식을 도출하였기 때문이며 삼각함수 계산 등에서 오차가 늘어나기 때문으로 사료된다. 이를 보완하기 위해서는 반대 방향으로 식을 수립하고 해를 구한 후 이전 해와 비교하여 최적의 값을 도출하여야 한다.

Fig. 9는 곡선 구간에서 측정 오차의 변화에 따른 위치 추정 오차를 나타낸 것이다. 기지국 A와 B의 수직 위치는 Fig. 8의 시뮬레이션과 동일하며 나머지 파라미터는 Fig. 7의 시뮬레이션과 동일하다. 다만 여기에서는 최대 오차를 나타내는 지점을 신호 크기를 이용하는 방법

의 경우 0.004rad, 제안 방식의 경우 0.1rad로 가정하였는데 제안 방식의 경우 반대 방향으로 식을 수립할 경우 Fig. 8에서 0.1~0.2rad의 오차 수준을 0~0.1rad과 동일하게 얻을 수 있기 때문이다. 이와 함께 두 방식의 오차 수준이 동일한 지점인 0.07rad에 대해서도 측정 오차의 변화에 따른 오차 수준을 구하여 Fig. 9에 표시하였다. 두 방식 모두 직선 구간보다 오차 수준이 낮으며 이 경우 제안하는 방식에서는 8Hz의 주파수 오차에서도 한국형 무선통신 열차제어시스템(KRTCS)에서 제시하는 열차 추정 오차보다 작은 값을 제시할 수 있다. 동일한 오차를 나타내는 지점($\theta = 0.07rad$)에서는 유사한 경향을 나타내나 Fig. 7에서 보인 바와 같이 제안하는 방식이 측정 오차가 큰 환경(-10dB, 10Hz)에서 좀더 강인한 추정 성능을 나타냄을 확인할 수 있다.

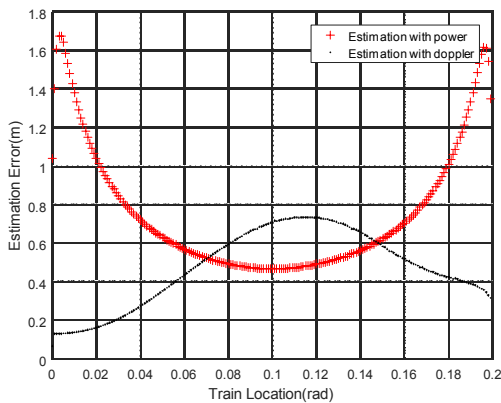


Fig. 8. Estimation error according to the train location for circular line

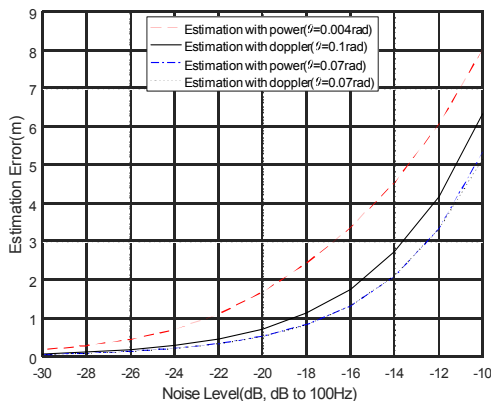


Fig. 9. Estimation error according to the noise level in the received signal power and the doppler frequency for circular line

5. 결론

두 기지국에서 수신되는 신호의 도플러 주파수와 선로의 지리적 정보를 이용하여 고속 열차의 위치를 추정하는 수식을 도출하고 시뮬레이션을 통하여 우수성을 검증하였다. 도플러 주파수로 열차 진행방향과 두 기지국과의 상대적인 각도의 비율을 알 수 있는데 선로의 지리적 정보를 이용하여 열차 위치와 함께 속도를 구할 수 있다. 또한 현 열차제어시스템에서 제시하는 성능과 동일한 열차 위치 추정 성능을 나타내기 위한 주파수 추정 오차 수준을 분석함으로써 실제 구현 시 참고가 될 수 있도록 하였다. 실제 노선에서는 선로 모양이 다양하므로 이를 잘 모델링하여 본 방법을 적용할 수 있는 지 확인하는 것은 추후 연구해야 할 부분이다. 이외에도 곡선 구간에서 오차가 더 줄어들며 또한 오차의 분포가 대칭이지 않음을 수치적으로 분석하고 보완 알고리즘을 도출하는 것과 오차가 커지는 구간(중간 부분)에서 다른 알고리즘과 융합하여 오차를 줄일 수 있는 방안을 도출하는 것도 계속 진행해야 할 과제이다.

References

[1] S. H. Hong, "The recent trends and prospects of the train control system," *the Magazine of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 34. no. 11, pp. 18-28, 2007.

- [2] S. Y. Huh, et. al, *General description of blocks*, 4th ed., Korea rail network authority, 2012.
- [3] S. Oh, et. al., "Headway calculation and train control algorithm for performance improvement in radio based train control system," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 10, pp. 6949-6958, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.10.6949>
- [4] Y. K. Yoon et. al., "The current status of radio based train control system development for the metropolitan railway," *Railway Journal*, vol. 17, no. 2, pp. 64-69, 2014.
- [5] Y. K. Kim, "The trends of the automation of the train control system," *Magazine of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 34, no. 11, pp. 75-83, 2007.
- [6] Shift2Rail, Shift2Rail multi-annual action plan, Horizon 2020 European Union, Brussels, Nov. 2015.
- [7] A. Acharya, S. Sadhu, T.K. Ghoshal, "Train localization and parting detection using data fusion," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, no. 1, pp. 75-84, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.03.010>
- [8] B. T. Kim, *Automatic train control system and control method using wireless communication*, Korean Patent 10-0806267, 2008.
- [9] M. Hellebrandt, R. Mathar, M. Scheibnebogen, "Estimating position and velocity of mobiles in a cellular radio network," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 46, no. 1, pp. 65-71, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1109/25.554738>
- [10] T.S. Rappaport, J.H. Reed, B. D. Woerner, "Position location using wireless communication on highways of the future," *IEEE Communications Magazine*, vol. 34, no. 10, pp. 33-41, 1996.
DOI: <https://doi.org/10.1109/35.544321>
- [11] S.M. Moon and H.K. Kim, "A precise location tracking system with smart context-awareness based-on doppler radar sensors", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 16, no. 12, pp. 1159-1166, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2010.16.12.1159>
- [12] C.D. Mcgillum, T. S. Rappaport, "A beacon navigation method for autonomous vehicles," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 132-139, 1989.
DOI: <https://doi.org/10.1109/25.45466>

김 정 태(Jungtai Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 공과대학 원 전기공학부 (공학석사)
- 2011년 8월 : KAIST 공과대학원 전기및전자공학과 (공학박사)
- 1999년 2월 ~ 2012년 7월 : LIG 넥스원 수석연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

열차제어, 신호처리, 임베디드시스템