

무선 측위 시스템의 비가시선 영향 완화를 위한 WLS 추정기의 가중치 결정

정회원 정양석*, 윤대희*, 이충용*

Weights Decision for a WLS Estimator Mitigating NLOS Effects in Wireless Positioning Systems

Yangseok Jeong*, Dae Hee Youn*, Chungyong Lee* *Regular Members*

요약

기지국과 단말기간 무선 신호의 직접 경로가 차단되어 직접 경로보다 먼 거리를 진행하는 비가시선 전파는 전파 지연 시간 측정을 기반으로 하는 무선 측위 시스템에서 매우 큰 측위 오차 요인으로 작용한다. 측정된 지연 시간들로부터 단말기의 위치를 추정하는 기존의 LS 방법은 이러한 비가시선 오차를 극복하지 못하므로 본 논문에서는 파라미터 측정 오차에 가중치를 달리하는 WLS 방법을 제안한다. 제안된 WLS 방법에서는 비가시선 오차에 반비례하는 상관 관계를 갖는 지연 확산을 이용하여 구성된 가중치 행렬을 사용함으로써 비가시선 영향을 효과적으로 완화한다. 모의 실험에서 가시선 확률 0.6을 고려한 경우 100m 오차 CDF 값을 측위 성능 기준으로 보았을 때 LS 방법이 45.5%, 기존의 Caffery 방법이 68.45%, 제안한 방법이 75.55%으로 제안한 방법이 기존의 방법에 비해 향상된 성능을 가짐을 보였다.

ABSTRACT

The NLOS(Non Line Of Sight) propagation, derived from blocking of direct path between a mobile station and a base station, always manifests a remarkable bias when a time parameter is estimated in time-based positioning system. In this paper, we propose a new WLS(Weighted Least Square) method using the weight matrix designed to mitigate the NLOS effects. The weight matrix is derived from the measured delay spread which is inversely proportional to NLOS error. Numerical experiments show that the proposed method has a robust performance in the overall environments.

1. 서론

무선 통신망의 비가시선 전파 환경에서는 기지국과 단말기간 무선 신호의 직접 경로가 차단되어 전파가 직접 경로보다 먼 거리를 진행하므로, 측정된 전파 지연 시간은 실제 지연 시간 보다 큰 바이어스 오차를 포함한다. 따라서 비가시선 전파는 무선 통신망에서 전파 지연 시간 측정을 기반으로 하는 무선 측위 시스템의 측위 정확도를 제한하는 원천

적인 오차 요인으로 작용한다^{[1][2][3]}.

시간 기반 측위 방법들을 위해 과거 제안되었던 대표적인 통계적 측위 알고리즘들은 측정된 TOA(Time of Arrival) 또는 TDOA(Time Difference of Arrival) 파라미터로부터 선형 또는 비선형 LS(Least Square) 추정 기법을 적용하여 단말기의 위치를 계산한다^{[4][5]}. 이 추정 기법은 높은 정확도를 얻기 위해 단말기와 기지국들 사이에 가시 또는 직접 경로의 보장을 반드시 요구하고, 측정 오차의 평

* 연세대학교 전기전자공학과 미디어통신신호처리연구실(bonjure@mcs.p.yonsei.ac.kr)

논문번호 : 020371-0826, 접수일자 : 2002년 9월 9일

본 논문은 한국통신학회에서 주최한 제 27차 학회 논문집에 게재되었습니다.

균을 0으로 가정하고 제안되었다. 그러나 실제 셀룰러 망에서는 비록 단말기가 소속되어 있는 기지국과 단말기가 가시 경로를 보장한다고 하더라도, 동시에 측위에 필요한 주변 기지국들과도 가시 경로가 보장될 수 있는 환경은 그리 많지 않다. 따라서 대부분의 측정된 TOA 값들에는 비가시선 오차가 반영되어 있게 되므로 이를 이용한 LS 위치 추정은 단말기의 실제 위치로부터 오차를 가진 추정 결과를 가져온다.

기준에 비가시선 오차의 영향을 줄이기 위해 일정 시간 동안 관측한 측정 데이터들로부터 N차 다항 근사화를 이용해 가시선을 재구성하고자 하는 시도가 있었으나^[3], 지연 시간 측정기의 최대 측정 오차 정보를 미리 알고 있어야만 하며 관측 구간 내에 반드시 한번은 가시선 구간이 나타나야 가시선 재구성이 가능한 단점이 있다. 또한 Caffery는 [6]에서 측정치의 비가시선 전파에 작은 가중치를 주는 WLS(Weighted Least Square)방법을 제안하였으나, 비가시선 오차의 크기에 상관없이 동일한 가중치를 사용하여 WLS의 최적 성능을 얻지 못했다. 따라서 본 논문에서는 이러한 WLS 방법의 가중치를 비가시선 오차의 크기에 반비례하는 값을 사용함으로써 비가시선 전파의 영향을 효과적으로 완화하는 방법을 제안한다.

II. WLS 위치 추정 알고리즘

1. 시간 파라미터 측정 모델

i번째 기지국과 단말기 사이의 전파 지연 시간 τ_i 는 기지국으로부터 동일 거리가 그리는 원주로 표현할 수 있고 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\tau_i = d_i(\mathbf{x}) / c \tag{1}$$

여기서 c 는 전파의 속도를 의미하며, i번째 기지국의 위치 $\mathbf{x}_i = [x_i \ y_i]^T$ 와 추정하고자 하는 단말기의 위치 $\mathbf{x} = [x \ y]^T$ 사이의 거리 $d_i(\mathbf{x})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$d_i(\mathbf{x}) = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}\| = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \tag{2}$$

TOA 방법에서는 식(2)가 그리는 원주들의 교점에 단말기가 위치한다.

일반적으로 i번째 기지국과 단말기에 대하여 잡음

환경에서 측정된 시간 파라미터 r_i 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_i = f_i(\mathbf{x}) + n_i, \quad i = 1, \dots, M \tag{3}$$

여기서 n_i 는 측정 오차 또는 측정 잡음, M 은 측정 기지국의 수를 의미한다. $f_i(\mathbf{x})$ 는 추정하고자 하는 단말기의 위치 \mathbf{x} 의 정보를 갖고 있는 측정 파라미터이다. 식(3)을 열벡터 형태로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있으며,

$$\mathbf{r} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{n} \tag{4}$$

$\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_M]^T \tag{5}$$

2. 위치 추정 방법

잡음이 섞인 측정치 집합으로부터 원하는 추정치를 얻는 가장 일반적인 방법이 바로 LS(Least Square) 방법이다^[7]. LS 방법은 측정치와 파라미터 모델 사이의 차이의 제곱의 합을 최소화하는 추정치를 선택한다. WLS(Weighted Least Square) 방법은 이러한 LS 방법을 측정치의 정확도에 따라 가중치를 적용하는 형태로 확장한 것으로 다음과 같은 2차 비용함수를 최소화하는 \mathbf{x} 를 추정한다^[8].

$$\epsilon(\mathbf{x}) = [\mathbf{r} - \mathbf{f}(\mathbf{x})]^T \mathbf{W} [\mathbf{r} - \mathbf{f}(\mathbf{x})] \tag{6}$$

LS 방법은 측정 잡음 벡터가 평균이 0이고 동일한 분산을 가지는 가우시안 분포일 때 ML(Maximum Likelihood) 추정 성능과 동일하다. 만약 측정 잡음의 분산들이 동일하지 않을 경우, \mathbf{N} 을 측정 잡음의 공분산 행렬으로 가정했을 때, $\mathbf{W} = \mathbf{N}^{-1}$ 인 WLS 방법이 ML 추정 성능을 보인다. 측정 잡음이 가우시안으로 가정될 수 없을 경우에도 WLS 방법은 측정치의 정확성의 신뢰도에 따라 가중치 행렬 \mathbf{W} 를 적당히 선택하면 \mathbf{x} 의 효과적인 추정기로서 사용할 수 있다.

WLS 추정기는 선형 모델에 대하여 간단한 의사역행렬(pseudo inverse)형태의 closed form으로 해가 존재한다. 그러나 식(1)과 같은 비선형 모델에 대해서는 비용 함수를 최소화하는 미지수 벡터 \mathbf{x} 를 찾기 위해서 비선형 함수 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 를 적당한 기준점 \mathbf{x}_0 에서 Taylor series expansion을 이용해 다음과

같이 1차 미분 성분까지만 근사하여 선형화 한다 [4][5].

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) \approx \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{G}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (7)$$

여기서 행렬 \mathbf{G} 는 행렬 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 의 Jacobian 행렬이며, 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_p} |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_M}{\partial x_1} |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} & \cdots & \frac{\partial f_M}{\partial x_p} |_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

선형 WLS 해를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} [\mathbf{r} - \mathbf{f}(\mathbf{x}_0)] \quad (9)$$

이와 같은 Taylor series에 의한 접근 방법은 선형화된 함수 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{G}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ 가 정확하게 비선형 함수 $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ 를 근사화하지 못했을 때 오차가 생긴다. 이러한 근사화 오차를 최소화하기 위해서는 가능한 실제 단말기 위치 \mathbf{x} 에 가까운 기준 위치 \mathbf{x}_0 가 필요하다.

3. Caffery의 WLS 추정기의 가중치 결정 방법

Caffery는 [6]에서 앞 절에서 설명한 WLS 방법에서 사용하는 가중치 행렬 \mathbf{W} 를 비가시선 전파에 의한 바이어스를 고려하여 설정하여 비가시선 오차의 영향을 최소화하는 방법을 제안하였다. 만약 측정치가 비가시선 전파를 포함한 결과로 판명되면 비가시선 오차의 크기에 상관없이 임의의 작은 가중치를, 가시선 전파로 판명되면 1의 가중치를 주는 WLS 방법을 사용한다. 그러나 이 경우 반드시 1개의 기지국 이상의 가시선이 보장되어야만 비가시선의 영향을 완화시킬 수 있다^[6]. 또한 비가시선 기지국과 가시선 기지국을 잘못 판별하게 되면 측위 성능 저하가 발생하므로 비가시선과 가시선의 정확한 판단 과정이 필요하다.

III. 제안하는 WLS 방법의 가중치 결정 방법

1. 지연확산과 평균초과지연과의 관계

일반적으로 지연 확산은 다중 경로 신호의 지연 폭에 대한 척도를 볼 수 있는데, 같은 기지국에 대

하여 다음과 같이 RMS(Root Mean Square)값으로 구할 수 있다.

$$\hat{\tau}_{rms,j} = \sqrt{\frac{\sum_i P_{i,j} (\tau_{i,j} - \tau_{m,j})^2}{\sum_i P_{i,j}}} \quad (10)$$

여기서 $\tau_{i,j}$ 는 기준 시간에 대한 i 번째 다중 경로 신호의 상대적 지연을 의미하는 초과 지연이며, $P_{i,j}$ 는 그에 상응하는 전력 성분이다. $\tau_{m,j}$ 은 평균 초과 지연을 의미하며 다음과 같은 수식으로 정의한다.

$$\tau_{m,j} = \frac{\sum_i (P_{i,j} \cdot \tau_{i,j})}{\sum_i P_{i,j}} \quad (11)$$

만약 초과 지연의 기준 시간을 직접 경로 신호의 지연 시간으로 한다면 식(11)으로부터 구해지는 평균 초과 지연은 비가시선 전파에 의한 비가시선 바이어스의 양에 해당한다. 실제로 직접 경로 신호의 지연시간은 알 수 없으므로, 직접 경로 신호의 지연 시간을 기준으로 하는 평균 초과 지연 값을 구할 수 없다. 그러나, 지연 확산은 다중 경로 신호들의 지연폭을 의미하므로, 어느 시간을 기준으로 하더라도 식(11)을 구하여 식(10)에 대입하면 그 크기에 변함이 없이 구할 수 있다.

Cox와 Leck은 New York 중심부에서 측정한 데이터를 토대로 지연 확산과 직접 경로 지연을 기준으로 한 평균 초과 지연이 평균적으로 1:1의 비율을 가짐을 보고하였다^[9]. 모토롤라에서 제시한 실측 데이터에 따르면 교외지역과 부도심에서는 2:1, 도심에 대해서는 1:1부터 2:1사이의 값을 갖는다^[10]. 에릭슨에서 제시한 실측 데이터에 따르면 urban 환경에 대해서는 1:1 비율을 만족한다^[11]. 이와 같은 실측 데이터는 지연 확산과 직접 경로 지연 기준 평균 초과 지연, 즉 비가시선 바이어스는 비례관계의 상관성을 갖고 있음을 알 수 있다.

2. 지연확산을 이용한 가중치의 결정

일반적으로 비가시선 전파 환경에서는 다중 경로 신호들 중 상대적으로 전력이 큰 신호가 존재하지 않는다. 따라서 전파 송출 시간을 기준으로 correlation방법을 사용하여 TOA를 추정하면 식(11)와 같이 전파 송출 시간에 지연 시간과 비가시선 오차가 포함된 평균 초과 지연으로 추정된다.

앞 절에서 살펴본 바와 같이 직접 경로 지연 기준 평균 초과 지연, 즉 비가시선 환경에서 비가시선 바이어스의 양에 해당하는 값은 지연 확산에 비례한다. 따라서, 비가시선 전파 환경에서 TOA 측정시 지연 확산을 동시에 추정하면, TOA 추정의 정확도를 알 수 있다. 즉 추정된 지연 확산이 클 경우 평균 초과 지연이 크다는 의미이고, 비가시선 전파일 확률이 매우 높아 TOA 추정 오차가 매우 크다는 의미가 된다. 따라서 TOA 측정의 정확도는 지연 확산에 반비례하므로 가중치 행렬을

$$W = \text{diag}\{\hat{\tau}_{rms,1}, \hat{\tau}_{rms,2}, \dots, \hat{\tau}_{rms,M}\}^{-1} \quad (12)$$

로 설정하여 WLS 방법에 사용한다. 이 방법은 Caffery가 제안한 방법에 비해 W를 비가시선 바이어스의 크기에 반비례해서 사용함으로써 향상된 성능을 얻을 수 있고, 가시선 기지국이 존재하지 않아도 동일한 가중치를 설정한 경우보다 향상된 성능을 보이게 된다.

IV. 모의 실험

1. 모의 실험 환경

GSM 표준화 기구인 T1P1.5에서 제시한 무선 측위 시스템 평가를 위한 무선 채널 모델^[2] 중에서 비가시선 전파가 가장 잘 일어나는 UrbanA 환경을 고려하여, 비가시선 영향 완화 방법들의 성능을 모의 실험 하였다. 가시선 전파를 확률적으로 고려하기 위해 소속 기지국에 대해서는 1, 0.8, 0.6의 세 가지 확률을 갖고 나머지 기지국은 0.4와 0.2로 고정하였다. 가시선/비가시선 환경 판별은 정확하다고 가정하고, 가시선인 경우 지연 시간 추정은 시간적으로 가장 먼저 수신되는 첫 번째 경로의 지연시간을 추정하게 되며, 비가시선인 경우 평균 초과 지연을 추정한다. 지연 시간 측정기 오차는 평균이 0이고 분산이 100 m^2 인 가우시안 분포를 갖는다. 비가시선 전파에 의한 거리 추정 바이어스는 각 환경과 단말기가 발생한 위치에 따라 다르게 나타나는다. 측위를 위한 측정 파라미터로는 TOA를 사용하였으며, 위치 계산 알고리즘은 Taylor series 로 선형화한 후 LS 추정 방법을 적용하는 측위 방법을 기본적인 비교 대상으로 하였다. 비가시선에 의한 영향의 완화 성능을 분석하기 위한 실험이므로, 선형화 과정에서 필요한 초기 좌표는 알고리즘의 발산의 방지 및 반복 수해 과정의 생략을 위하여 실제 발

생한 단말기의 좌표에 분산 10m^2 의 분포를 가우시안 잡음을 첨가하여 사용하였다. 비가시선 영향의 완화를 위해 기준에 제시된 Caffery WLS 추정 방법과 지연확산을 이용하는 제안된 WLS 추정 방법의 성능을 측위 오차의 CDF를 기준으로 분석하였다.

2. 모의 실험 결과

소속 기지국의 가시선 확률 변화에 따라 제안된 방법의 성능을 모의 실험 하였다. 소속 기지국의 가시선 확률이 1일 때와 0.8, 0.6일 때 기지국 3개를 이용한 측위 성능결과를 그림 1~그림 3에 보였고, 표 1에는 각 측위 방법의 100m 오차와 300m 오차 기준 CDF 값을 보였다.

비가시선 영향 완화를 위해 제안된 방법들이 이를 사용하지 않았을 때, 즉 TOA LS를 사용한 경우보다 측위 오차를 매우 많이 줄이고 있다. 첫번째 기지국이 가시선일 확률이 1일 때 그림 1을 보면 제안된 지연확산을 이용한 WLS 방법이 Caffery가 제안한 방법보다 매우 뛰어난 성능을 보이지 않지만, 가시선 확률이 떨어지면서 그림 2와 그림3에서 알 수 있듯이 Caffery 방법의 성능이 상대적으로 저하됨을 알 수 있다. 실제 무선 측위를 수행하기 위한 환경에서 반드시 한 개의 기지국이 가시선일 확률이 1일 경우는 많지 않으므로, 표 1에서 가시선 확률 0.6을 고려한 경우 100m 오차기준 CDF 값을 보면 LS 방법이 45.50%, 기존의 Caffery 방법이 68.45%, 제안한 방법이 75.55%으로 제안한 방법이 기존의 방법에 비해 가시선 확률이 낮은 환경일 수록 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

비가시선 전파는 CDMA 망을 이용한 무선 측위 시스템에서 매우 큰 오차요인으로 작용한다. 이를 해결하기 위해 Caffery가 WLS 추정기를 이용하는 것으로 비가시선 측정치에 가중치를 낮게 주는 방법을 제안하였으나, 비가시선 오차 정도에 상관없이 낮은 값을 사용함으로써 WLS 추정기의 최적 성능을 가져오지 못했다. 본 논문에서는 이러한 WLS 추정기를 위해 지연 확산치들의 역수를 이용한 가중치 행렬을 사용함으로써 Caffery가 제안한 비가시선 영향 완화를 위한 WLS 위치 추정 성능을 더욱 향상시켰다. 다양한 모의 실험을 통하여, 기존의 LS 방법이나 Caffery의 WLS 방법에 비하여 향상된 비

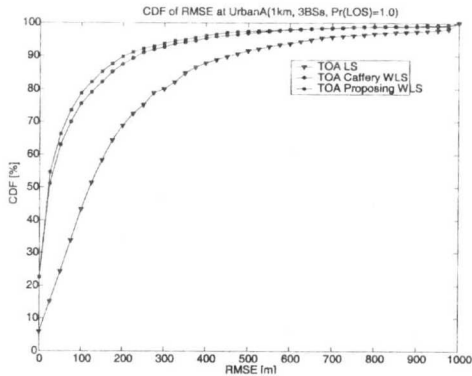


그림 1. 무선 측위 오차 CDF(환경: urbanA, 셀반경: 1km, 사용 기지국 수: 3, 가시선 확률: 1.0, —▼—: LS 추정 방법, —●—: Caffery의 WLS 방법, —■—: 제안한 WLS 방법)

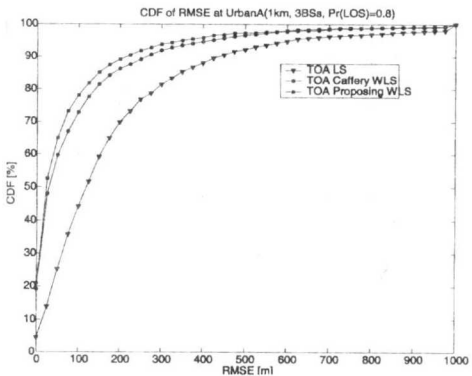


그림 2. 무선 측위 오차 CDF(환경: urbanA, 셀반경: 1km, 사용 기지국 수: 3, 가시선 확률: 0.8, —▼—: LS 추정 방법, —●—: Caffery의 WLS 방법, —■—: 제안한 WLS 방법)

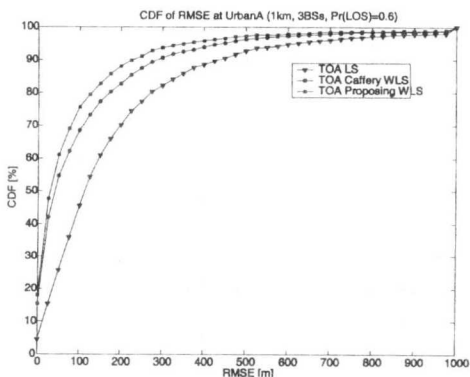


그림 3. 무선 측위 오차 CDF(환경: urbanA, 셀반경: 1km, 사용 기지국 수: 3, 가시선 확률: 0.6, —▼—: LS 추정 방법, —●—: Caffery의 WLS 방법, —■—: 제안한 WLS 방법)

가시선 영향의 완화 성능을 보였다. 특히 실제 상황에서 많이 발생하게 될 가시선 확률이 1이 아닌 경우에 더욱 향상된 성능을 확인할 수 있었다.

표 1. 기준 오차에 대한 CDF (단위: [%], 셀반경: 1km, 사용 기지국 수: 3)

가시선 확률	LS		Caffery의 WLS		제안된 WLS	
	100m 오차	300m 오차	100m 오차	300m 오차	100m 오차	300m 오차
1	43.35	80.05	75.50	92.60	78.75	93.65
0.8	44.25	81.40	72.80	91.85	78.10	93.75
0.6	45.50	82.10	68.45	90.70	75.55	93.70

참고 문헌

- [1] James J. Caffery, Jr. and Gordon L. Stüber, "Overview of Radiolocation in CDMA Cellular Systems," *IEEE Communications Magazine*, April 1998.
- [2] M. Silventoinen and T. Rantalainen. "Mobile Station Emergency Locating in GSM," *IEEE Int. Conference on Personal Wireless Communication*, pp. 232-238, 1996.
- [3] M. Wylie and J.Holtzmann. "The Non-Line of Sight Problem in Mobile Location estimation," *IEEE International Conference on Universal Personal Communications*, pp. 827-831, 1996.
- [4] W. H. Foy, "Position-Location Solutions by Taylor-series Estimation," *IEEE Trans. on AES*, Vol. AES-12, pp. 187-193, March, 1976 .
- [5] D. Torrieri, "Statistical Theory of Passive Location Systems," *IEEE Trans. on AES*, Vol. AES-20, pp. 183-197, March 1984.
- [6] Caffery, J.J.; Stuber, G.L., "Radio location in urban CDMA microcells," *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol. 2, pp. 858-962, 1995.
- [7] Steven M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Volume I Estimation Theory*, Prentice Hall, 1993.
- [8] Havixh Koorapaty, Hans Grubeck, and Mats Cedervall, "Effects of Biased Measurement Errors on Accuracy of Position Location

