

# RSSI와 TDOF의 비교

김학용

**요약** — 본 문서에서는 실시간 위치 추적 시스템(RTLS)에서 위치 추정을 위해 사용하는 거리 측정 기술(ranging technology)인 RSSI, TOF, TDOF 방식에 대해 각각의 특징을 살펴보도록 할 것이다.

## 1. RTLS 시스템 개요

RTLS(Real-Time Locating System) 시스템은 실시간으로 사물 혹은 사람의 위치를 찾아주는 시스템을 말한다. 1999년 미국의 FCC가 무선 E-911(Enhanced-911) 규칙을 제정하면서 관심을 끌기 시작했다. 현재 시장에 나와 있는 대부분의 RTLS 시스템은 기술적으로 2.45GHz의 주파수 대역의 무선 통신 기술을 사용하고 있는 능동형 RFID 시스템에 해당한다.

이러한 시스템에서 위치를 결정하는데 사용되는 방법은 두 가지가 있으며, 삼각법(triangulation)과 핑거프린팅(fingerprinting) 방식이 그것이다. 여러 가지 이유로 학교에서는 핑거프린팅에 대한 방법이 주로 연구되고 있으나, 운용 및 사용의 편리성 등의 이유로 실제 위치추적 솔루션에는 삼각법이 주로 사용되고 있다.

삼각법에 의한 위치 추정은 거리 측정(ranging)과 삼각법 연산의 두 단계로 구성된다. 이 중에서 삼각법 연산은 거리값만 주어지면 알고리즘적으로 구현되기 때문에 별다른 이슈가 없다. 반면에, 거리 측정에는 다양한 특성을 갖는 방식들이 존재하기 때문에, 위치 추적 시스템을 개발하거나 사용하는데 있어서는 다양한 거리 측정 방식에 대해 잘 이해하고 있는 것이 중요하다.

대표적인 거리 측정 방식에는 수신 신호의 세기를 이용하는 RSSI (Received Signal Strength Intensity) 방식과 신호가 장치 사이에서 전달되는데 걸린 시간을 이용하는 TOF (Time of Flight) 방식, 그리고 전파의 비행시간의 차이를 이용하는 TDOF (Time Difference of Flight) 방식, 전파의 도착 각도를 이용하는 AOA (Angle of Arrival) 방식, 그리고 전파의 도착 위상을 이용하는 POA (Phase of Arrival) 방식 등이 있다. 이 중에서 RSSI 방식과 TOA (Time of Arrival) 및 TDOA (Time Difference of Arrival) 라고도 불리는 TOF 및 TDOF 방식이 거리 측정에 주로 이용된다. 따라서, 본 문서에서는 RSSI, TOF, TDOF 방식에 대해서만 설명할 것이다.

## 2. RSSI (Received Signal Strength Intensity/Indication) 방식

RSSI를 이용한 거리 측정 방법은 AP(Access Point)에서 수신된 무선이동장치 혹은 태그의 신호 세기를 측정하여 이용하는 것으로, 태그와 AP 사이에서의 신호의 파워 손실 혹은 경로 손실(path loss)을 신호가 이동한 거리와 연결시키는 방식이다. 신호의 경로 손실과 거리와의 관계는 식 (1)에

보이는 Friis의 공식에 의해 설명된다.

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{dBm}) \quad (1)$$

이 식은

$$L = A \cdot \log_{10}(d) + B \quad (\text{dBm}) \quad (2)$$

과 같이 표현되기도 한다. 이때, A와 B는 시스템이 사용되는 환경 및 사용 주파수 대역에 따라 결정된다.

RSSI를 사용한 위치 추정의 정확성은 RSSI 측정의 정확성과 실제 이동 장치가 있는 환경에 따라 달라진다. 즉, 환경에 따라 측정된 RSSI 값이 안정적이지 않을 수 있다는 것이다. 예를 들면, 태그 및 AP의 안테나 방향성, 송신기와 수신기 사이에 존재하는 장애물 (예를 들면, 벽, 기둥, 가구, 사람 등), 사무실의 칸막이나 벽의 재질은 신호의 경로 손실에 커다란 영향을 미친다. 또한, 식 (1)에서 보이는 것처럼 신호의 경로 손실과 거리와의 관계는 로그 관계가 존재하기 때문에, 측정되는 거리가 멀면 멀수록 경로 손실의 변화가 위치 추정 정확도에 미치는 영향은 커진다. 따라서, RSSI를 이용한 위치 추정은 상대적으로 낮은 위치 추정 정확성 및 낮은 위치 추정 안정성을 제공한다. 그러나, RSSI를 이용하기 위한 장치의 구조가 간단하고 기존의 근거리 무선 통신 기술들이 RSSI 정보를 이용할 수 있는 구조를 취하고 있기 때문에 위치 추적과 관련된 분야에서 광범위하게 사용되고 있다.

휴대폰의 액정에 수신 신호 강도를 나타내기 위해 표시하는 안테나 모양을 RSSI Bar라고 부른다. 일반적으로 휴대폰에서 수신되는 전력은 보통  $-108\text{dBm}$ 에서  $-20\text{dBm}$  사이에서 움직이게 되며, 각 단말기 제조사마다 수신 전력의 세기를 나타내는 세로 막대기의 개수는 조금씩 다르다. 이따금, 지하나 외진 곳에서 휴대폰에 표시된 안테나의 세로 막대기 수는 많이 뜨지만 통화가 잘 되지 않는 경우가 있는데, 이것은 수신 신호의 크기는 크지만 원래 신호에 섞이는 노이즈들, 예를 들면 다중경로에 의한 신호나 다른 핸드폰의 강한 송신신호 등의 크기도 상대적으로 크기 때문이다. 무선랜을 비롯하여  $2.45\text{GHz}$  대역에서 사용되는 무선 통신 기술들도 대부분  $-100\text{dBm}$  전후의 수신 감도를 요구한다. 그러나,  $-100\text{dBm}$  정도의 낮은 감도는 신호를 수신할 수 있음을 나타내는 것에 불과하며, 이 영역에서 수신된 RSSI 값은 편차가 심하기 때문에 실제 위치 추정을 위해서는 사용할 수 없는 경우가 많다.

따라서, RSSI를 이용한 위치추적 시스템에서는 RSSI의 전파 모델을 찾아내는 것이 중요하다. 즉, 식 (2)의 계수인 A와 B를 어떻게 결정하느냐에 따라서 위치추적 시스템의 성능이 결정된다고 할 수 있다. 경우에 따라서는 식 (2)와 달리

$$L = A \cdot \log_{10}(d) + B \cdot d + C \quad (\text{dBm})$$

혹은

$$L = A \cdot d^3 + B \cdot d^2 + C \cdot d + D \quad (\text{dBm})$$

와 같은 다항식의 계수를 결정하는 방식을 취하기도 한다. 그러나, 어떤 전파 모델을 이용할지라도 전파의 변화에 따른 영향은 극복할 수 없는 것이 RSSI를 이용한 방법이다.

### 3. TOF (Time of Flight) 방식

TOF를 이용한 거리 측정 방식은 태그와 AP 사이에서 신호가 전달되는데 걸리는 시간을 측정하여 이를 거리로 변환하여 위치 추정에 이용하는 것이다. 신호의 비행 시간(Time of Flight,  $t$ )과 거리의 관계는 식 (3)에 보이는 것처럼 단순한 물리 공식에 의해 표현된다.

$$c = \frac{d}{t} \quad (\text{m/sec}) \quad (3)$$

자유 공간에서 전파의 속도  $c$ 는  $3 \times 10^8$  m/sec로 거리  $d$ 는  $d = t \cdot 3 \times 10^8$  과 같은 단순한 계산을 통해 얻어진다. 그러나, 이 과정에서 신호의 비행 시간  $t$ 를 구하는 것이 쉽지 않다.

태그와 AP 사이에서 신호가 전달되는데 걸리는 시간을 구하기 위해서는 태그와 모든 AP가 시간에 대해 동기화 맞춰져 있어야 한다. 그러나, 시동기를 맞추는 것이 쉬운 일이 아니다. 이동통신 시스템의 경우 기지국(Base Station)은 GPS 위성을 이용하기 때문에 비교적 간단하면서도 정확하게 시동기를 맞출 수 있으나, RTLS 시스템처럼 주로 실내에서 사용되는 시스템은 GPS 위성을 사용하는 것이 불가능하거나 쉽지 않다. 일반적으로, SNTP(Simple Network Time Protocol)와 같은 기술을 이용하기도 하지만, 이 방법 역시 AP들의 시동기는 가능하지만, 태그의 시동기를 맞추는 것은 불가능하다. 또한, AP들에 대한 시동기 역시 해상도(precision)가 1초 수준으로 낮기 때문에 근거리 위치 추적을 위한 시동기로 이용하는데 한계가 있다.

이러한 문제를 부분적으로 해결하기 위해 제안된 방법이 4절에서 소개될 TDOF 방식이다. TDOF 방식은 태그를 제외하고 AP들에 대해서만 시동기를 맞출 것을 요구하는 방식이다. 그러나, 이 방식 역시 AP들 사이에서 시동기를 맞추어야 하며, [1]에 보이는 것처럼 계산 양이 많다는 문제점을 가지고 있다.

원래의 TOF와 TDOF의 문제들을 해결하기 위해서 제안된 방법이 RTT를 이용한 TOF 방식이다. RTT를 이용한 TOF 방식은 신호가 태그와 AP 사이를 왕복하는데 걸리는 시간으로부터 신호가 태그와 AP 사이를 비행하는데 걸리는 시간을 유추해 내는 방식이다. 즉, 신호가 태그에서 AP 혹은 AP에서 태그로 비행하는데 걸리는 시간이  $t_{prop}$ 로 동일하다고 가정하고, AP에서 신호를 수신하여 태그로 응답하는데 걸리는 시간을  $t_{AP}$  라면, 태그와 AP 사이를 왕복하는데 걸리는 시간  $t_{RTT}$ 는

$$t_{RTT} = 2 \cdot t_{prop} + t_{AP}$$

과 같이 구해진다. 이 식을  $t_{prop}$ 에 대해 정리하면,

$$t_{prop} = \frac{t_{RTT} - t_{AP}}{2} \quad (4)$$

가 된다. 이때,  $t_{AP}$ 는 실험적으로 미리 알려진 값이며,  $t_{RTT}$ 는 태그에서 각 신호에 대해 측정을 하게 된다. 수 미터 정도의 위치추정 정확도를 제공하기 위해서  $t_{RTT}$ 는 대략 10 nsec 전후가 되어야 하기 때문에, 태그 및 AP는 nsec 수준의 시간 정보를 제공할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 고정밀 오실레이터(high-precision oscillator)를 이용해야 하며, 이는 가격 상승 및 회로 사이즈를 증가

시키는 요인이 된다. 이 외에 비행시간을 구하는데 걸리는 시간이 원래의 TOF 방식에 비해 적게는 2배에서 많게는 6배 정도 걸리며 그에 따라 약간의 계산량이 늘어난다는 것도 단점으로 지적할 수 있다. 또한,  $t_{RTT}$  를 얻기 위해서는 수 차례의 신호를 교환해야 하는데, 저전력을 기본 사양으로 하는 태그에서 수 차례 RF 신호를 전송하는 것은 배터리 수명 단축과 같은 문제를 야기하기도 한다. 그러나, 이러한 단점은 시동기를 맞춰야 하는 제약에 비하면 가벼운 것에 해당한다.

TOF 및 TDOF 방식도 RSSI 방식과 마찬가지로 전파 환경에 따른 오차가 발생할 수 있다. 주로 LOS (Line of Sight)가 보장되지 않음으로써 발생하는 다경로 환경(multipath fading)에 의한 오차가 주된 원인이 되지만, RSSI에서 발생하는 오차에 비해 크지 않으며 이를 해결하기 위한 방법들도 제안되고 있다 [2]. 또한, RSSI 방식은 태그와 AP 사이의 거리가 멀면 멀수록 큰 오차를 유발하게 되지만, TOF 방식은 거리에 무관하게 일정한 오차를 유발한다는 장점도 있다.

UWB(Ultra Wide-Band)와 같은 것을 제외하면 대부분의 근거리 무선 통신 기술들은 시간 정보를 이용할 수 없는 구조를 취하고 있다. 따라서, 이런 근거리 무선 통신 기술에서 시간 정보를 이용하여 위치추적 시스템을 개발하기 위해서는 기존 프로토콜을 변형시켜야 하는 문제가 있다. AeroScout의 근거리 위치추적 솔루션[3]은 TOF 기술을 이용한 위치추적 솔루션의 대표적인 예이다. 참고문헌 [4]는 무선랜 환경에서 TOF 기반의 삼각법의 성능 평가 결과를 제공하고 있다.

#### 4. TDOF (Time Difference of Flight) 방식

TDOF를 이용한 거리 측정 방식은 태그와 AP 사이에서 신호가 전달되는데 걸리는 시간차를 측정하여 이를 거리로 변환하여 위치 추정에 이용하는 것이다. 즉, 식 (5)에 보이는 것처럼 두 AP와 태그 사이의 비행 시간 차이가 일정한 지점들을 이용하여 태그의 위치를 계산하게 된다.

$$\Delta d = \frac{\Delta t}{c} = \frac{1}{c} \cdot |t_1 - t_2| \quad (5)$$

(x, y)로 표현되는 2차원 상의 위치값에 대해서 식 (5)를 전개하면 2원 2차 방정식을 푸는 문제가 되는데, 이는 [1]에서 보이는 것처럼 계산 과정도 복잡하고 계산 양도 많다는 문제가 있다. 또한, 태그와의 시동기는 필요치 않지만, 모든 AP들에 대해 고정밀 시동기를 제공할 수 있는 방법이 있어야 한다.

TDOF(TDOA)를 이용한 위치 추적은 초기 해양위치추적 시스템 및 이동통신망에서 많이 사용된다 [7]. RTLS 솔루션에 있어서, Cognio는 업계에서 처음으로 TDOA 포지셔닝 기술을 바탕으로 무선랜 위치 추적 시스템(Cognio Intelligent Spectrum Management™)을 개발한 것으로 알려져 있다 [8]. Hitachi 역시 무선랜 환경에서 TDOF 방식을 이용한 위치추적 시스템을 개발한 것으로 알려져 있다 [9]. UWB 기술에서 TDOF 방식을 이용한 위치추적 시스템과 관련해서는 [10]~[14]와 같은 연구 결과를 참조하기 바란다.

#### 5. RSSI-TDOF 하이브리드 방식

지금까지는 RSSI, TOF, 그리고 TDOF 방식에 대해 살펴보았다. 각 방식은 서로 상충적인 장단점을 가지고 있으며, 이러한 문제를 해결하고 위치추정 정확도를 개선하기 위해 RSSI와 TOF를 결합한 방식 및 RSSI와 TDOF를 결합한 방식이 연구되고 있다. 이와 관련된 자세한 내용은 [15]를 참고하기

바란다. 참고문헌 [16]은 RSS와 TDOF를 결합한 방식에 대한 위치추정 정확도의 편차에 대한 범위에 대한 연구 결과를 제공하고 있다.

## 6. 참고 자료

- [1] R. Bucher and D. Misra, "A Synthesizable VHDL Model of the Exact Solution for Three-Dimensional Hyperbolic Positioning System," VLSI Design, vol.15, no. 2, pp. 507~520, 2002.
- [2] L. Cong and W. Zhuang, "Non-Line-of-Sight Error Mitigation in TDOA Mobile Location," Proc. of IEEE GLOBECOM 2001, vol.1, pp. 680~684, 2001.
- [3] AeroScout, <http://www.aeroscout.com/>
- [4] F. Izquierdo, M. Ciurana, F. Barcelo, J. Paradells, and E. Zola, "Performance evaluation of a TOA-based trilateration method to locate terminals in WLAN," Proc. of IEEE Int'l. Symposium on Wireless Pervasive Computing, pp. 1~6, Jan. 2006.
- [5] A. Savvides, C.-C. Han, and M. Srivastava, "Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors," Proc. Of the 7th ACM Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom), Rome, Italy, July 2001, pp. 166~179.
- [6] N. B. Priyantha, A. Chakraborty, and H. Padmanabhan, "The cricket location support system," Proc. of the 6th ACM Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (Mobicom), Boston, MA, August 2000, pp. 32~43.
- [7] W. P. Frantz, W. N. Dean, and R. L. Frank, "A Precision Multi-Purpose Radio Navigation System," I. R. E. National Convention Record, Vol. 5, Part 8, pp. 79~98, March 1957.
- [8] Cognio, Inc. <http://www.cognio.com>
- [9] R. Yamasaki, A. Ogino, T. Tamaki, T. Uta, N. Matsuzawa, and T. Kato, "TDOA Location System for IEEE 802.11b WLAN," Proc. of IEEE WCNC 2005, vol.4, pp. 2338~2343, March 2005.
- [10] F. Gustafsson and F. Gunnarsson, "Positioning using time-difference of arrival measurements," Proc. of IEEE Int'l. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2003, vol. 6, pp. VI-553-6, April 2003.
- [11] D. P. Young, C. M. Keller, D. W. Bliss, and K. W. Forsythe, "Ultra-Wideband (UWB) Transmitter Location Using Time Difference of Arrival (TDOA) Techniques," Proc. of the 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, vol.2, pp. 1225~1229, Nov. 2003.
- [12] F. Evennou, F. Marx, and S. Nacivet, "An Experimental TDOA UWB Location System for NLOS Environments," Proc. of IEEE VTC 2005 Fall, vol.1, pp. 420~423, Sept. 2005.
- [13] E. Dickerson, D. Arndt, and J. Ni, "UWB Tracking System Design with TDOA Algorithm for Space Applications," Annual Report of Institute for Space Systems Operations, pp. 19~22 and 38, 2005.
- [14] J. Xu, M. Ma, and C. L. Law, "Position Estimation Using UWB TDOA Measurements," Proc. of IEEE Int'l. Conf. on Ultra-Wideband, Sept. 2006.
- [15] A. Catovic and Z. Sahinoglu, "Hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS Location Estimation Schemes for Short-Range Wireless Networks," Mitsubishi Electric, TR2004-096, Dec. 2004.

[16] A. Catovic and Z. Sahinoglu, "The Cramer-Rao Bounds of Hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS Location Estimation Schemes," IEEE Comm. Letters, vol.8, no.10, pp. 626~628, Oct. 2004.

※ 상기의 내용은 개인적으로 수집하고 공부한 내용들을 바탕으로 작성된 것이므로, 일반적이지 않을 수도 있으며 잘못된 내용을 포함하고 있을 수도 있습니다. 상기의 내용에 대해 문의가 있거나 잘못된 내용이 있는 경우에는 이메일 주소([honest72@korea.com](mailto:honest72@korea.com))로 연락 주시기 바랍니다. 기타 다른 내용에 대해서는 홈페이지 <http://hakyongkim.net> 혹은 <http://hykim.net> 을 참고하시기 바랍니다.