

主題

UWB와 Indoor Radio Location

한동대학교 이준용

차례

- I. 서론
- II. UWB Ranging Measurements
- III. Toa Measurement Algorithm for Distance Measurements
- IV. 결론

I. 서론

새로운 기술이 등장할 때마다, 그 기술이 이전에 사용되던 것에 비해 어떤 장점이 있는지, 또 구체적으로 어떤 분야에 응용될 수 있는지 질문하게 된다. 작년 2월 미국 FCC의 상용화 발표 이후, 이제 많은 이들이 ultra-wideband (UWB) 통신의 가능성에 대해 공감하고 있지만, 몇 년 전만 하더라도, 대부분의 사람들은 이 기술에 대해 회의적이었다. 1998년 당시, University of Southern California (USC)의 UltraLab 에는 기업체와 학계, 또 군관료들에 이르기까지 많은 방문자들이 찾아왔고, 그들이 가장 많이 던진 공통된 질문 또한 과연 이 기술이 얼마만큼의 실현 가능성이 있으며, 또 기존의 기술에 비해 얼마만큼의 경쟁력을 갖고 있느냐 하는 것이었다. 이들에게 UWB의 실용화 가능성을 설명하는 것은 쉽지 않았다. 당시만 하더라도 demo용으로 사용하던

Time Domain Corporation에서 제작된 prototype radio는 19.2Kbps의 data rate을 가지고 있었고 당시 대부분의 UWB 업체들을 목표는 10Mbps 정도의 link를 개발하는 것이었다. (물론 지금은 훨씬 더 높은 data rate이 거론되고 있다.) 그에 비해 UWB의 position location (위치추적) 에의 응용 가능성에 대해선 비교적 쉽게 수긍하곤 하였다. 간단한 propagation test를 통해 실제 UWB signal을 측정하면 이 분야에서 왜 UWB가 narrowband에 비해 잇점을 가질 수 있는지 쉽게 확인할 수 있었던 것이다.

USC의 Robert Scholtz교수는 UWB의 가장 유망한 응용분야로 imaging과 positioning을 꼽는데 주저하지 않는다. 그것은 시장성보다는 기술적인 feasibility라는 면에서 UWB를 전망한 것으로 생각된다. 즉 UWB의 가장 주된 응용분야로 이야기되고 있는 personal area network에 비해 비교적 단기간 내에 실현될 수 있으며, 또한 UWB와 경쟁관계에 있는 타 기술에 비해 확실

한 비교우위를 점할 수 있는 분야이기 때문이다. 실제로 Time Domain사가 개발한 through-wall radar와 Aether Wire & Location사가 개발한 lo calizer는 이미 수년 전에 이러한 분야들의 응용 가능성을 충분히 보여주었다. 특히 9.11 테러 이후 security에 대한 미국방부의 관심이 더욱 높아지면서, 재난 상황에서의 구조 작업 등, UWB를 이용한 position location의 필요성이 비중 있게 거론되었고, 이러한 사실은 UWB가 상용화되는데 영향을 미쳤다고 알려져 있다. 최근에는 RF tag를 이용한 positioning이 많은 관심을 끌고 있으며, communication과 location을 결합한 형태의 응용도 가능할 것으로 보인다.

Radio location의 방식에는 여러가지가 있다. Time of arrival (ToA), time difference of arrival (TDoA), angle of arrival (AoA), 또는 이들을 결합한 형태의 방식들이 있으며, 또 드물긴 하지만 signal strength를 이용한 방법도 사용된다. 이중 ToA 혹은 TdoA information을 위치추적에 사용할 경우 direct path signal의 정확한 arrival time을 측정하는 것이 매우 중요하다 [1], [2].

여기서 direct path signal이란 신호를 송신하였을 때, 송수신기간의 가장 짧은 path, 즉 직선 path를 통해 전송된 신호성분을 의미한다. 예외가 존재할 수는 있으나 특별한 경우를 제외하고는 direct path signal은 multipath 성분보다 먼저 receiver에 도착한다고 가정할 수 있으며, 이 신호 성분의 arrival time은 송수신기간의 range information을 갖고 있는 셈이다. UWB가 narrowband에 비해 positioning에 유리한 이유는 UWB 신호의 space resolution (혹은 range resolution)이 narrowband 신호의 그것보다 월등하게 높아, direct path signal의 ToA를 정확히 추정할 수 있기 때문이다. Space resolution이란 multipath channel에서 서로 다른 differential path length를 갖는 multipath 성분들을 receiver에서 구별할 수 있는 능력을 말한다. Narrowband 신호의 경우, multipath 성분들은 서로 겹쳐지게 되어 원치 않는 fading 현상을 초래하게 된다. 이 경우, direct path signal의 정확한 detection이 상당히 어려워지며, 따라서 ranging accuracy가 현저하게 떨어지게 된다. 특히 line of sight (LoS)가 존

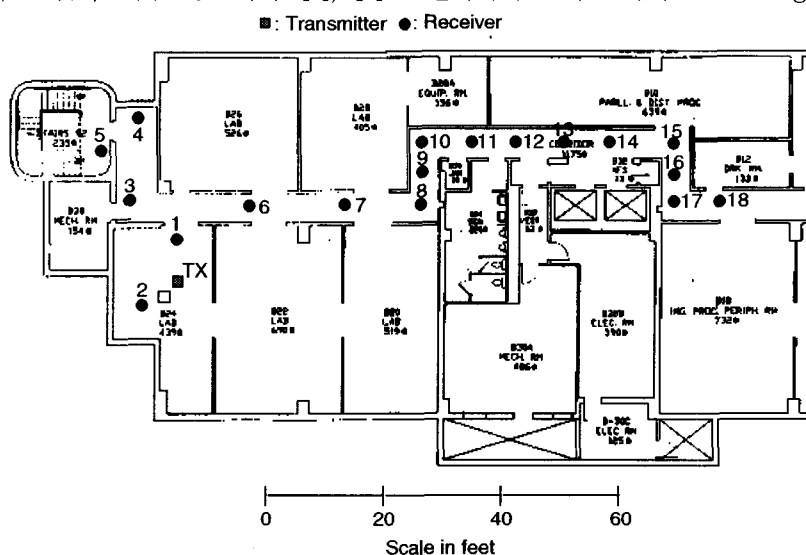


Fig. 1 Propagationtest가 행해진 건물의 단면도. 총 18개의 위치에서 신호가 측정되었으며 1번 위치를 제외한 나머지 위치들에서는 non-LoS propagation을 측정하였다.

재하지 않는 경우, 즉 송수신기간의 직선 path 상에 장애물이 존재하는 경우, 정확한 direct path signal detection은 그렇지 않은 경우에 비해 훨씬 더 어려워지며, 실제로 실내환경 등, shadowe

위치 한곳에 고정되었고 18개의 다른 위치에서 신호를 측정하였다. 이때 1번 위치에서는 LoS propagation을 측정하였고 이 신호는 range calibration 목적으로 사용되었다. 나머지 위치들에서

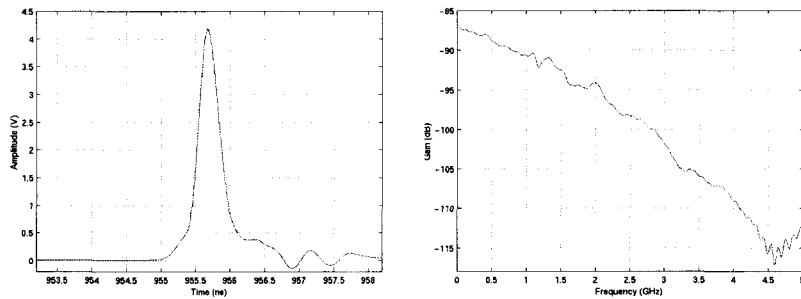


Fig.2 Pulser output. Pulse의 모양은 안테나를 통해 송수신되는 과정에서 안테나의 filtering action에 의해 변하게 된다.

d environment에서 GPS나 mobile station을 이용한 positioning 정확도는 현저히 떨어지는 이유도 이 때문이다. 반면 UWB의 경우엔 multipath 성분들이 서로 resolvable하여 direct path detection의 정확도를 높일 수 있는 것이다. 예를 들어 UWB system에서 사용하는 pulse의 폭이 0.5 ns라고 가정하면 약 15cm이상의 differential path length를 갖는 multipath 성분들은 서로 resolvable하며, 따라서 적어도 15cm의 range resolution을 갖게 되는 것이다. (multipath resolution technique을 사용하면, 실제 range resolution은 이것보다 더 향상될 수 있다.)

II. UWB Ranging Measurements

앞서 설명한 UWB의 위치추적에의 응용 가능성을 시험해 보기 위하여 UWB 신호를 측정하였다. 이 propagation test는 USC Electrical Engineering Building의 지하층에서 이루어졌고 Fig. 1은 이 건물의 단면도를 보여준다. 송신기의

는 non-LoS상황, 즉 콘크리트벽, elevator 등의 장애물이 존재하는 상황에서 측정이 이루어졌다. 송신단에서의 pulse generation에는 Avtech, Inc.에서 제작된 pulse generator가 사용되었고, 신호는 vertically polarized된 diamond dipole 안테나에 의해 송수신되었다. Fig. 2는 pulse generator의 출력신호를 time domain과 frequency domain에서 보여준다. 수신단에서는 digitized sampling scope를 사용하여 400ns의 time span과 약 2.05GHz의 sampling frequency로 신호를 측정하였다. 그리고 SNR을 높이기 위해 측정시 각 sample은 512회만큼 integrate되었다.

Fig. 3은 1, 8, 13, 16번 위치에서 측정된 신호의 delay profile을 보여준다. 그림에서 direct path signal과 multipath signal을 볼 수 있으며 각각의 multipath 성분들의 높은 space resolution을 확인할 수 있다. 1번위치에서 측정된 신호의 profile의 경우 direct path signal이 가장 강하고 multipath signal들은 그보다 약한 것을 알 수 있으며, 이것은 LoS가 존재하는 channel에서는

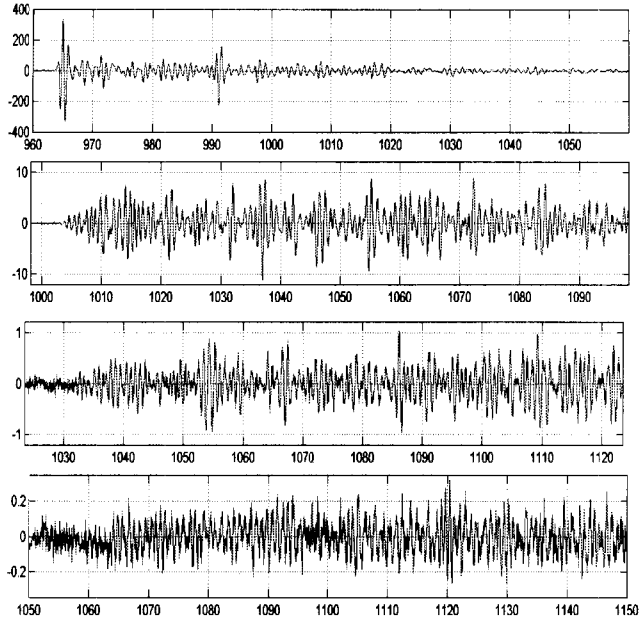


Fig.3 1, 8, 13, 16번 위치에서 측정된 신호의 profile. 수평축은 시간 (ns), 수직축은 voltage (mV) 를 나타낸다. 송수신 안테나간의 거리가 멀어질수록 신호의 quality가 떨어지는 것을 볼 수 있다.

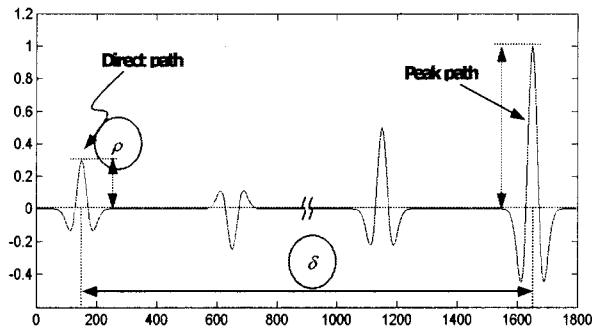


Fig.4 수신된 신호는 direct path 성분과 multipath 성분들의 linear sum으로 표현될 수 있다. Direct path와 strongest path의 시간차를 의미하는 δ 가 추정해야 할 parameter이다

일반적인 현상이라고 말할 수 있다. (그러나 특정한 multipath 성분이 증폭되도록 reflector가 배치되는 경우에는 예외가 존재할 수도 있다.) 그러나 LoS가 존재하지 않는 channel에서는 direct path 성분보다 더 강한 multipath 성분들이 존재할 수 있으며, Fig. 3에서 8, 13, 16번 위치에서

측정된 신호는 그 예를 보여준다. 그림에서 보듯 가장 강한 신호 성분이 direct path 성분으로부터 수십 ns 이상 떨어져 있을 수 있고, 이때 이 신호성분을 이용하여 거리를 추정할 경우 수십 feet의 ranging error가 발생하게 될 것이다. 뿐만아니라 noise와 interference의 존재로 인하

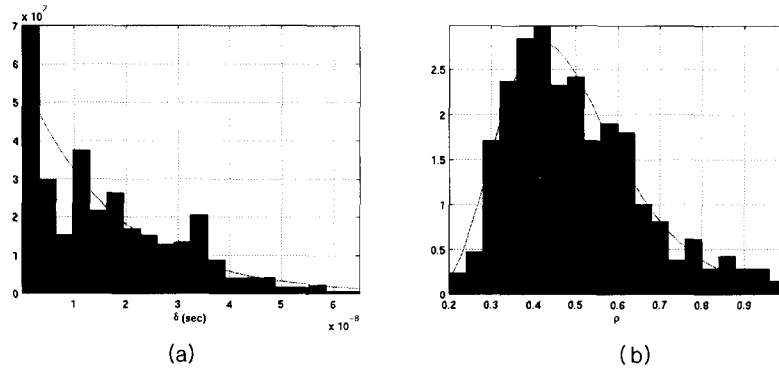


Fig.5 Parameter (a) δ 와 (b) ρ 의 marginal probability density function. Office 환경에서 측정된 data를 사용하여 modeling되었으며, 각각 exponential과 lognormal로 근사되었다.

여 false alarm의 확률도 존재한다. 따라서 indoor propagation의 경우 direct path detection은 용이한 문제가 아니며 이를 위한 별도의 estimation algorithm을 필요로 하게 된다.

III. ToA Measurement Algorithm for Distance Measurements

1. Direct Path Detection Using GML

Direct path detection 혹은 leading edge detection 문제는 결국 신호 성분의 ToA를 추정한다는 의미에서 time delay estimation problem과 공통점이 있으나, direct path 성분을 multipath 성분과 구별해내야 하므로 이 문제와는 구별된다. Time delay estimation problem은 narrowband의 경우 비교적 많이 연구가 되어져 왔던 topic이다 [5], [6]. UWB의 경우엔 Win과 Scholtz [3], 그리고 Cramer [4] 등에 의해 channel estimation algorithm이 제안된 바 있다. 대부분의 tim

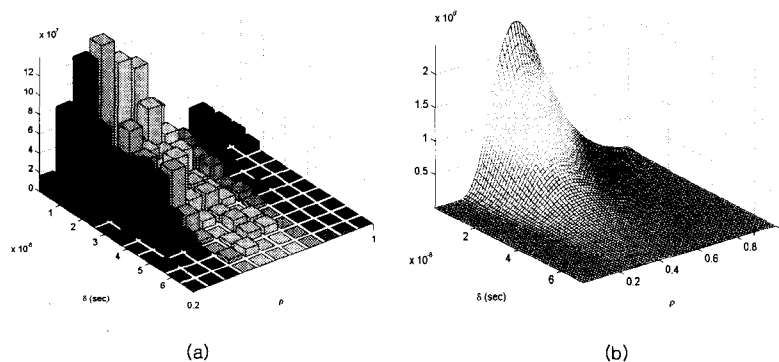


Fig.6 Parameter δ 와 ρ 의 (a) histogram과 (b) joint probability density function. 두 parameter는 서로 independent하다고 가정하였으며 이 가정은 chi-squared test로 검증되었다.

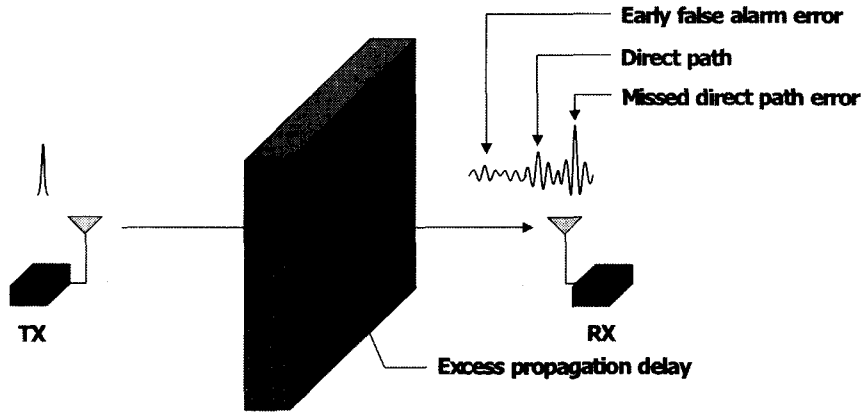


Fig.7 Non-LoS ranging 상황에서 발생할 수 있는 error. LoS blockage 내부에서 생기는 excess propagation delay와 ToA estimation error 가 발생할 수 있다.

e delay estimation algorithm과 마찬가지로 여기서 제안하는 ToA measurement algorithm은 기본적으로 deterministic approach를 채택하고 있다 [1]. 그 이유는 stochastic approach를 취하기 위해 필요한 channel model이 부재하다는 것과, 존재한다 하더라도 channel parameter의 variance가 클 경우 estimation의 error variance가 커질 수 밖에 없기 때문이다. Fig. 4는 receiver에서 수신된 신호를 나타낸 도식이다. 수신된 신호는 direct path signal과 multipath 성분들의 linear sum으로 표현되었으며, δ 와 ρ 는 각각 direct path 성분과 가장 강한 신호 성분간의 time difference와 relative strength를 나타내는 channel parameter이다. 수신기가 가장 강한 신호성분을 찾는 것이 가능하다고 가정할 때, 우리가 궁극적으로 추정하기 원하는 parameter는 δ 가 되고, 이를 위해서 generalized maximum likelihood (GML) estimation을 사용하였다. Estimation의 dimension을 줄이기 위하여 nonlinear programming을 이용한 iterative search algorithm을 개발하였으며, parameter δ 와 ρ 에 threshold (θ_δ , θ_ρ)를 적용함으로써 stopping rule을 정의하였다. 그리고 이 threshold 값들은와 의 확률분포에

근거해서 결정되었다.

Fig. 5는 parameter δ 와 ρ 의 marginal probability density function (PDF)를 통계적으로 modeling한 결과를 보여준다. 이 modeling에는 office environment에서 Win [3]에 의해 측정된 622개의 non-LoS propagation data가 사용되었으며, 두 parameter의 marginal density는 각각exponential과 lognormal로 근사되었다. 이 두 parameter가 서로 independent하다고 가정한다면 이들의 joint PDF는 각각의 marginal PDF의 곱으로 표현될 수 있을 것이다 (Fig. 6). Independence에 대한 이 가정은 chi-squared test [9]를 사용하여 검증되었다.

2. Error Analysis

앞서 구한 channel parameter들의 joint PDF를 사용하여 range estimation과정에서 발생할 수 있는 error probability를 계산할 수 있다. Fig. 7은 2개의 node가 존재할 경우 non-LoS propagation을 이용하여 거리 추정을 할 때, error가 발생할 수 있는 시나리오들을 보여준다. 첫번째는 LoS blockage 내부에서 발생하는 추가적인 propagation delay에 의해 발생하는 error이다. Ele

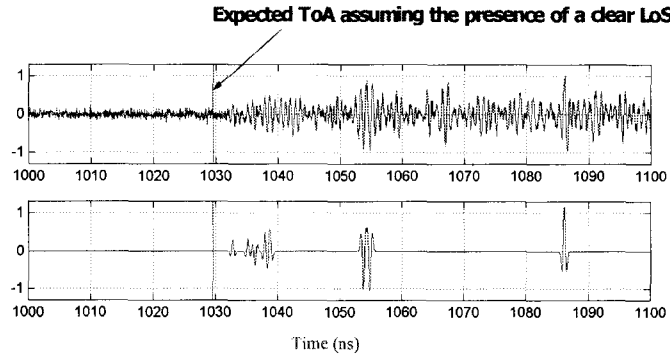


Fig. 8 측정된 신호에 ToA estimation algorithm을 적용하였다. 아래의 plot에서 가장 앞에 보이는 신호성분이 추정된 direct path 성분이다

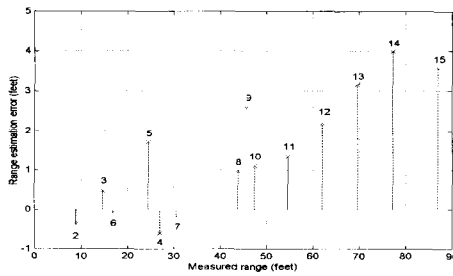


Fig. 9 Range estimation 결과. 수평축은 측정된 거리를, 수직축은 ranging error를 나타낸다

electromagnetic wave는 dielectric constant가 큰 medium일수록 그 propagation speed가 떨어지며, 따라서 LoS blockage 내에서는 excess propagation delay가 발생한다고 가정할 수 있다. 따라서 free space propagation을 가정하고 송수신기간의 거리를 추정하게 되면 이에 비례하는 positive error가 발생할 수 밖에 없을 것이다. 두번째 source는 앞에서 소개한 ToA estimation과정에서 발생하는 error이다. 이 error는 두 종류로 분류할 수 있는데, 그 하나는 direct path signal이 도착하기 전 noise나 interference에 의해 발생할 수 있는 false alarm error이고, 다른 하나는 multipath 성분이 direct path 성분으로 잘못 추정될 때 발생하는 error (missed direct path error) 이다.

이중 false alarm error의 확률은 수학에서 흔히 거론되는 level crossing probability로 표현될 수 있다 [7]. 그리고 이 algorithm의 stopping rule에 사용되는 threshold는 이 두 종류의 error probability가 주어진 performance criteria를 만족시키도록 결정되었다.

3. Test Results

Fig. 8은 앞서 설명한 ToA measurement algorithm을 13번 위치에서 측정된 신호에 적용한 결과이다. 위의 plot은 실제로 측정된 신호의 profile이고 아래의 plot은 ToA algorithm을 적용하였을 때 추정되는 신호성분들로 재구성된 것이다.

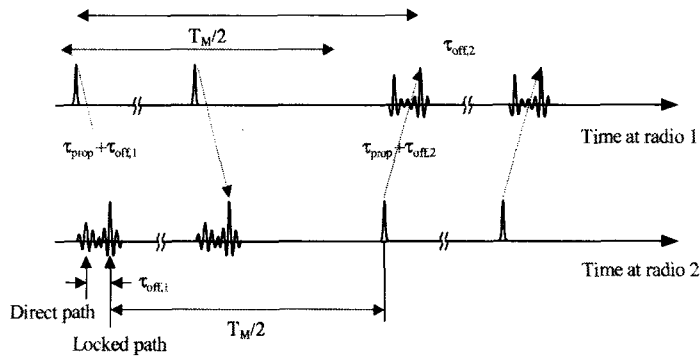


Fig. 10 Two-way ranging scheme. Common clock이 없는 상황에서 신호의 round-trip time을 측정함으로써 거리를 추정할 수 있다

그림에 보이는 붉은색 선은 실제로 측정된 거리를 LoS가 있다고 가정하고 시간으로 환산하였을 때 추정되는 direct path의 ToA이다. 이 선의 위치가 실제 direct path 성분의 ToA와 약 3ns 가량 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 이것은 앞서 언급한 LoS blockage 내에서의 excess propagation delay 때문이다. Fig. 9는 2번에서 15번 위치까지의 신호를 사용하여 거리를 추정한 결과이다. 그림에서 축은 실제로 측정된 거리이며, 축은 estimation error를 나타내고 있다. 거리가 멀어질수록 error가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 송수신기의 LoS를 가로막고 있는 건물의 구조가 더 복잡해지기 때문에 excess propagation delay가 증가하기 때문인 것으로 추정되며 이때문에 실제로 ToA estimation error가 얼마인지는 추정하기 매우 어렵다. Worst case는 5개의 벽을 통과하여 측정이 된 14번 위치에서 약 4 feet의 error가 발생하였다.

4. Two-Way Timing Scheme

Positioning scheme은 channel 환경과 사용 가능한 node의 갯수에 따라 달라질 수 있다. 3-dimensional positioning을 위해서는 적어도 4개의 node가 필요할 것이고 그 이상의 node가 존재한

다면 정확도를 높이는 데 도움이 될 것이다. 여기서는 node의 갯수가 2개이고 common clock이 없다고 가정할 때 적용 가능한 1-dimensional ranging scheme에 대해 소개하고자 한다. 이 방식은 satellite synchronization에 사용되는 2-way timing 방식 [8]을 이용하여 design한 것이다.

Fig. 10은 두개의 UWB radio의 timing diagram을 나타낸다. 각 time 축은 각 radio에서의 local time을 나타내며, 두 radio는 서로 TMsec의 주기로 time-multiplexed되고 있다고 가정한다. 먼저 radio1이 pulse train을 radio2에 송신하게 되고 radio2는 이 신호를 수신하여 특정 path의 신호성분을 track하게 된다. (이때 특정한 multiple-access 방식이나 modulation 방식은 가정하지 않기로 한다.) 그림에 나타난 τ_{off} 는 이때 direct path와 locked path와의 time offset을 의미하며 이는 앞서 소개한 ToA estimation algorithm에 의해 추정될 수 있다. Radio2는 신호의 수신을 마친후, 첫 pulse가 도착한 시각으로부터 특정한 delay (TM/2)로 같은 pulse train을 radio1에 송신한다. 마찬가지로 radio1은 이 신호를 수신하여 측정하고, offset time (τ_{off})을 계산한다. 이때 radio1은 처음 신호를 보낸 순간으로부터 다시 되돌려 받은 순간까지의 시간, 즉 signal

round-trip time을 local time으로 측정할 수 있으며, 측정이 이루어지는 동안 channel이 stationary하다는 가정 하에 signal propagation time을 계산할 수 있다.

IV. 결 론

앞서 소개한 test결과는 아직 preliminary result이긴 하나 indoor 환경에서 기존의 location system의 resolution에 비교한다면 매우 고무적인 결과이며 UWB를 이용한 indoor location의 충분한 가능성을 보여준다고 할 수 있다. 그러나 이의 실용화를 위해서는 아직도 해결해야 할 여러 가지 issue들이 남아있다. 우선 test에 사용된 propagation data는 매우 높은 sampling rate으로 측정된 신호들이다. 그러나 실제 상황에서는 measurement time이 제한되어 있기 때문에, 얻을 수 있는 data의 sampling rate은 이보다 낮아질 수 있고, 따라서 under-sampled data로 최대의 ranging resolution을 얻기 위해서는 효과적인 sampling design이 필수적이다. 그리고 앞의 측정들은 모두 안테나가 vertically polarized된 상태에서 이루어졌으나 실제 송수신 안테나간의 polarization pattern은 이와 달라질 수 있을 것이고, 이 문제를 해결하기 3-dimensional polarization에 대한 연구가 필요하다. 또한 clock synchronization 등 여러가지 timing issue들 또한 매우 중요한 연구 과제라고 할 수 있다.

참고문헌

- [1] Joon-Yong Lee and Robert A. Scholtz, Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 9, pp. 1677-1683, Dec. 2002.
- [2] Joon-Yong Lee and Robert A. Scholtz, Time of arrival estimation of direct path signal in UWB communications, in *Proc. URSI 2001 (invited)*, Boulder, 2001, pp. 139.
- [3] M. Z. Win and Robert A. Scholtz, Energy capture versus correlator resources in ultra-wide bandwidth indoor wireless communications channels, in *Proc. Milcom*, vol. 3, pp. 1277-1281, Nov. 1997.
- [4] J. M. Cramer, R. A. Scholtz, and M. Z. Win, Evaluation of an ultra-wideband propagation channel, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 50, pp. 561-570, May 2002.
- [5] T. G. Manickham, R. J. Vaccaro, and D. W. Tuffs, A least-squares algorithm for multipath time-delay estimation, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 42, pp. 3229-3233, Nov. 1994.
- [6] I. Ziskind and M. Wax, Maximum likelihood localization of multiple sources by alternating projection, *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 36, pp. 1553-1560, Oct. 1988.
- [7] J. R. Rice, First occurrence time of high-level crossings in a continuous random process, *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 39, pp. 323-335, May 1966.
- [8] W. C. Lideney and M. K. Simon, *Phase and Doppler Measurements in Two-Way Phase-Coherent Tracking Systems*. New York: Dover, 1991.
- [9] E. L. Lehmann, *Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks*. San Francisco, CA: McGraw-Hill, 1975.