

다중경로 다중사용자 환경에서의 초광대역 거리추정의 성능 분석

정회원 이준용*, 준회원 유성열*

Performance of UWB Ranging in Multipath and Multiuser Environments

Joon-Yong Lee* *Regular Member*, Sungyul Yoo* *Associate Member*

요 약

초광대역 신호의 높은 시간해상도는 복잡한 다중경로 환경에서의 정밀한 거리추정 및 위치추적을 가능하게 한다. 그러나 신호의 도착신호 추정시 발생하는 큰 추정오차의 발생은 거리추정의 정확도를 저하시키는 요인이 된다. 본 논문에서는 다중경로, 다중사용자 환경에서 초광대역 거리추정의 성능을 평가한다. 상호상관을 이용한 직렬검색 알고리즘을 적용할 때 발생하는 추정오차를 분석하고 모의실험 결과를 개시한다.

Key Words : Ultra-wideband, ranging, geolocation, direct path, time of arrival

ABSTRACT

Ultra-wideband (UWB) ranging poses a set of time delay estimation problems for designers. The possibility of a large error can be a challenging problem for accurate ranging and positioning. An approximate analysis of large error performance of UWB ranging in multipath and multiuser environments is posed. Both analytical and experimental approaches are taken to evaluate the large error variance in a correlation-based serial search scenario.

I. 서 론

펄스 방식의 초광대역 (UWB) 시스템은 신호의 높은 시간해상도 (time resolution)로 인하여 거리추정 (ranging) 및 위치추적 (positioning)을 위한 유력한 솔루션 (solution)으로 거론되고 있다. 송수신기간의 가시 경로 (line of sight, LoS)가 존재하는 채널 환경에서는 UWB 신호의 거리해상도(range resolution)에 해당하는 거리추정 정확도를 쉽게 얻을 수 있다 [1], [2]. 그러나 비가시적(non-LoS) 채널 환경에서는 직선경로 (direct path) 신호성분을 검출해내는 것이 매우 어렵게 된다. 이는 직선경로 신호 성분보다 더 강한 다중경로(multipath) 성분들이 존재할 수 있기 때문이다. 최근 들어 이를 해결하기

위한 알고리즘들이 제안되어 왔다 [3]-[6].

신호의 도착시간 (time of arrival, ToA) 추정의 정확도를 논할 때, 흔히 사용하는 방법이 추정오차의 분산(variance)에 대한 Cramer-Rao lower bound (CRLB)를 계산하는 것이다. 부가백색가우시안잡음 (additive white Gaussian noise, AWGN) 환경에서, 시간지연 추정오차의 분산에 대한 CRLB는

$$\sigma_{\epsilon}^2 \geq \frac{1}{2\gamma\beta_f^2} \quad (1)$$

로 알려져 있다 [7]. 여기서 σ_{ϵ} 은 추정오차의 표준편차 (standard deviation)를 의미하며, β_f 는 제곱평균자승근(root mean square, RMS) 대역폭 (band-

* 이 논문은 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국과학기술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (R05-2004-000-12640-0).

* 한동대학교 UWB 통신 연구실 (joonlee@handong.edu)

논문번호 : KICS2005-09-384, 접수일자 : 2005년 9월 23일

width), 혹은 Gabor 대역폭을 나타낸다. 그리고 y 는 신호의 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR) 를 의미한다. Zhang^[8]은 시간도약(time-hopped) UWB 신호를 위한 CRLB를 계산한 바 있다.

AWGN 환경에서는 상호상관 방식이 최적의 추정방식으로 알려져 있다. 그러나 SNR이 낮은 환경에서는, 추정오차의 분산값이 CRLB에서 크게 벗어나는 것으로 알려져 있으며, 이를 정확히 평가해 내기는 매우 어렵다. Ianniello^[9]는 상관(correlation) 방식을 이용한 시간지연 추정의 경우 발생하는 큰 추정오차를 분석한 바 있다.

본 논문에서는 다중경로 다중사용자(multiuser) 환경에서 발생하는 거리추정의 성능을, 상관방식과 직렬검색(serial search) 방식을 가정하여 분석하였다. 위 시나리오에서 발생할 수 있는 시간지연 추정 오차를 세 종류로 분류하고, 그 중 하나인 소위 early false alarm error의 분산의 상위경계(upper bound)와 하위경계(lower bound)를 구하였다. 또한 다중사용자 간섭(multiuser interference, MUI)으로 인한 영향을 분석하였다. 마지막으로 모의 실험(simulation)을 통해 상기 환경에서의 초광대역 거리 추정의 성능을 평가하였다.

II. 정의

신호의 도착시간 추정의 성능은 최초 lock point의 위치, 검색 구간의 길이, 임계값(threshold) 등 여러 가지 요소들에 의해 결정된다^[3]. 동기식(coherent) 초광대역 거리추정의 성능에 대한 보다 일반적인 이해를 얻기 위해 다음과 같은 단순화된 검색 시나리오를 가정한다. 우선 직렬 검색이 이루어지는 시간 구간이 $t \in [-\lambda_-, \lambda_+]$ 이고 직선경로 신호성분은 $t=0$ 에 위치한다고 가정한다. (그림 1 참조) 그리고 상관기의 출력이 주어진 임계값을 넘어서는 최초의 시간을 직선경로 신호의 도착시간

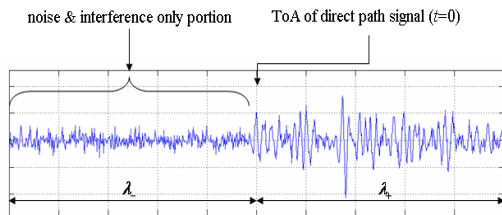


그림 1. 직선경로 신호의 검출문제. 직선경로 신호의 실제 도착시간은 0이며 검색구간은 $[-\lambda_-, \lambda_+]$ 라고 가정한다.

으로 추정한다. 이러한 방식은 [10]에서 제안된 거리추정 알고리즘에서 최초 lock point가 $t=\lambda_+$ 이고 검색구간의 길이가 $\lambda_- + \lambda_+$ 인 경우에 해당한다.

일반적으로 UWB 펄스를 다중경로 채널환경으로 송신할 때, 받은 신호 $r(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r(t) = a_d w(t) + \sum_{k=1}^N a_k w(t - \tau_k) + n(t) + n_m(t) \quad (2)$$

여기서 $0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_N$ 이 만족된다. 이때, 직선경로 신호성분은 $t=0$ 에서 a_d 의 진폭(amplitude)으로 도착하며, k 번째 다중경로 신호성분은 $t=\tau_k$ 에 a_k 의 진폭으로 도착한다고 가정한다. 다중경로의 개수 N 은 알려져 있지 않은 수이다. 신호 $w(t)$ 는 폭이 T_w sec 이고, 에너지가 E_w 인 상관기의 기준신호(template signal)이다. 그리고 잡음(noise) 신호 $n(t)$ 는 전력스펙트럼분포가 σ_N^2 인 AWGN이며 신호 $n_m(t)$ 는 간섭신호를 의미한다. 이때 $r(t)$ 와 기준신호 $w(t)$ 와의 상호상관함수(cross-correlation function)는

$$R_{rw}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t)w(t-\tau)dt = a_d R_w(\tau) + \sum_{k=1}^N a_k R_w(\tau - \tau_k) + R_{nw}(\tau) + R_{n_m}(\tau) \quad (3)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 $R_a(t)$ 는 신호 " $a(t)$ "의 자기상관함수(auto-correlation function)를, 그리고 $R_{ab}(t)$ 는 신호 " $a(t)$ "와 " $b(t)$ " 상호상관함수를 의미한다. 즉,

$$R_a(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)a(t-\tau)dt, \quad (4)$$

$$R_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t)b(t-\tau)dt. \quad (5)$$

로 정의된다. 상기 검색 알고리즘에 의하면, 직선경로신호의 도착시간의 추정값, $\hat{\tau}_d$ 는

$$\hat{\tau}_d = \arg \min_{\tau} [|R_{rw}(\tau)| > \theta], \quad (6)$$

와 같이 결정되며, 여기서 θ 는 임계값을 의미한다.

III. 추정오차의 계산

3.1 단일사용자 환경

직선경로 신호성분의 도착시간이 $t=0$ 라고 가정 하였으므로, 추정오차 ε 은 $\varepsilon = \hat{\tau}_d$ 가 된다. 본 논문에서는 신호의 상관시간(correlation time)보다 큰 추정오차를 편의상 큰 추정오차(large error)로, 그리고 이보다 작은 오차를 작은 추정오차라 명한다. 이때, 추정오차는 큰 추정오차 영역과 작은 추정오차 영역, 즉 $\varepsilon \in [-T_w, T_w]$ 과 $\varepsilon \in [-\lambda_-, -T_w] \cup (T_w, \lambda_+]$ 으로 구분되어질 수 있다. 그리고 큰 추정오차는 다음과 같은 세 가지 부류로 분류될 수 있다.

- Early false alarm error
- Late error
- Missing error

Early false alarm error는 잡음과 간섭신호만이 존재하는 시간 영역에서 발생하는 신호의 검출오류를 의미한다. Late error는 실제 직선경로 신호가 검출되지 않고 다중경로 신호성분을 직선경로 성분으로 잘못 검출하여 발생하는 오차이다. 그리고 missing error는 검색 구간 내에서 신호가 전혀 검출되지 않는 경우를 의미한다. 즉, 상관기의 출력이 주어진 문턱값을 초과하지 않을 때 발생한다. 큰 추정오차를 상기 세 가지 종류로 분류할 때, 오차의 MS 값은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E\{\varepsilon^2\} = P(E_{efa}) \cdot E\{\varepsilon^2|E_{efa}\} + P(E_l) \cdot E\{\varepsilon^2|E_l\} + P(E_m) \cdot \lambda_+^2, \quad (7)$$

여기서 E_{efa} , E_l , 그리고 E_m 은 각각 early false alarm error, late error, missing error가 발생하는 사건을 나타낸다. Missing error가 발생할 경우, $\hat{\tau}_d = \lambda_+$ 라고 가정한다. 즉, 이 경우 최초 lock point의 위치가 direct path의 도착시간으로 추정된다.

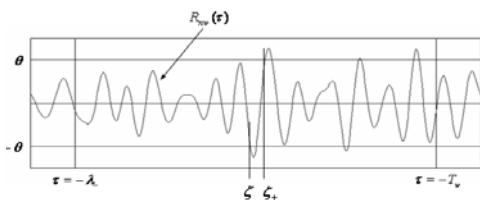


그림 2. Two-sided barrier level-crossing problem. ζ_+ 와 ζ_- 는 각각 one-sided barrier 문제와 two-sided 문제의 최초초과 시간을 의미한다.

Threshold θ 의 값은 거리추정의 정확도에 큰 영향을 미친다. 이 값이 너무 작을 경우, early false alarm error가 발생할 가능성이 높아지며, 반대로 너무 클 경우 late error와 missing error가 발생할 확률이 높아진다. 이 논문에서는 추정오차의 분산을 최소화할 수 있는 최적의 θ 의 값을 찾는 방법에 대해서는 논하지 않는다. 대신 θ 의 값이 다음과 같이 잡음 플로어 (noise floor)에 상대적으로 결정된다고 가정한다.

$$\theta = K_\theta \cdot \sigma_n \sqrt{E_w}, \quad (8)$$

여기서 K_θ 는 상수이다.

단일 사용자 환경에서, early false alarm error의 확률 P_{efa} 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_{efa} = P\left\{ \sup_{\tau \in [-\lambda_-, -T_w]} |R_{rw}(\tau)| > \theta \right\}, \quad (9)$$

$$= P\left\{ \sup_{\tau \in [-\lambda_-, -T_w]} |R_{mw}(\tau)| > \theta \right\}.$$

여기서 $|R_{mw}(-\lambda_-)| < \theta$ 가 만족된다고 가정한다. (9)에서 정의된 확률은 연속적인 (continuous) 랜덤 프로세스 (random process) $R_{mw}(\tau)$ 의 절대값이 시간 구간 $[-\lambda_-, -T_w]$ 에서 임계값 θ 를 넘어서는 확률로 계산될 수 있다. 좀 더 구체적으로 정의한다면 two-sided barrier level-crossing problem [11]에 해당한다. (그림 2 참조) Random process $R_{mw}(\tau)$ 는 평균이 0인 광의의 정상과정(wide-sense stationary random process)으로 가정한다. Level-crossing problem에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 활발하게 이루어져왔으며, 몇 가지 특정 부류의 random process에 대한 결과가 알려져 있다. 그 중의 하나가 평균이 0인 Gaussian random process이다. Level-crossing problem은 적용되는 threshold에 따라 one-sided barrier problem과 two-sided barrier problem으로 나눌 수 있다. 우선 one-sided barrier의 경우, level-crossing probability를 $P_{one-sided}$ 라고 명한다면 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{one-sided} = P\left\{ \sup_{\tau \in [-\lambda_-, -T_w]} R_{rw}(\tau) > \theta \right\},$$

$$= P\left\{ \zeta_+ \leq \lambda_- - T_w \right\}$$

$$= F_{\zeta_+}(\lambda_- - T_w) \quad (10)$$

여기서 ζ_+ 는 random process $R_{nw}(\tau)$ 가 임계값 Θ 에 이르는 데에 걸리는 시간, 즉 최초초과시간 (first passage time)을 의미한다. 최초초과시간 ζ_+ 의 분포는 다음과 같이 근사될 수 있다 [12].

$$F_{\zeta_+}(\zeta) \approx 1 - e^{-\zeta/E(\Phi)}. \quad (11)$$

여기서 Φ 는 임계값에서의 down-crossing 지점과 인접한 다음 up-crossing 지점사이의 시간을 의미한다. 파라미터 Φ 의 평균값은

$$E\{\Phi\} = \frac{2}{\beta_0} \left[1 - Q\left(\frac{\Theta}{\sigma_n \sqrt{E_w}}\right) \right] \cdot \exp\left[\frac{\Theta^2}{2\sigma_n^2 E_w}\right], \quad (12)$$

으로 계산될 수 있으며 [13], 여기서 β_0 는 $R_{nw}(\tau)$ 의 부호 변환점 (zero-crossing)의 개수의 평균을 의미하며 다음과 같이 계산된다.

$$\beta_0 = 2 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 S_{nw}(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} S_{nw}(f) df}}. \quad (13)$$

상호스펙트럼 밀도함수 (cross-spectral density) $S_{nw}(f)$ 는

$$S_{nw}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{nw}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (14)$$

로 정의된다. (10)과 (11)로부터, $P_{one-sided}$ 는

$$P_{one-sided} \approx 1 - \exp\left[-\frac{\lambda_- - T_w}{E\{\Phi\}}\right] \quad (15)$$

로 계산된다

Two-sided barrier problem의 경우, 최초초과시간 ζ 는

$$\zeta = \min[\zeta_+, \zeta_-] \quad (16)$$

로 정의될 수 있으며, 여기서 ζ_- 는 $R_{nw}(\tau)$ 의 임계값 $-\Theta$ 에서의 최초초과시간을 의미한다. 확률변수 ζ 의 분포 (probability distribution)는

$$F_{\zeta}(\zeta) = P\{\min[\zeta_+, \zeta_-] \leq \zeta\} = P\{\zeta_+ \leq \zeta \text{ or } \zeta_- \leq \zeta\} \quad (17)$$

로 표현되며 이는 ζ_+ 와 ζ_- 의 통계적 정보 (statistical information)가 없는 구하기 어렵다. 그러나 ζ_+ 와 ζ_- 가 동일한 분포(identically distributed)를 갖는다고 가정한다면, ζ 의 분포는 다음의 부등식을 만족할 것이다 [14].

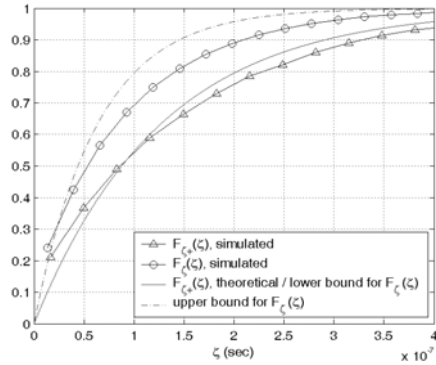


그림 3. 단일사용자 환경에서의 ζ_+ 와 ζ 의 분포 $K_{\Theta}=3.5$ 로 가정하였다.

$$F_{\zeta_+}(\zeta) \leq F_{\zeta}(\zeta) \leq 1 - [1 - F_{\zeta_+}(\zeta)]^2. \quad (18)$$

그림 3은 (18)에서 주어진 $F_{\zeta}(\zeta)$ 의 상위경계 (upper bound)와 하위경계(lower bound), 그리고 모의실험에서 얻어진 ζ 와 ζ_+ 의 분포를 보여준다. 모의실험에서는 다음 식과 같이 나타내지는 Gaussian 함수의 5차미분 과정을 기준신호로 사용하였다 [15].

$$w(t) = \left[-\frac{t^2}{\sqrt{2\pi\sigma^{11}}} + \frac{10t^3}{\sqrt{2\pi\sigma^9}} - \frac{15t}{\sqrt{2\pi\sigma^7}} \right] \cdot \exp\left[-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right], \quad (19)$$

여기서 $\sigma = 101 \times 10^{-12}$ 이다. (그림 4 참조) (9), (11), (15), (18)으로부터, P_{efa} 는 다음 부등식을 만족하게 된다.

$$P_{efa} \geq 1 - \exp\left[-\frac{\lambda_- - T_w}{E\{\Phi\}}\right], \quad (20)$$

$$P_{efa} \leq 1 - \exp\left[-\frac{2(\lambda_- - T_w)}{E\{\Phi\}}\right]. \quad (21)$$

Early false alarm error의 MS 값은

$$E\{\varepsilon^2 E_{efa}\} = \frac{\int_0^{\lambda_- - T_w} (\lambda_- - \zeta)^2 f_{\zeta}(\zeta) d\zeta}{F_{\zeta}(\lambda_- - T_w)} \quad (22)$$

로 계산되며, (18)와 (22)로부터 다음 부등식이 만족된다.

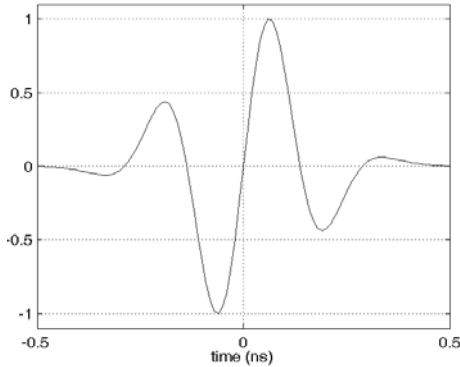


그림 4. 상관기의 기준 신호. Gaussian 함수의 5차미분함수로 모델링되었으며 10dB point가 2GHz와 5.24GHz이다.

$$E\{\varepsilon^2 | E_{efa}\} \geq [\exp[-(\lambda_w - T_w)/E\{\Phi\}] \cdot (-T_w^2 + 2E\{\Phi\}T_w - 2E\{\Phi\}^2) + \lambda_w^2 - 2E\{\Phi\}\lambda_w + 2E\{\Phi\}^2] \cdot [1 - \exp[-(\lambda_w - T_w)/E\{\Phi\}]]^{-1} \quad (23)$$

$$E\{\varepsilon^2 | E_{efa}\} \leq [\exp[-2(\lambda_w - T_w)/E\{\Phi\}] \cdot (-T_w^2 + E\{\Phi\}T_w - \frac{1}{2}E\{\Phi\}^2) + \lambda_w^2 - \frac{1}{2}E\{\Phi\}\lambda_w + E\{\Phi\}^2] \cdot [1 - \exp[-2(\lambda_w - T_w)/E\{\Phi\}]]^{-1} \quad (24)$$

그림 5는 K_θ 의 값에 따른 early false alarm error의 RMS 값을 보여준다.

(11), (12), (13)에 따르면 early false alarm error의 확률은 신호의 RMS 대역폭에 비례한다는 사실을 알 수 있다. Early false alarm error의 확률과 RMS 대역폭의 관계를 확인해보기 위하여, 신호의

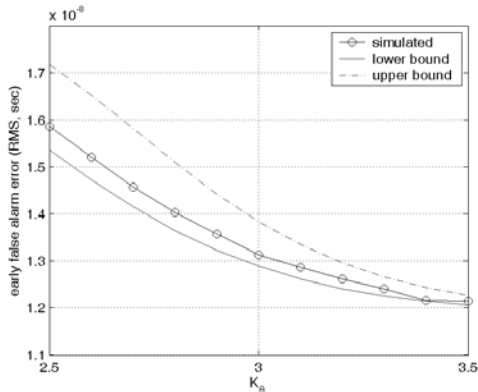


그림 5. K_θ 값에 따른 RMS early false alarm error.

에너지를 normalize한 상태에서 신호의 RMS 대역폭을 변화시켜 보았다. 표 1은 (19)에 주어진 Gaussian 펄스의 σ 에 따른 RMS 대역폭을 보여준다. 대역폭의 변화에 따른 $F_\zeta(\zeta)$ 와 early false alarm error의 MS값의 변화는 그림 6과 그림 7에 나타나 바와 같다.

표 1. Gaussian pulse의 대역폭

σ	RMS 대역폭(GHz)
51×10^{-12}	7.37
76×10^{-12}	4.96
101×10^{-12}	3.74
126×10^{-12}	3.01

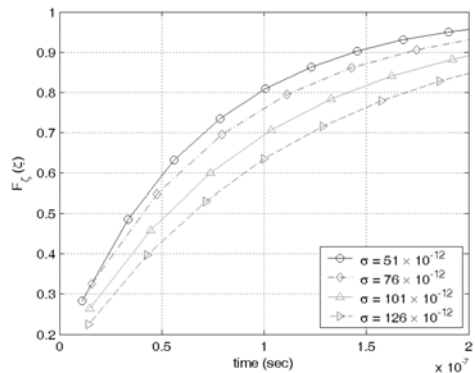


그림 6. Gaussian 함수의 σ 값에 따른 ζ 의 분포. $K_\theta=3.5$ 로 가정하였다.

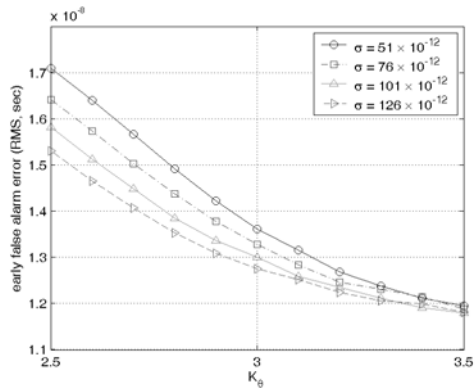


그림 7. K_θ 와 σ 값에 따른 RMS early false alarm error. 기준 신호의 대역폭이 증가할수록 early false alarm의 RMS 값도 증가함을 알 수 있다.

3.2 다중사용자 환경

채널에 2명이상의 사용자가 존재할 경우, 다중사용자 간섭은 직선경로 신호성분의 도착시간을 추정

하는 데에 중요한 영향을 미친다. 본 논문에서는 완전한 전력제어 (perfect power control), 즉 모든 사용자에게 의해 송신된 신호들이 수신단에서 같은 전력으로 수신된다고 가정한다. 상기 가정에 의하면, 채널에 $(N_u + 1)$ 명의 다른 UWB 송신기가 존재할 때, 다중사용자 간섭의 전력 σ_m^2 은

$$\sigma_m^2 \approx \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} R_{n_{m,w}}^2(\tau) d\tau \approx N_u \sigma_a^2, \quad (25)$$

로 근사될 수 있다. 여기서,

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} \left[\sum_{k=1}^N a_k R_w(\tau - \tau_k) \right]^2 d\tau \quad (26)$$

로 정의되며 T_f 는 펄스의 반복주기(pulse repetition time)를 의미한다. 여기서, Gaussian 가정 (Gaussian approximation), 즉 다중사용자 간섭 신호가 평균이 0이고 분산이 σ_m^2 인 wide-sense stationary Gaussian random process 이라는 가정을 적용한다. 이때, 임계값 Θ 는 잡음과 간섭의 강도에 비례하여 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$\Theta = K_\Theta \cdot \left(\frac{\sigma_n \sqrt{E_w} + \sigma_m}{\sqrt{N_i}} \right), \quad (27)$$

여기서 N_i 는 확산 이득 (processing gain)을 얻기 위해 수행하는 integration의 횟수를 의미한다. 여기서 (20)과 (21)에 주어진 P_{efa} 의 상위경계와 하위 경계를 적용할 수 있으며, 그림 8은 모의실험 결과를 보여준다. 주목할 것은 ζ_+ 와 ζ_- 가 비슷한 분포를 갖는다는 것이다. 이는 다중사용자 간섭신호와

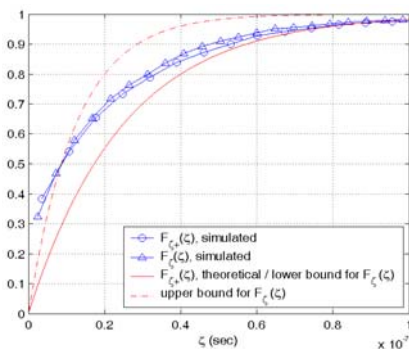


그림 8 8명의 다중사용자가 존재하는 상황에서의 ζ_+ 와 ζ_- 의 분포 $\sigma_n = 0$, $K_\Theta = 3.5$ 로 가정하였다.

상관기의 기준신호 간의 상관계수(correlation coefficient)가 매우 높기 때문에 해석할 수 있다.

Late error의 확률 P_l 과 missing error의 확률 P_m 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_l = P\left\{ \sup_{\tau \in [-\lambda_-, T_w]} |R_{rw}(\tau)| < \Theta \right. \\ \text{and} \left. \sup_{\tau \in [T_w, \lambda_+]} |R_{rw}(\tau)| > \Theta \right\} \quad (28)$$

$$P_m = P\left\{ \sup_{\tau \in [-\lambda_-, \lambda_+]} |R_{rw}(\tau)| < \Theta \right\} \quad (29)$$

이 확률들은 채널의 통계적 특성에 따라 달라지며, 정확한 분석이 쉽지 않다. IV절에서는 전체 RMS 오차에 대한 모의실험 결과를 소개한다.

IV. 모의실험을 통한 성능평가

UWB 신호의 직선경로 성분의 도착시간 추정 성능평가를 위해 Monte-Carlo 모의실험을 실시하였다. 모의실험을 위해 IEEE 802.15.3a 표준화 그룹에서 제안한 채널모델 [16]의 CM4 모드를 사용하였다. 앞서 정의한 파라미터들은 $\lambda_- = \lambda_+ = 20$ ns, $T_f = 200$ ns로 가정하였으며, 인접한 샘플간의 간격은 25ps로 하였다. 상관기의 기준신호는 (19)에 정의된 Gaussian 함수의 5차미분 모델을 사용하였고, SNR은 다음과 같이 정의한다.

$$SNR = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} R_w^2(\tau) d\tau}{T_f E_w \sigma_n^2} \quad (30)$$

그림 9는 단일사용자 환경에서 SNR이 0dB와 -6dB 일 때의 추정오차의 정상화된 도수분포표이다 (normalized histogram). Late error의 빈도는 -6dB 일 때 더 높게 나타나는 반면, early false alarm의 빈도수는 두 경우 모두 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 사용된 임계값 Θ 가 잡음 수준에 비례하여 결정되었기 때문이다. 그림 10은 단일사용자 환경에서 상수 K_Θ 의 값의 변화에 따른 RMS 오차를 보여준다. SNR이 작을 때, RMS 오차는 K_Θ 의 convex 함수로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 K_Θ 가 증가함에 따라, late error와 missing error의 확률은 증가하지만 early false alarm의 확률은 감소하기 때문이다.

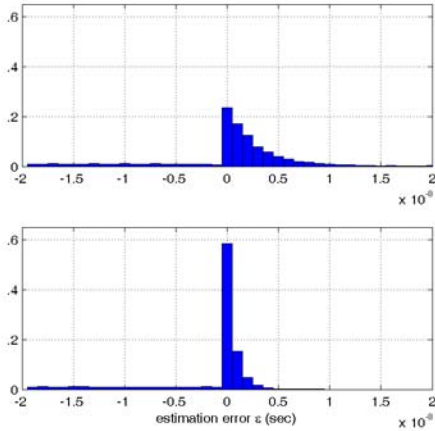


그림 9. SNR이 -6B(위) 일때와 0dB(아래) 일때의 RMS estimation error의 분포 $K_{\theta} = 3.5$ 로 가정하였다.

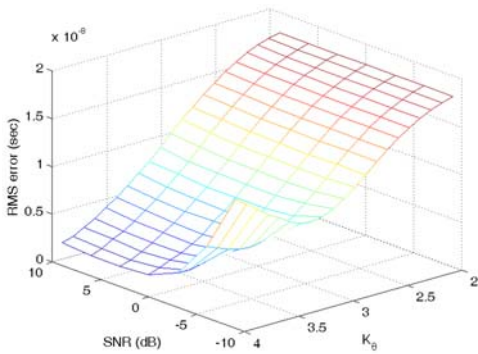


그림 10. 단일사용자 환경에서의 K_{θ} 와 SNR에 따른 RMS 성능.

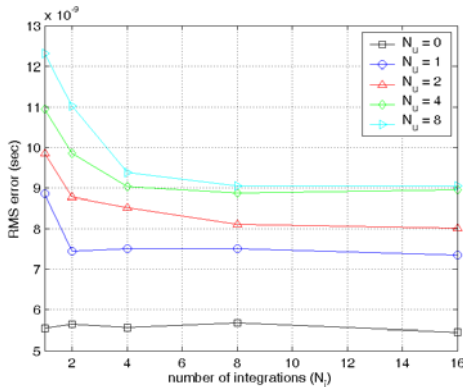


그림 11 다중사용자 환경에서의 ToA estimation 성능. $K_{\theta} = 3.5$, $SNR = 9dB$ 로 가정하였으며, 수신된 모든 신호의 전력은 같은 것으로 가정하였다.

그림 11은 다중사용자 환경에서의 성능을 보여준다. 채널에 존재하는 모든 사용자가 DS-CDMA 방식으로 신호를 송신하고 수신된 모든 신호의 전력

은 동일하다고 가정하였다. 모의실험 결과에서 볼 수 있듯이, 다중사용자 간섭은 신호의 도착시간 추정에 매우 큰 영향을 미친다. 또한 RMS 오차는 여러 개의 펄스를 송신하여 확산이득을 취함으로써 감소될 수 있음을 볼 수 있다.

V. 결론

다중경로 다중사용자 환경에서 직렬 검색 방식에 기반한 직선경로 신호의 도착신호 추정 성능에 대한 대략적인 분석을 개시하였다. Early false alarm error의 MS값의 상위경계과 하위경계를 Gaussian random process의 level-crossing probability 을 계산함으로써 구하였다. 상기 오차의 신호의 대역폭에 대한 의존성은 큰 추정오차와 작은 추정오차간의 tradeoff를 발생시킬 수 있음을 볼 수 있었다. Late error 확률의 계산을 위해서는 또 다른 부류의 random process의 level-crossing probability의 계산을 필요로 하며 본 논문에서는 개시되지 않았다. 다중사용자 환경에서의 성능에 관한 모의실험 결과는 분석결과에 근접하였다. 그러나 분석 과정에서 사용한 Gaussian 가정의 신뢰도는 검증되어야 할 필요가 있다. 또한 최적의 임계값에 대한 연구도 앞으로 진행될 필요가 있다.

참고 문헌

- [1] Z. N. Low, J. H. Cheong, C. L. Law, W. T. Ng, and Y. J. Lee, "Pulse detection algorithm for line-of-sight (LOS) UWB ranging applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 63-67, 2002.
- [2] Woo Cheol Chung and Dong Ha, "An accurate ultra wideband (UWB) ranging for precision asset location," in *Proc. UWBST 2003*, Nov. 2003, pp. 389-393.
- [3] Joon-Yong Lee and Robert A. Scholtz, "Ranging in dense multipath environments using an UWB radio link," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 9, pp. 1677-1683, Dec 2002.
- [4] B. Denis, J. Keignart, and N. Daniele, "Impact of NLOS propagation upon ranging precision in UWB systems," in *Proc.*

UWBST 2003, Nov. 2003, pp. 379-383.

[5] Sinan Gezici, Zhi Tian, Georgios B. Giannakis, Hisashi Kobayashi, Andreas F. Molisch, H. Vincent Poor, and Zafer Sahinoglu, "Localization via ultra-wideband radios," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 70-84, Jul. 2005.

[6] Kegen Yu and Ian Oppermann, "UWB positioning for wireless embedded networks," in *Proc. RAWCON 2004*, Sep. 2004, pp. 459-462.

[7] Robert N. McDonough and A. D. Whalen, *Detection of Signals in Noise*, Academic Press, Burlington, MA, 1995.

[8] J. Zhang, R. A. Kennedy, and T. D. Abhayapala, "Cramer-Rao lower bounds for the time delay estimation of UWB signals," in *Proc. ICC 2004*, Jun. 2004, vol. 6, pp. 3424-3428.

[9] John P. Ianniello, "Time delay estimation via cross-correlation in the presence of large estimation errors," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 31, no. 4, pp. 369-375, Dec 1982.

[10] R. A. Scholtz and Joon-Yong Lee, "Problems in modeling UWB channels," in *Proc. 36th Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, Nov. 2002, pp. 706-711.

[11] Ian F. Blake and William C. Lindsey, "Level-crossing problems for random processes," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 19 no. 3, pp. 295-315, May 1973.

[12] James R. Rice, "First-occurrence time of high-level crossings in a continuous random process," *Jour. Acoust. Soc. Amr.*, vol. 39, no. 2, pp. 323-335, 1966.

[13] S. O. Rice, "Mathematical analysis of random noise," *Bell System Tech. J.*, vol. 23, pp. 282-332, 1945.

[14] H. A. David and H. N. Nagaraja, *Order Statistics*, Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.

[15] Hongsan Sheng, P. Orlik, A.M. Haimovich, L.J. Cimini, and Jinyun Zhang, "On the spectral and power requirements for ultra-wideband transmission," in *Proc. ICC 2003*, May 2003, vol. 1, pp. 738-742.

[16] Jeff Forester, "Channel modeling sub-committee report (final)," Tech. Rep. P802-15-02/368r5-SG3a, IEEE P802.12 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs), Dec. 2002.

이 준 용 (Joon-Yong Lee)

정회원



1993년 2월 홍익대학교 전자공학(공학사)

1997년 5월 University of Southern California(공학석사)

2002년 5월 University of Southern California(공학박사)

2002년 9월~현재 한동대학교

전산전자공학부 조교수

<관심분야> UWB 위치인식 시스템, UWB 채널모델링

유 성 열 (Sungyul Yoo)

준회원



2005년 2월 한동대학교 전산 전자공학부(공학사)

2005년 3월~현재 한동대학교 UWB 통신연구실 연구원

<관심분야> UWB 위치인식, UWB 거리추정 성능평가