

대역제한 백색잡음 재밍환경에서 GPS L1 C/A 신호를 위한 유효 반송파 대 잡음 전력비 추정치의 CRLB

Cramer-Rao Lower Bound of Effective Carrier-to-noise Power Ratio Estimation for a GPS L1 C/A Signal under Band-limited White Noise Jamming Environments

유 승 수, 염 동 진, 지 규 인, 김 선 용*
(Seungsoo Yoo¹, Dong-Jin Yeom², Gyu-In Jee¹, and Sun Yong Kim^{1,*})

¹Division of Electronics Engineering, Konkuk University

²Agency for Defense Development

Abstract: In this paper, we derive the CRLB (Cramer-Rao Lower Bound) of effective carrier-to-noise power ratio (C/N_0) estimation for a GPS (Global Positioning System) L1 C/A (Coarse/Acquisition) signal under band-limited white noise jamming environments. The quality of a received GPS signal is commonly described in terms of its C/N_0 , implying that the noise is white and thus can be described by scalar noise density. However, if some intentional interference is received to a victim GPS receiver, then the C/N_0 is no longer the efficacious performance indicator. The correct and straightforward measurement to analyze the receiving situation is the effective C/N_0 . In this paper, we consider a band-limited white noise jamming whose bandwidth is 2MHz and is the same as one of the first null-to-null bandwidth of the GPS L1 C/A signal.

Keywords: GNSS, GPS, band-limited white noise jamming, carrier-to-noise power ratio, Cramer-Rao lower bound, effective carrier-to-noise power ratio

1. 서론

지상으로부터 약 2만Km 상공을 선회하는 GPS (Global Positioning System) 위성으로부터 지상에 위치한 GPS 수신기에 도달하는 GPS L1 C/A (Coarse/Acquisition) 신호는 약 -130dBm으로 상당히 미약하다. 일반적인 실외 수신환경에서 GPS를 비롯한 대부분의 GNSS (Global Navigation Satellite System)는 이를 DS/SS (Direct Sequence/Spread Spectrum) 기법을 사용한 처리이득(processing gain)으로 극복한다. 그러나 의도적 간섭, 즉 재밍(jamming)이 시도되는 경우 GNSS 수신기의 성능을 크게 열화된다[1,2].

특히 GPS 관련기술은 농업계획, 농지정리, 토양표본분석, 트랙터 유도, 수확관리 등 농업분야, 해양탐색 및 구조, 선박항행관리, 수중탐사, 압초 확인 및 전파 등 해양수산분야, 지상탐색 및 구조, 산불감시, 지진예측, 태풍추적, 홍수예측 등 공공안전 및 재난관리 분야, 차량혼선방지, 보수

구간관리, 무인차량주행, 차량항법 등 교통 분야, 음성 및 데이터 유무선 통신, 금융 등 사회 전 분야의 핵심기반 기술로 활용되고 있다. 2014년 현재 예측되는 2019년 GPS 관련시장은 2987억불 규모로 성장할 것으로 예측되며, 이 추이는 더욱 가속될 것으로 예상된다. 그러나 이와 같은 GNSS 기술향상과 시장 확대와 더불어 재밍위협은 꾸준히 증가하고 있다[3,4].

재밍은 크게 단순재밍, 재방송재밍(repeat-back jamming), 기만재밍(spoofing)으로 구분할 수 있다. 기만재밍은 GNSS 수신기의 위치해를 기만기가 의도하는 위치로 착각시키는 재밍으로, 재밍이 성공할 경우 다른 재밍에 비해 GNSS 수신기의 사용자측에 큰 피해를 줄 수 있다. 그러나 기만재밍이 성공하기 위해서는 정교한 기만기 설계가 필수적이다. 재방송재밍은 GNSS 수신기 근처에 위치한 재방송재밍기에서 수신한 GNSS 신호를 그대로 재방송하는 재밍방법으로 GNSS 수신기의 위치를 재방송재밍기 근처로 오인시키는 재밍이다. 재방송재밍은 기만재밍에 비해 GNSS RF (Radio Frequency) 수신기와 증폭기, 재방송 안테나만으로 쉽고 저렴하게 구성할 수 있다. 그러나 재방송재밍이 완벽히 성공한 경우 재방송재밍기 위치가 쉽게 노출되는 단점을 갖고 있다. 단순재밍은 연속파(continuous wave) 재밍, 펄스(pulse) 재밍, 대역제한 백색잡음(band-limited white noise, BLWN) 재밍 등이 있다. 단순재밍은 GNSS 수신기의 정상적인 수신을 방해하기 위한 재밍으로서 기만 및 재방송재밍에 비해 사용자측에 주는 피해는 적지만 간단하게 GNSS 수신기를

* Corresponding Author

Manuscript received June 3, 2014 / revised June 9, 2014 / accepted June 13, 2014

유승수, 지규인, 김선용: 건국대학교 전자공학부

(kelvin@konkuk.ac.kr/gijee@konkuk.ac.kr/kimsy@konkuk.ac.kr)

염동진: 국방과학연구소(djyeom@add.re.kr)

※ 본 논문은 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 위성항법 특화연구센터 사업, 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2012R1A1A 2004944).

무력화시킬 수 있기 때문에 최근 빈번하게 발생되고 있다. 단순재밍 가운데 연속과 재밍은 NF (Notched Filtering) 기법 등을 사용해 주파수 축에서 해당 성분을 제거함으로써 완화할 수 있으며, 펄스 재밍은 비움(blanking) 기법을 통해 쉽게 제거할 수 있다. 그러나 BLWN 재밍의 경우 잡음 대역폭 등 고려해야 하는 요소가 많다[5,6]. 본 논문은 여러 재밍 가운데 단순재밍의 한 종류인 BLWN 재밍에 초점을 맞춘다.

BLWN 재밍환경하에서 재밍 검출 및 식별을 위한 반송파와 신호 대 잡음 전력비(carrier-to-noise power ratio, C/N_0)에 대한 대표적인 연구결과는 [7]과 같다. [7]에서는 상관전(pre-correlation) 및 상관후(post-correlation) C/N_0 추정에 따른 체계적인 신호모형을 제시했으며, 이로부터 재밍환경에 유용한 새로운 지표로서 유효(effective) C/N_0 를 제시하고, 이에 대한 추정오차를 분석하였다. 추정기법에 대한 대표적인 성능지표 가운데 하나는 [8]에서 보인 CRLB (Cramer-Rao Lower Bound)이다. CRLB는 한 추정문제에 있어 하한한계에 대한 이론적 기준을 제시하며, 단순한 추정문제에 있어서는 최적(optimal) 추적기법의 설계도구로도 활용할 수 있다. CRLB는 오래전부터 많은 추정문제의 성능 지표로 다양하게 활용되고 있으며, 특히 이진위상천이(binary phase shift keying) 신호의 신호 대 잡음비(signal-to-noise power ratio, S/N) 추정에 대한 CRLB는 [9]에서 다루어진 바 있다. [9]에서는 신호와 가산성백색정규잡음이 수신되는 경우에 대한 S/N 추정에 따른 CRLB를 유도하였다. 이후 [10]에서는 [9]에서 유도한 CRLB를 GPS L1 C/A 신호에 대해 적용하였으며, 이를 통해 대표적인 C/N_0 추정기법인 NWPR (Narrow-band and Wide-band Power Ratio) 기법이 최적 C/N_0 기법에 가장 근접함을 모의실험을 통해 보였다. 본 논문에서는 [9]과 [10]의 결과를 확장해 BLWN 재밍환경 하에서 C/N_0 추정에 따른 CRLB를 유도하고, 관측 길이와 유효 C/N_0 에 따른 CRLB를 보이고, 이를 분석한다.

II. 수신신호모형과 유효 반송파 대 잡음 전력비 추정치의 CRLB

본 논문에서는 BLWN 재밍신호에 초점을 맞추기 위해 단일 GPS L1 C/A 신호만 고려하며, GPS 위성과 수신기 사이의 지연시간과 반송파 주파수는 정확히 추정되었고, 다중 경로영향 등의 수신신호 왜곡은 없다고 가정한다. 이를 바탕으로 한 기저대역 수신신호모형은 식 (1)과 같다.

$$r(t) = s(t) + j(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서 $s(t)$ 는 식 (2)와 같은 수신신호, $j(t)$ 는 식 (3)과 같은 대역제한 정규잡음 재밍신호, $n(t)$ 는 전력스펙트럼밀도가 $N_0/2$ 인 복소가산성백색정규잡음(complex additive white Gaussian noise)을 각각 뜻한다. 일반적으로 $j(t)$ 와 $n(t)$ 는 서로 독립으로 가정할 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{C_S} \cdot d(t) \cdot c(t) \cdot \cos(\theta) \quad (2)$$

여기서 C_S 는 수신된 신호의 전력, $d(t)$ 는 GNSS 항법 데이터, $c(t)$ 는 의사잡음(pseudo-random noise) 신호, θ 는 GNSS 위성과 수신기의 위상오차이다. 본 논문에서 항법 데이터 $d(t)$ 는 +1과 -1의 발생확률이 동일한 확률변수로 가정한다.

$$j(t) = \sqrt{C_J} \cdot F^{-1}[J(f)] \quad (3)$$

여기서 C_J 는 수신된 재밍신호의 전력, $F^{-1}[\cdot]$ 는 역푸리에(inverse Fourier) 변환, $J(f)$ 는 식 (4)와 같은 대역제한 정규잡음 재밍신호의 정규화된 주파수응답이다.

$$J(f) = \begin{cases} \frac{1}{\beta_J}, & f_J - \beta_J/2 \leq f \leq f_J + \beta_J/2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 β_J 와 f_J 는 각각 BLWN 재밍신호의 대역폭과 중심 주파수이다. 이 재밍신호는 [7]처럼 역확산 후 대역이 부호율(spreading code rate)에 따라 확산한다. 본 논문에서는 GPS L1 C/A 신호의 주엽대역폭(main-lobe bandwidth or null-to-null bandwidth)을 고려해 $\beta_J = 2\text{MHz}$ 인 경우를 고려한다.

수신기는 의사거리측정과 GNSS 항법데이터 추정을 위해 역확산 또는 상관(correlation)을 수행하며, 동위상과 직교위상 상관값은 각각 식 (5)와 식 (6)과 같다.

$$I_k = \frac{1}{T} \int_{(k-1)T}^{kT} r(t) \cdot c(t - kT_C) \cdot \cos(\hat{\theta}) dt \quad (5)$$

$$Q_k = \frac{1}{T} \int_{(k-1)T}^{kT} r(t) \cdot c(t - kT_C) \cdot \sin(\hat{\theta}) dt \quad (6)$$

여기서 T 는 동기적상(coherent integration)길이, T_C 는 의사잡음신호의 칩(chip) 주기, $\hat{\theta}$ 는 수신기에서 추정된 위상이다.

[7]처럼 재밍신호가 인가된 경우 일반적인 C/N_0 보다 유효 C/N_0 가 더 명확한 성능 판단 근거이다. [7]에서 정리한 유효 C/N_0 는 식 (7)과 같다.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{C_S/N_0} + \frac{C_J/C_S}{QR_C}} \quad (7)$$

여기서 C_S/N_0 는 재밍이 인가되지 않은 경우 식 (7)과 같은 C/N_0 이고, C_J/C_S 는 재밍 대 신호 전력 비, Q 는 식 (8)과 같은 재밍신호에 대한 민감도를 나타내는 요소(quality factor), $R_C = 1/T_C$ 인 확산부호율이다. Q 값이 클수록 재밍에 강인한 신호임을 뜻하며, 대역제한 정규잡음 재밍에 대한 Q 값은 식 (8)처럼 정의된다[7].

$$Q = \frac{1}{\frac{R_C}{\beta_J} \int_{f_J - \beta_J/2}^{f_J + \beta_J/2} S(f) df} \quad (8)$$

여기서 $S(f)$ 는 신호의 정규화된 전력스펙트럼밀도이다. 식 (7)과 식 (8)처럼 BLWN 재밍은 신호전력의 밀도가 높은 대역에 위치할 경우 수신기의 큰 오차를 유발할 수 있다[7].

본 논문에서는 수신기에서 GPS L1 C/A 신호는 완벽히 추적되고 있어 주파수와 위상 오차는 없으며, 비트동기도 완벽하다고 가정한다. 이 가정 하에서 GPS L1 C/A 신호는 50bps로 항법정보를 전송하므로, [1]에서 언급한 바와 같이 최대 20ms 동기적산이 가능하다(즉, $T=20$). 이런 가정을 바탕으로 L 개의 데이터 비트를 활용해 $(C/N_0)_{eff}$ 를 추정할 때 식 (5)의 동위상 상관값은 식 (9)처럼 다시 쓸 수 있다.

$$X_{i,k} = A_i + \zeta_{i,k} + \eta_{i,k} \quad (9)$$

여기서 $i=1,2,\dots,L$ 인 관측하는 데이터 비트의 색인, $k=1,2,\dots,20$ 인 상관 값의 색인, A_i 는 식 (5)로부터 유도할 수 있는 신호의 항법데이터로서 앞서 언급한 가정에 의해 $+A$ 와 $-A$ 는 각각 발생확률이 0.5인 확률변수, $\zeta_{i,k}$ 와 $\eta_{i,k}$ 는 서로 독립인 각각 상관 후 BLWN 재밍과 가산성백색정규잡음을 뜻한다. 본 논문에서는 $\zeta_{i,k} \sim N(0, \sigma_\zeta^2)$, $\eta_{i,k} \sim N(0, \sigma_\eta^2)$ 인 확률변수로 가정한다. 여기서 $N(\mu, \nu^2)$ 는 평균 μ , 분산 ν^2 인 정규확률밀도함수를 뜻한다. 이로부터 식 (7)의 유효 C/N_0 를 식 (10)처럼 다시 쓸 수 있다.

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{eff} = \frac{1}{\frac{\sigma_\eta^2}{A^2} + \left(\frac{1}{QR_C} \cdot \frac{\sigma_\zeta^2}{A^2}\right)} = \alpha \quad (10)$$

식 (9)의 관측값을 관측벡터 $\mathbf{X} = \{X_{i,k}\}_{i=1,\dots,L,k=1,\dots,20}$ 으로 정리하면 그 결합 확률밀도함수를 식 (11)처럼 정리할 수 있다.

식 (10)과 같은 유효 C/N_0 를 추정하기 위한 미지 매개변수 벡터 $\theta = [A \ \sigma_\zeta^2 \ \sigma_\eta^2]^T$, 여기서 $[\cdot]^T$ 는 전치행렬을 뜻한다. 식 (10)과 추정벡터를 바탕으로 CRLB를 구하기 위한 임의함수 $g(\theta)$ 는 식 (12)와 같다.

$$g(\theta) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\frac{\sigma_\eta^2}{A^2} + \left(\frac{1}{QR_C} \cdot \frac{\sigma_\zeta^2}{A^2}\right)} \right) \quad (12)$$

식 (12)로부터 유효 C/N_0 추정을 위한 CRLB는 식 (13)처럼 유도할 수 있다.

$$CRLB \left\{ \left(\frac{C}{N_0}\right)_{eff} \right\} = \frac{\partial}{\partial \theta} g(\theta) \cdot \Gamma^{-1}(\theta) \cdot \left[\frac{\partial}{\partial \theta} g(\theta) \right]^T \quad (13)$$

식 (13)에서 $\frac{\partial g(\theta)}{\partial \theta}$ 는 식 (14)와 같고, $I(\theta)$ 는 Fisher 정보행렬(Fisher's information matrix)로서 식 (15)와 같다.

$$\frac{\partial g(\theta)}{\partial \theta} = \left[\frac{20}{A \cdot \ln 10} \quad \frac{-10R_C Q}{\sigma_\zeta^2 \ln 10} \quad \frac{-10}{\sigma_\eta^2 \ln 10} \right] \quad (14)$$

$$p(\mathbf{X}) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma_\zeta\sigma_\eta} \right)^{20L} \prod_{i=1}^L \left[\frac{\exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{20} (X_{i,k} - A)^2 \left(\frac{1}{\sigma_\zeta^2} + \frac{1}{\sigma_\eta^2}\right)\right\} + \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{20} (X_{i,k} + A)^2 \left(\frac{1}{\sigma_\zeta^2} + \frac{1}{\sigma_\eta^2}\right)\right\}}{2} \right] \quad (11)$$

$$f(\theta) = -20L \cdot \ln(2\pi\sigma_\zeta\sigma_\eta) - \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^{20} \left(\frac{X_{i,k}^2}{2\sigma_\zeta^2} + \frac{X_{i,k}^2}{2\sigma_\eta^2} \right) - 10LA^2(\sigma_\zeta^{-2} + \sigma_\eta^{-2}) + \sum_{i=1}^L \ln \left[\cosh \left\{ A \sum_{k=1}^{20} X_{i,k} (\sigma_\zeta^{-2} + \sigma_\eta^{-2}) \right\} \right] \quad (16)$$

$$I(\theta) = \begin{bmatrix} -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial A^2}\right) & -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial A \partial \sigma_\zeta^2}\right) & -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial A \partial \sigma_\eta^2}\right) \\ -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial \sigma_\zeta^2 \partial A}\right) & -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial \sigma_\zeta^2 \partial \sigma_\zeta^2}\right) & -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial \sigma_\zeta^2 \partial \sigma_\eta^2}\right) \\ -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial \sigma_\eta^2 \partial A}\right) & -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial \sigma_\eta^2 \partial \sigma_\zeta^2}\right) & -E\left(\frac{\partial^2 f(\theta)}{\partial \sigma_\eta^2 \partial \sigma_\eta^2}\right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 $f(\theta)$ 는 $f(\theta) = \ln p(\mathbf{X}; \theta)$ 인 식 (11)의 대수우도함수(log-likelihood function)이며, 이를 적용해 정리하면 식 (16)과 같다. 여기서 $\ln[\cdot]$ 는 자연로그를 뜻한다.

식 (15)를 식 (16)을 적용해 정리하면 식 (17)과 같다.

$$I(\theta) = \frac{L}{(\sigma^2)^2} \begin{bmatrix} 20\sigma^2 - f(\alpha)\sigma^2 & Af(\alpha) & Af(\alpha) \\ Af(\alpha) & 10 - \frac{A^2}{\sigma_\zeta^2} f(\alpha) & \frac{10 - A^2}{\sigma^2} f(\alpha) \\ Af(\alpha) & \frac{10 - A^2}{\sigma^2} f(\alpha) & 10 - \frac{A^2}{\sigma_\eta^2} f(\alpha) \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 $f(\alpha)$ 는 식 (18)과 같고, $\sigma^2 = (\sigma_\zeta^2 + \sigma_\eta^2)$ 이다.

$$f(\alpha) = \frac{\exp\{20\alpha\}}{\sqrt{40\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u^2 \exp\left\{-\frac{u^2}{40}\right\}}{\cosh(u\sqrt{2\alpha})} du \quad (18)$$

만약 $\sigma_\zeta^2 = 0$ 이라면, 식 (10)은 [1]과 [7]에서 제시한 일반적인 C/N_0 와 같으며, 여기에 $T=1$ 인 경우를 함께 고려하면 [9]에서 보인 단순한 이진위상천이 변조방식을 사용한 때의 CRLB와 동일한 결과를 얻을 수 있다. 본 논문에서 유도한 식 (13)의 CRLB는 [10]에서 유도한 CRLB와 비슷한 구성을 보인다. 그러나 본 논문에서는 식 (9)처럼 BLWN 재밍을 고려하고 있어 식 (14)처럼 추정을 위한 함수의 구조에서 [10]에서 보인 성분에서 BLWN과 관련된 항이 추가된 형태를 갖는다.

L 에 따른 CRLB를 보이면 그림 1과 같다. 그림 1에서 'BLWN free'는 BLWN 재밍이 없는 경우이며, 이는 [10]에서 고려한 설정과 동일한 경우를 뜻한다. 그림 1에서 보인 것처럼 BLWN 재밍의 유무와 무관하게 L 이 클수록 CRLB가 낮음을 확인할 수 있으며, L 이 50과 100으로 GPS L1 C/A 신호의 경우 0.5초와 1.0초 데이터를 관측했을 때 BLWN이 없는 경우는 유효 C/N_0 에 따라 최대 약 $4(\text{dB})^2$, BLWN 재밍이 있는 경우 최대 약 최대 약 $6(\text{dB})^2$ 의 이득이 있음을 확인할 수 있다. 이는 관측 길이가 길어질수록 더 정확한 추정이 가능함을 뜻한다. 또한 BLWN이 없는 경우에 비해 BLWN 재밍이 있는 경우 유효 C/N_0 추정에

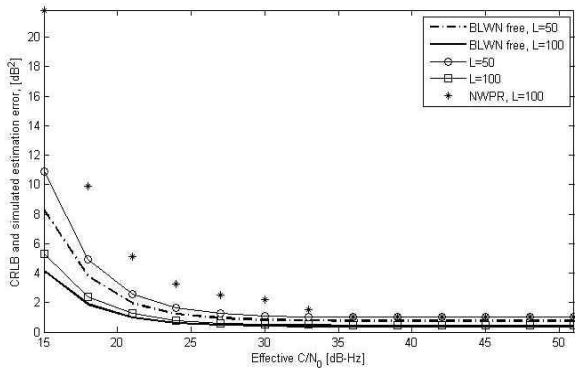


그림 1. L 에 따른 CRLB와 대표적인 C/N_0 추정기법인 NWPR 기법에 대한 모의실험 결과 ($f_J = 0\text{Hz}$, $\beta_J = 2\text{MHz}$, and $Q = 2.2$)

Fig. 1. CRLB according to L and a simulation result of NWPR method which is the representative C/N_0 estimation scheme ($f_J = 0\text{Hz}$, $\beta_J = 2\text{MHz}$, and $Q = 2.2$)

있어 약 $1 - 2(\text{dB})^2$ 의 성능차가 나타남을 확인할 수 있다. 이는 유효 C/N_0 가 15dB-Hz인 경우 유효 C/N_0 에서 BLWN 재밍신호가 차지하는 비중이 커짐에 따라 신호에 중심주파수 인근 신호 성분을 집중해 왜곡시키기 때문이다.

그림 1에 ‘NWPR, $L=100$ ’으로 표현된 결과는 [10]에서 최적 C/N_0 기법에 가장 가까운 것으로 알려진 NWPR 기법에 대한 모의실험 결과이다. 모의실험을 위해 대부분의 환경은 동일하게 적용하였으며, 각 JSR에 따른 결과 도출을 위해 10^3 회 수행하였으며, $L = 100$ 으로 설정하였다. [10]에서 언급한 바와 유사하게 NWPR 기법이 유효 C/N_0 가 35dB-Hz 이상인 경우 이상적인 CRLB에 거의 근접하며, 유효 C/N_0 가 35dB-Hz 이하인 경우 이상적인 CRLB에서 크게 벗어남을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 BLWN 재밍환경에서 기저대역 수신신호 모형을 정리하였으며, 이를 바탕으로 상관 후 모형을 제시하고, 이로부터 고려한 재밍환경 하에서 상관 값의 결합 확률밀도함수를 보였다. 그리고 유도한 결합 확률밀도함수를 바탕으로 BLWN 재밍환경하에서 유효 C/N_0 추정치의 CRLB를 유도하였다. 유도한 CRLB는 BLWN 재밍신호의 전력이 상당히 미약할 때 [10]에서 제시한 CRLB와 거의 유사함을 확인할 수 있다. 추후에는 본 논문에서 유도한 CRLB를 바탕으로 기존에 제안된 다양한 반송파 대 잡음 전력비 추정기법의 성능을 비교분석할 예정이다.

REFERENCES

[1] E. D. Kaplan and C. J. Hegarty, *Understanding GPS Principles and Applications, 2nd Edition*, Artech House, Norwood, MA, 2006.
 [2] D. W. Lim, J. M. Kang, and M. B. Heo, “Hybrid TDOA/AOA localization algorithm for GPS jamming,”

Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean), vol. 20, no. 1, pp. 101-105, Jan. 2014.

[3] J. Coffed, “The threat of GPS jamming: The risk to an information utility,” *Report of EXELIS*, Jan. 2014. Online Available: http://www.exelisin.com/solutions/signalsentry/Documents/ThreatOfGPSJamming_February2014.pdf
 [4] GPS World Staff, “LBS market worth \$39.87 billion by 2019,” *GPS World: The Business & Technology of GNSS*, Apr. 2014. Online Available: <http://gpsworld.com/lbs-market-worth-39-87-billion-by-2019/>
 [5] L. Scott, “Spoofs, proofs & jamming: Towards a sound national policy for civil location and time assurance,” *Inside GNSS Magazine*, vol. 7, no. 5, pp. 42-53, Sep.-Oct. 2012.
 [6] M. Jones, “The civilian battlefield: Protecting GNSS receivers from interference and jamming,” *Inside GNSS Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 40-49, Mar.-Apr. 2011.
 [7] J. W. Betz, “Effect of partial-band interference on receiver estimation of C/N_0 : Theory,” in *Proc. of the 2001 National Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION/NTM 2001)*, Long Beach, CA, pp. 817-828, Jan. 2001.
 [8] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Volume I Estimation Theory*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1993.
 [9] N. S. Alagha, “Cramer-Rao bounds of SNR estimates for BPSK and QPSK modulation signals,” *IEEE Communications Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 10-12, Jan. 2001.
 [10] K. Ramasubramanian, “Performance bounds for carrier-to-noise ratio estimation in GPS receivers,” in *Proc. of the 2006 National Technical Meeting of The Institute of Navigation (ION/NTM 2001)*, Monterey, CA, pp. 953-957, Jan. 2006.



유 승 수

2003년 건국대학교 전자정보통신공학부 졸업. 2005년 동 대학원 공학석사. 2010년 동 대학원 공학박사. 2010년~2011년 건국대 2단계 BK21 위성항법시스템 수신기 기술 연구팀 박사후 연구원. 2011년~현재 건국대학교 전자정보통신공학부 조교수. 관심분야는 통계학적 신호처리, GNSS 수신기 신호처리, GNSS 항재밍 신호처리 등.



염 동 진

1991년 충남대학교 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학원 공학석사. 1993년~현재 국방과학연구소 책임연구원. 관심분야는 능동 위상배열 레이더 시스템, 신호처리 등.



지규인

1982년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1984년 동 대학원 제어계측공학과 공학석사. 1989년 Case Western Reserve University 공학박사. 1992년~현재 건국대학교 전자정보통신공학부 교수. 관심분야는 GPS/INS 결합방법, GPS 수신기 신호처리, 무선측위, Software GPS, GPS 항재밍 신호처리 등.



김선용

1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(최우등). 1993년 동 대학원 공학석사. 1995년 동 대학원 공학박사. 1996년~2001년 한림대학교 정보통신공학부 조교수. 2001년~현재 건국대학교 전자정보통신공학부 교수. 관심분야는 통계학적 신호처리, 이동통신시스템, 통신이론, GPS 항재밍 신호처리 등.