

처프 신호를 이용한 무선측위 정밀도 향상 기법

김기태*, 김광열*, 신요안^o

A Technique for Improving Wireless Localization Precision Using Chirp Signals

Ki-tae Kim*, Kwang-wul Kim*, Yoan Shin^o

요약

본 논문에서는 전자전 환경의 처프 대역 확산 스펙트럼 시스템에서의 아군 송수신기와 적군 재밍 모델을 고려한다. 이 때, 재밍에 강인한 처프 신호의 처리 이득 및 프리앰블의 상관 특성을 활용하여, 낮은 아날로그-디지털 변환기 샘플링율에서도 우수한 무선측위 성능을 위한 레인징 알고리즘을 설계하고, 이를 전형적인 무선측위 알고리즘에 적용한다. 다양한 재밍 채널 환경에 대한 모의실험을 통해 제안된 무선측위 방식의 성능을 검증한다.

키워드 : 처프 대역 확산, 처프 기반 레인징, 아날로그-디지털 변환기, 샘플링율, 오버샘플링, 무선측위, Fang 알고리즘

Key Words : chirp spread spectrum, chirp-based ranging, analog-to-digital converter, sampling rate, oversampling, wireless localization, Fang algorithm

ABSTRACT

In this paper, we consider a chirp spread spectrum (CSS) transceiver and jamming model and design an algorithm for chirp-based wireless localization precision enhancement in an electronic warfare

environment. The algorithm uses the processing gain of the chirp band spread spectrum and the correlation characteristics of the preamble to improve the ranging performance from a low sampling rate converter, and then applies it to a typical wireless localization algorithm and analyzes its performance through simulations in various environments.

I. 서론

무선측위 시스템에서 사용되는 거리 측정, 즉 레인징 (Ranging)의 정밀도를 향상하기 위해서는, 아날로그-디지털 변환기 (Analog-to-Digital Converter; ADC)의 성능이 중요한 역할을 한다. 이 때, ADC의 성능을 결정하는 요소로서 분해능 (Resolution)과 샘플링율 (Sampling Rate)이 있다. 레인징 성능은 일반적으로 사용되는 ADC의 샘플링율이 높을수록 향상되나, 이를 얻기에는 기술적으로 어렵거나 큰 비용이 수반된다¹⁾.

한편, 처프 대역 확산 (Chirp Spread Spectrum System; CSS) 시스템은 시간에 따라 순간 주파수를 변화시키는 처프 신호를 사용하며, 저복잡도로 다중 경로 페이딩 영향을 줄이고 적은 에너지 소비로 대역폭을 확장할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에, 레이더 뿐만 아니라 군용 및 상용 무선통신 시스템에서도 다양하게 활용되고 있다²⁾.

본 논문에서는 전자전 환경에서 재밍에 강인한 특성을 갖는 처프 신호를 활용하여 적군의 재밍 환경에서도 아군의 단말기의 위치 추정이 가능하고, 동일한 ADC 샘플링율에서도 신호처리 기법을 통해 오버샘플링 (Oversampling)된 효과를 얻을 수 있는 레인징 기법을 제안한다. 그리고 이 제안된 레인징 방식을 전형적인 TDoA (Time Difference of Arrival) 무선측위 방식 가운데 하나인 Fang 알고리즘³⁾에 적용하여, AWGN (Additive White Gaussian Noise) 채널과 적군 재밍 (Pulse Jamming), 톤 재밍 (Tone Jamming) 채널 환경에서 모의실험을 통해 무선측위 성능을 검증한다.

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2023-RS-2023-00258639)

• First Author : (ORCID:0009-0003-6004-0338) School of Electronic Engineering, Soongsil University, ktae96@soongsil.ac.kr, 학생(석사), 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4722-6387) School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 정교수, 중신회원

* (ORCID:0000-0003-1728-3230) Senior Engineer, SOLiD WiNTECH, kimky@solidwt.co.kr, 공학박사, 정회원

논문번호 : 202310-112-B-LU, Received October 25, 2023; Revised November 4, 2023; Accepted November 4, 2023

II. 시스템 모델

2.1 CSS 통신 시스템 모델

일반적으로 디지털 CSS 통신 시스템은 전송 방식에 따라 직접 변조 (Direct Modulation; DM) 방식과 이진 직교 변조 (Binary Orthogonal Keying; BOK) 방식으로 크게 구분할 수 있다^[2]. DM 방식은 비트 “0”과 “1”을 전송 시 한 종류 처프 (Up Chirp 또는 Down Chirp)의 위상만 180° 변화시키는 방식이다. 주로 위상 천이 변조 (Phase Shift Keying)와 함께 사용함으로써 고효율 전송이 가능하나, 수신기에서 상관기를 이용하므로 위상 추정 때문에 수신기 복잡도가 증가한다. 한편, BOK 방식은 비트 “0”과 “1”을 전송 시 다른 두 개 처프를 사용하며, 일반적인 단일 선형 처프 (Single Linear Chirp; SLC) 방식의 경우 Up Chirp와 Down Chirp를 모두 사용한다. 이 방식은 최대한 직교성에 근접한 처프들을 이용해서 수신기에서 위상 추정 없이 비동기 검출 (Noncoherent Detection)을 수행하므로, DM 방식보다 약간 성능은 열화되나 수신기 복잡도를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 수신기 복잡도를 줄이기 위해 비동기 검출 방식을 고려하여 BOK 전송 방식을 채택하였다.

한편, 그림 1은 전자전 환경에서 고려할 수 있는 CSS 통신 시스템 모델로서, 아군 송수신기와 적군 수신기로 구성된다. BOK 방식에 의해 아군이 전송하는 처프 신호 $c_i(t)$ 는 비트 i 에 따라 $i=1$ 이면 “Chirp 1” $c_1(t)$, $i=0$ 이면 “Chirp 0” $c_0(t)$ 로 전송한다. 식 (1)은 비트 i 에 따른 SLC의 전송 신호를 표현한 것이다^[4].

$$c_i^{SLC}(t) = A \cos(2\pi f_c t - (-1)^i \pi \mu t^2), \quad (1)$$

여기서, $|t| \leq T_c/2$, $A = \sqrt{2E_b/T_c}$, E_b 는 비트 에너지, $T_c = 1/R_b$ 는 처프 신호의 전송 시간, R_b 는 전송률, f_c 는 중심 주파수, $\mu = B/T_c$ 는 처프율, B 는 전송 대역폭이다.

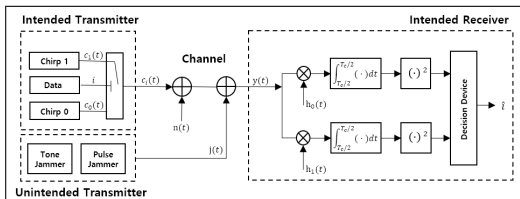


그림 1. 전자전 환경에서의 CSS 통신 시스템 모델
Fig. 1. CSS communication system model in an electronic warfare environment

2.2 재밍 모델

본 논문에서는 펄스 재밍과 톤 재밍 모델을 고려한다. 이러한 재밍 모델은, 적군이 아군 신호의 중심 주파수와 대역폭 정보를 보유하고 있으며, 적군의 GPS (Global Positioning System) 재밍으로 인한 위치 추정 오류 때문에 아군 수신기에서 추정 오차가 발생한다고 가정한다.

펄스 재밍 모델은 대역폭을 넓혀 더 짧은 신호를 얻어 강력한 시간 영역 펄스를 생성하며, 본 논문에서는 모든 심벌이 펄스 지속 시간 동안 펄스 재밍을 받는다고 고려한다. 이 때, 상관 (Correlation) 연산 동안 수신된 총 수신 전력은 재머 상태에 따라 달라지는데, 재머가 상관 연산이 진행되는 동안 켜져 있거나 꺼져 있다고 가정한다. 본 논문에서는 재머가 켜져 있는 상태를 재머 온 (Jammer-On) 상태, 즉 J_{on} 로 표시하고, 재머가 꺼져 있는 상태를 재머 오프 (Jammer-Off) 상태, 즉 J_{off} 로 표시한다. 따라서, 재밍 신호의 단면 전력 스펙트럼 밀도 (Single-Sided Power Spectral Density)는 다음과 같이 정의된다^[5].

$$N_j = \begin{cases} N_j/\rho & \text{with probability } \rho & (J_{on}) \\ 0 & \text{with probability } (1-\rho) & (J_{off}) \end{cases}, \quad (2)$$

여기서, ρ 는 재머의 듀티 사이클 (Duty Cycle)로서 심볼이 재밍될 확률이다.

한편, 톤 재밍 모델은 하나의 주파수 성분 단일 톤 신호를 연속적으로 생성하며, 이러한 단일 톤 재밍 파형 $J_t(t)$ 의 수학적 모델은 다음과 같다^[6].

$$J_t(t) = \sqrt{2J} \cos(2\pi f_c t + \theta), \quad (3)$$

여기서, $\sqrt{2J}$ 는 진폭, θ 는 위상으로서 $[0, 2\pi)$ 에 균일하게 분포되어 있다고 가정한다.

III. 제안하는 레인지 기법을 이용하는 무선측위 모델

우리가 고려하는 전자전 환경의 무선측위 시스템에서는 마스터 (Master) 통신 노드가 GPS 등으로부터 주기적인 동기 신호를 수신한다고 가정하고, 이 신호에 맞춰 전체 프레임 시간을 할당할 후, 슬레이브 (Slave) 통신 노드는 마스터가 보낸 동기화 신호를 검출하여 자신의 프레임 시간을 보정한다. 그리고, 마스터는 각 슬

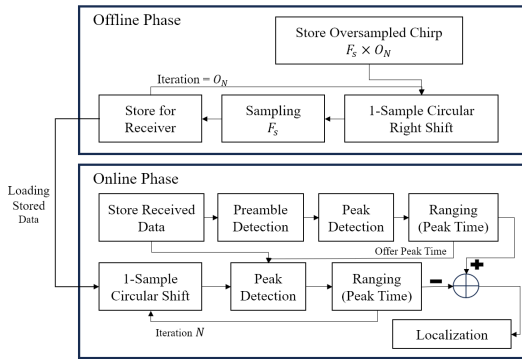


그림 2. 제안하는 레인징 방식의 구성
Fig. 2. Structure of the proposed ranging scheme

레이브가 보낸 동기화 신호를 검출한다.

그림 2는 제안하는 레인징 방식을 도시한 것이다. 우선 오프라인 단계에서는 버퍼에 저장된 신호를 이용한다. 버퍼에 저장한 신호는 온라인 단계에서 얻은 피크 값 검출 시간보다 ADC 샘플링율을 기준으로 한 샘플의 시간 앞에서 상관 연산을 통해 피크 값 검출을 수행하며, 버퍼에 저장된 신호를 한 샘플씩 순환이동 (Circular Shift) 한다.

그 뒤, 실제 온라인 동작 단계에서 마스터는 전체 프레임에 대해 각 슬레이브에 할당된 동기화 시간과 실제 검출한 시간의 차이 측정을 통해 레인징을 수행한다. 이는 버퍼에 저장된 신호를 통해 추정된 거리와 온라인 단계에서 추정된 거리를 뺀다⁷⁾.

위와 같이 제안된 레인징 방식을 전형적인 TDoA 기법 가운데 하나인 Fang 알고리즘³⁾에 적용하여 무선 측위를 수행한다.

IV. 모의실험 결과

제안 방식의 성능 평가를 위해, 전자전 환경의 이군 수신기에서 제안된 처프 기반 정밀도 향상 레인징 후 Fang 무선측위 알고리즘에 적용 시, 채널 E_b/N_0 에 따른 위치 추정치의 RMSE (Root Mean Square Error) 결과를 분석하였다. 모의실험 환경은 다양한 E_b/N_0 의 AWGN 채널, 톤 재밍 채널, 펄스 재밍 채널을 고려하였다. 이외 주요 모의실험 파라미터로서는, 처프 지속 시간 $T_s = 125 \mu\text{sec}$ 와 처프 대역폭 $B = 1 \text{ MHz}$ 이다. 측정 거리는 랜덤하게 10 km까지, ADC 샘플링율은 16.384 MHz를 고려하였다. 또한, 레인징 시 프리앰블의 상관 특성을 활용하며, 이러한 프리앰블로서 길이가 256인 Zadoff-Chu 시퀀스를 사용하였다⁸⁾.

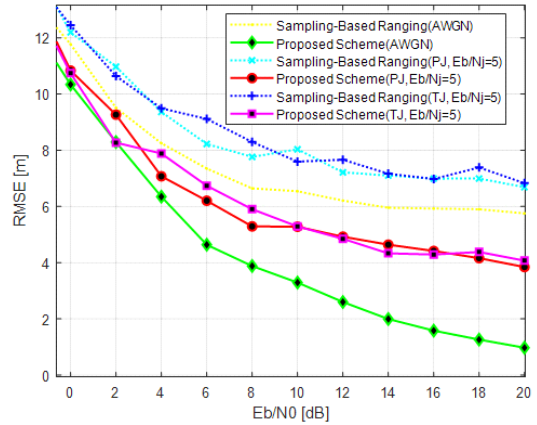


그림 3. 제안하는 알고리즘의 무선측위 성능
Fig. 3. Wireless localization performance with the proposed algorithm

그림 3은 AWGN 채널, 펄스 재밍 채널, 그리고 톤 재밍 채널에서 E_b/N_0 에 따른 무선측위의 RMSE 성능을 도시한다. 우선 AWGN 채널의 경우, $E_b/N_0 = 0 \text{ dB}$ 에서 제안 기법이 기존 기법에 비해 측위 정밀도가 약 2 m 향상되었고, $E_b/N_0 = 20 \text{ dB}$ 일 때는 제안 기법을 통해 약 5 m 향상되었다. 한편 펄스 재밍 채널과 톤 재밍 채널의 경우에도, $E_b/N_0 = 0 \text{ dB}$ 에서 약 2 m, $E_b/N_0 = 20 \text{ dB}$ 에서 약 3 m 정도 제안 기법을 통해 향상됨을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는, 전자전 환경에서 재밍에 강한 처프 신호를 이용하여 이군 단말기의 위치 추정을 위한 레인징 향상 기법을 설계하고, 이를 전형적인 무선측위 알고리즘을 적용하여 AWGN 채널, 펄스 재밍 채널, 그리고 톤 재밍 채널에서의 무선측위 성능을 분석하였다. 특히, AWGN 채널 환경에서는 기존 기법에 비해 상당히 우수한 성능을 보였고, 펄스 재밍 채널과 톤 재밍 채널에서도 우수한 성능을 확인하였다.

References

[1] G. Piccinni, G. Avitabile, G. Cociello, and C. Talarico, "Real-time distance evaluation system for wireless localization," *IEEE Trans. Cir. & Syst.*, vol. 67, no. 10, pp. 3320-3330, Oct. 2020. (<https://doi.org/10.1109/tcsi.2020.2979347>)

- [2] M.-R. Lee, K.-Y. Kim, and Y. Shin, "Analysis of transmission performance for frequency-hopping chirp spread spectrum systems in partial-band noise jamming environment," *J. KICS*, vol. 47, no. 10, pp. 1544-1547, Oct. 2022.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.10.1544>)
- [3] T. Zhou and Y. Cheng, "Positioning algorithm of UWB based on TDOA technology in indoor environment," in *Proc. ITME 2021*, pp. 261-266, Wuyishan, China, Nov. 2021.
(<https://doi.org/10.1109/ictc46691.2019.8939918>)
- [4] K.-Y. Kim and Y. Shin, "Analysis on cross-correlation coefficient for survivability of chirp spread spectrum systems," *IEEE Trans. Info. Forensics & Secur.*, vol. 15, no. 1, pp. 1959-1967, Jan. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/tifs.2019.2953332>)
- [5] B. Vojcic and R. L. Pickholtz, "Performance of coded direct sequence spread spectrum in a fading dispersive channel with pulsed jamming," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 8, no. 5, pp. 934-942, Jun. 1990.
(<https://doi.org/10.1109/49.56398>)
- [6] H. Jung, B. V. Nguyen, I. Song, and K. Kim, "Design of anti-jamming waveforms for time-hopping spread spectrum systems in tone jamming environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 1, pp. 728-737, Jan. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/tvt.2019.2954070>)
- [7] J. Han, J. P. Lee, D. Jang, S. Oh, and I. Oh, "The maintenance of TDMA network synchronization when reference burst is vanished in K-JTDLS," in *Proc. MILCOM 2011*, pp. 2063-2068, Baltimore, USA, 2011.
(<https://doi.org/10.1109/milcom.2011.6127623>)
- [8] M. Hua, M. Wang, K. W. Yang, and K. J. Zou, "Analysis of the frequency offset effect on Zadoff-Chu sequence timing performance," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 11, pp. 4024-4039, Nov. 2014.
(<https://doi.org/10.1109/tcomm.2014.2364597>)