

VDES 시스템에서 훈련 시퀀스 기반 주파수 오프셋 추정 연구

조대연, 김범준, 이지원, 김정창*
국립한국해양대학교

cdy3976@g.kmou.ac.kr, rlaqjawns509@g.kmou.ac.kr, zzib0808@g.kmou.ac.kr,
jchkim@kmou.ac.kr

Study on Frequency Offset Estimation Using Training Sequence in VDES System

Daeyeon Jo, Beomjun Kim, Ji-won Lee, Jeongchang Kim*
National Korea Maritime and Ocean University (KMOU)

요 약

본 논문은 VDES(VHF Data Exchange System)에서 사용되는 훈련 시퀀스(training sequence)를 이용하여 주파수 오프셋을 추정하는 방법을 제안한다. VDES의 ASM-TER과 VDE-TER에서 사용하는 이중 바커 시퀀스(double Barker sequence)의 전후 시퀀스 간 위상 차이를 이용하여 주파수 오프셋을 추정한다. 전산 실험을 통해 AWGN 채널 환경에서 제안한 기법의 성능을 평가하고, 잔류 주파수 오프셋의 평균 제곱 오차(mean square error, MSE) 성능을 확인한다.

I. 서 론

VDES(VHF Data Exchange System)는 기존 해상 통신 시스템인 AIS(Automatic Identification System)의 데이터 전송률 한계, 채널 용량 제한, 확장성 부족 문제를 해결하고자 개발된 차세대 해상 통신 시스템이다[1]. 이러한 VDES 시스템에서 정확한 신호 복원을 위해 주파수 동기화는 필수적이다. 특히 송수신기 간의 국부 발진기(local oscillator)의 주파수 오차나 도플러 천이(Doppler shift) 등으로 인해 발생하는 주파수 오프셋은 수신기의 복조 성능을 저하시킬 수 있으므로, 이를 추정하고 보정하는 기술이 중요하다. 이에 본 논문에서는 VDES 시스템의 훈련 시퀀스를 이용하여 주파수 오프셋을 추정하는 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 VDES 시스템에서 사용되는 훈련 시퀀스에 대해 소개하며, III장에서는 본 논문에서 제안하는 주파수 오프셋 추정 기법의 수학적 모델링과 구체적인 방법을 설명한다. IV장에서는 시뮬레이션 환경과 실험 결과를 통해 제안한 방식의 성능을 평가하며, V장에서 결론을 맺는다.

II. VDES 훈련 시퀀스

훈련 시퀀스는 디지털 통신 시스템에서 동기화를 목적으로 사용하는 시퀀스로, 수신기는 사전에 알고 있는 훈련 시퀀스를 이용하여 수신된 신호와의 상관(correlation) 연산을 수행함으로써 프레임의 시작 위치를 파악할 수 있다. VDES 시스템의 ASM-TER 및 VDE-TER에서는 훈련 시퀀스로서 이중 바커 시퀀스를 사용하고 있으며, 전후 시퀀스 간 위상 차이를 이용하여 주파수 오프셋(frequency offset)을 효과적으로 추정할 수 있다. ITU-R에서 제정한 M.2092-1 규격[2]에 따르면 제안된 이중 바커 시퀀스는 선행비트 '1', Barker-13

시퀀스(1111100110101), 그리고 inverted Barker-13 시퀀스(0000011001010)로 구성되며 총 27 개의 비트로 이루어진다. 각 비트는 규격에서 제안하는 $\pi/4$ QPSK(quadrature phase shift keying)를 통해 심볼로 매핑되는데, 비트 값이 '1'일 경우 $\pi/4$ QPSK 심볼의 (1,1)로 매핑 되고, 비트 값이 '0'일 경우 $\pi/4$ QPSK 심볼의 (0,0)으로 매핑된다. 결과적으로 이중 바커 시퀀스는 총 27 개의 QPSK 심볼을 형성하며, 이를 통해 VDES 수신기에서 동기화 및 주파수 보정을 효과적으로 수행할 수 있다.

III. 주파수 오프셋 추정 기법

송수신기에서 사용되는 국부 발진기의 오차로 인해 수신기의 수신 신호에서 주파수 오프셋이 발생할 수 있으며, 이동 통신 환경에서는 수신기의 이동에 따른 도플러 천이가 추가적으로 주파수 오프셋의 원인이 된다. 수신된 훈련 시퀀스 심볼은 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$r(k) = s(k)e^{j(2\pi f_a kT + \varphi)} + n(k), \quad 1 \leq k \leq L \quad (1)$$

여기서, $s(k)$ 는 local training sequence, f_a 는 주파수 오프셋, φ 는 위상 오프셋, T 는 심볼 주기, $n(k)$ 는 AWGN(additive white Gaussian noise), $L = 27$ 는 훈련 시퀀스의 길이이다.

M.2092-1 규격에서 제안하는 $\pi/4$ QPSK 변조 기법에서 짝수 번째 심볼과 홀수 번째 심볼은 $\pi/4$ 만큼 오프셋이 존재하므로, 심볼 간의 오프셋을 제거하기 위해 다음과 같이 위상 보정을 위한 전처리를 수행한다.

$$\hat{r}(k) = r(k) \times e^{-\frac{\pi}{4}(k \bmod 2)} \quad (2)$$

모델링된 수신 신호의 Barker 13 과 inverted Barker 13 간의 상관 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Corr} &= \frac{1}{13} \sum_{k=2}^{14} \text{conj}(\hat{r}(k)) \times \hat{r}(k+13) \cdot e^{-j\pi} \\
 &= \frac{1}{13} \sum_{k=2}^{14} e^{-j\pi} \left(\hat{s}^*(k) e^{-j(2\pi f_d k T + \varphi)} + \hat{n}^*(k) \right) \cdot \\
 &\quad \left(\hat{s}(k+13) e^{j(2\pi f_d (k+13) T + \varphi)} + \hat{n}(k+13) \right) \quad (3) \\
 &= \frac{e^{-j\pi}}{13} \sum_{k=2}^{14} \{ \hat{s}^*(k) \hat{s}(k+13) e^{j(2\pi f_d (13) T)} \\
 &\quad + \hat{s}^*(k) e^{-j(2\pi f_d k T + \varphi)} \hat{n}(k+13) \\
 &\quad + \hat{n}^*(k) \hat{s}(k+13) e^{j(2\pi f_d (k+13) T + \varphi)} \\
 &\quad + \hat{n}^*(k) \hat{n}(k+13) \}.
 \end{aligned}$$

최종적으로, 상관 값 Corr의 위상 값으로부터 수식 (4)와 같이 주파수 오프셋을 추정할 수 있다.

$$\hat{f}_d = \frac{1}{2\pi \cdot 13 \cdot T} \cdot \arg\{\text{Corr}\} \quad (4)$$

IV. 전산실험 결과

본 연구에서는 제안하는 VDES 시스템의 주파수 오프셋 추정 방식의 성능을 확인하기 위하여 MATLAB 기반 전산 시뮬레이션을 수행한다. 추정 가능한 주파수 오프셋 범위와 잔류 주파수 오프셋의 MSE를 측정하여 성능을 확인하였다. 시뮬레이션에서 사용한 심볼레이트(symbol rate)는 19.2ksps(symbols/sec)이며, AWGN 채널 환경에서 타이밍 동기는 완벽하다고 가정하였다.

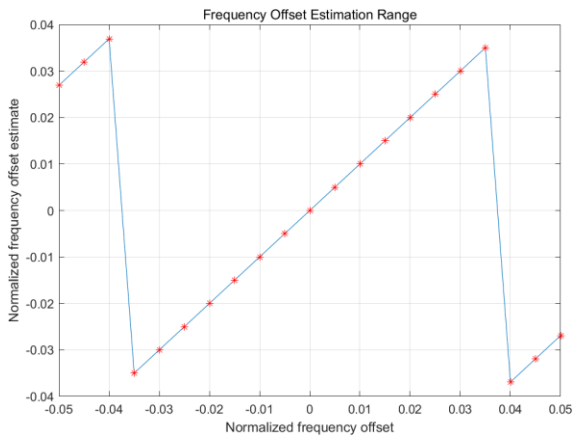


그림 1. Frequency offset estimation range

그림 1은 SNR = 10 dB 일 때 각 주파수 오프셋에 대해 추정된 값의 평균을 나타낸다. 그림 1의 정규화된 주파수 오프셋(normalized frequency offset)은 심볼레이트를 기준으로 정규화된 값이다. 심볼레이트와 바커 시퀀스 길이에 의해 이론적으로 추정 가능한 정규화된 주파수 오프셋의 범위는 $[-0.0385, 0.0385]$ 이다. 그림 1을 통해 이론적으로 계산한 주파수 범위와 실제 시뮬레이션 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있다.

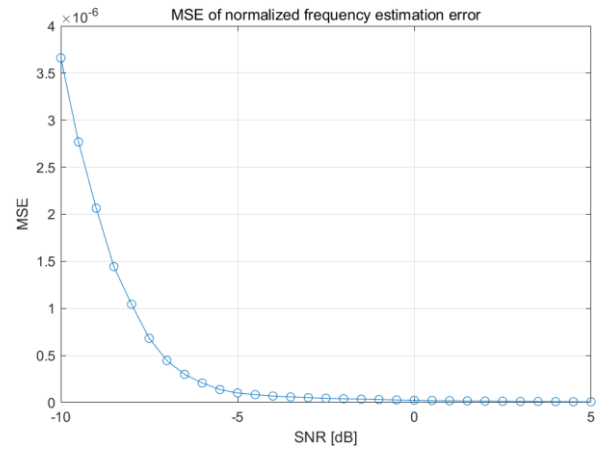


그림 2. MSE of normalized frequency estimation

그림 2는 정규화된 주파수 오프셋이 0.03 일 때 제안하는 주파수 오프셋 추정 방법에 따른 잔류 주파수 오프셋의 MSE를 나타낸다. 낮은 SNR 환경에서도 비교적 작은 MSE 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

V. 전산실험 결과

본 논문에서는 VDES 시스템에서 훈련 시퀀스를 이용한 주파수 오프셋 추정 기법을 제안하고, 추정 가능한 주파수 오프셋 범위 및 잔류 주파수 오프셋의 MSE 성능을 평가하였다. 바커 시퀀스 간의 위상 차이를 이용하여 얻은 주파수 오프셋 추정 범위가 이론적으로 산출된 추정 범위와 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 특히 낮은 SNR 환경에서도 우수한 MSE 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA), *VHF Data Exchange System (VDES) Overview*, IALA Guideline G1117, Ed. 3.0, Dec. 16, 2016.
- [2] International Telecommunication Union[ITU], (2022), "ITU-R M.2092-1: Technical characteristics for a VHF data exchange system in the VHF maritime mobile band".
- [3] Q. Hu, X. Jing, P. Lu, Q. Sun, and J. Huang, "A novel carrier frequency offset algorithm based on a double Barker code in VDE-TER," *Phys. Commun.*, vol. 40, pp. 101059, 2020.
- [4] S. Rong et al., "Synchronization for VHF Data Exchange System," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1952, no. 4, p. 042035, 2021.