

향상된 상관도 기반의 암맹 프레임 동기 기술

길용성*, 이동근*, 김상효^o

An Improved Correlation Based Blind Frame Synchronization

Yong-Sung Kil*, Dong Geun Lee*, Sang-Hyo Kim^o

요약

본 논문에서는 암맹 통신 환경에서의 프레임 정보 추정 및 동기 방법을 제시한다. 제안하는 암맹 프레임 동기 방법은 선행 연구 [3]의 개선된 형태로 낮은 복잡도로 낮은 암맹 프레임 동기 오율을 보인다.

Key Words : Blind frame synchronization, correlation, non-cooperative communication, synchronization word

ABSTRACT

In this paper, we propose a correlation-based blind frame synchronization algorithm of low complexity and low error rate, which is a modification of the algorithm proposed in [3].

1. 서론

암맹 프레임 동기(blind frame synchronization, BFS)는 송신단이 프레임 단위로 메시지를 전송하고, 수신단이 그 프레임 정보(프레임 길이, 동기 신호(sync word:SW))를 모르는 암맹 환경에서 프레임 동기를 위해 프레임 길이 및 SW를 추정하고 프레임 시

작점 및 데이터를 획득하는 기술이다. 선행 연구에서는 수신 신호의 상관도와 주기 샘플 평균 함수(mean of periodic samples: MPS)를 이용한 방법을 보였다^[1,2]. 논문 [3]에서는 BFS 오율 성능을 개선하였으며 상관도, MPS를 분석하고 수신 신호가 길어짐에 따라 BFS 오율이 0에 수렴함을 증명하였다. 하지만 알고리즘의 반복 과정 중 수신 신호의 상관도 계산 복잡도가 크며 수신 신호가 제한적인 경우 추정 오율에 오류 마루 현상이 발생하였다. 본 논문에서는 복잡도 및 오율 성능을 개선할 수 있는 MPS 상관도 기반의 BFS 알고리즘을 제안하고 모의실험을 통해 성능을 평가한다.

II. 시스템 모델

송신단은 binary phase shift keying (BPSK) 변조된 신호를 전송하며, 송신 신호는 $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots]$, $x_i = (-1)^{x_i^b}$, $x_i^b \in (0, 1)$ 이다. 한편, 수신단은 Gaussian 채널을 통해 신호 \mathbf{y} 를 획득한다. 프레임 구조와 송신 신호, 수신 신호는 그림 1에 제시되어있다. 송신단에서는 메시지를 프레임 단위로 연속적으로 전송하며 길이 N 의 프레임은 길이 L 의 SW와 데이터로 이루어져있으며 SW는 $\mathbf{s} = [s_0, \dots, s_{L-1}] \in \{1, -1\}^L$ 로 정의한다. 데이터는 $\{1, -1\}$ 을 각각 0.5의 확률로 가진다. 길이 M 수신 신호는 $y_t = x_{\tau+t} + n_t$, $\mathbf{y} = [y_0, y_1, \dots, y_{M-1}]$ 이다. 이때, τ 는 지연으로 수신 신호 상에서 첫 프레임의 첫 심벌의 인덱스와 같으며 $\mathbf{n} = [n_0, n_1, \dots, n_{M-1}]$ 는 평균이 0, 분산이 σ^2 인 Gaussian 잡음 벡터로 신호대 잡음비는 $E_s/N_0 = 1/2\sigma^2$ 이다. 수신단은 각 프레임의 길이와

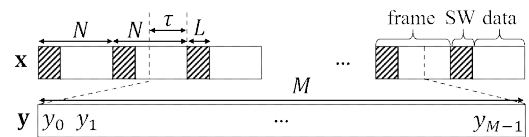


그림 1. 송수신 신호와 프레임 구조
Fig. 1. Transmitted signal composed of frames and the received signal.

* 본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : (ORCID:0000-0002-2075-6441)Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, gys0730@skku.edu, 학생(박사과정), 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-0660-5516)Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, iamshkim@skku.edu, 정교수, 종신회원

* Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, gas0621@skku.edu, 학생(석사과정), 학생회원
논문번호 : 202010-265-A-LU, Received October 26, 2020; Revised November 6, 2020; Accepted November 6, 2020

SW가 동일한 것은 알고 있다고 가정하며 \mathbf{y} 로부터 프레임 길이(M)와 SW 패턴 (\mathbf{s})와 길이 (L), 지연 (τ)를 추정하고자 한다.

III. MPS 상관도 기반의 암행 프레임 동기

선행 연구에서는 반복적인 SW의 기본 주기 추정을 통한 BFS 방법을 보였으며, 수신 신호의 상관도를 이용하여 SW의 등장 주기(기본 주기 혹은 그 배수)를 추정하였다³⁾. 수신 신호와 수신 신호 상의 이동 윈도우의 크기가 커짐에 따라 수신 신호의 상관도는 SW의 비주기 상관도의 주기 함수에 수렴함을 보였다³⁾. 하지만 윈도우 크기가 제한적인 경우 상관도 분산이 충분히 작지 않아 SW 주기 추정에 오류가 발생할 수 있다³⁾. 본 논문에서는 수신 신호보다 작은 분산을 가지는 MPS의 상관도를 이용한 SW 기본 주기 추정 및 BFS 방법을 제안한다. 수신 신호 상의 위치 m 에서 길이 W 인 윈도우 $\mathbf{w}_m = (w_{m,0}, \dots, w_{m,W-1}) = (y_m, \dots, y_{m+W-1})$ 의 상관도는 (1)과 같다.

$$C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m) = \sum_{i=0}^{W-1} w_{0,i} w_{m,i} \quad (1)$$

수신 신호의 상관도는 윈도우 길이가 길어짐에 따라 SW의 비주기 자기 상관도의 주기 함수 $H(m)$ 에 수렴하며 $C_a(\mathbf{s}; j)$ 는 SW의 비주기 자기 상관도이고 $(i)_j = i \bmod j$ 는 모듈로 연산이다³⁾.

$$H(m) = \begin{cases} \frac{L}{N} C_a(\mathbf{s}; (m)_N), & \text{if } 0 \leq (m)_N < L, \\ 0, & \text{if } L \leq (m)_N \leq N-L, \\ \frac{L}{N} C_a(\mathbf{s}; N-(m)_N), & \text{if } N-L < (m)_N < N, \end{cases}$$

$$C_a(\mathbf{s}; j) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-j-1} s_i s_{i+j}$$

p 를 주기로 하는 MPS는 다음과 같다.

$$D_p(l) = \frac{1}{g} \sum_{i=0}^{g-1} y_{l+ip}$$

여기서 $g = \lfloor M/p \rfloor$ 는 샘플의 수다. $C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$ 를 통해 SW 주기를 추정할 수 있으며 SW 주기로 계

Algorithm1 BFS using MPS correlation

Input: \mathbf{y}, N_{\max}, W

Output: $\hat{N}, \hat{L}, \hat{T}, \hat{\mathbf{s}}$

- compute $C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$ for $m \in [0, N_{\max}]$,
 - 1: $p \leftarrow \underset{m}{\operatorname{argmax}} C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$;
 - compute $D_p(l)$ for $l \in [0, p-1]$,
 - 2: $\eta^* \leftarrow \underset{\eta}{\operatorname{argmax}} \Lambda(\eta, C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_p))$, detect **R.F**;
 - 3: **while** $|\mathbf{R}| > 1$:
 - compute $C_p(\mathbf{d}_p; j)$ for $j \in [0, p-1]$,
 - 4: $p' \leftarrow \underset{j}{\operatorname{argmax}} C_p(\mathbf{d}_p; j)$;
 - compute $D_{p'}(l)$ for $l \in [0, p'-1]$,
 - 5: $\eta^* \leftarrow \underset{\eta}{\operatorname{argmax}} \Lambda(\eta, C_p(\mathbf{d}_p; p'))$, detect **R.F**;
 - 6: $p \leftarrow p'$;
 - 7: **end while**
 - 8: $\hat{T} \leftarrow r, \hat{N} \leftarrow p, \hat{L} \leftarrow (f-r)\hat{N}$;
 - 9: **for** $l = 0, \dots, \hat{L}-1$ **do**
 - 10: $\hat{s}_l \leftarrow \operatorname{sgn}(D_p((\hat{T}+l)_p))$;
 - 11: **end for**
-

산된 MPS는 SW 영역에서는 SW에 수렴하고 데이터 영역에서는 0에 수렴한다³⁾. 수신 신호의 분산은 SW와 데이터 영역에서 각각 $\sigma^2, 1 + \sigma^2$ 인 반면 MPS는 $\sigma^2/d, (1 + \sigma^2)/d$ 이다. 따라서 MPS의 상관도 (2)는 수신 신호의 상관도 (1)보다 $H(m)$ 와의 차이가 평균적으로 더 작아 SW 주기 추정 성능을 향상시킬 수 있다. 식 (2)에서 $\mathbf{d}_p = [d_{p,0}, d_{p,1}, \dots, d_{p,p-1}]$ 는 MPS의 벡터다($d_{p,l} = D_p(l)$).

$$C_p(\mathbf{d}_p; j) = \frac{1}{p} \sum_{i=0}^{p-1} d_{p,i} d_{p,(i+j)_p} \quad (2)$$

또한, MPS의 절댓값은 SW 영역에서는 1, 데이터 영역에서는 0에 수렴하므로 문턱값을 통해 MPS 절댓값의 상승, 하강 엣지를 검출하고 SW의 패턴, 프레임 길이, 지연을 추정할 수 있다.

제안 기법은 Algorithm1에 제시되어 있으며 \mathbf{y} 로부터 최대 N_{\max} 길이의 프레임에 대해 $\hat{N}, \hat{L}, \hat{\mathbf{s}}, \hat{\tau}$ 를 추정한다. Algorithm1의 1, 2번째 줄은 선행 연구와 동일하다³⁾. 1번째 줄에서는 $W = M - N_{\max}$ 의 윈도우로부터 (1)를 계산하고 SW 주기를 추정한다. 2번째 줄에

서는 MPS를 계산하고 최적의 문턱값 η^* 을 구하며 여기서 $A(\eta, c) = A_S(\eta, c)A_D(\eta, c)$ 는 엣지 추정 확률이다 [3]. 최적의 문턱값을 이용해 $|D_p(l)|$ 의 상승, 하강 엣지 인덱스 집합 \mathbf{R}, \mathbf{F} 을 구한다.

$$\mathbf{R} = \{l \mid |D_p((l-1)_p)| < \eta \leq |D_p((l)_p)|, l \in [0, p-1]\}$$

$$\mathbf{F} = \{l \mid |D_p((l)_p)| < \eta \leq |D_p((l-1)_p)|, l \in [0, p-1]\}$$

만약 $|\mathbf{R}| > 1$ 라면 p 가 SW의 기본 주기가 아니라고 판단하며, $|\mathbf{R}| = 1$ 이 될 때까지 반복적으로 MPS의 상관도를 이용하여 SW 기본 주기를 탐색하며 3-7 번째 줄에 나타나있다. $|\mathbf{R}| = 1$ 이라면 $r \in \mathbf{R}, f \in \mathbf{F}$ 는 각각 수신 신호 상에서 SW의 가장 작은 시작 인덱스와 마지막 인덱스로 간주한다. 이에 따라 프레임 길이 \hat{N} 은 SW의 기본 주기인 p 로, 지연 $\hat{\tau}$ 은 r 로 결정하고, SW 길이와 패턴은 각각 $(f-r)_{\hat{N}}$ 와 $D_p(l)$ 의 부호를 이용하여 추정한다.

제안 알고리즘은 선행 연구와 달리 반복 과정 중 수신 신호의 상관도 대신 MPS의 상관도를 이용한다. 수신 신호의 상관도 $C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$ 의 계산에는 $O(MN_{\max})$ 의 복잡도가 요구되는 반면 MPS 상관도 계산 복잡도는 $O(N_{\max}^2)$ 이다. 따라서 제안 알고리즘은 복잡도 측면에서 이득이 있다.

IV. 모의실험

제안 알고리즘의 성능을 BFS 오율을 통해 보인다. 모의실험은 $L = 15$ SW를 포함하는 $N = 100$ 의 프레임임을 사용하였다. SW 패턴은 이상적인 비주기 자기 상관 특성을 가지는 m-시퀀스와 매 실험 무작위적으로 생성된 시퀀스를 고려하였으며 $E_s/N_0 = 10\text{dB}$ 의 Gaussian 채널을 가정하였다. 추정 가능 프레임 길이는 $N_{\max} = 500$ 으로 설정하였다.

그림 2는 선행 연구의 알고리즘과 제안 알고리즘의 BFS 오율을 보여준다. 두 알고리즘 모두 수신 신호 길이 M 이 커짐에 따라 BFS 오율이 낮아졌으며 m-시퀀스의 경우 두 경우 모두 낮은 오율 성능을 보였다. 우수하지 않은 SW가 사용될 수 있는 환경에서는 기존 알고리즘의 오율 성능에 오류마루 현상이 발생하였다. 반면 제안 알고리즘은 같은 환경에서 더 낮은 오율 성능을 보였다. 이결과는 $H(m)$ 에 대한 상관도의 MSE가 개선된 것으로 알 수 있다. 그림 3은 $C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$ 와 $C_p(\mathbf{d}_p; j)$ 로부터 가장 높은 정확도로 동

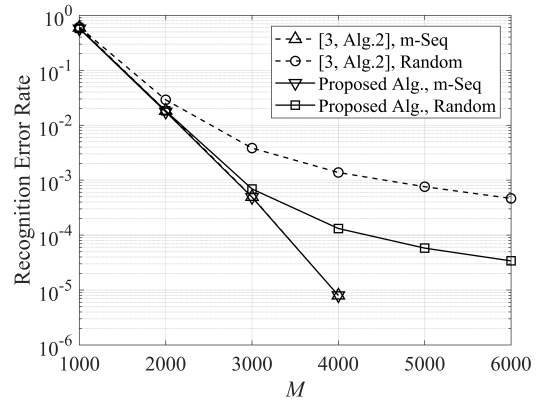


그림 2. [3]의 Algorithm 2와 제안 알고리즘의 BFS 오율 성능 비교.
Fig. 2. Recognition error rates of Algorithm2 in [3] and the proposed algorithm.

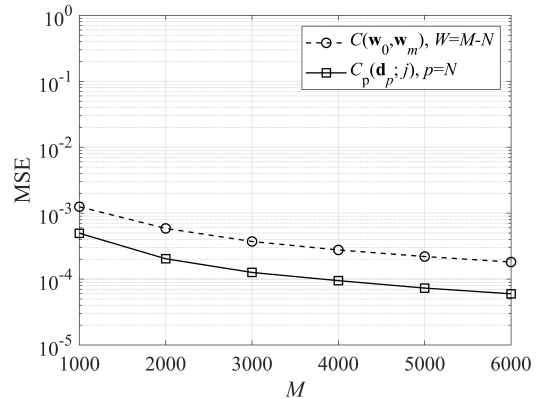


그림 3. $H(m)$ 에 대한 수신 신호의 상관도 $C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$ 와 MPS의 상관도 $C_p(\mathbf{d}_p; j)$ 의 MSE 비교.
Fig. 3. MSE of $H(m)$ to $C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$ and $H(m)$ to $C_p(\mathbf{d}_p; j)$.

기 신호의 기본 주기를 추정할 수 있는 환경 ($W = M - N, p = N$)에서의 MSE로 M 이 커짐에 따라 두 경우 모두 MSE가 감소하였다. $C(\mathbf{w}_0, \mathbf{w}_m)$ 의 MSE 대비 $C_p(\mathbf{d}_p; j)$ 의 MSE가 평균적으로 45% 수준이었으며 SW 주기 추정 성능이 향상되었다. 실제 통신 시스템에는 일반적으로 우수한 상관도 특성을 가지는 SW가 사용되며 이러한 환경에서 BFS 시 선행 기술 대비 제안 기술의 오율 성능 개선 정도는 크지 않을 수 있다. 하지만 제안 기술은 선행 기술 대비 낮은 계산 복잡도로 BFS가 가능하며 같거나 더 낮은 BFS 오율을 보인다는 점에서 선행 기술 대비 우수하다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 암맹 통신 환경에서 프레임 동기를 위한 프레임 정보 추정 및 동기 방법을 제안하였다. 제안 알고리즘은 MPS의 상관도를 이용한 반복적인 SW 기본 주기 추정을 통해 낮은 복잡도로 오율 성능을 개선하였다.

References

- [1] P. P. Brahma and K. Bandyopadhyay, "Non-cooperative denial of communication after synchronizing with repeating sequences," in *Proc. DSR2011*, pp. 1-4, Singapore, Aug. 2011.
- [2] Y.-S. Kil, H. Lee, and S.-H. Kim, "Correlation based blind frame length estimation," in *Proc. KIDET*, pp. 69-70, Korea, Oct. 2016.
- [3] Y.-S. Kil, H. Lee, S.-H. Kim, and S.-H. Chang, "Analysis of blind frame recognition and synchronization based on sync word periodicity," *IEEE ACCESS*, vol. 8, pp. 147516-147532, Aug. 2020.