

연속 위상 변조 신호에서 TSE 기반 오프셋 활용 등화 기법

라형인, 이지현, 김기만, 이태진*, 소민석*

국립한국해양대학교, *한국항공우주연구원

babavivi@naver.com, jigui99@naver.com, kimkim@kmou.ac.kr, *leetj0101@kari.re.kr,
*somin081@kari.re.kr

Offset-Aware Equalization Based on TSE for Continuous Phase Modulated Signals

Hyungin Ra, Ji Hyun Lee, Kiman Kim, Taejin Lee*, Minseok So*

Korea Maritime and Ocean University, *Korea Aerospace Research Institute

요약

SOQPSK-TG와 같은 연속 위상 변조 신호는 심볼 사이의 위상 연속성과 메모리를 갖기 때문에 심볼마다 고정된 샘플을 이용하는 conventional symbol-spaced equalizer(TSE)는 위상 경사(phase slope) 정보를 충분히 알지 못하며, 결과적으로 수렴 속도 및 잔여 ISI(intersymbol interference) 제거 성능이 제한된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 특정 샘플에서의 오프셋별로 위상 변화를 효과적으로 포착하여 fractionally-spaced equalizer(FSE)와 유사한 효과를 갖도록 하는 방식을 제안한다.

I. 서론

SOQPSK-TG(Shaped Offset QPSK - Telemetry Group) 방식^[1]은 연속 위상 변조(continuous phase modulation, CPM) 계열 중 좁은 대역폭, 일정한 진폭, 간결한 구조를 바탕으로 항공우주 및 군용 텔레메트리 분야에서 표준으로 채택되고 있는 변조 방식이다. 특히, 훈련 시퀀스 삽입이 제한되는 경우에는 송신측 정보를 필요로 하지 않는 블라인드 등화가 요구된다. 그 중에 CMA(constant modulus algorithm)는 수신 신호의 진폭만으로 동작하는 대표적인 알고리즘이다^[2]. 그러나 모든 샘플에 CMA를 적용한다면, CPM 신호의 연속적인 위상 변화로 인해 기준 위상이 불분명해지는 문제가 있다. 본 연구는 TSE 기반 CMA 구조에서 심볼 첫 샘플의 위상만 추출하여 나오는 규칙적인 위상을 기준 위상과 비교함으로써 위상 오차를 추정하고 누적 보정하는 위상 보정 기법을 제안한다.

II. 본론

본 연구에서는 심볼 단위의 위상 정렬과 CMA 블라인드 등화를 결합하여 CPM 신호의 위상 오차를 효과적으로 보상하는 등화기를 제안한다. 먼저 등화기 계수를 $\mathbf{w}$ 라고 할 때 입력 벡터 $\mathbf{x}[n]$ 에 대한 등화기 출력과 m 번째 심볼의 첫 샘플에서 추정된 위상 오차 $\phi_{err}[m]$ 를 누적하여 보상하는 수식은 다음과 같다.

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{w}^H[n] \mathbf{x}[n] \quad (1)$$

$$\hat{\theta}[m+1] = \hat{\theta}[m] + \lambda \phi_{err}[m] \quad (2)$$

여기서 λ 는 심볼 단위에서 위상 오차를 보정하기 위한 고정된 계수이며, 값이 클수록 빠르게 수렴하지만 잡음에 민감해진다. 본 연구에서는 0.01 - 0.1 구간에서 안정적 수렴 특성을 확인하였다. 이렇게 얻은 $\hat{\theta}[n]$ 를 동일 심볼 구간의 입력 위상을 보정한 뒤($\mathbf{x}[n] \leftarrow \mathbf{x}[n] \cdot e^{-j\hat{\theta}[n]}$), CMA 방식으로 계수를 다음과 같이 갱신한다.

$$\mathbf{w}[n+1] = \mathbf{w}[n] - \mu_{CMA} (|\mathbf{y}[n]|^2 - R^2) \mathbf{y}^*[n] \mathbf{x}[n] \quad (3)$$

여기서 μ_{CMA} 는 등화기 수렴계수이며, R^2 은 SOQPSK-TG 신호의

목표 모듈러스이다. 식 (2)는 SOQPSK-TG의 위상 변화를 심볼 단위로 찾아 보상한다. 이러한 두 식의 결합으로 신호의 연속적인 위상 변화에서도 위상 정보를 확인하여 보상하게 된다.

III. 결론

성능 검증은 실제 디지털 마이크로파 무선 시스템에서 수집된 채널 응답 데이터를 기반으로 수행되었으며, 해당 채널은 심볼 구간의 절반 간격으로 샘플링된 복소 기저대역 응답을 포함한다^[3]. E_b/N_0 가 10 dB인 조건에서 고전적인 OQPSK 복조기를 사용한 비트 오류율 측정 결과, CMA를 적용하지 않았을 때는 0.02614, 기존의 CMA를 적용하였을 때는 0.01452, 제안한 방식을 적용하면 0.01222로 가장 낮은 오류율을 보여주었다. 본 방식은 실제 적용 가능성이 높고, 향후 다양한 채널 환경으로 확장하여 그 효과를 분석할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 한국항공우주연구원의 우주센터 선진화사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] M. J. Rice, "SOQPSK: A bandwidth-efficient constant envelope modulation," in Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conf. (NAECON), Dayton, OH, USA, pp.560 - 566, 1999.
- [2] D. N. Godard, "Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems," IEEE Trans. Commun., vol. 28, no. 11, pp.1867 - 1875, Nov. 1980.
- [3] Signal Processing and Image Communication Group (SPIB), "Microwave Channel Impulse Responses Dataset," Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), [Online]. Available: <http://spib.linse.ufsc.br/microwave.html>