

초광대역 위성간 통신을 위한 시간 교차 ADC 시스템

성지원, 최진석

한국과학기술원 전기및전자공학부

A Time-Interleaved ADC System for Ultra-Wideband Inter-Satellite Communications

Jiwon Sung and Jinseok Choi

School of Electrical Engineering, KAIST

{jiwonsung, jinseok}@kaist.ac.kr

요 약

초광대역 위성간 통신에서 매우 높은 샘플링 레이트가 필수적이다. 단일 고속 ADC 를 구현하는 것은 비용적 부담이 크기에, 이에 대한 대안으로 다수의 서브-ADC 를 병렬로 구성해 샘플링 레이트를 배가시키는 시간 교차 ADC (TI-ADC) 기법이 많이 활용된다. 하지만 TI-ADC 구조에서 서브-ADC 간의 오프셋, 게인, 타이밍 미스매치 오류가 신호 품질을 심각하게 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 칼만 필터 기반으로 미스매치 오류를 정확하게 예측하는 기법을 제안한다.

1. 서론

초광대역(UWB) 위성간 통신은 대기 흡수나 주변 간섭이 상대적으로 적어, 초고속 대역폭을 효율적으로 활용할 수 있는 차세대 위성 네트워크 기술로 주목받고 있다. 이러한 UWB 링크에서 큰 전송 용량을 확보하려면, 매우 높은 샘플링 레이트를 지원하는 ADC가 필수적이다. 그러나 단일 ADC로 이와 같은 속도를 구현하는 것은 전력 [2], [3] 및 비용 측면에서 쉽지 않은 과제이다. 이에 대한 대안으로, 여러 서브-ADC 를 병렬로 배치하여 전체 샘플링 속도를 높이는 시간 교차 ADC (TI-ADC) 구조가 제시되고 있다 [1]. TI-ADC 는 각 서브-ADC 가 순차적으로 입력 신호를 샘플링함으로써, 단일 ADC 대비 훨씬 빠른 종합 샘플링 레이트를 달성할 수 있다. 다만, 서브-ADC 간 발생하는 오프셋(offset), 게인(gain), 타이밍(timing) 미스매치는 고속 신호의 정확도와 동적 범위를 심각하게 저하시킨다. 따라서 UWB 위성간 통신 환경에서 TI-ADC 를 안정적으로 운용하기 위해서는, 서브-ADC 간 불일치를 정확히 추정하고 즉각적으로 보상할 수 있는 기법이 필요하다. 본 논문은 필터 기반의 TI-ADC 미스매치 추정 기법을 제안한다. 제안 기법은 수신단에서 기준 신호를 활용하여 서브-ADC 오차를 실시간으로 추적하고, 이를 통해 고속 샘플링 환경에서 발생하는 복잡한 미스매치 문제를 효과적으로 해결하여 위성 간 초광대역 통신의 대역폭 요구 사항을 만족시키면서도 높은 신뢰도를 유지하도록 돕는다.

2. 본론

본 논문에서는 [4]과 동일한 하이브리드 보정 구조를 사용했다. TI-ADC 는 총 M 개의 서브-ADC 가 순차적으로 입력 신호를 샘플링한다. 각 서브-ADC 의 오프셋, 게인, 타이밍 미스매치는 각각 $\alpha^{(m)}$,

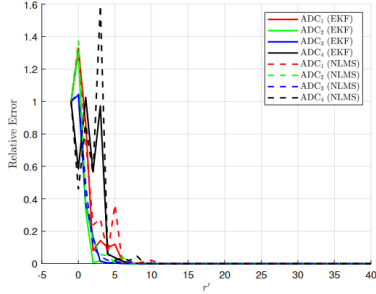
$\beta^{(m)}, \phi^{(m)}$ 로 정의한다. 매 M_h 번째 샘플마다 이미 알려진 사인 신호 $h(t)$ 를 샘플링하여, TI-ADC 출력 $\bar{h}[n]$ 과 기준 신호 $h[n]$ 을 비교함으로써 미스매치 파라미터 $\theta_t^{(m)} = [\alpha^{(m)}, \beta^{(m)}, \phi^{(m)}]^T$ 를 추정한다. 여기서 $m = \text{mod}(n, M) + 1$ 이며, $\text{mod}(\cdot)$ 는 모듈로 연산자이다. 이 때, 기준 신호를 샘플링하는 순간엔 실제 데이터 신호가 무시되므로 결측 샘플이 발생한다. 이러한 결측 샘플은 일정 조건을 만족하면 샘플링 이론에 따라 복원이 가능하다 [4]. 따라서 본 논문에서는 TI-ADC 출력에서 결측 샘플을 0 으로 대체하고, 대역제한 가정에 근거하여 원본 데이터를 복원하는 과정을 가정한다.

본 논문에서는 확장 칼만 필터 (EKF)를 적용하여 TI-ADC 미스매치 오차를 추정하는 방법을 제안한다. EKF 는 크게 예측 단계(prediction)와 갱신 단계(update)로 구성되며, 각 단계에서 상태 추정값(평균)과 오차 공분산을 재귀적으로 계산한다.

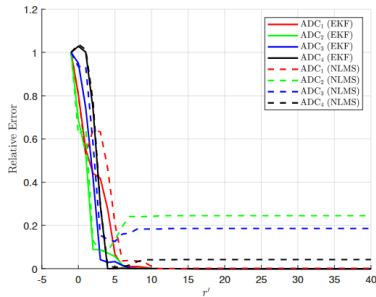
다음으로, EKF 알고리즘을 통해 TI-ADC 의 미스매치 오차를 추정하는 과정을 자세히 살펴본다. 먼저 예측 단계에서는 이전 시점 $t-1$ 에서 구한 상태 벡터의 사후 (a posteriori) 추정치 $\hat{\theta}_{t-1|t-1}$ 를 기반으로 현재 시점 t 에서의 사전 (a priori) 추정치 $\hat{\theta}_{t|t-1}$ 를 계산한다. 이를 위해 상태 진화 함수 $f(\cdot)$ 의 야코비안 (Jacobian)을 적용하여 얻은 상태 전이 행렬 F_t 를 사용하고, $\hat{\theta}_{t|t-1} = F_t \hat{\theta}_{t-1|t-1}$ 로 예측한다. 아울러, 예측값에 대한 오차 공분산 행렬은 $\Sigma_{t|t-1} = F_t \Sigma_{t-1|t-1} F_t^T + Q$ 로 계산함으로써, 상태가 시간에 따라 어떻게 변화할지를 통계적 관점에서 반영한다. 이후 관측 모델인 $\bar{h}(\cdot)$ 를 이용하여 관측값 $\hat{y}_{t|t-1}$ 을 사전 추정하고, 야코비안 H_t 로부터 $\hat{y}_{t|t-1}$ 의 오차 공분산 $S_{t|t-1}$ 을 산출한다.

갱신 단계에서는 실제로 수신된 관측값 y_t 를 통

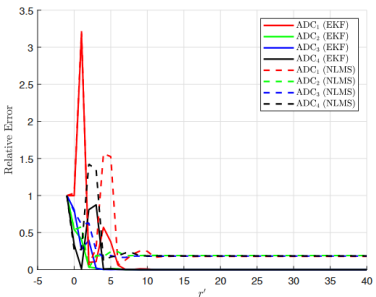
해 사전 추정치를 보정한다. 먼저, 혁신(innovation) 항인 $\Delta y_t = y_t - \hat{y}_{t|t-1}$ 을 계산하여, 예측값과 실제 관측값 사이의 차이를 구한다. 이어, 이 차이를 상태 추정에 어떻게 반영할지를 결정하는 칼만 게인 $K_t = \Sigma_{t|t-1} H_t^T S_{t|t-1}^{-1}$ 을 도출한다. 칼만 게인은 오차 공분산을 최소화하는 방향으로 설계되며, 이를 이용해 사후 추정치 $\hat{\theta}_{t|t} = \hat{\theta}_{t|t-1} + K_t \Delta y_t$ 를 갱신한다. 마지막으로, 갱신된 상태 벡터의 오차 공분산 $\Sigma_{t|t} = K_t S_{t|t-1} K_t^T$ 로 업데이트되면서, 전체 알고리즘은 상태와 관측이 들어올 때마다 예측과 갱신 단계를 반복한다.



(a) Offset estimation



(b) Gain estimation



(c) Timing estimation

그림 1. 오프셋, 게인, 타이밍 미스매치 추정값.

각 서브-ADC가 동일한 샘플링 레이트로 입력 신호를 받아들이고, 오프셋, 게인, 타이밍 미스매치는 시간이 지남에도 불변한다고 가정하였다. 이를 통해, 하드웨어 구현 시 자주 고려되는 가장 기본적인 시나리오에서 EKF 기반 알고리즘의 유효성을 검증하고자 하였다. 시뮬레이션에서 서브-ADC마다 임의의 초깃값을 갖는 오프셋, 이득, 타이밍 오차를 부여한 뒤, 일정 주기마다 삽입되는 기준 사인 신호의 샘플을 활용하여 오차를 추정하였다. 그 결과, EKF 알고리즘은 오프셋과 이득 오차에 대해서는 초기 수 회

의 샘플링만으로 매우 낮은 상대 오차 (relative error) 범위로 수렴하였으며, 특히 시간축 해상도가 높은 타이밍 오차도 안정적으로 추정하여 결국 거의 0에 가까운 잔차 값을 획득하였다. 이는 전경(foreground) 보정 없이도 무리 없이 구현 가능한 하이브리드 구조에서, 서브-ADC 간 불일치 요소를 짧은 학습 구간 안에 충분히 식별하고 있음을 시사한다. 또한 비교 대상으로 사용한 NLMS 기반 추정 방식은 오프셋 오차 추정에서는 EKF와 유사한 성능을 보였지만, 이득 및 타이밍 오차 측면에서는 상대적으로 높은 정착값을 나타냈다. 결론적으로, 시간 불변 미스매치 상황에서 EKF 알고리즘은 빠른 수렴 속도와 낮은 최종 오차를 모두 만족함으로써, TI-ADC의 신호 품질 유지에 효과적인 기법임을 입증하였다.

3. 결론

본 논문에서는 TI-ADC에서 발생하는 미스매치 오차를 정확히 추정하기 위해 EKF 기반 온라인 추적 기법을 제안하였다. 측정 모델로 사인 신호를 도입함으로써 NLMS 기반 기존 방식에 비해 높은 정확도와 빠른 수렴 속도를 달성할 수 있음을 모의실험으로 보였다. 특히 복잡한 필터 설계를 거치지 않아도 되므로, 실제 구현 시 계산 복잡도 측면에서도 장점을 가진다. 본 연구의 확장된 버전에 관한 보다 상세한 정보는 [5]를 참조하시기 바랍니다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00395824, (총괄 1-세부 2) Upper-mid Band를 지원하는 Cloud virtualized RAN (vRAN) 시스템 기술 개발)

4. 참고 문헌

- [1] W. C. Black and D. A. Hodges, "Time interleaved converter arrays," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 15, no. 6, pp. 1022–1029, 1980.
- [2] J. Choi, J. Park and N. Lee, "Energy Efficiency Maximization Precoding for Quantized Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 9, pp. 6803–6817, Sept. 2022.
- [3] S. Park, J. Sung, J. Choi, J. Park and W. Shin, "Maximizing Energy and Spectral Efficiency Tradeoff in MISO-RSMA Systems Under Coarse Quantization," 2024 32nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Lyon, France, 2024, pp. 857–861.
- [4] K. M. Tsui and S. C. Chan, "A Novel Iterative Structure for Online Calibration of M-channel Time-Interleaved ADCs," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 2, pp. 312–325, 2014.
- [5] J. Sung and J. Choi, "A New Interpretation of the Time-Interleaved ADC Mismatch Problem: A Tracking-Based Hybrid Calibration Approach," *arXiv*, 2025, arXiv:2503.10022.