

시뮬링크 기반의 주파수 오프셋 추정 시스템 시뮬레이터 구현

김현수, 김준환, 윤석호[†], *박재희, **김광순, ***송익호, *이성로

성균관대, *목포대, **연세대, ***한국과학기술원

[†] 교신저자 (syoon@skku.edu)

Implementation of Simulink-Based Frequency Offset Estimation System Simulator

Hyun Soo Kim, Junhwan Kim, Seokho Yoon[†], *Park Jae hee, **Kim Kwang Soon, ***Ickho Song, *Seong Ro Lee

Sungkyunkwan University, *Mokpo National Univ., **Yonsei Univ., ***KAIST

[†] Corresponding author (syoon@skku.edu)

요약

본 논문에서는 SS 신호의 주파수 오프셋 추정에 대한 연구를 수행한다. 우선 SS 시스템에 [2]의 주파수 오프셋 추정 기법을 적용하고, 이를 시뮬링크 시뮬레이터로 구현한다. 다음으로는 구현된 시뮬링크 시뮬레이터의 구조를 설명하며, 모의실험 결과를 통해 [2]의 기법을 적용하여 SS 신호의 주파수 오프셋을 신뢰성 있게 추정할 수 있음을 보인다.

I. 서론

대역 확산 (spread spectrum: SS) 기술은 재밍 및 다중 경로 간섭에 강한 특성 때문에 부호 분할 다중 접속, 무선 랜, 위성 항법 시스템 등 많은 통신 시스템에 사용되고 있다. SS 시스템에서는 데이터의 복조를 위해 수신 신호와 수신기에서 생성된 신호 간의 동기화가 이루어져야 하므로 신호 동기화는 SS 시스템의 중요한 기술적 이슈 중 하나이다 [1].

SS 신호의 완전한 동기화를 위해서는 시간 (timing) 동기화, 위상 (phase) 추정, 주파수 오프셋 (frequency offset) 추정이 모두 이루어져야 한다. 이들 중 시간 동기화, 위상 추정은 많이 연구되어 왔으나, 주파수 오프셋 추정에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다.

SS 시스템에 비해 상대적으로 주파수 오프셋 추정에 관한 연구가 많이 진행되어 있는 orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) 시스템 분야에서는 수신 신호가 시간 영역에서 반복된 형태를 지니고만 있으면 적용할 수 있고, 연산이 간단하다는 장점을 갖는 [2]의 기법이 널리 사용된다. SS 시스템 또한 동기화를 위해 확산 부호를 시간 영역에서 반복적으로 전송하기 때문에 [2]의 기법을 적용하여 주파수 오프셋을 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 SS 신호의 주파수 오프셋 추정에 대한 연구를 수행한다. 우선 SS 시스템을 시뮬링크 시뮬레이터로 구현한 후, 수신부에 [2]의 기법을 적용하여 주파수 오프셋을 추정한다. 모의실험 결과를 통해 [2]의 기법을 이용하여 SS 신호의 주파수 오프셋을 신뢰성 있게 추정할 수 있음을 보인다.

II. 주파수 오프셋 추정 기법

시간 및 위상 동기화가 맞았을 때 수신된 SS 신호의 복소 기저 이산 신호 모형은 다음과 같다.

$$r(n) = \sqrt{2P}c(n)e^{j2\pi\epsilon n} + w(n), \text{ for } n=0,1,\dots,N-1, \quad (1)$$

여기에서 P 는 수신 신호의 전력, $c(n)$ 는 시간 영역에서 반복 전송된 확산 부호, ϵ 는 신호의 대역폭으로 정규화된 주파수 오프셋, $w(n)$ 는 평균 0,

분산 σ^2 을 갖는 부가 백색 정규 잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN), N 은 SS 신호의 길이를 나타낸다. 반복 횟수가 2회일 경우 $c(n)$ 은 그림 1과 같은 구조를 갖는다.

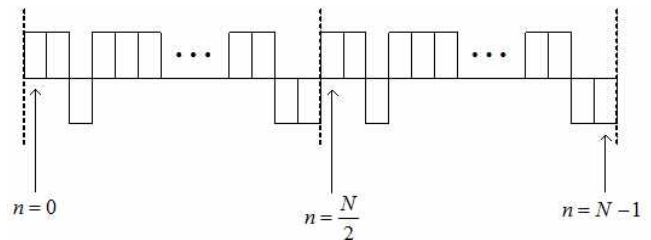


그림 1. 시간 영역에서 $c(n)$ 의 구조

수신 신호 $r(n)$ 및 [2]의 기법을 이용하여 아래와 같이 주파수 오프셋을 추정한다.

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{\pi N} \angle \sum_{n=0}^{N/2-1} r^*(n)r(n+N/2). \quad (2)$$

(2)에서 주파수 오프셋 추정 범위는 $-\frac{1}{N} \leq \epsilon < \frac{1}{N}$ 이다. 예를 들어 SS 신호의 대역폭이 2 MHz이고 SS 신호의 길이 N 이 100이라면 (2)의 주파수 오프셋 추정 범위는 ± 20 KHz이다. 보통 SS에서 고려하는 도플러 주파수는 수십~수백 Hz 정도이므로 [3] 식 (2)를 이용하여 주파수 오프셋을 추정할 수 있다.

III. 시뮬링크 기반 시뮬레이터

본 장에서는 (2)를 바탕으로 SS 신호의 주파수 오프셋 추정을 위한 시뮬링크 기반 시뮬레이터를 구현한다. 본 시뮬레이터는 시뮬링크에서 제공하는 기본적인 블록 및 S-function 기반의 블록을 이용하여 시각화하였다.

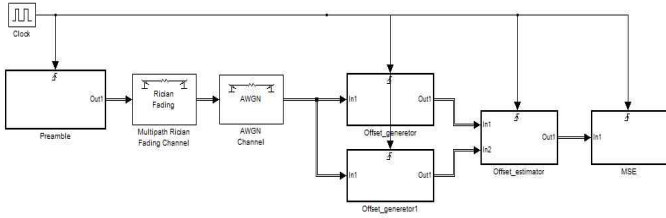


그림 2. 시뮬레이터의 전체 구조

그림 2는 시뮬레이터의 전체 구조를 나타낸다. 채널을 제외한 모든 블록은 trigger 기반의 S-function으로 이루어져 있다. Preamble 블록에서는 반복적인 구조를 갖는 확산 부호 기반의 신호를 생성한다. 생성된 신호는 Rician 분포를 띠는 다중경로 및 잡음 채널을 거쳐 수신부에 도착한다. 수신부에 도착한 신호는 임의의 주파수 오프셋을 겪게 된다. 본 시뮬레이터에서는 편의를 위해 수신 신호 $r(n)$ 을 n 에 따라 각각 다른 갈래로 ($n = 0, 1, \dots, N/2 - 1$ 및 $n = N/2, N/2 + 1, \dots, N - 1$) 수신하도록 처리하였으며 두 갈래로 입력되는 신호 모두에 공통적인 주파수 오프셋을 겪도록 처리하였다. 두 갈래로 입력된 신호는 Offset_estimator 블록에 전달되며, 이 블록에서는 (2)에 따라 주파수 오프셋을 추정한다. Mean square error (MSE) 블록에서는 실제 주파수 오프셋과 추정된 주파수 오프셋의 차이의 제곱수를 저장하여 다음처럼 여러 시뮬레이션 수행에 따라 평균값을 산출한다.

$$MSE = E[\hat{\varepsilon} - \varepsilon]^2. \quad (3)$$

다음으로 그림 2의 전체 구조를 바탕으로 하여 각각의 세부 블록 내부 기능에 대해 설명 한다. 먼저 Preamble 부분에서는 아래 수식에 의해 확산 부호로 사용할 Cazac sequence를 생성한다.

$$s(n) = e^{\frac{j2\pi pq l}{\sqrt{L}}}, \text{ for } 0 \leq n \leq L - 1, \quad (4)$$

여기에서 L 은 Cazac sequence의 길이 (제곱수), l 은 L 과 서로소인 정수, p 와 q 는 0부터 $\sqrt{L} - 1$ 사이의 정수로 수열의 인덱스 l 과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$l = p + q\sqrt{L}. \quad (5)$$

본 시뮬레이터에서는 $L = 36$ 으로 설정하였으며, 이를 각각 4회, 8회 반복 시켰다 ($N = 144$ 및 288). 전송된 신호는 채널 및 주파수 오프셋을 거쳐 수신부에 도착한다.

주파수 오프셋 생성 블록 (Offset_generator)에서는 수신신호에 주파수 오프셋을 첨가한다. 그림 3은 주파수 오프셋 생성 블록을 보여준다. 우선 입력된 신호를 실수부와 허수부로 나누어 S-function의 입력 값으로 사용한다. 그림 4 및 5는 각각 신호의 실수부와 허수부에 파라미터로 설정한 주파수 오프셋 값을 첨가하여 $r^*(n)$ 및 $r(n + N/2)$ 를 ($n = 0, 1, \dots, N/2 - 1$) 출력하는 S-function 코드이다. 그림 4 및 그림 5의 S-function 코드를 통해 출력된 신호는 Real-Image to Complex 블록을 통해 복소수로 재변환된다.

그림 6은 복소수로 재변환된 신호를 이용하여 주파수 오프셋 추정을 수행하는 블록을 (Offset_estimator) 보여준다. 수식 (2)를 기반으로 구성되었으며, Constant 블록에서는 상수 $\frac{1}{\pi N}$ 를 만든다.

모의실험은 다음 환경에서 수행되었다. 수신 신호의 길이 N 은 144, 288, 신호대잡음비는 (signal-to-noise ratio: SNR) 5dB, 20dB의 다양한

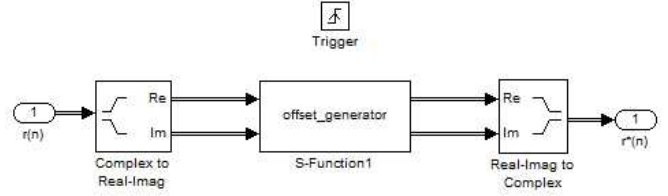


그림 3. 주파수 오프셋 생성 블록

```

if ( ssGetPortBasedSampleTimeBlockIsTriggered(S) ) {
    for(k=0;k< iPreambleLength/2; k++)
    {
        y0[k] = x0[k]*cos(2*Pi*FrequencyOffset*k)-x1[k]*sin(2*Pi*FrequencyOffset*k);
        y1[k] = -x1[k]*cos(2*Pi*FrequencyOffset*k)+x0[k]*sin(2*Pi*FrequencyOffset*k);
    }
}
    
```

그림 4. $r^*(n)$ 출력을 위한 S-function 코드

```

if ( ssGetPortBasedSampleTimeBlockIsTriggered(S) ) {
    for(k=0;k< iPreambleLength_half;k++)
    {
        y0[k] = x0[k+iPreambleLength_half]*cos(2*Pi*FrequencyOffset*(k+iPreambleLength_half))
        -x1[k+iPreambleLength_half]*sin(2*Pi*FrequencyOffset*(k+iPreambleLength_half));
        y1[k] = x1[k+iPreambleLength_half]*cos(2*Pi*FrequencyOffset*(k+iPreambleLength_half))
        +x0[k+iPreambleLength_half]*sin(2*Pi*FrequencyOffset*(k+iPreambleLength_half));
    }
}
    
```

그림 5. $r(n + N/2)$ 출력을 위한 S-function 코드

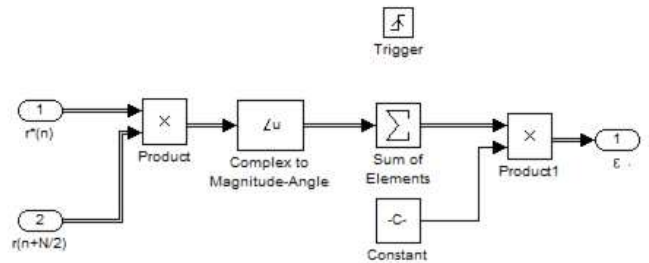
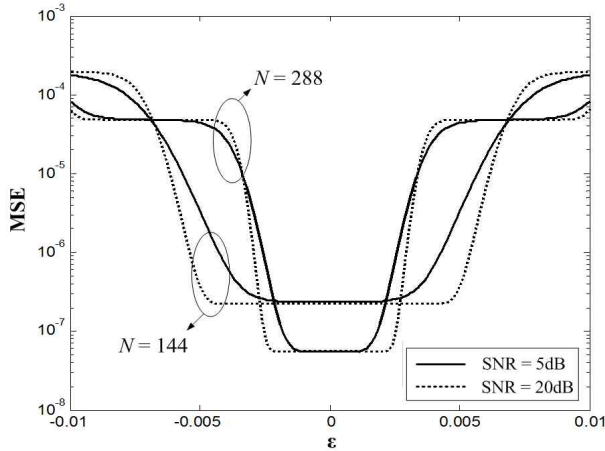


그림 6. 주파수 오프셋 추정 블록

경우를 고려하였으며, Rician 페이딩 채널의 k-factor는 8로 설정하였다. 그림 7은 본 시뮬레이터의 주파수 오프셋 추정 성능을 ε 에 따른 MSE 그래프로 보여주고 있다. SNR이 5dB인 상황에서 N 이 144일 때, 288일 때 각각 MSE는 $-0.004 \leq \varepsilon < 0.004$ 및 $-0.002 \leq \varepsilon < 0.002$ 정도에서 우수한 성능을 보이고 그 외의 ε 에서는 성능이 급격히 하락하는 것을 볼 수 있다. 또한, SNR이 20dB인 상황에서는 N 이 144일 때, 288일 때 각각 MSE는 $-0.005 \leq \varepsilon < 0.005$ 및 $-0.0025 \leq \varepsilon < 0.0025$ 정도에서 우수한 성능을 보이고 그 외의 ε 에서는 성능이 급격히 하락하는 것을 볼 수 있다. 이는 각도 연산을 이용하기 때문에 ε 이 주파수 오프셋의 추정 범위의 한계 지점인 $-\frac{1}{N}$ 및 $\frac{1}{N}$ 에 가까울수록 주파수 오프셋 추정 성능이 잡음의 영향에 더 민감하기 때문이다. 이러한 부분은 SNR이 높아질수록 극복되며, 잡음의 영향이 거의 없는 경우 주파수 오프셋 추정 범위는 $-\frac{1}{N} \leq \varepsilon < \frac{1}{N}$ 과 일치하게 된다. 또 다른 관찰 결과로는 N 이 클수록 추정 가능 범위 내에서의 MSE 성능이 더 좋아진다는 점이며, 이는 더 많은 신호 샘플을 이용할수록 잡음 성분이 더 상쇄되기 때문이다.

그림 7. ε 에 따른 MSE 그래프

IV. 결론

본 논문에서는 SS 신호의 주파수 옵셋 추정에 대한 연구를 수행하였다. 우선 SS 시스템에 [2]의 주파수 옵셋 추정 기법을 적용하였으며, 이를 시뮬링크 시뮬레이터로 구현하였다. 구현된 시뮬링크 시뮬레이터의 구조를 설명하였으며, 모의실험 결과를 통해 [2]의 기법을 적용하여 SS 신호의 주파수 옵셋을 신뢰성 있게 추정할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2011-0002915)과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업(NIPA-2011-C1090-1121-0007)의 연구 결과로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] S. Yoon, S. C. Kim, J. Heo, I. Song, and S. Y. Kim, "Twin-cell detection (TCD): a code acquisition scheme in the presence of fractional Doppler frequency offset," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1797-1803, May 2009.
- [2] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [3] O.-S. Shin and K. B. Lee, "Double-dwell code acquisition with differentially coherent combining in DS/CDMA systems," *Proc. IEEE Inter. Sympo. Person. Indoor and Mobile Radio Commun.*, pp. D-6-D-10, San Diego, CA, Sep. 2001.