

단일 톤 재밍 환경에서의 주파수 추정기법 성능 분석

이제원, 정준영, 이상욱, 황유라

한국전자통신연구원

{jw_lee, jungjy, slee, ylhwang}@etri.re.kr

Analysis of Frequency Estimation Techniques under a Single-Tone Jamming

Jewon Lee, Joon-Young Jung, Sanguk Lee, Yoola Hwang

Electronics and Telecommunications Research Institute

요약

본 논문은 단일 톤 재밍(Single-Tone Jamming) 환경에서 두 가지 주파수 추정기법, 즉 곱 후 합(Multiply-Then-Sum) 방식과 합 후 곱(Sum-Then-Multiply) 방식의 성능을 분석하였다. JSR(Jamming to Signal Ratio)이 20 dB인 환경에서 시뮬레이션을 수행하였으며, 전통적인 곱 후 합 방식은 재머의 위상 성분에 의해 주파수 추정이 실패하는 반면, 합 후 곱 방식은 일부 바이어스가 존재하더라도 주파수 추정이 가능한 결과를 보였다. 이를 통해 강한 단일 톤 재밍 환경에서도 합 후 곱 기반의 추정기법이 더 강건한 성능을 나타냄을 확인하였다.

I. 서론

위성항법이나 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 기반 통신 시스템에서는 정확한 주파수 추정이 동기화의 핵심 요소로 작용한다. 그러나 협대역 단일 톤 재머(Single-Tone Jammer)가 존재할 경우, 신호의 위상 추정과 주파수 동기화 성능이 심각하게 저하될 수 있다. 본 논문에서는 GPS(Global Positioning System) OS(Open Service) 신호를 기반으로 JSR(Jamming to Signal Ratio)이 20 dB인 단일 톤 재밍 환경에서 두 가지 주파수 추정기법으로부터 얻은 주파수 추정 값을 이용한 주파수 추적 성능을 비교 분석한다. [1]

II. 시스템 모델

본 연구에서 고려한 수신신호 $r[n]$ 은 다음과 같다.

$$r[n] = s[n]e^{(j2\pi f_d n T_s)} + A_t e^{j(2\pi f_t n T_s + \phi_t)} + w[n] \quad (1)$$

여기서 $s[n]$ GPS L1 C/A 신호, f_d 는 송신 신호의 주파수 오프셋, A_t , f_t , ϕ_t 는 단일 톤 재머의 진폭, 주파수, 위상, $w[n]$ 은 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 이다. 본 모의실험에서는 샘플링 주파수 f_s 를 C/A (Coarse Acquisition) 코드의 칩 전송률(Chip Rate)과 동일한 1.023 MHz, PRN(Pseudo Random Noise) 길이 N 는 C/A 코드의 길이인 1023, 주파수 추정을 위한 칩(Chip)간 간격 L 은 511, JSR은 20 dB 조건에서 수행하였다.

III. 주파수 추정기법

주파수 추정은 일반적으로 두 구간 간 위상차를 이용하여 계산한다. 본 논문에서는 다음 두 가지 방식을 비교하였다.

첫 번째 방식은 곱 후 합(Multiply-Then-Sum) 방식으로 전통적인 주파수 추정 방법으로 식 (2)와 같다.

$$R_{MS} = \sum_{n=0}^{N-L-1} r^*[n]r[n+L] \quad (2)$$

여기서 $r^*[n]$ 은 켈레 복소수를 의미한다. 식 (3)은 R_{MS} 를 이용하여 추정된 주파수를 나타낸다.

$$\hat{f}_{MS} = \frac{1}{2\pi L T_s} \angle R_{MS} \quad (3)$$

여기서 위상은 $[-\pi, \pi]$ 를 출력하는 역 탄젠트를 이용한다.

두 번째 방식은 합 후 곱(Sum-Then-Multiply) 방식으로 식(4)와 같다.

$$R_{SM} = \left(\sum_{n=0}^{L-1} r^*[n] \right) \left(\sum_{n=0}^{L-1} r[n+L] \right) \quad (4)$$

주파수 추정 값 $\hat{f}_{SM}$ 은 R_{SM} 과 식(3)을 이용하여 계산할 수 있다.

곱 후 합과 합 후 곱 방식을 이론적으로 분석하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} E[R_{MS}] &= P_s e^{j2\pi f_d L T_s} + P_t e^{j2\pi f_t L T_s} \\ E[R_{SM}] &= P_s e^{j2\pi f_d L T_s} + P_t e^{j2\pi f_t L T_s} + \text{crossterms} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 P_s , P_t 는 원하는 신호와 재머 신호의 전력을 의미한다.

식(5)에서 알 수 있듯이 곱 후 합 방식은 강한 단일 톤 재머가 존재하면 재머 항이 지배적이어서 추정된 주파수가 재머의 주파수로 바이어스(Bias)될 수 있음을 알 수 있다. 반면, 합 후 곱 방식은 각 구간의 신호가 합성되어 재머 성분이 부분적으로 상쇄될 수 있으며 일부 조건에서는 교차항(Cross Term)이 신호 성분을 보강하여 주파수 추정이 가능할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 주파수 추적기법

두 가지 주파수 추정기법을 이용하여 계산된 주파수 추정 값을 2차 루프 필터(Loop Filter)의 입력으로 사용하여 주파수를 보정한다. FLL(Frequency Locked Loop)은 주파수 추정기법과 루프 필터의 조합을 의

미한다. 식 (6)은 2차 루프 필터를 나타낸다.

$$\begin{aligned} W_{prev}[n] &= W_c[n-1] \\ W_c[n] &= \hat{f}[n]G_{F1}T_i + W_{prev}[n] \\ FL_{out}[n] &= \frac{(W_c[n] + W_{prev}[n])}{2} + \hat{f}[n]G_{F2} \\ F_N &= 1.88B_F, G_{F1} = F_N^2, G_{F2} = \sqrt{2}F_N \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 B_F 는 루프 필터의 대역폭, F_N 은 고유 주파수(Natural Frequency), G_{F1} 은 1차 루프 필터 이득, G_{F2} 는 2차 루프 필터 이득, $W_c[n]$ 은 누적기 결과, T_i 는 누적 시간을 의미한다. 루프 필터 출력 $FL_{out}[n]$ 을 이용하여 최종 주파수 보정 값은 식 (7)과 같다.

$$FLL_{nco}[n] = FLL_{nco}[n-1] + FL_{out}[n]T_i \quad (7)$$

V. 모의실험

표 1은 모의실험 파라미터를 나타낸다. 샘플링 주파수 f_s , PRN 길이 N , 주파수 추정을 위한 칩 간격 L , JSR은 2장의 시스템 모델에 정의된 값을 사용하였다.

표 1. 모의실험 파라미터

파라미터	값
반송파 대 잡음비(CNR)	-17.5 dB
루프 필터 대역폭 (B_F)	1 Hz
누적 시간 (T_i)	1 msec
단일 톤 재머 시작 주파수	200 Hz
단일 톤 재머 주파수 변화율	1 Hz/sec
모의실험 시간	500 sec

반송파 대 잡음비 CNR(Carrier to Noise Ratio)는 -17.5 dB는 GPS 최소 수신 전력 -128.5 dBm과 신호 대역폭 2.046 MHz를 이용하여 계산된 값이다. [2] 모의실험 시간 500초 동안 단일 톤 재머 주파수는 200 Hz부터 700 Hz까지 변화하며 송신 신호 $s[n]$ 의 주파수 오프셋은 0 Hz로 고정하였다.

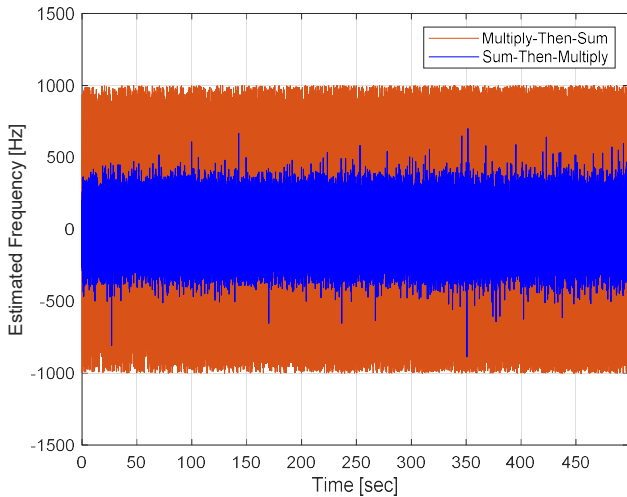


그림 1. 주파수 추정기법으로 추정된 주파수 결과

그림 1은 두 가지 주파수 추정기법의 출력인 $\hat{f}_{MS}$, $\hat{f}_{SM}$ 의 결과를 보여 준다.

식 (8)은 주파수 추정기법에 따른 식 (7)의 결과 값과 송신 신호 $s[n]$ 의 주파수 오프셋 f_Δ 간의 차이로 잔여 주파수를 나타낸다.

$$f_r[n] = f_\Delta - FLL_{nco}[n] \quad (8)$$

그림 2에서 볼 수 있듯이 JSR 20 dB에서 곱 후 합 방식은 단일 톤 재머의 주파수로 바이어스되지만, 합 후 곱 방식은 그렇지 않은 것을 알 수 있다. 합 후 곱 방식이 높은 JSR 환경에서도 상대적으로 안정적인 주파수 추정을 수행함을 알 수 있다.

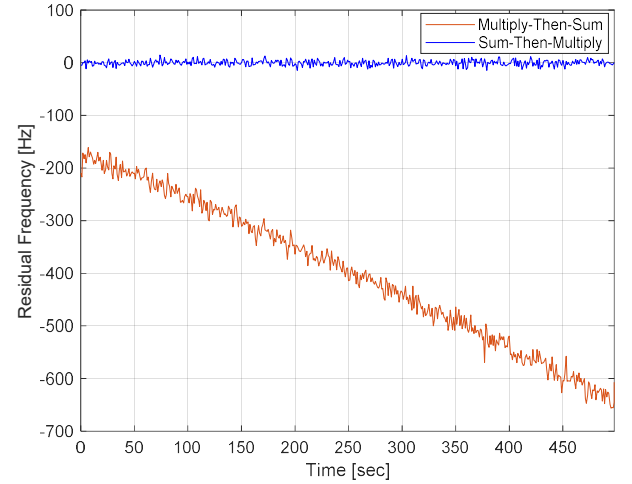


그림 2. 주파수 추정기법에 따른 잔여 주파수 결과

VI. 결 론

본 논문은 단일 톤 재머 환경에서 두 가지 주파수 추정기법의 성능을 비교하였다. 재머가 신호보다 20 dB 강한 경우, 곱 후 합 방식은 재머의 주파수에 바이어스되어 주파수 추적이 실패하였으나, 합 후 곱 방식은 원하는 신호에 대한 주파수 추적이 성공함을 모의실험을 통해서 확인하였다. 이 결과는 향후 DSSS 수신기 설계에서 단일 톤 재머 환경에 대응하기 위한 주파수 추정 구조 설계에 유효한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : RS-2022-00165951)

참 고 문 헌

- [1] Kaplan, Elliott D., and Christopher Hegarty, "Understanding GPS/GNSS: principles and applications", Artech house, 2017.
- [2] Byeong-Jae Yu, Yong-Sup Shim, Hyun-Mook Cho, Il-Kyoo Lee, & Heon-Jin Hong, "A Study on the Protection Ratio of GPS", The J. KICS, vol. 36, no. 3, pp. 296-301, Mar. 2011.