

Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 정밀 거리 추정

조원철, 장갑석, 김용선, 고영조
한국전자통신연구원

{woncheol, kschang, doori, koyj}@etri.re.kr

Precise Range Distance Estimation with Zadoff-Chu Sequences

Woncheol Cho, Kapseok Chang, Yong Sun Kim, and Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

요약

본 논문에서는 Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 정밀 거리 추정 기법을 제안한다. 제안 추정 기법은 샘플링 이론에 기반하여 제한된 무선 자원으로 지연 영역 분해능을 향상하여 거리 추정 성능을 개선한다. 실험 결과는 제안 기법이 TDL-D 채널 모델에서 정밀한 거리 추정을 달성함을 보인다.

I. 서론

센싱은 차세대 무선 네트워크를 위한 어플리케이션 시나리오를 가능케 하는 주요 요소 기술 중 하나로, 학계와 산업계에서 많은 관심을 받고 있다 [1]. 정밀 거리 추정은 센싱의 범주 중 하나로, 향후 예상되는 다양한 무선 서비스를 지원하기 위해 필수적이다. 또한 정밀 거리 추정을 통해 고해상도의 지연 영역 채널 정보를 획득하면 프리코딩을 통해 주파수 선택적 채널에서 통신 성능을 효과적으로 향상할 수 있다. 본 논문에서는 root 인덱스 1의 Zadoff-Chu 시퀀스가 이산시간 베이스밴드 선형 chirp 신호와 동일하다는 사실에 기반하여 Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 정밀 거리 추정 기법을 제안한다. 2 장의 제안 추정 기법은 샘플링 이론에 기반하여 제한된 무선 자원으로 지연 영역 분해능을 향상하여 거리 추정 성능을 개선한다. 3 장의 실험 결과는 제안 추정 기법이 LoS(Line-of-Sight) 경로가 존재하는 TDL-D 채널 모델에서 제한된 대역폭으로 거리 추정을 효과적으로 수행함을 보인다.

II. Zadoff-Chu 시퀀스 기반 거리 추정 기법

송신단은 시간 T 의 연속시간 베이스밴드 선형 chirp 신호를 샘플 개수 N 으로 샘플링하여 n 번째 샘플에 대해 다음과 같은 root 인덱스 1의 Zadoff-Chu 시퀀스($n = 0, 1, \dots, N-1$)를 얻을 수 있다.

$$s[n] = \exp\left(j2\pi\left(-\frac{n}{2} + \frac{n^2}{2N}\right)\right). \quad (1)$$

송신단은 왕복 채널의 최대 지연 확산보다 긴 길이를 가지는 CP(Cyclic Prefix)를 삽입하여 단일 캐리어 변조를 수행하고, 수신단은 왕복 신호에 대해 CP를 제거하여 n 번째 샘플에 대해 다음과 같은 수신 신호($n = 0, 1, \dots, N-1$)를 얻을 수 있다.

$$r[n] = (h \circledast s)[n] + w[n], \quad (2)$$

이때, 자기 간섭은 완벽히 제거됨을 가정하고, $h[l]$ 은 l 번째 채널 탭, $w[n]$ 은 n 번째 샘플의 AWGN(Additive

White Gaussian Noise), \circledast 는 원형 컨볼루션 연산자로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$(h \circledast s)[n] = \sum_{l=L_0}^{L_0+L-1} h[l]s[(n-l) \bmod N], \quad (3)$$

이때, L_0 와 L 은 왕복 채널의 0이 아닌 채널 탭의 최소값과 개수를 각각 나타내고, $(\cdot) \bmod N$ 은 모듈로- N 연산자를 나타낸다. 수신 신호에 대한 정밀 거리 추정을 수행하기 위해 수신 신호와 수식 (1)의 Zadoff-Chu 시퀀스의 cross-correlation을 수행하여 다음과 같은 비트 신호($n = 0, 1, \dots, N-1$)를 획득할 수 있다.

$$b[n] = r^*[n]s[n] \\ = \sum_{l=L_0}^{L_0+L-1} h^*[l] \exp\left(j\phi_l + j\frac{2\pi ln}{N}\right) + z[n], \quad (4)$$

이때, $(\cdot)^*$ 는 켈레 복소 연산자, $\phi_l = -\pi(l + l^2/N)$, $z[n] = w^*[n]s[n]$ 이고 $w[n]$ 과 동일한 분포를 가지는 AWGN이다. 두 번째 등호는 수식 (1)의 Zadoff-Chu 시퀀스 정의를 통해 유도된다. 송신단과 타겟 사이 단일 LoS 경로가 존재함을 가정하면, 샘플링 이론에 의해 샘플링 주파수 $f_s = T/N$ 의 대역 제한적인 LTI(Linear Time-Invariant) 채널의 l 번째 탭은 다음과 같이 모델링될 수 있다 [2].

$$h[l] = \begin{cases} \text{sinc}(l - f_s\tau), & l = L_0, \dots, L_0 + L - 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

이때, $\tau = 2R/c$ 는 왕복 채널 지연, R 은 송신단과 타겟 사이의 거리, c 는 광속이다. 수식 (5)의 채널 모델을 수식 (4)의 비트 신호에 대입하고 크기- N 의 이산 푸리에 변환을 수행하면 부분송파 $k = L_0, \dots, L_0 + L - 1$ 에 대해 다음의 주파수 영역 신호를 얻을 수 있다.

$$B[k] = \sqrt{N} \text{sinc}\left(T\left(\frac{k}{T} - f_r\right)\right) \exp(j\phi_k) + Z[k], \quad (6)$$

이때, 비트 주파수 $f_r = f_s\tau/T$, $Z[k]$ 는 $z[n]$ 의 크기- N 의 이산 푸리에 변환이다. 주어진 $B[k]$ 에 대해 추정 비트 주파수를 다음과 같이 구할 수 있고,

$$\hat{f}_r = \arg \max_k |B[k]| / T, \quad (7)$$

이에 대응하는 추정 거리는 다음과 같이 주어지고,

$$\hat{R} = \frac{c\hat{f}_r T}{2f_s}, \quad (8)$$

추정 해상도는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\hat{R} = \frac{c\Delta fT}{2f_s} = \frac{c}{2f_s'} \quad (9)$$

이때, $\Delta f = 1/T$ 는 부반송파 간격이다. 수식 (9)에서 볼 수 있듯이 이산 주파수 영역에서 거리 추정 해상도는 샘플링 주파수 f_s 에 의해 결정된다. 하지만 본 논문에서 제안하는 decimation 기법은 샘플링 이론에 기반하여 지연 영역 추정 해상도를 향상할 수 있다. 수식 (6)의 주파수 영역 비트 신호 $B[k]$ 에 대해 각 부반송파 k 별 $\exp(j\pi(k^2 + k)/N)$ 을 곱하여 위상 회전하고, 크기- N 의 이산 푸리에 역변환을 수행하면 충분히 큰 N 에 대하여 다음과 같은 신호($n = 0, 1, \dots, N-1$)를 얻을 수 있다.

$$\bar{b}[n] \approx \exp(j2\pi f_r T_s n) + \bar{z}[n], \quad (10)$$

이때, $\bar{z}[n]$ 은 $Z[k] \exp(j\pi(k^2 + k)/N)$ 의 크기- N 의 이산 푸리에 역변환이다. 주어진 decimation factor D 에 대해, $d = 0, \dots, D-1$ 과 $n = 0, \dots, N/D-1$ 에 대해, decimated 비트 신호 $\tilde{b}^{(d)}[n] = \bar{b}[Dn + d]$ 를 정의하고, 모든 d 에 대해 추정 비트 주파수 \hat{f}_r 를 이용하여 MRC(Maximal Ratio Combining)를 수행하면, 다음과 같은 이산시간 신호($n = 0, 1, \dots, N/D-1$)를 얻을 수 있다.

$$\tilde{b}[n] = \frac{1}{\sqrt{D}} \sum_{d=0}^{D-1} \tilde{b}^{(d)}[n] \exp(-j2\pi \hat{f}_r T_s d). \quad (11)$$

FFT(Fast Fourier Transform) 크기 $N_{\text{fft}} = MN$ 에 대해, $n = 0, \dots, N/D-1$ 에는 $\tilde{b}[n]$ 을 대입하고 나머지 샘플은 제로 패딩하여 크기- N_{fft} 의 FFT를 수행하면 $\exp(j2\pi(f_r - \hat{f}_r)T_s d) \approx 1$ 이라는 가정 하에 샘플링 이론에 의해 부반송파 $k = MDL_0, \dots, MD(L_0 + L - 1)$ 에 대해 다음과 같은 주파수 신호를 얻을 수 있다.

$$\tilde{B}[k] \approx \sqrt{ND} \text{sinc}\left(T\left(\frac{k}{MDT} - f_r\right)\right) \exp(j\tilde{\phi}_k) + \tilde{Z}[k], \quad (12)$$

이때, $\tilde{\phi}_k = -\pi(N-1)k/N$, $\tilde{Z}[k]$ 는 $Z[k]$ 와 동일한 분포를 가지는 AWGN이다. 수식 (6)과 수식 (12)의 주파수 영역 신호를 비교하면 확인할 수 있듯이 제안 기법은 유효 부반송파 간격을 MD 배 줄이며, D 배의 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 향상 효과를 얻는다. 줄어든 유효 부반송파 간격 $\Delta f_{\text{eff}} = 1/(MDT)$ 에 따른 MD 배 향상된 유효 추정 해상도는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\hat{R}_{\text{eff}} = \frac{c\Delta f_{\text{eff}}T}{2f_s} = \frac{c}{2f_s MD} = \frac{\Delta\hat{R}}{MD}. \quad (13)$$

실제적인 채널에서 제안 기법의 추정 성능 향상 효과는 3 장의 실험 결과를 통해 제공된다.

III. 실험 결과

본 절에서는 샘플링 주파수 61.44 MHz 의 TDL-D 채널 [3]에서, 부반송파 간격 120 kHz, 샘플 개수 512 개의 Zadoff-Chu 신호의 단일 캐리어 변조를 통한 거리 추정 RMSE(Root Mean Square Error) 성능을 관찰한다. TDL-D 채널의 지연 확산은 37 ns 로 주어지고, 첫 번째 탭은 K-factor 13.3 dB 의 Rician 분포, 다른 탭들은 Rayleigh 분포를 따른다. 송신단으로부터 타겟의 거리는 95-100 m 구간에서 균일하게 분포하고, CP 길이는 왕복 채널의 최대 지연 확산보다 크도록 72 로 설정되었다. N_{fft} 는 4096 으로, 샘플 개수 512 에 비해 8 배 크도록 설정하였다.

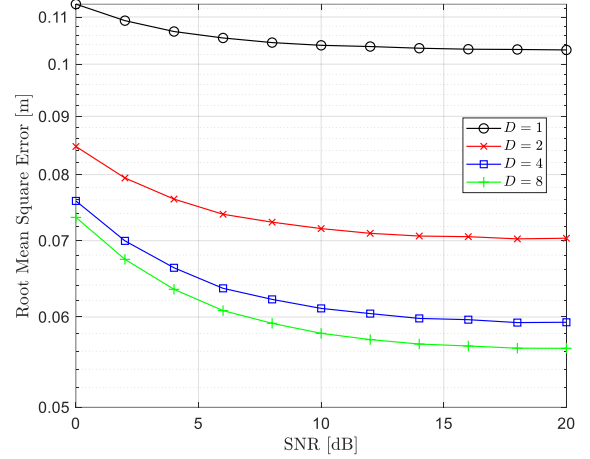


그림 1. 서로 다른 decimation factor D 에 따른 제안 기법의 SNR 대비 추정 RMSE 성능

그림 1은 서로 다른 decimation factor D 에 따른 제안 기법의 SNR 대비 추정 RMSE 성능을 나타낸다. Decimation factor D 가 클수록 추정 기법의 유효 부반송파 간격이 줄어들고 SNR 이득이 증가한다. Decimation 이 수행되지 않은 추정 기법($D = 1$)은 높은 SNR 영역에서도 추정 RMSE 0.1 m 를 달성하지 못하는 반면, decimation 이 수행되는 제안 추정 기법($D > 1$)은 낮은 SNR 영역에서도 0.1 m 보다 작은 RMSE 를 달성하는 것을 볼 수 있다. 특히 $D = 8$ 의 추정 기법은 SNR=20 dB 에서 0.056 m 의 매우 정밀한 거리 추정을 수행하여, 제안 기법의 효과성을 입증한다.

IV. 결론

본 논문은 Zadoff-Chu 시퀀스를 이용한 정밀 거리 추정 기법을 제안하였다. 실험 결과는 제안 기법이 TDL-D 채널에서 제한된 주파수 대역폭 61.44 MHz 으로 효과적인 정밀 거리 추정을 수행함을 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

참고 문헌

- [1] S. Lu *et al.*, "Integrated sensing and communications: Recent advances and ten open challenges," *IEEE Internet Things J.*, early access, Feb. 2024, doi:10.1109/JIOT.2024.3361173.
- [2] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2005.
- [3] 3GPP TSG RAN, "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16)," *3GPP TR 38.901*, V16.1.0, Jan. 2020.