

수중음향환경에서 Linear Canonical Transform 기반의 채널 임펄스 응답 추정 및 특성 분석

이다운, 배호석*

*국방과학연구소

dwlee0420@add.re.kr, *belfre@add.re.kr

Estimation and Characteristic Analysis of Channel Impulse Response using Linear Canonical Transform for Underwater Acoustic

Dawoon Lee, Ho Seuk Bae*

*Agency for Defense Development

요약

수중 통신 및 탐지 분야에서 정확한 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response, CIR)의 추정은 시스템 성능을 좌우하는 핵심 요소이다. 일반적으로 CIR 추정에는 송신 신호와의 상관도를 이용하는 정합 필터(Matched Filter)가 주로 사용된다. 그러나 송수신기의 고속 기동으로 인한 강한 도플러 효과가 발생할 경우, 신호의 시간 축적 변화로 인해 정합 필터의 성능이 급격히 저하되는 한계가 있다. 또한, 비협조적 탐지 환경에서는 송신 신호의 정확한 정보를 알 수 없어 기존 기법 적용이 어렵다. 이에 본 논문에서는 푸리에 변환의 일반화된 형태인 Linear Canonical Transform(LCT)을 수중음향 채널 추정에 적용하는 기법을 제안한다. LFM 신호에 대해 LCT 도메인에서의 에너지 집중 특성을 분석하고, Windowed-LCT(WLCT)를 통해 국소적 시간-주파수 특징을 추출하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 LCT 파라미터 조절을 통해 도플러로 왜곡된 LFM 신호의 에너지를 효과적으로 집중시킬 수 있었으며, 이를 통해 고속 기동 환경에서도 기존 정합 필터 대비 정밀한 CIR 추정이 가능함을 확인하였다.

I. 서론

수중음향 채널은 다중 경로(Multipath) 전달, 전달 손실, 그리고 시변동성으로 인해 통신 및 탐지 성능 확보가 매우 까다로운 환경이다. 이러한 환경에서 송신된 신호가 겹는 왜곡을 보상하고 표적을 정확히 탐지하기 위해서는 채널 임펄스 응답(CIR) 혹은 Green's function의 정확한 추정이 필수적이다. 전통적으로 이를 위해 잡음 환경에서 신호 대 잡음비(SNR)를 최대화하는 정합 필터(Matched Filter)가 널리 사용되어 왔다[1]. 정합 필터는 탐침 신호(Probe signal)의 자기상관 함수가 델타 함수(Dirac delta function)에 근사할수록 우수한 거리 분해능을 가지므로, 수중 분야에서는 주로 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호가 사용된다.

그러나 송수신 플랫폼의 고속 기동이 동반되는 환경에서는 도플러 효과(Doppler effect)에 의해 수신 신호의 주파수 천이 및 시간 팽창/수축이 발생한다. 이는 LFM 신호와 참조 신호 간의 부정합을 유발하여 CIR 추정 성능을 심각하게 저하시키며, 탐지 정확도를 떨어뜨리는 주요 원인이 된다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 시간-주파수 평면의 자유로운 선형 변환이 가능한 Linear Canonical Transform(LCT)을 도입한다. LCT 파라미터 제어를 통해 도플러로 왜곡된 LFM 신호의 에너지를 최적의 축으로 회전시켜 CIR을 추정하고, 기존 STFT 및 정합 필터 기법과 그 성능을 비교 분석한다.

II. 본론

LCT는 4개의 파라미터(a, b, c, d)를 갖는 선형 적분 변환으로, 행렬식 $ad - bc = 1$ 을 만족한다. 입력신호 $f(t)$ 에 대한 LCT 변환 $L_M[f]$ 는 다음과 같이 정의된다[2][3].

$$L_M[f](u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{j2\pi b}} e^{\frac{j}{2b}u^2} \int e^{-j\frac{1}{b}ut} e^{j\frac{a}{2b}t^2} f(t) dt, & b \neq 0 \\ \sqrt{d} e^{\frac{jcd}{2}u^2} f(du), & b = 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 파라미터 a, b, c, d 는 시간-주파수 평면에서의 회전, 확대/축소, 전단 변화를 결정한다. 그림 1은 이러한 LCT의 기하학적 변환 개념을 도식화한 것이다.

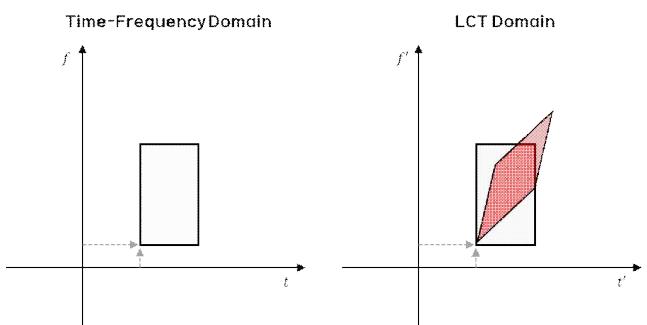


그림 1. LCT의 시간-주파수 평면 변환 모식도

LFM 신호 $f(t) = e^{j\pi\mu t^2}$ 는 시간-주파수 평면에서 기울기 μ 를 갖는 직선으로 나타난다. 기존 푸리에 변환은 시간 축과 수직인 축으로만 투영 하므로 LFM 신호의 에너지가 퍼져 나타나지만, LCT를 이용해 해당 직선을 시간 축과 수직이 되도록 회전시키면 에너지가 한 점(Impulse)으로 집중된다. 이때 에너지 집중을 위한 최적의 비율은 a/b 비율을 조절하여 결정하며, 신호의 Chirp rate μ 와 $a/b \approx 2\pi\mu$ 관계를 만족할 때 CIR 추정 성능이 극대화된다[3].

제안하는 LCT 기반 기법의 타당성을 검증하기 위해, 먼저 도플러 효과가 없는 정적인 수중 채널 환경(Static Channel)을 가정하여 시뮬레이션

을 수행하였다. 송신 신호로는 LFM 파형을 사용하였으며, 채널의 지연 시간(Time delay)은 0.5초로 설정하였다. 그림 2는 정적 환경에서의 신호 처리 결과를 보여준다.

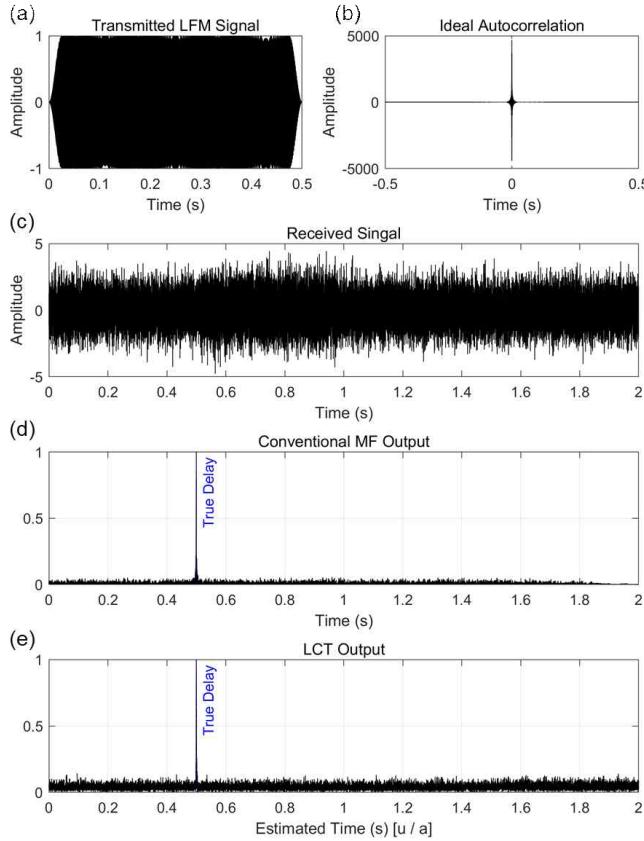


그림 2. 정적 채널 환경에서의 CIR 추정 성능 비교 검증:
(a) 송신 LFM 파형, (b) 자기상관 함수 결과, (c) 수신신호,
(d) MF 적용 결과, (e) LCT 변환 결과

그림 2(a)의 송신 신호가 채널을 통과하여 그림 2(c)와 같이 수신되었을 때, 기존 정합 필터를 적용한 결과인 그림 2(d)와 제안하는 LCT 기법을 적용한 그림 2(e)를 비교해보면, 두 기법 모두 0.5초 지점에서 정확한 임펄스 응답(Green's function)을 추정함을 알 수 있다. 이는 도플러가 없는 이상적인 상황에서 LCT 기법이 정합 필터와 동등한 수준의 정확도를 가짐을 검증한 것이며, LCT 변환이 CIR 추정에 유효하게 적용될 수 있음을 시사한다. 또한, LFM 신호의 시간-주파수(Time-Frequency) 국소 특성을 분석하기 위해 그림 3과 같이 기존 STFT와 Windowed-LCT(WLCT)를 비교 분석하였다.

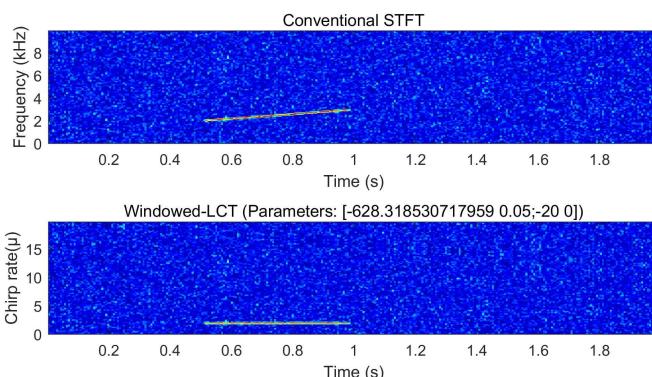


그림 3. 시간-주파수 분석 특성 비교

그림 3(a)의 STFT 결과에서는 LFM 신호가 시간-주파수 평면상에서 대각선 방향의 기울기를 갖는 럭지(Ridge) 형태로 나타난다. 반면, 그림 3(b)의 WLCT 결과에서는 에너지가 시간 축과 평행한 직선 형태로 나타남을 확인할 수 있다. 이는 LCT 파라미터가 LFM 신호의 Chirp Rate를 완벽하게 보상하여, 주파수 변조 성분을 제거하고 에너지를 특정 축으로 압축시켰음을 의미한다. 이러한 변환 특성은 잡음이 섞인 환경에서도 신호의 에너지를 효과적으로 집중시켜 탐지 성능을 높이는 핵심 기제가 된다.

마지막으로, 송수신 플랫폼의 고속 기동에 따른 도플러 효과를 고려하여 CIR 예측 성능을 평가하였다. 표 1은 상대 속도(5, 10, 20, 50 m/s) 변화에 따라 기존 LCT를 이용한 단순 속도 추정 지연 시간 예측 결과를 비교한 것이다.

표 1. 기동속도 별 MF 및 LCT 기반 지연시간과 도플러 속도 추정 성능 비교(실제 지연시간: 0.5 s).

	예측 지연시간		추정 상대속도 LCT
	MF (s)	LCT (s)	
상 대 속 도	5 m/s	0.4949	4.92 m/s
	10 m/s	0.4891	9.95 m/s
	25 m/s	0.4795	23.32 m/s
	50 m/s	0.4600	50.44 m/s
	100 m/s	0.4177	100.23 m/s

III. 결론

본 연구에서는 수중음향 통신 및 탐지 시 발생하는 고속 기동 도플러 환경에서, 기존 정합 필터의 한계를 극복하기 위해 LCT 기반의 채널 임펄스 응답 추정 기법을 제안하였다. LCT는 파라미터 조절을 통해 도플러로 왜곡된 LFM 신호의 에너지를 효과적으로 집중시킬 수 있었으며, WLCT를 통해 시간-주파수 해상도를 개선할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년 정부의 재원으로 수행된 연구 결과임(915084201).

참 고 문 헌

- [1] W. S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis," Prentice Hall, pp. 231–232, 1991.
- [2] M. J. Bastiaans, "The Wigner distribution function and linear canonical signal transformations," J. Opt. Soc. Am., vol. 69, pp. 1710–1716, 1979.
- [3] S. C. Pei and J. J. Ding, "Relations between fractional operations and time-frequency distributions, and their applications," IEEE Trans. Signal Process., vol. 49, no. 8, pp. 1638–1655, 2001.