

칼만 필터를 사용한 레이더 펄스열 추적 Tracking of Radar Pulse Train Using Kalman Filter

김 용 우, 신 욱 현**, 이 효 섭***, 김 홍 필****, 양 해 원*****

- * 국방과학연구소(Tel: 042-821-3531; Fax: 042-821-2225; E-mail:ywkim63@sunam.kreonet.re.kr)
- ** 국방과학연구소(Tel: 042-821-3545; Fax: 042-821-2225; E-mail:whshin@sunam.kreonet.re.kr)
- *** 서울정수기능대학 전기과(Tel: 02-2001-4051; Fax: 02-2001-4139; E-mail:hyoseop@kopo.or.kr)
- **** 경일대학교 전기공학과(Tel: 053-850-7146; Fax: 053-850-7602; E-mail:kimhongp@bear.kyungil.ac.kr)
- ***** 한양대학교 전기공학과(Tel: 031-400-5162; Fax: 031-406-7769; E-mail:hwyang@email.hanyang.ac.kr)

Abstract : Generally, discrete-time processing is applied to the uniformly-sampled signals. But, radars emit pulse trains with irregular time instances. In this paper, we formulate the radar pulse train as a stochastic discrete-time dynamic linear model. The estimation task can be done via linear signal processing using Kalman Filter and some considerations. As a result, we can estimate the pulse repetition interval of a pulse train and predict the time instances of the next pulses to be received.

Keywords : radar, pulse train, Kalman Filter, tracking, PRI, TOA

1. 서론

일반적으로 디지털 신호처리 분야에서는 연속적인 아날로그 신호를 일정한 샘플링 간격으로 샘플링하여 디지털로 변환한 데이터를 다룬다. 음성신호, 영상신호 등의 신호처리가 이에 속하는 대표적인 예이다. 그러나 레이더에서 방출되는 펄스 신호는 매우 짧은 펄스폭과 불규칙하고 긴 펄스 간격, 그리고 레이더 스캔으로 인한 신호의 불연속성 등의 특성으로 인하여 기존의 디지털 신호처리 이론을 직접 적용하기에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 전자전(電子戰) 분야의 레이더 탐지 및 재밍 신호 발생 등에 필요한 레이더 펄스 신호 분석에 대하여 논한다. 수신 안테나를 통하여 수신되고 측정된 레이더 펄스 데이터들은 각각 측정된 도착시간(TOA; Time Of Arrival) 정보를 갖게 된다. 그러나 이 TOA 데이터는 불규칙하게 여러 레이더의 펄스 데이터가 혼재되어 있으므로, 여러 단계의 처리과정을 통하여 유효한 정보로 변환된다. 처리과정 중 신호분리(deinterleaving) 과정을 거치면 혼재된 레이더 펄스들은 펄스를 방사한 레이더 별로 분리된다[2],[3],[4]. 그러나 레이더 펄스에는 잡음 펄스와 반사 펄스, 누락 펄스 등이 존재하고 펄스 신호 정보의 모호성으로 인하여 완벽한 신호분리는 대단히 어려운 일이다. 이렇게 분리된 펄스 신호를 이용하여 레이더 식별, 경보, 추적, 재밍 등과 같은 후속 조치가 이루어진다.

펄스열 추적을 위하여 펄스반복주기(PRI; Pulse Repetition Interval)와 관련된 파라미터 추정이나 TOA 예측을 위한 많은 연구가 수행되고 있다[1],[5]. 본 논문에서는 이러한 펄스열(Pulse Train) 데이터를 다루기 위하여 펄스열을 방출하는 레이더를 어떻게 이산시간의 선형 시스템으로 모델링 할 수 있는지 보였으며, 적절한 필터를 이용하여 모델의 파라미터를 추정하며 다음 펄스의 도착시간을 예측하는 것이 가능하다는 것을 보였다.

2. 레이더 펄스 신호

레이더는 목표물을 향하여 펄스 신호를 방사하고 목표물에서 반사되는 펄스를 수신하여 목표물의 존재 여부와 방향을 알아내고 반사되는 시간으로부터 목표물까지의 거리를 계산한다. 레이더가 한

개의 펄스를 방사하고 다음 펄스를 방사할 때까지의 시간 간격을 펄스반복주기(PRI)라고 하며, PRI가 일정한 펄스열을 고정(stable) PRI 펄스열, 일정한 시간 폭 내에서 무작위로 흔들리는 펄스열을 지터(jittered) PRI 펄스열, 그리고 여러 단계의 PRI값을 반복해서 사용하는 것을 스테거(staggered) PRI 펄스열이라고 한다.

$k \geq 1$ 번째 펄스의 TOA를 y_k 라고 하고, y_k 와 y_{k+1} 의 간격을 $T_k \equiv y_{k+1} - y_k$ 로 정의하면, 펄스열의 PRI와 TOA는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= T_{k+1} = T_k \\ y_{k+1} &= y_k + T + v_k \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서 v_k 는 백색잡음으로서 $v_k=0$ 인 경우가 고정 PRI 펄스열이고, $v_k > 0$ 인 경우가 지터 PRI 펄스열이며, v_k 의 크기가 지터율을 결정한다. 스테거 펄스열의 경우 스테거 단수가 N 이라고 할 경우, 스테거 PRI는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T = \sum_{n=1}^N T_n \quad (2.2)$$

여기서, T_n 은 $n \in \{1, \dots, M\}$ 번째 단의 PRI이고, T 는 프레임 주기이다. 측정된 레이더 펄스는 펄스폭, 펄스세기, 펄스주파수, 방위각, 도착시간 등의 펄스내(intra pulse) 특성과 펄스반복주기, 스캔주기 등과 같은 펄스간(inter pulse) 특성을 갖는다. 그러나, 본 논문은 펄스열의 PRI를 찾아내고 다음 펄스의 TOA를 예측하는 것이 목적이므로, 레이더 펄스가 갖는 이러한 여러 특성들 중에서 시간과 관계된 정보만을 한정적으로 다루기로 한다.

3. 수학적 모델링

본 논문의 주 관심사는 펄스의 PRI와 TOA이므로, 펄스의 세기 및 방위각, 주파수 등의 정보는 모델링에서 제외한다. 실제로 레이더 펄스는 펄스폭과 세기, 주파수를 갖지만 펄스폭은 펄스반복주기(PRI)에 비하면 무시할 만큼 작은 값이고 펄스의 세기와 주파수는 이 논문에서 다루는 내용이 아니므로 시간축에서 펄스의 유무를 1과 0으로만 간단히 표현할 수 있다.