

DTOA를 이용한 혼합된 다중 신호 환경 하에서 펄스 열 주파수 추정

정회원 김 정 호*

Paper Pulse train frequency estimation using DTOA in the multi-signal environment

Jung-ho Kim* *Regular Member*

요 약

이 논문에서는 주기적인 특성을 가진 펄스 열들이 서로 다른 초기 위상을 가지고 수신기에 입력되었을 때 도래 시간 차이를 이용하여 펄스 열을 분리하는 방법을 제시하고자 한다. 주기적인 펄스 열을 주파수 관점에서 고찰해 보면 하나의 펄스 열 주파수 값으로 특성 지을 수 있으며 이러한 성질은 다중의 펄스 열이 포함된 신호 환경 하에서도 동일하게 나타난다. 제안된 기법은 기존의 스펙트럼 영역에서 사용된 신호 도래 시간의 지수함수로의 매핑을 대신하여 신호 도래 시간 차이를 이용하였으며 실제 다중 환경에서 나타날 수 있는 신호 성분들의 펄스 열 주파수 추정을 위하여 기존의 방법과 비교함으로써 제시한 방법의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes the method to deinterleave pulse trains using DTOA(Difference Time Of Arrival) when pulse trains with periodic characteristic enter the receiver with different initial phases. If we observe the periodic pulse train in the frequency aspect, it is characterized by one pulse train frequency value and this property still remains in the environment including the multi-signal pulse trains. The proposed technique makes use of DTOA instead of exponential mapping of TOA used in the previous spectrum analysis. This paper confirms validity of the proposed method by means of comparing the previous method to estimate pulse train frequency of signal components that exist in the real multi-signal environment.

I. 서론

오늘날의 전장 환경에서는 각종 플랫폼에서 사용하는 레이더의 종류 및 수량이 증가하고 또한 복합적으로 사용되기 때문에 이러한 신호를 수신, 분석하고 식별하는 전자전 장비의 중요성은 날로 증대되고 있다. 그러나, 레이더의 특성 파라미터를 완전히 분석할 수 있는 장비를 모든 플랫폼에 탑재한다

는 것은 비용이나 공간 등에서 제약을 받을 수 있으므로 최소한의 파라미터로서 최대한의 레이더 정보를 얻는 것이 전자전 장비의 전자전지원(Electronic Warfare Support) 분석 기능이 가져야 하는 최대 목표이다. 일반적으로 레이더 신호는 짧은 듀티(duty) 사이클을 가진 펄스 열을 이용하여 표적의 거리 및 방위 정보를 얻기 위하여 사용되며 함정의 경우 여러 종류의 펄스 주기를 가지는 신호를 이용하고 있다. 이러한 신호를 분리하기 위해서

* 국방과학연구소 (jhkim@add.re.kr)

논문번호 : 010052-0403, 접수일자 : 2001년 4월 3일

는 신호의 특성 파라미터, 즉 펄스 열의 신호원이 서로 다른 주기를 가지고 신호를 방출한다는 조건을 기본으로 하고 있다.

이전의 고전적인 방법으로는 수신된 펄스 신호의 인접한 쌍을 선택하여 그 도래 시간을 투영시키는 방법이 Davies/Holland^[1]와 Campbell/Saperstein^[2], 이것의 발전된 모델인 신호 도래 시간의 차이를 이용한 히스토그램 기법이 Mardia^[3], 히스토그램의 발전된 기법인 순차차분 히스토그램 기법과 시퀀스 탐색기법의 혼합시킨 방법이 Milojevic/Popovic^[4]에 의하여 제안되었다. 이러한 기법들은 계산 회수 증가로 인한 처리 시간과 신뢰성 측면에서 단점을 가지고 있다. 최근에는 이러한 방법에서 벗어난 새로운 방법이 제시되고 있는데 그 중에서도 행렬의 특수한 성질을 이용한 분석 방법이 Ray^[5], 도래시간의 투영을 이용한 펄스 열 주파수 추정 방법이 Orsi, Moore와 Mahony^[6]에 의해 제안되었다. 본 논문에서는 신호 도래시간 차이에 대한 이산 푸리에 변환을 적용하여 펄스 열의 주파수를 추정하는 방법을 제시하고 기존의 스펙트럼을 이용한 주파수 추출 방법과 비교, 분석하였으며 일반적으로 레이더 신호의 수신에서 나타나는 잡음이나 펄스 누락에 대해서도 제안된 방법이 현실성을 가짐을 보여줄 것이다.

II. 펄스 열 주파수 추정

먼저 혼합된 다중의 전자파 신호가 존재하는 환경에서의 펄스 열 신호를 각각의 신호원으로 분리하여 표적을 식별하고자 한다. 본 논문에서는 펄스 신호의 도래 시간의 차이를 이산 푸리에 변환하여 펄스 열의 주파수를 추정한다.

다중 신호 모델은 M 개의 펄스 열로 구성되고 펄스 열의 시작 위상 및 주기를 각각 ϕ_i, f_i 로 가정하고 신호의 도래 시간은 t_0 에서 시작하여 t_N 으로 끝나며 신호 펄스의 누락은 없다고 가정한다. 주어진 가정을 이용하여 도래시간 사이의 차이는 다음과 같은 이산적인 식으로 표현할 수 있다.

$$x(n) = t_{n+1} - t_n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

DTOA를 이용한 펄스 열 주파수 추정의 타당성을 보이기 위하여 특별한 경우에 대하여 DTOA에 이산 푸리에 변환을 적용할 것이며 이것은 다중 신호가 혼합된 경우에도 펄스 열 추정이 가능함을 시

물레이션을 통하여 보일 것이다. 특별한 경우의 변환을 위한 조건은 첫째로 모든 펄스 열의 초기 위상을 "0"에서 시작하는 것으로 고려하였다. 두 번째 과정으로는 임의의 펄스 도래 시간이 중복되더라도 그 데이터를 누락시키지 않는다는 것이며 또한 누락 펄스도 없다고 가정한다. 세 번째로는 수신된 펄스 데이터는 최소한 주기(T)의 정수 배의 개수를 가져야 한다. 주기 T에 대한 예를 들면, M=3인 경우에 펄스 열이 혼합되었을 때 정의되는 한 주기는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 주기는 각각의 펄스 열 주기의 최소공배수에 해당하는 시간을 의미하며 T_1, T_2, T_3 의 관계는 $T_1 : T_2 : T_3 = 3 : 2 : 1$ 과 같다.

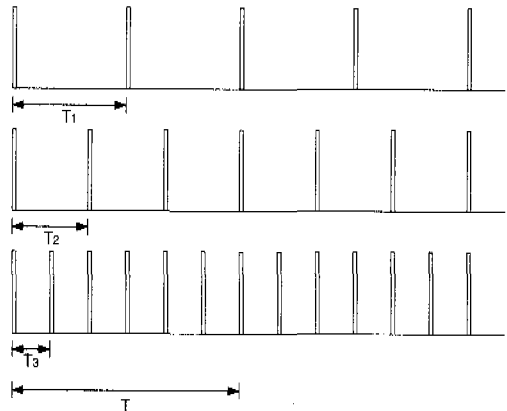


그림 1. 혼합된 펄스 열에서의 최소 펄스 주기(T)

도래 시간 차이에 대한 이산 푸리에 변환식을 유도하기 위하여 먼저 M 개의 펄스 열이 한 주기를 이루는 신호에 대하여 고려하자. 수신된 신호의 한 주기 안에 나타나는 펄스의 총 개수를 N_T , 혼합된 펄스 열을 이루는 각각의 펄스 열이 한 주기 안에서 존재하는 펄스의 개수를 각각 a_i 라 하고 각각의 펄스 열의 주기를 T_1, T_2, \dots, T_M 이라고 하면 한 주기 T는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 단 각각의 펄스 열 주기는 유리수라고 가정한다.

$$T = T_1 a_1 = T_2 a_2 = \dots = T_M a_M \quad (2)$$

또한 한 주기 안에서 총 펄스의 개수는 식 (3)으로 표현된다.

$$N_T = \sum_{i=1}^M a_i \quad (3)$$

펄스 도래 시간 데이터는 t_0, t_1, \dots, t_N 으로 잡음이 없다고 가정하며 관찰시간동안의 총 펄스 개수 N 과 한 주기 안에서의 펄스 개수 N_T 와의 관계는 식(4)와 같고, 여기서 Z 는 정수의 집합이라고 하자.

$$t_N = \frac{N}{N_T} T, \quad \frac{N}{N_T} \in Z \quad (4)$$

M 개의 혼합된 펄스 열로 구성된 신호의 도래 시간 차이(DTOA)를 이용한 경우에 대한 이산 푸리에 변환을 취하면 다음과 같다.

$$X(k) = \begin{cases} \frac{N}{N_T} \sum_{l=0}^{N_T-1} DTOA_l \cdot e^{-jk(2\pi/N)l} \\ , \text{ if } k = \frac{2\pi p}{N}, p=0, \dots, N_T-1 \\ 0, \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $DTOA_l = t_{l+1} - t_l$ 이며 l 은 한 주기 안에서 펄스 인덱스를 나타낸다. 식 (5)을 증명하기 위하여 먼저 이산 푸리에 변환의 정의식을 이용하면

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} (t_{n+1} - t_n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \end{aligned} \quad (6)$$

n 은 도래시간 차이의 데이터에 대한 인덱스이며 수신된 신호가 주기 T 를 가지며, T 동안에 수신된 펄스의 개수가 N_T 라고 가정하였으므로 n 을 $m \cdot N_T + l$ 로 대체할 수 있으며, m 은 전체 시간 동안에 포함된 주기 개수의 계수 값이다.

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{m=0}^{N/N_T-1} \sum_{l=0}^{N_T-1} DTOA_l \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}k(mN_T+l)} \\ &= \sum_{l=0}^{N_T-1} \left[\sum_{m=0}^{N/N_T-1} e^{-jk\frac{2\pi}{N}N_T m} \right] \cdot DTOA_l \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kl} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{N/N_T-1} e^{-jk\frac{2\pi}{N}N_T m} &= \sum_{m=0}^{N/N_T-1} z^m \\ &= \begin{cases} \frac{z^{N/N_T} - 1}{z - 1}, & \text{if } z \neq 1 \\ \frac{N}{N_T}, & \text{if } z = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

$$= \begin{cases} 0, & \text{if } z \neq 1 (\because z^{N/N_T} = 1) \\ \frac{N}{N_T}, & \text{if } z = 1 \end{cases} \quad (7)$$

여기서 z 는 $e^{-jk(2\pi/N)N_T}$ 이며 $z=1$ 인 경우를 고려하여 k 를 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z &= e^{-jk(2\pi/N)N_T} \\ -k \frac{N_T}{N} &= -p, \quad k = \frac{N}{N_T} p \end{aligned}$$

(p 는 양의 정수, $k \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$)

위의 식에서처럼 N 개의 데이터에 대한 이산 푸리에 변환에서 도래시간의 차이가 주기를 가지기 때문에 N 개의 샘플 포인트 중에서 N_T 개의 이산 푸리에 변환 값이 존재하며 총 관찰 시간에 대한 k 의 관계로부터 펄스 열의 주파수를 구할 수 있다. 펄스 열의 개수 M 은 구해진 펄스 열의 주파수와 총 관찰시간의 곱의 합이 수신된 총 펄스 개수 N 에 가장 근접할 경우의 펄스 주파수의 개수를 구하여 얻을 수 있다.

$$t_N \sum_{m=1}^M \hat{f}_m \approx N$$

여기서, t_N 은 총 관찰 시간, \hat{f}_m 은 추정된 펄스 열 주파수이다.

본 논문에서 제시한 도래시간 차이를 이용한 방법의 타당성을 검증하는 방안으로 기존의 방법인 도래 시간을 이용한 경우^[6]와 비교하기 위하여 [6]에서 적용한 3개의 펄스 열이 혼합되어 있고 각각의 주파수가 $f_1=0.25, f_2=0.75, f_3=0.8$ 이며 총 샘플 개수는 $N=20$ 일 때의 스펙트럼의 크기에 대한 결과를 제시하였다.^[6] 여기서 예들 든 f_1, f_2, f_3 의 경우에 대하여 혼합된 펄스 열의 한 주기 T 는 다음과 같이 구하여 사용하였다.

$$a) T_1 = \frac{1}{f_1} = 4, T_2 = \frac{1}{f_2} = \frac{4}{3}, T_3 = \frac{1}{f_3} = \frac{5}{4}$$

b) T_1, T_2, T_3 를 정수로 만들어 주기 위하여 12를 곱하고 각각을 T_1', T_2', T_3' 라 하면

$$T_1' = 48, T_2' = 16, T_3' = 15$$

c) 이제 T_1', T_2', T_3' 의 최소 공배수를 T' 라하고 이 값을 구하고 다시 처음에 곱해 준 12로 나누면 혼합 펄스 열의 한 주기를 구할 수 있다.

$$T' = 240, T = T' / 12 = 20$$

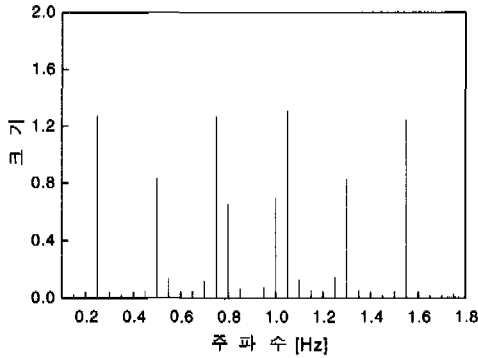


그림 2. 도래 시간에 의한 펄스 열 주파수 추정

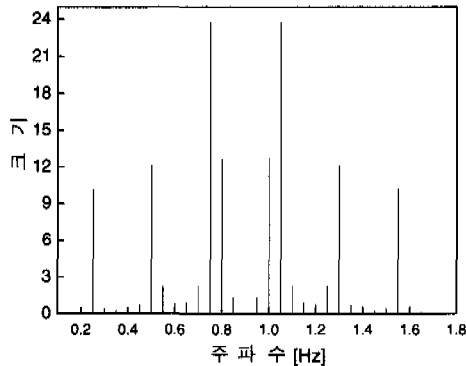


그림 3. 도래 시간 차이에 의한 펄스 열 주파수 추정

그림 2와 3은 도래 시간의 차이 즉 실수 값에 대한 이산 푸리에 변환이므로 진폭 값은 총 샘플 개수가 N 개라면 주파수 영역에서 $N/2+1$ (N 은 짝수) 혹은 $\frac{N+1}{2}$ (N 은 홀수)개의 샘플에 대하여 서로 대칭으로 나타난다^[7]. 따라서 대칭의 아래 주파수 부분을 관심영역으로 하였으며 진폭을 내림차순으로 배열하여 추정된 펄스 열 주파수 값의 합과 총 관찰시간의 곱한 값은 총 샘플 개수와 같아질 때까지 반복한다. 따라서 펄스 열 주파수를 내림차순으로 배열하면 {0.75, 0.8, 0.5, 0.25,...} 가 되며 이 값들의 합과 총 관찰시간을 곱해보면 0.75와 0.8에 대하여 그 곱은 31이 되며 나머지 5개에 대하여 만족하는 값은 0.25가 된다. 이리하여 3개의 주파수 값을 얻을 수 있다. 여기서 0.25와 0.5의 관계는 펄스 열 주파수의 하모닉 관계로 볼 수 있으며 0.25의 3차 하모닉 값으로 0.75를 여길 수 있으나 진폭의 크기 즉 기본 주파수와 2차 주파수의 진폭 평균보다 훨씬 크기 때문에 독립적인 주파수로 고려된다. 위에

서 적용된 펄스 열 추정은 임의의 다중 펄스 열이 혼합되어 있을 때도 적용이 가능하며 여기서 그 결과를 보이도록 한다. 시뮬레이션에 사용된 펄스 열들은 잡음이 없고 누락 펄스가 존재하지 않는다는 조건에 대하여 계산하였고 펄스 열 주파수는 일반적으로 사용되는 주파수 범위의 임의의 값을 선택하였다. 또한 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 기존의 방법에 의한 펄스 열 추정 결과와 비교하였다.

표 1. 펄스 열 주파수 추정 값 비교

펄스 열 번호	실제 펄스 열 주파수 (Hz)	추정 주파수 (기존) (Hz)	추정 주파수 (제시) (Hz)
1	1298.0	1298.1	1298.2
2	1740.0	1740.9	1741.0
3	2065.8	2063.5	2063.7
4	2094.4	2093.5	2093.7
5	2718.3	2716.4	2716.6
6	3000.0	3001.5	3001.7
7	3341.6	3339.2	3339.4
8	4141.6	4142.1	4142.4
9	4820.0	4817.4	4817.8
10	5510.0	5507.7	5508.2

추정된 결과는 펄스의 크기가 $N=4096$ 이며 주파수 영역에서 크기의 내림차순 배열과 샘플 크기의 관계에서 추출된 값들이다. 그림에서 볼 수 있듯이 추정된 주파수의 하모닉 성분이 존재함을 알 수 있다.

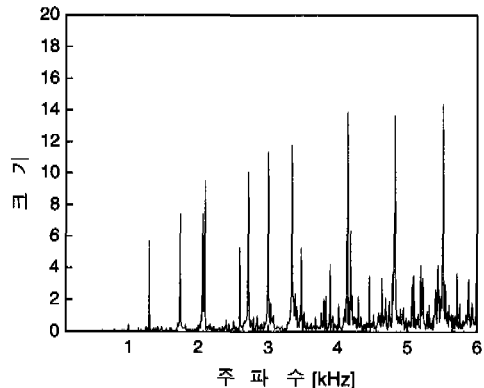


그림 4. 펄스 열의 주파수 대 크기

Ⅲ. 실제 환경 조건에서의 펄스 열 주파수 추정

1. 도래 시간에 잡음이 포함된 경우

도래시간 데이터에 수치적으로 가우시안 분포를 가지는 잡음을 임의로 부가할 수 있다. 펄스 반복 간격 즉 PRI를 추정할 때 잡음이 포함된 경우에 측정 변수(z)는 다음과 같이 정의된다.

$$z_j = x_0 + (\delta_{noise})_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, k \quad (8)$$

$$\delta_{noise} \sim N(0, \sigma^2)$$

식 (8)에서 x_0 는 참값을 나타내며 즉, PRI 값이며 잡음은 가우시안 분포를 가진다. 잡음이 포함된 PRI 데이터 생성은 다음과 같다. 각각의 신호 도래 시간에서 잡음 성분은 n 에 일반적으로 의존하며 서로 독립적인 특성을 가지고 있다. 순수한 펄스 신호에 잡음이 혼합된 실제 환경에서의 수신된 펄스 신호에 대한 잡음을 가진 PRI와 펄스 도래 시간 (Time Of Arrival : TOA)을 표현하면 식 (9), (10)와 같다.

$$PRI_n = PRI + (\delta_{noise})_n \quad (9)$$

$$TOA_n = PRI_1 + PRI_2 + \dots + PRI_n$$

$$= PRI + (\delta_{noise})_1 + PRI + (\delta_{noise})_2$$

$$+ \dots + PRI + (\delta_{noise})_n$$

$$= n \cdot PRI + \sum_{k=1}^n (\delta_{noise})_k \quad (10)$$

위와 같이 각각의 신호를 생성할 때 발생하는 PRI 잡음은 레이더의 수신단에서 TOA를 검출하는 경우에 포함되는 것은 당연하다. 잡음이 혼합된 다중 신호에서 제시된 방법을 이용하여 신호 펄스 열 주파수를 추정하면 그림 5와 같다.

잡음이 포함된 경우의 펄스 열 주파수 대 크기에 대한 시뮬레이션 결과를 보면, 단일 신호에 대한 펄스 열을 형성함을 알 수 있다. 신호 특성은 펄스 열의 특성 파라미터인 평균 PRI를 중심으로 약간의 분포를 가지게 된다. 이럴 경우 여기서 제시한 방법을 이용하기 위해서는 수신된 펄스 열의 평균 PRI를 중심으로 하고 수신된 신호의 초기 위상(ϕ_0)와 PRI 사이의 값을 위상으로 하는 신호를 만든 다음 수신 신호와 중첩시켜서 제시된 펄스 열 주파수 추정 기법을 이용하면 된다.

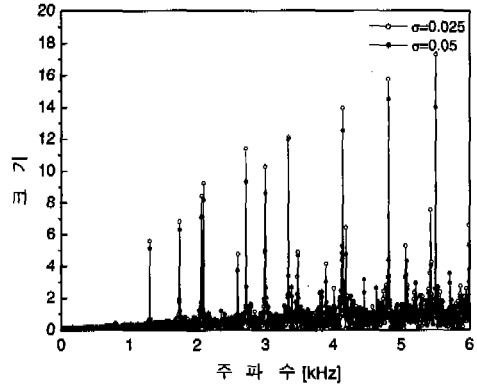


그림 5. 잡음이 포함된 경우 펄스 열 주파수 대 크기

그림 5는 잡음이 포함된 펄스 열의 주파수 대 크기를 나타낸 것이며 주파수의 값이 커질 때 더 큰 진폭 값을 가짐을 알 수 있다.

2. 누락 펄스가 발생한 경우

레이더 신호를 수신하는 경우 수신기 자체의 에러 혹은 다른 원인에 의하여 펄스가 누락되는 경우는 실제로 존재하는 문제로서 이러한 경우에 복합 펄스 열에서 펄스 열 주파수를 추정해 보자. 여기서는 균일한 펄스 분포에서 임의로 펄스 열을 누락시켜서 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 일정한 펄스 열의 신호를 만든 다음 누락율을 결정하고 이산 주

표 2. 누락 펄스가 발생한 경우의 펄스 열 주파수 추정 값 비교

펄스 열 번호	실제 펄스 열 주파수 (Hz)	추정 주파수 (기준) (Hz)	추정 주파수 (제시) (Hz)
1	1298.0	1301.8	1294.9
2	1740.0	1740.6	1739.1
3	2065.8	2067.9	2062.8
4	2094.4	2097.7	2092.9
5	2718.3	2722.5	2717.8
6	3000.0	3005.2	2996.3
7	3341.6	3347.4	3342.6
8	4141.6	4165.6	4140.6
9	4820.0	4827.7	4818.2
10	5510.0	5519.5	5510.8

파수 변환을 이용하여 펄스 열의 주파수를 추정하였으며 또한 주파수의 구간별로 해당하는 펄스 열 주파수를 찾아서 원래의 신호 주파수 값과 비교하여 보았다. 총 펄스 개수는 $N=4096$ 이며 펄스의 누락율은 1%로 하여 결과를 얻었다.

펄스 열이 누락된 경우에 주파수의 잡음 성분이 증가하였으나 구간별로 펄스 열 주파수를 추출하였을 때 그 값은 원래 신호의 펄스 열 주파수 값에 근사함을 확인하였고 기존의 결과와 비교하였을 때 높은 펄스 열 주파수에 대하여 더욱 정확한 추정 값을 얻을 수 있었다.

2. 스테저 펄스 형태

고전적인 레이더는 단순한 하나의 PRI를 선택하여 표적의 정보를 탐지하였으나 근래에 와서는 일정한 펄스 프레임과 펄스 사이의 특정한 스테저 비를 가지는 펄스 열, 즉 스테저 형태를 사용한다. 이러한 스테저 형태의 펄스 열은 다른 관점에서 보면 동일한 펄스 간격을 가지는 펄스 열이 서로 다른 위상을 가지고 시작할 때 이 펄스 열들을 혼합한 형태로 간주할 수 있다.

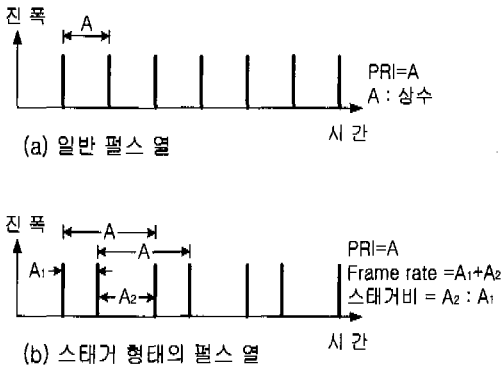


그림 6. 일반적인 펄스 열과 스테저 형태의 펄스 열

스테저 형태의 펄스 열 사용은 상대방이 자신의 펄스 정보를 탐지하는 것을 어렵게 한다. 시뮬레이션은 전과 동일한 펄스 주파수에 대해서 수행하였으며 스테저 형태의 펄스 열을 삽입시키는 방법은 동일한 주파수를 가지는 펄스 열의 위상을 달리하여 펄스 신호를 결합한 후에 이산 푸리에 변환을 이용하여 펄스 열 주파수를 추정하였다. 사용된 펄스 열은 표 2에서 발생한 펄스 열 번호 5, 6, 10 번의 시작 위상을 가변시켜서 만든 혼합 펄스 열을 만들었다.

추정된 펄스 열의 주파수 대 크기 분포는 그림 6과 같으며 그 값은 표 3에 나타내었다. 그림 6은 기본 성분의 값들에 대한 추정 값에 2차의 하모닉 성분에 해당하는 크기를 더하고 2차 고조 성분의 값을 제거하는 부가적인 처리를 하여 얻은 결과를 나타내었다. 기존에 제시된 방법과 동일하게 스테저를 형성하기 위하여 더해진 펄스 열 성분들은 다른 펄스 열들에 비하여 더 큰 값의 크기를 가짐을 알 수 있으며 큰 값의 2차 하모닉 성분들이 계산됨을 알 수 있었다. 앞에서도 언급하였듯이 펄스 열 주파수의 하모닉 성분들이 존재하며 그 형태는 다음으로 정의한다.

사용 주파수 : $f_1, f_2, f_3, \dots, f_{10}$

■ 펄스 열 주파수의 정수 배의 고조 성분

- 2 차의 고조 성분 : $2 \cdot f_1, 2 \cdot f_2, \dots, 2 \cdot f_{10}$
- 3 차의 고조 성분 : $3 \cdot f_1, 3 \cdot f_2, \dots, 3 \cdot f_{10}$
- ⋮
- n 차의 고조 성분 : $n \cdot f_1, n \cdot f_2, \dots, n \cdot f_{10}$

■ 펄스 열 주파수의 정수 배가 아닌 고조 성분

$f_1 + f_2, f_1 + f_3, \dots, f_1 + f_{10},$
 $f_2 + f_3, f_2 + f_4, \dots, f_2 + f_{10}, \dots,$

표 3. 스테저 형태의 펄스 열 주파수 추정 값

펄스 열 번호	실제 주파수(Hz)	추정 주파수(Hz)
1	1298.0	1300.7
2	1740.0	1741.3
3	2065.8	2066.5
4	2094.4	2098.0
5	2718.3	2716.9
6	3000.0	3000.1
7	3341.6	3335.8
8	4141.6	4143.5
9	4820.0	4814.8
10	5510.0	5507.2

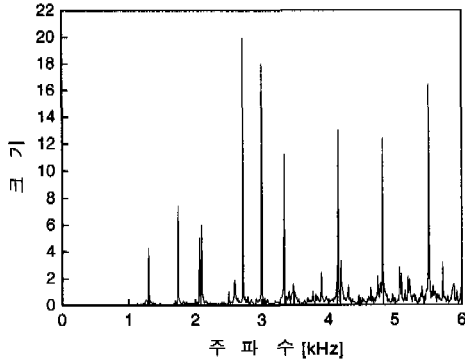


그림 7. 스테이지 형태의 펄스 열에 대한 펄스 열 주파수 대 크기

IV. 결론

본 논문은 다중의 펄스 열들이 혼합된 신호 환경 하에서 최소한의 파라미터 정보인 즉 신호 도래 시간 차이를 이용하여 그 특성 파라미터인 펄스 열 주파수를 추출하기 위한 방법을 제시하였다. 기존의 방법은 도래 시간의 각각의 지수함수로의 매핑을 이용하여 주파수 정보를 추정하였으나 제시된 방법은 더욱 간단한 형태인 도래 시간 차이에 대한 이산 푸리에 변환에 의하여 원하는 펄스 열들의 주파수 값들을 충분히 신뢰성 있게 추정함을 보여주었다. 실제 신호 환경에서 나타날 수 있는 도래 시간에 포함된 잡음, 누락 펄스의 문제, 스테이지 형태의 펄스 열에 대해서도 고려하였으며 또한 주파수들의 하모닉 성분들에 대한 추가적인 처리를 하여 양호한 결과를 구할 수 있었다.

참고 문헌

[1] C. L. Davies and P. Holland, "Automatic processing for ESM," *IEE Proc. F, Commun. Radar & Signal Process.*, 129, (3), pp. 164-171, 1985.
 [2] J. W. Campbell and S. Saperstein, "Signal recognition in complex radar environments," *Watkins-Johnson Tech. Notes*, 3, (6), November/December 1976.
 [3] H. K. Mardia, "New technique for the deinterleaving of repetitive sequences," *IEE PROCEEDINGS*, vol. 136, Pt.F, No. 4, pp. 149-154, Aug. 1989.
 [4] D. J. Milojevic and B. M. Popovic, "Improved

algorithm for the deinterleaving of radar pulses," *IEE PROCEEDINGS-F*, vol. 139, No. 1, pp. 98-104, Feb. 1992.

[5] P. S. Ray, "A novel pulse TOA analysis technique for radar identification," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic systems*, vol. 34, No. 3, pp. 716-721, July 1998.
 [6] R. J. Orsi, J. E. Moore and R. E. Mahony, "Spectrum estimation of interleaved pulse trains," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 47, No. 6, pp. 1646-1653, June. 1999.
 [7] M. T. Jong, *Methods Of Discrete Signal And System Analysis*, McGraw-Hill, 1982.

김정호(Jung-Ho Kim)

정회원

한국통신학회 논문지 제26권 제2B호 참조

현재 : 국방과학연구소 연구원