

다중 신호환경하에서 펄스 열 분리(deinterleaving)

Deinterleaving the Pulse Trains in Multiple Signal Environment

이 성 호*
Sung-Ho Lee

김 정 호*
Jung-Ho Kim

정 회 인*
Hoi-In Jung

ABSTRACT

Some signals, such as in radar system, are transmitted as periodic pulse trains. If more than one pulse train are transmitted over the same communication channel, a problem is to separate them for source identification and extract each pulse train at the receiver. This is known as pulse train deinterleaving.

In this paper, we present an approach for deinterleaving the pulse trains and extracting their periods combining the estimation of the frequency of each pulse train by DFT, CDIF/SDIF histogram and Sequence Search technique.

Also, we present the result of deinterleaving pulse trains and extracting PRI in the complex environment which multiple signals are interleaved.

주요기술용어 : TOA(펄스도래시간), DFT(이산푸리에변환), CDIF(누적차분), SDIF(순차차분) Sequence Search (시퀀스 검색)

1. 서 론

레이다 기술의 발달과 미사일의 등장으로 전자전(Electronic Warfare)의 역할과 중요성이 더욱 부각되고 있으며 실제로 걸프전을 통해 현대전에서 전쟁의 승리는 전자전에 의해 판가름난다는 교훈을 얻었다.

선진각국의 첨단 전자전 기술을 선점하기 위한 전자전장비 개발경쟁은 더욱 치열해지고 막대한 투자가 이루어지고 있는 실정이며 국내에서도 지속적인 연구 개발과 효율적인 집중투자로 전자전장비에 대한 상당한 기술력을 확보하고 있다.

전자전의 승패 요인은 전자파 에너지의 정보를 신속·정확하게 수집·분석하는 전자전지원(ES; Electronic Support) 능력과 상대 레이다의 전자파 에너지 사용을 억제하는 전자공격(EA; Electronic Attack) 능력 및 전자공격으로부터 레이다를 효율적

* 국방과학연구소

으로 사용하기 위한 전자보호(EP; Electronic Protection) 능력에 의해 좌우된다. 특히 해상에서 활동하는 함정의 경우에 있어서 주요 위협세력은 항공기와 대함 유도탄이다. 이러한 위협 속에서 함정을 효과적으로 방어하여 원활한 해상작전을 수행하기 위해서는 이들이 방사하는 신호를 탐지, 분석 및 식별하는 전자전장비가 필수적으로 요구되고 있다.

본 논문에서는 여러 신호원이 혼합되어 동시에 수신기에 도달할 때 이러한 복합 펄스 열로부터 본래의 각자 신호로 분리해내는 효율적인 기법을 제시한다. 이 기법은 먼저 TOA에 대한 이산 푸리에 변환(DFT; Discrete Fourier Transform)을 사용하여 혼합된 펄스 열이 어떤 주파수 성분(PRF; Pulse Repetition Frequency)을 포함하고 있는지를 개략적으로 추정한다^[2]. 그 다음에 CDIF(Cumulative Difference)와 SDIF (Sequenential Difference) 히스토그램 기법으로 얻어진 잠재적 PRI가 DFT에서 구한 PRI(Pulse Repetition Interval)의 허용범위 내에 존재하면 혼합된 펄스 열에서 원하는 PRI 펄스 열 신호를 찾아내는 시퀀스 검색 알고리즘을 통해 순차적으로 개별 펄스를 추출해낸다^{[3][4]}.

2. 펄스 열 분리 기법

2.1 DFT를 이용한 펄스 열 주파수 추정

여러 개의 신호가 혼합되어 있는 다중 신호환경에서 펄스 열 신호를 다음과 같이 가정한다.

- M 개의 펄스 열이 존재하고 각 펄스 열의 시작 위상과 주파수는 ϕ_i, f_i 이다.
- TOA는 t_0 에서 시작하여 t_{N-1} 으로 끝나고 누락펄스는 없다.

주어진 가정을 이용하여 식 (1)을 유도할 수 있다.

$$x(n) = e^{j(2\pi/t_N)t_n} \quad (1)$$

여기서, $n=0, 1, 2, \dots, N-1, j=\sqrt{-1}$ 신호 $x(n)$ 의 간격은 $[t_0, t_{N-1}]$ 이며 주기신호로 만들기 위해 먼저 펄스의 갯수가 N 인 TOA를 길이가 약 2π 가 되도록 정규화한 다음 단위원상에서 일정 간격으로 둘러싼다. 여기서 $t_0 = 0$ 이다. 그 다음에 N 개의 샘플 펄스에 대해 N 점 이산 푸리에 변환을 수행하고 필요한 주파수 정보를 얻기 위하여 주파수에 대한 신호의 크기가 가장 큰 성분부터 찾아내서 펄스 열의 개수와 펄스반복주기를 추출하는데 이 과정에서 펄스의 갯수를 적절히 선택하면 더욱 분해능을 향상시킬 수 있다.

2.2 CDIF/SDIF 히스토그램

2.2.1 CDIF 히스토그램

펄스 열의 첫번째 TOA에서 마지막 TOA까지 차분 레벨을 증가시키면서 히스토그램을 만든 후 각 차분 레벨에서 구해진 히스토그램 값과 문턱함수에 의하여 결정된 문턱값(threshold)을 비교하여 잠재적 PRI를 구하는 방법이다. 우선 i 번째 TOA를 기준으로 할 때 각 차분은(식 2)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{1차 차분} &: TOA(i+1) - TOA(i), \\ & \quad i = 1, 2, K, N \\ \text{2차 차분} &: TOA(i+2) - TOA(i) \end{aligned} \quad (2)$$

CDIF에서는 TOA 차분 값이 히스토그램에서 누적되며 고정 PRI의 정수 배에 해당하는 값에서 동일한 계수 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 문턱값이란 어

편 차분 값에서 히스토그램 값이 고정 PRI 시퀀스를 구성하기 위하여 가져야 할 최소의 히스토그램 계수 값을 의미한다. CDIF 히스토그램에서 문턱값을 구해 보면 다음과 같다.

$$threshold(\tau) = \frac{x N}{\tau} \quad (3)$$

여기서, τ : 펄스사이의 간격, N : 총 관찰시간, x : 누락펄스와 관련되는 1보다 작은 상수

2.2.2 SDIF 히스토그램

각각의 TOA 차분 레벨에서 히스토그램 값을 계수 하고 문턱값과 비교하여 잠재적 PRI를 구하는 방법이다. CDIF 히스토그램 기법과 다른 점은 각 단계에서 히스토그램 계수 값을 누적할 필요가 없으므로 더 낮은 차분 레벨에서 빨리 잠재적 PRI를 찾을 수 있다. SDIF의 문턱치 함수는 유한한 관찰시간(T) 동안 n 개의 랜덤 펄스중에서 k 개의 펄스가 랜덤 시간간격 ($\tau = t_2 - t_1$) 사이에 놓일 확률은 포아송 분포로 주어진다.

$$p_k(\tau) = \frac{(\lambda \tau)^k}{k!} e^{-\lambda \tau} \quad (4)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

여기서, $k \ll n$, $\lambda = \frac{n}{T}$, n , T 는 무한히 증가 하지만 비율 λ 는 일정하다.

또한 식 (4)의 포아송 프로세스에서 $k=0$, 시간구간 (τ) 사이에 한 개의 펄스만 존재할 확률은 다음과 같다.

$$p_0(\tau) = e^{-\lambda \tau} \quad (5)$$

따라서 문턱값은 각각의 차분 레벨에서 임의의 시간구간에 펄스가 나타날 확률과 그와 관계되는 펄스 개수의 곱으로 주어진다.

$$threshold(\tau) = x(E - c)e^{-\lambda \cdot \tau} \quad (6)$$

여기서, τ : 펄스사이의 간격,

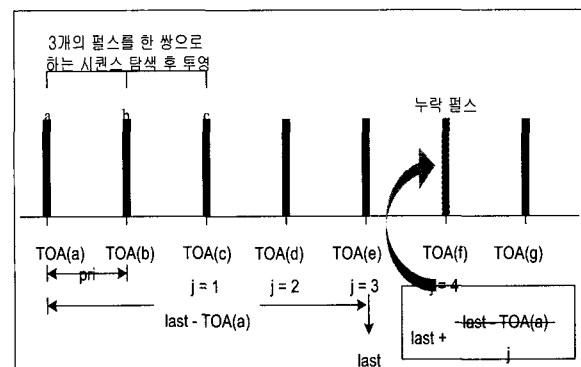
E : 총 펄스 개수, c : 차분 레벨,

λ : 단위 시간당 평균 펄스의 개수

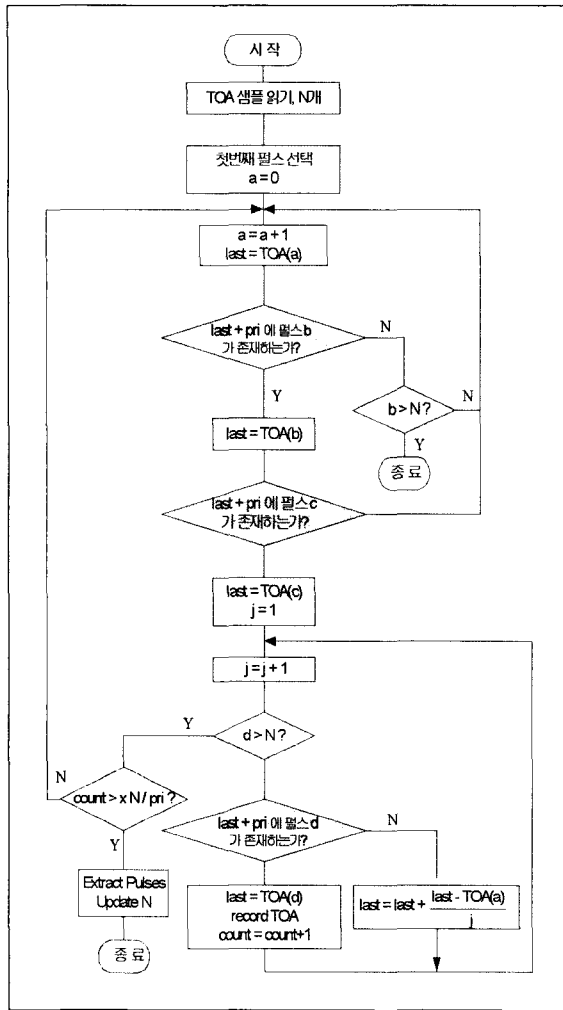
2.2.3 시퀀스 검색 기법

CDIF 및 SDIF 히스토그램을 이용해서 찾은 잠재적 PRI를 사용하여 고정 PRI 혹은 스테저 형태의 펄스변화 특성을 가지는 시퀀스를 검색하는 기법으로 실제 혼합된 펄스 열에서 각각의 펄스를 추출하는데 사용된다.

시퀀스 검색 기법은 먼저 CDIF/SDIF 에서 찾은 잠재적 PRI를 사용하여 그림 3에서 보는 바와 같이 혼합된 펄스 열에서 시작 위치를 변경시키면서 PRI 시퀀스를 찾는다. 잠재적 PRI 간격을 갖는 3개의 연속된 펄스들이 존재할 때 이 값들이 하나의 펄스 열을 이룬다고 가정하고 펄스 열을 추출한다. 만일 혼합



[그림 2] 잠재적 PRI 간격을 갖는 3개의 연속적인 펄스 열



[그림 3] 시퀀스 검색 흐름도

된 펄스 열에서 시퀀스에 해당하는 펄스가 누락되었을 때는 잠재적 PRI와 이 값의 허용치를 고려하여 그림 2와 같이 내삽시킨다(interpolate).

3. 시뮬레이션 및 결과고찰

3.1 고정신호가 혼합된 펄스 열

고정 PRI를 갖는 에미터를 표 1과 같이 5개 생성

하여 하나의 혼합된 펄스 열을 만들었으며 이 펄스 열은 펄스의 도착시간(TOA)순으로 구성되어 있다.

5개의 고정신호가 혼합된 펄스 열에 대해 DFT를 통해 개략적인 펄스 열 주파수 성분을 추정하여 주파수 영역에서 진폭이 최대로 되는 값을 추출하고 이 값의 하모닉 성분을 찾아 제거한 후 차례로 최대값을 찾아낸다. 표 2는 추출된 펄스 열 주파수 성분이고 그림 4는 5개의 고정 PRI로 구성된 펄스 열과 DFT 후의 주파수 성분을 보여준다.

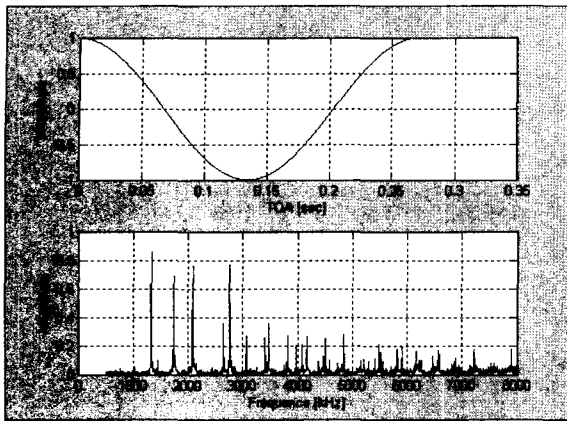
CDIF/SDIF 히스토그램을 사용해서 펄스 열 사이의 간격중에서 문턱치를 초과하는 값인 잠재적 PRI를 찾아내어 시퀀스 검색을 통해 하나씩 추출해낸다. 그림 5와 그림 6은 낮은 PRI부터 CDIF 및 SDIF 히스토그램에서 잠재적 PRI를 찾아내는 과정을 보여준다.

[표 1] 5개의 고정 PRI 신호

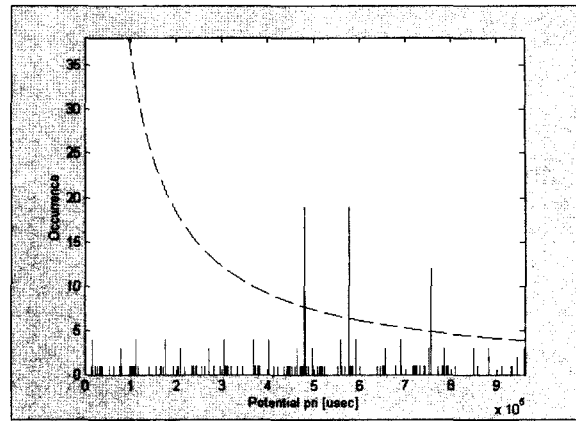
구 분	PRI(μ s)	PRF(Hz)	위상(rad.)
고 정 신 호	138	7246.37	2.33
	362	2762.43	2.04
	480	2083.33	4.90
	576	1736.11	5.31
	755	1324.50	4.50

[표 2] 5개 고정신호에 대한 주파수 추정값

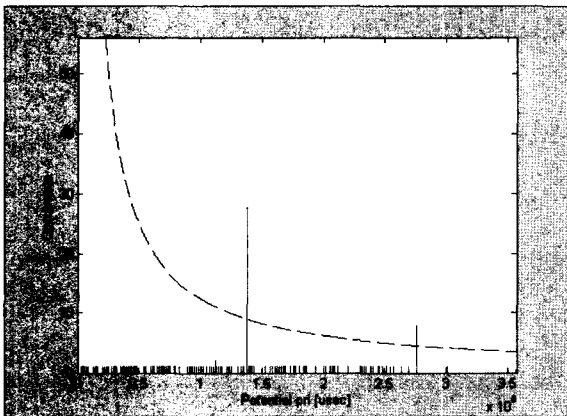
구 분	실제 주파수(Hz)	추정 주파수(Hz)
고 정 신 호	1324.5	1328.3
	1736.1	1737.8
	2083.3	2084.7
	2762.4	2763.6
	7246.3	-



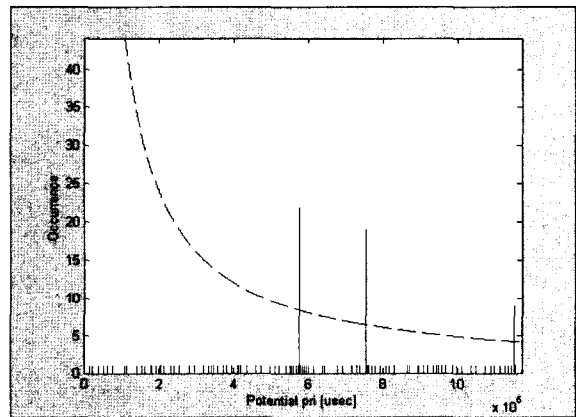
[그림 4] 고정 PRI로 구성된 펄스 열과 DFT



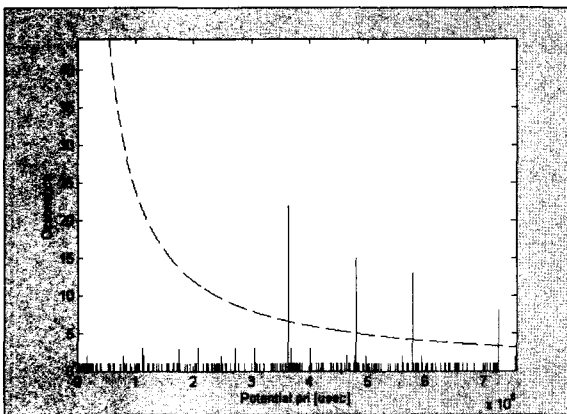
(c) PRI = 480 μ s



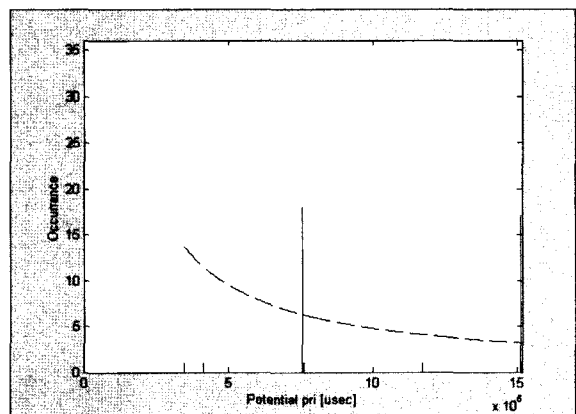
(a) PRI = 138 μ s



(d) PRI = 576 μ s

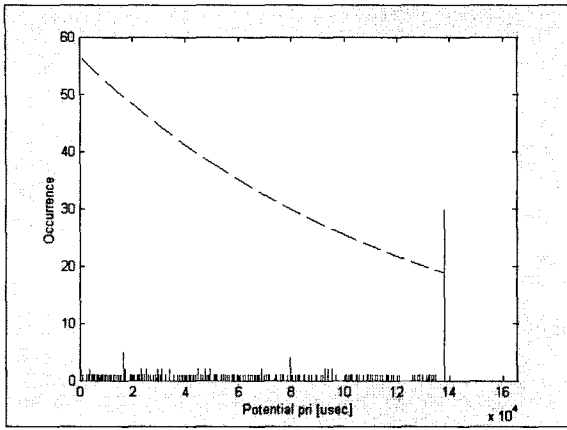


(b) PRI = 362 μ s

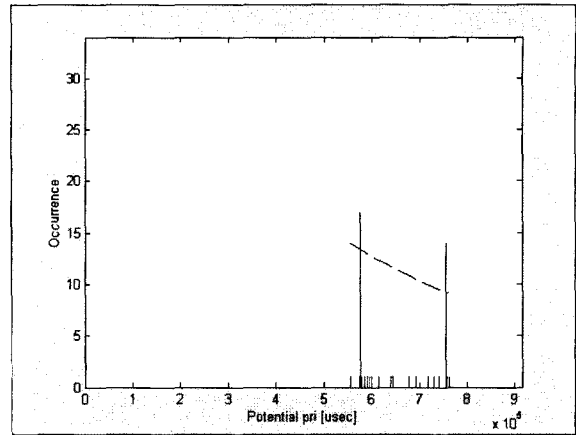


(e) PRI = 755 μ s

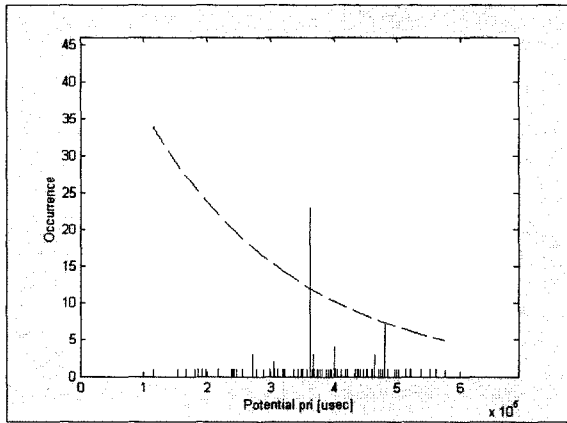
[그림 5] 고정신호에 대한 CDIF 문턱치와 잠재적 PRI



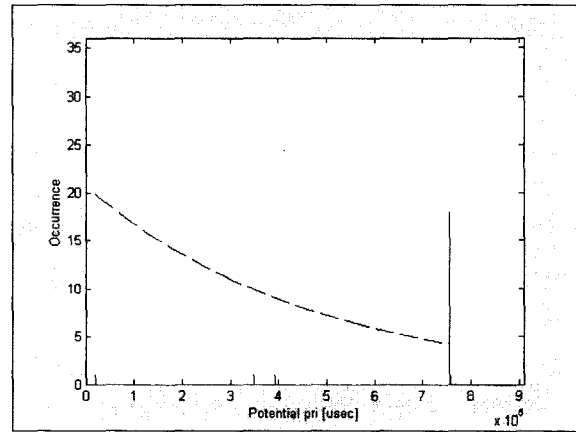
(a) PRI = 138 μ s



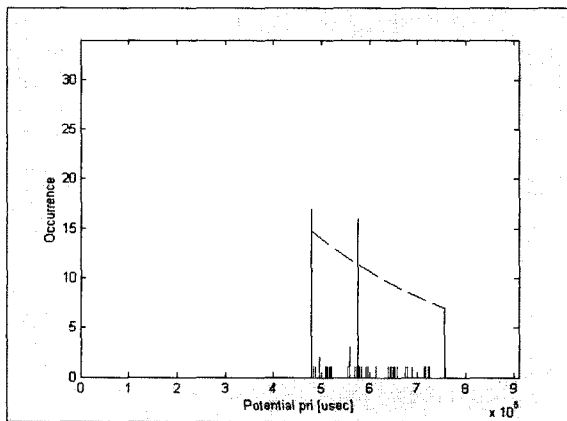
(d) PRI = 576 μ s



(b) PRI = 362 μ s



(e) PRI = 755 μ s



(c) PRI = 480 μ s

[그림 6] 고정신호에 대한 SDIF 문턱치와 잠재적 PRI

[표 3] 3개의 고정 및 3단 스테저 신호

구분	PRI(μ s)	PRF(Hz)	위상(rad.)
스테저 신호	450	2222.2	2.33
	500	2000.0	
	550	1818.2	
고정 신호	362	2762.43	2.04
	480	2083.33	4.90
	576	1736.11	5.31

3.3 고정/스태거 신호가 혼합된 펄스 열

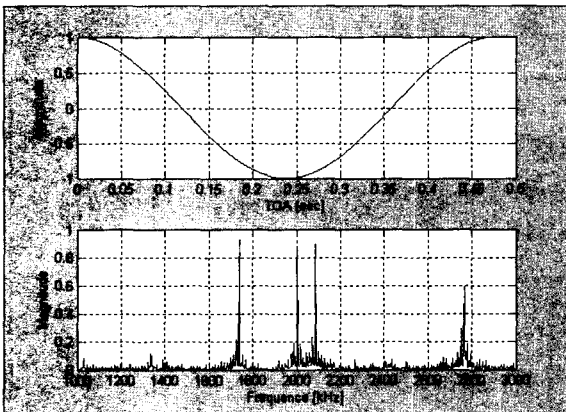
고정 및 스태거 PRI를 가지는 신호를 표 3과 같이 생성하여 하나의 혼합된 복합 펄스 열을 만들었다.

3개의 고정 PRI 신호와 3단 스태거 신호가 혼합된 펄스 열에 대해 DFT를 통해 개략적인 펄스 열의 주파수 성분을 추정하면 표 4와 같다. 그림 7은 본래의 펄스 열과 DFT 후의 주파수 성분을 보여준다.

CDIF/SDIF 히스토그램을 사용해서 펄스 열 사이의 간격중에서 문턱치를 초과하는 값인 잠재적 PRI를 찾아내어 시퀀스 검색을 통해 하나씩 추출해낸다. 그림 8과 그림 9은 낮은 PRI부터 CDIF/SDIF 히스토그램에서 잠재적 PRI를 찾아내는 과정을 보여준다.

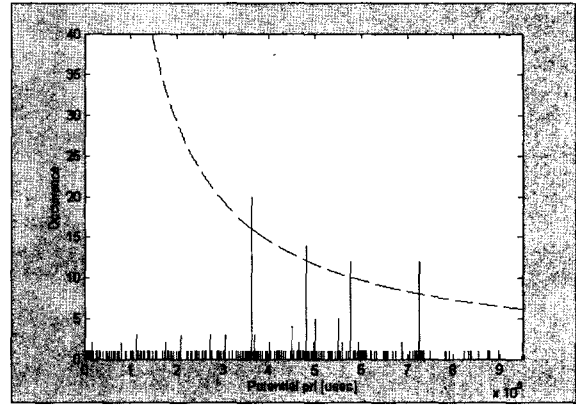
[표 4] 고정, 스태거 신호에 대한 주파수 추정값

구 분	실제 주파수(Hz)	추정 주파수(Hz)
스태거 신호	2222.2	-
	2000.0	2002.6
	1818.2	-
고정 신호	1736.1	1739.0
	2083.3	2086.3
	2762.4	2766.4

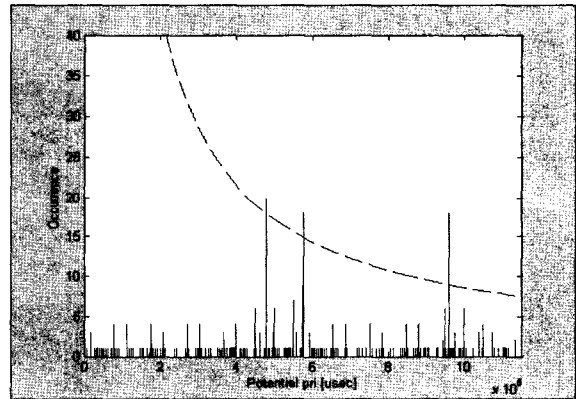


[그림 7] 고정/스태거 PRI로 구성된 펄스 열과 DFT

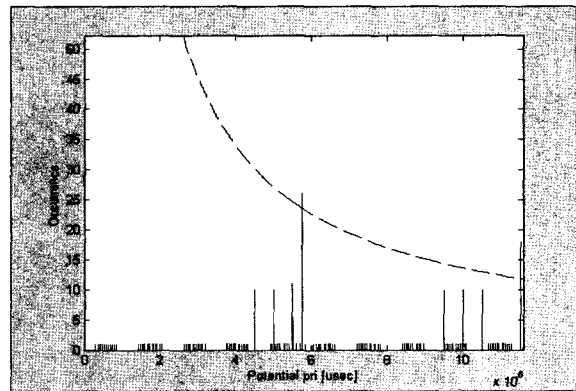
스태거 PRI 신호는 프레임 주기가 1500 μs을 갖는 고정신호로 추출됨을 알 수 있다.



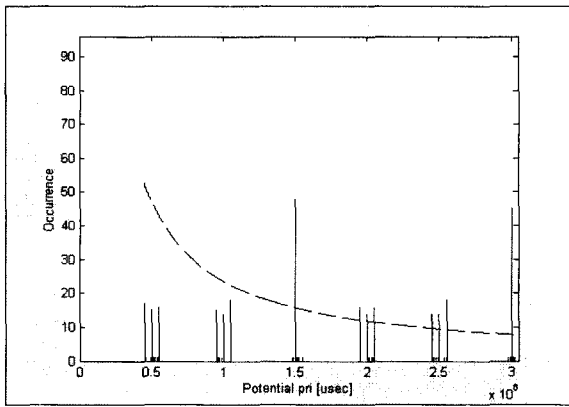
(a) PRI = 362 μs



(b) PRI = 480 μs

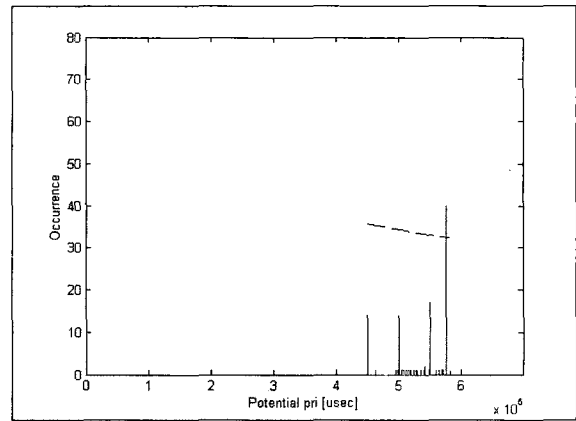


(c) PRI = 576 μs

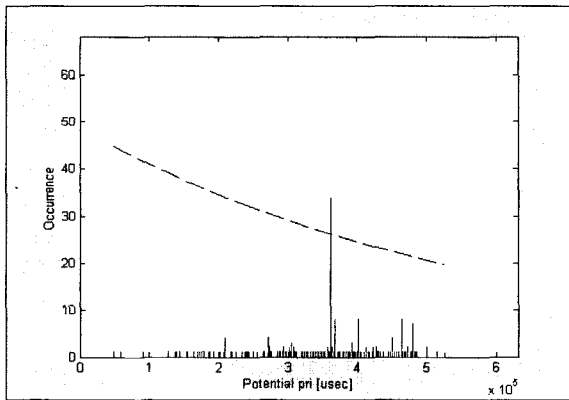


(d) PRI = 1500 μ s

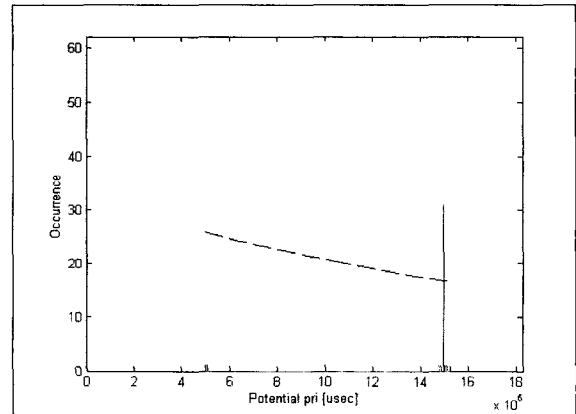
[그림 8] 고정/스태거 신호에 대한 CDIF 문턱치와 잠재적 PRI



(c) PRI = 576 μ s

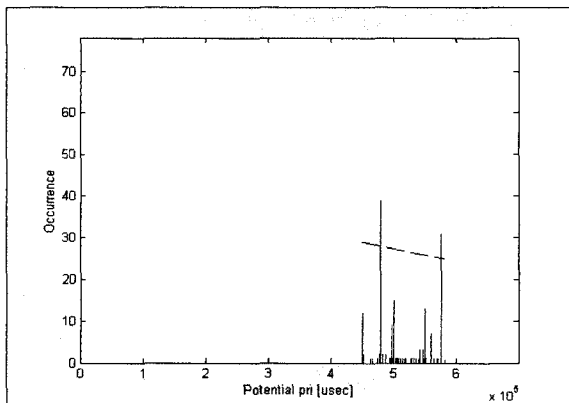


(a) PRI = 362 μ s



(d) PRI = 1500 μ s

[그림 9] 고정/스태거 신호에 대한 SDIF 문턱치와 잠재적 PRI



(b) PRI = 480 μ s

[표 5] 3개의 고정, 3단 스태거 및 지터 신호

구 분	PRI(μ s)	PRF(Hz)	위상(rad)
스태거 신 호	450	2222.2	2.33
	500	2000.0	
	550	1818.2	
단 일 신 호	362	2762.43	2.04
	480	2083.33	4.90
	576	1736.11	5.31
지 터 신 호	270 ($\sigma=27\mu$ s)	3703.7	1.5

3.3 고정/스태거/지터 신호가 혼합된 펄스 열 표 5과 같이 고정, 스태거 및 지터 PRI를 가지는 신호를 혼합하여 복합 펄스 열을 생성하였다.

지터신호는 평균이 0이고 분산이 $\sigma^2 = 0.729 \text{ ns}^2$ ($\sigma = 27 \text{ } \mu\text{s}$)인 가우시안 잡음을 PRI가 270 μs 인 고정신호에 더하여 만들었다.

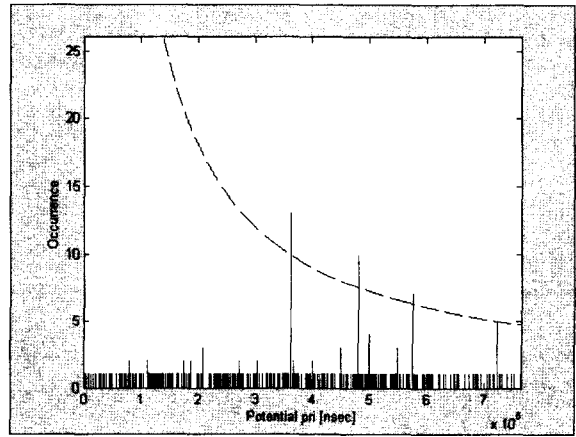
3개의 고정 PRI, 3단 스태거 및 지터 신호에 대해

[표 6] 고정, 스태거 및 지터 신호에 대한 주파수 추정값

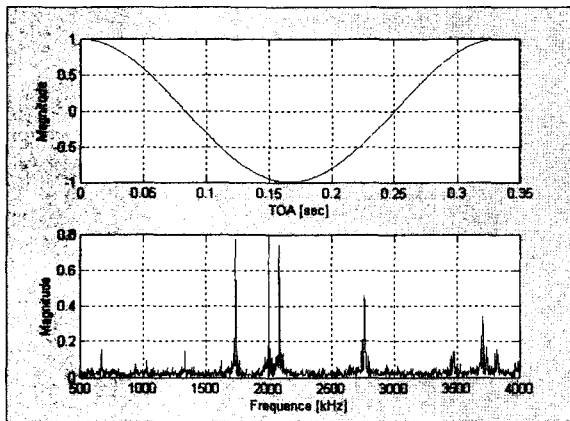
펄스열 번호	실제 주파수(Hz)	추정 주파수(Hz)
스태거 신호	2222.2,	-
	2000.0,	2003.3
	1818.2)	-
고정 신호	1736.1	1739.8
	2083.3	2087.1
	2762.4	2763.8
지터 신호	3703.7	3704.1

DFT를 통해 개략적인 펄스 열의 주파수성분을 예측하면 표 6과 같다. 그림 11은 본래의 펄스 열과 DFT 후의 주파수 성분을 보여준다.

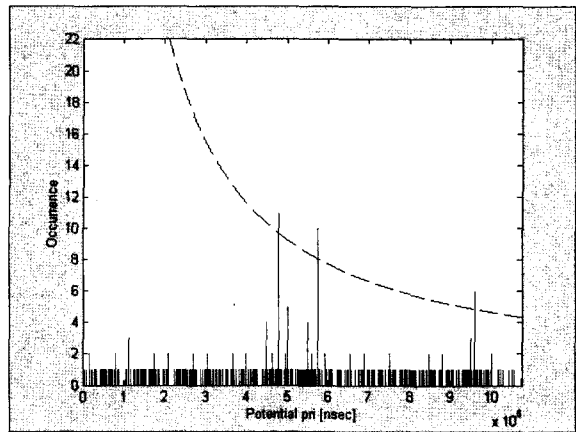
그림 11와 그림 12은 CDIF/SDIF 히스토그램을 사용해서 잠재적 PRI를 찾아낸 후 시퀀스 검색을 통해 낮은 PRI 부터 잠재적 PRI를 찾아내는 과정을 보여준다. 그러나 지터 PRI 신호는 CDIF/SDIF 모두 검출할 수 없었으며 스태거 신호는 CDIF/SDIF 모두 프레임 주기가 1500 μs 을 갖는 고정신호로 검출되었다.



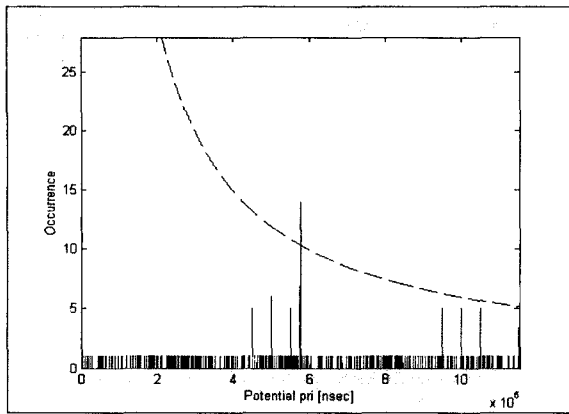
(a) PRI = 362 μs



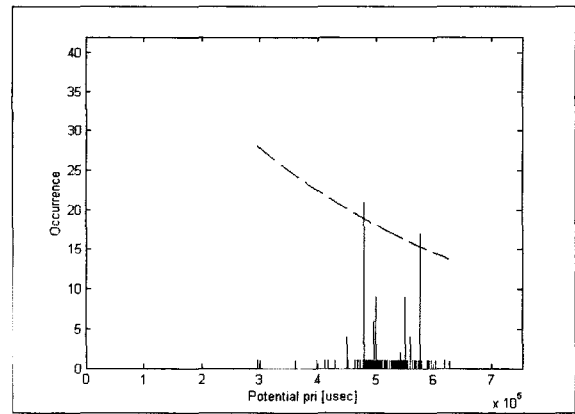
[그림 10] 고정/스태거/지터 PRI로 구성된 펄스 열과 DFT



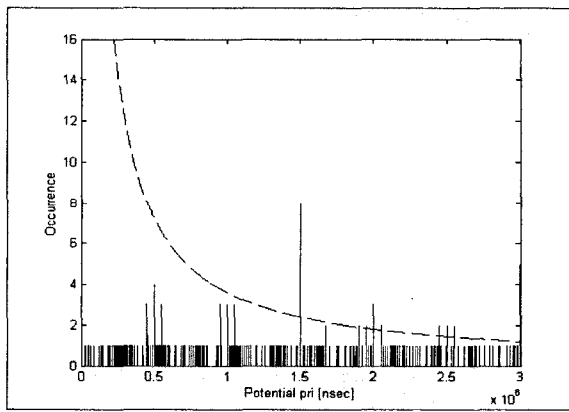
(b) PRI = 480 μs



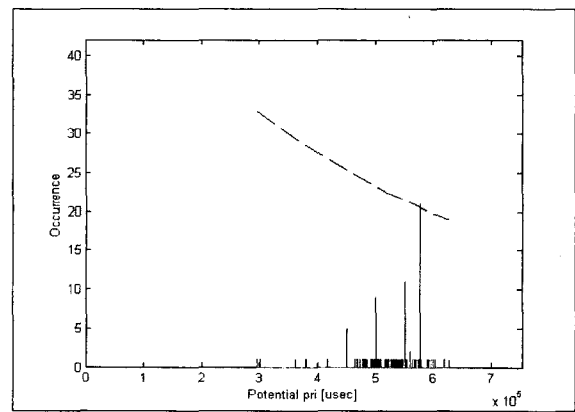
(c) PRI = 576 μ s



(b) PRI = 480 μ s

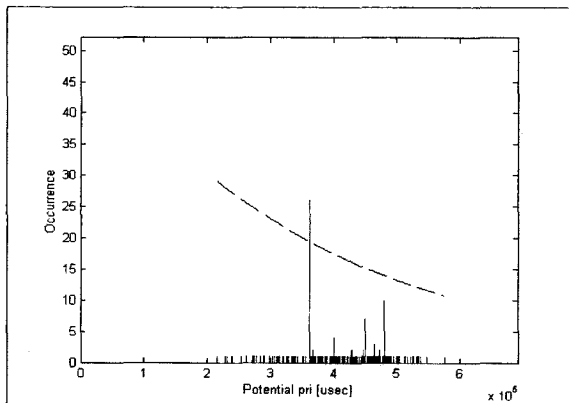


(d) PRI = 1500 μ s

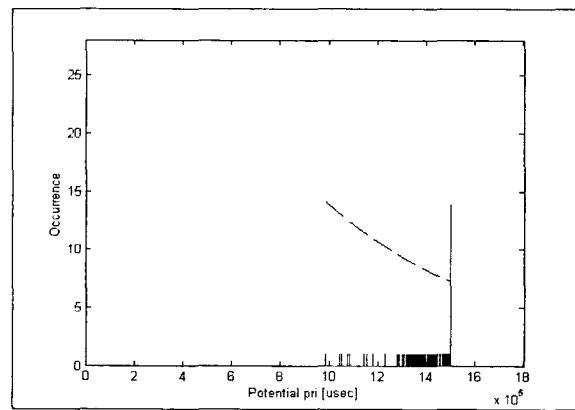


(c) PRI = 576 μ s

[그림 11] 고정/스태거/지터신호에 대한 CDIF 문턱치와 잠재적 PRI



(a) PRI = 362 μ s



(d) PRI = 1500 μ s

[그림 12] 고정/스태거/지터신호에 대한 SDIF 문턱치와 잠재적 PRI

4. 결 론

다중신호가 혼합된 복합 펄스 열에서 반복되는 펄스 특성을 찾아내기 위해 TOA 정보만을 이용하는 펄스 열 분리 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능을 확인하였다.

먼저 DFT를 이용하여 혼합된 펄스 열이 어떤 주파수 성분(PRF)을 포함하고 있는지를 개략적으로 추정하였고 그 다음에 CDIF와 SDIF 히스토그램 기법으로 얻어진 잠재적 PRI가 DFT에서 구한 PRI의 허용범위 내에 존재하면 혼합된 펄스 열에서 원하는 PRI 신호를 찾아내는 시퀀스 검색 알고리즘을 통해 순차적으로 개별 펄스 열을 추출하였다.

CDIF/SDIF는 고정, 스테저 신호와 같이 주기적인 특성을 갖는 펄스 열 추출에는 뛰어난 성능을 보이지만 지터신호와 같이 비주기적인 특성을 갖는 펄스 열 추출에는 적합하지 않기 때문에 DFT를 이용하여 펄스 열 주파수를 추정함으로써 이를 보완하였다.

본 논문에서는 TOA 정보만 사용하여 펄스 열 분리를 수행하였지만 전단에 DOA와 RF 필터를 사용하여 펄스를 먼저 분류한 후 TOA 분리를 수행하면 다중신호 환경에서도 강인하게 각각의 에미터를 분석 및 식별할 수 있을 것이다.

Analysis of Radar Signals", Artech House, 1993.

- [2] R.J. Orsi, J.B. Moore, R.E. Mahony, "Spectrum Estimation of Interleaved Pulse Trains", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol.47, No.6, pp.1646~1653, June. 1999.
- [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] Campbell, J.W., and Saperstein, S., "Signal recognition in complex radar environments", *Watkins-Johnson Tech. Notes*, 3, (6), November/December 1976.

참 고 문 헌

- [1] Wiley, R.G., "Electronic Intelligence : The