

Subband PRI 분석 알고리즘

正會員 尹 元 植*

Subband PRI Analysis Algorithm

Won-Sik Youn* *Regular Member*

※본 논문은 1994학년도 아주대학교 정착 연구비 지원을 받았음.

요 약

누락펄스가 발생할 시 PRI 분석을 위한 전형적인 sequence search 알고리즘은 harmonic 문제를 발생시킨다. 본 논문에서 이러한 harmonic 문제를 해결할 수 있는 PRI 분석 알고리즘을 제안한다. 분석해야 할 전체 PRI 범위를 harmonic이 없도록 subband로 나눈 후, sequence search를 forward 및 backward로 행한다. 전형적인 sequence search 알고리즘에 비하여 제안한 알고리즘의 성능이 증대된다.

ABSTRACT

A conventional sequence search algorithm for PRI analysis occurs the harmonic problem under missing pulses. An improved PRI analysis algorithm is proposed to remedy the harmonic problem. After dividing an overall PRI range into subbands without harmonic, a sequence search is done into forward and backward in time. The proposed algorithm increases the performance compared with that of conventional sequence search algorithm.

I. 서 론

Electronic support measures(ESM) 시스템에서 pulse repetition interval(PRI) 분석을 위한 알고리즘이 연구되어 왔다. PRI 분석으로부터 한 에미터의 PRI, scan

형태를 알 수 있으며, 재밍을 위한 정보를 제공할 수 있으므로, PRI 분석은 ESM 시스템의 핵심적인 부분이다[1].

PRI 분석을 위해 sequence search 알고리즘이 제안되었다[2], [3]. 이 sequence search 알고리즘은 분석해야 할 PRI 범위가 넓거나, 누락 펄스가 발생할 시 harmonic 문제를 야기시킨다. 한편, 히스토그램과 sequence search 알고리즘을 결합한 방법이 제안되었다 [4], [5]. 수신된 펄스의 도래시간 데이터로부터 히스토

*아주대학교 전파공학과 조교수
論文番號:95411-1202
接受日字:1995年 12月 2日

그램을 형성하여 이로부터 PRI를 추정한다. 이 추정된 PRI를 이용하여 sequence search를 행한다. 한 분석 프레임에서 짧은 PRI인 펄스열이 일부만 존재할 경우 이 PRI는 히스토그램으로부터 가설된 PRI로 누락될 수 있으므로 PRI 분석의 성능저하를 야기할 수 있다.

본 논문에서 harmonic 분체를 해결할 수 있는 sequence search 알고리즘을 제안한다. 분석해야 할 PRI 범위를 harmonic이 일어나지 않도록 PRI 범위를 subband로 나눈 후 짧은 subband PRI 범위부터 sequence search를 행한다. 또한 sequence search를 forward/backward로 행함으로써 한 PRI를 형성한 펄스열을 추출하여 잔여펄스로 인한 오류 PRI가 형성되는 것을 감소시킨다.

II. 제안한 sequence search 알고리즘

PRI 분석을 위해 한 펄스열의 프레임을 구성하여 블럭처리를 하여야 한다. 에미터가 탐색 레이더인 경우 ESM 시스템에 burst 펄스 형태로 수신되므로 프레임 구성을 위한 기준으로 다음 두 가지 기준을 제안한다. 첫째는 인접펄스의 도래시간 차이가 분석하려는 최대 PRI를 초과하게 되면 그 펄스를 프레임의 마지막 펄스로 기준하여 프레임을 구성한다. 둘째는 마지막 펄스의 도래시간과 첫 번째 펄스의 도래시간 차이가 분석하려는 최대 PRI의 $(N_1 - 1)$ 배보다 크면 한 프레임이 구성된다. 여기서 N_1 은 한 PRI를 구성하는 최소 연속된 펄스 개수이다. 일반적으로 N_1 은 5로 선택하며, N_1 이 너무 작은 수로 선택하게 되면 오류 PRI를 형성할 수 있으며, N_1 이 너무 크면 짧은 시간 동안만 방사하는 에미터에 대한 PRI 분석이 불가능하게 된다.

수신 펄스밀도가 높거나 추적레이더 신호가 수신됨으로 인해 이상의 두 조건이 만족되지 않으면 한 프레임의 최대 버퍼 크기에 따라 프레임이 정해진다.

전형적인 sequence search 알고리즘은 프레임의 첫 번째 펄스를 한 PRI를 갖는 펄스열의 시작 펄스로 간주한 후, 첫 번째 펄스와 두 번째 펄스의 도래시간 차이를 가설된 PRI로 하여, 이 PRI를 갖는 펄스열이 존재하는지를 탐색한다. 만일 N_1 개의 연속된 펄스열이 존재하게 되면 이를 한 에미터에 의해 방사된 펄스열

로 추출하고, 이 PRI를 갖는 펄스들을 그 프레임에서 제거하여 다음 PRI 분석을 간략화시킨다. 만일 위에서 가설된 PRI를 갖는 펄스열이 존재하지 않을 경우 첫 번째 펄스와 세 번째 펄스의 도래시간 차이를 가설된 PRI로 하여, 이 PRI를 갖는 펄스열이 존재하는지를 탐색한다. 이와 같은 과정을 반복하여 분석하려는 최대 PRI에 도달하게 되었는데도 첫 번째 펄스까한 PRI의 연속된 N_1 개 펄스열을 형성하지 못할 경우, 한 PRI의 시작 펄스를 그 프레임의 두 번째 펄스로 가정한 후 위와 같은 과정을 반복하여 PRI 분석을 행하게 된다.

이와 같은 sequence search 알고리즘은 한 PRI를 갖는 펄스열에서 누락펄스가 발생하게 되면 실제 PRI의 배수를 갖는 PRI로 분석되는 harmonic 분체를 발생시킨다. 누락펄스는 레이더와 ESM 시스템이 동일한 곳에 있을 시, 레이더 펄스가 방사되는 순간에는 ESM 시스템에 수신되지 않도록 ESM 시스템을 blanking시키며, 이 때 한 에미터의 의해 방사된 펄스가 도래할 시 그 펄스를 수신하지 못함으로 인해 생긴다. 또한 PRI 분석을 위해 segregator[6]가 있을 시, 새로운 에미터가 방사한 펄스를 이전 PRI 분석으로부터 추출한 PRI의 펄스열로 간주함으로써 생길 수 있으며, 서로 다른 에미터에 의하여 방사된 펄스들이 중첩됨으로써도 생길 수 있다.

Harmonic 분체가 발생하게 되면 나머지 PRI 분석에도 영향을 미침으로 오류 PRI를 발생시킬 가능성이 점점 더 커지게 된다.

본 논문에서 이러한 harmonic 분체를 해결하기 위한 PRI 분석 알고리즘을 제안한다. 우선 분석해야 할 PRI 범위를 harmonic 관계에 있지 않도록 PRI subband로 나눈다. 즉 PRI subband들은 $[P_{min}, P_{min} \times 2)$ $[P_{min} \times P_{min} \times 4) \dots (P_{max}/2, P_{max}]$ 이다. 여기서 P_{min} 은 분석해야 할 최소 PRI이며, P_{max} 는 분석해야 할 최대 PRI이다. 이와 같이 분석해야 할 전체 PRI범위를 PRI subband로 나눈 후 가장 짧은 PRI subband인 $[P_{min}, P_{min} \times 2)$ 를 분석해야 할 PRI 범위로 설정하여 sequence search를 행하여 이 범위내에 PRI를 갖는 펄스열들이 존재하는지를 탐색한다. 만일 한 PRI를 형성하는 펄스열이 존재할 경우에는 그 펄스들을 프레임에서 제거시키며, 그렇지 않은 경우에는 그 프레임에 있는 펄스 데이터 그대로 다음으로 가장 짧은 PRI

subband인 $[P_{min} \times 2, P_{min} \times 4)$ 로 PRI 분석 범위를 이동하여 sequence search를 행한다. 이와 같은 과정을 $(P_{max}/2, P_{max})$ 까지 반복한다.

이 때 한 프레임의 인접펄스간의 도래시간 차이 데이터로 히스토그램을 형성하여 한 subband PRI 범위에 펄스수가 N_1 개 이상인 가장 짧은 subband를 분석 시작 subband로 설정하면 효율적이다. 또한, 한 subband에 대하여 분석을 행한 후 분석이 안된 잔여펄스가 N_1 개 이상일 경우에만 다음 subband에 대하여 분석하고, 그렇지 않으면 PRI 분석을 종료한다.

각 subband별로 sequence search를 행할 시 한 PRI를 구성하는 연속된 펄스가 N_1 개 존재하게 되면 계속

해서 forward 방향으로 탐색하다가 N_2 개의 연속된 펄스가 존재하지 않으면 그 PRI를 갖는 펄스열은 종료되었다고 간주한다. 여기서 N_2 가 작으면 작을수록 한 PRI를 갖는 펄스열이 누락펄스로 인해 서로 나누어질 수 있고, N_2 가 크면 클수록 다른 PRI를 구성하는 펄스가 포함될 수 있다.

또한, 한 PRI를 구성하는 연속된 펄스가 N_1 개 존재하게 되면 forward 방향뿐만 아니라 backward 방향으로도 탐색하는 것을 제안한다. Forward 방향과 마찬가지로 backward 방향으로도 탐색하여 N_2 개의 연속된 펄스가 존재하지 않으면 그 PRI를 갖는 펄스열은 종료되었다고 간주한다. 이와 같이 backward 방향으로도 탐색함으로써 한 PRI를 구성하는 펄스들을 forward 방향으로만 탐색할 경우에 비하여 보다 많이 추출할 수 있다. 이로써 잔여펄스로 인한 오류 PRI를 형성하는 것을 줄인다.

대표적인 PRI 종류에는 fixed PRI, staggered PRI, dwell/switch PRI, jittered PRI가 있다[1]. Staggered PRI와 dwell/switch PRI도 fixed PRI 분석으로부터 얻어지므로 모든 subband에 대하여 fixed PRI, staggered PRI, dwell/switch PRI 분석을 행한 후, 프레임에서 잔여 펄스수가 N_1 개 이상일 때 jittered PRI 분석을 fixed PRI 분석 때와 마찬가지로 subband별로 행한다.

III. 모의 실험

PRI 분석을 위하여 제안한 sequence search 알고리즘과 전형적인 sequence search 알고리즘의 성능 비교를 행하였다. 분석해야 할 PRI 범위를 $[250\mu s, 3999\mu s]$ 로 설정하였다. 제안한 sequence search 알고리즘의 PRI subband를 $[250\mu s, 499\mu s]$, $[500\mu s, 999\mu s]$, $[1000\mu s, 1999\mu s]$, $[2000\mu s, 3999\mu s]$ 로 나누었다. 실제 ESM 시스템이 사용되는 환경에서 누락펄스 뿐만 아니라 다중경로 펄스도 존재하므로 이 두 경우를 모두 고려하여 데이터를 구성하였다. N_1 은 5 그리고 N_2 는 2를 사용하였다. Jittered PRI 분석을 위해 jitter율을 10%로 사용하였다.

표 1은 fixed PRI의 펄스열만 있을 경우, PRI를 구성하는 펄스에 대한 누락펄스 및 다중경로 펄스의 각 비율 R 에 따른 성능을 나타낸다. 각 fixed PRI의 펄스

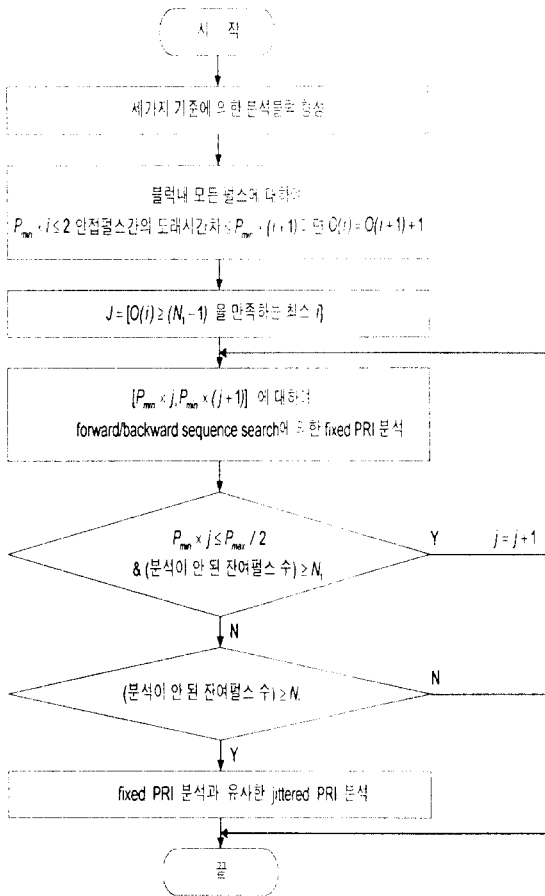


그림 1. Subband PRI 분석 알고리즘의 흐름도.
Fig. 1 Flowchart of subband PRI analysis algorithm.

열은 40개 펄스 간격으로 구성하였다. 제안한 sequence search 알고리즘은 R이 5% 및 10%일 경우 모두 올바른 PRI 분석을 하였다. R이 15%로 증가하였을 경우 잔여펄스 및 다중경로 펄스로 인하여 jittered PRI로 분석된 펄스열이 하나 발생하였다.

한편, 전형적인 sequence search 알고리즘은 모든 R에 대하여 올바르게 분석된 PRI가 하나 존재하였는데, 이는 fixed PRI가 3321μs일 경우 PRI 분석 범위상 harmonic이 발생하지 않을 PRI이기 때문에 올바르게 분석되었다. 그러나 나머지 fixed PRI에 대하여는 harmonic 문제가 발생하였다. R이 10%인 경우 이미 잔여펄스로 인하여 jittered PRI로 분석된 펄스열이 하나 발생하였다. R이 15%인 경우에 오류 PRI로 분석된 펄스열이 증가하였다.

표 2는 fixed PRI 및 jittered PRI의 펄스열이 동시에 있을 경우 R에 따른 성능을 나타낸다. 각 PRI의 펄스열은 40개 펄스 간격으로 구성하였으며, jittered PRI의 jitter율은 10% 및 5% 이었다. 표 2의 (1)에서 2개의 에미터가 있을 경우, 표 1에서와 마찬가지로 제안한 sequence search 알고리즘은 R이 5% 및 10%일 경우 모두 올바른 PRI 분석을 하였으나, R이 15%로 증가하였을 경우 잔여펄스 및 다중경로 펄스로 인하여 오류 jittered PRI로 분석된 펄스열이 하나 발생하였다. 한편, 전형적인 sequence search 알고리즘은 R이 5% 및 10%일 경우 모두 harmonic 문제를 발생하여 오류 PRI로 분석되었다. R이 15%로 증가하였을 경우 잔여펄스 및 다중경로 펄스로 인하여, 오류 PRI가 증가하였다.

표 1. Fixed PRI 분석 알고리즘 성능 비교.
Table 1. Performance comparison of fixed PRI analysis algorithms.

Fixed PRI: 280, 510, 589, 1251, 3321 [μs]			
R	결과	알고리즘	
		제한한 sequence search	전형적인 sequence search
5%	correct reports	5	1
	false reports	0	4
10%	correct reports	5	1
	false reports	0	5
15%	correct reports	5	1
	false reports	1	9

표 2의 (2)에서 jittered PRI를 갖는 에미터가 하나 더 증가할 경우에도 제안한 분석 알고리즘의 성능향상을 알 수 있다.

표 2. Fixed PRI 및 jittered PRI 분석 알고리즘 성능 비교.
Table 2. Performance comparison of fixed and jittered PRI analysis algorithms.

(1) 2 에미터
(1) 2 emitters

Fixed PRI: 280 [μs], Jittered PRI: 421 [μs] (10%)			
R	결과	알고리즘	
		제한한 sequence search	전형적인 sequence search
5%	correct reports	2	0
	false reports	0	2
10%	correct reports	2	0
	false reports	0	2
15%	correct reports	2	0
	false reports	1	4

(2) 3 에미터
(2) 3 emitters

Fixed PRI: 280 [μs], Jittered PRI: 421, 731 [μs] (10%)			
R	결과	알고리즘	
		제한한 sequence search	전형적인 sequence search
5%	correct reports	3	0
	false reports	0	5
10%	correct reports	3	1
	false reports	0	4
15%	correct reports	3	1
	false reports	0	4

IV. 맺음말

Harmonic 문제를 효과적으로 해결할 수 있는 PRI 분석 알고리즘을 제안하였다. 분석해야 할 PRI 범위가 harmonic을 더 포함하면 할수록 harmonic 문제가 발생할 가능성이 더 커진다. 분석해야 할 전체 PRI 범위를 harmonic이 없도록 subband로 나눈 후 forward/backward 방향으로 sequence search를 행함으로써 PRI 분석 성능을 증대시켰다.

만일 짝수인 N-position staggered PRI를 갖는 레이다의 펄스 간격 (P_1, P_2, \dots, P_N)이 $\sum_{i=1}^{N/2} P_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N P_i$

인 관계에 있으면 subharmonic 관계가 발생하므로 이를 위한 신호처리 과정을 행하여야 한다. 그러므로 ESM 신호처리는 매우 경험적인 지식 및 많은 에미터에 대한 지식이 요구된다.

참 고 문 헌

1. R.G. Wiley, *Electronic Intelligence: the Analysis of Radar Signals*. Artech House, 1982.
2. C.L. Davies and P. Holland, "Automatic processing for ESM," *IEE Proc. F, Commun. Radar & Signal Process.*, vol. 129, pp. 164-171, June 1982.
3. J.W. Campbell and S. Saperstein, "Signal recognition in complex radar environments," *Watkins-Johnson Tech. Notes*, vol. 3, Nov./Dec. 1976.
4. H.K. Mardia, "New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences," *IEE Proc. F, Commun. Radar & Signal Process.*, vol. 136, pp. 149-154, Aug. 1989.
5. D.J. Milojevic and B.M. Popovic, "Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses," *IEE Proc. F, Commun. Radar & Signal Process.*, vol. 139, pp. 98-104, Feb. 1992.
6. A.G. Kellett, "SADIE- A high performance ESM signal analysis processor," *IEE Colloquium on Signal Processing for ESM Systems*, pp. 7/1-7/3, April 1988.

윤 원 식(Won-Sik Youn) 정회원

1984년 2월: 서울대학교 제어계측 공학과(공학사)

1986년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학 석사)

1991년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학 박사)

1986년 1월~1991년 5월: 금성전기 연구소 선임연구원

1991년 6월~1994년 8월: 금성정밀 연구소 책임연구원

1994년 9월~현재: 아주대학교 전파공학과 조교수