

## 펄스열의 2차 차분을 이용한 2단 stagger 신호 식별

임중수<sup>1\*</sup>, 홍경호<sup>1</sup>, 이득영<sup>2</sup>, 신동훈<sup>2</sup>, 김용환<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>백석대학교 정보통신학부, <sup>2</sup>삼성탈레스(주)

### An Identify of Two Step Stagger Signals Using the Second Deviation of Pulse Train

Joong-Soo Lim<sup>1\*</sup>, Kyung-Ho Hong<sup>1</sup>, Dukyung Lee<sup>2</sup>, Dong Hoon Shin<sup>2</sup>  
and Yong Hwan Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Information and Communication, Baekseok University

<sup>2</sup>Samsung Thales

**요약** 본 논문은 2단 스테저 펄스열을 사용하는 레이더 신호를 분리하는 전자전 장비의 알고리즘에 관한 연구이다. 일반적으로 레이더는 고정된 펄스열을 사용하였으나 최신 레이더들은 전자보호 기능을 강화하기 위해서 펄스열을 바꾸고 있다. 2단 스테저 펄스신호는 2가지의 펄스반복주기를 교대로 사용하여 레이더의 탐지 성능을 향상시키고 전자보호 능력을 향상시키는 좋은 방법이다. 종래에는 히스토그램 방법을 사용하여 스테저 신호를 식별하였으나, 본 논문에서는 펄스열의 2차 차분을 이용하는 방법으로 신호를 식별하였으며, 종래에 사용하던 방법과 비교해서 처리 속도가 매우 빠르다. 제안된 알고리즘은 2단 스테저 펄스열을 포함한 각종 펄스열을 분리하는 특성이 매우 양호하였다.

**Abstract** In this paper, we present a novel pulse train identification method for two step stagger pulse train. Generally radar uses a fixed pulse train, and it is easy for electronic warfare system to measure the pulse repeat interval(PRI) and identify the radar. But it is very difficult to measure the PRI of stagger pulse radar because the pulse interval is periodically changed. We suggest a novel method to measure the PRI and identify the radars using the second deviation of pulse train. This method is faster comparing with Histogram method. We have a good PRI measurement results for 2 step stagger signals.

**Key Words** : Stagger, Radar, Jitter, Electronic Warfare, Frequency, PRI, Emitter.

### 1. 서론

레이더 기술이 발달되어 현대전에서는 레이더 신호를 이용한 표적의 거리와 방위 측정, 표적의 속도 측정, 표적의 형상 예측에 레이더가 많이 사용되고 있다. 또한 신형 레이더들은 전자전(electronic warfare: EW)에 대응하기 위하여 주파수 급속변경이나 펄스반복간격(pulse repeat interval: PRI) 변경과 같은 전자보호(electronic protection: EP) 능력을 갖추고 있다[1].

이와 같이 레이더나 탐색기를 비롯한 에미터(emitter)의 방사(radiation) 신호형태가 복잡해지고 신호환경이 고

밀도화 됨에 따라, 에미터 신호를 탐지, 분석하여 에미터의 종류와 위치를 식별하는 전자전지원(electronic support measure: ES) 장비는 상대방의 에미터 사용 여부를 탐지하는 높은 신호 포착 확률을 가지고 있어야 하며, 신호세기가 작은 에미터 송신 신호도 포착할 수 있는 높은 수신 감도를 지녀야 한다. 또한 수신된 에미터 신호를 분석하여 에미터의 위치와 종류를 식별할 수 있는 좋은 신호분석 알고리즘이 필요하다[2,3].

일반적으로, 현대의 전자전 지원 시스템에서는 감시지역에 존재하는 에미터 신호를 수집하기 위해서 신호포착 확률이 높고 수신감도가 높은 수신기를 이용하여 에미터

\*교신저자 : 임중수(jslim@bu.ac.kr)

접수일 09년 06월 29일

수정일 09년 07월 20일

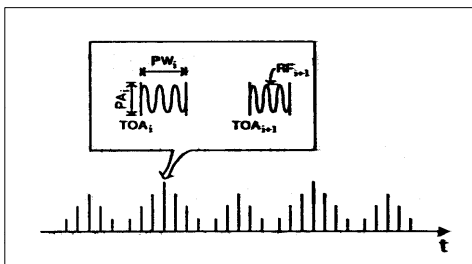
게재확정일 09년 07월 22일

신호를 빠짐없이 수신하고, 수신된 에미터 신호들의 신호 도착 방향(angle of arrival: AOA), 반송파의 주파수, 반송파 주파수의 변조상태, 펄스폭(pulse width: PW), 펄스크기(pulse amplitude: PA)와 신호 도착시간(time of arrival: TOA) 등의 에미터 신호변수들을 측정한다. 그리고 측정된 에미터 신호들을 반송파 주파수, 도래방향, 펄스폭을 기준으로 1차 분리해서 그룹을 만든 뒤에, 각 그룹 내의 에미터 신호들을 신호 펄스의 도착 시간을 기준으로 각 펄스간의 상관성과 펄스열의 연속성을 분석하여 PRI를 구하여 레이더 신호들의 방향 및 종류별로 분리할 수 있다[4,5].

본 연구에서는 레이더 펄스의 PRI가 고정, 지터 2단 스테거, 반복패턴 특성을 가지고 변경되는 경우에 대해서, 레이더 펄스의 TOA의 1차 차분과 2차 차분의 평균과 표준 편차를 이용하여 레이더의 PRI 신호를 식별하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 TOA의 1차 차분의 표준 편차와 평균값을 이용하여 고정 PRI 신호, 지터 PRI 신호를 식별하며, TOA의 2차 차분을 이용하여 2단 스테거 신호의 펄스열을 식별한다.

## 2. 레이더 펄스의 PDW 구성

초기의 ES 시스템에서는 스펙트럼 분석기를 이용하거나 간단한 로직(logic)으로 구성된 하드웨어에 의한 방법으로 그림 1과 같이 협대역 주파수 범위에서 신호를 수신하여 에미터 신호를 분석하고 식별하였다. 그러나 에미터의 신호 형태가 복잡해지고 신호밀도가 증가함에 따라 이러한 방법으로는 효율적인 신호분석이 어렵게 되었다.



[그림 1] 수신기에 측정된 레이더 신호

최근에 사용되고 있는 ES나 ELINT 시스템에서는 신호 환경에 존재하는 에미터를 식별하기 위하여, 수신되는 펄스신호들에 대해 신호분석에 필요한 변수들을 측정 한 후에, 방향 탐지기에서 측정되는 도래 방위각(angle of arrival: AOA)과 수신기에서 측정되는 반송파주파수,

TOA, PA, PW 등의 파라미터들을 매 펄스 단위로 64 비트 또는 128 비트의 디지털 값으로 만들며 이것을 PDW(pulse descriptor word)라 부르고 일반적인 구성은 그림 2와 같다[6].

지속파(CW)신호는 보통 수 백 us를 넘는 펄스폭을 갖는 신호를 의미하며, TOA 측정은 펄스의 상승에지(leading edge)에 맞추어진 내부 클럭에 의해 행해진다.

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
POWER										AOA valid/PW	C/P W	ST	Blk	Band	P
AOA EI (고각)										AOA Az (방위각)					
TOA - MSB															
TOA - LSB															
PM OP	FM OP	FREQUENCY													
Avr. FREQUENCY															
Pulse Width															
Reserved															

[그림 2] PDW 구성

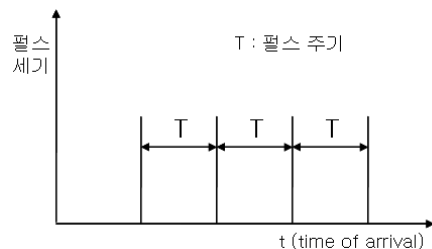
## 3. 레이더의 PRI 분석

레이더들이 탐지 기능을 향상시키거나 전자보호(EP) 기능을 강화하기 위해서 반송파 변경과 마찬가지로 PRI를 변경하는 방법을 많이 사용한다. 레이더에 사용되는 대표적인 PRI형태에는 고정(stable) PRI, 스테거(stagger) PRI, 지터(jitter) PRI, D&S(Dwell and Switch) PRI 및 패턴 PRI가 있다.

고정 PRI는 인접펄스간의 간격이 일정한 것으로서 그림 3에서 보는 바와 같이 모든  $i$ 에 대해서  $t_i - t_{i-1}$ 가  $T$ 인 가장 간단한 형태이다.

레이더에서 발생하는 신호의 PRI가  $T$ 인 경우에는 신호 발생시간은 식(1)과 같다.

$$t_k = t_{k-1} + T, \quad k = 1, 2, 3 \quad (1)$$



[그림 3] 고정 PRI 펄스열

이러한 레이더 신호를 수신기에서 측정하여 펄스간의

시간차를  $Y_k$ 라 하였을 때 측정오차 ( $e_k$ )는 다음과 같이 표현되어질 수 있고, 측정오차는 확률변수로서 평균이 0, 표준편차가  $\sigma$ 인 정규분포를 가지게 된다.

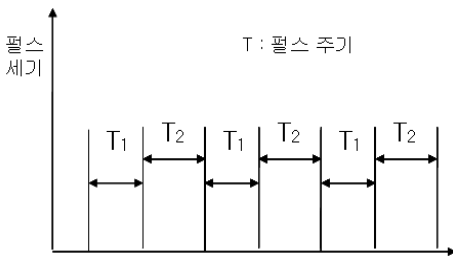
$$e_k = Y_k - T, \quad k = 1, 2, 3, \quad (2)$$

다음으로 스테저 PRI 신호는 정해진 N개의 PRI가 순차적으로 반복되는 것으로 프레임(frame) 주기  $T_f$  와 스테저비(Ratio)는 아래 식과 같이 정의된다.

$$T_f = \sum_{i=1}^N T_i \quad (3)$$

$$Ratio = T_1 : T_2 : T_3 : \dots : T_N \quad (4)$$

2단 스테저 신호는 (3) 식과 같은 PRI  $T_f$ 를 갖고 신호 발생시간 차가  $T_1$ 과  $T_2$  인 고정 PRI 신호의 결합 형태로 볼 수 있다. 즉  $T_1$ 과  $T_2$  펄스간격을 가진 신호가 반복되는 형태이다.



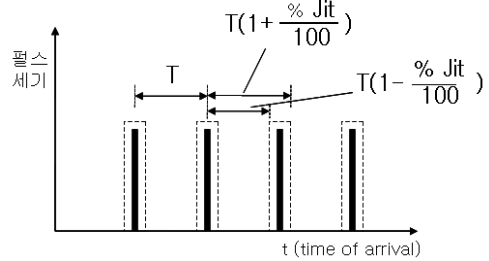
[그림 4] 2단 스테저 PRI 펄스열

지터 PRI신호는 그림 5와 같이 어떤 값을 중심으로 펄스 반복 주기가 변화하는 것으로서 EW 장비의 신호식별을 어렵게 하기 위해서 고의적으로 변화시킬 수도 있고, 발진기 시간회로의 불안정에 의하여 발생될 수도 있다. 에미터에서 발생시키는 기본 PRI가 T이고 지터비율이  $\alpha$  인 지터 PRI 신호의 발생시간을 수식으로 표현하면 식 (5)와 같다[7].

$$t_k = t_{k-1} + T(1 \pm \alpha), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

여기서 지터의 변화분포는 에미터에 따라 다르며 가우스 분포(Gaussian Distribution)를 많이 갖는다. 이와 같은 지터 PRI 신호가 수신기에 수신되어 측정되었을 때,

TOA치의 평균은 T가 될 것이다. 분산은 고정 PRI는 0 이고, 지터 PRI는 TOA 평균값과 비교하면 5% 이내의 작은 값을 가진다. 이러한 특성을 이용하면 고정 PRI 신호와 지터 PRI 신호의 구분이 가능할 것이다.

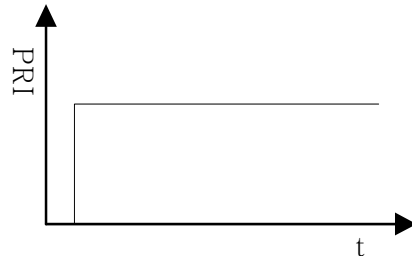


[그림 5] 지터 PRI 펄스열

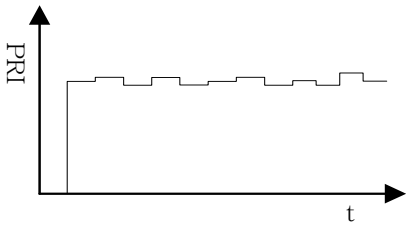
#### 4. TOA 차분 이용 펄스열 분리

그림 6과 그림 7은 고정 펄스열과 지터 펄스열에 대한 TOA의 1차 차분값을 나타낸 것이다. 고정 펄스열은 차분값이 항상 일정하며 평균값차분값과 같고, 표준편차는 0이다. 그러므로 그림 6과 같이 전후 펄스의 차분값이 일정한 값을 유지한다. 또 지터 펄스열은 그림 7과 같이 차분값에서 약간의 오차가 발생한다. 이 오차범위가 평균값의 5% 이내이면 지터 펄스열로 인식한다[7].

만약에 누락 펄스가 발생하면 위에서 걸러지지 못하며, 1차 차분값 중에서 평균값보다 큰 값을 제거한 뒤 분산을 재계산하여 분산이 0이면 누락 펄스를 포함한 고정 펄스열로 인식한다. 지터 펄스열도 마찬가지로 누락 펄스가 포함되면 1차 차분값의 평균이 5%를 초과하게 되면 이 때 평균값보다 큰 값을 제거하고 분산을 재계산한 뒤 분산이 5%이내이면 누락 펄스를 포함한 지터 펄스로 인식하게 된다.

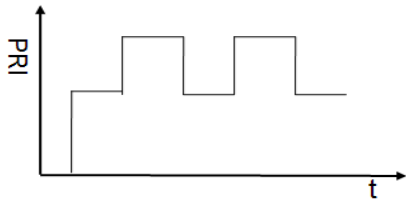


[그림 6] 고정 펄스열의 1차 차분



[그림 7] 지터 펄스열의 1차 차분

스태저 펄스열의 TOA의 1차 차분은 그림 8과 같이 2개의 일정한 값이 연속적으로 반복된다. 이 경우 평균과 표준편차를 구하여서 비교하여 보면, 표준편차는 평균값의 5% 이상이 된다.



[그림 8] 2단 스태저 펄스열 1차 차분

고정 펄스열 및 지터 펄스열 신호는 TOA의 1차 차분으로 그 형태와 펄스 간격을 계산할 수 있다. 그러나 위의 경우가 아니면 펄스열의 패턴을 알 수 없기 때문에 펄스열의 2차 차분을 계산한다. 펄스열의 2차 차분으로 PRI 패턴을 인식할 수 있는 펄스열은 스태저, 삼각파, 톱니파 PRI 등이다. 먼저 스태저와 삼각파 PRI를 검출하는 것이 좋으며, 식별순서는 다음과 같다.

- 1) 펄스열의 2차 차분값이 일정한 주기로 양, 음이 반복되는지 검사한다.
- 2) 음의 값은 절대값을 취한 뒤, 평균과 표준편차를 계산한다.
- 3) 표준 편차가 0이면 2단 스태저 또는 삼각파로 인식한다.
- 4) 2단 스태저 신호의 2차 차분은 그림 9와 같이 음양 값을 교대로 반복한다.



[그림 9] 2단 스태저 펄스열의 2차 차분

## 5. 펄스열 분리 알고리즘

TOA의 1차 차분과 2차 차분을 이용한 펄스열 분리는 크게 4단계로 구분한다. 1) TOA를 시간에 따라 분류하는 단계, 2) TOA의 1차 차분 즉, 펄스열의 PRI를 구하여 고정 PRI 펄스열과 지터 PRI 펄스열을 구분하는 단계, 3) TOA의 2차 차분을 구하는 단계, 4) 이것을 이용해서 2단 스태저 신호와 삼각파를 비롯한 패턴드 PRI 신호를 구하는 단계로 나누며 알고리즘의 세부적인 수행 내용과 순서는 다음과 같다.

- 1) 레이더의 펄스도착시간(Time of arrival: TOA)에 관련된 자료 입력.
- 2) 펄스도착 시간차, 즉 펄스와 펄스 사이의 시간 (pulse repeat interval: PRI)를 구함.
- 3) PRI의 평균( $T$ )과 표준편차( $\sigma$ )를 구함.

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n T_i \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^n (T_j - T)^2} \quad (7)$$

- 4) PRI의 표준편차가 평균의 1% 미만의 범위를 가지는 경우는 고정 펄스열(fixed PRI)로 판단.
- 5) PRI의 표준편차가 평균의 1%이상 5%미만의 범위를 가지는 경우는 지터 펄스열(jittered PRI)로 판단.
- 6) 그 외의 경우는 TOA의 2차 차분, 즉 PRI의 1차 차분을 구함.
- 7) PRI 1차 차분값의 절대값의 평균과 표준편차를 구함.
- 8) PRI의 1차 차분값이 일정한 주기를 가지고 같은 크기의 양수값과 음수값을 반복하면 2단 스태저 신호로 분류.
- 9) 그 외의 경우는 PRI가 삼각파, 톱니파 또는 복합파 형태의 펄스열로 분류.
- 10) 8)경우에 7)에서 계산한 PRI의 1차 차분값의 표준편차가 평균의 1% 미만이면 PRI가 2단 스태저 펄스열로 판단.
- 11) 9)경우에 대해서 삼각파, 톱니파의 특성을 이용하여 펄스열을 판단 PRI 예측기법으로 추가 분류
- 12) 9)경우에 대해서 삼각파, 톱니파가 아니면 복합파로 분류하고 PRI 예측기법으로 추가 분석[7]
- 13) 모든 경우에도 해당되지 않은 경우 알 수 없는 펄

스열이 된다.

## 6. 전자모사 결과 분석

본 논문에서 제시한 레이더 펄스의 PRI 패턴 분석 알고리즘을 시뮬레이터로 구성해서 128비트로 작성된 여러 종류 PRI 패턴의 PDW를 입력한 뒤 그 결과를 분석하였다. 작성된 프로그램은 고정 PRI 신호, 지터 PRI 신호, 2단 스테저 PRI 신호를 정확하게 분리 하였으며 그 결과는 표 1, 표 2와 같다.

표 1의 입력 PDW 자료 중 0, 12300, 35700 등은 입력 펄스가 도달한 시간을 나타내는 디지털 값으로, 프로그램에서 1 비트의 기본시간을 7.8125 ns로 사용했기 때문에 첫째 펄스가 도달한 시간은 0 ns로 기준을 잡을 때, 12300\*7.8125 ns, 35700\*7.8125 ns 간격으로 입력펄스가 도달하고 있음을 나타낸다. 따라서 마지막 펄스가 도달한 시간은 690600\*7.8125 ns로 약 5,395.3 us가 된다. 또한 표준편차는 식 (6), (7)을 이용하여 계산하였으며 1차 차분에 대한 표준편차는 5620.7, 2차 차분에 의한 표준편차는 0 이다.

히스토그램 방법은 PDW 데이터를 그룹(group) 단위로 수신하여 지정된 메모리에 저장하고, 그룹의 PDW가 다 수신되면 그룹 내의 모든 펄스와 펄스 사이의 시간차를 계산한 후에, 시간차가 같은 값을 히스토그램 그래프로 표시하고, 이때 그래프의 최대값이 되는 펄스간격을 PRI로 가정한다. 이 방법을 사용할 경우 N 개 펄스의 펄스 간격을 구하는 총횟수는 (N-1)!이 된다.

2차 차분법을 이용하는 경우 N 개 펄스의 펄스와 펄스 사이의 시간차를 구하는 횟수는 (N-1)\*(N-2)로 히스토그램 방법보다 줄어들어 전체 신호 분리 시간이 매우 빨라진다. 인텔 코어2 듀오 E7300 2.66GHz, 메인 메모리 3GB에서 표 1의 데이터 분리를 수행하는 시간을 실험한 결과 계산의 실행 시간이 0 μs로 측정되었다. 즉 현재 환경에서 1 us 미만의 시간이 소요되는 것을 알 수 있다.

## 7. 결론

본 연구에서는 에미터 신호들이 혼재된 상황에서 레이더 펄스의 PRI가 고정 및 주기적인 특성을 가지고 변경되는 경우에 대해서 펄스열의 2차 차분을 이용하여 PRI 패턴을 분석하는 알고리즘을 개발하였다.

본 논문에서 제시한 TOA의 1차 차분과 2차 차분의 평균값과 표준 편차를 이용하여 PRI 패턴을 식별하는 방법

은 현재 레이더 수신기가 식별하기 매우 어려웠던 스테저 PRI 신호를 구분할 수 있게 되었다. 특히 이런 방법은 기존에 사용하던 각 그룹에서 펄스들 간의 TOA 차를 히스토그램으로 작성하여 PRI와 PRI 변화폭을 판단하던 히스토그램 방법보다 분석 시간이 매우 짧아졌으며, 시뮬레이션 결과 2단 스테저 펄스열을 포함한 각종 펄스열을 분리하는 특성이 매우 양호하였다.

【표 1】 Double Stagger PRI 테스트

Input PDW :	0	12300	35700	48000	71400
	83700	107100	119400	142800	155100
	178500	190800	214200	226500	249900
	262200	285600	297900	321300	333600
	357000	369300	392700	405000	428400
	440700	464100	476400	499800	512100
	535500	547800	571200	583500	606900
	619200	642600	654900	678300	690600
Number of PDW data :	40				
Azimuth of PDW data :	20				
Radio Frequency:	1200				
Power :	20				
Band :	3				
The time of first arrived PDW's :	0.0 us				
The time of last arrived PDW's:	5395.3 us				
The type of PRI :	Double Stagger				
average1 :	12300.0	average2 : 23400.0			
std dev1 :	5620.7	std dev2 : 0.0			

【표 2】 Stagger PRI 테스트

Input PDW :	0	23400	35430	60430
	83830	95860	120860	144260
	156290	181290	204690	216720
	241720	265120	277150	302150
	325550	337580	362580	385980
	398010	423010	446410	458440
	483440	506840	518870	543870
	567270	579300	604300	627700
	639730	664730	688130	700160
	725160	748560	760590	785590
Number of PDW data :	40			
Azimuth of PDW data :	10			
Radio Frequency :	1000			
Power :	100			
Band :	2			
The time of first arrived PDW's :	0.0 us			
The time of last arrived PDW's :	6137.4 us			
The type of PRI:	Triple Stagger			
average1 :	23400.0	average2 :	12030.0	average3 :
	25000.0			
std dev1 :	5849.5	std dev2 :	0.0	

**참고문헌**

[1] Bassem R. Mahafza Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB(2nd edition), Chapman &hall/CRC, 2005.

[2] Filippo Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems(Second Edition)*, Artech House, Boston, 2001.

[3] G. D. Curtis Schleher, *A Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Boston, 1999.

[4] Richard G. Wiley, *ELINT The interception and analysis of radar signals*, Artech House, Boston, 2006.

[5] K. Nishiguchi, M. Kobayashi, "Improved Algorithm for Estimating Pulse Repetition Intervals", IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems Vol. 36, NO 2, April 2000.

[6] Pia Hansson, *Analysis of some methods for de-interleaving of pulse trains*, XR-EE-SB- 2007, 2007.

[7] 임중수 외, "레이저 펄스열의 2차 차분을 이용한 PRI 패턴 분석", 한국콘텐츠학회 논문지, 제8권, 4호, pp.63-70, 2008. 4.

**임 중 수(Joong-Soo Lim)**

[정회원]



- 1978년 2월 : 경북대학교 전자공학과(공학사)
- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과(공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University Dept. of EE(공학박사)
- 1994년 1월 ~ 2003년 2월 : 국방과학연구소 책임 연구원/ 전파 탐지 탐장

- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
- 2004년 1월 ~ 현재 : 한국군사과학기술학회 임원
- 2007년 1월 ~ 현재 : 한국전자과학회 정보전자연구회 위원장

<관심분야>

전자파 수치 해석, 초고주파 시스템

**홍 경 호(Kyung-Ho Hong)**

[정회원]



- 1993년 2월 : 영남대학교 전자공학과(공학 석사)
- 2000년 2월 : 영남대학교 전자공학과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수

<관심분야>

패턴인식, 신경망, 임베디드 시스템

**신 동 훈(Dong Hoon Shin)**

[정회원]



- 2000년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 2002년 2월 : KAIST 전기전자공학과 (공학석사)
- 2005년 8월 : KAIST 전기전자공학과 (공학박사)
- 2007년 11월 ~ 현재 : 삼성탈레스 전자전 그룹 전문연구원

<관심분야>

전자파 수치 해석, 초고주파 시스템, 전자전 방향탐지 시스템

**이 득 영(Dukyung Lee)**

[정회원]

- 2006년 1월 ~ 현재 : 삼성탈레스 종합연구소 전자전 그룹장

<관심분야>

전자파 수치 해석, 초고주파 시스템

**김 용 환(Yong Hwan Kim)**

[정회원]

- 2009 1월 ~ 현재 : 삼성탈레스 종합연구소 연구 소장

<관심분야>

전자파 수치 해석, 초고주파 시스템