

선형 위상배열 안테나를 이용한 역지향성 크로스아이 구조에 관한 연구

김인선¹⁾ · 박진태¹⁾ · 김기백¹⁾ · 박범준¹⁾ · 장연수^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 제2기술연구본부

Study on Retrodirective Cross-eye Structure using Linear Phased Array Antenna

In-seon Kim¹⁾ · Jintae Park¹⁾ · Ghiback Kim¹⁾ · Beomjun Park¹⁾ · Yeonsoo Jang^{*,1)}

¹⁾ The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 5 November 2019 / Revised 15 January 2020 / Accepted 29 January 2020)

ABSTRACT

This study proposes a novel structure for the cross-eye, one of the representative jamming techniques of monopulse sensors. The proposed jammer transceivers are composed of multi-channels with phased array antenna. We named this structure PRCJ(Phased array Retrodirective Cross-eye Jammer). In this structure, formulas for calculating cross-eye gain and distance error are derived. We compare the properties of PRCJ with two-element retrodirective cross-eye jammer(TRCJ). PRCJ can achieve higher J/S because this structure can steer the spatially combined jamming signal in the direction of the incident monopulse signal. Because of the multiple channels in the phased array, it also increases the degree of freedom of channel matching. Finally, We perform a statistical analysis of the cross-eye gain according to the amplitude and phase errors. From this results, It has been found that PRCJ can get higher cross-eye gain than TRCJ.

Key Words : Retrodirective Cross-eye(역위상 교차눈), Wave Distortion(전파왜곡), Phased Array(위상배열), Cross-eye Gain(크로스아이 이득), Statistical Analysis(통계적 분석)

1. 서론

탐색기나 레이더와 같은 모노펄스 센서를 재밍할 수 있는 각도기만 기법들 중 크로스아이(Cross-eye) 재밍

기법이 대표적인 것으로 알려져 있다. 이 기법에 대한 다양한 연구가 이루어졌으나 실용적인 크로스아이 재밍기법의 구현은 방향정보 없이 입사방향으로 재밍신호를 재 방사하는 역지향성(retrodirective 또는 Van Atta array) 크로스아이 재머가 개발됨으로서 가능하게 되었다^[1]. 이런 구조를 채택한 가장 전형적인 형태는 두 쌍의 송수신 채널로 구성된 이중요소 역지향성 크로

* Corresponding author, E-mail: ysjang83@gmail.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

스아이 재머(TRCJ: Two-element Retrodirective Cross-eye Jammer)가 있다^[4]. 이 구조는 이격된 거리에 위치한 두 개의 재머에서 수신된 신호를 서로 역위상이 되도록 상대 송신기로 교차 전송한다. 그런 후, 송신 안테나를 통해 방사된 재밍 신호가 모노펄스 센서에 수신될 때 전파면을 왜곡시켜 각도 오차를 유발시킨다. 따라서 크로스아이 재밍은 인공 글린트(artificial glint)라고도 불린다^[7]. 이 구조에서 가장 중요한 파라미터는 크로스아이 이득(G_{EC} : cross-eye gain)이다. 이것은 두 재머간의 위상차와 진폭차에 의해 결정된다. 따라서 채널간 위상과 진폭의 정밀 보정은 크로스 아이 성능을 결정하는 주요한 파라미터이다.

기존의 TRCJ는 두 채널로만 구성되기 때문에 다채널 구조에서와 같이 채널간 특성을 trade-off 하며 원하는 특성에 접근할 수 있는 채널매칭 구현의 자유도(degree of freedom)가 낮다. 이것이 이 구조가 갖는 가장 큰 단점이다. 또한 이 구조는 전파면의 왜곡을 발생시키는 섹터 각이 매우 좁다는 단점도 갖는다.

좁은 위상왜곡 섹터 각을 확장하기 위해 다중요소 크로스아이 재머(MCJ: Multiple element Cross-eye Jammer) 구조가 연구되었다^[8]. 이 구조는 중심에 하나의 수신기를 두고 양 옆에 배열된 다수의 송신기를 배치하는 구조로서 각각의 엘리먼트 루프에 진폭과 위상의 가중치를 부여하는 방식이다. 이 MCJ는 TRCJ 보다 약 3배 정도 넓은 섹터 각을 제공한다. 그러나 역지향성 구조가 아니기 때문에 미리 알고있는 방향정보를 이용한 인위적인 제어로 항상 MCJ 중심에 목표물을 위치시켜야 된다. 따라서 무기체계 적용에 매우 비실용적인 구조이다. 이런 제한점을 극복하기 위해 MCJ 구조를 응용한 다중요소 역지향성 크로스아이 재머(MRCJ: Multiple element Retrodirective Cross-eye Jammer)에 관한 연구들이 수행되었다^[7,9-11]. 이 구조는 전형적인 다수의 TRCJ를 동일 간격으로 배치하는 구조이다 이때 배열간격은 위상배열 이론에 근거하지 않는다. 이 MRCJ는 TRCJ에 비해 개선된 G_{EC} 를 제공하며, 다 채널 구성에 따른 채널매칭 구현의 자유도를 개선시켰다. 그러나 이 MRCJ는 위상배열 이론에 근거하지 않아 신호의 공간합성을 이용할 수 없기 때문에 다수의 안테나가 사용되었음에도 불구하고 높은 J/S를 얻을 수 있는 구조가 아니다. 특히 이 MRCJ의 설계 파라미터는 매우 복잡한 과정에 의해 구해지기 때문에 일반적인 설계접근이 어렵다.

본 연구는 전형적인 TRCJ의 단점 즉, 낮은 J/S와 채

널 매칭 자유도를 개선하여 G_{EC} 를 향상시키기 위한 새로운 구조의 역지향성 크로스아이 구조(PRCJ: Phased array Retrodirective Cross-eye Jammer)를 제안한다. 제안하는 구조는 위상 배열을 바탕으로 다중요소를 사용하므로 MCJ와 유사한 섹터각을 갖고, 역지향 구조로 인해 목표물의 방향정보가 필요없으며 높은 J/S를 낼 수 있는 장점이 있다.

제 2장에서 제안 구조와 예상되는 특성을 제시한다. 3 장에서 크로스아이 구조의 주요 파라미터 식을 유도한다. 제 4장에서 G_{EC} 에 대한 통계적 분석을 통해 제안구조가 기존구조보다 성능이 우수함을 입증한다.

2. 선형 위상배열 retrodirective cross-eye 구조

Fig. 1은 전형적인 이중요소 역지향성 크로스아이 재머(TRCJ: Two-element Retrodirective Cross-eye Jammer) 구성이다. 이 구조는 전송한 바와 같이 이격 배치된 두 쌍의 송수신기를 사용한다. 하나의 재머에서 수신된 위협 신호는 동일한 위상으로 이격된 재머를 통해 송신하고, 나머지 수신기에서 수신된 위협 신호는 역위상으로 반전하여 반대쪽에 이격된 재머를 통해 송신하는 구조이다.

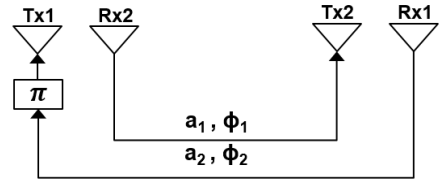


Fig. 1. Two-Elements Retrodirective Cross-eye Jammer(TRCJ) configuration

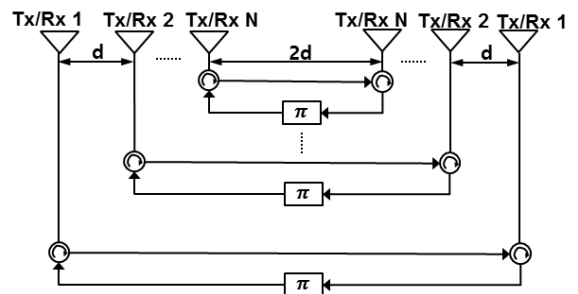


Fig. 2. Multiple element Retrodirective Cross-eye Jammer(MRCJ) configuration

Fig. 2는 다중요소 역지향성 크로스아이 재머(MRCJ: Multiple element Retrodirective Cross-eye Jammer)의 구성이다.

Fig. 3은 본 논문에서 제안하는 위상배열 역지향성 크로스아이 재머(PRCJ: Phased array Retrodirective Cross-eye Jammer) 구성이다.

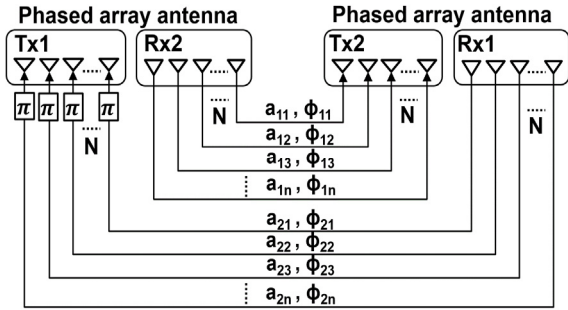


Fig. 3. Phased array Retrodirective Cross-eye Jammer (PRCJ) configuration

Fig. 3은 양쪽의 송수신기에 모두 위상배열 이론에 근거한 선형 위상배열 안테나를 배치한 구조이다.

MRCJ의 개별 송수신기는 전체 베이스라인에 대해 등간격(d)으로 배치되어 있다. 예를 들어 베이스라인이 20 m이고 송수신기가 5개일 경우, 각 송수신기는 2 m 간격으로 배치된다. 이러한 배치를 통해 위상 및 진폭에 대한 허용 오차(tolerance)를 확보할 수 있으나, 빔 합성 조건을 만족하지 못하므로 높은 재밍출력(J/S)을 얻을 수 없다. 빔 합성을 위한 배열 간격 조건은 빛속도/(2*주파수)이며, 12 GHz의 주파수에서 빔 합성 효과를 얻기 위한 배열 간격은 약 0.0125 m이다. 또한 MRCJ는 물리적으로 N개의 송수신기가 필요한 단점이 있다.

이에 반해 제안하는 PRCJ는 베이스라인 양쪽 끝에 위치한 2개의 송수신기에 빔 합성 조건을 만족하는 간격으로 안테나를 배열함으로써 높은 J/S을 얻을 수 있다. 또한 송수신이 물리적으로 분리되어 높은 격리도를 얻을 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 TRCJ는 구성이 단순하고, 이론적인 성능이 우수하기 때문에 가장 널리 참조되는 크로스아이 구조이다. 그러나 이 구조는 잘 알려진 바와 같이 높은 J/S 구현이 어렵다. 두 경로별로 각각 단일 채널 송수신 구조를 사용하기 때문에 목표물의 반사신호보다 훨씬 큰 재밍 신호 생성이 어렵기 때문이다. Fig. 1

의 TRCJ는 넓은 크로스아이 운용범위와 높은 이득을 동시에 충족할 수 있는 안테나가 요구된다. 그러나 안테나에서 이득과 빔폭은 반비례 관계이므로 두 조건은 동시에 만족되기 어렵다. 따라서 만약 재밍출력을 증가시키기 위해 안테나 크기를 증가시키면 운용 범위를 줄이는 결과를 초래한다. 그러므로 재밍출력을 키우기 위한 유일한 방법은 각각의 채널에 출력이 매우 큰 진행파관(TWT: Traveling Wave Tube)을 사용하는 것이다. 이 경우 진행파관 출력 즉, 고출력에서 보정을 위해 위상 및 진폭을 정밀히 제어하는 것은 매우 어렵다. 또한 고출력에 기인한 온도변화 폭이 크기 때문에 두 채널간 진폭과 위상의 상대적 편차를 시간 경과에 따라 일정하게 유지시키는 것은 매우 어렵다.

PRCJ는 재밍출력을 상당히 향상시킬 수 있는 구조이다. 송수신기에 위상배열 안테나가 적용되기 때문에 공간합성된 지향성 재밍빔을 얻을 수 있기 때문이다. 따라서 목표물에서 반사되는 신호의 세기는 일정하게 유지되는 반면 특정방향으로 고출력 지향성 빔을 송신함으로써 J/S비를 향상시킬 수 있다. 또한 이때, 배열 간격은 그레이팅 로브가 발생하지 않는 파장/2 이하로 설계하였고 위상 배열 구조를 적용하였기 때문에 지향성 빔 사용함에도 불구하고 그레이팅 로브가 발생하지 않는 비교적 넓은 조향 범위 내에서 크로스아이 운용이 가능하다. 반면 MRCJ는 위상 배열 구조가 아니므로 빔 조향이 불가능하며 개별 안테나의 빔폭으로 조향 범위가 제한된다.

PRCJ는 반도체 증폭소자를 적용한 다채널 송수모듈을 사용하여 구현될 수 있다. 이로부터 TRCJ 구조의 진행파관과 비교하여 훨씬 낮은 출력에서 위상 및 진폭의 제어가 수행될 수 있어 정밀 보정이 가능하다.

PRCJ는 다채널 구성으로 몇몇 채널의 진폭 및 위상에 일부 오차가 발생하더라도 TRCJ 구조에 비해 G_{EC} 변화가 둔감하다. 따라서 PRCJ 구조는 채널매칭 구현의 자유도가 상대적으로 우수한 구조이다.

3. Cross-eye 이득과 오거리

제안한 PRCJ 구조의 변수는 Fig. 2에 정의되었다. 여기서, 송수신 안테나는 이상적인 선형 위상배열 안테나이다. a_{1i} 는 1번 송수신기간의 각 채널별 진폭을, a_{2i} 는 2번 송수신기간의 각 채널별 진폭을 의미한다. ϕ_{1i} 는 1번 송수신기간의 각 채널별 위상을, ϕ_{2i} 는 2번

송수신기간의 각 채널별 위상을 의미한다.

삼각 근사법(trigonometric approximation)의 선형결합(linear combination)에 의해 재밍송신기 1과 재밍송신기 2의 진폭(M)과 위상(Φ)은 다음의 식으로 구할 수 있다^[12].

$$M_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N a_{1i} a_{1k} \cos(\phi_{1i} - \phi_{1k})} \quad (1)$$

$$M_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N a_{2i} a_{2k} \cos(\phi_{2i} - \phi_{2k})} \quad (2)$$

$$\Phi_1 = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N a_{1i} \sin(\phi_{1i})}{\sum_{i=1}^N a_{1i} \cos(\phi_{1i})} \quad (3)$$

$$\Phi_2 = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N a_{2i} \sin(\phi_{2i})}{\sum_{i=1}^N a_{2i} \cos(\phi_{2i})} \quad (4)$$

식 (1) ~ 식 (4)를 이용한 크로스아이 이득(G_{CE})은 식 (5)와 같다.

$$G_{CE} = \frac{1 - (M_2/M_1)^2}{1 + 2(M_2/M_1) \cos(\pi + \Delta\phi) + (M_2/M_1)^2} \quad (5)$$

식 (5)는 참고문헌 [1] 등에서 제시된 전형적인 TRCJ의 G_{CE} 수식에 빔 합성에 대한 표현인 수식 (1) ~ (4)를 직접 대입하여 유도할 수 있다. 식 (5)는 전형적인 TRCJ의 G_{CE}와 외형상 매우 유사하지만 Fig. 2의 PRCJ에서 정의된 각 채널별 진폭과 위상차가 내포된 표현이다. 여기서, Δφ는 Φ₂-Φ₁이다.

Fig. 3은 크로스아이 재머와 모노펄스 센서 배치에 대한 기하학적 근사모델을 보여준다. 그림에서 “o”는 크로스아이 재머 비송신시 모노펄스 센서가 지향하는 위치이며 “◇”는 크로스아이 재머 송신시 전파왜곡에 의해 모노펄스 센서가 잘못된 방향을 지향하는 위치이다. θ_{err}은 오지향각이며 L_{err}은 전파왜곡에 의해 목표물의 중심으로부터 벗어난 오거리로서 식 (6)으로 구할 수 있다^[5].

$$L_{err} = R \cdot \tan \theta_{err} = \frac{L}{2} G_{CE} \quad (6)$$

식 (6)에서 크로스아이 이득(G_{CE})이 클수록 거리오차(L_{err})가 증가함을 알 수 있다. 이것이 지금까지 다양한 크로스아이 연구에서 높은 G_{CE}를 확보하고자 노력하는 이유이다.

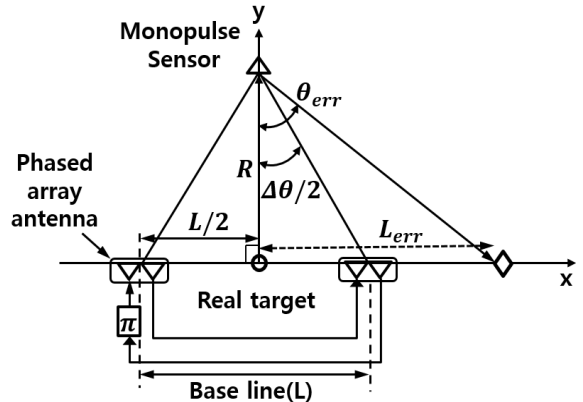


Fig. 4. Geometrically approximate model

PRCJ에서 크로스아이 효과를 고찰하기 위해 8-선형 안테나배열, 주파수 12 GHz 조건에서 20 m의 베이스라인 길이(Fig. 4, L)에 배치 두 재머로부터 역 위상의 신호를 송신할 때, 거리(Fig. 4, R) 1 km 떨어진 조건에서 모노펄스 센서의 수신신호 강도를 Fig. 5에 도시하였다.

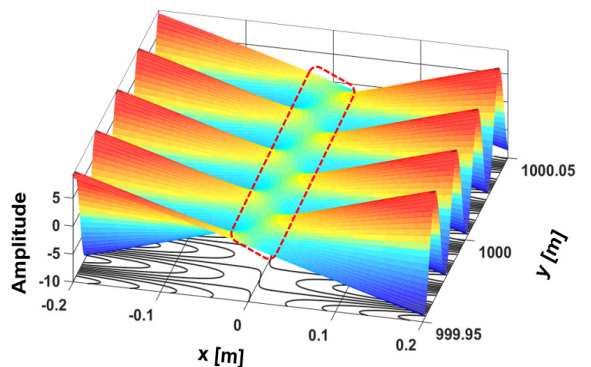


Fig. 5. Received signal of monopulse sensor

Fig. 6은 Fig. 5에서 파면의 등위상 윤곽선을 도시한 것이다^[6].

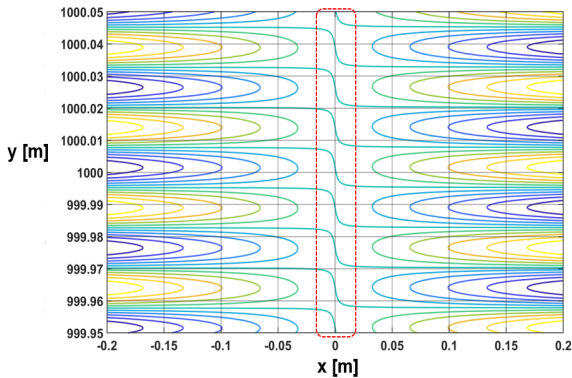


Fig. 6. Contour of equi-phase

Fig. 5와 Fig. 6에서 점선 부분과 같이 모노필스 센서의 지향각에서 전파면의 왜곡이 발생함을 확인할 수 있다. 이것은 제안한 PRCJ가 크로스아이 구조로 정상 동작함을 의미한다.

Fig. 7은 G_{CE} 을 동일하게 제공하는 곡선을 도시한 것이다^[5]. 이때 G_{CE} 곡선상의 각 점에 해당되는 M_2/M_1 과 $\Delta\phi$ 는 해당 G_{CE} 를 구현하기 위한 채널간 진폭비와 위상차를 의미한다. 따라서 Fig. 7은 제안한 PRCJ 구조에서 원하는 G_{EC} 를 성취하기 위한 진폭과 위상의 최대 허용오차를 예측하는데 유용하다.

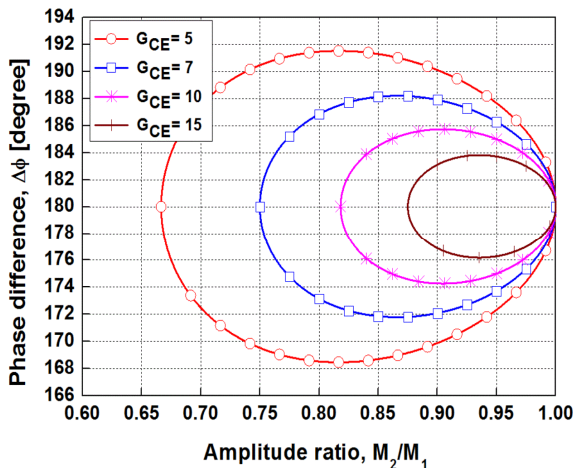


Fig. 7. Contour of constant cross-eye gain

Fig. 7에서 원하는 특정 G_{EC} 를 갖는 진폭비(M_2/M_1)와 위상차($\Delta\phi = \Phi_2 - \Phi_1$)가 결정되었을 경우, 제안한 PRCJ에서 동일한 위상차와 진폭비를 얻을 수 있는 경우의 수는 매우 많다. 즉, 식 (1) ~ 식 (5)에서 다양한

경우의 a 와 ϕ 의 채널 정합에 의해 동일한 위상차와 진폭비를 구할 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 PRCJ가 채널매칭 구현의 자유도를 높일 수 있음을 의미한다. 이런 이유로 만약 일부 채널이 오차범위를 벗어난 경우라도 대부분의 채널이 우수하게 정합되면 동등 이상의 G_{CE} 를 얻을 수 있다.

4. Cross-eye 이득의 통계적 분석

PRCJ 구조의 장점을 입증하기 위해 TRCJ 구조와 PRCJ 구조에 대해 랜덤 위상 및 진폭 오차에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 이때 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 운용 주파수 12 GHz
- 베이스라인 길이 20 m
- 모노필스 센서와 재머간의 거리 1 km
- 8-선형 안테나배열

시뮬레이션 조건의 운용 주파수, 베이스라인 길이, 모노필스 센서와 재머간의 거리는 TRCJ와 PRCJ에 대해 동일하게 적용하였으며, 8-선형 안테나배열은 PRCJ에만 적용된다. 채널간 분산된 위상차($\sigma^2 = \Delta\phi$)를 가우시안 분포로 가정하였으며, 10^6 번 반복으로 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다^[13].

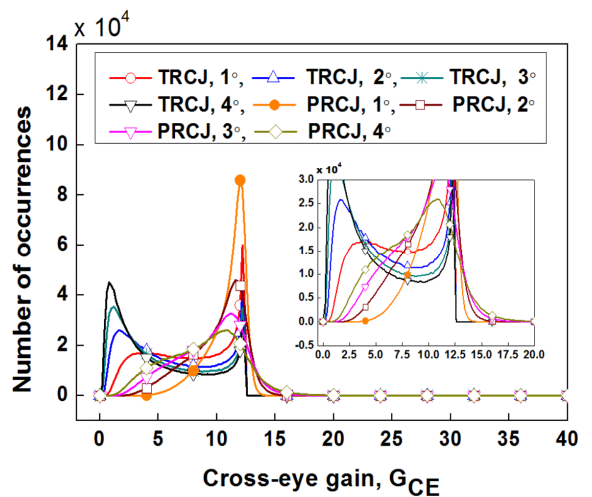


Fig. 8. Statistical analysis of cross-eye gain according to phase errors($M_2/M_1 = 0.85$)

TRCJ와 PRCJ에서 진폭비(M_2/M_1)를 0.85, 0.9, 0.95로 고정하고 각각의 진폭비에 대해 $1^\circ \sim 4^\circ$ 의 위상차로 분산된 경우 발생할 수 있는 G_{CE} 의 빈도수를 계산하였다.

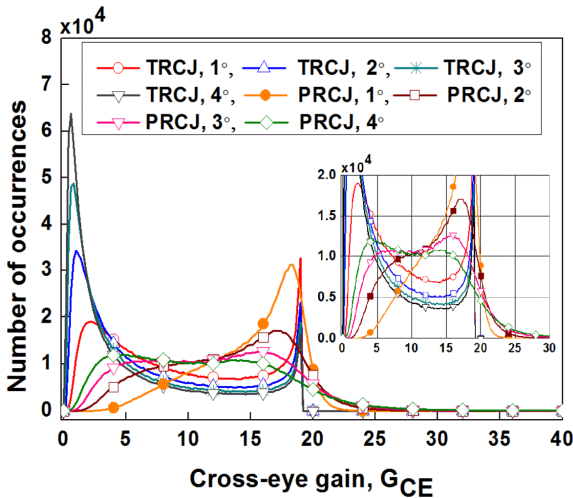


Fig. 9. Statistical analysis of cross-eye gain according to phase errors($M_2/M_1 = 0.9$)

Fig. 8과 Fig. 9는 M_2/M_1 이 각각 0.85와 0.9인 경우에 대한 결과를 도시한 것이다. 두 구조 사이에서 결과를 정량적으로 비교하기 위해 10 이상의 G_{CE} 가 발생할 확률을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Statistical analysis according to phase errors

구분	$\sigma^2 = \Delta\phi$				M_2/M_1	
	1°	2°	3°	4°		
발생 확률 [%]	TRCJ (A)	36.19	26.19	21.46	18.65	0.95
	PRCJ (B)	81.48	64.59	54.30	47.31	
	B / A	2.25	2.47	2.53	2.54	
	TRCJ (A)	41.25	29.80	24.51	21.35	0.9
	PRCJ (B)	87.34	71.80	61.52	54.29	
	B / A	2.12	2.41	2.51	2.54	
TRCJ (A)	33.42	24.00	19.73	17.06	0.85	
PRCJ (B)	77.53	60.14	49.61	42.31		
B / A	2.32	2.51	2.51	2.48		

이와 같은 통계적 분석은 원하는 G_{CE} 을 가장 높은 확률로 얻기 위한 진폭 및 위상조건을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다. 본 예제의 경우, $G_{CE} > 10$ 을 가장 높은 확률로 얻기 위한 조건은 Table 1의 음영부분과 같이 특정하면 진폭비 0.9, 위상차 1° 에 해당된다.

Fig. 8에서 TRCJ가 $G_{CE} > 13$ 을 구현할 수 없고, Fig. 9에서 $G_{CE} > 21$ 을 구현할 수 없음을 보여주는 반면, PRCJ에서 그 보다 더 큰 G_{CE} 구현이 가능함을 확인할 수 있다. 또한 Table 1에서 볼 수 있듯이 제시된 모든 예에서 $G_{CE} > 10$ 이 발생할 확률은 PRCJ가 TRCJ 보다 약 2.1배 ~ 2.5 높다. 따라서 이상의 결과는 제안한 PRCJ가 동일한 진폭비 또는 동일한 위상차를 갖는 조건에서 TRCJ에 비해 더 큰 G_{CE} 구현이 가능하고, 더 높은 확률로 동일한 G_{CE} 를 구현하는데 유리한 구조임을 입증한다. 또한 이상의 결과가 동일한 편차 구간의 랜덤변수를 두 구조에 동시 적용해 얻어진 결과임을 고려할 때, PRCJ가 TRCJ에 비해 상대적으로 채널매칭 자유도가 높다는 것을 확인할 수 있는 결과로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서 전형적인 TRCJ 구조의 성능을 개선하기 위한 방안으로 PRCJ 구조를 제안하였다. 제안한 구조에서 크로스아이 이득(G_{CE})과 오거리(L_{err}) 계산식을 유도하였다. 또한 계산된 수식을 이용해, 랜덤 위상편차 및 진폭편차에 대한 통계적 분석을 통해 PRCJ 구조의 장점을 검증하였다.

제안한 PRCJ는 TRCJ에 비해 복잡한 구조의 단점을 갖지만 위상배열 구조의 공간합성 특성으로 높은 J/S를 얻을 수 있다. 또한 다채널 구성으로 일부 채널에서 위상과 진폭이 편차를 갖더라도 전체의 특성에 미치는 영향은 둔감하여 채널매칭의 자유도를 높일 수 있다. 이런 특성으로 제안한 PRCJ는 동일 진폭비 또는 동일 위상차 조건에서 TRCJ에 비해 상대적으로 높은 G_{CE} 를 얻을 수 있는 구조이다.

References

[1] W. P. Plessis, "A Comprehensive Investigation of Retrodirective Cross-Eye Jmming," Doctoral Dissertation

- for Degree of Philosophy Doctor. pp. 19-24, 2009.
- [2] W. P. Plessis, J. W. Odendaal, and J. Joubert, "Extended Analysis of Retrodirective Cross-eye Jamming," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 57, No. 9, pp. 2803-2806, 2009.
- [3] F. Neri, "Introduction to Electronic Defence System," *Technology & Engineering*, pp. 446-452, 2006.
- [4] Lars Falk, "Cross-eye Jamming of Monopulse Radar," *International Waveform Diversity and Design*, pp. 209-213, June 2007.
- [5] Y. Jang, G. Kim, J. Park, C. Lee, "Required Performance Analysis of Wavefront Distortion System against Monopulse Radar," *Journal of Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 27, No. 6, pp. 577-580, June 2016.
- [6] T. W. Tucker, Bill Vildger, "Cross-eye Jamming Effectiveness," *Tactical Technologies Inc., Ottawa, ON K2A 3V6, Tech. Rep.*, 2009.
- [7] T. Liu, D. Liao, X. Wei, "Performance Analysis of Multiple-Element Retrodirective Based on Linear Array," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 51, No. 3, pp. 1867-1876, July 2009.
- [8] N. H. Harwood, W. N. Dawaber, D. J. King, V. A. Kluckers and G. E. James, "Multiple-Element Cross-eye," *IET Radar Sonar Navig.*, Vol. 1, No. 1, pp. 67-73, 2007.
- [9] W. P. Plessis, "Cross-eye Gain in Multiloop Retrodirective Cross-eye Jamming," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 52, No. 2, pp. 1867-1876, Apr. 2016.
- [10] Y. Degui, L. Buge, and Z. Dangjun, "Cross-eye Gain Distribution of Multiple-Element Retrodirective Cross-eye Jamming," *Journal of System Engineering and Electronics*, Vol. 29, No. 8, pp. 1170-1179, Dec. 2018.
- [11] T. Liu, X. Wei, L. Li, "Multiple-Element Retrodirective Cross-eye Jamming Against Amplitude-Comparison Monopulse Radar," *ICSP 2014 Proceedings*, pp. 2135-2140, 2014.
- [12] Wolfram MathWorld Website, "Harmonic Addition Theorem," <http://mathworld.wolfram.com/HarmonicAdditionTheorem.html>
- [13] Mechanical & Aerospace Engineering, Missouri University of Science and Technology Website, "Mote Carlo Simulation," http://web.mst.edu/~dux/repository/me360/me360_presentaion.html