

스위치 매트릭스를 이용한 동시 다중빔 형성 기술

Simultaneous Multi-Beamforming Technique Using A Switch Matrix

김인선 · 유홍균 · 이철수 · 박주래 · 김기백

In-Seon Kim · Hong-Kyun Ryu · Chul-Soo Lee · Joo-Rae Park · Ghi-Back Kim

요 약

본 연구는 전자전용 재밍 송신기에 적용하기 위한 동시 다중빔 형성기술에 관해 기술한다. 본 기술은 기존의 아날로그 다중빔 형성 방식과 디지털 다중빔 형성 방식의 기능을 접목한 새로운 형태의 하이브리드 송신구조이다. 이 구조는 구성이 단순하고 포화영역 구동시에도 다중 신호에 의한 혼변조 문제가 발생하지 않는다. 또한 개구면 분할의 유연성을 갖고 제한된 범위에서 부배열을 가변할 수 있다. 개구면 분할을 위한 핵심 구조로 스위치 매트릭스 모듈을 제시한다. 스위치 제어로 다양하게 개구면을 분할하는 방법과 각 개구면에 서로 다른 주파수 신호를 할당하는 방법을 제시한다. 최종적으로 분할 개구면을 통해 방사시험을 수행한다. 시험결과로부터 각 분할 개구면을 통해 서로 다른 주파수 신호를 서로 다른 방향으로 동시에 조향할 수 있음을 입증한다. 이로부터 제안한 방식이 다수의 전자파 위협에 동시에 대응할 수 있는 재밍 송신기에 적합한 기술임을 보인다.

Abstract

This paper describes a simultaneous multi-beamforming technique for application in an electronic warfare jamming transmitter. The proposed technique is a hybrid transmission structure that combines the functions of conventional analog and digital multi-beamforming methods. The structure has a simple configuration and does not generate intermodulation problems due to multiple signals, even when operated in the saturation region. In addition, it provides flexibility in aperture division and allows variation of sub-array within a limited range. Methods for dividing the aperture into multiple sub-arrays using switch control and for assigning different frequency signals to each sub-array are presented. Radiation tests were performed on the split apertures. The results demonstrate that multiple signals can be simultaneously steered in different directions through each split aperture. These results indicate that the proposed method is suitable for jamming transmitters capable of simultaneously responding to multiple electromagnetic threats.

Key words: Simultaneous Multi-Beamforming, Aperture Division, Switch Matrix, Sub-Array, Jamming Transmitter

I. 동시 다중빔 송신 방식

본 논문은 송신기 위상배열 안테나의 개구면을 분할하

고 분할된 각 부배열을 통해 서로 다른 신호를 송신할 때, 혼변조 없이 동시 다중빔을 형성할 수 있는 재밍송신 기술을 제안한다. 이 기술의 개발 배경은 군용 재밍 송신기

「이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 연구되었음(912971201).」

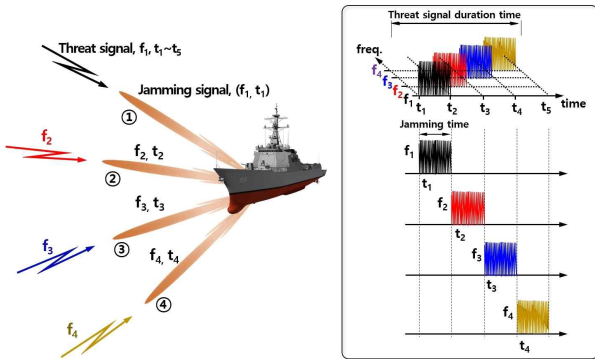
국방과학연구소 3연구원 3부(ADD, 3rd R&D Institute 3rd Directorate)

· Manuscript received August 14, 2025 ; Revised September 7, 2025 ; Accepted October 16, 2025. (ID No. 20250814-082)

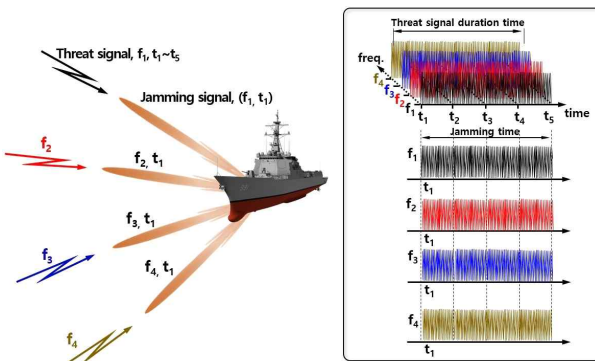
· Corresponding Author: In-Seon Kim (e-mail: naechon@add.re.kr)

[14-16]가 아군 플랫폼에 접근하는 서로 다른 주파수를 갖는 다중 위협을 동시에 교란하여 재밍효율을 향상시키기 위한 목적에서 비롯되었다.

일반적으로 다중위협에 대응하는 기존의 재밍 송신 방식은 위협순위가 높은 대상으로부터 위협순위가 낮은 대상으로 시분할 순차재밍을 수행하여 이루어진다(그림 1(a)). 그러나 최근 재밍 송신 방식은 여러 위협을 동시에 대응할 수 있도록 발전되고 있다(그림 1(b)). 그림 1은 이 두 가지 재밍송신 방식을 비교하기 위해 도시한 것이다. 그림 1(a)는 위협 존재 지속시간 중에 일부 시간만 재밍점유시간이 할당된다. 그러므로 단일 위협에 대한 재밍 시간은 위협 지속시간/빔수가 된다. 반면에 그림 1(b)는 위협 존재 시간 내



(a) 시분할 순차재밍
(a) Time sharing sequential jamming



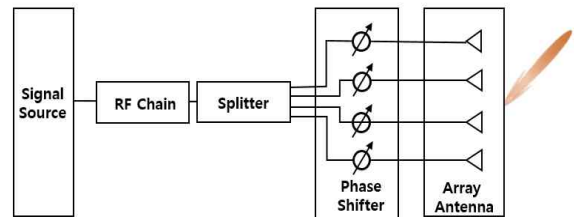
(b) 동시재밍
(b) Simultaneous jamming

그림 1. 재밍 송신 방식 비교
Fig. 1. Comparison of jamming transmission methods.

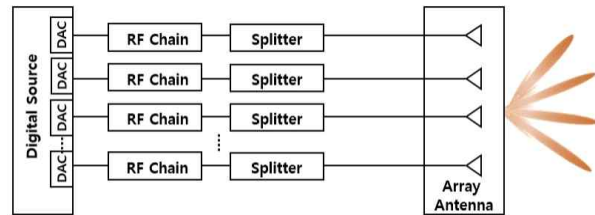
내 재밍 점유시간이 할당된다. 따라서 그림 1(b)의 재밍효율이 높다. 이것이 재밍송신기에 사용되는 동시 다중빔 송신 방식의 가장 큰 장점이다.

빔 형성 방식은 그림 2와 같이 크게 세 가지로 분류된다. 첫째는 아날로그 방식[4-7], 두 번째는 디지털 방식[8-11]이고 세 번째는 디지털 방식과 아날로그 방식을 조합한 하이브리드[12,13] 방식이다.

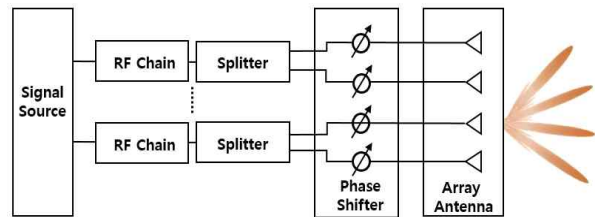
아날로그 빔 형성 방식은 안테나 배열이 단일 RF 채널로만 연결되며 한순간에 하나의 빔만을 형성할 수 있다. Rotman lens, Butler matrix, Blass matrix를 사용하는 빔포밍 방법이 대표적이다. 미리 빔조향 방향이 결정된 입력포트를 스위치로 선택하여 그 방향으로 빔을 형성하는 방식이다. 제한된 방향으로만 빔을 형성시킬 수 있기 때문에 빔조향의 해상도가 낮다.



(a) 아날로그 빔포밍
(a) Analog beamforming



(b) 디지털 빔포밍
(b) Digital beamforming



(c) 하이브리드 빔포밍
(c) Hybrid beamforming

그림 2. 빔포밍 구조
Fig. 2. Beamforming structures.

디지털 다중빔 형성 방식은 채널의 모든 자유도를 활용하여 여러 신호를 동시에 송신할 수 있다. 배열안테나의 모든 채널에 제공되는 신호의 위상과 진폭을 디지털 제어로 변경 가능하다. 따라서 빔포밍 알고리즘을 통해 송신 빔조향 방향과 출력세기를 임의로 조절할 수 있는 방식이다. 그러나 이 구조는 다중 신호가 능동소자의 비선형영역에서 구동되면 혼변조 신호에 의해 복잡한 불요 신호가 발생될 수 있다. 이런 현상은 동시 송신하고자 하는 신호의 수가 증가할수록, 또한 포화영역 근처에서 구동할수록 더 심각해진다. 그러므로 이런 현상을 완화하기 위해 증폭기를 선형영역에서 구동해야 하므로 유효방사출력이 낮아지는 단점이 있다. 또한 다수의 디지털 신호원이 요구되어 고가이며 모든 채널마다 신호원의 직접 연결로 결선이 매우 복잡하다. 또한 전력 소모가 크다고 알려져 있다. 그럼에도 불구하고 위상배열 안테나를 통한 다중빔 형성에서 개구면 가변 유연성(flexibility)이 뛰어난 다중빔 송신 방식으로 간주된다.

하이브리드 다중빔 형성 방식은 소수의 RF 채널과 위상지연기 네트워크를 통해 다수의 안테나 배열에 연결되어 이루어진다. 여러 가지 형태로 구현되는데, 송신하고자 하는 최대 빔 수만큼 배열안테나를 고정된 부배열(sub-array)로 분할^{[14]-[16]}하는 방법, 서로 다른 운용 주파수를 갖는 여러 형태의 안테나를 동일면 상에 혼합하여 분할 배치^{[17]-[20]}하는 방법, 서로 다른 층에 다른 운용 주파수 배열안테나를 적층하는 구조^{[21]-[23]} 등이 사용된다. 이 방식은 디지털 방식과 달리 송신모듈 중단의 증폭기에 단일 톤(single-tone) 신호만 급전되기 때문에 혼변조 문제가 없고 포화영역에서 구동이 가능하다. 이 방식은 설정된 부배열 단위로 운용단위를 설정하고 스위치를 포함한 신호분배 구조로 부배열 안테나를 선택하기 때문에 구조가 상대적으로 단순하다. 그러나 배열안테나의 개구면을 분할하여 사용하기 때문에 각 송신신호의 유효방사출력이 줄어드는 단점을 갖는다.

전술한 각 빔 형성 방식은 표 1과 같은 장단점을 갖기 때문에 목표성능을 만족하는 범위에서 송신기의 복잡도, 제작비용 등을 고려하여 적합한 구조를 선택한다. 본 연구에서는 다양한 부배열 안테나를 선택할 수 있는 스위치 매트릭스 신호분배구조를 포함하는 새로운 형태의 하

표 1. 빔포밍 방식의 특성비교

Table 1. Characteristics comparison of beamforming schemes.

Items	Analog	Digital	Hybrid
Number of beams	Single	Multiple	Multiple
Manufacturing cost	Low	High	Middle
Flexibility	Low	High	Middle
Power consumption	Low	High	Middle
Manufacturing difficulty	Low	High	Middle
Operating range	Saturation	Linear	Saturation
Intermodulation	No	Yes	No
Use of phase shifters	Yes	No	Yes

이브리드 빔 형성 송신구조를 제안하고 이 구조로 기존의 하이브리드 빔 형성 구조에 비해 배열안테나를 훨씬 더 다양한 형태의 부배열 안테나로 분할할 수 있음을 제시한다.

II. 송신장치 구성

우리가 구현하려는 멀티빔 송신장치의 블럭도는 그림 3과 같다. 신호발생모듈은 최대 4개까지 서로 다른 주파수 신호를 제공할 수 있도록 4채널 RFSoc를 채택하였다.

스위치 매트릭스모듈은 배열안테나 선택을 위해 스위치와 분배기로 구성된다. 송신모듈은 8개로 구성된다. 각 모듈은 8개의 채널을 갖고 각 채널에는 시간지연소자(TTD, true time delay)를 배치하여 빔 조향이 가능하도록 하였다. 또한 모든 채널에 대한 진폭 및 위상 보정을 수행하였다.

그림 4는 송신모듈의 포트 배치를 보여준다. 송신모듈 전면의 출력포트는 배열안테나의 입력포트와 동일한 위치 및 간격을 갖도록 하여 서로 간에 직접 체결이 가능하게 구성하였다. M1~M64는 송신모듈의 출력포트 번호를 부여한 것이다. 송신모듈 내부에서 입력포트 하나마다 두

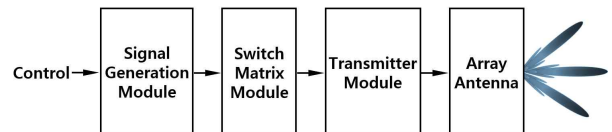


그림 3. 송신장치 구성

Fig. 3. Transmitting equipment configuration.

채널씩 연결되도록 구성하였다. 따라서 각 송신모듈의 입력포트는 4개로 구성되며 전체 입력포트는 32개(T1~T32)이다. 예로 T1으로 입력된 신호는 송신모듈 내부의 고출력증폭기 1과 2를 구동하기 위한 입력으로 인가되고 증폭된 신호는 M1과 M3 포트로 출력된다. 각 두 개의 포트들을 연결한 점선과 파란색 부분(T1~T32)은 입출력 포트간의 관계를 보여준다. 그림 4의 좌측 그림은 Tx 모듈 1의 후면 포트(입력 포트) 구성이다.

그림 5는 장치에 적용된 배열안테나의 정면도이다. 그림은 배열안테나와 송신모듈의 포트연결을 설명하기 위한 개념적인 그림으로 실제 송신모듈의 높이는 배열안테나 높이보다 약 2.5배 크다. 배열안테나 구조는 8x8의 삼각배열 구성이며 단일 안테나(element antenna)는 45° 선형편파를 갖는 TSA(tapered slot antenna) 구조이다. A1~A64는 단일 안테나의 번호이다. 또한 그림 5는 송신모듈

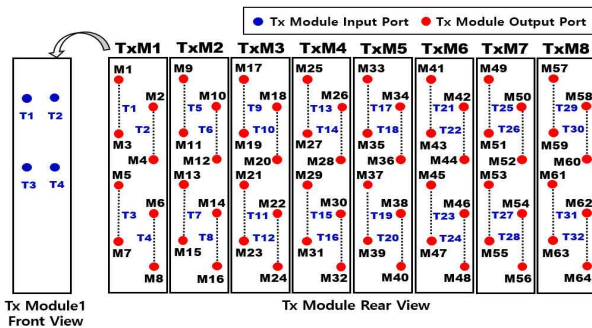


그림 4. 송신모듈 포트번호
Fig. 4. The port numbers of Tx modules.

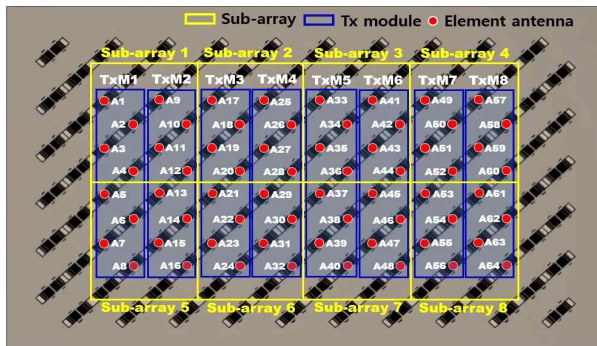


그림 5. 위상배열 안테나(정면도)
Fig. 5. Phased array antenna (front view).

(TxM)과 배열안테나가 어떻게 체결되는지를 보여준다. 그림 4의 송신모듈 출력 M1~M64는 그림 5의 안테나 A1~A64에 각각 연결된다. 예를 들어, 그림 4 송신모듈의 T1에 신호가 입력되면 송신모듈의 M1과 M3 포트에 증폭된 신호가 출력되고 그 신호는 그림 5 배열안테나의 A1과 A3 안테나로 연결된다.

한편 안테나를 임의로 선택할 수 있는 최소 단위의 부배열을 1~8로 설정하였다. 여기서 각 부배열은 2x4 배열로 구성된다. 이는 우리가 구현하려는 시스템의 유효방사출력을 만족시킬 수 있는 최소 배열로 결정한 것이다. 이 부배열은 설계목적에 따라 더 큰 배열로 설정할 수도 있고 더 작은 배열로 설정할 수도 있다.

그림 6은 제안하는 스위치 매트릭스 모듈을 보여준다. 이는 본 논문에서 제안하는 동시 다중빔 생성을 위한 핵심 구조이다.

그림 6에서 JSG(jamming signal generator)는 재밍신호를 생성하는 발생기이고 SW(switch)는 각 채널을 on/off 한다. 다중 입력력 PD(power divider)는 본 모듈을 위해 고안한 전력분배기이다. 다중 입력력 PD의 출력(D1~D32)은 송신모듈(TxM)의 입력포트, T1~T32에 연결된다.

표 2는 스위치 제어에 따라 부배열이 8개로 분할되는 경우와 4개의 분면 즉, 분면 1(sub-array 1과 2), 분면 2(sub-array 3과 4), 분면 3(sub-array 5와 6), 분면 4(subarray 7과 8)으로 분할되는 경우를 정리한 것이다. 표 2를 참조하면 다양한 형태의 개구면 분할이 가능하다. 예를 들어

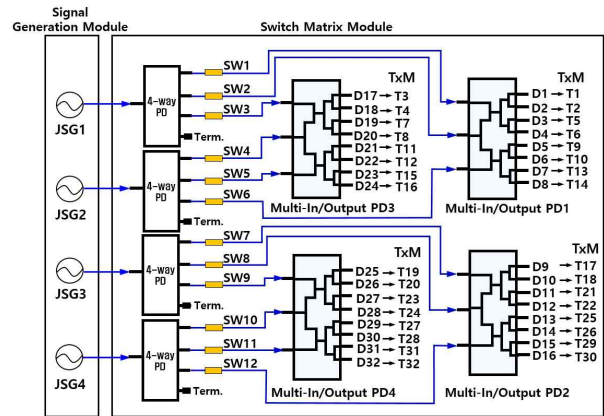


그림 6. 스위치 매트릭스 모듈
Fig. 6. Switch matrix module.

SW2와 SW8을 도통한 상태에서 JSG1과 JSG3에 같은 주파수 신호(f_1)를 할당하고, 마찬가지로 SW4와 SW10을 도통한 상태에서 JSG2과 JSG4에 같은 주파수 신호(f_2)를 할당하면 개구면이 상하로 2등분된 형태로 분할

되고 그 분할된 각각의 개구면에 서로 다른 주파수 신호를 인가할 수 있는 상태가 된다. 이와 같은 방법으로 다양한 형태의 개구면 분할이 가능하다. 그림 7은 동일한 방법으로 개구면이 분할된 11가지 경우를 보여준다. 중심축

표 2. 모듈연결시 포트, 스위치, JSG 번호
Table 2. Port-, SW-, JSG-numbers when connecting modules.

Switch matrix module (see Fig. 6)		Transmitter module (see Fig. 4)		Array ant. (see Fig. 5)	Sub-array			Quadrant		
		In	Out		No.	SW	JSG	No.	SW	JSG
Multi-in/output PD1	D1	T1	M1, M3	A1, A3	1	SW1	JSG1	1	SW2	JSG1
	D2	T2	M2, M4	A2, A4						
	D3	T5	M9, M11	A9, A11						
	D4	T6	M10, M12	A10, A12						
	D5	T9	M17, M19	A17, A19	2	SW6	JSG2			
	D6	T10	M18, M20	A18, A20						
	D7	T13	M25, M27	A25, A27						
	D8	T14	M26, M28	A26, A28						
Multi-in/output PD2	D9	T17	M33, M35	A33, A35	3	SW7	JSG3	2	SW8	JSG3
	D10	T18	M34, M36	A34, A36						
	D11	T21	M41, M43	A41, A43						
	D12	T22	M42, M44	A42, A44						
	D13	T25,	M49, M51	A49, A51	4	SW12	JSG4			
	D14	T26	M50, M52	A50, A52						
	D15	T29	M57, M59	A57, A59						
	D16	T30	M58, M60	A58, A60						
Multi-in/output PD3	D17	T3	M5, M7	A5, A7	5	SW3	JSG1	3	SW4	JSG2
	D18	T4	M6, M8	A6, A8						
	D19	T7	M13, M15	A13, A15						
	D20	T8	M14, M16	A14, A16						
	D21	T11	M21, M23	A21, A23	6	SW5	JSG2			
	D22	T12	M22, M24	A22, A24						
	D23	T15	M29, M31	A29, A31						
	D24	T16	M30, M32	A30, A32						
Multi-in/output PD4	D25	T19	M37, M39	A37, A39	7	SW9	JSG3	4	SW10	JSG4
	D26	T20	M38, M40	A38, A40						
	D27	T23	M45, M47	A45, A47						
	D28	T24	M46, M48	A46, A48						
	D29	T27	M53, M55	A53, A55	8	SW11	JSG4			
	D30	T28	M54, M56	A54, A56						
	D31	T31	M61, M63	A61, A63						
	D32	T32	M62, M64	A62, A64						

을 기준으로 대칭적인 분할 구조도 구현 가능하지만 빔의 형상이 동일하기 때문에 제시하지 않았다.

그림 7에서 Type에 붙은 번호는 분리된 개구면의 개수에 따라 명명한 것이다. 개구면의 서로 다른 색은 분할된 개구면을 표현한 것이다. 본 논문에서 제시한 스위치 매트릭스 모듈에서 개구면 분할 개수는 1개부터 4개까지로 제한했지만 필요할 경우 스위치 매트릭스 구조를 변경하여 분할 개수를 확장 또는 축소할 수 있다.

표 3은 그림 7 각각의 경우에 대해 그림 6을 참조하여, 도통되는 스위치와 그때 할당된 주파수 신호(JSG) 상태를 정리한 것이다. 표 3에서, 예를 들어 Type 3(a)의 경우 $(JSG1=JSG3) \neq JSG2 \neq JSG4$ 에서 JSG1과 JSG3는 동일한 f_1 주파수 신호를 발생하고 JSG2는 f_2 , JSG4는 f_3 의 주파수 신호발생을 의미한다. 즉, 표에서 등호 표시된 신호는 동일 주파수를 갖는 경우이고, 부등호 표시된 신호는 서로 다른 주파수를 갖는 경우를 나타낸다. 어떤 Type을 선택하더라도 JSG1부터 JSG4까지 4개의 주파수 신호는 항상 송신모듈에 제공된다. 따라서 JSG1~JSG4의 동기(synchronization)가 매우 중요하다.

그림 8은 제작된 스위치 매트릭스 모듈 사진을 보여준다. 실제 제작에서는 모듈 간 배치와 체결을 고려하여 스위치부와 다중 입출력 PD부로 분리하여 제작되었다. 다중 입출력 PD부는 송신모듈과 블라인드 매트 타입의 커넥터로 직접 체결된다.

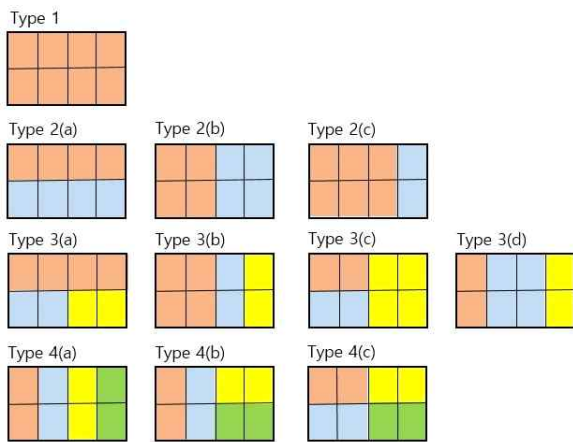


그림 7. 분할된 개구면
Fig. 7. Split apertures.

표 3. 그림 6의 스위치와 신호 할당의 정리
Table 3. Summary of switch and signal assignment in fig 6.

Aperture division Type	Switch no. (see Fig. 6)	JSG
Type 1	2, 4, 8, 10	$JSG1=JSG2=JSG3=JSG4$
Type 2	(a) 2, 4, 8, 10	$(JSG1=JSG3) \neq (JSG2=JSG4)$
	(b) 2, 4, 8, 10	$(JSG1=JSG2) \neq (JSG3=JSG4)$
	(c) 2, 4, 7, 9, 11, 12	$JSG1=JSG2=JSG3 \neq JSG4$
Type 3	(a) 2, 4, 8, 10	$(JSG1=JSG3) \neq JSG2 \neq JSG4$
	(b) 2, 4, 7, 9, 11, 12	$(JSG1=JSG2) \neq JSG3 \neq JSG4$
	(c) 2, 4, 8, 10	$JSG1 \neq JSG2 \neq JSG3 = JSG4$
	(d) 1, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 12	$JSG1 \neq JSG2 = JSG3 \neq JSG4$
Type 4	(a) 1, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 12	$JSG1 \neq JSG2 \neq JSG3 \neq JSG4$
	(b) 1, 3, 5, 6, 8, 10	$JSG1 \neq JSG2 \neq JSG3 \neq JSG4$
	(c) 2, 4, 8, 10	$JSG1 \neq JSG2 \neq JSG3 \neq JSG4$

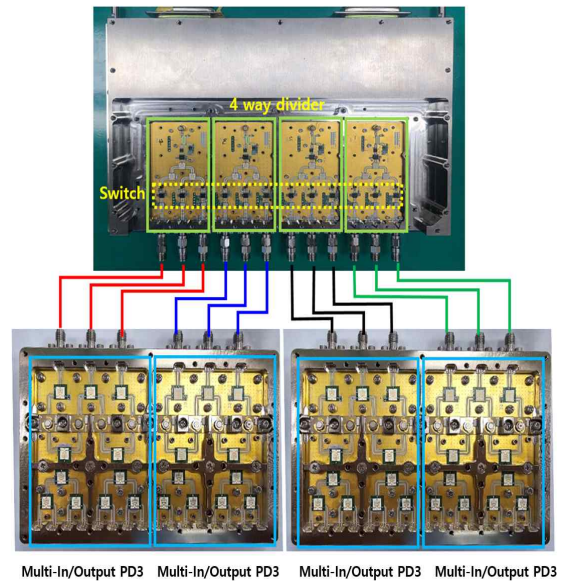


그림 8. 제작된 스위치 매트릭스 모듈
Fig. 8. Fabricated switch matrix module.

Ⅲ. 다중빔 형성 검증

전술한 내용을 검증하고자 분할된 개구면에 대한 시뮬레이션 및 방사시험을 수행하였다. 분할된 각 개구면에 할당된 주파수 및 고각/방위각 빔조향 값은 표 4와 같다. 분리된 개구면 간의 방사특성을 명확히 식별하기 위해 송신 주파수는 운용 대역에서 비교적 높은 주파수를 사용하였다. 또한 각 개구면의 빔조향 각을 달리하여 빔이 겹치지 않도록 시험조건을 설정하였다. 표에서 B1~B4는 각 분할 개구면의 조향빔 번호를 의미한다.

3-1 시뮬레이션

그림 9는 그림 7에서 제시한 11가지 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 가로축과 세로축은 각각 방위각과 고각이다. 시뮬레이션은 제작된 배열안테나를 구성하는 모든 단일 안테나들의 측정데이터와 어레이 팩터를 이용하여 빔패턴을 구하였고, 이론적인 TTD 값을 적용하여 빔조향을 모사하였다. 각 그림 오른쪽에 제시된 컬러 바(color bar)의 범위는 0~-45 dB이다.

3-2 측정결과

표 4. 측정 주파수와 빔조향 각

Table 4. Measurement frequencies and beam steering angles.

Type	Frequency (GHz)				Beam steering angle (Az, El) (°)				
	Beam 1 (B1)	Beam 2 (B2)	Beam 3 (B3)	Beam 4 (B4)	Beam 1 (B1)	Beam 2 (B2)	Beam 3 (B3)	Beam 4 (B4)	
1	f				0, 0				
2	(a)	f	1.27 f		-45, -10	45, 10			
	(b)	f	1.27 f		-45, -20	45, 20			
	(c)	f	1.27 f		-45, -10	45, 10			
3	(a)	f	1.27 f	1.55 f	0, 10	-45, -10	45, -10		
	(b)	f	1.27 f	1.55 f	-45, -10	0, 10	45, -10		
	(c)	f	1.27 f	1.55 f	-45, 10	0, -10	45, 10		
	(d)	f	1.27 f	1.55 f	45, -10	0, 0	45, -10		
4	(a)	1.27 f	1.36 f	1.45 f	1.55 f	-45, 10	-20, -10	20, 10	45, -10
	(b)	1.27 f	1.36 f	1.45 f	1.55 f	-45, 10	-20, -10	20, 10	45, -10
	(c)	1.36 f	1.55 f	1.45 f	1.64 f	-45, 20	-45, -20	45, 20	45, -20

분할된 개구면에 대한 성능을 검증하고자 방사시험을 수행하였다. 시험은 전자파 무반사실에서 구형근접전계 측정장치를 통해 측정하였다. 그림 10은 그림 3의 전체 시스템의 다중빔 시험결과를 보여준다. 그림 10은 측정장치가 제공하는 톨로 확보하였다. 각 그림의 우측 상단에 있는 사각형은 분할된 개구면을 도시한 것이다. 그림 9에서와 마찬가지로 컬러 바의 범위는 0~-45 dB이다.

그림 10과 표 4의 비교를 통해 분리된 각 개구면에서 원하는 주파수 신호가 의도한 방향으로 빔이 형성됨을 확인할 수 있다. 또한 측정된 결과로부터 선택된 개구면의 형태에 따라 고각과 방위각을 넓게 또는 좁게 선택적으로 운용할 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, 개구면 분할 방법으로 제한된 범위내에서 가변빔 형성이 가능함을 확인할 수 있다. 이 특성은 재밍 송신기 관점에서 매우 중요하다. 만약 재밍해야 할 다수의 대상체들이 방위각 방향으로 넓게 분포되었는지 또는 고각 방향으로 넓게 분포되었는지에 따라 재밍 제원을 불필요하게 소모하지 않고 효과적으로 사용할 수 있기 때문이다.

3-3 시뮬레이션과 측정결과 비교

시뮬레이션은 채널 간의 진폭/위상오차가 없는 이상적

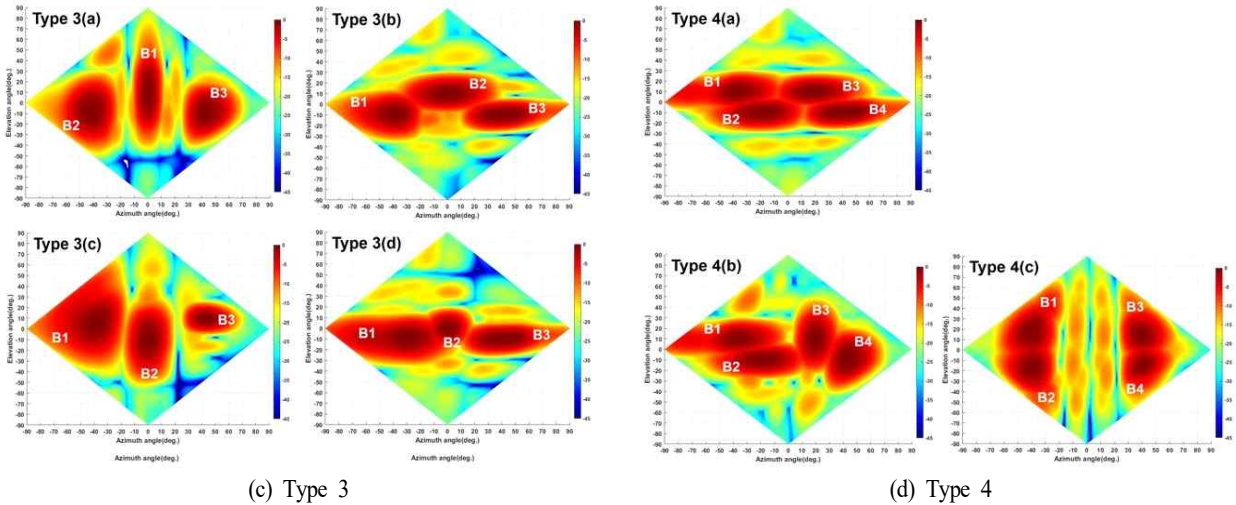
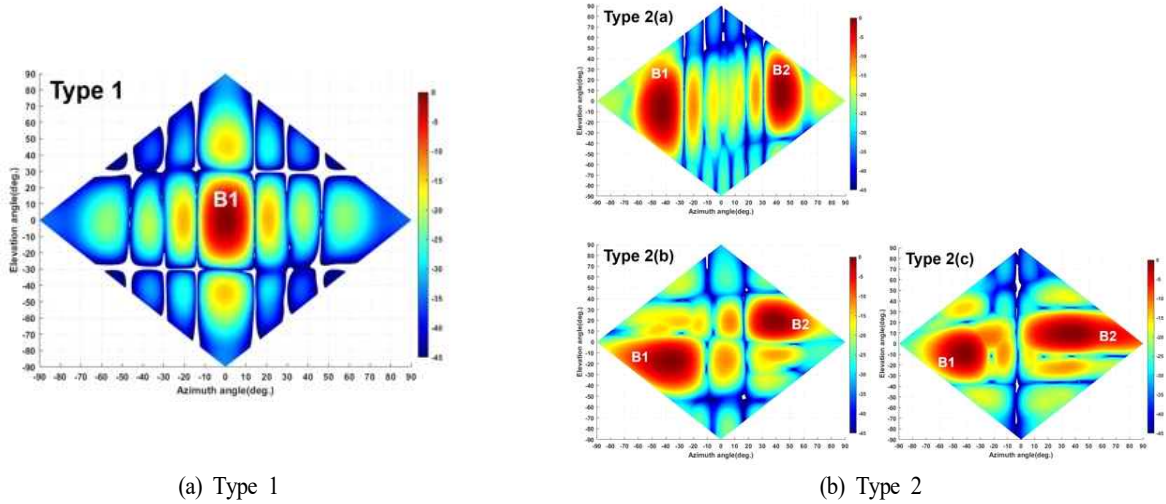


그림 9. 다중빔 시뮬레이션 결과
 Fig. 9. Simulation results of multibeam.

인 상태로 수행된 반면, 측정결과는 시스템 경로(그림 3의 신호발생모듈부터 송신모듈까지) 모든 채널을 보정한 후, 실제 채널 간 진폭/위상오차가 적용된 상태이다. 그럼에도 불구하고 그림 9의 시뮬레이션 결과와 그림 10의 측정결과를 비교해 보면, 빔패턴, 조향각, 빔폭 등이 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 이 비교 결과로부터 수행한 시뮬레이션 방법의 타당성을 검증할 수 있고, 구현된 실제 시스템이 이론치와 거의 동일할 만큼 잘 설계되었음을 입증할 수 있다.

향후 유사한 시스템 설계에서 본 연구에서와 동일한 방법

으로 시뮬레이션을 수행한다면 시스템 설계에서 발생할 수 있는 시행착오를 상당 부분 제거할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 연구에서 시뮬레이션과 측정결과가 매우 잘 일치함을 확인하였다. 이로부터 우리가 수행한 시뮬레이션 방법을 통해 시스템 구현 전에 비교적 정확한 최종 성능 예측이 가능함을 확인할 수 있었다. 한편, 제안한 바와 같이 1개부터 4개까지의 서로 다른 주파수 신호가 11가지 경우의 분

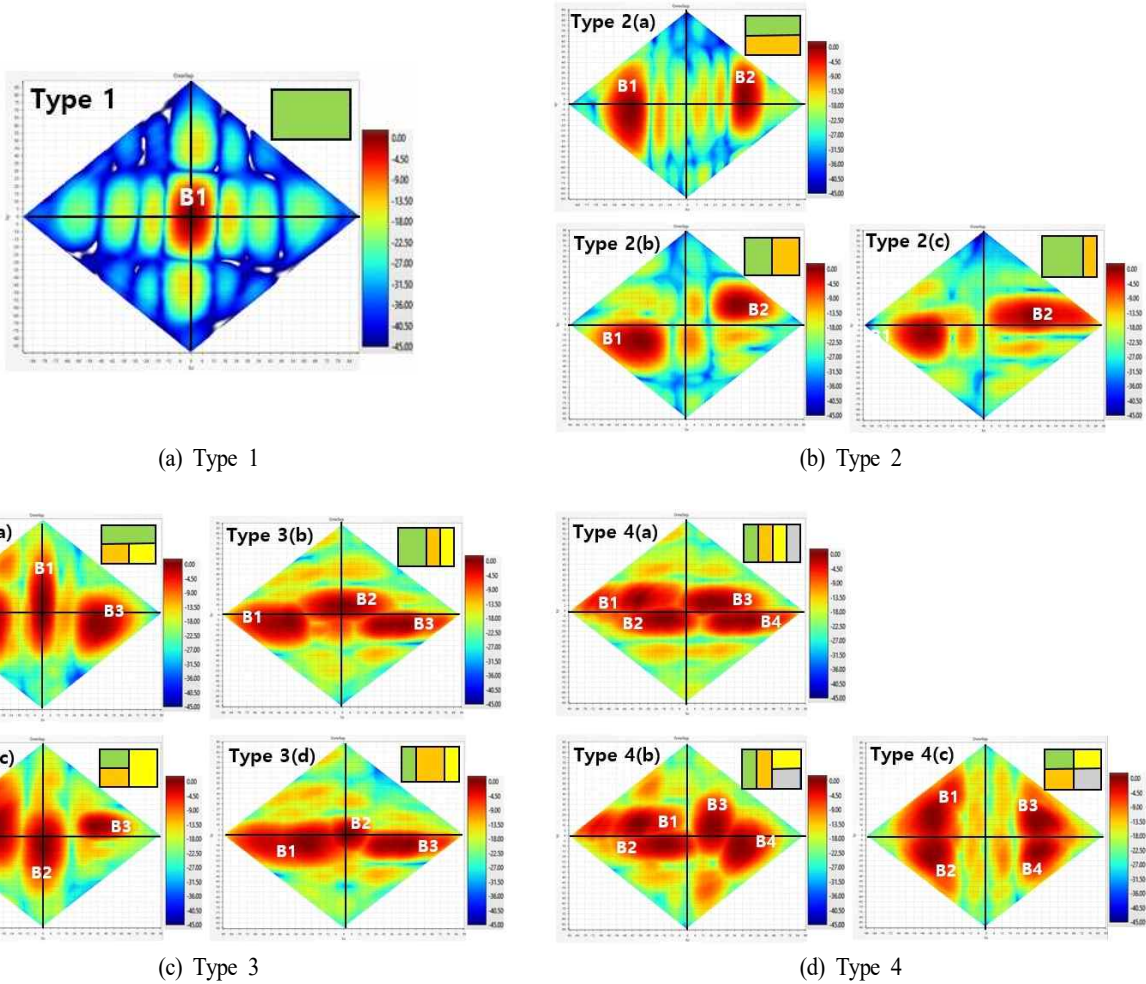


그림 10. 다중빔 측정 결과
 Fig. 10. Measured results of multibeam.

할 개구면을 통해 서로 다른 방향으로 조향됨을 시험결과로 확인하였다. 또한 분할된 개구면의 형태에 따라 제한된 범위에서 빙폭을 가변할 수 있음도 검증하였다. 이상의 결과로부터 우리가 제안한 스위치 매트릭스를 이용한 하이브리드 멀티빔 형성 구조가 타당함을 검증할 수 있었다.

본 기술은 서로 다른 제원을 갖고 여러 방향에서 접근하는 적 전자파 위협에 대한 재밍 송신에 매우 적합할 것으로 예상된다. 특히, 최근 큰 이슈가 되고 있는 드론의 다양한 위성항법시스템(GPS, beidou, glonass, galileo) 신호를 동시에 대응할 수 있는 드론 재밍 시스템에 매우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] D. C. Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, Norwood, MA, Artech House, 1999.
- [2] F. Neri, *Introduction to Electronic Defense Systems*, Norwood, MA, Artech House, 1991.
- [3] E. J. Chrzanowski, *Activ Radar Electronic Countermeasures*, Norwood, MA, Artech House, 1990.
- [4] D. I. Lialios, N. Ntetsikas, K. D. Paschaloudis, C. L. Zekios, S. V. Georgakopoulos, and G. A. Kyriacou, "Design of true time delay millimeter wave beamformers for 5G multibeam phased arrays," *Electronics*, vol. 9, no.

- 8, p. 1331, Aug. 2020.
- [5] A. Darvazehban, O. Manoochchri, M. A. Salari, P. Dehkhoda, and A. Tavakoli, "Ultra-wideband scanning antenna array with Rotman lens," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 9, pp. 3435-3442, Sep. 2017.
- [6] S. E. Ershadi, A. Keshtkar, A. Bayat, A. H. Abdelrahman, and H. Xin, "Rotman lens design and optimization for 5G applications," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 10, no. 9, pp. 1048-1057, Jun. 2018.
- [7] A. Bembarka, L. Setti, A. Tribak, H. Tizyi, and M. El Ouahabi, "A novel wideband beamforming antenna for 5G applications by eliminating the phase shifters and crossovers from the butler matrix," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 133, pp. 51-63, May 2023.
- [8] V. K. Parikh, P. T. Balsara, and O. E. Eliezer, "A fully digital architecture for wideband wireless transmitters," in *2008 IEEE Radio and Wireless Symposium*, Orlando, FL, Jan. 2008, p. 147.
- [9] Y. Yu, W. Hong, Z. H. Jiang, H. Zhang, and C. Guo, "Multibeam generation and measurement of a DDS-based digital beamforming array transmitter," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 5, pp. 3030-3039, May 2019.
- [10] S. Jang, R. Lu, J. Jeong, and M. P. Flynn, "A 1-GHz 16-element four-beam true-time-delay digital beamformer," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 54, no. 5, pp. 1304-1314, May 2019.
- [11] S. B Venkatakrishnan, D. K. Papantonis, A. A. Akhiyat, E. A. Alwan, and J. L. Volakis, "Experimental validation of on-site coding digital beamformer with ultra-wideband antenna arrays," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 11, pp. 4408-4417, Nov. 2017.
- [12] S. Payami, M. Ghorashi, and M. Dianati, "Hybrid beamforming for large antenna arrays with phase shifter selection," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 7258-7271, Nov. 2016.
- [13] C. Han, L. Yan, and J. Yuan, "Hybrid beamforming for terahertz wireless communications: Challenges, architectures, and open problems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 28, no. 4, pp. 198-204, Aug. 2021.
- [14] Z. Wang, Z. Huang, "A microwave/millimeter wave dual-band shared aperture patch antenna array," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 218585-218591, Nov. 2020.
- [15] X. Huang, Y. J. Guo, and J. D. Bunton, "A hybrid adaptive antenna array," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 5, pp. 1770-1779, May 2010.
- [16] J. A. Zhang, X. Huang, V. Dyadyuk, and Y. J. Guo, "Massive hybrid antenna array for millimeter-wave cellular communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 79-87, Feb. 2015.
- [17] V. K. Kothapudi, V. Kumar, "Hybrid-fed shared aperture antenna array for X/K-band airborne synthetic aperture radar applications," *IEEE Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 15, no. 1, pp. 93-102, Dec. 2020.
- [18] G. Kwon, J. Y. Park, D. H. Kim, and K. C. Hwang, "Optimization of a shared-aperture dual-band transmitting/receiving array antenna for radar applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 7038-7051, Dec. 2017.
- [19] Y. R. Ding, Y. J. Cheng, J. X. Sun, L. Wang, and T. J. Li, "Dual-band shared-aperture two-dimensional phased array antenna with wide bandwidth of 25.0% and 11.4% at Ku- and Ka-band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 9, pp. 7468-7477, Sep. 2022.
- [20] S. Wang, H. Kim, D. Kim, and H. Choo, "Multi-band array antenna sharing a common aperture with heterogeneous array elements," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 18, p. 9348, Sep. 2022.
- [21] J. Park, D. Jang, H. Choo, and S. Wang, "Design of a dual-band share-aperture array antenna composed of array elements with high electromagnetic transparency," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 137533-137541, Jul. 2024.
- [22] A. Askarian, K. Wu, "Aperture-shared radiation surface: A promising technique for multifunctional antenna array development," *Electromagnetic Science*, vol. 1, no. 3, p. 0030082, Sep. 2023.
- [23] J. Xu, C. J. Guo, and J. Ding, "Compact tri-band dual-polarized shared aperture array," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 104, pp. 101-110, Aug. 2021.

김 인 선 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6972-4128>



1995년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학석사)
2005년 8월: 순천향대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 2월~현재: 국방과학연구소 수석

연구원

[주 관심분야] 전자전용 송수신기 설계, RF 소자 설계

박 주 래 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0000-7192-6490>



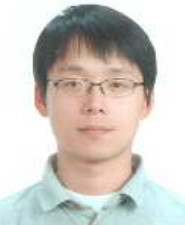
1991년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2015년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1993년 3월~현재: 국방과학연구소 수석

연구원

[주 관심분야] 광대역 고출력 송신기, 광대역 빔조향 소자

유 흥 균 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-3835-257X>



2005년 2월: 목원대학교 정보통신전파공학과 (공학사)
2007년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2012년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
2012년 10월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 전자전용 광대역 안테나 설계

김 기 백 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-4374-7787>



1989년 2월: 충북대학교 전산기공학과 (공학사)
1991년 2월: 충북대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학석사)
2011년 8월: 아주대학교 대학원 시스템공학과 (공학박사)
1991년 3월~현재: 국방과학연구소 수석

연구원

[주 관심분야] 전자전 제밍기법, 제밍소프트웨어, 제밍시스템

이 철 수 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2135-5962>



1990년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
1992년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
2016년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1992년 3월~현재: 국방과학연구소 수석

연구원

[주 관심분야] 전자전용 광대역 위상배열 안테나, 고출력 송수신기