

두 패치의 위상 차이를 기반으로 빔 조향 기능을 구현한 주파수 가변 안테나

Frequency Tunable Antenna with Beam Steering Function Based on the Phase Difference between Two Patches

조 영 진 · 성 영 제

Young-Jin Cho · Young-Je Sung

요 약

본 논문에서는 빔 조향과 동작주파수 조절이 동시에 가능한 2요소 배열 안테나를 제안한다. 각 단일요소는 패치 안테나와 좁은 폭의 I 자형 스텐드로 구성되며, 그 사이에 두 개의 버랙터(varactor) 다이오드가 배치된다. 두 패치에 적용된 버랙터의 등가 정전용량 값을 달리하여 두 패치 간의 위상차를 구현하여, $\pm 15^\circ$ 의 범위 내에서 연속적인 빔조향이 가능하였다. 추가적으로 패치 안테나와 스텐드 간의 등가 정전용량 값에 따라 안테나의 공진주파수를 조절할 수 있었다. 측정 결과로부터 제안된 안테나는 5.28 % (2.95~3.15 GHz) 사용 대역폭에서 30° 의 연속적인 빔 조향을 보였다.

Abstract

This study proposed a two-element array antenna capable of beam steering and operating frequency adjustment. Each element comprised a patch antenna and narrow-width I-shaped stub, with two varactor diodes placed between them. A phase difference was achieved by varying the equivalent capacitance values of the varactors applied to the two patches. This enabled continuous beam steering within the range of $\pm 15^\circ$. Additionally, the resonant frequencies of the antenna could be adjusted depending on the equivalent capacitance values between the patch antenna and stub. From the measurement results, the proposed antenna showed continuous beam steering of 30° in the 5.28% (2.95~3.15 GHz) usable bandwidth.

Key words: Beam Steering, Frequency Tunable Antenna, Pattern Reconfigurable Antenna

I. 서 론

최근 이동통신 및 위성 통신을 포함한 무선통신 분야의 발전으로 다양한 기능을 갖춘 안테나의 수요가 증가하고 있다. 패턴 재구성 안테나는 안테나의 기계적 조작

없이 빔 방향을 재구성할 수 있기에 주목받고 있다^[1].

빔 조향은 여러 방식으로 구현될 수 있다. 한 방법은 안테나의 급전 위치를 선택하기 위해 급전 위치를 변환할 수 있도록 설계하는 것이다^[2]. 또 다른 방법은 위상 배열을 사용하는 것이다. 위상 배열에서는 안테나 요소를

「본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발의 지원을 받아 수행되었음(과제번호: 20017411).」

경기대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kyonggi University)

· Manuscript received July 11, 2025 ; Revised July 28, 2025 ; Accepted August 1, 2025. (ID No. 20250711-066)

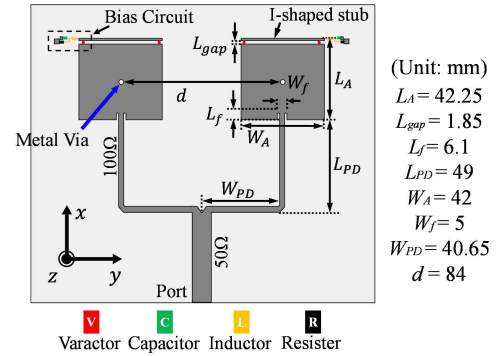
· Corresponding Author: Young-Je Sung (e-mail: yjsung@kgu.ac.kr)

배열하고, 각 요소에 위상차를 부여하여 빔을 제어한다. 위상차는 다른 길이의 전송선로를 택하는 방식의 위상 천이기(phase shifter)를 사용하거나 PIN 다이오드, 버렉터 다이오드 등의 수동 소자를 통해 안테나의 크기를 전기적으로 조정함으로써 달성될 수 있다. PIN 다이오드가 있는 구조는 선택적으로 몇 개 방향의 고정된 빔만 선택할 수 있다는 제한이 있다. 반대로, 버렉터 다이오드가 RF 스위치로 사용되는 경우, 빔의 조향각은 연속적으로 구현될 수 있다. 패치의 전기적 길이를 변경하기 위해 버렉터를 사용하여 개별 패치의 공진 주파수를 조절함으로써 빔 조향을 가능하게 한 연구도 보고되었다^[3]. 또한, 빔 조향을 위해 전자적으로 조향 가능한 기생 배열 방사체(ESPAR) 구조를 활용한 사례도 있다^[4].

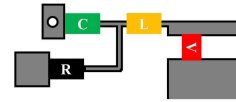
본 논문에서는 복잡한 급전 구조나 위상 천이기 없이 버렉터 다이오드를 사용하여 두 패치 간의 위상차를 기반으로 패턴 재구성이 가능하고 주파수 조절이 가능한 안테나를 제안한다. 각 안테나 요소의 버렉터 다이오드에 서로 다른 역전압을 인가하면 두 패치 간의 정전용량 차이 ΔC 가 발생하고 두 요소 간에 위상차 $\Delta\phi$ 가 발생한다. 빔 조향을 구현하기 위해 안테나 요소 간에 점진적인 위상차를 발생시켜 공진 주파수 차이를 유도하여 방사 패턴의 기울기를 발생시킨다^[3].

II. 안테나 구성

본 논문에서 제안한 안테나 구조는 그림 1과 같다. 유전율 2.2, 손실 탄젠트 0.0009의 TLY-05 기판 위에 제작되었다. 제안된 구조는 2개의 패치 안테나 소자를 가진 배열 안테나로 구성되었으며, 각각은 2개의 버렉터 다이오드에 연결된 I 자형 스티브를 포함한다. 각 소자 상단의 2개의 버렉터 다이오드(SMV1276-079LF)에 바이어스 전압을 인가하기 위한 2개의 독립적인 바이어스 회로를 I 자형 스티브에 연결하였다. 패치의 중심에는 DC 접지를 위한 단락 편이 위치하였으며, 이는 안테나 성능에 미치는 영향을 최소화하기 위해 선택되었다. 바이어스 회로는 큰 저항($R=18\text{ k}\Omega$), RF 초크 역할을 하는 인덕터($L=100\text{ nH}$), 바이패스 커패시터($C=39\text{ pF}$)를 포함하였다. 각 소자에서 버렉터 다이오드에 인가되는 전압의 점진적인 변화



(a) 제안된 안테나 구조도와 설계 파라미터
(a) Proposed antenna structure and design parameters



(b) 적용된 바이어스 회로의 확대도
(b) Magnified view of the applied bias circuit

그림 1. 제안된 안테나 구조 레이아웃
Fig. 1. Layout of proposed antenna structure.

는 패치의 전기적 길이에 점진적인 변화를 유도하여 패치 간에 연속적인 위상 차이 $\Delta\phi$ 를 발생시킨다. 결과적으로 $\Delta\phi$ 는 방사 패턴과 주파수를 변화시킬 수 있다. 위상 차이($\Delta\phi$)는 왼쪽 패치와 오른쪽 패치 사이에 발생한 전기장의 상대적인 위상 이동을 나타내며, 왼쪽 패치가 기준점이 된다. 식 (1)을 이용하여 패치의 편파 방향을 고려하여 전기장 위상 ϕ 를 계산하였다.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\vec{E} \times \vec{x})}{\text{Re}(\vec{E} \times \vec{x})} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

각 패치에 동일한 바이어스 전압을 인가하면 브로드사이드 패턴이 생성되는 반면, 1.2~2.5 V의 역바이어스 전압은 yoz 평면에서 패치 방향으로 빔 조향을 발생시켰다. 이때 발생하는 조향의 범위는 $\pm 15^\circ$ 까지였으며, 패치 사이에 인가되는 역바이어스 전압의 크기에 따라 연속적으로 변화하였다. 빔 조향을 위한 동작 주파수는 2.9~3.15 GHz 사이였다. 표 1에서 다른 결과물들과의 성능을 비교하였다^{[2]-[5]}. 여기서 다른 결과물들은 참고 문헌에서 제안된 안테나를 의미하며 주파수 가변성, 안테나 이득, 사용된 RF 스위치 개수, 연속적인 빔 조향, 회전 가능한 각도 그리고

표 1. 제안된 안테나의 성능과 기존 문헌에서의 성능 비교

Table 1. Comparison with previous antennas' performance.

Ref.	Freq. (GHz)	Gain peak (dBi)	RF Switch/Num. of switches	Continues steering / Num. of modes	Steering angle	Size ($\lambda_0 \times \lambda_0$)
[2]	2.45	6.15	P/2	N.A./3	-30, 0, 30	1×2
[3]	2.15~2.38	7~8.4	V/2	O	-23/23	1.16×1.24
[4]	2.4	6.3~8.8	V/4	O	-26/29	1.92×1.04
[5]	2.45	6.5	P/4	N.A./3	-30, 0, 24	r=0.28
This work	2.95~3.15	6~9.57	V/4	O	-15/15	0.92×1.25

P: PIN diode, V: Varactor diode, r: radius.

안테나의 크기 측면에서 비교하였으며 전체적인 비교에서 본 논문에서 제안한 안테나는 비교 결과 종합적인 측면에서 훌륭하게 경쟁력이 있음을 확인할 수 있었다.

III. 안테나 분석 및 최적화

두 패치의 벡터의 등가 정전용량을 다르게 적용함에 따라 그림 2와 같이 두 패치 간의 공진주파수와 위상차가 변화하였다. 'left cap.'은 왼쪽 패치에서 두 개의 벡터를 의미하는 반면, 'right cap.'은 오른쪽 패치에서 두 개의 벡터를 의미한다. 만약 왼쪽 벡터와 오른쪽 벡터의 정전용량 값이 동일하다면 패치 간의 전기적 길이는 동일하다. 따라서 패치 간의 위상차 $\Delta\phi$ 는 0° 이므로 위상차가 없다. 왼쪽 패치의 정전용량 값이 오른쪽 패치의 정전

용량 값보다 작아지면 $\Delta\phi$ 는 음의 방향으로 변화한다. 반대로 왼쪽 패치의 정전용량 값이 오른쪽 패치보다 커지면 $\Delta\phi$ 는 양의 방향으로 변화한다. 이러한 변화는 더 작은 정전용량을 가진 패치의 방향으로 빔의 기울어짐을 초래한다. 본 논문에서 사용된 벡터로 구현할 수 있는 정전용량 범위를 고려하여 시뮬레이션을 진행하였으나 정전용량 값이 고려된 값보다 큰 경우에도 그림 2와 같은 경향성을 유지하였다. 왼쪽 패치의 벡터의 정전용량 값을 6.85 pF로 고정하고 오른쪽 패치의 벡터의 커패시턴스 값을 각각 6.85, 4.5, 3.14 pF로 변경하면 두 패치 안테나 간의 위상차는 각각 0° , 45° , 90° 이다.

그림 3은 시뮬레이션한 방사 패턴과 반사 계수를 보여준다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 패치 간의 위상차가 커짐에 따라 빔도 더 크게 조향됨을 알 수 있다. θ 는 각도, λ

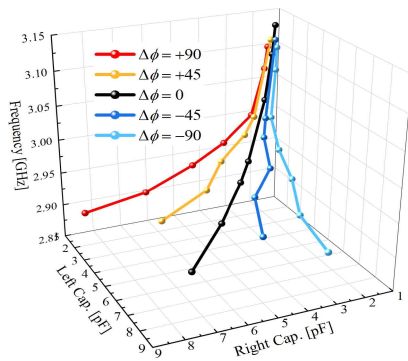
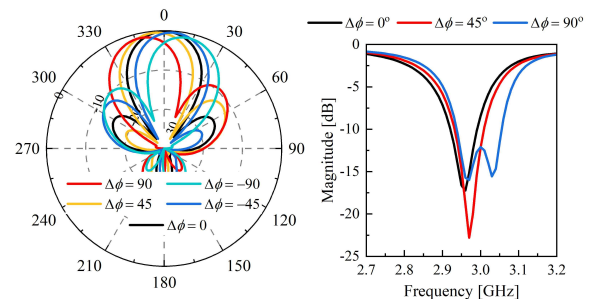


그림 2. 좌우 등가 정전용량에 따른 위상차 및 주파수 변화 그래프

Fig. 2. Phase difference and operating frequency with different left and right equivalent capacitance.



(a) 빔 조향이 나타난 방사 패턴
(a) Radiation pattern showing beam steering

(b) S_{11} 그래프
(b) S_{11} graph

그림 3. 두 패치의 위상차에 따른 성능 변화

Fig. 3. Performance depending on phase difference between two patches.

는 파장의 길이, d 는 두 패치 간의 거리, f 는 주파수, C 는 광속이다. d 가 84 mm이고 f 가 2.97 GHz일 때 (2): $\Delta\Phi = 100^\circ$ 에서 19.5° , $\Delta\Phi = 90^\circ$ 에서 17.5° , $\Delta\Phi = 45^\circ$ 에서 8.6° 를 사용하여 최대 조향각을 계산할 수 있다. 시뮬레이션 결과 두 패치 간의 위상차가 100° 일 때 메인 빔의 방향은 17° , 위상차가 90° , 45° 일 때 메인 빔의 방향은 각각 15° , 6° 이었다. 시뮬레이션을 통해 얻은 빔 조향의 최대값은 식 (2)에서 얻은 값보다 2.5° 낮았다. 동일한 역 바이어스 전압 조건에서도 주파수의 변화에 따라 두 패치 간의 위상차는 변화한다. 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 위상차가 커짐에 따라 두 패치의 공진 주파수는 더 멀어지게 되었다.

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\Phi\lambda}{360d}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\Phi c}{360fd}\right) \quad (2)$$

그림 4는 좌측 정전용량이 6.8 pF, 우측 정전용량이 3.1 pF인 제한된 안테나의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

2.95 GHz에서 두 안테나의 위상차는 -92.74° , 빔 방향은 15° 이다. 주파수가 2.95 GHz에서 멀어짐에 따라 두 안테나의 위상차가 감소하여 빔이 점차 왼쪽으로 이동한다.

그림 5는 두 패치 사이의 거리에 따른 방사 패턴과 반사 계수를 보여준다. 시뮬레이션은 left cap.=3.16pF와 right cap.=6.85 pF 조건에서 진행하였다. 방사 패턴은 반사 계수 그래프에서 원으로 표시된 주파수인 3 GHz를 기준으로 시뮬레이션되었다. 식 (2)에서 최대 조향 가능 빔 각도 θ 는 패치 사이의 거리 d 에 따라 달라진다. 두 패치 사이의 위상 차이가 90° 와 d 가 58 mm일 때 $\theta=25.53^\circ$, $d=84$ mm일 때 $\theta=17.31^\circ$, d 가 110 mm일 때 $\theta=13.14^\circ$ 이었다. HFSS로 시뮬레이션한 결과는 $d=58$ mm일 때 $\theta=20^\circ$,

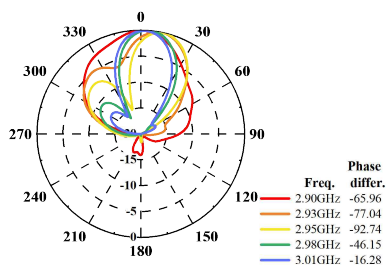


그림 4. 주파수에 따른 위상 변화와 방사 패턴 그래프
 Fig. 4. Phase shift and radiation pattern graph according to frequency.

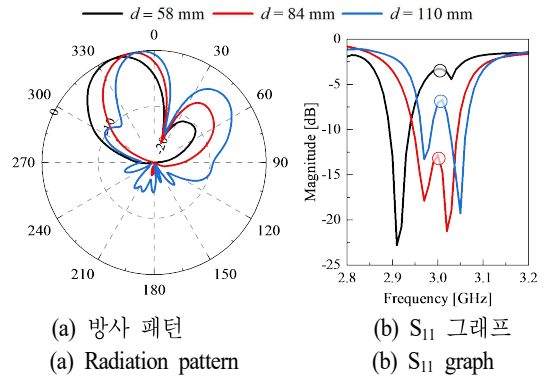


그림 5. 두 패치 간 거리 d 에 따른 성능 변화
 Fig. 5. Performance depending on the distance d between two patches.

$d=84$ mm일 때 $\theta=15^\circ$, $d=110$ mm일 때 $\theta=12^\circ$ 이었다. $d=58$ mm의 경우 최대 가능 조향각이 크고 패치 사이의 거리가 짧았지만 반사 계수의 품질이 -3.7 dB로 좋지 않았다. 적절한 반사 계수와 조향각을 고려하여 패치 사이의 거리 d 는 84 mm로 결정하였다.

그림 6은 L_{gap} 에 따른 방사 패턴의 null 깊이와 빔 조향 각도 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. Left cap.=3.16 pF와 right cap.=6.85 pF를 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 빔의 각도와 null의 깊이는 반비례하였다. L_{gap} 의 길이가 2.25 mm를 넘어서 증가할 때 두 패치의 공진 주파수 사이의 디튜닝 정도는 감소하였다. 두 패치 사이의 위상차가 감소하였기 때문에 빔 조향과 null 깊이는 감소하였다. Null 깊이와 조향각이 크기 때문에 패치와 스

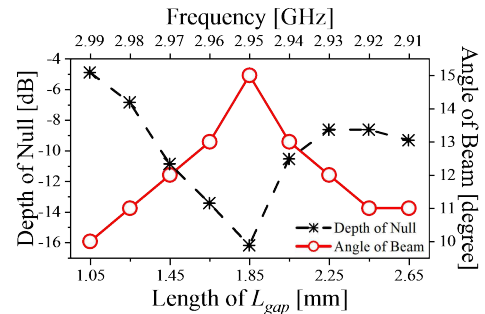


그림 6. L_{gap} 에 따른 빔 조향 각도 및 null 깊이 변화
 Fig. 6. Beam steering angle and depth of null according to L_{gap} .

터브 사이의 거리인 L_{gap} 은 1.85 mm로 결정되었다.

IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

본 논문에서 제안한 안테나의 성능을 검증하기 위해 실제로 프로토타입 안테나를 제작하였으며, 사진을 그림 7에서 확인할 수 있다.

4.1 반사계수

표 2에는 인가된 역바이어스 전압에 따른 등가 정전용량이 정리되어 있다. 그림 8은 서로 다른 바이어스 조건에서 제안된 안테나의 S_{11} 시뮬레이션 및 측정 결과를 보여준다. 그림 8(a)는 -10 dB 이하의 반사 계수 지점을 중심으로, 최대 빔 조향 주파수(동그라미)와 빔 조향이 가능한 대역(음영 영역)을 나타낸다. 그림 8(b)는 두 공진 주파수가 일치하는 조건에서 측정된 반사 계수를 보여주며, 최대 조향 시와 비조향 시의 동작 대역폭이 일치함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션과 측정 결과는 전반적으로 잘 일치하였다. 그림 8(a)의 검은색 곡선은 좌측 패치의 버랙

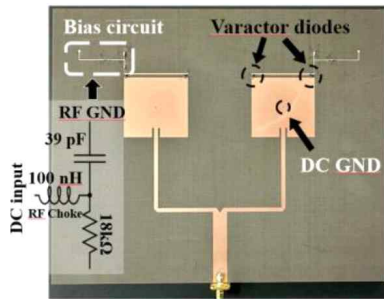


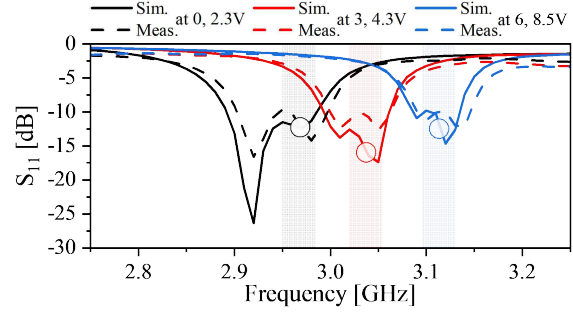
그림 7. 실제 제작된 안테나 사진

Fig. 7. Photograph of fabricated prototype antenna.

표 2. 역바이어스에 따른 정전 용량과 동작 주파수

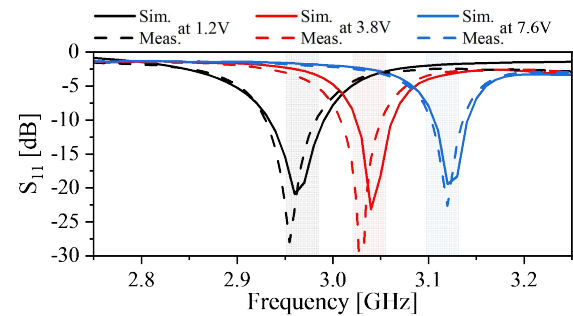
Table 2. Equivalent capacitance of varactor and operating frequency components with reverse bias.

Voltage (V)	0	2.3	3	4.3	6	8.5
Capacitance (pF)	6.85	3.16	2.47	1.93	1.55	1.35
Voltage (V)	1.2	3.8	7.6			
Capacitance (pF)	4	2.1	1.4			
Frequency (GHz)	2.95	3.03	3.13			



(a) 빔의 최대 조향이 이뤄졌을 때의 반사 계수

(a) Reflection coefficient when maximum beam steering is achieved



(b) 빔의 조향이 이뤄지지 않았을 때의 반사 계수

(b) Reflection coefficient when no beam steering is achieved

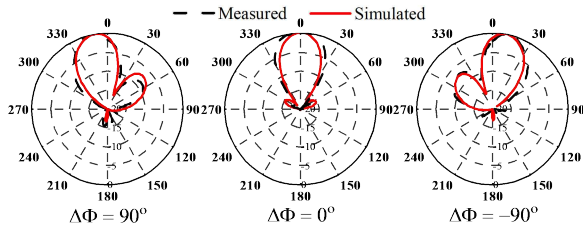
그림 8. 반사 계수 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 8. Simulation and measurement results of reflection coefficient.

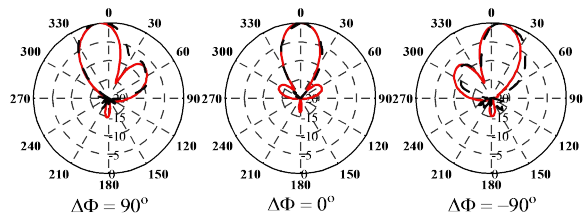
터 다이오드에 0 V, 우측에 2.3 V를 인가한 경우이며, 전압 증가에 따라 정전용량이 감소하면서 공진 주파수가 증가하였다. 제안된 안테나는 2.95~3.13 GHz에서 5.28 %의 가변 대역폭을 보였다.

4.2 방사 패턴

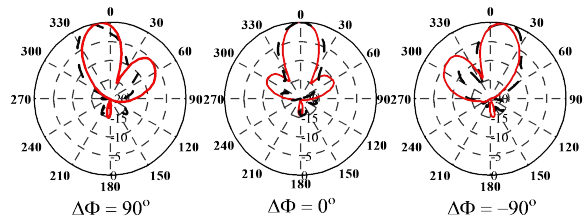
그림 9는 그림 8에서 음영 처리한 대역폭 중 최대 조향이 발생하는 주파수인 2.95, 3.01, 3.13 GHz에서 측정된 방사 패턴을 나타낸다. 각 주파수에서 각각 15°, 14°, 17°의 빔 조향각이 달성되었다. 두 안테나 요소 간 위상차가 0°일 때 브로드사이드 빔 패턴이 관찰되었으며, $\pm 90^\circ$ 의 위상 차에서는 메인 빔이 평균 약 $\pm 15^\circ$, null은 $\mp 40^\circ$ 방향으



(a) 2.95 GHz에서 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴
(a) Simulated and measured radiation pattern at 2.95 GHz



(b) 3.03 GHz에서 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴
(b) Simulated and measured radiation pattern at 3.03 GHz



(c) 3.13 GHz에서 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴
(c) Simulated and measured radiation pattern at 3.13 GHz

그림 9. 제안된 안테나의 정규화된 방사 패턴 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 9. Normalized radiation pattern simulation and measurement results of the proposed antenna.

로 조향되었다. 빔이 최대로 기울어진 경우, 주파수에 따라 7.7~9.01 dBi의 최대 이득을 보였으며, 빔이 기울어지지 않은 경우에는 8.27~9.74 dBi의 최대 이득을 나타냈다. 이는 제안된 구조가 주파수 및 빔 조향 조건에 관계없이 안정적인 이득 특성을 제공함을 보여준다. 그림 8 및 그림 9의 측정 결과를 바탕으로, 본 논문에서는 5.28 % 대역폭 내에서 $\pm 15^\circ$ 의 빔 조향 특성을 유지할 수 있는 안테나가 구현되었음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 빔 조향 기능을 갖는 주파수 가변 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 5.28 % (2.95~3.15 GHz)의 가용 대역폭에서 $\pm 15^\circ$ 의 연속 빔 조향이 가능하다. 패턴의 null은 메인 빔이 $\pm 15^\circ$ 로 최대 조향 될 때 $\mp 23^\circ$ 부근에서 발생하며, $23^\circ \sim 40^\circ$ 또는 $-40^\circ \sim -23^\circ$ 사이에서 연속 조향이 가능하다. 패치 간 최대 위상 차이는 주파수에 따라 $87.85^\circ \sim 99.96^\circ$, $-101.38^\circ \sim -87.07^\circ$ 로 나타났다. 제안된 안테나는 빔 조향 기술이 필요한 LEO 위성 및 UAV 통신에 적용 가능하다.

References

- [1] M. Hwang, G. Kim, S. Kim, and J. Kim, "Miniaturized unit cell design and verification of multi-functional transmissive meta-surface for S-band radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 1, pp. 12-19, Jan. 2022.
- [2] S. J. Ha, C. W. Jung, "Reconfigurable beam steering using a microstrip patch antenna with a U-slot for wearable fabric applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1228-1231, Oct. 2011.
- [3] S. N. M. Zainarry, N. Nguyen-Trong, and C. Fumeaux, "A frequency- and pattern-reconfigurable two-element array antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 617-620, Apr. 2018.
- [4] H. Y. Xie, B. Wu, Y. M. Yang, Y. L. Xin, L. Q. Ding, and T. Su, "E-plane beam-steerable patch array with enhanced directivity using nonradiating resonator," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 1, pp. 279-283, Jan. 2024.
- [5] B. Ban, Z. Cheng, and S. L. Chen, "Center-fed shorting-via-loaded circular patch antenna with reconfigurable polarization and switchable beam," in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, Hangzhou, Dec. 2018, pp. 1-3.

두 패치의 위상 차이를 기반으로 빔 조향 기능을 구현한 주파수 가변 안테나

조 영 진 [경기대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-5446-4999>



2024년 2월: 경기대학교 전자공학과 (공학사)

2024년 9월~현재: 경기대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 재구성 안테나, 광대역 슬롯 안테나, 대역통과 필터

성 영 제 [경기대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-9310-7450>



2000년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)

2002년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)

2005년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)

2005년 3월~2007년 2월: 삼성전자 무선사업부 안테나개발팀 책임연구원

2008년 3월~현재: 경기대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 재구성 안테나, 원형편파 안테나, 광대역 슬롯 안테나