

액정 폴리머 기판을 적용한 28 GHz 차단대역 및 향상된 전후방비 특성을 갖는 Ka 대역 테이퍼드 슬롯 안테나

Tapered Slot Antenna with 28 GHz Band-Stop and Enhanced Front-Back Ratio Characteristics Applied to a Liquid Crystal Polymer Substrate for Ka-Band

이지연 · 최세환 · 유종인 · 이재영

Jiyeon Lee · Sehwan Choi · Jongin Ryu · Jaeyoung Lee

요약

본 논문에서는 Ka 대역에서 차단대역 특성을 갖는 테이퍼드 슬롯 안테나를 제안하고, 이를 설계 및 측정하였다. 초소형 레이더 송수신모듈에 적용하기 위해 4층 구조의 150 μm 두께를 갖는 액정 폴리머 기판을 사용하였다. 5G통신에 사용되는 28 GHz 대역의 수신을 차단하기 위해 피드라인에 SRR 구조를 추가하였으며, 이득 향상과 부엽 감소를 위해 안테나 복사체 양단에 corrugation 구조를 형성하였다. 이러한 구조를 적용하여, 제안된 안테나는 28 GHz에서 반사계수 1.8 dB로 측정되어 차단대역이 형성됨을 확인하였으며, 시뮬레이션 결과로 35 GHz에서 전후방비를 14.0 dB에서 21.1 dB로 향상시켰고, 방사 이득은 11.6 dBi로 측정되었다.

Abstract

In this study, a tapered slot antenna with a band-stop characteristic in the Ka-band is proposed and measured. A 4-layer liquid crystal polymer substrate with a thickness of 150 μm was used to implement the same substrate as a radar transmit-receive module. To stop the 28 GHz band used for 5G communication, a split ring resonator structure is added to the feed line and corrugations are formed on both sides of the antenna. Through these structures, the proposed antenna has a 28 GHz band-stop with a measured 1.8 dB return loss. In addition, the front-back ratio increases from 14.0 dB to 21.1 dB for the simulated results, and the measured radiation gain is 11.6 dBi.

Key words: TSA, LCP, Corrugation, SRR, Band-Stop

I. 서론

테이퍼드 슬롯 안테나(tapered slot antenna, TSA)는 넓은 주파수 응답과 엔드파이어 방사패턴을 가지며 높은 이득 특성으로 인해 UWB 통신, X 대역 군사용 레이더,

영상의학 분야에 사용되고 있다^{[1][2]}. 특히 군용으로 Ka 대역과 같은 밀리미터파 대역에서는 RCS(radar cross-section) 값을 높일 수 있기 때문에 미사일 탐색기에 적용하기도 한다.

밀리미터파대역의 레이더 시스템에서 TSA는 진행파

「본 연구는 민·군기술협력사업 (18-CM-SS-10), 초소형 레이더용 TRM을 위한 다층액정폴리머 회로기술 개발 과제의 연구결과로 수행되었습니다. 한국전자기술연구원 (Korea Electronics Technology Institute: KETI)

· Manuscript received September 28, 2020 ; Revised October 25, 2020 ; Accepted December 18, 2020. (ID No. 20200928-084)

· Corresponding Author: Sehwan Choi (e-mail: shchoi@keti.re.kr)

형태로 동작하여 광대역 주파수 특성을 갖기 때문에, 협대역 주파수 특성을 갖는 패치 안테나와 같은 공진형 안테나보다 더 선호된다.

TSA의 피드라인 부분은 기본적으로 슬롯라인 형태이며, 마이크로스트립 선로와의 변환구조가 필요하다. 변환구조의 주파수 한계를 보상하여 광대역으로 동작하게 할 수 있으며, 초광대역 변환구조를 갖는 형태로는 안티포달 TSA가 있다^[3]. 이러한 TSA의 광대역 동작으로 불필요한 대역의 동작을 막기 위해 노치 구조를 이용하기도 한다.^[4]

최근 밀리미터파 주파수 대역을 사용하여 초고속통신을 제공하는 5G 서비스의 출범으로, Ka 대역에서 동작하는 광대역 안테나는 이러한 점을 고려하여 설계되어야 한다.

탐재용 레이더의 소형화 요구에 따라 송수신 모듈(transmit-receive module, TRM)의 소형화도 중요하다. 초소형 TRM 구현을 위해 밀리미터파대역에서 적층공정이 가능한 LCP 기판을 사용하여 소형화 연구가 되고 있다. LCP는 저손실과 내흡습성이 뛰어나 안정된 전기적 특성을 가지며, 제조 공정에서 별도의 접착층이 없이 LCP만으로 적층이 가능하여 밀리미터파대역 기판으로 활용하기 적합하다. 이러한 특성으로 밀리미터파 초소형 레이더와 테라헤르츠 대역, 의료기기 등에 적용되고 있다^[5].

본 논문에서 제안하는 TSA는 저손실 적층형 4층 LCP 기판 등의 복합적 기술을 적용하여 실용성을 높였다. 제안된 TSA는 Ka 대역의 35 GHz에서 동작하는 소형화된 4층 LCP 기판 TRM에 적합하고, 35 GHz에서 전후방비 특성을 향상시켰으며, 5G 통신의 간섭을 최소화하기 위해 28 GHz 차단대역을 갖는다.

II. LCP TSA 설계 및 측정

본 논문에서 제안된 TSA는 그림 1과 같은 4층 LCP 단면 구조인 TRM과 단일 기판으로 공정되므로, 50 μm 두께의 유전율 2.9인 LCP 유전체 3개를 적층한 150 μm 두께로 안테나를 설계하였다. TSA 구조상 복사체 패턴 반대편에 마이크로스트립이 가상으로 short 되는 급전 구조로, Cu 패턴을 기준으로 중간층은 사용하지 않았으며, 본 논문에서는 TSA 자체만의 설계와 측정을 고안하였다.

		Material	Thickness [μm]
Top	L4	Cu	19
		LCP	50
	L3	Cu	19
		LCP	50
	L2	Cu	19
		LCP	50
Bottom	L1	Cu	19

그림 1. 4층 LCP 기판 구조
Fig. 1. Structure of 4-layer LCP substrate.

TSA는 선형 TSA, 비발디, 페르미와 같이 테이퍼 부분의 모양에 따라 여러 가지로 설계할 수 있으며, 이에 따라서 주파수 응답과 사이드로브 레벨도 달라진다. 본 논문에서는 디자인이 용이하도록 선형 테이퍼 모양으로 설계했으며, 제안된 안테나 구성은 그림 2와 같다.

안테나 이득을 35 GHz 대역에서 10 dBi 이상으로 확보하기 위해 개구 사이즈를 약 1.4λ인 12 mm으로 설계했다. 마이크로스트립 선로로 구현된 TRM과의 연결을 위해 TSA 피드라인 부분에 부채꼴 모양의 스텔브를 이용한 광대역 변환구조가 설계되었고, 28 GHz에서 차단대역을 형성하기 위해 그림 2(c)와 같이 슬롯라인에 W_{SRR} 과 gap은 200 μm, l_1 과 l_2 는 1.1 mm, p_1 은 1.4 mm으로 SRR을 형성하였다.

그림 3은 차단대역을 구현하기 위해 슬롯라인에 형성된 SRR 개수에 따른 삽입손실 변화 시뮬레이션 결과이다. SRR 개수가 홀수인 경우에는 동작주파수인 35 GHz에서 최대 3.5 dB 손실이 발생한다. 짝수인 경우에는 1 dB 미만으로 손실이 거의 발생하지 않아, 적용에 더욱 적합하다. SRR 개수가 2개인 경우, 차단대역인 28 GHz 대역에서 손실이 15 dB 이상으로, 신호 저지 측면에서 값이 충분하므로 SRR 개수를 2개로 선택하였다.

테이퍼드 슬롯라인을 따라 전파하는 전자파는 대부분 안테나의 개구면에서 방사되지만, 일부는 도체 표면을 따라 개구 뒤편으로 흘러가게 된다. 이 때 발생한 누설 전류는 다양한 부엽과 후엽 발생의 원인이 되는데, 안테나 사이즈가 30 mm 정도로 소형화되었으므로 이와 같은 현상이 더 도드라진다. 개구 뒤편으로 흐르는 누설 전류를 줄이기 위해 그림 2(d)와 같이 corrugation의 슬롯 평균 깊이

액정 폴리머 기판을 적용한 28 GHz 차단대역 및 향상된 전후방비 특성을 갖는 Ka 대역 테이퍼드 슬롯 안테나

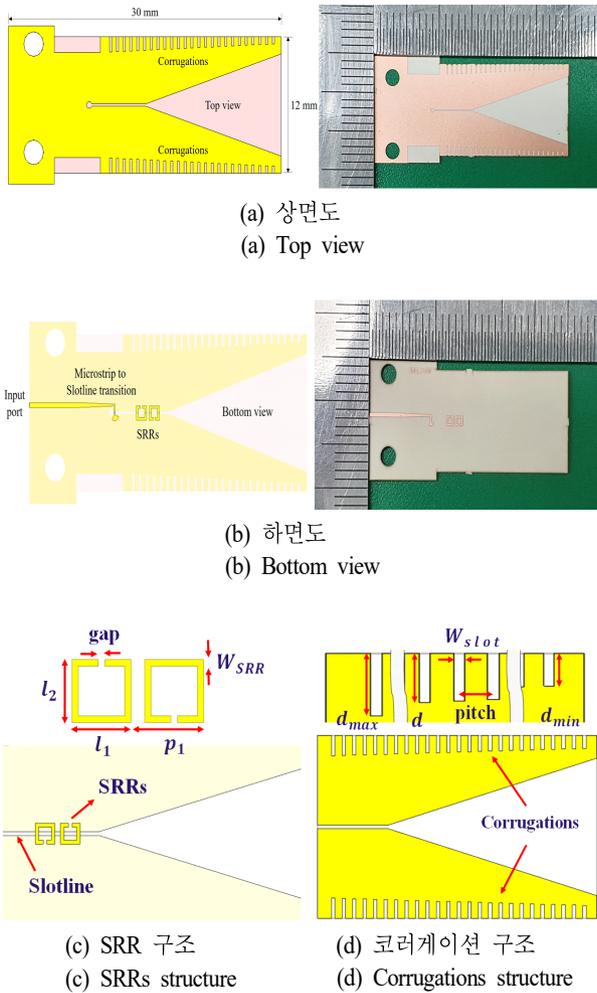


그림 2. 제안된 안테나 구성
Fig. 2. Configuration of proposed antenna.

d 를 약 $\lambda_c/4$ (λ_c : 중심주파수 35 GHz에서의 파장)인 0.98 mm로 설계하였다. 대역폭 1 GHz 이상의 광대역으로 동작하는 corrugation 구조를 위해서는 피드라인에 가까운 쪽에는 최대 깊이 d_{max} , 반대쪽에는 최소 깊이 d_{min} 으로 슬롯을 형성해야 한다. d_{max} 는 $\lambda_{max}/2$ (λ_{max} : 35.5 GHz에서의 파장)보다 작은 1.34 mm, d_{min} 은 $\lambda_{min}/4$ (λ_{min} : 34.5 GHz에서의 파장)보다 큰 0.62 mm, 슬롯 간격 W_{slot} 은 $\lambda_c/4$ 보다 작은 0.25 mm, 다음 슬롯과의 간격 pitch는 0.75 mm로 설계하였다^[6]. 30 mm 크기의 안테나에서 최소 10 개의 슬롯을 적용해야 약 1 dBi의 방사 이득이 개선되며, 제안된 안테나는 슬롯 간격을 고려하여 최대로 구현할

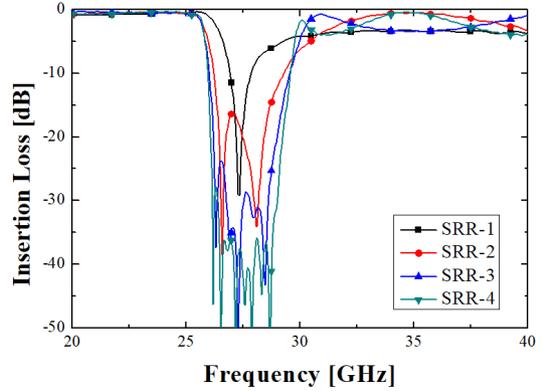


그림 3. SRR 개수에 따른 삽입 손실 변화
Fig. 3. Variation of insertion losses according to the number of SRRs.

수 있는 25개의 슬롯을 적용하였다. 그림 4는 corrugation 여부에 따른 35 GHz에서의 표면 전류 변화이며, 슬롯으로 들어오는 전류와 나가는 전류의 위상차에 따라 서로 상쇄되어 누설 전류가 제거됨을 보여준다.

그림 5에서는 제안된 안테나의 주파수 응답특성의 시뮬레이션과 측정결과를 비교하였다. 시뮬레이션 결과에서 SRR을 적용하여 28 GHz 대역에서 반사계수는 -15 dB에서 -0.8 dB로 커져서 차단대역이 형성되었다.

그림 3에서 언급했듯이, 슬롯라인상의 SRR에 의한 28 GHz 대역저지 특성으로 28 GHz에서 방사패턴이 억압되었으며, 이는 total radiation efficiency가 SRR 적용 후 92.0

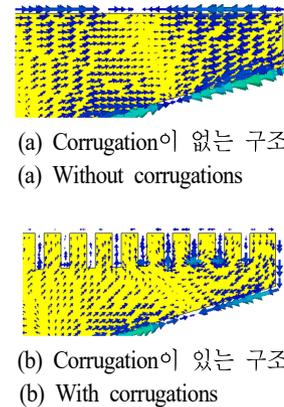


그림 4. Corrugation 여부에 따른 표면 전류 비교
Fig. 4. Comparison of surface current according to with or without of corrugations.

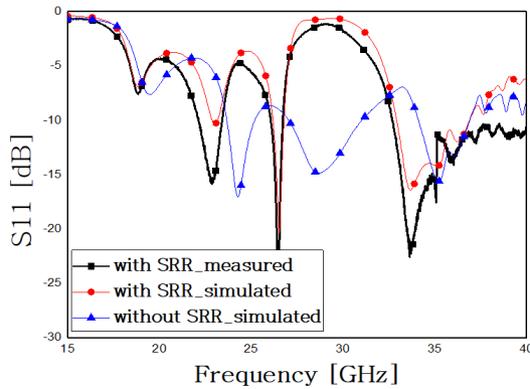


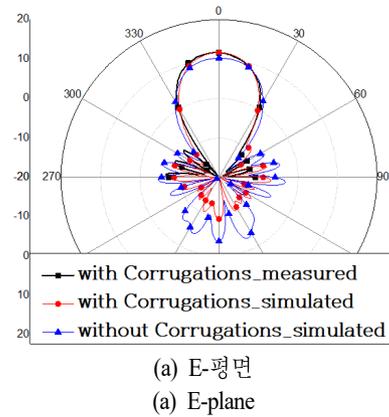
그림 5. 제안된 안테나의 반사계수 측정 및 시뮬레이션
Fig. 5. Return loss measurement and simulation of proposed antenna.

%에서 4.7 %로 줄어든 시뮬레이션 결과에서 알 수 있다. 28 GHz 대역의 반사계수 측정치는 1.8 dB로 나타났으며, 시뮬레이션 값과 차이는 계측기에 연결한 케이블과 커넥터 손실로 발생됐을 것이라 예상되며, 반사계수가 2 dB 이내로 28 GHz에서 차단 대역이 잘 형성되었음을 알 수 있다.

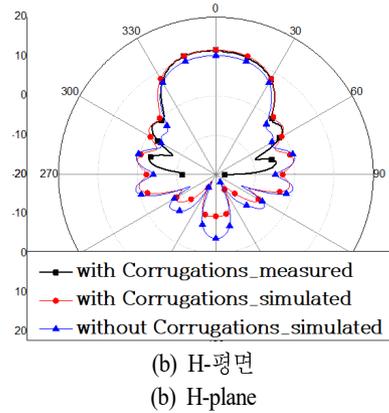
그림 6에서는 35 GHz에서 제안된 안테나의 방사패턴 시뮬레이션과 측정치를 비교하였다. Corrugation 유무에 대한 방사패턴 시뮬레이션 결과값을 비교하면 안테나 이득은 10.2 dBi에서 11.7 dBi로 1.5 dBi 증가하였고, 전후방비는 14 dB에서 21.1 dB 로 약 7 dB 개선되었다.

방사패턴 측정을 위해 2D 스캐너 장비가 사용되었고, 이에 따라 후엽 측정이 불가하여 전후방비와 방사효율 결과 비교는 불가능하지만, 35 GHz에서 주엽은 전체적으로 시뮬레이션 패턴과 일치하며, beam peak가 11.6 dBi로 측정되었으며, 안테나 연결된 커넥터 손실을 고려하면 시뮬레이션 결과와 매우 유사함이 확인되었다. 28 GHz에서 안테나 이득은 -10 dBi로 측정되었으며, 실제로 28 GHz에서 방사가 일어나지 않음을 확인하였다.

제안된 TSA와 TRM과의 결합성을 시뮬레이션으로 검증하였다. 그림 1에서 L1층의 안테나 피드라인을 연장하여, 4층 구조 TRM RF부 전송선로와 동일하게 L2층에 50 μm 유전체 두께로 GND 층을 추가하고, 이를 L4층의 복사체와 via로 연결하면 TRM RF부의 전송선로와 안테나 피드라인을 연결할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 제안된



(a) E-평면
(a) E-plane



(b) H-평면
(b) H-plane

그림 6. 제안된 안테나의 방사패턴 측정 및 시뮬레이션
Fig. 6. Radiation pattern measurement and simulation of proposed antenna.

TSA와 TRM RF부를 결합한 TSA의 주파수응답과 동작주파수에서의 방사패턴 특성이 거의 동일함을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서 제안한 TSA는 SRR과 corrugation을 적용하여 5G 통신대역인 28 GHz 대역에서 total radiation efficiency를 4.7 %로 줄였으며, 동작 주파수인 35 GHz에서 안테나 이득을 1.5 dB 증가시켜 전후방비를 약 7 dB 향상시켰다. 제안된 TSA는 LCP 기판을 적용하여 주변회로와 함께 집적화가 가능하며, 원치 않는 주파수 대역은 차단하고, 동작주파수 대역에서는 안테나의 전후방비 특성과 이득을 향상시킴으로써, 밀리미터파 대역 레이다 안테나의 훌륭한 후보기술이 될 것이다.

References

- [1] Y. M. Koh, K. H. Ra, "Design of UWB tapered slot antenna for the optimum impulse radio transmitting & receiving," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 6, pp. 553-563, Jun. 2010.
- [2] M. Abbak, M. N. Akıncı, M. Çayören, and İ. Akduman, "Experimental microwave imaging with a novel corrugated vivaldi antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 6, pp. 3302-3307, Jun. 2017.
- [3] L. C. Kuo, M. C. Tsai, and H. R. Chuang, "3-D FDTD design simulation and experimental measurement of a Ka-band planar antipodal linearly-tapered slot antenna (AL TSA)," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 9, pp. 382-384, Sep. 2001.
- [4] J. Y. Siddiqui, C. Saha, C. Sarkar, L. A. Shaik, and Y. M. M. Antar, "Ultra-wideband antipodal tapered slot antenna with integrated frequency-notch characteristics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1534-1539, Mar. 2018.
- [5] A. Kaiser, C. M. Bee, F. Dupuis, R. V. Metzen, and K. Fritz, "Thin film based LCP multi-layer circuits: Manufacturing technology and characterization," in *2015 European Microelectronics Packaging Conference(EMPC)*, Friedrichshafen, Sep. 2015, pp. 1-6.
- [6] B. Thomas, G. James, and K. Greene, "Design of wide-band corrugated conical horns for Cassegrain antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 6, pp. 750-757, Jun. 1986.

이 지 연 [한국전자기술연구원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0320-2751>



2016년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)
 2019년 1월~현재: 한국전자기술연구원 연구원
 [주 관심분야] 초고주파 안테나 설계

유 중 인 [한국전자기술연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2377-7934>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
 2000년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학석사)
 2019년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학 (공학박사)
 2006년 3월~현재: 한국전자기술연구원 책임연구원

[주 관심분야] SAR 레이다 부품 및 안테나 설계, 밀리미터파 회로 및 안테나 설계, 초고주파 회로 부품

최 세 환 [한국전자기술연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4882-9227>



2001년 2월: 충북대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 8월: 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)
 2017년 8월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학 (공학박사)
 2004년 2월~현재: 한국전자기술연구원 책임연구원

[주 관심분야] 밀리미터파 회로 및 안테나 설계, 빔포밍, 초고주파 회로 부품, 무선전력전송

이 재 영 [한국전자기술연구원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3985-472X>



1990년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 한양대학교 전자공학 (공학석사)
 2016년 2월: 경희대학교 전자전파공학 (공학박사)
 1996년 8월~현재: 한국전자기술연구원 수석연구원

[주 관심분야] 이동통신 FEM모듈, 초고주파 회로 부품, LTCC 모듈 기술, 국방 레이다기술