

## 높은 주파수 선택도와 광대역 흡수 성능을 가지는 24 GHz 대역 라조버 설계

### Design of a 24 GHz Band Rasorber with High Frequency Selectivity and Broadband Absorption Performance

김 수 현 · 하 노 겐\* · 김 상 길

SooHyun Kim · Nohgyeom Ha\* · Sangkil Kim

요 약

본 연구에서는 24 GHz 대역 무선 통신 혹은 레이더 시스템에 최적화된 FSR(frequency-selective-rasorber) 구조를 제안한다. 제안된 FSR은 정밀한 주파수 선택성과 낮은 삽입 손실을 제공하며, 목표 주파수 대역 근처에서 안정적인 신호 전송과 높은 흡수율을 달성한다. FSR의 동작 원리는 등가회로 모델을 통해 분석했으며, 모의실험을 통해 설계의 타당성을 검증하였다. 모의실험 결과, 제안하는 FSR 구조는 12.8~31.5 GHz에 이르는 광대역(FBW = 84.4 %)에서 -10 dB 이하의 반사계수를 가지며, 23.8 GHz에서 최소 삽입 손실 0.37 dB를 달성하였다. 이러한 특성은 mmWave 대역에서 발생하는 신호 간섭 문제를 해결하며, 통신 시스템 및 레이더 센싱 기술과 같은 최신 응용 분야에 적합한 노이즈 저감 방안을 제시한다.

#### Abstract

This paper proposes a frequency-selective rasorber (FSR) structure optimized for 24 GHz wireless communication and radar systems. The proposed FSR provides precise frequency selectivity and a low insertion loss, ensuring stable signal transmission and high absorption near the target frequency band. The operating principle of the FSR was analyzed using an equivalent circuit model, and the design was validated through simulations. Simulation results demonstrated that the proposed FSR achieved a wide bandwidth (FBW = 84.4 %), covering 12.8 to 31.5 GHz, with a reflection coefficient below -10 dB. In addition, it achieved a minimum insertion loss of 0.37 dB at 23.8 GHz. These characteristics effectively mitigate signal interference issues in the mm-wave band and offer a noise reduction solution suitable for advanced applications, such as communication systems and radar sensing technologies.

Key words: Frequency-Selective Rasorber, Absorber, mmWave, Noise Mitigation, Frequency-Selective-Surface

#### I. 서 론

최근 5G 및 6G 통신 기술의 급격한 발전으로 인해 더

욱 넓은 주파수 대역폭이 필요해짐에 따라서, 통신 주파수 대역이 기존의 Sub-6 GHz 대역에서 밀리미터파(mmWave) 대역으로 확장되고 있다<sup>[1]~[4]</sup>. 또한, 차세대 무

「이 과제는부산대학교기초연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.」

부산대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pusan Nantional University)

\*한화시스템(Hanwha Systems)

· Manuscript received February 2, 2025 ; Revised February 12, 2025 ; Accepted February 18, 2025. (ID No. 20250202-015)

· Corresponding Author: Sangkil Kim (e-mail: ksangkil3@pusan.ac.kr)

선 기술, 센서 시스템의 발전과 통합 시스템의 주목도가 올라감에 따라서 mmWave 대역을 활용한 무선 광대역 고정밀 초고속 통신/감지 기술의 중요성이 더욱 커졌다. 가령, mmWave 레이더를 활용한 객체 감지, 거리 측정 및 속도 측정과 데이터 통신을 융합하는 통신-감지 통합 기술(ISAC, integrated sensing and communication)은 차세대 미래 산업인 자율 주행 시스템의 핵심이 되는 기술로써 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 방식의 주파수 자원 활용은 효율적인 주파수 스펙트럼의 활용을 통해서 더 나은 해상도와 높은 통신 속도를 동시에 확보할 수 있으나, 동시에 신호의 간섭과 혼선으로 인한 시스템 성능 저하를 방지하는 기술이 매우 중요한 화제로 떠오르고 있다<sup>[5]</sup>.

그림 1은 mmWave 레이더를 실제 도로 환경에서 사용할 때 발생할 수 있는 대표적인 사례를 보여주고 있다. 동일한 동작 대역폭 이외의 통신/레이더 신호는 모두 간섭 신호로 인식되어 수신 신호의 신호 대 잡음비(SNR, signal to noise ratio)를 낮추고, 본래 인식해야 할 목표 객체를 탐지하지 못하는 상황을 발생시킬 수 있다. 또한, 자동차 내부의 금속 프레임과 범퍼에 산란된 신호로 인해 유령 객체(ghost target)가 발생하여 레이더 시스템의 오탐(false alarm)을 야기할 수 있다. 이처럼 차세대 통신 및 레이더 시스템에서는 주요 신호는 통과시키고 원치 않는 전자기파 신호의 간섭은 억제하는 기술이 매우 중요하다.

전자기파 차폐와 간섭을 줄이기 위해서 주파수 선택 표

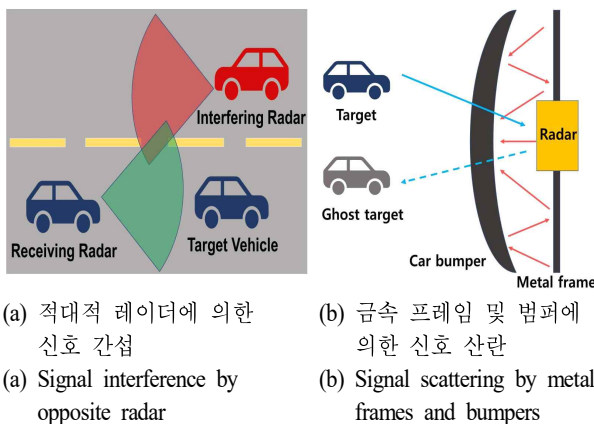


그림 1. 차량용 통신-레이더 신호 간섭 및 산란 예시  
Fig. 1. Example of automotive communication-radar signal interference and scattering.

면(FSS, frequency selective surface) 기반 레이돔(radome)<sup>[6]~[8]</sup>과 전자기파 흡수체(microwave absorber)<sup>[9]~[11]</sup>가 활발하게 연구되었다. 하지만, FSS와 전자 흡수체는 바이스테틱(bistatic) 또는 멀티스테틱(multistatic) 환경의 통신 시스템에서는 통신 대역 근처에서 발생하는 신호 간섭 및 다중경로(multi-path) 현상을 해결하는 데에 한계가 있다. 특히나, mmWave 대역에서 통신 및 레이더 시스템의 성능을 극대화하기 위해서 주파수 선택적 흡수 및 투과 특성을 동시에 가지는 구조물의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 24 GHz 무선 시스템에서 동작하는 FSR(frequency-selective-rasorber)을 제안한다. Rasorber는 레이돔(radome)과 흡수체(absorber)의 합성어로 특정 주파수 대역의 신호는 투과시키면서도 다른 주파수 대역의 신호는 흡수하여 반사 및 투과를 억제하는 특징을 가지고 있다<sup>[12]~[14]</sup>. FSS의 공간상에서의 전자기파 필터링 특성과 전자기파 흡수체의 통합 설계를 바탕으로 투과 대역에서의 낮은 삽입 손실을 구현하고, 투과 대역 이외의 신호는 흡수함으로써 레이더 시스템의 신뢰성과 정확성을 확보할 수 있다.

그림 2는 흡수-투과(A-T, absorption-transmission) 방식과 흡수-투과-흡수(A-T-A, absorption-transmission absorption) 방식으로 동작하는 FSR의 동작 방식을 개괄적으로 보여주고 있다. 각각 하나의 흡수 대역과 투과 대역을 가지는 A-T/T-A 방식과 다르게 A-T-A 방식은 투과 대역의 양쪽에 흡수 대역을 구현한 방식으로 A-T/T-A 방식으로 동작하는 FSR보다 더 높은 주파수 선택도를 가진다. A-T-A 방식으로 동작하는 FSR은 정밀한 주파수 선택성과 고품질 신호

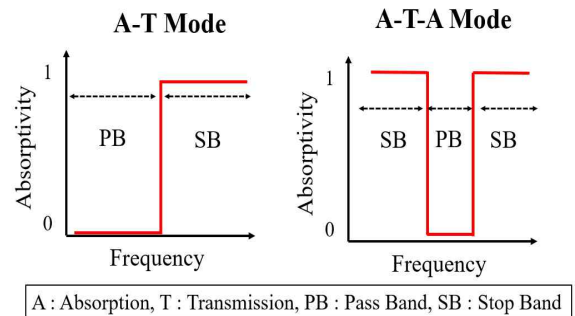


그림 2. FSR 동작 방식: A-T 방식과 A-T-A 방식  
Fig. 2. FSR types: A-T and A-T-A types.

전송이 필요한 통신 시스템 및 레이더 센싱 기술 분야에 특히 더 유용하다. 또한 A-T-A 구조는 흡수 대역 사이에 투과 대역을 형성해야 하므로, 투과 대역에서의 삽입 손실 최소화에 유의하여 FSR 설계를 최적화해야 한다.

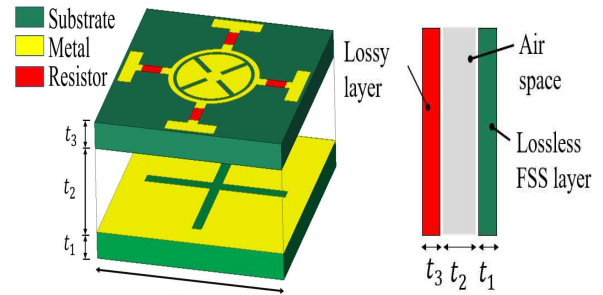
본 연구에서는 24 GHz의 신호를 투과 대역으로 하는 A-T-A 모드 FSR을 제안한다. Ku-대역 이하의 주파수 영역에서 투과와 흡수 성능을 구현했던 기존의 FSR 연구와는 달리, mmWave 대역으로 활발히 활용되고 있는 Ku-, K-, Ka- 대역에서 성능을 구현했다. 또한, 주파수가 높아질수록 설계 파라미터 및 공정의 민감도에 의한 오차가 커지기 때문에 간단한 구조로 최대의 성능을 내기 위한 공진기 구조로 설계를 진행하였다.

## II. FSR 동작 원리

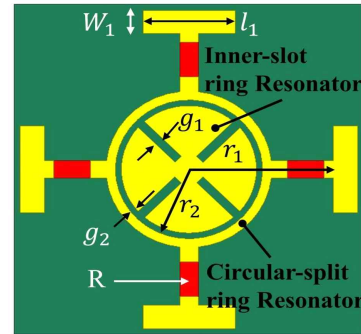
### 2-1 FSR의 동작 원리 및 등가회로 분석

본 논문에서 제안하는 FSR의 구조 및 단위 구조(unit-cell)는 그림 3(a)에 상세히 나타나 있다. 제안하는 FSR의 각 층은 유전체 기판 위에 인쇄되었으며, 두 층은 공기층으로 분리되어 있다. 제안된 FSR은 흡수 대역에서 저항으로 인한 에너지 손실을 발생시키는 손실층과 투과 대역에서 특정 주파수를 선택적으로 통과시키는 무손실 FSS 층으로 구성된다. 두 층 사이의 간격( $t_2$ )은 투과 대역 중심 주파수 파장의  $\lambda_0/4$ 로 설계했다. mmWave 대역에서 A-T-A 모드를 구현하기 위해 최대한 단순한 구조의 공진기를 설계하였다. 기존의 FSR은 구불구불한 형태의 선로 또는 슬롯을 추가하여 공진에 필요한 인덕턴스 및 캐패시턴스를 세밀하게 조정하는 방식을 주로 사용하였다<sup>[15]</sup>. 상대적으로 복잡한 형태의 공진기는 일반적인 PCB 공정이 가지고 있는 250  $\mu\text{m}$ 의 공정 오차 내에서 구현하기 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 손실층에 단순한 원형-링 형태의 공진기를 적용하였으며, 해당 구조는 일부 파라미터 조정만으로도 공진 주파수를 안정적으로 제어할 수 있다. 또한, 구조의 단순성으로 인해 주파수 스케일링이 용이하며, 성능 재현성이 높다는 장점을 가진다.

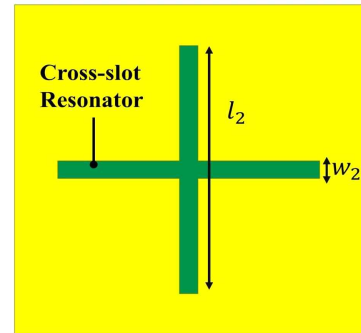
그림 3(b)에 제시된 바와 같이, 손실층은 두 개의 공진기로 구성되며, TE와 TM 편파 모두에 효과적으로 대응



(a) 구조 및 적층구조  
(a) Structure and stack-up



(b) 윗면: 손실층  
(b) Top view: lossy layer



(c) 아랫면: 무손실 FSS 층  
(c) Bottom: lossless FSS layer

그림 3. 제안된 FSR의 구조 및 각 층의 단위 셀

Fig. 3. Geometry of proposed FSR and unit cell of each layer.

하기 위해 상하좌우 대칭 구조로 설계되었다. 손실층의 첫 번째 공진기는 가장 안쪽에 위치한 슬롯-링 형태(inner-slot ring)의 공진기로, 투과 대역에서 공진하지만 에너지 손실을 발생시키지 않는다. 반면, 두 번째 공진기는 바깥쪽에 위치한 원형-링(circular-split ring) 형태로 설

계되어 흡수 대역에서 공진한다. 이 공진기는 상하좌우 대칭으로 배열된 네 개의 저항 소자를 포함하며, 흡수 대역에서 입사된 전자기파 에너지를 효과적으로 흡수한다. 그림 3(c)의 무손실 FSS층은 열십자 모양의 슬롯(cross-slot) 구조를 기반으로 설계되었다. 이 층은 투과 대역에서는 공진기로 동작하며, 투과 대역을 제외한 모든 대역에서는 접지면(ground plane)으로 동작하여 흡수 대역에서 전파의 투과를 차단한다.

그림 4(a)는 제안된 FSR의 등가회로 모델을 보여주고 있다. 손실층의 바깥쪽 원형-링 공진기와 안쪽의 슬롯-링

공진기는 각각 직렬 RLC( $R_1, C_1, L_1$ )와 병렬 LC ( $L_2, C_2$ )로 모델링할 수 있으며, 직렬 공진기는 흡수 대역에서, 병렬 공진기는 투과 대역에서 각각 공진하도록 설계되었다. 교차-슬롯 형태의 무손실 FSS 층은 병렬 LC ( $L_3, C_3$ )공진기로 나타낼 수 있으며, 투과 대역에서 공진하도록 설계되었다. FSR 동작의 파라미터 값들은 다음과 같이 ABCD 행렬을 통해 나타낼 수 있다<sup>[16]</sup>.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{Lossy}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\delta & jZ_0\sin\delta \\ j\frac{\sin\delta}{Z_0} & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{Lossless}} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$Z_0$ 는 자유공간에서의 특성 임피던스,  $Z_{Lossy}$ 는 손실층의 임피던스,  $Z_{Lossless}$ 는 무손실층의 임피던스를 나타내며  $\delta$ 는 공기에서의 위상 경로(phase path)를 뜻한다.  $\delta = 2\pi h_2 f / c$ 로 나타내어지며  $h_2$ 는 공기층의 두께,  $c$ 는 빛의 속도를 의미한다. ABCD 행렬과 S-파라미터 사이의 행렬 변환 이론에 따르면, S-파라미터는 다음과 같이 정의된다<sup>[17]</sup>.

$$|S_{11}| = \left| \frac{A + \frac{B}{Z_0} - CZ_0 - D}{A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D} \right| \quad (2)$$

$$|S_{21}| = \frac{2}{\left| A + \frac{B}{Z_0} + CZ_0 + D \right|} \quad (3)$$

이때, 식 (2)와 (3)에 따르면 S-파라미터는 공기층의 두께 ( $h_2$ )에 의존하는 변수인 ABCD-파라미터로 표현되기 때문에 반사 계수 ( $|S_{11}|$ )와 투과 계수 ( $|S_{21}|$ )가  $h_2$ 에 크게 의존하는 것을 볼 수 있다. 식 (1)~(3)에 의하면, 투과 대역에서 공진하는 병렬 공진기들에 의해 각 층의 임피던스가 크게 증가하는 경우, 투과 계수가 반사 계수에 비해 현저히 커지는 것을 알 수 있다.

그림 4(b)는 흡수 대역에서의 FSR 동작을 설명하는 등가회로 모델을 보여준다. 투과 대역에서 공진하도록 설계된 병렬 LC 공진기는 투과 대역 이외의 모든 구간에서 접지면으로 동작한다. FSR은 회로-아날로그 흡수체(CA 흡수체, circuit-analog absorber)와 유사한 두자기 전자기파 흡수

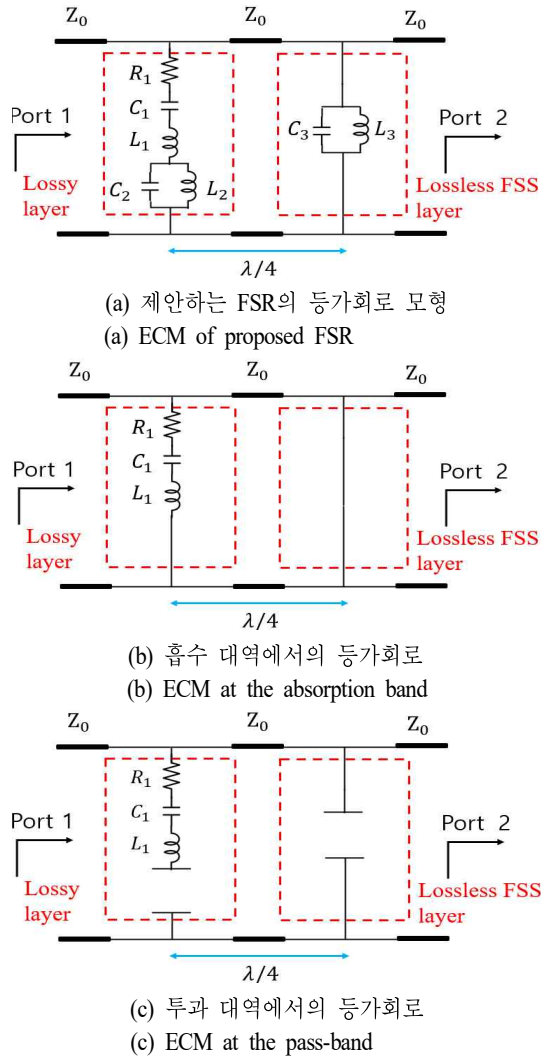


그림 4. 동작 대역에 따른 FSR 등가회로 모형  
Fig. 4. ECM of FSR at each operation band.

매커니즘을 갖는다. 첫 번째는 투과 대역 주파수의  $\lambda_0/4$ 의 길이로 설정된 공기층에서 발생하는 상쇄간섭 효과이다. FSR의 손실 층에 입사된 전파는  $\lambda_0/4$  길이의 공기층을 통과한 후 접지면으로 동작하는 무손실 FSS 층에서 반사된다. 이때, 반파장 ( $\lambda_0/2$ )의 위상 변화를 겪게 되고, 위상이 반전되어 되돌아오는 전파는 입사 전파와 상쇄간섭을 일으킨다. 이러한 상쇄간섭은 손실층 표면에서의 반사계수를 크게 감소시키며, 목표 주파수 대역에서 최대 에너지 흡수율을 달성하는 데 기여한다. 공기층은 임피던스 정합 관점에서도 중요한 역할을 한다. 손실층 자체의 고유 임피던스는 일반적으로 자유공간의 특성 임피던스 ( $\eta_0=377 \Omega$ ) 보다 낮아 직접적인 정합이 어렵다<sup>[18]</sup>. 그러나  $\lambda_0/4$  공기층은 손실층의 입력 임피던스와 자유공간의 특성 임피던스를 효과적으로 정합시켜 반사계수를 줄이는 데 도움을 준다. 이는 FSR의 구조적 설계에서  $\lambda_0/4$  공기층이 필수적인 요소임을 나타낸다. 두 번째 손실 매커니즘은 손실층 내 저항 소자에서 발생하는 에너지 손실이다. 그림 4(b)에서 처럼 무손실 FSS층이 단락회로 ( $Z_L = 0$ )일 때 선로의 입력 임피던스는  $Z_{in} = jZ_0 \tan \beta l$ 로 나타낼 수 있으며,  $l = \lambda/4$ 인 경우에 입력 임피던스  $Z_{in} = \infty$ 이 된다. 이는 흡수 대역에서 무손실 FSS 층이 손실층을 기준으로 보았을 때 개방 회로(open circuit)로 동작하여 손실층의 직렬 RLC 공진기로만 전류가 흐르게 되는 상황으로 해석할 수 있다. 이 과정에서 손실층 내 저항 소자는 전기 에너지를 열 에너지로 변환하는 저항 손실(ohmic loss)을 발생시키고, 이를 통해 흡수 대역에서 에너지 흡수가 이루어진다. 반면에 투과 대역에서는 손실층과 무손실 FSS층의 병렬 LC 공진기는 공진 상태에서 개방 회로로 동작하기 때문에 Port 1으로 들어온 에너지는 손실층에서 소모되지 않고 Port 2로 전달된다.

그림 3에 제시된 각 층의 공진기 규격 및 관련 파라미터 값은 그림 4의 등가회로에서 직·병렬 공진기의 인덕턴스(L) 및 커패시턴스(C) 값과 직접적으로 연관된다. 따라서 등가회로 구조를 기반으로 특정 파라미터가 각 소자의 등가값에 미치는 영향을 분석해야 하며, 이를 통해 목표 주파수 대역에서 정확한 흡수 및 투과 성능을 구현할 수 있다. 손실층의 직렬 RLC( $R_1, C_1, L_1$ ) 소자값들은

$w_1, l_1, r_1, R$ 에 따라, 병렬 LC( $L_2, C_2$ ) 소자값들은  $r_2, g_1, g_2$  값에 의존적이다. 마찬가지로 무손실 FSS층의  $L_3, C_3$  값 역시  $l_2, w_2$ 의 영향을 받는다. 본 연구에서는 제조 공정 오차 및 비용을 고려하여 각 파라미터의 길이와 간격을 최소 0.1 mm 이상으로 설계했으며, 이를 통해 최적화된 설계의 파라미터 값은 표 1에 제시되어 있다.

## 2-2 손실층 및 무손실 FSS층 분석

본 연구에서는 FSR의 등가회로 모델과 주파수 응답을 ANSYS사의 HFSS(high frequency structure simulator)를 사용하여 분석했다. 흡수 대역에서의 흡수율은 에너지 보존 법칙에 따라서  $1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 로 정의할 수 있다. 이상적으로 동작하는 FSR은 흡수 대역에서  $|S_{11}| = 0, |S_{21}| = 0$ 을 만족하고, 투과 대역에서는  $|S_{11}| = 0, |S_{21}| = 1$ 의 조건을 만족한다. 본 논문에서는 90 % 이상의 흡수율을 가지는 구간을 흡수 대역으로 정의했다 ( $|S_{11}| < -10$  dB).

그림 5(a)는 손실층 아래에 접지면이 있을 때와 없을 때의 S-파라미터 결과를 보여준다. 손실층이 접지면과 함께 존재할 때, 이 구조는 일반적인 CA 흡수체와 동일한 구조를 가지며 투과 대역을 중심으로 두 개의 흡수 대역이 나타난다. 이는 그림 5(a)의 빨간색 실선에 나타나 있듯이, 낮은 흡수 대역( $f_1$ )이 18 GHz에서, 높은 흡수 대역( $f_3$ )이 30 GHz 부근에서 나타난다. 투과 대역( $f_2$ ) 24 GHz 부근에서 의도적으로 설계한 노치(notch)가 관찰되며, 이는 손실층의 병렬 LC 공진기가  $f_2$ 에서 공진하면서

표 1. 제안하는 FSR 설계 변수

Table. 1. Design parameter of the proposed FSR.

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
$t_1, t_3$	0.508	$g_2$	0.1
$t_2$	1.6	$r_1$	2.35
$P$	5.7	$r_2$	1.2
$w_1$	0.4	$R$	140 ( $\Omega$ )
$l_1$	1.5	$l_2$	4.3
$g_1$	0.15	$w_2$	0.3

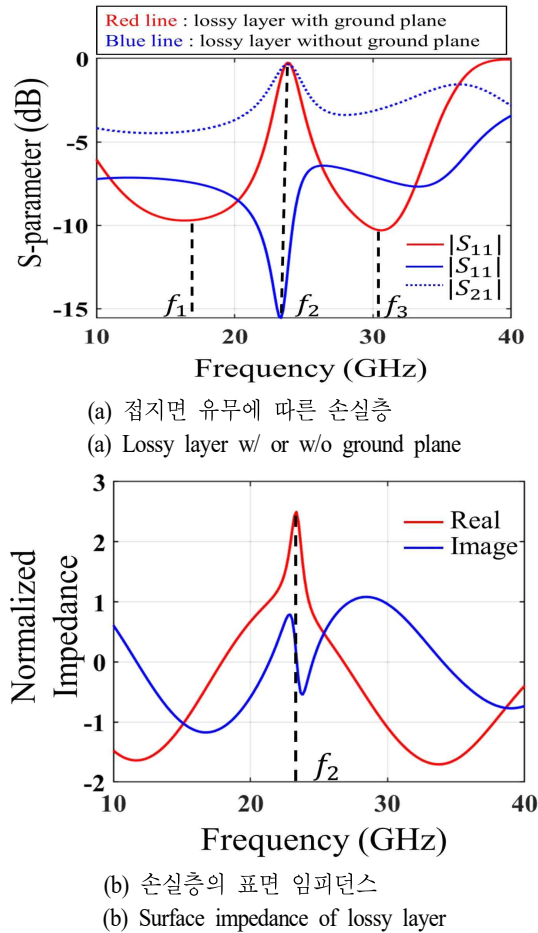


그림 5. 손실층 동작 분석  
Fig. 5. Analysis of lossy layer.

손실층 회로가 개방 회로로 변하고, 뒤쪽의 접지면에서  $f_2$ 에 해당하는 주파수 성분은 전부 반사되는 결과로 발생한 것이다. 그림 5(a)의 빨간색 실선의 흡수 대역 ( $f_1, f_3$ )에서 90 %의 흡수율을 나타내는  $|S_{11}| < -10$  dB 조건을 완전히 만족하지 못함이 확인되었다. 이는 흡수 대역 중간에 형성된 투과 대역으로 인해 자유공간과 손실층의 임피던스 부정합이 커졌기 때문이다. 넓은 대역에 걸쳐 높은 흡수율을 달성하기 위해서는 무손실 FSS층의 설계를 최적화하고, 공기층의 길이를 세밀히 조정해야 한다. 흡수 대역 중간에 위치한 노치의 역할을 더 살펴보기 위해서 손실층 뒤에 접지면이 존재하지 않을 때의 S-파라미터 그래프를 그림 5(a)에 파란색 선으로 나타냈다. 파란

색 점선에서 확인할 수 있듯이, 기존에 노치가 존재했던  $f_2$  대역에서는 투과 대역이 형성된다. 이는 접지면이 존재하지 않을 경우, 손실층이 본질적으로  $f_2$  대역을 투과시키는 구조임을 나타낸다. 따라서 무손실 FSS 층의 투과 대역을  $f_2$ 에 맞추어 설계하면, 흡수 대역 사이에 투과 대역을 가지는 A-T-A 구조의 FSR 설계가 가능하다.

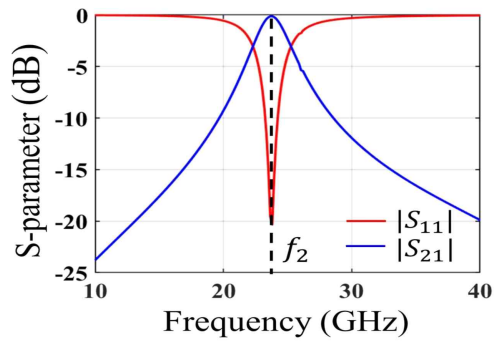
등가회로 모델 관점에서 투과 대역,  $f_2$ 에서 손실층은 개방 회로로 동작해야 하므로,  $f_2$  대역에서 임피던스의 실수값은 다른 대역보다 높아야 한다. 그림 5(b)는 손실층 뒤 접지면이 존재하지 않을 때, 자유 공간의 특성 임피던스인 377  $\Omega$ 으로 정규화된 손실층의 표면 임피던스를 보여준다. 빨간색 실선에서 확인할 수 있듯이,  $f_2$  부근에서 임피던스의 실수값이 다른 대역에 비해 크게 증가함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 손실층이 2-1에서 제안한 등가회로 모델에 따라 동작함을 확인할 수 있다.

FSR의 투과 대역을 형성하기 위해서, 대역 통과 필터 역할을 하는 무손실 FSS층을 설계하였다. 열십자 형태의 무손실 공진기는 슬롯의 길이 ( $l$ )와 폭 ( $w_1$ )에 의해 공진 주파수 대역이 변하며, 이러한 값들은 무손실 FSS층 병렬 LC 공진기의 등가 회로 소자값과 직결된다. 그림 6(a)는 무손실 FSS층만 존재할 때의 S-파라미터 결과를 보여준다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이, 24 GHz 대역에서만 입사 전파가 투과하며, 다른 주파수 대역에서는 PEC와 유사한 반사 특성을 보인다. 이는 무손실 FSS층이 투과 대역에서 공진하도록 설계되었기 때문이다. 또한, 무손실 FSS층의 병렬 LC 공진기는 투과 대역에서 공진하므로, 해당 대역에서 표면 임피던스가 다른 대역보다 높아야 한다. 그림 6(b)는 377  $\Omega$ 으로 정규화된 무손실 FSS층의 표면 임피던스 시뮬레이션 결과를 나타내며, 설계한 무손실 FSS층이 등가회로 모델과 일치함을 보여준다.

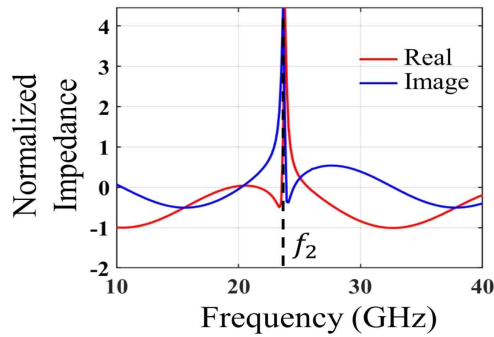
### 2.3 손실층과 무손실 FSS층의 결합

FSR은 손실층과 무손실층을 각각 설계한 후, 두 층을 일정한 간격으로 배치하는 구조로 설계했다. 그림 7(a)는 손실층과 무손실 FSS층이 결합하여 완전한 FSR로 동작했을 때의 S-파라미터 결과를 보여준다. 그 결과 제안된 FSR은 모의실험 결과 12.6~31.5 GHz에서  $-10$  dB 이하





(a) 무손실 FSS층 S-파라미터  
(a) S-parameter of lossless FSS layer

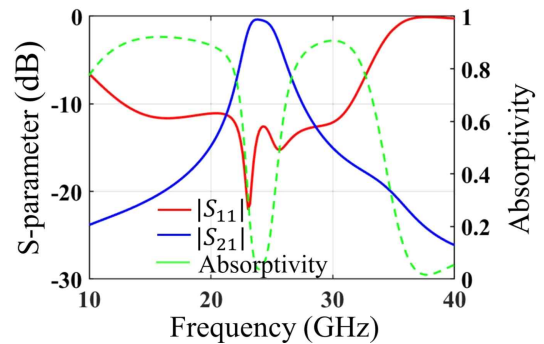


(b) 무손실 FSS층의 표면 임피던스  
(b) Surface impedance of lossless FSS layer

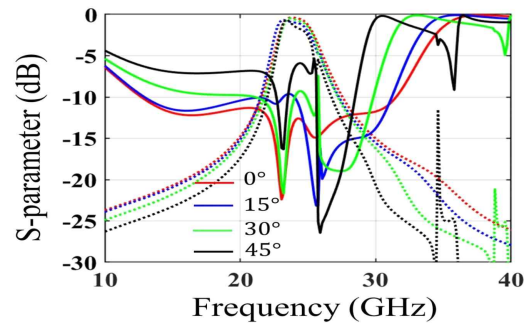
그림 6. 무손실 FSS층 동작 분석  
Fig. 6. Analysis of lossless FSS layer.

의 반사계수를 가진다. 23.2~24.8 GHz에서는  $-1$  dB 이하의 삽입 손실(IL, insertion loss)을 가지며, 23.8 GHz에서 0.37 dB로 최소의 삽입 손실을 가진다. 제안하는 FSR의 90 % 흡수 대역은 12.7~21.6 GHz/ 27.5~31.5 GHz으로 나타났다. 손실층과 접지면만 존재할 때,  $|S_{11}| < -10$  dB 이하를 충분히 만족하지 못했으나(그림 5(a)), 두 층을 결합한 최종 구조에서는  $|S_{11}|$ 이 넓은 대역에 걸쳐  $-10$  dB 이하를 만족함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 손실층과 무손실 FSS층 간의 상호작용(mutual interaction) 및 공기층을 통한 에너지 커플링(coupling)에 의해 임피던스 정합이 개선되었기 때문이다. 두 층간의 상호작용은 반사계수를 감소시키고 대역폭 확장에 기여하여 FSR의 성능 향상에 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다<sup>[16]</sup>. 이와 같은 결

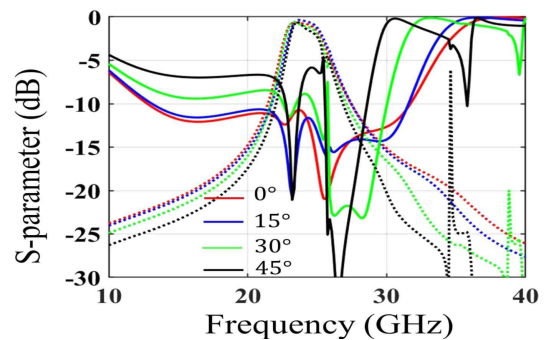
과는 손실층과 무손실 FSS층의 결합이 단순한 구조적 합성에 그치지 않고, 상호작용을 통해 전자기적 특성을 향상시키는 중요한 설계 요소임을 보여준다. 다양한 입사각과 편파에서 FSR의 동작 특성을 확인하는 것은 실제 응용 환경에서 중요한 성능 지표이기 때문에, 편파와 입사각에



(a) 제안하는 FSR의 S-파라미터  
(a) S-parameters of proposed FSR



(b) 경사 입사: TE 편파  
(b) Oblique incidence: TE polarization



(c) 경사 입사: TM 편파  
(c) Oblique incidence: TM polarization

그림 7. 제안하는 FSR의 S-파라미터  
Fig. 7. S-parameter of proposed FSR.

따른 제안한 FSR의 주파수 응답을 분석했다(그림 7(b), (c)). 제안하는 FSR은 TE 및 TM 편파에서도 넓은 90 % 이상의 흡수율을 나타냈고, 30°와 45° 입사 조건에서도 A-T-A 특성을 확인할 수 있었다.

손실층에서 발생하는 에너지 흡수 매커니즘을 이해하기 위해 주파수에 따른 전기장(E-field) 분포를 그림 8과 같이 살펴보았다. 그림 8(a)와 (c)에서 볼 수 있듯이, 흡수 대역( $f_1, f_3$ )에서는 바깥쪽 원형 링 형태의 공진기와 연결된 저항 소자 부근에 전기장이 강하게 집중된다. 반면, 투과대역( $f_2$ )에서는 저항 소자보다는 안쪽 슬롯 링 형태의 공진기에 전기장이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해  $f_2$  대역에서는 전파가 최소한의 삽입손실로 손실층을 통과하고,  $f_1$  및  $f_3$  대역에서는 저항 소자에 의해 효과적으로 흡수됨을 확인할 수 있다.

### III. 제작 및 측정 결과

제안하는 FSR의 동작을 실험적으로 검증하기 위해 그림

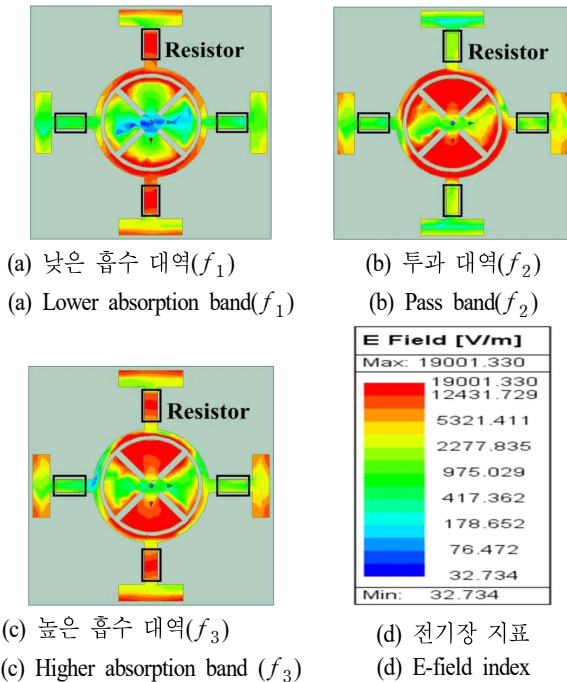


그림 8. 손실층의 전기장 분포  
Fig. 8. E-field distribution of lossy layer.

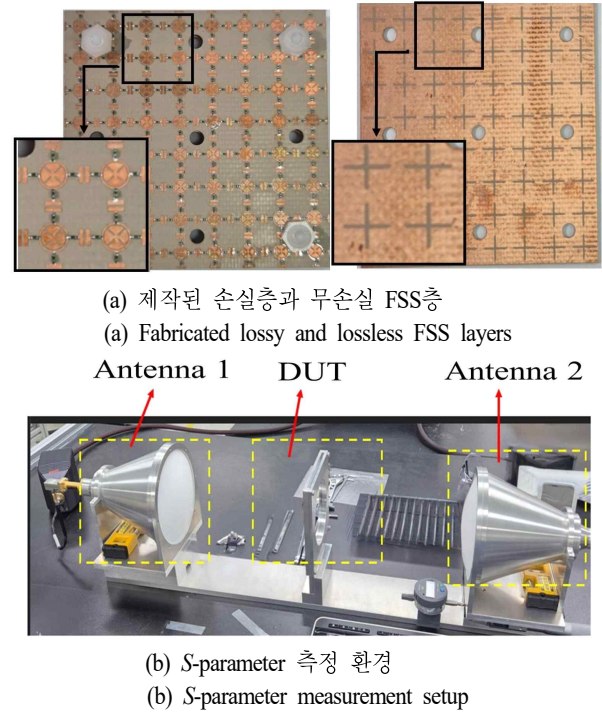
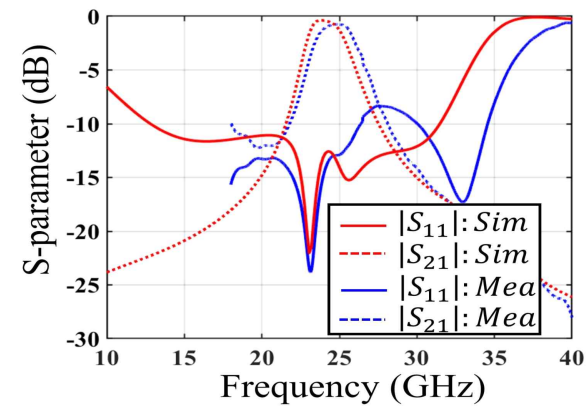


그림 9. FSR 제작 및 측정 환경  
Fig. 9. FSR fabrication & measurement setup.

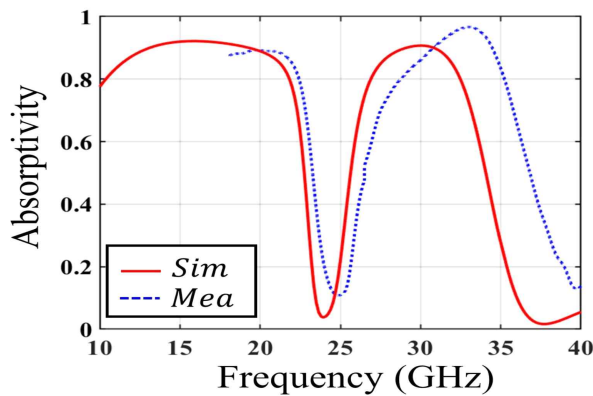
9(a)와 같이 FSR 시제품을 제작했고, 측정 환경은 그림 9(b)에 나타나 있다. 제안하는 FSR은 8×8의 단위 셀로 구성되었으며, 제작한 시제품의 면적은 45.6×45.6 mm<sup>2</sup>이다. 제작에 사용된 기판은 0.508 mm 두께의 RF-35( $\epsilon_r = 3.5$ )이며, 그림 9(a)에서 확인할 수 있듯이 손실층의 바깥쪽 원형 링에는 단위 셀당 4개의 0201 크기의 칩 저항기를 실장했다. 손실층과 무손실 FSS층 사이에 공기층을 형성하기 위해 지름 2.5 mm의 구멍을 뚫고, 3D 프린터로 제작된 지지대를 삽입한 후 플라스틱 나사로 두 층을 단단히 고정하였다. 측정은 그림 9(b)와 같이 벡터 네트워크 분석기(VNA, vector network analyzer)와 연결되어있는 두 개의 혼 안테나 사이에 시제품(DUT, device under test)을 배치하여 전자기파의 산란과 투과를 측정했다. 측정 시 불필요한 반사와 잡음을 제거하기 위해 time-gating 기법이 적용되었으며, 측정된 결과는 디임베딩(de-embedding)을 통해 DUT 고유의 S-파라미터를 추출했다<sup>[19]</sup>.

디임베딩 과정을 거쳐 얻어진 산란계수 결과와 측정된 흡수율은 그림 10에 나타나 있다. 제작한 FSR은 24.7 GHz





(a) 측정된 S-파라미터  
(a) Measured S-parameters



(b) 측정된 흡수율  
(b) Measured absorptivity

그림 10. FSR 측정  
Fig. 10. FSR measurement.

에서 최소 삽입 손실 0.74 dB를 가지며, 투과 대역 양쪽으로 흡수 대역이 구현되었다(그림 10(a)). 투과 대역보다 흡수 대역에서 모의실험 결과와 측정 결과 간 차이를 확인할 수 있는데, 이는 크게 두 가지 이유에 기인한다. 첫 번째 원인은 고주파 대역에서 표면 실장 부품 (SMD, surface mount device)인 칩 저항 소자의 모형 오차와 기생 효과 (parasitic effect)이다. SMD 칩 저항 내부의 기생 인덕턴스와 기생 캐패시턴스는 고주파 대역에서 저항 소자의 성능을 저하시키는 주요 요인으로 작용한다. 두 번째 원인은 공기층 형성 과정에서 생기는 정렬 오차이다. 손실층과 무손실 FSS층 사이의 공기층은 자유 공간과의 임

피던스 정합에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 3D 프린터로 1.6 mm 높이의 지지대를 제작하였으나, 제작 및 조립 과정에서 두 층 간 간격의 균일함과 정렬에 오차가 발생했을 가능성이 존재한다.

측정된 FSR의 주파수 대역에 따른 흡수 성능은 그림 10(b)에 나타나 있으며, 투과대역의 양쪽으로 약 90 %의 흡수율을 가지는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 제안하는 FSR의 성능을 선행 연구된 A-T-A 방식 FSR의 성능과 비교한 표이다. 최근 연구된 대부분의 FSR은 X-대역 근처에서 성능이 구현되고 있다. 반면, 본 논문에서 제안하는 FSR은 Ku-대역부터 Ka-대역을 포함하며, 짧은 파장에서 A-T-A 모드를 구현하기 위해 최대한 단순한 형태의 공진기를 설계하였다. 또한, mmWave 대역에서 집중 정수 소자(lumped element)인 저항을 사용하여 흡수 성능을 확보하였다. 이로 인해 표 2에 제시된 기존 연구의 FSR보다 비대역폭이 다소 제한되는 단점이 있으나, 기존 연구에서 다루지 않았던 mmWave 대역에서 A-T-A 모드를 성공적

표 2. FSR 성능 비교

Table. 2. FSR Performance comparison.

	IL / Transmission Freq.	Absorption FBW (%)	Thickness (@ $f_L$ )
Ref [20]	0.67 dB / 6.5 GHz	102	0.098
Ref [21]	0.2 dB / 10 GHz	100	0.12
Ref [22]	0.27 dB / 4.31 GHz	109.8	0.08
Ref [23]	0.35 dB / 5 GHz	96.6	0.11
Ref [24]	0.29 dB / 6.1 GHz	112.4	0.1
Ref [25]*	0.2 dB / 35 GHz	114*	0.1
This Work	0.38 dB / 23.7 GHz	84.3	0.11

FBW: fractional bandwidth of  $-10$  dB reflection,  $f_L$ : lowest frequency of  $-10$ dB reflection,  $\lambda_L$ : wave-length at  $f_L$ , \* : 80 % absorption A-T mode FSR.

으로 구현하였다는 점에서 연구의 의의가 있다. 참고문헌 [23]에서 제안된 FSR은 다른 FSR에 비해 비교적 높은 35 GHz에서 투과 대역을 가지지만, 흡수 대역을 80 %의 흡수율을 기준으로 설계되었고 A-T 방식으로 동작한다. 그에 반해 본 논문에서 제안된 FSR은 90 %의 흡수율을 기준으로 설계되었고, A-T-A 방식으로 동작하도록 설계되었다는 점에서 높은 주파수 선택도와 흡수율을 가지고 있다. 제안된 FSR은 24 GHz 레이더 및 통신에 최적화된 설계이며, 실제 레이더 및 통신에서 오탐지와 신호 오류를 만드는 인접 주파수 대역의 간섭 신호를 효과적으로 걸러낼 수 있는 높은 신호 선택도를 가지고 있다. 또한 제안하는 FSR은 24 GHz 대역에서 대역 통과(BPF, band-pass filter) 특성을 안테나 주변 공간에서 수행(spatial filtering)할 수 있기에 높은 활용도를 가진다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 mmWave 24 GHz 대역 레이더 및 통신 시스템에서 발생하는 신호 간섭 문제를 해결하기 위해 대역 통과 FSR 구조를 제안하였다. 제안된 FSR의 동작 원리를 분석하기 위해 등가회로 모델을 기반으로 투과 대역 및 흡수 대역의 특성을 해석하였으며, 표면 임피던스 및 전기장 분포 모의 실험 결과를 통해 설계된 구조의 주파수 응답과 등가회로 모형을 검증했다. 제안하는 FSR은 A-T-A 방식으로 동작하며, 기존의 A-T 또는 T-A 방식 기반 FSR에 비해 레이더 및 통신 시스템에 보다 적합한 특성을 제공한다. 나아가, Ku-, K-, Ka- 대역에서 흡수 및 투과 성능을 구현하여 기존 연구와 차별화된 성과를 보여주었다. A-T-A 방식의 특성으로 인해 레이더나 통신 시스템에서 오류를 생성하는 간섭 신호를 효과적으로 제거하는데 기여할 수 있으며, 활용 주파수 대역에 인접한 주파수 대역을 효과적으로 억제하여 높은 신호 선택도를 제공한다. 이러한 특성은 mmWave 레이더 통신, 차량 레이더, 및 영상 처리와 같은 최신 무선 통신 응용 분야에서 기존 흡수체와 차별화된 높은 잠재력을 가지고 있다.

본 연구를 통해 제안된 FSR은 기존 FSR 연구가 다루지 못했던 mmWave 대역에서 흡수와 투과를 동시에 구현함으로써, 차세대 레이더 및 무선 통신 시스템에 적합한 새

로운 설계 방안을 제시하였다. 향후 연구에서는 FSR 구조의 제조 공정 최적화 및 다양한 응용 환경에서의 실험적 검증을 통해 해당 구조의 실용성을 더욱 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

#### References

- [1] X. Tong, Z. H. Jiang, C. Yu, F. Wu, X. Xu, and W. Hong, "Low-profile, broadband, dual-linearly polarized, and wide-angle millimeter-wave antenna arrays for Ka-band 5G applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 10, pp. 2038-2042, Oct. 2021.
- [2] D. Liu, X. Gu, C. W. Baks, and A. Valdes-Garcia, "Antenna-in-package design considerations for Ka-band 5G communication applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6372-6379, Dec. 2017.
- [3] J. C. I. Galarregui, A. T. Pereda, J. L. M. de Falcón, I. Ederri, R. Gonzalo, and P. de Maagt, "Broadband radar cross-section reduction using AMC technology," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6136-6143, Dec. 2013.
- [4] C. X. Wang, X. You, X. Gao, X. Zhu, Z. Li, and C. Zhang, et al., "On the road to 6G: Visions, requirements, key technologies, and testbeds," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 905-974, Feb. 2023.
- [5] F. Uysal, S. Sanka, "Mitigation of automotive radar interference," in *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*, Oklahoma City, OK, Apr. 2018, pp. 405-410.
- [6] F. Costa, A. Monorchio, "A frequency selective radome with wideband absorbing properties," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 6, pp. 2740-2747, Jun. 2012.
- [7] M. Al-Joumayly, N. Behdad, "A new technique for design of low-profile, second-order, bandpass frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and*

- Propagation*, vol. 57, no. 2, pp. 452-459, Feb. 2009.
- [8] Y. Pang, Y. Li, B. Qu, M. Yan, J. Wang, and S. Qu, et al., "Wideband RCS reduction metasurface with a transmission window," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 10, pp. 7079-7087, Oct. 2020.
- [9] L. Li, Z. Lv, "Ultra-wideband polarization-insensitive and wide-angle thin absorber based on resistive metasurfaces with three resonant modes," *Journal of Applied Physics*, vol. 122, no. 5, p. 055104, Aug. 2017.
- [10] B. A. Munk, P. Munk, and J. Pryor, "On designing Jaumann and circuit analog absorbers(CA absorbers) for oblique angle of incidence," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 1, pp. 186-193, Jan. 2007.
- [11] T. Deng, Z. W. Li, and Z. N. Chen, "Ultrathin broadband absorber using frequency-selective surface and frequency-dispersive magnetic materials," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 11, pp. 5886-5894, Nov. 2017.
- [12] W. Yu, G. Q. Luo, Y. Yu, Y. Pan, W. Cao, and Z. Shen, "Dual-polarized band-absorptive frequency selective rasorber using meander-line and lumped resistors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 2, pp. 1318-1322, Feb. 2019.
- [13] Y. Shang, Z. Shen, and S. Xiao, "Frequency-selective rasorber based on square-loop and cross-dipole arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 11, pp. 5581-5589, Nov. 2014.
- [14] Y. Han, Y. Chang, and W. Che, "Frequency-selective rasorbers: A view of frequency-selective rasorbers and their application in reducing the radar cross sections of antennas," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 23, no. 2, pp. 86-98, Feb. 2022.
- [15] Q. Yu, S. Liu, A. Monorchio, X. Kong, Y. Wen, and Z. Huang, "A miniaturized high-selectivity frequency selective rasorber based on subwavelength resonance and interdigital resonator," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1833-1837, Sep. 2019.
- [16] A. Parameswaran, D. Kundu, and H. S. Sonaliker, "A dual-polarized wideband frequency-selective rasorber with low in-band insertion loss and high oblique incidence stability," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 6, pp. 1820-1828, Dec. 2021.
- [17] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2009.
- [18] Y. Shang, Z. Shen, and S. Xiao, "On the design of single-layer circuit analog absorber using double-square-loop array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6022-6029, Dec. 2013.
- [19] R. T. Johnk, A. Ondrejka, S. Tofani, and M. Kanda, "Time-domain measurements of the electromagnetic backscatter of pyramidal absorbers and metallic plates," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 35, no. 4, pp. 429-433, Nov. 1993.
- [20] H. Ye, J. Wei, L. Lin, F. Liu, L. Miao, and S. Bie, "A frequency-selective surface rasorber based on four functional layers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 5, pp. 2768-2778, May 2021.
- [21] Q. Chen, S. Yang, J. Bai, and Y. Fu, "Design of absorptive/transmissive frequency-selective surface based on parallel resonance," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4897-4902, Sep. 2017.
- [22] Y. Han, L. Zhu, Y. Chang, and B. Li, "Dual-polarized bandpass and band-notched frequency-selective absorbers under multimode resonance," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 7449-7454, Dec. 2018.
- [23] Q. Guo, Z. Li, J. Su, L. Y. Yang, and J. Song, "Dual-polarization absorptive/transmissive frequency selective surface based on tripole elements," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 5, pp. 961-965, May 2019.
- [24] H. Huang, Z. Shen, "Absorptive frequency-selective transmission structure with square-loop hybrid reson-

ator," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 3212-3215, Nov. 2017.

- [25] G. Shin, Y. Kim, S. H. An, J. H. Joo, and I. J. Yoon, "Design of a parallel resonance based frequency-

selective rasorber," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 6, pp. 415-423, Jun. 2022.

김 수 현 [부산대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0000-3927-0313>



2024년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)  
2024년 2월~현재: 부산대학교 전자공학과 석사과정  
[주 관심분야] RF, 전파 흡수체, 라조버

김 상 길 [부산대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1720-2410>



2010년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
2011년 12월: 조지아공과대학 전자공학 (공학석사)  
2014년 12월: 조지아공과대학 전자공학과 (공학박사)  
2015년 1월~2018년 2월: Qualcomm Inc.

USA

2018년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 부교수  
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

하 노 점 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4827-6877>



2019년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)  
2022년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)  
2025년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학박사)  
2025년 2월~현재: 한화시스템 전문연구

원

[주 관심분야] 전파 흡수체, RF-Photonics