Modern Physics 现代物理, 2026, 16(6), 217-225
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mp
https://doi.org/10.12677/mp.2026.166023

Hans汉斯

人工电磁表面的多维度调控演进：“频率选择表面”到“智能电磁皮肤”

孙曼丽

贵州大学大数据与信息工程学院，贵州 贵阳

收稿日期：2026年10月4日；录用日期：2026年10月26日；发布日期：2026年11月3日

摘　要

随着无线系统激增，空间电磁环境日趋复杂，如何在维持传播空间基本形态的前提下实现对特定频率、能量及传播状态电磁波的选择性调控，已成为现代电磁技术的关键问题。频率选择表面(FSS)由周期/准周期单元构成，利用单元谐振与耦合产生特定的反射与透射响应，被誉为空间中的“电磁滤波窗”。本文从电磁波传播和谐振基础理论出发，阐释FSS的空间滤波机理、等效电路模型及能量分配过程，并综述频率选择吸波体、可重构FSS及能量选择表面等衍生技术的发展。研究表明，人工电磁表面正从固定频率选择向吸收－透射协同、动态调谐、功率自适应及可编程多自由度调控演进，柔性基材、透明导电材料与印刷电子技术则为其轻量化、共形化与大面积制造提供了支撑。文章进一步探讨“智能电磁皮肤”的技术内涵，指出其本质并非单一FSS结构，而是由人工电磁单元、可调器件、环境感知、数字控制与算法决策集成的综合调控系统，有望推动电磁表面从被动滤波向主动感知与自适应调控跃升。

关键词

频率选择表面，空间滤波，频率选择吸波体，可重构超表面，能量选择表面，智能电磁皮肤

The Multi-Dimensional Regulation Evolution of Artificial Electromagnetic Surfaces: From Frequency-Selective Surfaces to Intelligent Electromagnetic Skins

Manli Sun

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: October 4, 2026; accepted: October 26, 2026; published: November 3, 2026

文章引用: 孙曼丽. 人工电磁表面的多维度调控演进: “频率选择表面”到“智能电磁皮肤” [J]. 现代物理, 2026, 16(6): 217-225. DOI: 10.12677/mp.2026.166023

Abstract

With the rapid growth of wireless systems, the space electromagnetic environment has become increasingly complex. How to achieve selective control of electromagnetic waves of specific frequencies, energies, and propagation states while maintaining the basic form of the propagation space has become a key issue in modern electromagnetic technology. Frequency-selective surfaces (FSS) are composed of periodic/periodic units, and by using the resonances and couplings of these units to generate specific reflection and transmission responses, they are known as "electromagnetic filtering windows" in space. This paper starts from the basic theories of electromagnetic wave propagation and resonance, explains the spatial filtering mechanism, equivalent circuit model, and energy distribution process of FSS, and reviews the development of frequency-selective absorbing bodies, active reconfigurable FSS, and energy-selective surfaces and other derivative technologies. Research shows that artificial electromagnetic surfaces are evolving from fixed frequency selection to absorption-transmission synergy, dynamic tuning, power adaptation, and programmable multi-degree-of-freedom control. Flexible substrates, transparent conductive materials, and printed electronic technologies provide support for their lightweight, conformal, and large-area manufacturing. The article further explores the technical connotation of "intelligent electromagnetic skin", pointing out that its essence is not a single FSS structure, but a comprehensive control system integrating artificial electromagnetic units, adjustable devices, environmental perception, digital control, and algorithm decision-making, which is expected to promote the leap of electromagnetic surfaces from passive filtering to active perception and adaptive control.

Keywords

Frequency Selection Surface, Spatial Filtering, Frequency-Selective Absorbing Body, Reconfigurable Ultrastructure, Energy Selection Surface, Intelligent Electromagnetic Skin

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 频率选择表面：操控电磁波的物理基础

1.1. 电磁波与空间频率选择

人们能够直接观察到可见光，却无法依靠感官察觉手机通信、卫星导航、无线网络和雷达系统使用的大多数电磁波。实际上，可见光仅占电磁频谱很小的一部分。无线通信和雷达所采用的无线电波、微波及毫米波与可见光具有相同的电磁本质，只是频率和波长不同。

在真空中，电磁波频率 f、波长 λ 与传播速度 c 满足：

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1}$$

其中，c 约为 3.0×10^8 m/s。由此可知，频率越高，相应波长越短。不同波长的电磁波与人工结构相互作用的方式也存在差异，这为通过几何结构实现频率选择提供了基本物理条件。

普通金属板在宽频带内呈强反射特性，而 FSS 由周期性排列的金属贴片、缝隙或谐振单元构成，入射波激发表面感应电流与单元间耦合，当单元尺度与波长满足特定条件时，即可对不同频率呈现差异化响应。因此，FSS 被视为自由空间的“空间滤波器”[1]，相关综述指出其已由早期贴片和孔径阵列发展

为多层、三维及多功能结构，应用于电磁屏蔽、天线、吸波及无线通信等领域。若将无线频谱比作多车道道路，FSS 则类似于依据“频率身份”进行通行管控的规则体系。

1.2. 周期单元与电磁谐振机制

FSS 能够选择频率，其核心原因之一是人工单元具有谐振特性。以最基本的金属环、贴片或缝隙单元为例，电磁波照射后，导体表面的电流路径表现出一定的等效电感特征，而相邻金属边缘之间的电荷积聚又会形成等效电容。因此，很多 FSS 可以在一定频率范围内近似等效为由电感 L 和电容 C 构成的谐振网络。

其基本谐振频率可近似表示为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2}$$

由上式可直观理解 FSS 的设计思想：金属路径长度影响等效电感，缝隙宽度与介质介电常数影响等效电容，各参数共同决定工作频率。可见，看似简单的几何图案背后，实为电磁场、电流路径与 LC 耦合的协同作用。需指出的是，实际 FSS 无法完全由理想 LC 电路描述，频率升高、结构多层化及斜入射时，单元间耦合、高阶 Floquet 模式及介质损耗均会产生影响；但等效电路模型仍是将复杂电磁结构转化为直观电路参数的重要方法[2]。

1.3. 电磁波的反射、透射与吸收

一束电磁波到达人工电磁表面后，其能量主要具有三种去向：反射、透射和吸收。在微波工程中，可以利用散射参数$|S_{11}|$和$|S_{21}|$描述结构的反射和透射特性。在忽略其他能量通道时，其反射率 R、透射率 T 和吸收率 A 可分别表示为

$$R = |S_{11}|^2 \tag{3}$$

$$T = |S_{21}|^2 \tag{4}$$

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \tag{5}$$

对于理想无损 FSS，吸收部分通常较小，因此入射能量主要在反射和透射之间重新分配。例如，在 FSS 的通带内，$|S_{21}| \approx 1$，意味着较多电磁能量能够穿过表面；而在阻带内，$|S_{11}| \approx 1$，则意味着入射波主要被反射。

由此可以看出，FSS 真正控制的并不是“电磁波是否存在”，而是电磁能量在不同传播路径中的重新分配。这一基本认识也是理解后续吸波、可重构和功率自适应电磁表面的基础。

2. 从“电磁滤波窗”到多功能电磁表面

2.1. 传统 FSS：给电磁波安装一扇“选择性窗口”

FSS 较早的重要应用之一是频率选择雷达罩。

雷达和通信天线通常需要外部结构进行空气动力学和环境防护，但普通材料可能对天线的正常辐射造成影响。如果将具有带通特性的 FSS 集成于雷达罩中，便可使工作频段附近的电磁波保持较高透射，而对其他频率产生较强反射。

其理想工作状态可以简化表示为：

$$\begin{cases} T \to 1, & f \in f_{\text{work}} \\ R \to 1, & f \notin f_{\text{work}} \end{cases} \tag{6}$$

即工作频率被“放行”，非工作频率被“拒绝”。这种特性使 FSS 逐渐被应用于雷达罩、电磁屏蔽、天线隔离、无线信号覆盖和室内电磁环境调控等领域[2]。

近年来，透明 FSS 又进一步拓展了“电磁窗口”的含义。2025 年的研究采用细金属线构造透明 FSS，在毫米波频率实现较宽透射频带的同时，单层结构的可见光透明度可达到 84%，并保持一定的斜入射稳定性[3]。其潜在应用包括建筑窗户、车辆玻璃、无人机以及透明雷达罩等。

因此，一块从视觉上仍然接近透明的玻璃，在电磁波看来却可能已经是一张具有明确频率规则的滤波器。这种“视觉透明而电磁可控”的差异，正体现了人工电磁结构利用不同波长尺度实施功能设计的特点。

2.2. FSR：从“挡住电磁波”到“吸收电磁波”

传统 FSS 面临一个根本性问题：被反射的电磁波并未消失，其能量仍可能贡献于雷达散射或复杂电磁兼容场景中的二次干扰。因此，人们希望在保留有用信号透射窗口的同时，将带外入射能量尽可能转化为热损耗，频率选择吸波体(FSR)由此发展起来[4]。典型 FSR 将损耗性吸收层与选频无损 FSS 相结合，其中损耗层可采用加载电阻的金属结构、图案化电阻膜或其他有损材料。早期代表性研究通过方环和交叉偶极子阵列在吸收频段内构建低插损透射窗口[5]；此后又发展出两个吸收带夹一通带的 A-T-A (吸收–透射–吸收)响应构型[6]。Chen 等设计的 FSR 在 10 GHz 附近形成透明窗口，并基于等效电路推导了电阻层与带通 FSS 满足吸收与透射的阻抗匹配条件。

从功能层面看，FSR 标志着 FSS 研究从单一“频率选择”向“频率选择 + 能量管理”的转变。当前研究已不再仅满足于实现透波与吸波的共存，而是进一步追求宽吸收带、低插入损耗、小型化与宽角稳定性等多目标协同优化。例如 2025 年的一项研究将单元周期压缩至约 $0.11\lambda_0$，并结合斜入射栅瓣理论与特征模分析，提升了 FSR 在变角度与变极化条件下的响应稳定性[7]。这表明 FSR 的设计正由追求特定频率响应曲线，转向对尺寸、角度、极化、损耗与多功能之间关系的综合优化。

2.3. 主动可重构 FSS：让“窗口位置”可以改变

传统 FSS 和大多数被动 FSR 仍然存在共同限制，即结构加工完成后，工作频率基本固定。如果一个 FSS 被设计为在某一频率产生通带，那么当通信系统工作频率改变时，它无法像电子设备一样主动“切换频道”。主动或可重构 FSS 试图解决这一问题。其基本思路是在周期单元中集成 PIN 二极管、变容二极管、MEMS 开关等可控器件，使单元的电流路径或等效电抗能够在外部电信号作用下发生变化。

以变容二极管为例，其电容量与外加偏置电压有关，可表示为：

$$C = C(V) \tag{7}$$

将其代入谐振关系，可得到：

$$f_0(V) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC(V)}} \tag{8}$$

由此可见，改变偏置电压便可能改变结构的谐振频率[8]。

PIN 二极管则可以在高频电路中承担类似“开关”的作用。当二极管导通或截止时，FSS 内部电流路径发生改变，从而产生不同的滤波状态。

2024 年的研究已经利用 PIN 二极管实现 C、X 和 Ku 波段之间不同阻带模式的动态切换，并通过实物测试验证了不同偏置状态下的频率响应[9]。ESS 通过非线性器件引入功率响应维度，使人工电磁表面在频率选择基础上进一步具备根据入射电磁场强弱自适应改变状态的能力；其功率阈值受器件参数及环

境因素影响，且正从单一频段防护向宽带、多阈值及新型材料方向拓展，并与吸波功能逐步融合，为后续智能电磁表面的发展奠定了基础。

2.4. 能量选择表面：不仅关注频率，还能响应电磁波“强弱”

传统 FSS 依据入射频率产生相应透射或反射响应，而能量选择表面(ESS)则在此基础上引入对入射功率水平的响应能力——频率相同而功率不同的电磁波可呈现不同电磁特性。ESS 通常借助加载于周期单元中的 PIN 二极管等非线性器件实现[10]。低功率入射时，器件维持高透射态，保障通信或探测信号顺利通过；当功率升至阈值，器件等效阻抗发生突变，改变单元电流路径与表面阻抗，使结构转入反射、屏蔽或吸收状态。

如果进行简化描述，传统 FSS 的散射响应主要可表示为：

$$S = S(f) \tag{9}$$

其中，f 为入射电磁波频率。而对于 ESS，其响应还与入射功率有关，可进一步表示为：

$$S = S(f, p) \tag{10}$$

其中，P 表示入射功率或相应的电磁场强度水平。上述表达说明，与主要依赖频率产生响应的传统 FSS 相比，ESS 增加了一个与入射信号“强弱”相关的调控维度。

其工作过程可以进一步概括为：

$$\begin{cases} P < P_{th}, & \text{正常信号透射} \\ P \geq P_{th}, & \text{反射、屏蔽或吸收} \end{cases} \tag{11}$$

其中，P_{th} 为结构发生明显非线性状态转换时对应的等效功率阈值。需要指出的是，该阈值并非完全固定不变，在实际系统中还可能受到器件参数、工作频率、入射波形以及结构设计等因素影响。

ESS 的功率阈值 P_{th} 并非固定不变，实际中受器件参数、工作频率、入射波形及结构设计等因素影响。近年来 ESS 已从特定频段防护向宽带、多阈值及新型材料方向拓展，V_{O2} 等变电磁特性材料开始用于高频自适应防护。此外，能量选择与吸波技术逐步融合，如能量选择吸波体在低功率时保持 A-T-A 响应使正常信号通过，高功率时转入宽频吸收态，实现对异常能量的抑制[11]。ESS 的核心变化可概括为“频率选择–频率与功率协同响应”，表明人工电磁表面开始根据入射强弱自适应调整状态，为后续智能表面发展奠定基础。

Table 1. Comparison of functional characteristics of different artificial electromagnetic surfaces
表 1. 不同人工电磁表面的功能特征对比

文献	类型	工作频段	插入损耗	调谐范围/响应时间
[12]	FSS	2.4, 3.3, 5.2 GHz	0.92~2.15 dB	支持 TE/TM 独立调控
[13]	FSR	3.25~17.2 GHz	0.4 dB	模式可切换
[14]	可重构 FSS	2.18~9.53GHz	<3 dB	连续调谐
[15]	ESS	0~7.64 GHz	<3 dB	响应时间依赖 PIN 管

表 1 表明，人工电磁表面经极化调控、模式切换、连续调谐和功率自适应等机制拓展调控自由度，呈“静态选择–动态可调–环境自适应”演进，为“智能电磁皮肤”奠定基础。

3. 面向“智能电磁皮肤”的发展路径与关键问题

3.1. 从单一选频向多自由度电磁调控发展

如果说传统 FSS 的核心任务是回答“什么频率可以通过”，那么现代可重构超表面的研究目标已经明显扩大。除了幅度以外，电磁波还具有相位、极化、传播方向和时间变化等多个自由度。通过对大量亚波长单元进行独立或分组调节，可重构超表面能够改变反射波或透射波的空间相位分布，从而实现波束偏转、聚焦、散射调控以及信息编码。

2026 年的综述将可重构超表面在雷达中的应用归纳为信号产生与调制、雷达干扰与欺骗、散射控制与隐身、到达方向估计以及雷达通信一体化等多个方面，表明人工电磁表面正在由单纯的无源器件向系统级功能平台发展[16]。另一项 2026 年的综述进一步指出，可重构电磁超表面正在同时利用空间、频率、极化和时间等自由度开展多域复用，其长期目标之一是构建通信、感知和计算共同参与的智能电磁环境[17]。因此，可以用下式概括电磁表面调控能力的变化：固定频率选择 - 可调频率选择 - 多自由度重构 - 环境自适应。这里的“智能电磁皮肤”可以理解为这一演变过程的系统级形象表达。

理想情况下，它应至少具备以下闭环过程：环境感知 - 信息判断 - 状态重构 - 电磁响应 - 反馈修正。例如，当表面检测到正常通信信号时，可以维持低损耗透射；当检测到异常强电磁信号时，可转入保护状态；当目标方向发生变化时，又可以重新调整表面相位分布。此时，表面不再只是被动地“接受电磁波”，而开始成为电磁系统中的主动组成部分。

3.2. 柔性、透明与印刷技术推动“皮肤化”

若智能电磁表面需覆盖飞行器、车辆或建筑物等复杂物体，传统刚性 PCB 结构将受限于曲率适配、重量及加工面积等因素。近年来，柔性与印刷电磁器件因此受到广泛关注。丝网印刷、喷墨打印、电流体动力打印及卷对卷制造等技术可将导电图案直接形成于 PET、PI 等柔性聚合物基材上，相较于传统铜箔腐蚀工艺，更适用于低成本、大面积及曲面集成场景。2025 年相关综述指出，当前导电材料已涵盖金属纳米颗粒墨水、导电聚合物及金属纳米线等体系，相应制造方法覆盖多种印刷技术，应用范围涉及天线、超材料吸波体及 FSS 等领域[18]。这意味着未来人工电磁表面不再表现为明显的刚性“电路板”，而可能呈现为可弯曲薄膜、曲面贴附层、具有一定透明度的玻璃涂层或直接印刷于设备外壳的导电图案。因此，“电磁皮肤”中的“皮肤”并非仅作形象化比喻，亦反映了人工电磁器件由传统刚性、平面、独立式结构向薄型化、柔性化、共形化、透明化及结构功能一体化方向发展的实际趋势。

3.3. 从实验室电磁性能走向真实工程环境

实验室研究中，FSS 的性能通常以反射系数$|S_{11}|$、透射系数$|S_{21}|$、中心频率、工作带宽及插入损耗等指标评价，借助周期边界条件与理想平面波激励可较准确地分析单元的基本电磁响应。然而，实际应用中入射角度、极化方式、结构曲率、材料损耗及温度、机械载荷等条件均可能偏离理想状态，实验室测得的电磁性能并不能完全代表工程应用水平。

首先，入射角与极化方式是影响 FSS 实际性能的重要因素。理想分析通常假设垂直入射，而雷达罩、飞行器蒙皮等实际场景中电磁波常从不同方向照射表面。入射角增大时，TE/TM 极化下的波阻抗、单元间耦合、空间相位差及高阶 Floquet 模式均可能发生变化，引起谐振频率漂移、透射下降或吸收带变化。为此，减小单元电尺寸、提高宽角稳定性已成为设计重点，近年研究通过单元小型化、对称结构及特征模分析等方法在一定程度上降低了斜入射的不利影响。

其次，可重构能力的提升往往伴随附加损耗与结构复杂度的增加。PIN 二极管、变容二极管及偏置网络虽能实现频率和状态的动态调节，但其寄生电感、寄生电容及导通损耗不可忽略，偏置线路还可能

破坏结构对称性，影响极化稳定性。因此，可重构功能的增加并不意味着各项性能同步提升，实际设计需在工作带宽、插入损耗、调谐范围、厚度、控制复杂度与制造成本之间综合权衡。

此外，结构可靠性是 FSS 工程化必须考虑的问题。以飞行器雷达罩为例，表面电磁功能层不仅需满足透射、反射或吸收要求，还可能长期承受高温、振动、冲击及气动载荷。近期研究将 FSS、图案化电阻膜与纤维陶瓷等承载结构结合，在实现电磁功能的同时兼顾耐高温与机械性能[15]，表明研究目标正由单一电磁指标优化向电磁、材料与结构协同设计转变。

综上，未来 FSS 的工程化发展不应仅关注理想频率响应，还需综合考虑入射条件、器件损耗、环境适应性与结构可靠性等因素。对于面向实际装备的“智能电磁皮肤”而言，电磁、材料与结构的多学科协同是其从实验室原型走向应用的重要基础。

3.4. 实现“智能电磁皮肤”所面临的跨学科挑战

随着有源器件与人工智能技术的引入，“可重构”“自适应”与“智能”三者需加以区分：可重构是状态可调，由预设指令驱动；自适应是环境驱动，由外部条件直接触发响应；智能则是自主决策，构建“环境感知–信息处理–状态决策–电磁调控–反馈修正”的完整闭环，三者体现控制能力由低到高的递进。

实现“智能电磁皮肤”面临三大跨学科挑战：

(1) 系统集成与电磁兼容。将传感、计算与控制功能集成于亚波长薄层中，首要难题是传感模块与电磁调控功能的电磁兼容——传感电路引入的寄生参数和散射源可能干扰主通路响应，对系统信噪比与抗干扰能力提出极高要求。近年来已有仿生电容式电子皮肤通过集成液态金属薄膜，在同一软平台上实现了多模态感知与可拉伸电磁干扰屏蔽的兼容设计[19]。此外，时域调制电磁皮肤(TM-EMS)的研究表明，通过将传感功能与波束调控功能深度融合，可为通感一体化系统提供新的物理层实现路径[20]。

(2) 供能与热管理。大规模有源器件集成导致功耗与热积累问题，局部热效应可使器件参数漂移甚至失效[21]。中国科学技术大学团队开发的皮革基电子皮肤，亦在 1.6 mm 厚度下实现了约 75 dB 的电磁屏蔽效能与 3.0 V 供电下 110℃的焦耳热性能，验证了热–电协同设计的可行性[22]。

(3) 感知–控制算法闭环。物理层需通过有限传感节点准确重建入射波环境；控制层面临数百上千个单元的高维调控问题，传统查表或解析方法失效。Massa 教授团队提出的物理驱动人工智能框架，将严谨的电磁物理定律深度嵌入机器学习架构，为智能电磁环境的实时调控提供了低能耗、低时延的解决方案。在具体算法层面，物理–数据混合驱动的表面电流学习方法已将电磁建模推理时间平均加速 87.67%、内存消耗降低 99.24%；而双驱动人工智能在电磁无损检测中的应用，则展示了物理先验与数据驱动深度融合的可行性。

4. 结语

FSS 依托周期结构所激发的电磁谐振机制，对入射波的反射、透射与吸收能量进行重新分配，其本质为依据频率维度实现空间滤波的器件，故可形象地理解为“电磁滤波窗”。在复杂电磁环境与多功能系统需求的共同驱动下，FSS 从固定频率选择向吸透射一体、动态调谐、功率自适应及多自由度可编程调控等方向演进，柔性基材与透明导电材料等技术的进步则为其工程化应用提供了重要支撑。纵观其发展脉络，人工电磁表面的概念演进可归纳为“选择频率–管理能量–动态重构–感知与适应”四个递进阶段。值得指出的是，真正意义上的“智能电磁皮肤”并非单一的 FSS 结构，而是由人工电磁单元、可调器件、传感模块、控制与信息处理系统深度融合构成的综合电磁调控平台，能够使物体表面依据外部电磁环境与任务需求主动调整自身状态。从固定滤波到智能适应，这一跃迁标志着电磁技术向智能化、

系统化与多学科融合的方向发展。

参考文献

[1] Judice, A., Aaron James, S., Livin, J., Kumarapandian, S., Kishanlal, S.M. and Yadav, R. (2026) Frequency Selective Surfaces for the Future of Wireless Technologies, Trends, and Applications. *Journal of Applied Physics*, **139**, Article ID: 100702. https://doi.org/10.1063/5.0300013

[2] Kapoor, A., Mishra, R. and Kumar, P. (2022) Frequency Selective Surfaces as Spatial Filters: Fundamentals, Analysis and Applications. *Alexandria Engineering Journal*, **61**, 4263-4293. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.09.046

[3] Nguyen, D.T. and Jung, C.W. (2025) Transparent Frequency Selective Surfaces with High Optical Transparency and Wide Bandwidth for 5G Mm-Wave Spatial Filtering Applications. *Optik*, **336**, Article ID: 172440. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2025.172440

[4] Shen, Z., Wang, J. and Li, B. (2016) 3D Frequency Selective Rasorber: Concept, Analysis, and Design. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **64**, 3087-3096. https://doi.org/10.1109/tmtt.2016.2604385

[5] Shang, Y., Shen, Z. and Xiao, S. (2014) Frequency-Selective Rasorber Based on Square-Loop and Cross-Dipole Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **62**, 5581-5589. https://doi.org/10.1109/tap.2014.2357427

[6] Chen, Q., Sang, D., Guo, M. and Fu, Y. (2018) Frequency-Selective Rasorber with Interabsorption Band Transparent Window and Interdigital Resonator. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **66**, 4105-4114. https://doi.org/10.1109/tap.2018.2835671

[7] Pang, X., Zhao, S., Men, W. and Liu, S. (2025) Design of Miniaturized Frequency Selective Rasorber with High Angular Stability. *Optics Communications*, **591**, Article ID: 132113. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2025.132113

[8] Wu, L., Zhong, S., Huang, J. and Liu, T. (2019) Broadband Frequency-Selective Rasorber with Varactor-Tunable Interabsorption Band Transmission Window. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **67**, 6039-6050. https://doi.org/10.1109/tap.2019.2916739

[9] Güler, C., Esen Bayer Keskin, S. and Türker Tokan, N. (2024) Dynamic Frequency Switching of a Bandstop Reconfigurable Frequency Selective Surface with PIN Diodes for C/X and Ku-Band Shielding Applications. *AEU—International Journal of Electronics and Communications*, **183**, Article ID: 155402. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155402

[10] Lv, J., Luo, C., Zhao, J., Han, H., Lu, H. and Zheng, B. (2025) Development of Energy-Selective Surface for Electromagnetic Protection. *Micromachines*, **16**, Article No. 555. https://doi.org/10.3390/mi16050555

[11] Gao, X., Huang, X., Zhang, Y. and Hou, W. (2026) Broadband Adaptive Energy Selective Rasorber for Enhanced Electromagnetic Shielding. *Optics & Laser Technology*, **199**, Article ID: 115053. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2026.115053

[12] Wang, Z., Zhu, H., Jin, S., Guo, D., Gan, X. and Lyu, X. (2026) A Miniaturized and Angular Stability Switchable Frequency Selective Surface. *Microwave and Optical Technology Letters*, **68**, e70578. https://doi.org/10.1002/mop.70578

[13] Mooda, R., B, M. and S, R. (2026) A High Angular Stability A-T-A Rasorber with Enhanced Absorption Bandwidth and Low In-Band Insertion Loss. *AEU—International Journal of Electronics and Communications*, **211**, Article ID: 156309. https://doi.org/10.1016/j.aeue.2026.156309

[14] Jing, L., Zhang, L. and Ding, X. (2026) A Wideband Reconfigurable FSS with Tunable Transmission, Reflection, Absorption, and RCS Regulation. *Physica Scripta*, **101**, Article ID: 225510. https://doi.org/10.1088/1402-4896/ae721e

[15] Hong, J., Wang, Y., Yang, Z. and Li, H. (2025). A Broadband Energy-Selective Surface with Ultra-Wideband and Fast Roll-Off Characteristics. 2025 *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium* (*ACES-China*), Huangshan, 8-11 August 2025, 1-3. https://doi.org/10.23919/aces-china66523.2025.11333256

[16] Qian, B., Chu, H., Guo, Y. and Zhao, Z. (2026) A Review of Reconfigurable Metasurfaces for Radar Applications. *iScience*, **29**, Article ID: 116348. https://doi.org/10.1016/j.isci.2026.116348

[17] Li, F., Xiao, G., Li, P. and Zhu, W. (2026) Reconfigurable Metasurfaces and Meta-Devices with Multi-Domain Multiplexing. *Device*, **4**, Article ID: 101175. https://doi.org/10.1016/j.device.2026.101175

[18] Jepiti, P., Kim, J., Bark, S. and Lim, S. (2025) Transparent and Printed RF Electronics: A Comprehensive Review of Materials, and Applications. *Materials & Design*, **258**, Article ID: 114583. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114583

[19] Ruan, Y., Hou, J., Li, Y., Du, J. and Qiu, J. (2026) A Readily Manufacturable Biomimetic Capacitive e-Skin for Sensing, Recognition, and Interactive Control in Electromagnetically Complex Environments. *Small*, e75006. https://doi.org/10.1002/smll.75006

[20] Poli, L., Bansal, A., Oliveri, G., Aaron Angel, S., Whittow, W. and Massa, A. (2025) Time-Modulated EM Skins for Integrated Sensing and Communications. *IEEE Journal of Selected Topics in Electromagnetics, Antennas and Propagation*, **1**, 237-248. https://doi.org/10.1109/jsteap.2025.3605882

[21] Wang, Y.R., Guan, D., Cai, Y.Z., *et al*. (2026) A Review of Research on Multifield Coupled Design and Multifunctional Integration of RF Smart Skins. *Modern Radar*, **48**, 1-24.

[22] Meng, X., Wang, J., Chen, Q., Xuan, Z., Wu, Z., Zhang, Y., *et al*. (2025) Boosting Flexible Thermal Management and Absorption-Dominant Electromagnetic Shielding through Surface Engineering of Electrochemically-Exfoliated Graphene. *Chemical Engineering Journal*, **511**, Article ID: 162262. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.162262