

超表面阻抗匹配层在电磁无损检测信号增强中的应用研究综述

郝彤^{1,2}, 郑吴安^{1,2}, 李晓静^{2,3}

(1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学空间信息科学与可持续发展应用中心, 上海 200092;
3. 同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 电磁无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)是一种非侵入型介质内部信息检测与评估方法, 广泛应用于生物医学检测、建筑内部损伤探测与定位、地下空间及介质内部目标识别与成像等领域。在检测过程中, 信号进入待测介质(Material Under Test, MUT)内部前会在空气-MUT交界面产生反射, 反射信号不仅不携带任何有用信息, 还减弱了探测信号的总能量。因此, 通过阻抗匹配的方式消除空气-MUT交界面的反射, 能够提高信号透射率, 进而有效增加NDT回波信号的强度。电磁超表面作为一种新颖的匹配层结构, 在NDT信号增强领域得到了广泛应用。本文从阻抗匹配的原理出发, 综述其在生物医学检测、水体内外信号传输、室内信息穿墙交互及地下管线增强探测等方面的发展与应用, 总结现阶段超表面阻抗匹配层在应用中的需求、面临的困难与挑战, 为NDT及信号传输增强领域中阻抗匹配技术的发展提供参考与启发。

关键词: 无损检测(NDT); 阻抗匹配; 超表面; 信号增强; 探地雷达; 目标识别

基金项目: 国家自然科学基金(No.42074179)

中图分类号: TN82; P66

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)07-2539-19

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20241070

Review on the Application of Metasurface-Based Impedance Matching Layer for Non-Destructive Testing Signal Enhancement

HAO Tong^{1,2}, ZHENG Wu-an^{1,2}, LI Xiao-jing^{2,3}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Center for Spatial Information Science and Sustainable Development Applications, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Electromagnetic non-destructive testing (NDT) is a non-invasive method for detecting and evaluating the internal information of various media. It is widely used in various fields, including biomedical detection, localization of internal damage in buildings, and identification and imaging of targets within underground spaces and other media. During the testing process, reflections at the air-material under test (MUT) interface before entering the interior of the MUT. The reflected signals not only carry no useful information but also attenuate the total energy of the detection signal. Therefore, eliminating the reflections at the air-MUT interface through impedance matching can enhance the signal transmission efficiency, thereby effectively increasing the strength of the NDT echo signals. Metasurfaces, a novel type of impedance-matching structures, have been widely applied in NDT signal enhancement scenarios. This paper reviews the principles of impedance matching and its development and applications in various fields, including biomedical detection, signal transmission in and out of water bodies, indoor information penetration through walls, and enhanced detection of underground pipelines. It also summarizes the current requirements, challenges, and difficulties associated with the practical application of metasurface-based impedance matching layers. This work aims to provide references and insights for the advancement of impedance matching techniques in the field of NDT and signal transmission enhancement.

Key words: non-destructive testing (NDT); impedance matching; metasurfaces; signal enhancement; ground penetrating radar; target recognition

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.42074179)

1 引言

无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)是一种无需破坏被测物体但能对其内部结构和性质进行探测和评估的技术,包括渗透检测(Penetrant Testing, PT)、磁粉检测(Magnetic Particle Testing, MPT)、射线检测(Radiographic Testing, RT)、红外热成像(Infrared Thermography, IT)、电磁波探测(Electromagnetic Testing, ET)、超声检测(Ultrasonic Testing, UT)、涡流检测(Eddy Current Testing, ECT)等及其组合形式^[1-3]。这些技术在生物医学成像^[4]、仪器与金属损伤评估^[5]、建筑内部损伤定位^[6]、地下空间目标识别^[7]等领域发挥着重要作用。在各类NDT方法中,电磁NDT技术尤为常见,包括磁流泄漏法(Magnetic Flux Leakage, MFL)、ECT、永磁扰动检测(Permanent Magnetic Perturbation, PMP)及探地雷达探测(Ground Penetrating Radar, GPR)^[8,9]等。GPR技术因工作频带宽(从几十兆赫兹到十几吉赫兹)、成像分辨率高及数据信息丰富等特点,成为应用范围最广且最有效的NDT手段之一^[10]。随着该技术的发展,GPR已从单一的缺陷或目标位置探测设备,发展为集检测、成像、诊断及连续监测为一体的系统,数据形式也从一维发展到三维及动态三维,能够多尺度、多角度地展示介质内部目标信息,并实现信息的自动提取^[10,11]。随着检测目标的精细化、检测范围的全面化和检测尺度的多元化发展,后期多尺度大范围数据的处理、融合及建模等过程对原始数据质量提出了更高的要求^[12,13]。

为提高雷达数据的精度和分辨率,研究者开发了多种图像后处理方法^[14-16],包括数据偏移(Migration)、合成孔径处理(Synthetic Aperture Radar Processing)和感知压缩(Compressive Sensing)。从地震波信号处理领域引入的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)^[17]、变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)^[18]及其衍生算法能够精细地去除雷达数据的高频或低频噪声,从而进一步提高数据的信噪比^[19]。然而,尽管数据处理可以优化数据的显示与表达,但它无法从根本上提高原始数据的质量^[20]。因此,研究者通过设计宽带、多极化的天线系统^[21-23],以及整合多维数据和多种探测手段来改进原始数据的精度和分辨率^[24,25]。例如,增益型天线通过增强原始探测信号的能量,实现对回波信号的增强^[23,26]。此外,一些研究者通过在天线辐射单元正上方放置人工磁导体表面,使天线后向散射波能在不发生相位反转的情况下反射到探测方向,从而放大原始探测信号。这一方法已被广泛应

用于提高电磁探测系统的探测性能^[27,28]。

在设计雷达天线时,考虑到天线信号发射单元所在基底阻抗和空气阻抗之间的差异,通过设计特殊的基底形状或使用磁性材料实现阻抗匹配,能够在更小的天线底面高度下实现信号增益,从而有利于增益天线的小型化^[29,30]。在探地雷达探测时,空气与待测介质(Material Under Test, MUT)之间的阻抗差异使得探测信号在MUT表面产生衰减,从而减少了信号的传输距离,并降低了回波信号的质量^[31,32]。因此,实现空气与MUT之间的阻抗匹配,对于提高原始探测信号的透射率,进而提高NDT回波信号的强度,具有重要的意义。

已有理论计算表明,通过阻抗匹配消除探测信号的界面反射后,地下目标的散射场强度可显著提高,从而增强地下目标的可探测性^[33]。此外,阻抗渐变的多层介质匹配层也能消除信号在MUT表面的反射,增加信号透射率,进而提高回波信号的振幅^[34]。因此,通过阻抗匹配方式消除探测信号在MUT表面的反射,提高信号能量的透射率,能够从根本上提高NDT信号质量,是一种更加直接有效的信号增强方法,在NDT及信号传输增强等领域内具有重要的应用前景。

电磁超表面作为电磁超材料的二维形式,是由亚波长尺度的人工结构阵列组成的二维平面,能够高效调控电磁波的传播特性,包括相位、振幅和极化方式等^[35]。这些特性调节能力使其在波束调控^[36]、天线设计^[37,38]等多个领域展现出广泛的应用潜力。在阻抗匹配领域,电磁超表面的发展为不同介质间的阻抗匹配提供了新的解决方案。文献[39]的研究表明,通过电磁超表面匹配层,可以实现不同介质间的窄带阻抗匹配,且匹配层的厚度仅为介质内波长的1/18。文献[40]的研究中利用立体十字谐振器组成的双层结构,实现了更宽频(28%)的阻抗匹配。然而,双层结构的整体厚度较大,限制了其在NDT和微波领域的应用。文献[41]从宽带阻抗匹配的边界条件出发,通过求解麦克斯韦方程组获得了宽带阻抗匹配层的电性参数表达式及其色散关系,并设计了微波段的多层介质超材料结构。尽管受限于组成介质的物理性质,其实验验证带宽仅约为17%,但该模型在理论上实现了全光波段的阻抗匹配,在宽带阻抗匹配领域显示出巨大的应用潜力。

在电磁NDT领域,基于电磁超表面的阻抗匹配技术正逐渐受到重视。尽管电磁超表面结构本身具有亚波长级厚度,但其绝对厚度会随着工作频率的降低和波长的增加而增大,这限制了其在电磁NDT领域的广

泛应用. 因此, 研究者们一直致力于设计更低频、宽带且厚度更小的电磁超表面结构, 以满足 NDT 和信号传输增强的需求. 文献[42]的研究表明, 通过设计缺口谐振环阵列与待匹配介质接触, 可以实现带宽为 38% 且厚度为 1/6 波长的阻抗匹配层结构. 文献[43]则基于切比雪夫多层介质阻抗匹配层, 设计了多层超表面宽带匹配层, 实现了高达 100% 的阻抗匹配带宽. 此外, 级联结构的超表面^[44]和惠更斯结构的宽带超表面^[45, 46]也在 NDT 和信息通信领域展现出了广泛的应用潜力.

本文综述了电磁超表面阻抗匹配层在 NDT 和信号传输领域的应用. 超表面通过调控电磁波的基本特性, 增强了生物医学成像的分辨率、水下通信的稳定性、室内交互信息的穿透力以及地下目标探测的精确度. 这些应用场景详细展示了电磁超表面阻抗匹配层在信号增强方面的优越性, 同时也凸显了设计更宽带、更轻薄的超表面对 NDT 及信号增强的重要性. 随着时空超表面的发展, 可调控或具备时变特性的超表面, 将在信号阻抗匹配领域发挥越来越重要的作用. 另外, 阻抗匹配不仅在 NDT 及信号传输增强等领域具有重要应用, 还在设备集成和仪器制造等领域发挥关键作用.

2 电磁阻抗匹配的原理

电磁阻抗匹配是指在电磁信号传播过程中, 通过匹配层消除由于两种介质阻抗差异在其交界面引起的反射. 在如图 1(a) 所示的模型中, 假设空气的阻抗为 Z_0 , MUT 的阻抗为 Z_{MUT} . 当电磁波从空气入射到 MUT 表面时, 由于两种介质之间的阻抗差异, 会在交界面产生反射. 反射系数 Γ 的大小可以根据空气及 MUT 的阻抗值计算获得, 且反射能量与阻抗差异的大小成正比. 这种反射能量损失导致透射到 MUT 内部的有效信号能量减少, 进而影响电磁 NDT 系统的探测深度. 如图 1(b) 所示, 当空气和 MUT 之间放置阻抗匹配层, 匹配层的阻抗值满足阻抗匹配的条件 $Z_M = \sqrt{Z_0 Z_{MUT}}$, 匹配层的厚度满足匹配层介质中波长的 1/4 (或其奇数倍) 时, 空气-匹配层及匹配层-MUT 交界面的反射波之间会产生干涉相消, 这种干涉相消现象有效地减少了界面反射, 使得更多的信号能量能够透射进入 MUT, 从而提高了探测信号的传播距离和回波信号的强度. 在实际应用中, 阻抗匹配层的设计需要综合考虑探测信号的频率范围、MUT 的阻抗大小以及探测系统的具体要求.

如图 1(c) 所示, 与传统的介质阻抗匹配层相比, 基于电磁超表面的阻抗匹配层能够以更小的厚度实现阻抗匹配. 研究者利用相邻界面的电磁干涉理论解释使用超表面后空气-超表面界面无反射的现象, 具体而言, 空气-超表面交界面整体的反射率和透射率可表示如下^[39]:

$$\tilde{\Gamma} = \frac{r_{21} e^{i\phi_{12}} - r_{23} e^{i(\phi_{12} + \phi_{21} + \phi_{23} + 2\beta)}}{1 - r_{21} r_{23} e^{i(\phi_{21} + \phi_{23} + 2\beta)}} \quad (1)$$

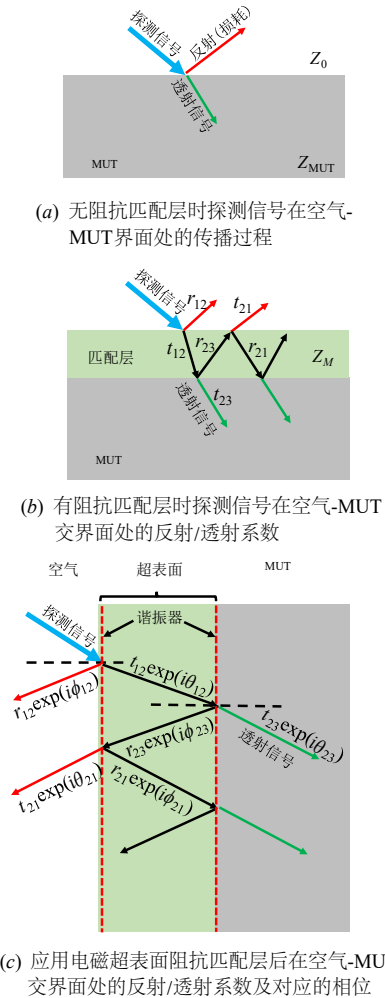


图 1 电磁探测信号在介质界面处的反射/透射模型^[32, 39]

$$\tilde{\Gamma} = \frac{t_{12} t_{23} e^{i(\theta_{12} + \theta_{23} + \beta)}}{1 - r_{21} r_{23} e^{i(\phi_{21} + \phi_{23} + 2\beta)}} \quad (2)$$

由于超表面两侧的谐振器单元阵列对电磁信号的反射相位 $\phi_{21} + \phi_{23}$ 会补偿信号在超表面介质内传播的相位延迟 β , β 的计算式为 $-\sqrt{\varepsilon_{\text{spacer}}} k_0 d / \cos(\alpha_s)$, 其中 $\varepsilon_{\text{spacer}}$ 为超表面衬底的相对介电常数, k_0 为电磁波在真空中的波数, d 为超表面的厚度, α_s 为电磁信号的入射角度. 因此相较于传统的 1/4 波长介质匹配层, 超表面在实现阻抗匹配时对其介质内的相位延迟 β 的要求更低. 由于相位延迟 β 的大小和介质的厚度成正比, 这使得其能通过更薄的厚度实现相邻界面的反射信号干涉条件, 达到阻抗匹配. 当界面的反射系数及其对应的相位满足干涉相消条件 (i) $r_{12} = r_{21} = r_{23}$ 和 (ii) $\phi_{21} + \phi_{23} + 2\beta = 0$ 时, 在该界面处即可出现无反射的电磁全透现象.

如图 1(c) 所示, r_{ij} 为电磁波从介质 i 传播到介质 j 时界面的反射系数, t_{ij} 为电磁波从介质 i 传播到介质 j 时界面的透射系数, ϕ_{ij} 为界面的反射系数对应的相位, θ_{ij}

为界面的透射系数对应的相位, i, j 分别为 1、2、3 时, 其分别指代空气、超表面和 MUT. 在超表面设计时, 使用刻录在表面的谐振环阵列调控电磁信号的反射系数及相位, 同时, 界面反射相位 ϕ_{ij} 为由超表面衬底介质厚度决定的传播相位延迟 β 提供补偿, 从而实现不同界面的电磁干涉和反射抑制. 当介质表面的反射信号被抑制后, 电磁信号的透射率 T 仅与超表面结构的吸收率 A 相关 ($T=1-A$), 例如, 当吸收率为 0 时, 电磁信号的透射率则为 1. 但在大多数情况下, 组成超表面的衬底介质层损耗不为 0, 导致吸收率一般不为 0. 因此, 需要采取以下措施: (1) 减小超表面衬底介质的厚度, 以尽可能降低其损耗并提高透射率, 但介质厚度不能无限小, 否则难以满足电磁干涉的条件 (ii); (2) 使用低损耗介质 (损耗正切值 $\tan \delta_{\text{spacer}} \approx 0$) 作为超表面结构的衬底. 由于介质板的损耗不为 0, 降低介质板的厚度通常也会影响超表面的带宽. 因此, 在超表面的设计中, 通常需要在足够小的厚度和足够大的带宽之间进行权衡, 两者难以兼顾. 此外, 超表面的厚度对其实际应用的影响显著, 不仅涉及样品打印制造的成本和便利性, 还关系到超表面结构与其他天线或仪器的集成复杂度.

为了更直观地解释电磁干涉理论下的阻抗匹配条件, 空气-超表面及超表面-MUT 界面的反射/透射系数及其对应的相位如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 实现阻抗匹配之后的界面反射/透射率如图 2(c) 所示, 超表面的等效阻抗如图 2(d) 所示.

如图 2(a) 和图 2(b) 所示, 在物理仿真软件 CST Studio Suit 中设置超表面阻抗匹配层, 通过仿真计算获得空气-超表面和超表面-MUT 交界面的反射系数和相位,

上述变量在 1.2 GHz 处满足电磁干涉条件 (i) 和 (ii). 图 2(c) 展示了基于 CST 仿真获得的界面反射系数和相位, 并通过式 (1)~(2) 计算所得的放置超表面匹配层后的空气-超表面交界面整体的反射率和透射率 (蓝色实线). 计算结果和直接仿真获得的反射率/透射率结果 (红色虚线) 高度一致, 间接验证了上述超表面干涉理论的正确性. 除电磁干涉理论外, 还可基于阻抗匹配理论, 通过计算超表面匹配层的等效电性参数, 解释放置超表面后的反射抑制和透射增强现象^[47,48]. 如图 2(d) 所示, 使用等效参数计算理论得出的超表面等效阻抗在 1.2 GHz 处满足条件 $Z_M = \sqrt{Z_0 Z_{\text{MUT}}}$. 因此, 从空气-超表面-MUT 三层介质之间的阻抗关系也能反映出电磁信号在 1.2 GHz 处满足反射系数幅值关系 (i). 另外, 传统的介质阻抗匹配层通常需要 $1/4$ 波长厚度, 以满足匹配层前后表面反射系数相位相差 $2\beta = 180^\circ$ 的干涉条件. 然而, 电磁超表面的表面谐振环阵列产生的反射相位会对传播相位 β 产生一定的相位补偿, 使其匹配层整体厚度可以小于 $1/4$ 波长. 当反射系数的相位补偿和介质中信号传播的相位延迟之和满足 $\phi_{21} + \phi_{23} + 2\beta = 0$ 的条件时, 即可实现电磁干涉, 这也是超表面匹配层能够以更小厚度实现阻抗匹配的根本原因. 在一些超薄阻抗匹配层设计中, 当匹配层厚度极小, 例如达到深度亚波长厚度 ($< \lambda/100$) 时, 匹配层两侧的谐振环阵列不仅对反射系数提供相位补偿, 两侧谐振环阵列之间倏逝波叠加产生的近场耦合效应也会导致无反射和透射增强的现象^[49,50]. 此时, 仅考虑界面反射相位与幅值的干涉条件 (i) 和 (ii) 无法完全解释深度亚波长超表面的透射增强现象, 而需要引入倏逝波叠加对界面反射的修正.

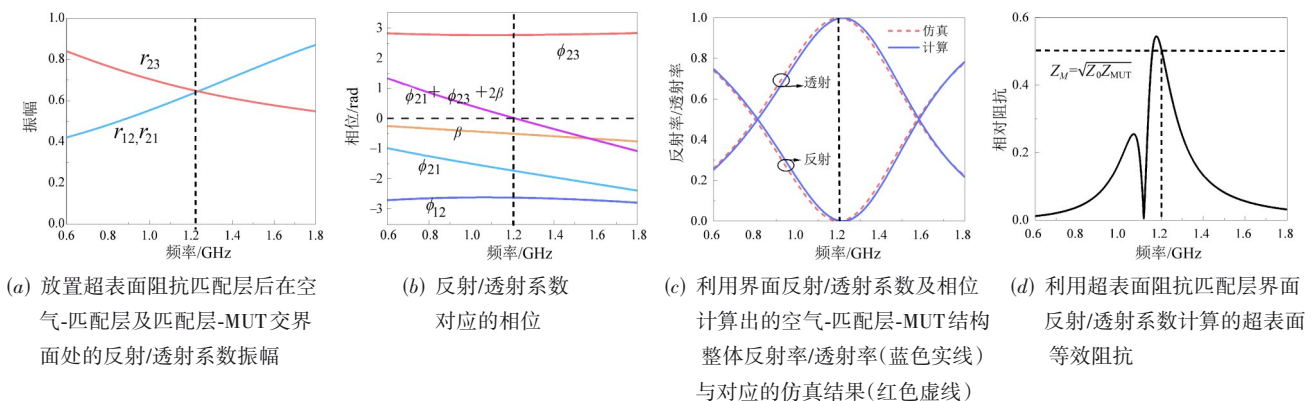


图 2 超表面电磁干涉理论及等效阻抗理论图示^[39,47]

3 电磁阻抗匹配在信号传输增强领域的研究进展

超表面阻抗匹配层结构通过精确调控电磁波的反射系数及对应的相位, 在 NDT 和信号传输增强领域展

现出显著优势. 超表面结构通常由周期性的亚波长单元阵列构成, 单元结构类型包括刻录在低损耗介质基底 (如玻璃纤维板、聚四氟乙烯板及其他光敏/热敏材料) 上的金属谐振器或一定形状的全介质单元等. 超表面的应用领域涵盖不同波段电磁波的吸收、滤波、阻抗

匹配、极化转换、波束调控及电磁隐身等多个方面,应用频段包括声波段、微波段、太赫兹波段及光波段等。当应用频段为微波段时,超表面的基本单元一般为刻录在低损耗介质基底上的金属谐振器;而在太赫兹波段或光波段时,超表面多由二氧化钒、石墨烯、砷化镓等光敏/热敏材料结合金属谐振器构成,或完全由一定形状的全介质单元按特定方式排列组合构成^[35]。在生物医学成像领域,超表面阻抗匹配层通过增强信号在人体皮肤表面的透射率,提高了检测回波信号的成像分辨率,这对人体组织内部结构的精确探测至关重要,也为早期诊断和治疗规划提供了有力支持。在水上水下信号传输领域,超表面匹配层通过消除空气与水面间的巨大阻抗差异,削减了信号在水面的强反射,增强了信号的透射率,显著提升了水下通信距离,在海洋探索和潜艇通信等领域意义重大。在室内外信息交互方面,超表面匹配层通过匹配空气与建筑结构间的阻抗差异,增强了信号的穿透力和传播距离。结合超表面的信号聚焦和透射波束调控能力,可进一步提高室内外信息传输的可靠性。在地下目标探测中,超表面阻抗匹配层能够减少探测信号的界面反射,提升信号的透射率和回波信号的强度,增强 NDT 的精度和分辨率。这些应用实例不仅展示了超表面匹配层在信号增强方面的优势,也凸显了设计更宽带、更轻薄超表面结构对于 NDT 及信号传输增强领域的重要性,为电磁超表面在这些领域的进一步发展与应用提供了研究方向。

3.1 生物和人体医学检测中的阻抗匹配

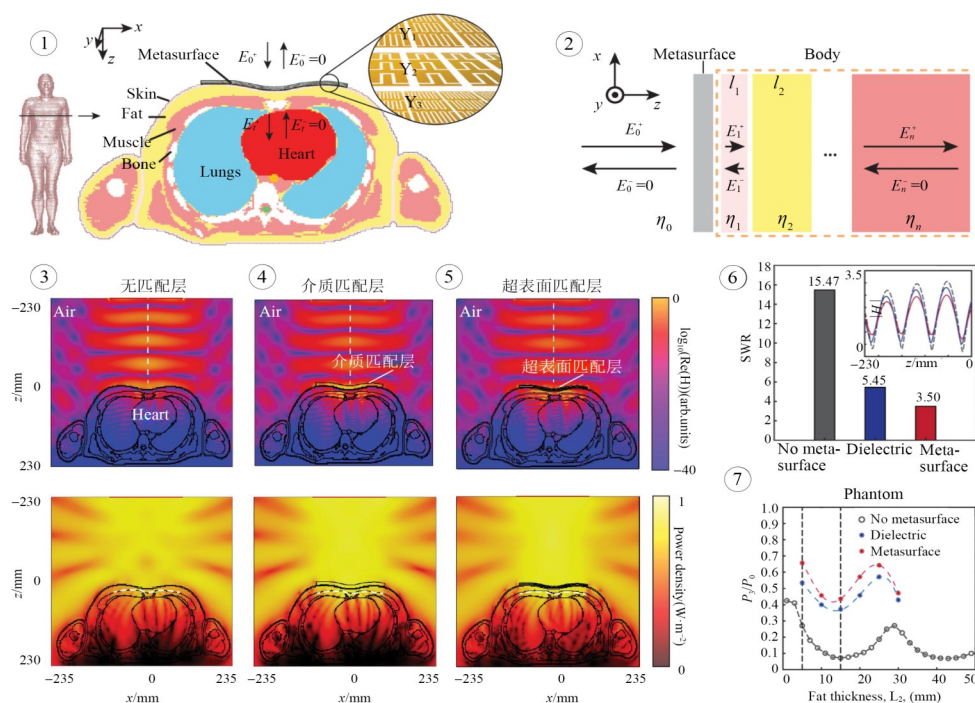
生物和人体的医学检测是 NDT 的重要分支^[4],随着各种电磁和射线成像技术的发展,医学检测的精度和成像分辨率得到了显著提高,但如何在微波频段精确定位人体细微病变仍是当今医学检测的难点。文献[51]提出使用电磁超表面对空气和生物皮肤表面进行阻抗匹配,实现空气到待测生物体内的信号传输增强,通过电磁仿真模型确认了超表面的信号增强作用。随后,文献[52]优化了超表面结构并通过简易的生物实验进一步佐证了电磁超表面的信号增强作用。文献[53]使用基于十字裂环谐振器的超表面匹配层结构实现了对人体头部检测信号的增强。通过超表面阵列与头戴扫描仪的集成,可有效提升扫描仪对弱信号的检测能力,有望进一步集成为增强型脑成像系统。随后,文献[54]通过全波模拟和实验探讨了超表面增强技术对脑卒中疾病的监测效果,同时通过数值模拟计算了肝脏内部的聚焦电场,探讨了超表面对热烧蚀监测的影响。文献[55]通过设计基于电磁超表面的三维定向检测天线系统,对模拟头部的三维模型进行检测,证明了这种系统对脑出血检测和监测的可行性。最近,文献[56]提出使用级联超表面进行人体检测信号的增强。从多层介质间的散

射和传播理论出发,推导了级联超表面在目标频带无反射条件下的空气-匹配层-MUT 之间的导纳关系,通过调控超表面单元的结构参数并使其符合一定的导纳值要求,进而实现了阻抗匹配。在超表面单元结构设计与优化过程中,所需级联超表面单元的等效导纳值可以根据待匹配介质的导纳及超表面的工作频段,按照传输矩阵模型进行理论计算,随后通过调节级联超表面单元的结构参数获得所需的等效导纳值,从而实现不同频带和阻抗匹配情况下的超表面设计优化与阻抗匹配。该研究指出,结构轻薄并能实现空气-人体阻抗匹配的级联超表面在人体检测和成像领域潜力巨大,在未来微小病理检测和健康状态实时监测等领域有广泛的应用前景。

图 3 中①为级联电磁超表面阻抗匹配层应用于人体内外电磁信号增强传输及成像的示意图。超表面贴于皮肤表面时,能够匹配空气与皮肤之间的阻抗差异,使更多检测信号进入人体内部。检测信号在体内传播时会在病变及异常位置产生反射,更强的反射回波信号可以提高后期成像的精度和分辨率。图 3 中②为级联超表面在多层介质阻抗匹配时的原理示意图。与经典的电磁信号干涉模型仅考虑匹配层不同界面的反射系数与相位不同,该模型将无反射的条件归纳为匹配层与待匹配介质之间的导纳关系。通过设计不同导纳的级联超表面阵列,可实现界面无反射及信号增强的目的。如图 3 中③~⑤所示,相较于无超表面的情况,使用超表面进行阻抗匹配后,透射进入人体的磁场强度显著增强。此外,相较于使用传统介质阻抗匹配层,厚度减半的电磁超表面可实现更好的透射增强效果。如图 3 中⑥所示,以磁场的驻波比(Standing Wave Ratio, $SWR=|H_x|_{\max}/|H_x|_{\min}$)为判断标准,相较于无超表面时测量的驻波比,超表面可将驻波比降低约 12 倍,且该性能优于更厚的传统介质匹配层。如图 3 中⑦所示,超表面可将透射率(透射能量 P_s /总能量 P_0)从 10% 提升到约 43%,优于传统介质匹配层 38% 的提升效果^[56]。通过阻抗匹配实现信号增强,不仅在医学成像上具有重要作用,还在人体佩戴或植入天线及健康监测设备的信号传输方面具有显著增强效果^[57]。如何通过优化设计减小超表面与信号传输天线的体积,提高其电磁调控的灵活性并实现与附着生物体的良好热隔离,将电磁超表面融入电磁诊断与治疗工具以及可穿戴和植入组件中,是将设备从原型阶段推进到现实应用的关键因素^[58]。因此,超表面在基于先进电子技术的健康监测领域具有重要的应用前景^[59,60]。

3.2 水上水下信号传输时的阻抗匹配

在阻抗匹配过程中,影响阻抗匹配效果的关键因素之一是待匹配介质之间的阻抗差异大小。当两种介



注: ①—级联超表面对人体检测信号传输增强过程示意图; ②—级联超表面的等效阻抗模型; ③—磁场强度(上)和功率密度(下)在无匹配层时的信号增强仿真结果; ④—磁场强度(上)和功率密度(下)在有介质匹配层时的信号增强仿真结果; ⑤—磁场强度(上)和功率密度(下)在有超表面匹配层时的信号增强仿真结果; ⑥—无匹配层、介质匹配层和有超表面时的驻波比对比(x 方向最大与最小磁场强度之比, $SWR = H_{x\max}/H_{x\min}$); ⑦—无匹配层、有介质匹配层和有超表面时的最大信号透射功率的提升效果对比。

图3 级联超表面在人体检测信号传输增强中的应用^[56]

质之间阻抗差异较小时,使用超表面或传统的介质匹配层很容易实现宽带阻抗匹配;而当阻抗差异太大时,阻抗匹配的带宽和匹配后的反射/透射率很难达到理想的要求,无法轻易实现宽频带且轻薄的匹配效果^[44,45]。水体的高相对介电常数($\epsilon = 78-11.7i$)^[44]对应的低相对阻抗值($Z=0.11$),与空气的相对阻抗($Z_0=1$)之间存在巨大差异,导致水面探测信号的强反射一直是影响水下探测距离的重要因素。如何提高空气到水下目标的信号传输与通信效率,在海洋生物分布与状态探测、海洋信息通信和定位等领域均具有重要意义^[61,62]。

如图4中①所示,文献[44]设计了一种级联超表面结构用于空气到水体之间的阻抗匹配,级联超表面按照一定的相位梯度排列构成三维聚焦透镜,可用于电磁信号从空气到水体的阻抗匹配和聚焦。当已知待匹配介质为水体及对应的相对介电常数和超表面的工作频段时,基于传输矩阵模型理论计算获得超表面的等效导纳,并调节超表面单元结构参数实现所需导纳值和透射相位,再根据不同单元的透射相位排列单元结构,使其同时实现聚焦和阻抗匹配的功能。级联超表面如图4中②所示,将超表面放置在空气-水体交界面并测量水体内部的透射信号强度,水面以下5 cm位置处的磁场强度得到了明显增强。同时,磁场在超表面透镜的焦点位置达到增强的最大值,实验结果表明:使用超表

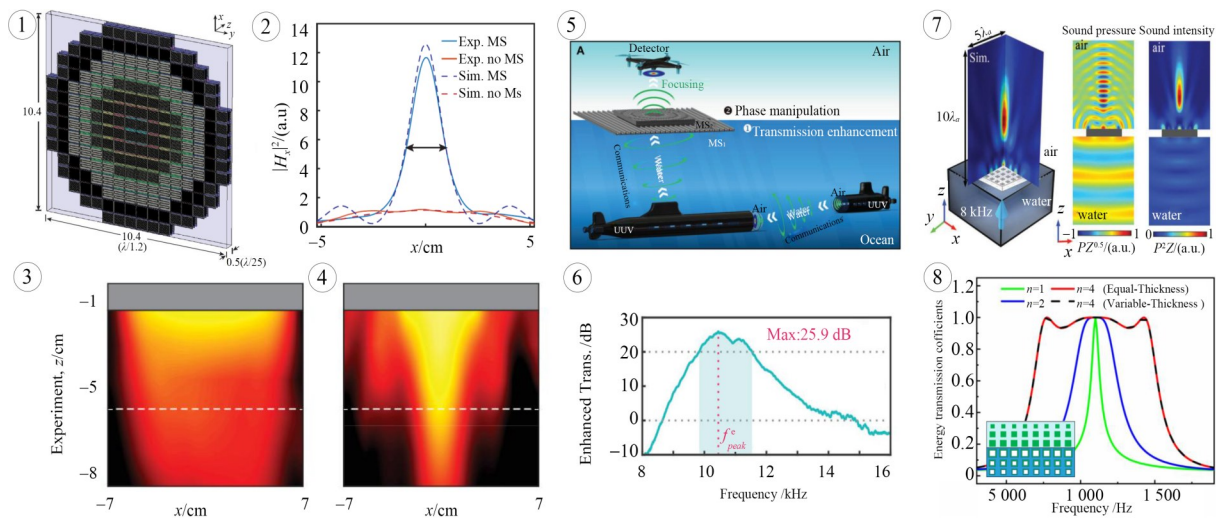
面后焦点位置的磁场强度是使用前的12倍。图4中③和④为磁场强度的二维测量结果,同样显示了超表面对信号的传输增强和聚焦作用。通过对比两幅实验结果可知,应用超表面透镜后能在一定程度上克服信号在水上水下传输时严重的发散和耗散问题。文献[63]通过将水面作为透镜的组成部分,在理论和仿真上证实了超透镜在水上水下信息传输时的增强作用,由于人体组织的构造和水体相似,因此这种阻抗匹配技术在生物成像方面有良好的借鉴意义。另外,考虑到可以使用水介质作为超表面的组成部分^[64],以水介质为构成单元的超透镜在水上水下信息传输和生物成像方面将发挥更加显著的作用。

在水上水下声波传输过程中,超表面的人工亚波长结构为空气与水体之间的阻抗匹配提供了有效的策略与辅助方案。文献[65]提出使用超表面增强声信号提高在水面的传输效率,相较于传统的1/4波长介质板,超表面厚度仅为空气中信号波长的1%。如图4中⑤所示,为了实现水下到水上通信设备之间的信息传输,文献[66]提出可使用阻抗匹配-波束调控组合超表面同时进行空气-水界面的阻抗匹配及透射后信号的波束调控与聚焦。其中,与水面接触的超表面1(MS1)具备阻抗匹配功能,放置于超表面1上方并与空气接触的超表面2(MS2)则具备相位调控与聚焦功能。超表面结构以

条形单元为基础,根据所要求的单元结构阻抗和透射相位,并基于拓扑优化算法进行结构参数调整和变形,使得最终的单元结构满足阻抗匹配和聚焦所需要的等效阻抗和透射相位,进而通过组合不同优化后的结构单元形成两层的阻抗匹配聚焦超表面.图4中⑥为使用组合超表面后对透射声场强度的增强效果,结果显示,在9.84~11.53 kHz频段内声场强度的增益高于20 dB,在10.45 kHz频段出现25.9 dB的最大增益值.使用组合超表面后不仅可以在水上水下通信时实现界面阻抗匹配,提高信号的传输效率,同时也能对透射后的信号进行相位调控,形成聚焦波形或漩涡波束,从而提高信号交互与通信的能力.

需要强调的是,水上水下通信的首选是声传播,这是由电磁信号在水体内的高衰减特性所决定的.因此,在水上水下通信领域,基于声超表面阻抗匹配的研究进展迅速,在阻抗匹配的基础上,还拓展了更多的信号调控功能,也为电磁超表面阻抗匹配应用提供了诸多借鉴.例如,文献[67]提出了由不同透射相位调控单元构成的单层超表面,可以同时实现信号的阻抗匹配与相位调控.超表面单元设计时,单元结构由方形固体介质和内部路径不规则的空气通道构成,通过改变通道的长度可实现目标透射率和透射相位,根据不同长度

通道的透射率和透射相位选择单元结构,再排列组成最终所需要的兼具阻抗匹配和聚焦功能的超表面结构.图4中⑦展示了超表面在阻抗匹配的同时对声压和声强的聚焦作用.实验数据显示,阻抗匹配能够使信号能量在界面的传输效率提高约30 dB.同时,超表面对信号的聚焦也使得焦点处的能量值相比聚焦前提高了约8 dB.因此,同时具备阻抗匹配和能量聚焦的超表面可以实现共38 dB的信号增强效果.考虑到超表面阻抗匹配带宽对其信号增强效果的限制,如图4中⑧所示,文献[68]结合空气基底和水体基底设计了梯度阻抗匹配层,实现了更宽带高效的信号传输增强效果.超表面单元结构由亚波长厚度的方形空气柱和方形水柱作为基本组成单元,通过调节空气柱单元层和水柱单元层各基本单元的大小及组合方式,形成具有一定阻抗的空气柱阵列超表面和水柱阵列超表面,并组合形成多层结构,获得目标阻抗值和透射相位,从而实现所需的阻抗匹配和信号增益功能.图4结果显示,使用了多层结构的超表面阻抗匹配层从窄带变为在730~1470 Hz内透射率大于0.9的宽带高通射,从而有效提高了信息传输的能力和效率.这种宽带超表面可以在水上水下实现图像信息传输,这类简单、有效、低成本的设计手段为高阻抗差异的宽带阻抗匹配研究提供了有效借鉴思路[69].



注:①—基于级联超表面的三维聚焦与阻抗匹配透镜;②—超表面透镜使用前后在深度5 cm的水中焦点位置磁场强度仿真与测量结果;③—空气-水阻抗匹配前磁场强度分布;④—空气-水阻抗匹配后磁场强度分布;⑤—使用组合型超表面对水上水下传输信号进行阻抗匹配与波形调控示意图;⑥—一组合超表面对水面透射信号的传输增益;⑦—使用单层超表面进行信号阻抗匹配与波形调控后增强与聚焦的三维声压和声强;⑧—宽带超表面阻抗匹配层结构与能量透射系数[68].

图4 超表面在水上水下信息传输时的阻抗匹配与聚焦作用[44,66,67]

3.3 室内信息穿墙传输时的阻抗匹配

随着信息技术与通信设备的迅猛发展,6G 通信网络建设迎来了重大变革与机遇.通信节点的密度和信息量大幅增加,对电磁信号的有效调控提出了更高的要求,提高通信的质量和效率已成为亟待解决的关键

问题之一[70].文献[71]提出使用可重构智能表面(Reconfigurable Intelligence Surface, RIS)进行波形调控,通过调节超表面单元的开关状态使入射到 RIS 表面的电磁信号产生不同的反射相位,从而实现对电磁信号的动态调控.由于这种超表面只支持反射信号的波形调

控,因此文献[72]设计了兼具反射和透射波信号调控的多功能超表面结构,可以实现多角度散射和透射波聚焦等功能.随后,文献[73]设计了全空间RIS结构,能够对空间内电磁波的反射、透射、吸收及极化进行实时调控,同时实现了电磁波的定向散射.文献[74]设计了可以对多频点信号进行调控的RIS结构,拓宽了其在无线通信领域内的应用范围.文献[75]拓展了RIS结构对电磁波的调控范围,使其能够在软件程序控制下实时动态调控电磁波的振幅、波形、方向、极化、频率及相位等性质,提高了更加复杂的波束调控能力.RIS的快速发展使其在室内外信息通信领域发挥着越来越重要的作用.但是,大多数RIS重点关注如何通过反射和散射信号的波形调控实现室内电磁信号的分布重构,在室内外穿墙通信领域的研究尚不多见^[76].利用电磁超表面实现室内穿墙通信的难点在于不仅要通过超表面实现电磁波束的散射和聚焦调控,还需要重点关注气与墙体之间的阻抗匹配问题,以确保穿墙通信的信号强度^[45].因此,研究兼具阻抗匹配和波束调控功能的可重构电磁超表面不仅在穿墙通信方面具有重要意义,相关结构和研究成果也可以延伸到穿墙雷达探测及墙外目标成像等NDT领域,对于NDT通用领域和军事反恐特定场景的发展具有重要的借鉴意义^[77,78].

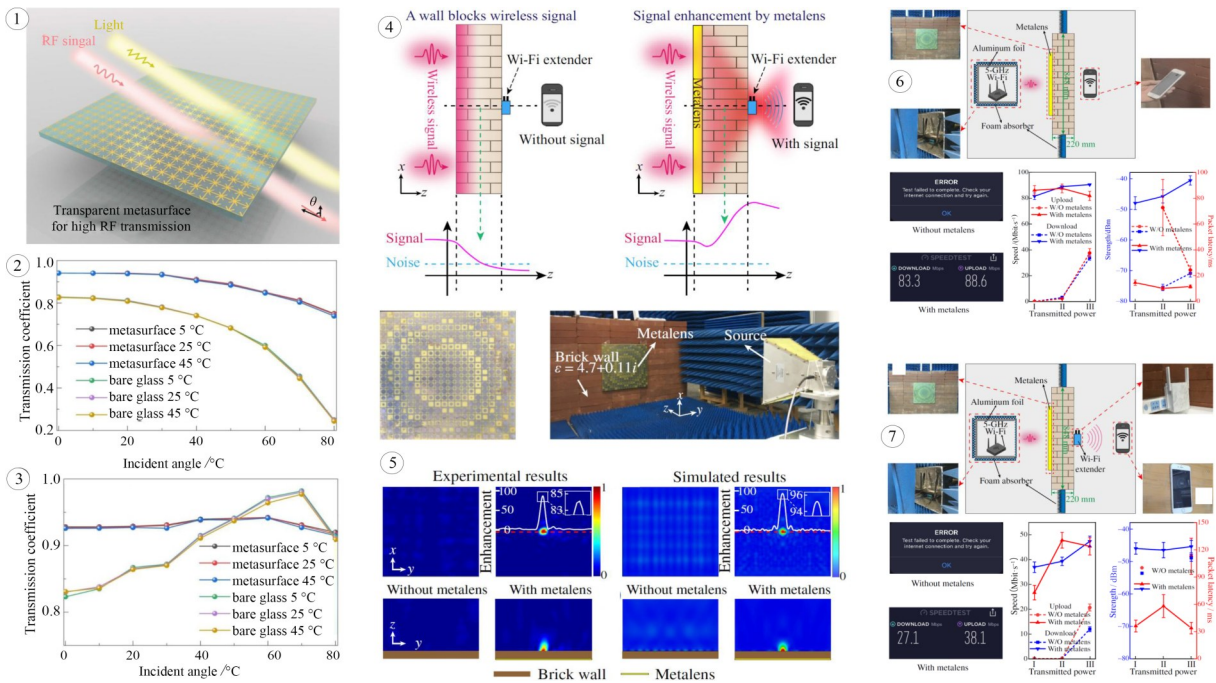
考虑到现代大多数建筑的特征,当通信信号在室内外传播经过玻璃层或玻璃覆盖的设施时,由于空气-玻璃之间的阻抗差异,信号会在玻璃界面产生反射,严重影响信号传输的质量和效率.如图5中①所示,文献[79]提出在信号传输方向的玻璃介质表面排布一定形状的谐振单元能够有效提高信号的透射率.超表面单元为刻录在玻璃衬底的裂环谐振器,通过调节谐振环宽度、谐振环内部金属条长度、周期长度及玻璃衬底厚度等关键结构参数实现所需导纳值,实现对不同角度入射信号的阻抗匹配和透射增强.如图5中②所示,在横电波(Transverse Electric Wave, TE Wave)入射时,使用超表面阵列能够有效提高信号在玻璃表面的透射率,且电磁信号入射角度越大,超表面阵列对信号透射增强的比例越大.当电磁信号入射角为 0° 时,使用超表面结构后的整体透射率能从80%左右提升至95%左右,当入射角为 80° 时,透射率能从25%提升至75%,提升量为原始透射率的3倍.更高的透射能量意味着电磁信号能够传播到更远的距离,更高效地实现信息交互,提高室内外信息通信的可靠性和高效性.在横磁波(Transverse Magnetic Wave, TM Wave)入射时,如图5中③所示,当入射角小于 50° 时,覆盖超表面阵列的玻璃透射率大于玻璃本身透射率;透射率的提升效果在入射角度为 0° 时最显著,能实现近10%的透射率增加,从而提升电磁信号的强度,保障信号交互的连续性;当入射角

大于 50° 时,覆盖超表面阵列并不能提高信号透射率.此实验结果证明:超表面阵列能够有效提高电磁信号,尤其是TE波在空气-玻璃界面的传输效率.

如图5中④所示,在无线网络信息传输过程中,由于信号在墙壁表面的反射损耗和在墙壁内部的传输损耗,接收端收到的信号信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)会大大降低,使得接收端的信号接收成功率和质量受到严重影响,无法确保通信的连续性.针对这一问题,文献[80]证明在墙壁表面放置电磁超表面结构不仅可以匹配空气与墙壁之间的阻抗差异,同时其信号汇聚作用还可以将信号从墙壁一侧汇聚到另一侧.超表面单元由多层方形金属谐振环和圆形金属片作为基本单元构成,通过调节方形金属环的周期、宽度、圆形金属片的半径及多层结构厚度等单元结构几何参数,实现所需的透射率和透射相位,并将单元结构按照一定方式排列形成具有阻抗匹配作用的聚焦透镜.如图5中⑤所示,按照一定相位梯度排布的超表面透镜,同时具备阻抗匹配和汇聚作用,可以在墙壁的另一侧实现信号的增强传输和汇聚,仿真和实验结果显示了其优异的阻抗匹配和信号汇聚效果.图5中⑥结果显示,超表面透镜不仅可以有效提高信号传输的成功率,同样还极大提高了信号接收的速度和强度,实现了有效的室内穿墙通信.使用超表面进行信号阻抗匹配及聚焦后,数据上传与下载的速度提高了约80 Mbit/s,信号强度增加了30 dB以上.如图5中⑦所示,当在墙壁另一侧使用Wi-Fi拓展器时,超表面透镜与Wi-Fi拓展器的结合可有效拓展信息传输的距离.使用Wi-Fi拓展器后,用于信号接收的手机端不用靠近墙壁,从而可以获得更大的移动自由度.图5数据显示,使用超透镜进行信号增强后,数据的上传和下载速度仍然可以提高27~38 Mbit/s,信号强度增加了20 dB以上.更快的数据上传与下载速度保证了穿墙信息通信的效率,更强的传输信号保证了信息交互的稳定性.图5中④和⑦中的结果表明:穿墙通信的难点在于设计多功能电磁超表面,使其在具备阻抗匹配功能的同时实现信号汇聚和固定方向散射.这种技术对地上地下通信中信息传输质量的提高也具有重要的参考意义,能够有效促进地下物联网技术的发展与智慧城市的建设^[81,82].

3.4 探地雷达增强探测中的阻抗匹配

在对介质内部性质和地下空间结构进行NDT时,探地雷达信号在地表产生的强反射(也称为地表反射波)会导致信号在进入介质内部前就产生损耗,从而极大限制信号的传播距离和回波信号的强度^[83].通过阻抗匹配消除空气与MUT之间的阻抗差异,可有效消除地表反射,这对于提高探地雷达系统探测深度和回波信号的强度至关重要.



注:①—空气-玻璃界面电磁信号传输阻抗匹配示意图;②—不同温度下TE极化电磁波入射时阻抗匹配前后透射率变化;③—不同温度下TM极化电磁波入射时阻抗匹配前后透射率变化;④—空气-墙壁界面阻抗匹配对穿墙无线通信的信号增强示意图;⑤—具有阻抗匹配作用的聚焦透镜在穿墙信号增强与汇聚时的仿真与实验结果;⑥—具有阻抗匹配作用的聚焦透镜在Wi-Fi信号穿墙传输时的信号增强实验与结果;⑦—具有阻抗匹配作用的聚焦透镜在Wi-Fi信号穿墙传输时与Wi-Fi拓展器结合后的信号增强实验与结果。

图5 超表面在室内外通信信号传输中的阻抗匹配和聚焦作用^[79,80]

如图6所示,文献[33]提出用砂石、泡沫及丙醇等自然材料的混合物作为增透介质层铺设在地面上,以增加雷达信号的透射率.其中,混合物的比例和厚度由MUT的相对介电常数等电性参数决定.理论计算和仿真结果表明:该类型的介质匹配层能显著提高地下目标的散射场强度.随后,文献[34]提出使用相对介电常数在空气和MUT间梯度变化的多层介质板作为增透层增加雷达探测能量透射率,从而提高雷达信号的探测深度和目标反射回波的强度.这些以物理手段增强雷达信号传播距离和强度的方法为地下目标体的增强探测提供了良好的思路,但通过自然材料或介质板匹配层增强信号透射率存在局限性,例如,其尺寸厚度较大或难以重复使用的特点,阻碍了这些方法在微波频段NDT领域的推广和应用.

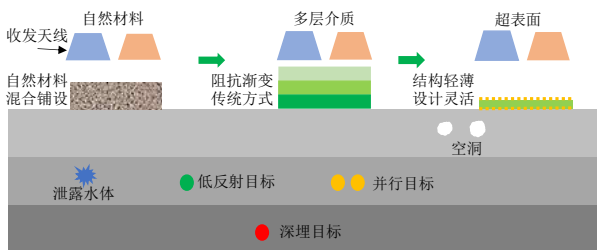


图6 地下NDT阻抗匹配方法示意图

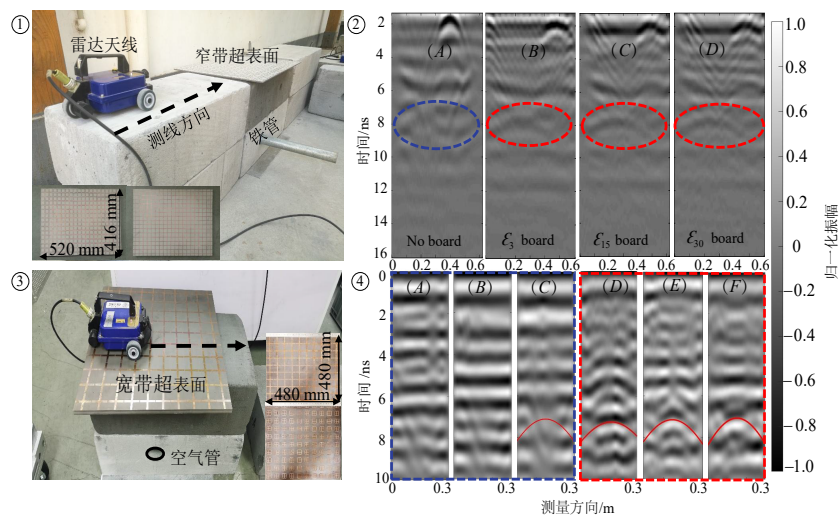
电磁超表面阻抗匹配层作为二维平面结构,由电磁谐振单元阵列构成,整体厚度较小.因此,可通过便捷的设计、优化和打印制作实现与电磁NDT系统的整合^[35,36,84].当使用超表面匹配层消除界面反射进而增强信号透射率,提高回波信号强度后,后期信号解译的精度和三维重建的质量也能获得有效提升^[85].与前文中空气-水体间的阻抗匹配过程类似,地下介质的相对介电常数变化范围较大,当MUT相对介电常数越高,空气与MUT之间的阻抗差异越大时,超表面对反射损耗的削减越重要,阻抗匹配对信号传输的增强作用越显著^[83].针对这一问题,文献[86]提出使用一种由闭口方形环和十字网格阵列构成的窄带超表面消除探地雷达信号在空气-MUT界面的损耗,提高高损介质中金属管道的可探测性.在窄带电磁超表面设计时,通过改变超表面正面的方形谐振环、反面的十字网格的几何尺寸及中间介质层的厚度,实现特定工作频段下对不同介电常数MUT的阻抗匹配.

如图7中①所示,设置两层含水量不同的介质模拟地下土壤的分层结构,在下层干介质内钻孔放置铁管模拟金属管道,设计标识为 ϵ_3 、 ϵ_{15} 及 ϵ_{30} 的三种匹配层,用于匹配相对介电常数为3、15及30的MUT.在标称中心频率为1.2 GHz的天线下方放置超表面,以削减雷达信号在该界面的反射.当MUT表面即空气-湿砖交界面

反射被削减后,更多的雷达信号进入湿砖介质内部,增强后的信号被内部埋设的金属管道反射,回波信号在传播到接收天线的过程中在湿砖-空气界面再次被电磁超表面匹配层增强. 该实验结果表明:原先无法被探测的金属管道信号可以被探测到. 具体而言,当MUT的相对介电常数为11.5时,如图7中②(A)的结果所示,在不放置超表面的情况下,由于探测信号在空气-湿砖表面的反射衰减和在介质内部的传播衰减及散射等原因,无法在相应位置(蓝色椭圆标记区域)看到清晰的管道双曲线回波. 在三种不同超表面匹配层的增强下,如图7中②(B)~(D)所示,在相应管道反射位置可以看到清晰的双曲线回波信号. 图7中②的结果表明:(1)通过电磁超表面阻抗匹配,可以使得更多的雷达信号进入高损介质内部,实现对介质内部金属管道的增强探测;(2)电磁超表面在待匹配介质的介电常数偏离设计值时仍具有良好的鲁棒性^[86].

考虑到常见的时域探地雷达天线的宽带特性(相对带宽一般为100%)^[83],远高于上述超表面的工作带宽,因此,设计更宽带的电磁超表面结构能够实现更好地增强探测效果. 针对这一问题,文献[42]通过设计与MUT接触的缺口谐振环阵列,将超表面阻抗匹配的带宽拓展为38%左右,且匹配层的厚度仅为 $\lambda/6$. 与MUT

接触的缺口谐振环能够更加有效地调控超表面-待匹配介质界面的反射系数幅值和相位,相比窄带超表面匹配层结构,反面裂环谐振器的使用能够使电磁信号在更宽的频带内产生电磁干涉,从而实现宽带的阻抗匹配和透射增强,能够使更多的探地雷达信号进入MUT内部,实现对更细小目标和低反射目标的增强探测. 进一步地,文献[87]通过优化超表面结构,获得了44%的相对带宽,且超表面厚度缩小为 $\lambda/9$. 如图7中③所示,当优化后的宽带超表面应用于非金属管道增强探测时,更宽带的阻抗匹配意味着有更多的反射信号在空气-被测介质界面被抑制,从而使更多的雷达信号进入介质内部. 如图7中④(A)~(C)所示,当不使用宽带超表面匹配层进行信号增强时,高损介质中的非金属管道无法被稳定地探测到^[11,88]. 如图7中④(D)~(F)所示,当使用宽带超表面进行了信号增强后,可以清晰地看到相应位置的双曲线回波信号,利用双曲线自动识别算法也能更准确地勾画出双曲线的位置和形状. 图7中③和④的结果表明:使用宽带电磁超表面可以更好地解决探地雷达探测的阻抗匹配问题,实现非金属管道的增强探测. 考虑到未来埋设的地下管线以非金属材质为主^[83],宽带的阻抗匹配可为非金属管线的探测提供了一种有效的手段,具有广阔的应用前景.



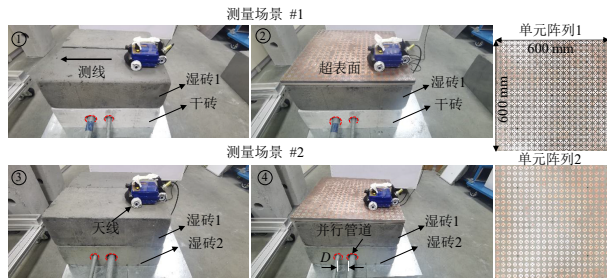
注:①—窄带电磁超表面匹配层对金属管线的探地雷达增强探测实验设置;②—窄带超表面探地雷达增强探测实验结果;③—宽带电磁超表面匹配层对非金属管线的探地雷达增强探测实验设置;④—宽带超表面多天探地雷达实验结果.

图7 窄带与宽带超表面匹配层对不同类型管道的探地雷达增强探测实验与结果^[86,87]

如何提高探地雷达系统的分辨率也是地下基础设施探测的关键问题之一. 电磁NDT的分辨率一般和电磁探测信号的频率相关,即高频信号能实现高分辨率探测结果,但高频信号受制于传输介质耗散而无法传播到介质深部^[83]. 在超宽带超表面能够匹配雷达系统100%相对带宽的情况下,被有效保留的高频段雷达信号能够提升探测的分辨率. 文献[43]基于切比雪夫阻

抗匹配层结构设计了一种带宽为100%的超宽带多层电磁超表面结构. 多层超表面结构利用谐振环进行反射系数及相位的调节,同时,多层结构提供的相位延迟和界面反射相位能够共同实现更宽带的电磁干涉,从而实现单层结构很难达到的超宽带阻抗匹配. 将该超表面匹配层应用于标称中心频率为2.5 GHz的探地雷达天线信号的阻抗匹配时,由于雷达信号的高频部分被

有效保留和增强,被测介质内相距很近的并行管道目标能够被准确探测^[89].如图8所示,设置湿介质-干介质和湿介质-湿介质两种结构模拟不同分层的地下介质状态,在下层介质中设置两个边界距离为8 cm的金属管道,验证雷达高频信号在被超表面增强后对并行管道的分辨能力.该匹配层的双层谐振环阵列形状如图8所示^[89].

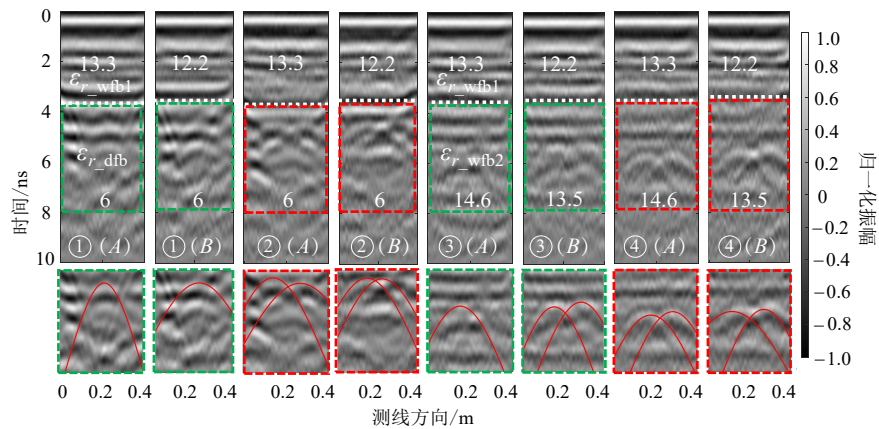


注:①—未放置超表面的湿介质-干介质分层结构测量平台;②—放置超表面的湿介质-干介质分层结构测量平台;③—未放置超表面的湿介质-湿介质分层结构测量平台;④—放置超表面的湿介质-湿介质分层结构测量平台.

图8 超宽带电磁超表面匹配层对雷达探测分辨率提高验证实验设置^[89]

如图9中①(A)和(B)所示,对于上层为湿介质、下层为干介质的模拟地下结构,若未使用超宽带电磁超表面匹配层,由于高频信号在传播过程中衰减较快,使得雷达天线接收到的回波信号主要由低频信号组成,从而

使得回波图像呈现出低频、低分辨率的特征.如图9中②(A)和(B)所示,当超宽带匹配层保留和增强了空气-MUT交界面的高频信号,使得更多的高频信号能够穿透介质并被管道表面反射接收天线,这一过程显著提高了回波信号的高频成分,从而使得回波图像能够清晰地显示出两条管道的双曲线特征.此外,应用双曲线拟合程序可以准确地确定两条管道的位置^[11].对于上下两层均为湿介质的分层结构,如图9中③(A)和(B)所示,未使用超宽带匹配层时,由于信号的反射衰减和传播耗散,雷达回波信号中难以观察到明显的双曲线信号.尽管自动拟合程序能够识别出双曲线的位置,但仅识别出一个双曲线,与真实情况存在较大偏差.同样地,如图9中④(A)和(B)所示,当超宽带匹配层通过消除界面反射并增强高频信号透射时,雷达回波图像能够清晰地显示出两条管道的双曲线回波特征.无论是通过目视判读还是程序自动识别,均能够准确确定两条管道的位置.综上所述,图9中①和②结果表明:使用相对带宽和雷达探测信号频带一致的超宽带电磁超表面进行信号增强时,能通过增强信号高频部分提高雷达回波信号的分辨率.图9中③和④结果进一步证实,超宽带电磁超表面不仅能够通过提高雷达信号高频部分的透射率,提升介质内探测分辨率,还能够通过增强整个频带内的能量透射率,增强回波信号的强度,探测到因界面反射损耗、内部介质损耗及散射而难以识别的管道信号.



注:①—当上层湿砖介质相对介电常数为13.3(A)及12.2(B)、下层干砖介质的相对介电常数均为6时,超宽带超表面匹配层放置前对边界距离8 cm的并行管道的测量结果;②—放置后对并行管道的测量结果;③—当上层湿砖介质相对介电常数为13.3(A)及12.2(B)、下层湿砖介质相对介电常数为14.6(A)及13.5(B)时,超宽带超表面匹配层放置前对边界距离8 cm的并行管道探测结果;④—放置后并行管道的探测结果.

图9 超宽带电磁超表面对介质内并行管道的高分辨率增强探测结果^[89]

3.5 超表面阻抗匹配层总结与未来发展趋势

为适应不同阻抗匹配应用的需求,不同应用场景下的电磁超表面具有不同的性能和结构特点^[90].当然,不同的应用场景也为电磁超表面匹配层的发展提出了新的要求,具体如表1所示.同时,电磁超表面匹配层的发展经历了带宽及结构尺寸等多方面的优化阶段^[35].

如图10和表2所示,这一过程包括对超表面谐振单元的优化,例如谐振环形状的选择^[40,42,87];阻抗匹配理论的优化,例如通过麦克斯韦方程组和宽带全透射边界条件的解析,推导出具有宽带透射增强特性的匹配层电性参数^[41];以及超表面多层结构的优化,例如基于经典的切比雪夫双层结构设计双层超表面匹配层^[43]等.这些进展

显著拓宽了超表面匹配层的带宽。然而,由于厚度、带宽和最小反射率之间的相互制约,宽带结构无法有效降低厚度的问题成为难以忽视的挑战^[91]。在后续宽带超表面设计中,必须综合考虑这些关键参数之间的相互影响,以实现最优设计。此外,为了突破传统匹配层结构的厚度限制,设计时可以考虑结合匹配层界面的干涉效应以

及谐振环之间的耦合效应,这有助于在扩大带宽的同时减少结构的厚度^[49,50]。另一方面,同时具备阻抗匹配、信号聚焦或波形调控功能的电磁超表面展现出更广阔的应用前景,但多功能电磁超表面在实现宽带性能方面仍面临挑战。设计时需参考现有的宽带结构特征,重点突破其工作频带,以满足日益增长的宽带应用需求。

表 1 不同应用场景下超表面的特点及技术难点

| 应用场景 | 性能与结构特点 | 技术难点 |
|-----------|------------------|--|
| 生物和人体医学检测 | 轻薄、柔性、多层、阻抗匹配 | 提高电磁调控的灵活性、降低超表面结构复杂性、超表面与其他诊疗设备的结合、拓展阻抗匹配的带宽 |
| 水上水下信号传输 | 轻盈、多层、宽带、阻抗匹配、聚焦 | 减小超表面厚度、优化阻抗匹配和聚焦功能的整合方式、提高信号传输的稳定性、拓展阻抗匹配的带宽 |
| 室内信息穿墙传输 | 多层、可调控、阻抗匹配、聚焦 | 提高电磁调控效率、实现可编程自动调控、超表面多种功能的集成、拓展阻抗匹配的带宽 |
| 探地雷达增强探测 | 轻薄、单层/多层、宽带、阻抗匹配 | 优化超表面厚度与带宽之间的矛盾、提高待匹配介质及信号入射角变化时阻抗匹配性能的稳定性、获得超表面的可调特性、与探地雷达天线的结合是否便利 |

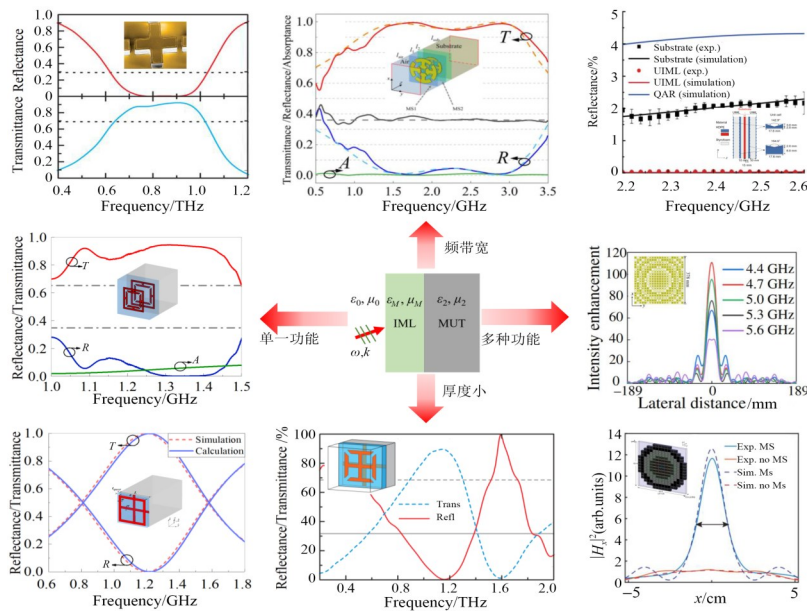


图 10 电磁超表面匹配层的发展历程示意图^[39-44,80,86]

表 2 不同超表面匹配层的各项参数对比

| 模型结构 | 相对带宽/% | 电尺寸/λ | 功能 |
|-------------------------------|--------|-----------|---------|
| 经典超表面匹配层 ^[39] | 15 | 0.12 | 阻抗匹配 |
| 立体十字宽带匹配层 ^[40] | 28 | 0.30-0.40 | 阻抗匹配 |
| 普适的介质超材料匹配层 ^[41] | 17 | 0.55-0.52 | 阻抗匹配 |
| 反面谐振环宽带匹配层 ^[42,87] | 38 | 0.12-0.18 | 阻抗匹配 |
| 切比雪夫双层超表面 ^[43] | 100 | 0.33 | 阻抗匹配 |
| 时域超表面匹配层 ^[92-94] | 100 | 0.50 | 阻抗匹配 |
| 级联超表面 ^[44] | 窄带(<5) | 0.04 | 阻抗匹配、聚焦 |
| 阻抗匹配与聚焦透镜 ^[80] | 窄带(<5) | 0.21 | 阻抗匹配、聚焦 |

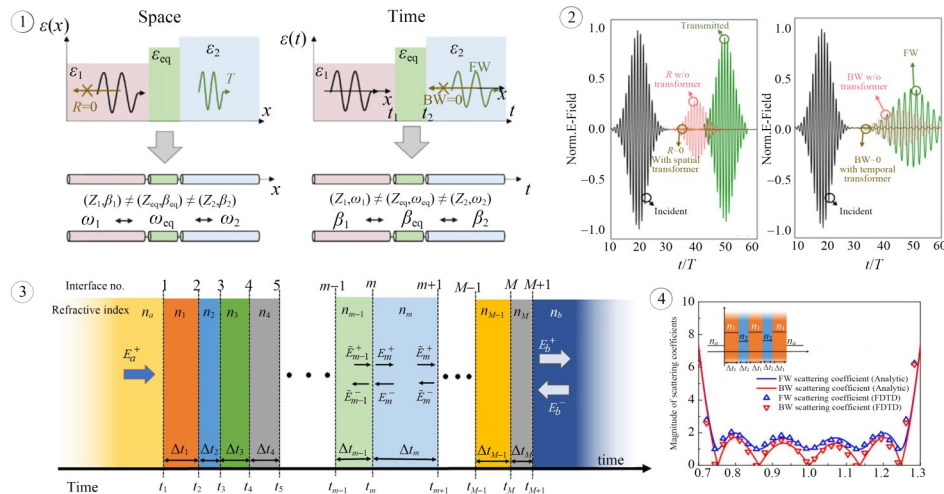
时空超表面作为一种新型电磁超表面设计思路,通过光、电、热、磁等手段对电磁超表面进行动态调控,代表了第四代超表面技术的发展方向^[95]。这种动态调控能力使得超表面能够在反射、透射及散射等不同性质之间进行快速切换,从而显著提升超表面的应用效率和范围^[96,97]。由于传统超表面一般是随时间静止的人工结构,其单元结构一旦被设计和打印,功能便固定不变。时空超表面的提出为超表面结构增加了时间调控的新自由度,使用电控、热敏、光敏材料及在谐振单元上添加二极管结构等方式,能够通过光、电、热、磁等外部作用使超表面能够在某一时刻从一种功能切换到

另一种功能,例如,在透射和反射两种模式之间切换^[72],或从透射体转变为吸收体^[73,96].与传统超表面相比,这不仅提高了应用的灵活性,也大大拓展了功能性.当然,时空超表面的时间可变特性也为其引入了许多传统超表面不具备的物理特性,可用于设计打破空间互异性、打破时间不变性结构,生成混频信号和倍频信号及实现性能优异的滤波器和匹配单元等^[95].在传统超表面匹配层的设计中,受限于厚度、带宽和最小反射率三个关键参数之间的相互制约关系,理论上难以实现低反射、宽带及深度亚波长厚度的超表面结构^[91,98].然而,时空超表面由于其时变特性,在设计时往往可以打破传统的理论极限,提高超表面在微波段应用的便利性^[99].在阻抗匹配方面,通过调控超表面匹配层相对介电常数的时变特征,可以实现宽带阻抗匹配,从而增强电磁波透射信号^[32,93,94].另外,通过设计与雷达天线相互协调响应的动态超表面系统,可以同步雷达信号的发射接收与超表面物性的变化,从而更有效地进行波形调控,实现高效探测,这对于探地雷达增强探测技术尤为重要^[100,101],在未来的 NDT 仪器制造领域具备十分广阔的前景.

如图 11 中①所示,针对两种不同介质之间的阻抗匹配,传统空间域的阻抗匹配方式是在两种待匹配介质之间放置相对介电常数与厚度满足阻抗匹配关系的介质层,而在时域阻抗匹配层设计时,则不需要其厚度满足传统的 1/4 波长的空间尺寸要求,而仅需要时域匹配层的相对介电常数在两种待匹配介质对应值范围内随信号在匹配层内的传播时间而改变,即当信号在时域匹配层内传播时,匹配层相对介电常数在时域上的变化趋势决定了其阻抗匹配后反射系数的带宽和特

征^[92].在图 11 中②所描述的情形中,相对于空间域匹配层,时间域匹配层在阻抗不匹配时表现出不同的特性.在时域匹配层中,由于介质阻抗的不均匀变化所引发的散射信号,并非单一的界面反射,而是在时间维度上连续发生的后向散射过程.这种连续散射的特性意味着信号在时间域匹配层的传播中,会经历一系列复杂的相互作用和能量交换.值得注意的是,当信号传播至具有时变特性的匹配层介质中时,其波长保持不变,而频率则会发生相应的变化.这一现象与空间域匹配层中观察到的波长变化和频率恒定的规律形成鲜明对比,这在实际的时域阻抗匹配层设计中需要重点关注^[95].

如图 11 中③所示,在时域阻抗匹配层设计时,可以将时域变化的匹配层介质类比为 n 层有一定厚度的介质.当信号在匹配层中传播时,每层匹配介质的相对介电常数处于渐变状态,当其相对介电常数变化的趋势满足一定条件时,就可以在时域范围内对电磁信号的反射与透射进行调控,获得如图 11 中④所示的宽带抗反射曲线.时域匹配层的反射和透射系数的计算方法,可以借鉴传统多层介质的反射透射系数的计算模型.通过类比推导,可以获得适用于时变介质的模型^[94,102].改变时域匹配层相对介电常数随时间变化的曲线,可以设计不同类型反射系数曲线,例如 1/4 波长变换器(Quarter-Wave Transformer)、切比雪夫变换器(Chebyshev Transformer)和指数渐变匹配层(Exponential Taper)等^[32,91].时空超表面由于其时变特性,不仅可以从带宽、厚度等方面提高超表面在 NDT 系统中的应用便利性,其波束的形态及方向的动态调节也使其在 NDT 领域有更广阔的应用前景^[74,75,103].



注:①—空间域与时间域界面条件对比;②—空间域与时间域阻抗匹配层的反射/透射电场对比;③—多层时域阻抗匹配层模型;④—时域匹配层散射系数计算结果.

图 11 时空超表面阻抗匹配层设计模型与理论^[94,104]

4 结论

在电磁 NDT 领域,基于电磁超表面的阻抗匹配技术已显示出其重要性. 该技术通过匹配不同介质界面的阻抗差异,显著增强了检测信号的透射率和回波信号的强度,从而提升检测系统的整体性能. 在阻抗匹配的实施过程中,超表面阻抗匹配层的带宽、厚度和界面反射率是三个关键性能指标. 然而,这些指标之间存在相互制约的关系,即带宽的增加往往需要增加匹配层的厚度,而厚度的减小则会限制带宽的扩展^[91]. 在匹配层设计时,当匹配层厚度足够大时,可以将其视为一个腔体,周期性排列的谐振器能够调节入射电磁波的相位和振幅,从而通过界面上的电磁波干涉实现增强透射^[39]. 相反,当匹配层的厚度减小到一定程度时,谐振单元之间的倏逝波叠加产生的近场效应将导致阻抗匹配不再仅仅是干涉现象,而是涉及更复杂的电磁波近场耦合机制^[49]. 在这种情况下,近场耦合技术通过利用深度亚波长结构能够实现增强透射,但通常具有较窄的相对带宽,难以满足实际应用中宽带阻抗匹配的需求^[50]. 为了实现宽带阻抗匹配,研究者们通常采用麦克斯韦方程组结合阻抗匹配的边界条件来求解匹配层的电性参数,并设计特定形状的全介质谐振单元阵列来满足宽带阻抗匹配对其电性参数的要求,但匹配层的厚度仍是限制其广泛应用的一个关键因素^[41]. 因此,在设计电磁超表面时,为了实现高透射率这一关键指标,往往需要在其他方面做出妥协,如牺牲带宽或增加结构的厚度. 在后续的匹配层设计过程中,设计者需要综合考虑和优化这些关键参数之间的关系.

时空超表面技术为电磁 NDT 领域提供了一种全新的阻抗匹配策略. 与传统超表面相比,时空超表面能够通过电、磁、光、热等多种方式实现同一结构的多种功能,如阻抗匹配、波束调控等. 传统超表面通常需要将不同功能的超表面组合使用,这不仅增加了系统的复杂性,还可能导致不同超表面间的相互干扰. 时空超表面的可调特性使得单一结构即可实现这些功能,更适合复杂环境的检测需求,这使得它们在电磁 NDT 领域具有更广泛的应用前景. 此外,时空超表面通常需要通过电调控实现相应功能,这能够与同样基于电调控的电磁 NDT 系统进行有机整合,使其有望成为电磁 NDT 系统的一部分. 同时,当在时空超表面中加入电调控特性时,能够突破传统超表面理论中关于带宽及厚度的相互限制,这意味着时空超表面在电磁 NDT 领域的巨大优势和潜力.

参考文献

[1] GUPTA M, KHAN M A, BUTOLA R, et al. Advances in applications of non-destructive testing (NDT): A review[J].

Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8(2): 2286-2307.

- [2] HAO T, ROGERS C D F, METJE N, et al. Condition assessment of the buried utility service infrastructure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 331-344.
- [3] ROGERS C D F, HAO T, COSTELLO S B, et al. Condition assessment of the surface and buried infrastructure-A proposal for integration[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 202-211.
- [4] TURA A, MARAN A, PACINI G. Non-invasive glucose monitoring: Assessment of technologies and devices according to quantitative criteria[J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2007, 77(1): 16-40.
- [5] THAPA D, SIVAGURUNATHAN K, MELNIKOV A, et al. Three-dimensional super-resolution crack imaging in industrial manufactured components: A truncated correlation photothermal coherence tomography approach[J]. NDT & E International, 2024, 146: 103145.
- [6] PÉREZ-GRACIA V, CASELLES J O, CLAPÉS J, et al. Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures[J]. NDT & E International, 2013, 59: 40-47.
- [7] CATALDO A, PERSICO R, LEUCCI G, et al. Time domain reflectometry, ground penetrating radar and electrical resistivity tomography: A comparative analysis of alternative approaches for leak detection in underground pipes[J]. NDT & E International, 2014, 62: 14-28.
- [8] LIU S W, SUN Y H, GU M, et al. Review and analysis of three representative electromagnetic NDT methods[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2017, 59(4): 176-183.
- [9] CATAPANO I, GENNARELLI G, LUDENO G, et al. Contactless Ground Penetrating Radar Imaging: State of the art, challenges, and microwave tomography-based data processing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2022, 10(1): 251-273.
- [10] WAI-LOK LAI W, DÉROBERT X, ANNAN P. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A 30-year journey from Locating and Testing to Imaging and Diagnosis[J]. NDT & E International, 2018, 96: 58-78.
- [11] LUO W H, LEE Y H, HAO T, et al. Automatic dual-polarized ground penetrating radar for enhanced 3-D tree roots system architecture reconstruction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62:

- 4514418.
- [12] BI W D, ZHAO Y H, SHEN R Q, et al. Multi-frequency GPR data fusion and its application in NDT[J]. *NDT & E International*, 2020, 115: 102289.
- [13] 郝彤, 赵杰. 面向双曲线形态的探地雷达图像识别技术综述[J]. *电子学报*, 2019, 47(6): 1366-1372.
- HAO T, ZHAO J. A brief review of the hyperbola signature recognition techniques for ground penetrating radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(6): 1366-1372. (in Chinese)
- [14] SMITHA N, ULLAS BHARADWAJ D R, ABILASH S, et al. Kirchhoff and F-K migration to focus ground penetrating radar images[J]. *International Journal of Geo-Engineering*, 2016, 7(1): 4.
- [15] HALMAN J I, SHUBERT K A, RUCK G T. SAR processing of ground-penetrating radar data for buried UXO detection: Results from a surface-based system[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, 46(7): 1023-1027.
- [16] YANG J G, JIN T, HUANG X T, et al. Sparse MIMO array forward-looking GPR imaging based on compressed sensing in clutter environment[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4480-4494.
- [17] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(2): 112-114.
- [18] LIU W, CAO S Y, CHEN Y K. Applications of variational mode decomposition in seismic time-frequency analysis[J]. *Geophysics*, 2016, 81(5): V365-V378.
- [19] HE W C, HAO T, KE H N, et al. Joint time-frequency analysis of ground penetrating radar data based on variational mode decomposition[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 181: 104146.
- [20] BENEDETTO A, TOSTI F, BIANCHINI CIAMPOLI L, et al. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections[J]. *Signal Processing*, 2017, 132: 201-209.
- [21] CHENG W X, SUN H H, TAN K H, et al. Estimating the diameter of reinforcing bars using an ultra-wideband MIMO GPR array[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 365: 129924.
- [22] ZENG Z F, LI J, HUANG L, et al. Improving target detection accuracy based on multipolarization MIMO GPR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1): 15-24.
- [23] SUN H-H, LEE Y H, LUO W H, et al. Compact dual-polarized Vivaldi antenna with high gain and high polarization purity for GPR applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 503.
- [24] ZHOU X R, CHEN H H, HAO T. Efficient detection of buried plastic pipes by combining GPR and electric field methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(6): 3967-3979.
- [25] GABER A, GEMAIL K S, KAMEL A, et al. Integration of 2D/3D ground penetrating radar and electrical resistivity tomography surveys as enhanced imaging of archaeological Ruins: A case study in San El-Hager (Tanis) site, northeastern Nile Delta, Egypt[J]. *Archaeological Prospection*, 2021, 28(2): 251-267.
- [26] LI Y N, CHEN J. Design of miniaturized high gain bow-Tie antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 70(1): 738-743.
- [27] SIEVENPIPER D, ZHANG L J, BROAS R F J, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2059-2074.
- [28] DEWAN R, RAHIM M K A, HAMID M R, et al. Artificial magnetic conductor for various antenna applications: An overview[J]. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2017, 27(6): e21105.
- [29] IKONEN P M T, ROZANOV K N, OSIPOV A V, et al. Magnetodielectric substrates in antenna miniaturization: Potential and limitations[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(11): 3391-3399.
- [30] YIN P, ZHENG Z L. Low-profile and wideband unidirectional antenna with ferrite loading for UHF applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(11): 10338-10346.
- [31] URSIN B. Review of elastic and electromagnetic wave propagation in horizontally layered media[J]. *Geophysics*, 1983, 48(8): 1063-1081.
- [32] ORFANIDIS S J. Electromagnetic waves and antennas[EB/OL]. (2002-01-01)[2024-11-02]. <https://daskalakispiros.com/files/Ebooks/Electromagnetic%20Waves%20and%20Antennas%20S%20Orfanidis/ch1&2-sol.pdf>.
- [33] VALAGIANNOPOULOS C A, TSITSAS N L, SIHVOLA A H. "Unlocking" the ground: Increasing the detectability of buried objects by depositing passive superstrates[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(6): 3697-3709.
- [34] BAGHDASARYAN H, KNYAZYAN T, HOVHANNISYAN T, et al. Enhancement of air-ground matching by means of a chirped multilayer structure: Electromagnetic modeling with the method of single expression[J]. *Journal*

- of Telecommunications and Information Technology, 2017, 3(2017): 30-36.
- [35] CHEN H-T, TAYLOR A J, YU N F. A review of metasurfaces: Physics and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(7): 076401.
- [36] GLYBOVSKI S B, TRET'YAKOV S A, BELOV P A, et al. Metasurfaces: From microwaves to visible[J]. Physics Reports, 2016, 634: 1-72.
- [37] WANG J F, LI Y, JIANG Z H, et al. Metantenna: When metasurface meets antenna again[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 1332-1347.
- [38] 王军会. 超表面调制天线的国内外最新进展[J]. 电波科学学报, 2021, 36(4): 498-510.
- WANG J H. The latest development of the modulated metasurface antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2021, 36(4): 498-510. (in Chinese)
- [39] CHEN H-T, ZHOU J F, O'HARA J F, et al. Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(7): 073901.
- [40] HUANG L, CHANG C C, ZENG B B, et al. Bilayer metasurfaces for dual- and broadband optical antireflection[J]. ACS Photonics, 2017, 4(9): 2111-2116.
- [41] IM K, KANG J H, PARK Q H. Universal impedance matching and the perfect transmission of white light[J]. Nature Photonics, 2018, 12(3): 143-149.
- [42] HAO T, ZHENG W A, WANG W Q, et al. Electrically thin metasurface for broadband transmission enhancement by manipulating the amplitude and phase of the reflection coefficients[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(2): 025303.
- [43] LI X J, ZHENG W A, ZHANG W H, et al. Broadband bilayer antireflective coating with metasurfaces and Chebyshev transformer[J]. Physical Review Applied, 2022, 18(5): 054057.
- [44] YANG F Y, RAEKER B O, NGUYEN D T, et al. Antireflection and wavefront manipulation with cascaded metasurfaces[J]. Physical Review Applied, 2020, 14(6): 064044.
- [45] DORRAH A H, CHEN M, ELEFTHERIADES G V. Bi-anisotropic Huygens' metasurface for wideband impedance matching between two dielectric media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(9): 4729-4742.
- [46] XUE C H, LOU Q, CHEN Z N. Broadband double-layered Huygens' metasurface lens antenna for 5G millimeter-wave systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 1468-1476.
- [47] SMITH D R, SCHULTZ S, MARKOŠ P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. Physical Review B, 2002, 65(19): 195104.
- [48] CHEN X D, GRZEGORCZYK T M, WU B I, et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials[J]. Physical Review E, 2004, 70: 016608.
- [49] MA S J, XIAO S Y, ZHOU L. Resonant modes in metal/insulator/metal metamaterials: An analytical study on near-field couplings[J]. Physical Review B, 2016, 93(4): 045305.
- [50] WU F, FAN C F, ZHU K J, et al. Tailoring electromagnetic responses in a coupled-grating system with combined modulation of near-field and far-field couplings[J]. Physical Review B, 2022, 105(24): 245417.
- [51] CANO-GARCÍA H, KOSMAS P, KALLOS E. Enhancing electromagnetic transmission through biological tissues at millimeter waves using subwavelength metamaterial antireflection coatings[C]//2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS). Piscataway: IEEE, 2015: 43-45.
- [52] CANO-GARCIA H, KOSMAS P, KALLOS E. Demonstration of enhancing the transmission of 60 GHz waves through biological tissue using thin metamaterial antireflection coatings[C]//2016 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS). Piscataway: IEEE, 2016: 85-87.
- [53] RAZZICCHIA E, SOTIRIOU I, CANO-GARCIA H, et al. Feasibility study of enhancing microwave brain imaging using metamaterials[J]. Sensors, 2019, 19(24): 5472.
- [54] RAZZICCHIA E, GHAVAMI N, KARADIMA O, et al. Metasurface technology for medical imaging[M]//Electromagnetic Imaging for a Novel Generation of Medical Devices. Cham: Springer International Publishing, 2023: 69-99.
- [55] SHAHIDUL ISLAM M, ISLAM M T, HOQUE A, et al. A portable electromagnetic head imaging system using metamaterial loaded compact directional 3D antenna[J]. IEEE Access, 2021, 9: 50893-50906.
- [56] YANG F Y, NGUYEN D T, RAEKER B O, et al. Near-reflectionless wireless transmission into the body with cascaded metasurfaces[J]. IEEE Transactions on Anten-

- nas and Propagation, 2022, 70(9): 8379-8388.
- [57] XU L J, ZHU L, LIANG M Y. Impedance matching at skin-air interface for transmission-range improvement of implantable antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(3): 2235-2246.
- [58] TZAROUCHIS D C, KOUTSOUPIDOU M, SOTIRIOU I, et al. Electromagnetic metamaterials for biomedical applications: Short review and trends[J]. EPJ Applied Metamaterials, 2024, 11: 7.
- [59] WANG C H, LI X S, HU H J, et al. Monitoring of the central blood pressure waveform *via* a conformal ultrasonic device[J]. Nature Biomedical Engineering, 2018, 2(9): 687-695.
- [60] WANG C H, ZHAO X H. See how your body works in real time: Wearable ultrasound is on its way[J]. Nature, 2024, 630: 817-819.
- [61] STAFFORD K M, FOX C G, CLARK D S. Long-range acoustic detection and localization of blue whale calls in the northeast Pacific Ocean[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(6): 3616-3625.
- [62] LIN K Q, HAO T, ZHENG W A, et al. Analysis of LoRa link quality for underwater wireless sensor networks: A semi-empirical study[C]//2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). Piscataway: IEEE, 2019: 120-122.
- [63] SMOLYANINOV I I, BALZANO Q, BARRY M, et al. Superlensing enables radio communication and imaging underwater[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 18333.
- [64] ODIT M, KAPITANOVA P, ANDRYIEUSKI A, et al. Experimental demonstration of water based tunable metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109: 011901.
- [65] BOK E, PARK J J, CHOI H, et al. Metasurface for water-to-air sound transmission[J]. Physical Review Letters, 2018, 120(4): 044302.
- [66] ZHOU H T, ZHANG S C, ZHU T, et al. Hybrid metasurfaces for perfect transmission and customized manipulation of sound across water-air interface[J]. Advanced Science, 2023, 10(19): e2207181.
- [67] LIU J J, LI Z W, LIANG B, et al. Remote water-to-air eavesdropping with a phase-engineered impedance matching metasurface[J]. Advanced Materials, 2023, 35(29): e2301799.
- [68] ZHOU P, JIA H, BI Y F, et al. Water-air acoustic communication based on broadband impedance matching[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(19): 191701.
- [69] CHU H C, ZHANG H Y, ZHANG Y, et al. Invisible surfaces enabled by the coalescence of anti-reflection and wavefront controllability in ultrathin metasurfaces[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4523.
- [70] YANG G, DU J F, XIAO M. Maximum throughput path selection with random blockage for indoor 60 GHz relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(10): 3511-3524.
- [71] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [72] CAI T, TANG S W, WANG G M, et al. High-performance bifunctional metasurfaces in transmission and reflection geometries[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(2): 1600506.
- [73] WANG H L, MA H F, CHEN M, et al. A reconfigurable multifunctional metasurface for full-space control of electromagnetic waves[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(25): 2100275.
- [74] LIANG J C, ZHANG L, LUO Z J, et al. A filtering reconfigurable intelligent surface for interference-free wireless communications[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 3838.
- [75] WU G-B, DAI J Y, SHUM K M, et al. A universal metasurface antenna to manipulate all fundamental characteristics of electromagnetic waves[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5155.
- [76] ZENG S H, ZHANG H L, DI B Y, et al. Reconfigurable intelligent surfaces in 6G: Reflective, transmissive, or both? [J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(6): 2063-2067.
- [77] LI J, ZENG Z F, SUN J G, et al. Through-wall detection of human being's movement by UWB radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(6): 1079-1083.
- [78] NKWARI P K M, SINHA S, FERREIRA H C. Through-the-wall radar imaging: A review[J]. IETE Technical Review, 2018, 35(6): 631-639.
- [79] JIANG R Z, MA Q, LIANG J C, et al. A single-layered wideband and wide-angle transparent metasurface for enhancing the EM-wave transmissions through glass[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(8): 6593-6605.
- [80] MENG X D, LIU R X, CHU H C, et al. Through-wall wireless communication enabled by a metalens[J]. Physical Review Applied, 2022, 17(6): 064027.
- [81] LIN K Q, HAO T. Experimental link quality analysis for

- LoRa-based wireless underground sensor networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(8): 6565-6577.
- [82] LIN K Q, ULLAH M A, ALVES H, et al. Subterranean mMTC in remote areas: Underground-to-satellite connectivity approach[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(5): 136-142.
- [83] DANIELS D J. Ground Penetrating Radar[M]. London: Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [84] 范辉颖, 罗杰. 无反射电磁超构表面研究进展[J]. 光电工程, 2023, 50(9): 47-68.
FAN H Y, LUO J. Research progress of reflectionless electromagnetic metasurfaces[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(9): 47-68. (in Chinese)
- [85] LUO W H, LEE Y H, SUN H H, et al. Tree roots reconstruction framework for accurate positioning in heterogeneous soil[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 1912-1925.
- [86] HAO T, ZHENG W A, HE W C, et al. Air-ground impedance matching by depositing metasurfaces for enhanced GPR detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(6): 4061-4075.
- [87] ZHENG W A, LUO W H, HAO T. Experimental investigations on enhanced GPR detection assisted by broadband metasurfaces[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1004911.
- [88] DOU Q X, WEI L J, MAGEE D R, et al. Real-time hyperbola recognition and fitting in GPR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(1): 51-62.
- [89] ZHENG W A, HAO T, LI X J, et al. Experimental validation of the horizontal resolution improvement by ultra-wideband metasurfaces for GPR systems[J]. NDT & E International, 2024, 147: 103179.
- [90] 张在琛, 江浩. 智能超表面使能无人机高能效通信信道建模与传输机理分析[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2623-2634.
ZHANG Z C, JIANG H. Channel modeling and characteristics analysis for high energy-efficient RIS-assisted UAV communications[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(10): 2623-2634. (in Chinese)
- [91] FANO R M. Theoretical limitations on the broadband matching of arbitrary impedances[J]. Journal of the Franklin Institute, 1950, 249(2): 139-154.
- [92] POZAR D M. Microwave engineering[M]//Book Reviews for Radioscientists. Piscataway: IEEE, 2012: 26-30.
- [93] ZHANG Y, PENG L, HUANG Z J, et al. Ultra-wideband antireflection assisted by a continuously varying temporal medium[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 40357-40366.
- [94] RAMACCIA D, ALÙ A, TOSCANO A, et al. Temporal multilayer structures for designing higher-order transfer functions using time-varying metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(10): 101901.
- [95] CALOZ C, DECK-LÉGER Z L. Spacetime metamaterials: Part II: Theory and applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 1583-1598.
- [96] LI Y, LIN J, GUO H J, et al. A tunable metasurface with switchable functionalities: From perfect transparency to perfect absorption[J]. Advanced Optical Materials, 2020, 8(6): 1901548.
- [97] LI D, CHEN Q X, HUANG J H, et al. Scalable-manufactured metamaterials for simultaneous visible transmission, infrared reflection, and microwave absorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(29): 33933-33943.
- [98] ROZANOV K N. Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(8): 1230-1234.
- [99] SHLIVINSKI A, HADAD Y. Beyond the Bode-Fano bound: Wideband impedance matching for short pulses using temporal switching of transmission-line parameters[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(20): 204301.
- [100] ZHOU Y J, CHEN L F, ZHANG Q F, et al. A 1-bit reconfigurable intelligent metasurface-based antenna design for 5G application[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2023, 15(10): 1758-1767.
- [101] RIZZA C, CASTALDI G, GALDI V. Short-pulsed metamaterials[J]. Physical Review Letters, 2022, 128(25): 257402.
- [102] PACHECO-PEÑA V, ENGHETA N. Effective medium concept in temporal metamaterials[J]. Nanophotonics, 2020, 9(2): 379-391.
- [103] PACHECO-PEÑA V, ENGHETA N. Temporal aiming[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 129.
- [104] PACHECO-PEÑA V, ENGHETA N. Antireflection temporal coatings[J]. Optica, 2020, 7(4): 323.

作者简介



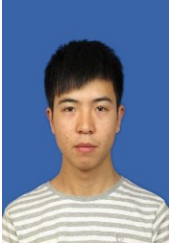
郝 彤 男,1980年7月出生于江苏省扬州市.现为同济大学测绘与地理信息学院院长聘教授、博士生导师.在国内外发表学术论文100余篇.

E-mail: tonghao@tongji.edu.cn



李晓静 女,1997年4月出生于河南省洛阳市.现为同济大学物理科学与工程学院博士研究生.主要研究方向为电磁超表面对无损探测信号的增强技术.

E-mail: xjli@tongji.edu.cn



郑吴安 男,1996年1月出生于甘肃省陇南市.现为同济大学测绘与地理信息学院博士研究生.主要研究方向为电磁超表面在探地雷达增强探测中的应用.

E-mail: zhengwuan@tongji.edu.cn