



S/X双频带吸波实时可调的吸波器

周仕浩 房欣宇 李猛猛 俞叶峰 陈如山

S/X dual-band real-time modulated frequency selective surface based absorber

Zhou Shi-Hao Fang Xin-Yu Li Meng-Meng Yu Ye-Feng Chen Ru-Shan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 204101 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200606

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200606>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种宽带可重构反射型极化旋转表面

Broadband reconfigurable reflective polarization convertor

物理学报. 2018, 67(22): 224101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181041>

太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量

Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section

物理学报. 2019, 68(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190552>

基于电路模拟吸收体的宽带吸波型频率选择表面设计

A novel wideband absorptive frequency selective surface based on circuit analog absorber

物理学报. 2020, 69(19): 198101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200641>

基于人工表面等离激元的双通带频率选择结构设计

Design of dual-band-pass frequency selective structure based on spoof surface plasmon polariton

物理学报. 2018, 67(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180696>

电磁超材料吸波体的研究进展

Research progress of electromagnetic metamaterial absorbers

物理学报. 2020, 69(13): 134101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200355>

双层螺旋环超表面复合吸波体等效电路模型及微波损耗机制

Equivalent circuit model and microwave reflection loss mechanism of double-layer spiral-ring metasurface embedded composite microwave absorber

物理学报. 2019, 68(9): 095201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181960>

S/X 双频带吸波实时可调的吸波器*

周仕浩 房欣宇 李猛猛† 俞叶峰 陈如山

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2020年4月25日收到; 2020年6月12日收到修改稿)

本文提出了一种基于频率选择表面(FSS)的双频带实时可调的吸波器,可以实时调控雷达散射截面(RCS). FSS的单元由带有缺口的圆环和弯曲的十字交叉偶极子组成. 通过切换嵌入在单元中的PIN二极管工作状态,可以调控单元的谐振频率. 同时设计了一种新型的偏置网络来实现FSS阵面的可重构,利用现场可编程门阵列(FPGA)对单元的“开/关”状态独立编码,从而实现了单元的散射场独立调控. 利用单元工作状态编码,阵列RCS变化范围分别在S频带达到33dB(3.2 GHz),在X频带达到26dB(10.3 GHz). 仿真分析和实验结果都证明了设计的合理性.

关键词: 频率选择表面, 吸波器, 雷达散射截面, 可重构**PACS:** 41.20.Jb, 5225.Os**DOI:** 10.7498/aps.69.20200606

1 引言

频率选择表面(FSS)因其在天线罩、吸波器、电磁滤波器、人工电磁带隙材料等方面的广泛应用而引起人们极大的研究兴趣^[1-6]. 基于FSS的吸波器,由于在雷达散射截面(RCS)缩减等^[6-12]军事应用方面的潜力,获得了极大的关注和发展.

为了实现多功能的FSS,可重构的特性和技术得到了广泛研究^[13]. 获得多功能可重构FSS主要有三种方法:可重构FSS单元、可重构阵列、可重构单元与阵列的组合. 在许多工作中,为了获得可重构的FSS,在单元中嵌入了PIN二极管等开关元件. 文献^[14]中,通过切换二极管的偏置状态来调节单元上的场分布,可以获得两个相邻的完全吸收点. 文献^[15]中,介绍了一种可切换的反射器和吸波器结构,通过一对偏置线调节嵌入的二极管开关状态,使得FSS具有反射和吸收的可重构特性. 文献^[16]中,介绍了一种L频段的可重构极化不

敏感FSS吸波器,通过对周围的四个PIN二极管进行“开/关”调控实现其可重构特性. 文献^[6]中,介绍了一种双频段极化不敏感的可重构FSS吸波器,该吸波器的单元由嵌有PIN二极管的环型贴片和十字型贴片组成,通过通断二极管可独立实现双频段的吸收. 文献^[17]中,设计了一种工作在超高频段(UHF)的可重构FSS吸波器,通过控制偏置电压可以调节吸波频点的位置.

在可重构FSS阵列的设计中,可以通过改变衬底的等效介电常数来设计FSS阵列^[18,19]. 可重构阵列的设计还可以通过优化单元的状态来实现,文献^[14]中的FSS使用了简单的线型单元和交叉偶极单元,单元中嵌入了相互连接的开关. 然后利用遗传算法对FSS阵列的“开/关”状态矩阵进行优化. 利用所提出的算法,从数值计算上表明这些可重构的FSS可以达到目标频率响应.

最近,崔铁军院士团队^[20]提出了一种新型的数字编码超表面,它通过现场可编程门阵列(FPGA)对单元的“开/关”状态进行编码,从而实时调控单

* 国家自然科学基金(批准号: 61871222, 61890540, 61890541)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20171429)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: 30918011103)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: limengmeng@njust.edu.cn

元的 $0/\pi$ 反射相位, 实现超表面散射场的自由调控. 对相位差为 π 的两种单元, 进行棋盘型或者随机排布^[21], 实现反射波相消^[22]或漫反射^[23], 达到 RCS 缩减的目的. 然而, 这些单元是不可重构的, 低散射只能通过优化单元的排布获得^[22,23]. 最近, 文献^[24]中提出了一种可重构的相位梯度超表面, 单元包含三层谐振结构, 同层的每一排谐振结构共用偏置线, 控制每一层的偏置电压获得相位梯度, 从而设计出工作在 4.4 GHz 的低散射天线^[25,26].

如文献^[6]中所述, 对于工作在多频段的 FSS 阵列, 需要仔细设计 FSS 阵列的偏置网络, 实现实时可切换工作状态的单元和阵列. 文献^[27,28]提出了两种反射阵天线, 天线单元加载了二极管, 由 FPGA 独立控制二极管的“开/关”状态, 通过 1 比特编码阵面相位序列实现波束扫描. 而对于双频 FSS 吸波器, 由于单元结构复杂, 需要控制多个 PIN 二极管, 因此设计实时 RCS 可调控的偏置网络具有一定的挑战性.

本文提出了一种可重构单元与 FSS 阵列相结合的设计方法, 实现了一种双频带 RCS 实时可调控的 FSS 吸波器. 对于可重构单元, 通过切换单元通断状态, 改变单元谐振频率, 实现双频带吸波状态调控. 对于可重构 FSS 阵列, 引入了一种新型的偏置网络, 可以独立调控每个 PIN 二极管的“导通”与“截止”状态, 实现阵面散射场的实时调控. 利用遗传算法优化 FSS 阵列上单元“导通”与“截止”编码状态矩阵, 以获得所需要的散射场. 通过可编程的 FPGA 对状态矩阵的控制, 实现吸波器双频带散射场幅度的调控. 实验结果表明, 阵列 RCS 在可实现 S 频带 33dB、X 频带 26dB 的范围内编程调节. 这项工作对于 RCS 隐身和伪装具有重要的意义.

2 基于 FSS 的吸波器设计

2.1 FSS 单元设计

文中提出的双频可重构 FSS 单元的结构如图 1 所示. 采用环形和弯曲的十字交叉偶极子组合来获得双频带的吸收特性. 在圆环上嵌入 2 个二极管, 在中间的交叉偶极子上嵌入 4 个二极管, 共有 3 个通孔与地面下的偏置网络相连, 2 个在圆环上, 一个在弯曲的十字交叉偶极子中心. 随着偏置电压的变化, 6 个二极管的导通与截止状态会改变单元的谐振频率. 为了减小通孔对谐振的影响, 设计时

使通孔半径最小, 并将偏置网络放置在金属底板下, 来降低偏置线对散射场的影响. 此外, 值得注意的是, 与每个单元连接的 LED 有两方面的用途: 首先 LED 可以指示单元上二极管的状态, 使测试更容易^[27], 其次闪烁的 LED 具有光学伪装的潜力.

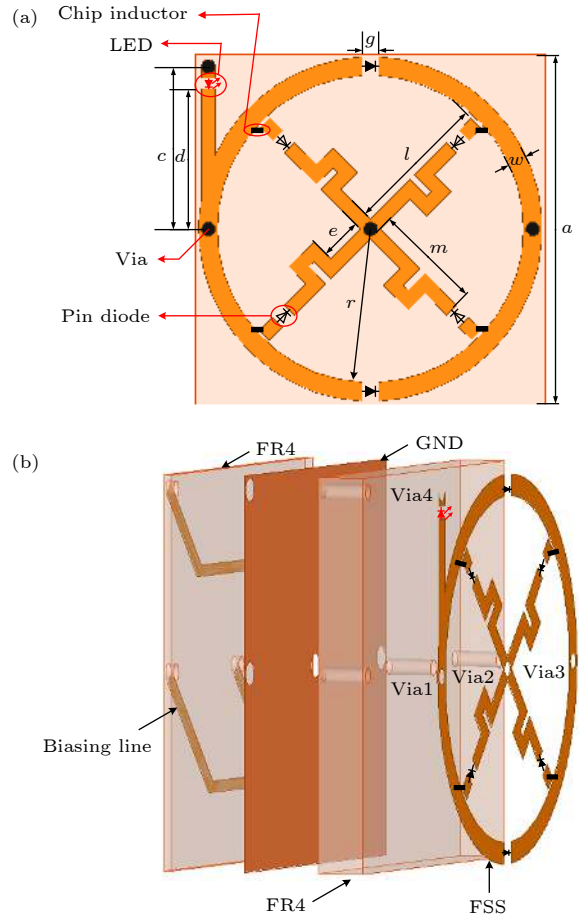


图 1 可重构 FSS 单元 (a) 俯视图; (b) 侧视图

Fig. 1. Configuration of the dual-band reconfigurable FSS unit cell: (a) Top view; (b) side view.

如图 1(a) 所示, FSS 吸波单元的几何参数为: $a = 25 \text{ mm}$, $r = 12.3 \text{ mm}$, $w = 1.3 \text{ mm}$, $g = 1.2 \text{ mm}$, $d = 10.2 \text{ mm}$, $c = 11.65 \text{ mm}$, $l = 10.2 \text{ mm}$, $m = 8 \text{ mm}$, $p = 1 \text{ mm}$, $f = 2.5 \text{ mm}$, $e = 5 \text{ mm}$. 介质基板选用的是 FR4, 其介电常数为 4.4, 及损耗角正切值 $\tan\delta = 0.02$, FSS 单元上层介质基板的厚度为 3 mm, 下层偏置网络介质基板的厚度为 0.5 mm. 选择的 PIN 二极管型号为 SMP1340-079 LF, PIN 二极管的等效电路模型在其“导通”状态时, 等效为 RL 串联电路, 等效参数值 $L = 0.45 \text{ nH}$, $R = 5 \Omega$ (3—4 GHz), $R = 8 \Omega$ (10—11 GHz). 在其处于“截止”状态时, 等效为 LC 串联电路, 等效参数值

$L = 0.45 \text{ nH}$, $C = 0.3 \text{ pF}$ (3—4 GHz), $C = 0.11 \text{ pF}$ (10—11 GHz).

表 1 中列出了 FSS 吸波单元的状态, 圆环和弯曲的十字交叉偶极子共有 4 种“导通”和“截止”状态, 通过改变通孔 1 到通孔 4 的电压来实现状态的切换, 如图 1(b) 所示, 所有通孔都连接到偏置线上. 通过切换单元状态实现双频带的可重构. 在本设计中, 可重构的 FSS 吸波器主要使用了 3 和 4 的状态, 即圆环和弯曲的十字交叉偶极子上的 PIN 二极管只有同时“导通”和“截止”状态. 对于单元中的圆环, 当二极管处于“导通”的状态时, 是个闭合的圆环, 而处于“截止”状态时, 圆环被分为 4 部分, 圆环的等效电感减小; 对于十字交叉偶极子, “导通”、“截止”状态改变了交叉偶极子等效长度. 因此通过二极管工作状态的组合, 来改变单元的双频带谐振频率. 图 2 为垂直入射波作用下, 所提出的双频可重构单元的反射系数. 当 PIN 二极管均处于“截止”状态时, 谐振频率分别为 3.9 GHz 和 10.6 GHz, 垂直入射平面电磁波将被完全吸收, 当 PIN 二极管均处于“导通”状态, 其谐振频率分别移至 4.6 GHz 和 11 GHz, 在原有两个频点会呈现出全反射状态. 图 3(a), (b) 为二极管全“截止”

表 1 通孔 1, 2, 3, 4 的电压变化, 可重新配置 FSS 的吸波器状态

Table 1. Reconfigurable FSS based absorber unit cell with the change of the voltage of via holes 1, 2, 3, and 4.

状态	通孔1	通孔2	通孔3	通孔4	圆环	偶极子	LED
1	高	高	低	高	通	断	灭
2	高	低	高	高	断	通	灭
3	高	低	低	高	通	通	灭
4	低	低	低	高	断	断	亮

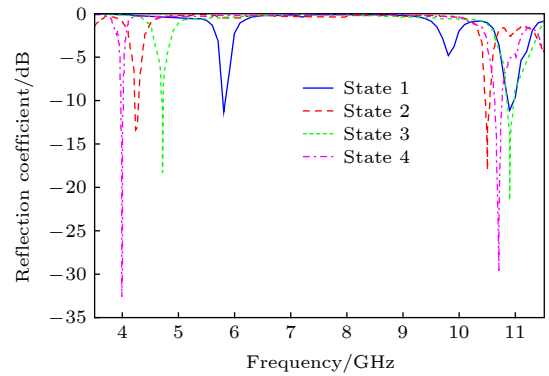


图 2 FSS 单元反射系数的仿真结果

Fig. 2. Simulated reflection coefficients of the proposed dual-band reconfigurable FSS unit cell.

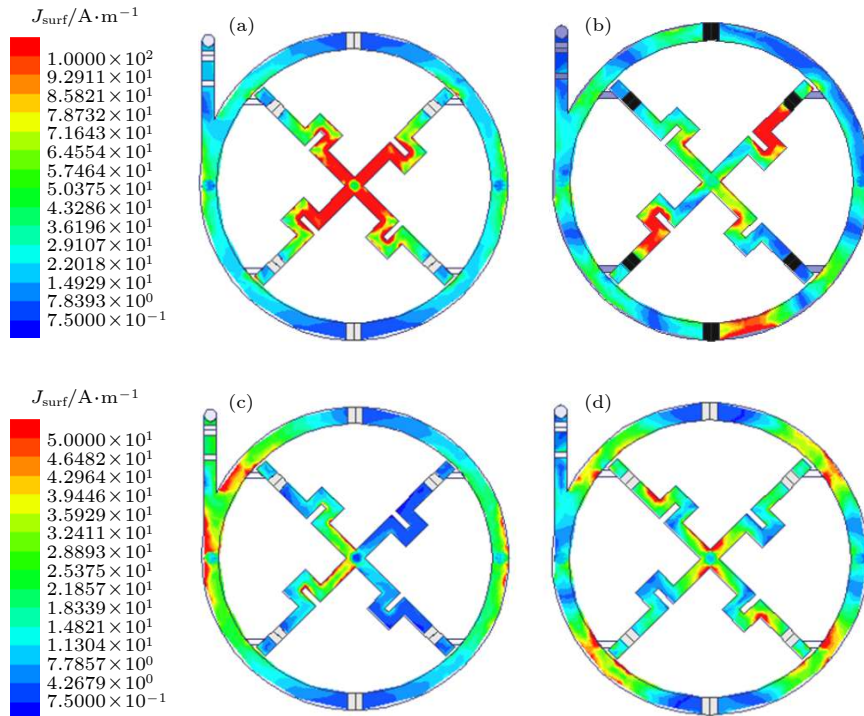


图 3 单元二极管全“截止”状态时表面电流分布 (a) 3.9 GHz, (b) 10.6 GHz; 单元二极管全“导通”状态时表面电流分布 (c) 3.9 GHz, (d) 10.6 GHz

Fig. 3. Surface currents distribution of the FSS unit cell with PIN diodes all at “off” states at (a) 3.9 GHz and (b) 10.6 GHz; surface currents distribution of the FSS unit cell with PIN diodes all at “on” states at (c) 3.9 GHz and (d) 10.6 GHz.

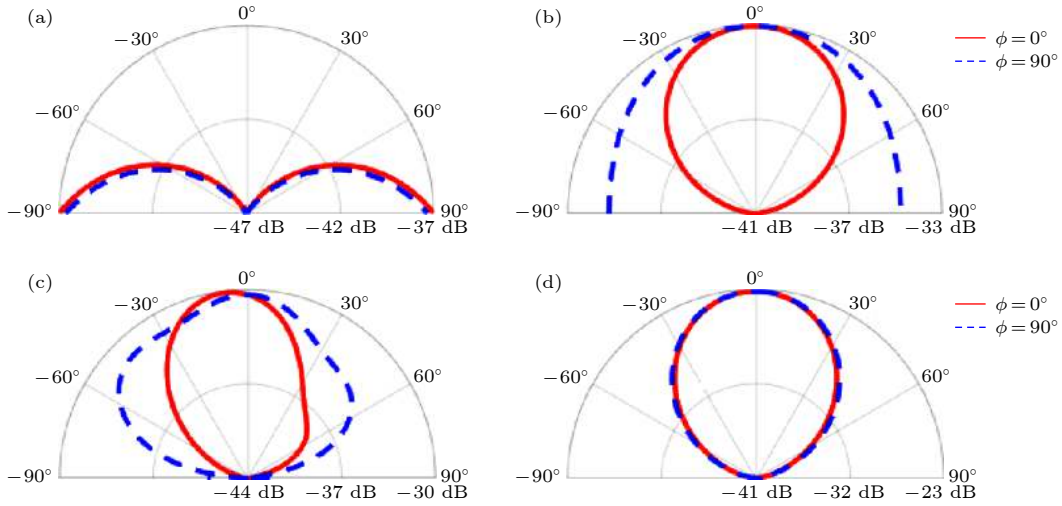


图 4 单元的二极管全“截止”状态时频率为 (a) 3.9 GHz, (c) 10.6 GHz 的 RCS; 单元的二极管全“导通”状态时频率为 (b) 3.9 GHz, (d) 10.6 GHz 的 RCS

Fig. 4. Simulated two-dimensional RCS of the FSS unit cell with PIN diodes all at “off” states at (a) 3.9 GHz and (c) 10.6 GHz; two-dimensional RCS when with PIN diodes all at “on” states at (b) 3.9 GHz and (d) 10.6 GHz.

时 FSS 单元表面电流分布情况, 图 3(c), (d) 所示为二极管全“导通”时单元表面的电流分布. 可以看出当二极管处于全“截止”状态时, 3.9 GHz 和 10.6 GHz 频率下电流幅值较强, 对应着 FSS 吸波状态响应; 当二极管处于全“导通”状态时, 3.9 GHz 和 10.6 GHz 频率下电流幅值较弱, 对应着 FSS 反射状态的响应. 如图 4(a), (b) 分别为 3.9 GHz 下 FSS 单元全“导通”和全“截止”状态下的 RCS 图, 在主反射方向上相差 14 dB; 图 4(c), (d) 为 10.6 GHz 下 FSS 单元两种状态的 RCS 图, 在主反射方向上相差 7 dB, 这表明当二极管处于全“截止”状态时,

单元在所设计的 S 与 X 频带具有很好的 RCS 缩减效果.

2.2 可重构的 FSS 吸波器

利用 2.1 节中设计的 FSS 单元, 设计了规模为 20×10 的双频带电可调 FSS 阵列. FSS 阵列的尺寸为 500×250 mm. 对于每个 FSS 单元, 嵌入 6 个 PIN 二极管可实现谐振频率的可重构, 结果阵列总共使用了 1200 个 PIN 二极管和 800 个贴片电感, 其中贴片电感保证圆环和交叉偶极子间直流电流的导通, 如图 5(a) 所示, 对于 FSS 阵列

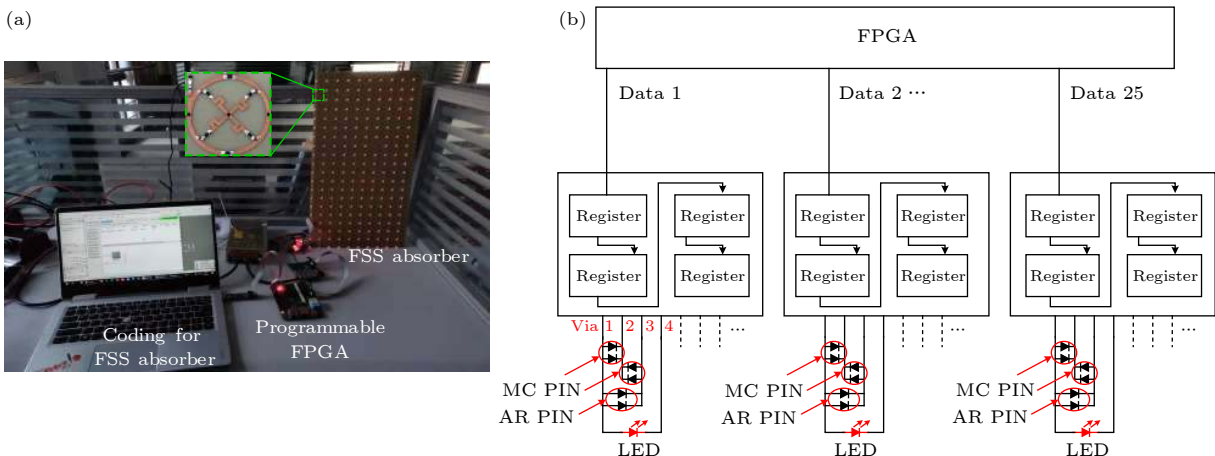


图 5 RCS 实时可调的 FSS 吸波器 (a) 可重构 FSS 吸波器系统包括 FSS 吸波器, FPGA, 状态编码的 PIN 开关; (b) 偏置网络
Fig. 5. Reconfigurable FSS absorber with real-time coding RCS: (a) System of the reconfigurable FSS absorber including FSS absorber, programmable FPGA, and coding for the states of switchable PIN diodes, inset is a fabricated unit cell; (b) biasing network for PIN diodes embedded in the meander cross (MC) and angular ring (AR) of the unit cells.

上面每个单元都可以通过 FPGA 进行编码. 利用编码可以独立切换每个单元的 PIN 二极管导通与截止状态, 实现单元吸波与反射的调控, 阵列的 RCS 大小可以通过编码单元的工作状态实时调控.

偏置网络的设计对于可重构的 FSS 吸波器是十分重要的^[6,24], 通过偏置网络可以控制每个单元上 PIN 二极管的偏置电压, 保证每个单元的状态都可独立控制以实现 RCS 调控. 图 5(b) 显示了动态伪装 FSS 阵列的偏置网络. 如图 1(b) 和图 5(b) 所示, 对于每个 FSS 单元, 需独立控制 4 个通孔的电压, 才能实现单元不同状态间的切换, 因此, 需要通过 FPGA 配合所设计的偏置网络同时对 800 个通孔的电压进行调控, 才能实现阵列上每个单元的独立控制. 为了降低偏置网络以及控制系统的复杂性, 将 4 个 74 LV4094 PW 8 位移寄存器级联成一个集成芯片, 来控制 8 个 FSS 单元. 这样, 可以通过 25 个集成芯片和一个可编程 FPGA 来控制 200 个单元的状态, 从而得到 RCS 电可调的 FSS 阵列, 所提的调节过程将在下面进行详细介绍. 此外, 连接到圆环的 LED 灯的状态与 FSS 单元的 PIN 二极管处于全部截止状态对应, 这将确保调试和测试过程更加直观.

3 结果与讨论

3.1 可重构 FSS 吸波器双站 RCS 的仿真

对于 FSS 吸波器, 获得期望的 RCS 大小, 可以通过优化阵列上单元的通断状态来实现. FSS 阵列由 $M \times N$ 个大小相等, 周期为 p 的超表面单元组成, 当平面波垂直入射时, 散射场 E_{total} 可以看作每个基本单元场的叠加^[29]:

$$E_{\text{total}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E_{m,n}(\theta, \varphi) \times e^{j(\varphi_{m,n} + kDm \sin \theta \cos \varphi + kDn \sin \theta \sin \varphi)}, \quad (1)$$

其中, $E_{m,n}(\theta, \varphi)$ 为周期边界条件下第 (m, n) 个单元的散射场, $\varphi_{m,n}$ 为单元的反射相位, D 是单元的周期, φ 和 θ 是球坐标系下的方位角与极化角, k 为波数.

由散射场叠加公式可以看出, 通过将两种不同状态的 FSS 单元进行组合, 可以容易地预测出 FSS 阵列的散射场. 值得指出的是, PIN 二极管处

于全部截止状态时的单元定义为“0”, PIN 二极管处于全部导通状态时的单元定义为“1”. 然后可以将整个 FSS 阵列通过二进制编码矩阵表示为

$$\begin{bmatrix} 1/0 & 1/0 & \cdots & 1/0 \\ 1/0 & 1/0 & \cdots & 1/0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/0 & 1/0 & \cdots & 1/0 \end{bmatrix}_{M \times N} \quad (2)$$

利用遗传算法对二进制编码矩阵进行优化, 可得到目标的散射场^[3,4]. 适应度函数定义为

$$\text{fitness} = \sum \sum (E(\theta, \phi) - E_{\text{target}}(\theta, \phi))^2, \quad (3)$$

$E_{\text{target}}(\theta, \phi)$ 是目标散射场, $E(\theta, \phi)$ 是由解析公式 (1) 式求得的散射场. 为了减少全波仿真的计算量, 只对 1/4 的 FSS 阵列状态进行优化, 利用对称边界条件可以有效地对整个 FSS 阵列进行仿真. 因此, 在优化过程中只考虑 FSS 吸波器上 1/4 的单元 (共 50 个单元).

为了验证 FSS 吸波器可通过阵列上编码单元的状态实现可重构 RCS, 本设计对主反射方向 ($\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$) 的散射场进行了优化. 优化目标是主反射方向的双站 RCS. 在 3.8 GHz 时, 来自主反射方向的 RCS 目标为 10dB, 5dB, 0dB, 而在 10.5 GHz 时, 目标为 20dB, 15dB, 5dB. 阵面优化结果的频点与单元吸收的频点会有一些偏移, 这主要是因为计算单元是在理想的周期边界条件下进行的, 而阵面中的单元不满足这种条件. 从图 6 和图 7 可以看出, 采用全波仿真和解析公式 (1) 计算得到的 FSS 吸波器在优化后的双站 RCS, 特别是在主反射方向上有很好的 consistency, 如图 8 所示, 给出了优化阵面的 RCS, RCS 仿真结果与图 6 和图 7 中的计算结果一致, 阵面 RCS 在 $\varphi = 0^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 均具有较好的对称性. 仿真的 RCS 结果能够较好地达到优化目标, 验证了本文的优化过程的正确性.

3.2 测试结果与讨论

20 × 10 的 FSS 阵列样件实物测试图如图 9(a) 所示, 收发喇叭天线与矢量网络分析仪相连, 用来测量 FSS 吸波器的单站 RCS. 如图 9(b) 所示, 为了保证测试结果不失一般性, 选择了 FSS 阵列呈全部截止状态, 3/4 的 FSS 阵列呈截止状态, 1/2 的 FSS 阵列呈截止状态, 1/4 的 FSS 阵列呈截止状态, 以及 FSS 阵列呈全部导通状态这五种排布

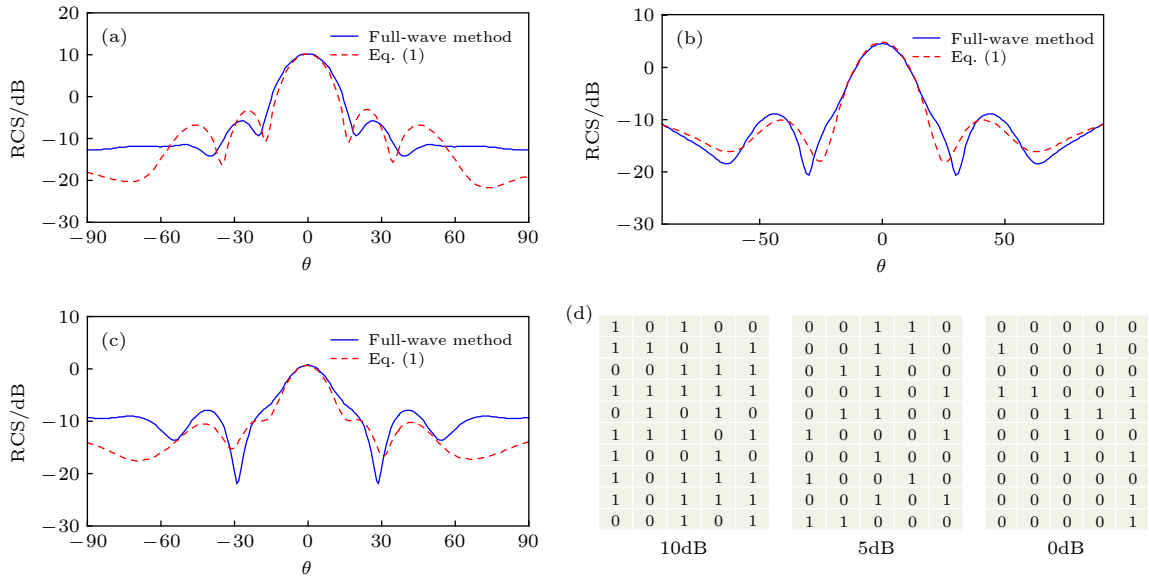


图 6 在 3.8 GHz 频率下双站 RCS 的全波仿真结果, 当优化 1/4 阵列的状态矩阵时, 主反射方向 ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$) 的 RCS 为 (a) 10dB, (b) 5dB, (c) 0dB, (d) 1/4 阵列的优化状态

Fig. 6. Full-wave and analytical method simulated bistatic RCS of the reconfigurable FSS absorber at 3.8 GHz. The RCS is manipulated to be (a) 10dB, (b) 5dB, and (c) 0dB at the main reflection direction ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$), when optimizing the states matrices as in (d) of the unit cells of a quarter of the screen.

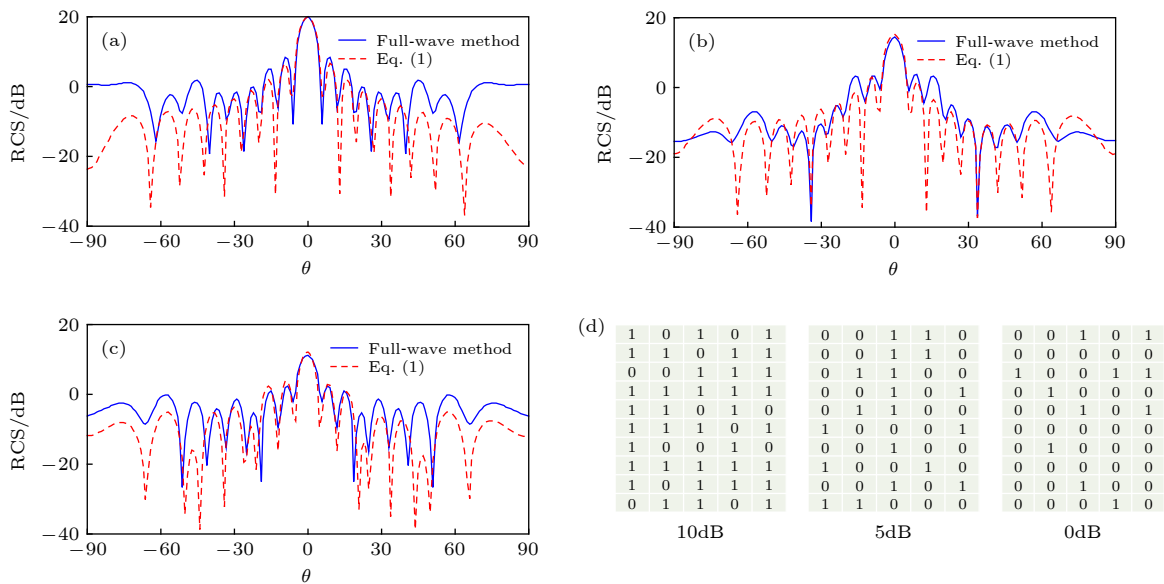


图 7 在 10.5 GHz 频率下双站 RCS 的全波仿真结果, 当优化 1/4 阵列的状态矩阵时, 主反射方向 ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$) 的 RCS 为 (a) 20dB, (b) 15dB, (c) 10dB, (d) 1/4 阵列的优化状态

Fig. 7. Full-wave and analytical method simulated bistatic RCS of the reconfigurable FSS absorber at 10.5 GHz. The RCS is manipulated to be (a) 20dB, (b) 15dB, and (c) 10dB at the main reflection direction ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$), when optimizing the states matrices as in (d) of the unit cells of a quarter of the screen.

方式进行测试. 在 2.9—3.7 GHz 和 9.7—11.1 GHz 频带测量的单站 RCS. 如图 10 所示当所有的单元都处于“1”状态时, 其最大反射性能与导体平面相似, 而随着处于“0”状态的单元数量的增加, RCS 逐渐减小. 在 3.2 和 10.3 GHz 下, 通过 FPGA 控制

导通/截断两种单元所占比例, 在 3.2 和 10.3 GHz 处, FSS 阵列的单站 RCS 呈现一个动态浮动的状态, 浮动范围在分别在 33 dB 和 26 dB 左右.

表 2 列出了本文中的设计与其他论文中提出的 FSS 吸波器的性能比较. FSS 阵列上所有的单

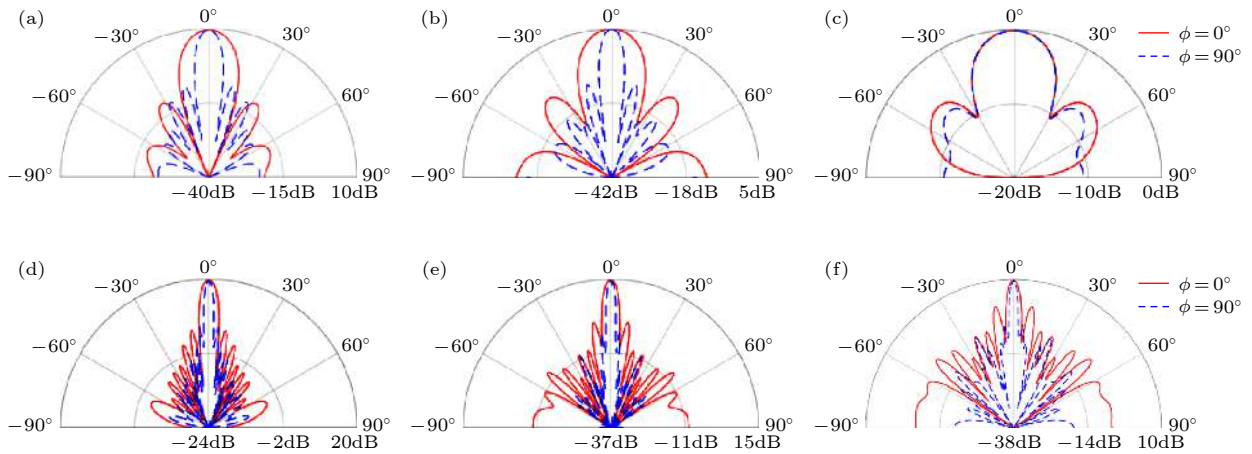


图 8 双站 RCS 全波仿真结果. 当优化 1/4 阵列的状态矩阵时, 主反射方向 ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$) 的 RCS 在 3.8 GHz 频率下为 (a) 10 dB, (b) 5 dB, (c) 0 dB; 在 10.5 GHz 频率下为 (d) 20 dB, (e) 15 dB, (f) 10 dB

Fig. 8. Full-wave simulated two-dimensional RCS of the reconfigurable FSS absorber. The RCS from the main reflection direction ($\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ$) is optimized to be (a) 10 dB, (b) 5 dB, and (c) 0 dB at 3.8 GHz; the RCS is optimized to be (d) 20 dB, (e) 15 dB, and (f) 10 dB at 10.5 GHz.

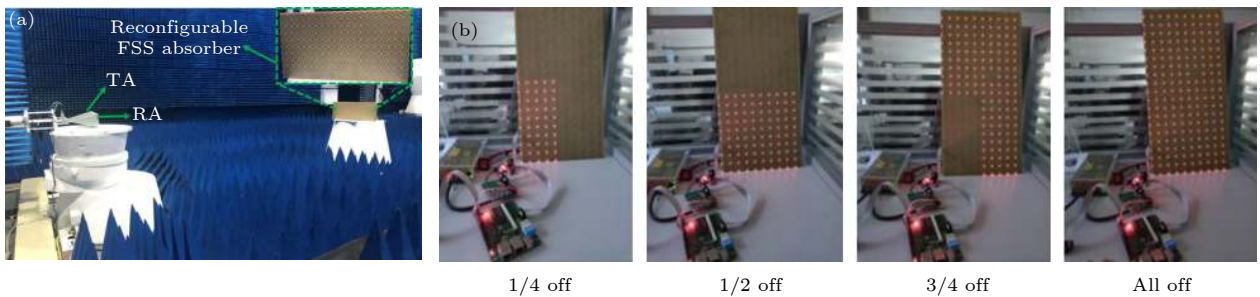


图 9 双频可重构 FSS 波收器的测量 (a) 单站 RCS 的测量设置; (b) 图 7 中测量的 FSS 阵列的 4 种状态

Fig. 9. Measurement of the proposed dual-band reconfigurable FSS absorber: (a) Measurement setup for the monostatic RCS; (b) four states of the FSS screen measured in Fig. 7.

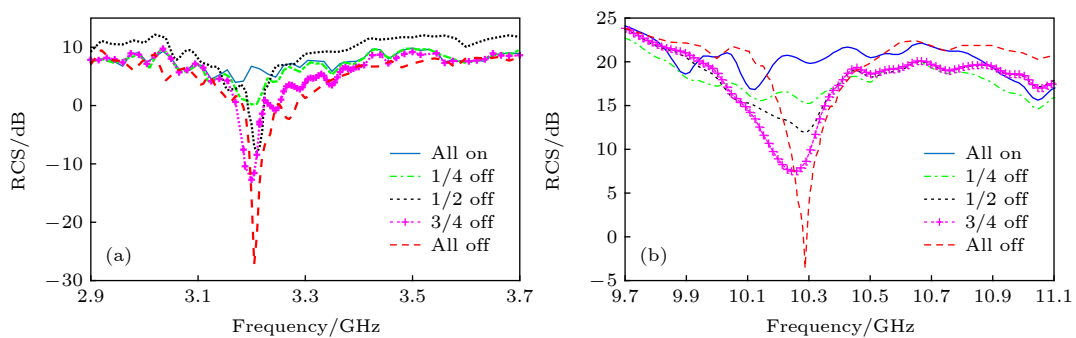


图 10 (a) 2.9—3.7 GHz, (b) 9.7—11.1 GHz 范围内 FSS 吸波器单站 RCS 测量值, 可调节 RCS 范围分别为 33dB 和 26dB.

Fig. 10. Measured monostatic RCS of the FSS absorber within (a) 2.9 to 3.7 GHz and (b) 9.7 to 11.1 GHz, ranges of 33dB and 26dB tunable RCS are obtained.

元处于“0”的状态 (3.2 和 10.3 GHz) 和“1”的状态 (4.8 和 11.0 GHz), 吸收峰会有变化. 可重构 FSS 吸波器可进一步通过优化状态矩阵的单元状态来

实现更好的实时调控 RCS. 文中提出的吸波器的厚度相对于其他工作中的要厚一些, 这是由于在 FSS 的金属底板下外加偏置网络所造成的.

表 2 与现有可重构基于 FSS 的吸波器的比较
Table 2. Lists of the comparison with existing published reconfigurable FSS based absorber.

可重构吸波器	带宽个数	频率范围/GHz	厚度(λ_0)	大小(λ_0)	RCS可调节范围/dB	能否调控RCS
[6]	2	2.26, 3.794.02, 6.36	0.02	2.08×2.08	-16	否
[11]	1	2.60, 2.90	0.02	2.7×2.9	—	否
[12]	1	4.10, 4.79	0.05	2.4×1.1	-25	否
[13]	1	1.95, 2.07	0.02	3.2×3.2	-40	否
[14]	1	0.70, 0.90, 1.10, 1.40, 1.50, 1.80	0.03	2.0×2.0	-10	否
[19]	1	8.80	—	0.9×0.9	-24	否
本工作	2	3.20, 10.304.80, 11.00	0.08	12.5×6.25	3326	是

4 结 论

本文中, 提出了一种具有实时调控 RCS 功能的 FSS 吸波器. 设计了加载二极管的双频带可调单元, 通过切换二极管工作状态, 改变单元的谐振点, 实现双频带吸波状态调控. 通过优化 FSS 阵列上每个单元的状态, 可以实时控制 FSS 吸波器的散射场. 在 3.2 GHz 和 10.3 GHz 下, 通过编码 FSS 阵列上单元的状态, 实现了 33dB 和 25dB 变化范围的单站 RCS. 全波仿真和解析算法都证明了所提优化方法的有效性. 与其他文献报道的 FSS 吸波器相比, 性能良好, 验证了本设计的正确性.

参考文献

- [1] Munk B A 2020 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York: Wiley) pp5-25
- [2] Wu T K Ed 1995 *Frequency Selective Surface and Grid Array* (New York: Wiley) pp5-25
- [3] Kern D J, Werner D H 2003 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **38** 61
- [4] Bossard J A, Werner D H, Mayer T S, Drupp R P 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 1390
- [5] Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 2740
- [6] Ghosh S, Srivastava K V 2017 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **16** 1687
- [7] Ghosh S, Srivastava K V 2014 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **14** 511
- [8] Tennant A, Chambers B 2004 *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.* **14** 46
- [9] Sun L, Cheng H, Zhou Y, Wang J 2012 *Optics Express* **20** 4675
- [10] Wu C J, Cheng Y Z., Wang W Y, He B, Gong R Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164102 (in Chinese) [吴晨骏, 程用志, 王文颖, 何博, 龚荣洲 2015 物理学报 **64** 164102]
- [11] Li Y F, Zhang J Q, Qu S B, Wang J F, Chen H Y, Xu Z, Zhang A X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 084103 (in Chinese) [李勇峰, 张介秋, 屈绍波, 王甲富, 陈红雅, 徐卓, 张安学 2014 物理学报 **63** 084103]
- [12] Zhang Y, Feng Y J, Jiang T, Cao J, Zhao J M, Zhu B 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 204101 (in Chinese) [张银, 冯一军, 姜田, 曹杰, 赵俊明, 朱博 2017 物理学报 **66** 204101]
- [13] Costantine J, Tawk Y, Barbin S E, Christodoulou C G 2015 *Proc. IEEE* **103** 424
- [14] Zhu B, Huang C, Feng Y, Zhao J, Jiang T 2010 *Prog. Electromagn.* **24** 121
- [15] Xu W, Sonkusale S 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 031902
- [16] Wang M, Hu C, Pu M, Huang C, Ma X, Luo X 2012 *Electron. Lett.* **48** 1002
- [17] Xu W, He Y, Kong P, Li J, Xu H, Miao L, Bie S, Jiang J 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 184903
- [18] Parker E A, Savia S B 2001 *in Proc. Inst. Elect. Eng. Microwaves, Antennas, Propag.* **148** 103
- [19] Lima A C de C, Parker E A, Langley R J 1994 *Electron. Lett.* **30** 281
- [20] Cui T J, Qi M Q, Wan X, Zhao J, Cheng Q 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e218
- [21] Li M, Li S, Yu Y F, Ni X, Chen R S 2018 *Opt. Express* **26** 24702
- [22] Pazokian M, Komjani N, Karimipour M 2018 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **17** 1382
- [23] Liu X, Gao J, Xu L, Cao X, Zhao Y, Li S 2016 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **16** 724
- [24] Yu J, Jiang W, Gong S 2019 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **18** 2016
- [25] Jia Y, Liu Y, Guo Y J, Li K, Gong S X 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 179
- [26] Liu Y, Li K, Jia Y, Hao Y, Gong S X, Guo Y J 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 326
- [27] Yang H, Yang F, Xu S, Mao Y, Li M, Cao X, Gao J 2016 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **64** 2246
- [28] Yang H, Yang F, Cao X, Xu S, Gao J, Chen X, Li M, Li T 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 3024
- [29] Xu J, Li M, Chen R S 2017 *IET Microwaves Antennas Propag.* **11** 1578

S/X dual-band real-time modulated frequency selective surface based absorber^{*}

Zhou Shi-Hao Fang Xin-Yu Li Meng-Meng[†] Yu Ye-Feng Chen Ru-Shan

(*Department of Communication Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*)

(Received 25 April 2020; revised manuscript received 12 June 2020)

Abstract

Frequency selective surface (FSS) is of great research interest for its wide applications in radome, absorber, electromagnetic filters, and artificial electromagnetic bandgap materials. In order to achieve a multifunctional FSS with real-time manipulated radar cross-section (RCS), there are mainly three ways, i.e. to design reconfigurable FSS unit cell, reconfigurable screen, and a combination of reconfigurable unit cell and screen. In this work, a combination design of both the reconfigurable unit cells and FSS screen is proposed to realize a dual-band FSS absorber with real-time manipulated RCS. For the reconfigurable unit cell, an angular ring and a meander cross dipole are combined to obtain a dual-band absorption. The dual-band resonance frequencies are reconfigurable by switching the PIN diodes embedded in the unit cell. When switching the PIN diodes, the resonance frequencies of the unit cell would be changed due to the variation of the effective capacitance and inductance of the unit cell. For the reconfigurable FSS screen, a novel biasing network is introduced, then the scattering field from each unit cell is modulated independently by switching the “on/off” state of the PIN diode through using a programmable field programmable gate array (FPGA). The total scattering far field is expressed as the superposition of the scattering field from each unit cell, and the far field scattered by the unit cell which is evaluated under an infinite periodic boundary condition. The scattering field of the FSS absorber can be predicted by considering the working states of all the unit cells on the screen. We define the unit cell as state “0”, when all the PIN diodes are at the states of “off”, and as state “1” when the PIN diodes are all at the states of “on”. The entire screen of FSS absorber is thus pixelated, which can be expressed by a binary coding matrix. The real-time scattering fields from the FSS absorber are manipulated perfectly by optimizing the states matrices showing “on/off” of each unit cell with genetic algorithm (GA). The FSS absorber is fabricated and measured. The ranges of 33dB and 25dB reconfigurable monostatic RCS at 3.2 GHz and 10.3 GHz are achieved by coding the states of unit cells on the FSS absorber screen. Both full-wave and analytical simulations demonstrate the effectiveness of the proposed optimization procedure. Compared with the reported FSS absorber, the proposed design is validated to possess good performance.

Keywords: frequency selective surfaces, absorber, radar cross section, reconfigurable

PACS: 41.20.Jb, 5225.Os

DOI: 10.7498/aps.69.20200606

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61871222, 61890540, 61890541), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant No. BK20171429), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 30918011103).

[†] Corresponding author. E-mail: limengmeng@njust.edu.cn