

王素玲, 郭楠, 赵清峰, 等. 双层双频电磁带隙结构的电磁特性[J]. 电波科学学报, 2014, 29(6): 1183-1188. doi: 10.13443/j. cjors. 2013122201.

WANG Suling, GUO Nan, ZHAO Qingfeng, et al. Frequency characterizations of the double-layer and dual band EBG structure[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(6): 1183-1188. (in Chinese). doi: 10.13443/j. cjors. 2013122201.

双层双频电磁带隙结构的电磁特性

王素玲 郭楠 赵清峰 刘亚宁

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘 要 提出了一种双层电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构, 构建其电感电容(Inductance Capacitance, LC)等效电路并推算出双层 EBG 的谐振表达式, 通过仿真软件对双层 EBG 结构上下两层的参数进行调节, 分析各参数对电磁特性的影响规律, 结果表明双层 EBG 可以产生两个零位相频率点, 下层结构对应的零位相频率主要与下层的介质厚度及贴片大小有关, 几乎不受上层的影响, 而上层结构的谐振频率不仅与其自身参数有关也要考虑下层对其的影响, 仿真结果与理论分析一致. 该结构为 EBG 的具体设计和应用提供了指导依据.

关键词 电磁带隙; 双层 EBG 结构; 零位相频率; 高阻抗

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2014)06-1183-06

Frequency characterizations of the double-layer and dual band EBG structure

WANG Suling GUO Nan ZHAO Qingfeng LIU Yaning

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract A double-layer electromagnetic band gap (EBG) structure is presented. The expressions of the double-layer EBG structure are derived based on its inductance and capacitance (LC) equivalent circuit proposed. The paper presents the relationship between the resonance frequency and the parameters of the structure by analyzing the characteristic of the double-layer EBG structure with different parameters of each layer based on the simulating research. The results show that the double-layer EBG has two zero-phase points, the lower one is mainly related with its dielectric thickness and patch size and has nothing to do with the upper layer, which is not only related with its own parameters also take the influence of the lower one into account. The simulation results agree well with the theoretical analysis, which provides specific guidance in the EBG design and application.

Key words electromagnetic band gap; double-layer EBG structure; zero-phase frequency; high-impedance

收稿日期: 2013-12-22

资助项目: 国家自然科学基金支持(61040016); 河南理工大学博士基金(64998357)

联系人: 郭楠 E-mail: gnshelley@163.com

引言

近年来,电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)结构的应用研究发展非常迅速.与光子带隙(Photonic Band Gap, PBG)结构^[1-2]性质类似,EBG结构同样对特定的频段呈现带阻特性,即电磁波在某一频率范围内不能在周期性带隙结构中传播. EBG结构独有的带隙特性和同相反射特性在微波领域有广泛的应用前景,如可以制作宽带移相器、功分器、耦合器、微波天线和相控阵天线等.这种结构表面具有很高的阻抗,对特定频段内的电磁波产生抑制^[2-4].利用EBG作为天线反射基板不仅可以实现天线系统低轮廓^[5-7],对改善天线的辐射性能也有重大意义.

在单层EBG结构的基础上,提出双层EBG结构,并依据电感电容(Inductance Capacitance, LC)谐振原理对其进行理论分析和仿真验证.在双频天线反射基板的设计中,由于基板参数较多,且各个参数间互相影响,达到期望的工程设计指标,需要付出大量的仿真、实验工作,本文的结论给专业设计者提供了理论支持,并可以为设计工作提供参考和依据.

1 双层 EBG 结构及其电路模型

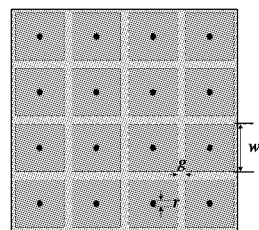
1.1 单层 EBG 及其 LC 等效模型

传统的单层 EBG 结构通常采用双面覆铜印刷板制作.如图 1(a)所示,地平面为连续的覆铜面,另一面为印有周期性结构的正方形贴片,贴片的宽度为 w ,两个贴片间的间隔为 g ,介质的厚度为 h ,贴片通过金属过孔与地平面相连,金属过孔的高度与介质厚度 h 相同,半径为 r .图 1(b)为其剖面图,图 1(c)为等效的 LC 模型电路^[6-7]

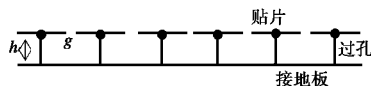
EBG 结构有各种不同的分析模型,比较直观的常用模型是 EBG 的集总参数模型,该模型把贴片和通孔等效为 LC 并联谐振电路,如图 1(c)所示 EBG 单元的金属贴片和通孔的尺寸远远小于其工作波长,入射电磁波在 EBG 中的金属贴片表面激发电流经由金属过孔流到接地板,因此金属贴片与金属过孔及其电流流经的地平面可等效为电感 L ,而相邻的金属贴片之间积累的电荷可等效为电容 C .

由 EBG 的 LC 等效模型图可知,其带隙特性是由周期单元的谐振或共谐振机制产生的 EBG 结构的表面阻抗可近似表达为^[7-9]

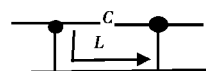
$$Z_s = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}. \quad (1)$$



(a) EBG 俯视图



(b) EBG 结构侧视图



(c) 单元 EBG 等效模型

图 1 单层 EBG 结构及其等效 LC 模型图

式中: ω 为入射波的角频率; L 为 EBG 一个单元与地平面之间的电感; C 为相邻两个单元之间的电容;谐振频率(也就是 EBG 的阻带中心频率)为^[7-8]

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

由式(1)可知,EBG 的阻抗在谐振频率处趋于无穷大,呈现出高阻抗状态除了高阻抗性质之外,EBG 结构还表现出了反射性质.

当电磁波垂直入射到金属表面时,电磁波发生全反射,但是入射波与反射波之间存在半波损失,反射波与入射波的反射系数为 -1 .而 EBG 结构的反射波与入射波在谐振频段位相差为零,电磁波反射系数为正 1,而非 -1 .EBG 结构在特定频段呈现出理想磁导体性质,相当于磁壁,与金属导体表面形成电壁的性质相对应,称为同位相反射. EBG 的同位相反射性质如图 2 所示.图中 EBG 反射位相从

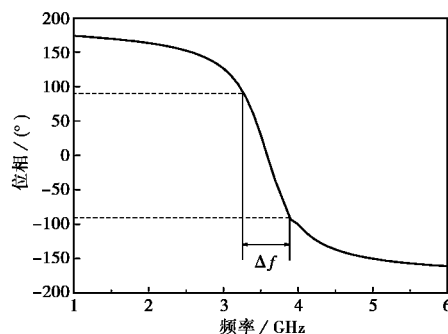


图 2 EBG 结构的零位相反射示意

+180°变化到-180°,在特定频率点位相为零,位相+90°到-90°为同位相反射的带宽 Δf [7-9]。

1.2 双层 EBG 的结构及理论分析

双层 EBG 结构如图 3 所示。该结构的俯视图见图 3(a),该双层 EBG 结构采用层叠方式,直接在第一层 EBG 结构上堆加第二层介质和贴片,最下层为连续的金属地平面图。3(b)为其横截面图,下层介质厚度 h_1 、上层厚度 h_2 。与单层 EBG 的 LC 等效电路模型类似,此处提出双层 EBG 结构的 LC 等效电路模型如图 3(c)所示。图 3(c)所示电路中, C_1 为下层贴片的缝隙电容, C_2 为上层贴片的缝隙电容, L_1 为下层过孔及金属地的等效电感, L_2 为上层过孔的等效电感。下面对该结构的频率特性进行分析。

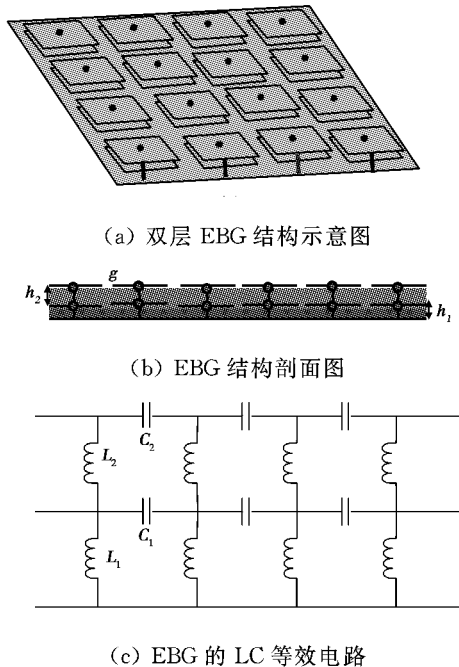


图 3 EBG 结构剖面图及其 LC 等效电路

对于周期性的 EBG 结构,分析其频率特性只需取其一个单元即可。由图 3(c)可知,单元电路可以认为是:电感 L_1 先与电容 C_1 并联,然后再与电感 L_2 串联,最后再与电容 C_2 并联。假定电感 L_1 先与电容 C_1 并联,阻抗用 Z_1 表示,则

$$Z_1 = \frac{j\omega L_1}{1 - \omega^2 L_1 C_1}. \quad (3)$$

用 Z_2 表示 Z_1 与电感 L_2 的串联,则

$$Z_2 = Z_1 + j\omega L_2. \quad (4)$$

单元总并联总导纳为

$$Y = j\omega C_2 + \frac{1}{Z_2 + j\omega L_2}. \quad (5)$$

令式(5)为零,并将式(3)代入得

$$j\omega C_2 + \frac{1}{\frac{j\omega L_1}{1 - \omega^2 L_1 C_1} + j\omega L_2} = 0. \quad (6)$$

将式(6)整理可得单元谐振表达式为

$$\frac{\omega^2 L_1 C_2}{1 - \omega^2 L_1 C_1} + \omega^2 L_2 C_2 - 1 = 0. \quad (7)$$

式(7)由三项组成,这里分别称为第一项,第二项和第三项这三项有不同的意义:第一项为分数,当其分母为零时,该项为无穷大,对应的 EBG 表面阻抗为无穷大。由第一项分母为零可得

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}. \quad (8)$$

此频率可以认为是双层双频 EBG 结构的第一谐振频率,即图 2 中的同位相反射频率点。式(8)显示出此双层 EBG 结构的第一谐振频率 ω_1 主要取决于 EBG 的下层结构(下层电容 C_1 与下层电感 L_1),与上层关系不大。

在表达式(7)中,如果不考虑第一项作用,则第二项和第三项得出的频率与第二层单独存在时相同,而第一项为附加项,是两层之间相互作用的结果。因此,第二谐振频率不仅仅由第二层属性决定,同时要考虑第一层 EBG 对其产生的影响。

2 同位相反射的仿真验证

仿真软件采用 HFSS11。仿真内容分两部分,一是验证第一谐振频率与上下层介质及贴片等参数之间的关系,二是验证影响第二谐振频率的各种因素。

2.1 第一频率点仿真

设 EBG 为无限大周期性结构平面,下层介质采用 Rogers TMM4,相对介电常数为 $\epsilon_{r1} = 4.5$,基片尺寸为 $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,基片厚度 $h_1 = 5 \text{ mm}$,上层介质采用 Rogers 03010 做基片,相对介电常数 $\epsilon_{r2} = 10.2$,介质基片 $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 1.28 \text{ mm}$,尺度 $h_2 = 1.28 \text{ mm}$,金属贴片尺度为 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$,下层矩形金属贴片的尺度为 $13.6 \text{ mm} \times 13.6 \text{ mm}$,上下两层过孔均位于贴片中心位置,过孔半径 $r = 0.5 \text{ mm}$ 当微波垂直入射时,仿真结果如图 4 所示,零位相频率 $f = 1.1 \text{ GHz}$ 。

2.1.1 零位相频率点与下层介质间关系

由理论分析可知,第一频率点主要受到下层介质及下层贴片的影响,上层介质及贴片对第一频率的影响较小,根据式(8),当下层的电容 C_1 、电感 L_1 发生改变时,零位相频率点随之改变,电容电感变小,频率将向高频方向移动。

仿真中只改变介质厚度保持其它参数不变,从

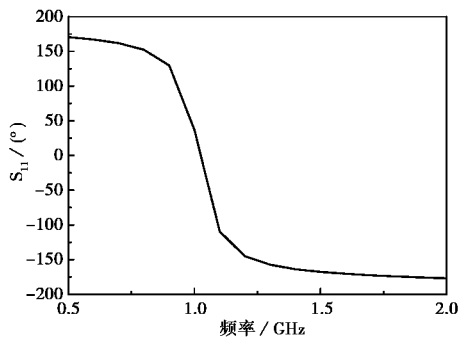


图4 双层 EBG 的第一零位相频率点

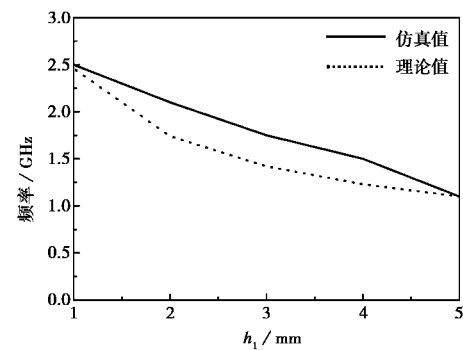
而使电感 L_1 变化,观察零位相点的移动. 下层高度 h_1 取系列分离值 5、4、3、2、1 mm 微波垂直入射,仿真结果如图 5(a)实线所示,不难看出当厚度减小时,零谐振点向高频方向移动. 如果用下层介质厚度 5 mm 时对应的频率作为标准,同时认为下层的等效电感 L_1 与下层介质的厚度 h_1 成正比^[6]. 由式(8)可得零位相点的频率与厚度的对应关系为平方根反比关系,如果用 f_5 、 f_4 分别对应厚度 h_1 为 5 mm 和 4 mm 则有

$$f_5 : f_4 = \sqrt{4} : \sqrt{5}. \quad (9)$$

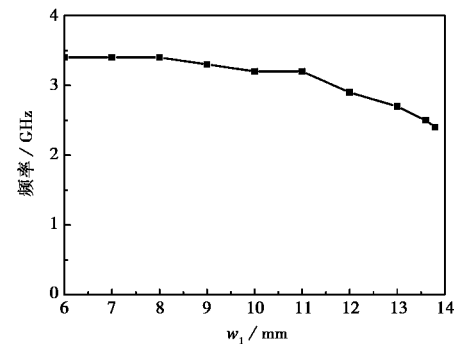
其它厚度对应的频率同样可以用式(9)计算. 由此可以估算 5、4、3、2、1 mm 对应的零频率点分别为: 1.1、1.23、1.42、1.74、2.46 GHz. 图 5(a)中虚线为理论估算值曲线,图中显示,理论曲线与仿真曲线的变化趋势相同,均为厚度 h_1 增加时频率降低,一定程度上证明了关系式(8)所揭示的规律的正确性. 同时二者之间存在一定的误差,该误差可能是在估算中用 5 mm 厚度对应的频率作为参考造成的,也有可能是在估算下层电感 L_1 时采用 L_1 正比于下层介质的厚度 h_1 导致 L_1 计算不够精确造成的. 笔者认为,该误差的存在不影响表达式(8)的正确性.

影响零位相的另一个参数是下层贴片大小,在仿真中只设定下层介质厚度 h_1 为 1 mm,保持其它参数不变,改变中间层贴片的尺度观察零位相点的移动. 下层贴片的尺度取系列分离值 13.8 mm × 13.8 mm、13.6 mm × 13.6 mm、13 mm × 13 mm、12 mm × 12 mm、11 mm × 11 mm、10 mm × 10 mm、9 mm × 9 mm、8 mm × 8 mm、7 mm × 7 mm. 微波垂直入射,用 w_1 表示贴片的长或宽,仿真结果如图 5(b)实线所示:整体看来,当贴片尺度增加时(电容 C_1 增加),零位相频率变化趋势为向低频方向移动,满足式(8)的理论结果.

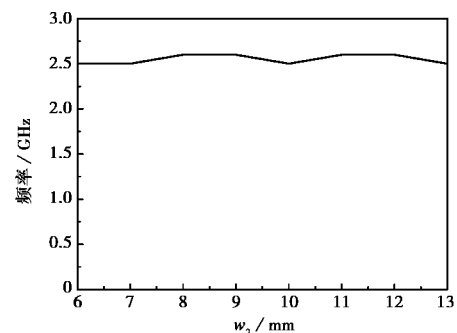
与改变下层介质的厚度相比,贴片大小对零频



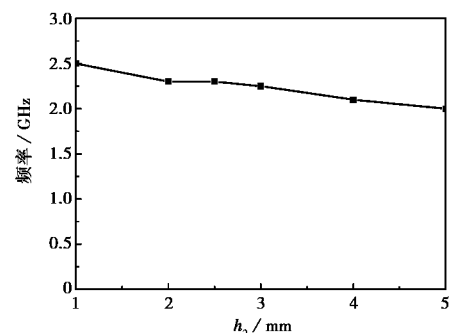
(a) 零位相点随着下层介质厚度变化



(b) 零位相点随下层贴片大小变化



(c) 零位相点随上层贴片大小变化



(d) 零位相点随上层介质厚度变化

图5 零位相点变化图

率点的调节要微弱些,即零频率点的变化幅度相对要小,此性质为 EBG 第一频率点的设计提供了依据,当粗调零位相频率可以采用调节介质厚度的方

式,微调时采用调节贴片尺度较为有效。

需要注意的是由于上层介质和贴片的存在,下层贴片电容 C_1 的大小会受到一定的影响,导致理论零位相频率的偏移。

2.1.2 零位相频率点与上层介质关系

上层介质仿真时,先设定下层介质的参数并保持不变,改变上层介质的贴片大小和介质的厚度,观察第一零位相点的变化。仿真中下层贴片的厚度 h_1 设定为 1 mm,贴片 13.6 mm×13.6 mm 为固定值,上层贴片边长取系列分离值 6、7、8、9、10、11、12、13 mm,仿真结果如图 5(c)所示。当贴片边长从 6 mm 增大到 13 mm 时,对应的频率在 2.5~2.6 GHz 之间变化,变化波动范围非常小,此结果验证了表达式(8)中第一频率不受上层电容影响的结论。

保持上层贴片大小为 13.6 mm×13.6 mm 不变,改变上层贴片的厚度 h_2 ,当 h_2 取分离值 1、2、3、4、5 mm 时,对应的频率从 2.5 GHz 减小到 2 GHz,仿真结果见图 5(d)与贴片大小相比,第一零频率点变动较大。这是由于上层厚度的增加等效于下层电感 L_1 加大,从而使得谐振频率减小。

2.2 第二频率点仿真分析

第二频率点需满足表达式(7),而式(7)是较为复杂的高次表达式,虽然可以解高次方程,但是结果较复杂,不易看出频率变化的趋势。本文从频率偏移的角度对第二频率进行分析和仿真。把式(7)中的第一项,即下层电容、电感的作用称为偏移量:

如果第二频率小于第一频率,表达式(7)中的第一项将为正值,导致第二零位相频率向低频方向偏移(与不存在第一项相比);

如果第二频率大于第一频率,表达式(7)中的第一项将为负值,导致第二零位相频率向高频方向偏移;

如果第二频率远远大于第一频率,表达式(7)中的第一项近似为上下层电容的比值($-C_2/C_1$),第二零位相频率向高频方向的偏移量取决于上下贴片的尺度之比。

第二零位相频率仿真中先做单层仿真,大致找出由式(7)中后两项决定的频率,仿真参数不再赘述,仿真结果见图 6 中实线系列曲线 1,其零位相频率为 3.7 GHz 在单层仿真的基础上加载下层介质的厚度 h_1 ,改变下层 h_1 以改变下层电感 L_1 ,当 h_1 为 2 mm 时,仿真结果见图 6 系列曲线 2,对应的零位相频率为 4.1 GHz,相对于基准频率 3.8 GHz 偏移 0.4 GHz;保持下层厚度 1 mm 不变,改变中间贴

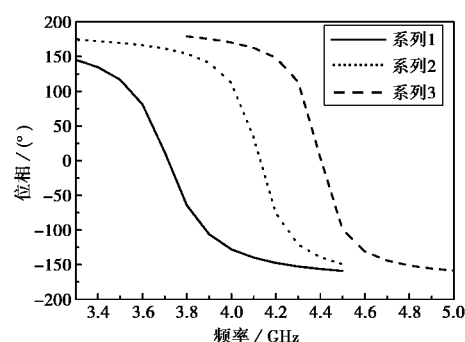


图 6 参数不同时第二零位相点的变化

片大小(从 6.8 mm 减小到 6.5 mm),位相曲线见图 6 系列 3,对应的频率为 4.4 GHz,相对基准频率上移 0.7 GHz. 仿真结果和预期结果一致. 其它情况限于篇幅不再一一列出。

3 结 论

提出了一种双层 EBG 结构,并给出了该结构的 LC 模型电路,推出了双层 EBG 的谐振表达式,理论分析结果表明:双层 EBG 结构可以产生双频甚至多频;其下层结构所激发的谐振频率与上层关系不大,主要由下层的介质基片、介质厚度以及下层对应的金属贴片决定,上层对下层的影响主要表现在对其电容、电感数值的微小影响;而上层对应的第二零位相频率则不仅由上层 EBG 的属性决定,更要考虑下层对上层的作用,下层激发的频率项较大,不能忽略当上层激发的零位相频率小于下层时,偏移量使其向更小的频率方向移动,而当上层激发的零位相频率高于下层时,偏移量使其向更高的频率方向移动。

参考文献

- [1] RADISIC V, QIAN Y, ITOH T. Broadband power amplifier using dielectric photonic bandgap structure[J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett, 1998, 8(10): 336-339.
- [2] KAMGAING T, RAMAHI O M. Design and modeling of high-impedance electromagnetic surface for switching noise suppression in power planes[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(3): 479-489.
- [3] 陈曦, 梁昌洪, 苏子剑, 等. 一种新型的双带电磁带隙结构[J]. 电波科学学报, 2009, 24(5): 860-864.
CHEN Xi, LIANG Changhong, SU Zijian, et al. Novel dual-band electromagnetic bandgap structure[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(5): 860-

864. (in Chinese)

- [4] 史凌峰, 张 颖, 王海鹏, 等. 一种新型多周期平面电磁带隙结构[J]. 电波科学学报, 2012, 27(2): 339-343.

SHI Lingfeng, ZHANG Ying, WANG Haipeng, et al. A novel multi-period planar electromagnetic band-gap structure[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 339-343. (in Chinese)

- [5] SIEVENPIPER D, ZHANG L, BROAS R, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1999, 47(11): 2059-2074.

- [6] LAU P Y. Novel RFID Antennas for a Modern Library[D]. Hong Kong: City University of Hong Kong, 2010.

- [7] PENG Lin, RUAN Chengli, XIONG Jiang. Compact EBG for multi-band applications[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2012, 60(9): 4440-4444.

- [8] YANG F, SAMII Y R. Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering[M]. New York: Cambridge University Press, 2009.

- [9] 田雨波, 沙 莎. 一种蝶形单元的电磁带隙结构的频率特性[J]. 电波科学学报, 2009, 24(5): 865-868+878.

TIAN Yubo, SHA Sha. Frequency characteristics of electromagnetic bandgap structure with bow tie unit[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(5): 865-868+878. (in Chinese)

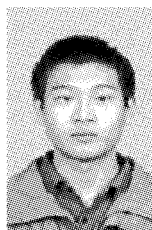
作者简介



王素玲 (1964—), 女, 河南人, 教授, 博士, 硕士生导师, 973 项目、国家自然科学基金项目重要成员, 主要从事电磁兼容、电磁场与微波技术方面的研究.



郭楠 (1989—), 女, 河南人, 河南理工大学硕士研究生, 主要从事电磁场与微波技术方面的研究.



赵清峰 (1990—), 男, 河南人, 河南理工大学硕士研究生, 主要从事电磁场与微波技术方面的研究.

(上接第 1164 页)

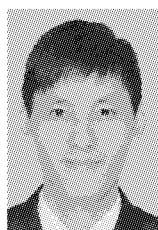
作者简介



史建魁 (1954—), 男, 陕西人, 博士, 中国科学院空间科学与应用研究中心研究员, 中国科学院大学教授, 博士生导师, 主要从事电离层扰动变化以及电离层-磁层耦合研究.



王霄 (1974—), 男, 江苏人, 博士, 主要从事低纬度地区电离层探测和扰动变化研究.



张冬 (1989—), 男, 山东人, 中国科学院空间科学与应用研究中心空间物理学专业硕士研究生, 研究方向为低纬电离层 TEC 扰动研究.