

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.11.023

加载电磁带隙 EBG 反射板的低电磁辐射比 吸收率 SAR 天线*

王素玲^{1,2} 杨晓策¹

(1. 新乡学院机电工程学院 新乡 453000; 2. 河南理工大学电气与自动化工程学院 焦作 454000)

摘要:如何减小移动通信中移动终端电磁信号对人体脑部的影响成为公众关注的焦点之一,电磁带隙(EBG)结构在其禁带内具有阻抗高、反射波与入射波位相相同的特点,可以抑制印刷线路板的表面波改善天线辐射性能,减少进入脑部的电磁信号。在 1.8 GHz 频段,对加载 EBG 结构的反射板的天线系统进行了仿真,结果表明,与未加载 EBG 的天线系统相比,加载 EBG 结构的偶极天线系统不仅可以保证天线的辐射增益,同时人体脑部电磁波的比吸收率大大降低,加载 EBG 反射板可以有效抑制人体脑部的电磁场强度;由于天线与反射板的互相耦合,天线的尺度与未加载 EBG 结构的天线相比尺度变小,同位相反射偶极天线与 EBG 距离很近,实现了低轮廓天线。

关键词:电磁带隙;比吸收率;天线增益;同位相反射

中图分类号: TN826 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:**

Low specific absorption rate antenna with reflection board of electromagnetic band gap

Wang Suling^{1,2} Yang Xiaocel¹

(1. Electrical and Mechanical College, Xinxiang University, Xinxiang 453000, China;

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

Abstract: It becomes more and more attention of the public that the research on the reduction of the specific absorption rate (SAR) of electromagnetic radiation on the human brain with the development of the mobile communications. The electromagnetic band gap (EBG) structure has high-impedance in some frequency band and its reflection wave is in-phase with that of the incident wave, so it could suppress the surface waves formed on the printed board and improve antenna's radiation preventing the transmission of electromagnetic wave in the direction of the human head. The simulation is carried out on the antenna with EBG at 1.8 GHz. The results show that comparing with the antenna without EBG structure, the SAR of electromagnetic wave is greatly reduced. Meanwhile, the antenna satisfies the technique indication such as S-parameters, radiation etc. The simulation also show that the antenna's dimension is smaller. Based on the in-phase reflection a low-profile antenna with low SAR is achieved in this paper.

Keywords: electromagnetic band gap (EBG); specific absorption rate (SAR); antenna gain; in-phase reflection

0 引 言

近年来由于通信系统的迅速发展,人们对便携式通信设备的需求迅速增加,手机、平板电脑以及其他便携式

通信终端越来越成为人们日常工作和生活中不可或缺的电子设备^[1-2]。为方便使用,移动设备工作时通常靠近人体,这给使用者带来一定的健康隐患。

由于微波穿越大气层时损耗的能量最少,在空气中相对其他波段来讲能够传播更远的距离,移动设备通常

工作在微波波段。然而,微波波段的电磁场对人体有很强的辐射效应,工作在微波波段的移动设备发射的电磁波会进入人体内部,如手机信号会进入人体的脑部,引起人体头部局部(如耳部发热),平板电脑辐射的电磁波则靠近使用者内脏部位,引起人体组织的局部能量吸收,关于微波对人体组织的伤害不断的见诸报道^[2-3],采取相应的措施来减小微波信号对人体的伤害越来越受到各方的重视。受到各种因素的制约,直接定量的测量便携式移动通信系统对人体的影响并不容易实现,因此技术上通常有指标电磁波吸收比值(SAR)来表示人体中电磁波的相对大小。SAR为单位质量的人体组织所吸收或消耗的电磁功率,单位为W/kg。不同国家的组织对于SAR限值有不同的标准,这些标准推荐了对一般公众以及工人的无线电辐射的安全等级,目前国际通用的SAR标准的限值有两个:欧洲标准2W/kg和美国标准1.6W/kg。因此降低SAR技术对便携式设备及其制造企业非常重要。

人们一直在积极探索即能保证通信质量又能降低对人体的电磁辐射的设计方法,如在发射体天线与人体间加载金属反射板是减低电磁辐射SAR最常用的方法之一,但是这种加载金属反射板屏蔽方法会使得设备尺度庞大,其原因在于反射波与入射波之间存在180°相差,加载的防辐射反射板与辐射体间必须满足半波长关系,才能保证电磁波的正常辐射,也就是说电磁波波长越长反射体与辐射体之间的距离必须越大,否则辐射体的辐射性能将大大下降,严重时影响设备的正常使用。

电磁带隙(EBG)结构^[4-6]是20世纪90年代末科学界提出的一种仿晶格的周期性电磁结构,EBG结构在一定的频率范围电磁带隙结构对电磁波有一定的抑制作用,也就是说在特定的频段电磁波不能传播,因此该结构又称为高阻抗表面。之间架设屏蔽金属,阻挡微波信号直接进入人体,该方法虽然有效,但是由于金属反射板存在180°位相差或者说存在半波损失^[7-8],架设距离必须设置足够大,这样就使得这个设备的维度增大,给便携式通信带来不便。电磁带隙的出现为解决这个问题带来了新的思路,电磁带隙结构不存在半波损失,因此如果用电磁带隙结构做微波反射面,可以设置在距离辐射体很近的区域,这时反射波与辐射体的辐射波同相相加,不仅能够增加辐射体的辐射增益同时又可以减低电磁信号的SAR值,因此EBG结构反射板对于电子设备小型化、同时减低对人体的伤害提供了很好的解决方案。

本文主要研究EBG结构反射板对脑部辐射的防护作用,仿真辐射体为常用的偶极天线,EBG反射板置于非常靠近天线的位置,人脑采用球体模型并置于EBG反射板之后。仿真结果表明,加载EBG反射板的天线系统,人体脑部的电磁辐射比吸收率SAR大为降低,整个

天线系统与加载金属反射板的的天线系统相比体积明显减小、结构更加紧凑。

1 EBG结构的反射特性

高阻抗表面反射板通常用敷铜双面或者多面印刷线路板(PCB)制作,双面印刷线路板的上表面铜箔印制成周期性排列的贴片图案,图案可根据设计者的应用需求设计成多种形式,经典的贴片图形是周期性排列的正方形或正六边形金属贴片^[6-7];双面印刷板的下表面通常是一完整的敷铜表面,该下表面通常认为是地表面;印刷线路板上表面的贴片阵列与下表面的地表面通过嵌入在介质中的导电过孔相连,称为金属化孔。典型的两层结构Mushroom-like EBG结排列构由EBG结构由金属贴片、介质基板、金属地面和金属化过孔组成。图1(a)所示为经典的EBG的俯视图,本文采用一维的EBG结构,即只在图示y轴方向制作周期性的贴片(patch)。正方形金属贴片的边长用 w 表示,相邻两个贴片的间距用 g 表示。微波领域的专业人员对EBG结构的电磁性质做了大量深入研究,提出了各种研究模型,其中最简单明了的EBG结构模型为LC等效电路模型,如图1(b)所示,LC等效电路模型认为,电磁波在EBG结构中传播时,EBG结构上表面的相邻贴片之间可以等效为电容 C ,同时,贴片和金属化过孔(pin)则可以等效为电感 L 。周期性排列的贴片和金属化过孔构成了周期性排列的LC网络。由于EBG结构具有周期性,因此,可以通过分析其中的一个LC单元的特性来得知整个EBG结构反射板的电磁性质。单元EBG结构的等效电路为LC并联谐振电路,其禁带频率可以写为^[9-11]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

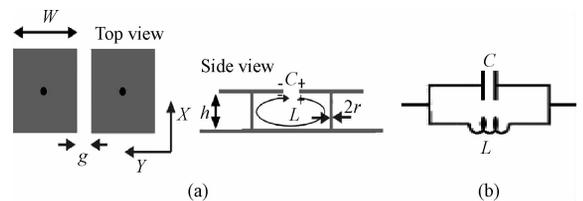


图1 电磁带隙结构及其等效电路

Fig. 1 EBG structure and its equivalent circuit

理想情况下,在EBG结构的禁带区,电磁波的波阻抗为无穷大,电磁波不能再EBG结构中形成表面波,因此EBG又称为高阻抗表面。正是由于EBG结构的禁带性质使其在微波工程上获得了广泛应用的可能。

EBG结构禁带区的另外一个特点是同位相反射特性^[12-13]。图2所示为EBG防护人体脑部示意图,当微波

入射在 EBG 反射面板上时, EBG 表面反射形成反射波。高阻抗表面的反射波与入射波之间存在相位差, 且其相位差具有频率依赖, 如图 3 所示, 从图 3 不难看出, 在特定的频率点, 反射波与入射波位相差为 0, 即二者位相相同, 称为同位相反射。其实, 在零位相反射频率点附近区域, 其位相虽然偏离零, 但是只要在 $\pm 90^\circ$ 范围内, 均认为是同位相反射区, 这是因为从电磁波矢量叠加的角度看, 两列波叠加时, 当二者的位相差在 $\pm 90^\circ$ 的范围, 叠加以后的总电磁场都是增强的, 而当两列波的位相差超过 90° 时, 两列波将相互抵消, 两列电磁波互相抵消, 叠加后的总电磁场变弱^[14-15]。

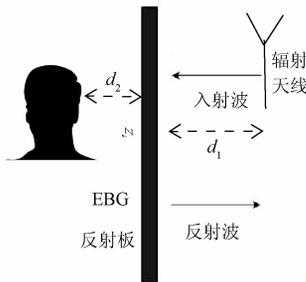


图 2 电磁带隙结构对人体脑部的保护

Fig. 2 The protection of EBG structure on human brain

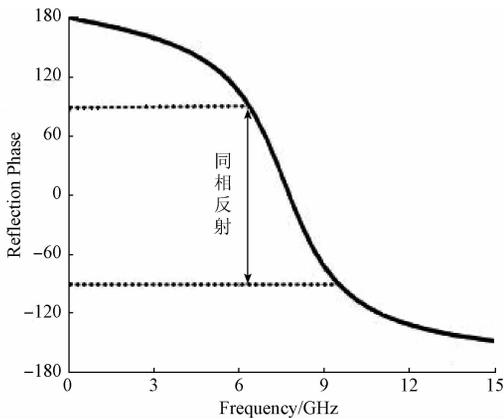


图 3 电磁带隙结构的同位相反射

Fig. 3 The in-phase reflection of EBG structure

图 2 中, 假定辐射天线与 EBG 结构的反射板的距离为 d_1 , 人脑模型与 EBG 的距离为 d_2 , 天线发射的电磁波遇到 EBG 反射板发生反射, 反射波将与天线本身的辐射波相互叠加, 由于是同位相反射, 总的电磁场大大增强, 从而天线系统的增益得到了提高, 原则上当同位相反射频率与天线辐射频率吻合时, 天线与 EBG 反射板的距离越近, 天线的增益提高的越大, 据此可以设计出高增益、低轮廓的天线系统; EBG 反射板的背面为人脑模型, 由于在禁带区, 理想的 EBG 结构不能透射电磁波, 则透过

EBG 反射板到达人体脑部的电磁场大大减低, 从而使得电磁场的人脑吸收率的指标 SAR 大大减低, EBG 起到保护人体脑部的作用。

2 加载 EBG 结构反射板的天线系统的 SAR 特性仿真

2.1 仿真建模

仿真采用商业软件 HFSS13。模型由 3 部分组成: 偶极天线为辐射体, EBG 置于天线一侧作为反射板, 人脑模型在 EBG 反射板的另一侧。仿真模型示意图如图 4 所示。在仿真中首先需要确定辐射天线的类型, 实际工程中的辐射天线多种多样, 偶极天线是实际工程中应用最为广泛的天线, 这里同样采用偶极天线作为辐射天线, 天线辐射频率设置在在 1.8 GHz, 该频率是移动通信基站和移动台的收发频率, 由频率与波长的关系不难估算出其对应的波长为 166 mm, 半波长为 83.3 mm, 该半波长是偶极天线在真空中的长度。

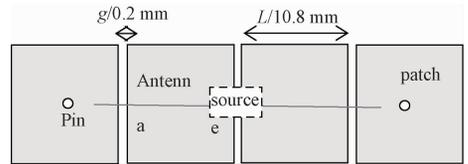


图 4 EBG 反射板仿真模型俯视图

Fig. 4 The vertical view of the simulation model of EBG reflection board

本文设计的 EBG 天线系统仿真中, 由于紧靠偶极天线放置了 EBG 天线反射板, 偶极天线与 EBG 反射板相互耦合, 偶极天线的辐射频率偏离理论值较大, 理论计算的天线长度只能作为参考, 实际的天线尺度需要在仿真过程确定, 经反复调试, 最终设置偶极天线的长度为 27.85 mm^2 , 比理论值偏离 -28.3 mm 。偶极天线的半径设计与常规相同, 仿真中设置为 $r = 1.8 \text{ mm}$ 。理论上可以设置偶极天线与 EBG 的距离 d_1 为无限小, 设计中偶极天线放置在 EBG 的中间位置, 距离 EBG 反射板 $d_1 = 0.8 \text{ mm}$ 。

仿真中的 EBG 结构采用双层印刷电路板, 介质基片采用 Rogers RT/ duroid 6010, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 10.2$, 介电损耗为 0.002 3, 厚度为 $h = 1.6 \text{ mm}$ 。图 4 为仿真模型的俯视图, 由于偶极天线为线状结构, 其直径比较细, 不必用二维的 EBG 结构, 一维结构 EBG 的宽度已经大于偶极天线的半径, 因此仿真采用一维 EBG 结构。偶极天线位于 EBG 结构的正上方, 平行于 EBG 的上表面。为了使得 EBG 反射面的长度大于偶极天线的总长, 仿真中设置了 6 个周期性的正方形单元, 印刷板上表面单元

正方形贴片的长度为 10.8 mm, 相邻贴片的缝隙 g 为 0.2 mm, 在正方形贴片中心设置金属化过孔, 过孔 pin 的半径 r 为 0.2 mm, 高度与介质基片厚度相同为 1.6 mm。双面印刷板的下表面为地平面, 其维度与上表面以及介质基片的大小均相同。

仿真用简易球形容器模拟的人体头部, 仿真模型如图 5 所示, 模型分两个部分, 脑壳和脑组织液。HFSS 自带的介质表中并未有脑组织和脑壳这两种介质, 需要添加这两种介质, 其电磁参数为脑组织液的相对介电常数为 41.5, 损耗正切为 0.90, 脑壳的相对介电常数 4.6, 损耗正切 0.01。脑壳为球壳, 设置其外半径为 111.5 mm, 内半径为 106.5 mm, 壳体厚度为 5 mm。脑壳内即为脑组织液部分, 脑组织液部分球体与脑壳内半径相同, 只需经过反复的 Boolean 操作, 即可完成人体脑部组织的建模。为了得到人体脑部的 SAR 吸收率, 需要设置一条 SAR 计算线, SAR 计算线如图 5 中 S 所示, 位于脑体内部, 沿着水平 y 方向, 模拟人体脑部从左耳到右耳, SAR 计算线的长度为 140 mm。在人体脑部的侧面设置 EBG 反射板, 人体脑部与 EBG 反射板中心的距离为 d_2 , 反射板距离人体脑部越近脑部的比吸收率 SAR 越大, 考虑对人体危害比较大的情况, 仿真中取 d_2 为 2.4 mm, 基本贴近人脑。

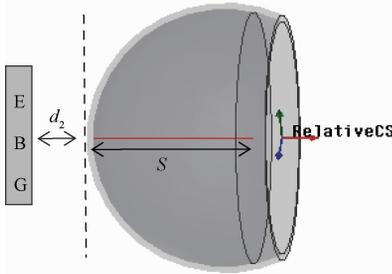


图 5 人体脑部仿真模型图

Fig. 5 The simulation model of human brain

2.2 仿真结果

仿真中心频率设置在 1.8 GHz。由于偶极天线与 EBG 反射板之间距离很近, 二者之间存在较强的耦合, 若偶极天线的频率没有处在 EBG 的同位相反射区, 反射信号与天线的辐射信号将反相抵消, 使得天线信号不能有效的辐射到空中, 或者说将使得天线系统不能在设定频率辐射或者引起其增益 Gain 减小; 同时, 由于 EBG 反射板的存在, 偶极天线的辐射长度将受到影响不再与真空中的尺度一致, 从 S 参数看, 仿真的参数 S_{11} 在 1.8 GHz 不辐射或者在其他频率较低的点辐射。反过来, 偶极天线的存在相当于在 EBG 附近设置一良导体, EBG 的同位相反射中心频率以及同位相反射区所对应的频段也将发生变化。经过反复调整偶极天线和 EBG 的贴片大小, 偶

极天线的半臂高度 27.85 mm, EBG 贴片的尺度如上文所述。

加载 EBG 反射板的偶极天线系统的驻波比 (VSWR) 如图 6 所示, 可以看出, 驻波比小于 2 的天线辐射频率为 1.69 ~ 1.89 GHz; 图 7 所示为偶极天线 E 面方向图, 天线在人体脑部反方向获得最大增益, 其总增益 Gain 可达 2.7 dB。从上述两项指标可以知道, 加载 EBG 反射板的偶极天线能够在工程要求的频段正常辐射。

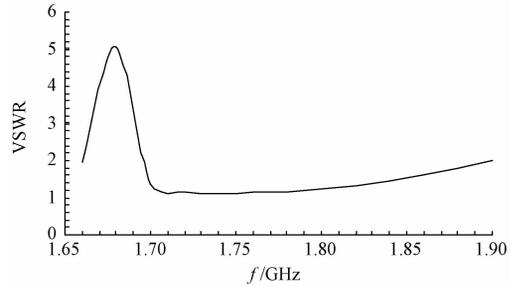


图 6 加载 EBG 反射板的天线的驻波比

Fig. 6 The voltage standing-wave ratio of the antenna of loaded EBG reflection board

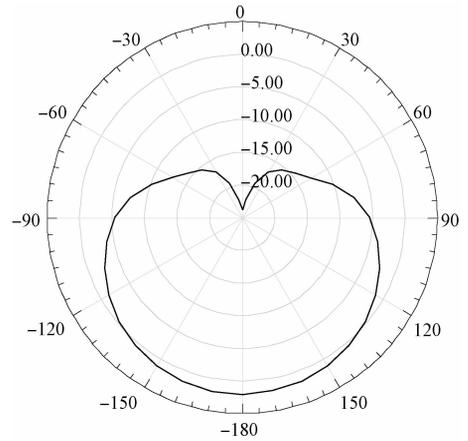


图 7 加载 EBG 反射板的天线的增益

Fig. 7 The gain of the antenna of loaded EBG reflection board

人体脑部的吸收率 SAR 曲线如图 8 所示。为了比较加载 EBG 前后人体脑部吸收率的变化, 图 8 同时给出了未加载 EBG 反射板的 SAR 吸收曲线。图中的实线为加载 EBG 结构后的 SAR 吸收率, 虚线为加载 EBG 前的比吸收率 SAR。从图形可以看出, 沿着 SAR 计算线, 人体脑部与 EBG 反射板的距离不同, SAR 吸收率也不同, 这是由于电磁波的电场强度按照距离的平方规律减小, 且当电磁波在脑部传播时脑壳和脑液会吸收一部分电磁场能量造成电磁波的衰减。不管是否加载 EBG 反射板,

当脑子部位随 EBG 距离增大时,比吸收率 SAR 迅速越小,当加载 EBG 以后,两条曲线相比,在靠近反射板的脑部,二者的比吸收率 SAR 有着很大的差别,未加载 EBG 之前其最大的 SAR 为 79,而加载之后 SAR 下降为 40,下降了 39,几乎是下降了一半;当脑部距离天线反射板的距离大于 20 mm 时,加载 EBG 前后的 SAR 趋于一致,因此,可以说加载 EBG 结构对于保护靠近天线的脑部具有非常好的效果。

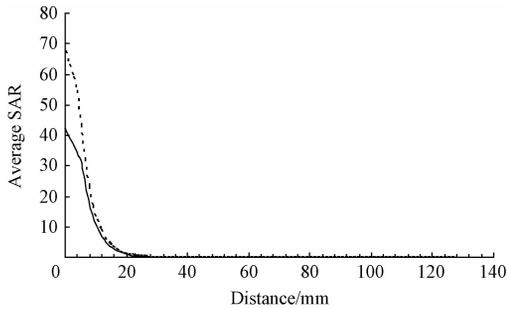


图 8 加载 EBG 反射板前后脑部的比吸收率
Fig. 8 The brain's SAR before and after loaded EBG reflection board

3 结 论

对加载电磁带隙结构 EBG 反射板的偶极天线系统进行了仿真,仿真结果表明,当天线距离人脑较远时 (>40 mm),加载 EBG 前后人脑的 Sar 吸收比几乎相同,但是,当 <20 mm 时,加载 EBG 反射板的天线系统明显小于为加载的天线系统,二者差值可以达到 35,因此可以说:在保证天线系统正常辐射的前提下,加载 EBG 反射板的天线系统对人体脑部有明显的保护作用,与未加载 EBG 反射板的天线系统相比人体脑部的比吸收率 SAR 明显降低;与加载金属反射板的天线系统相比,EBG 与天线辐射体之间的间距可以不受半波波长的限制,可以设置在毫米量级,实现了天线的高增益低轮廓。

参考文献

- [1] XU Z, LIU J N, ZHOU S D, et al. Distributed antenna wireless communication system coverage design and field trial over higher frequency band [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(S1): 131-138.
- [2] 郭慧丽,王素玲,王志军. 一维叉指 EBG 结构的传输特性分析 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(6): 39-42. GUO H L, WANG S L, WANG ZH J. Analysis on transmission characteristics of one dimension EBG structure [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(6): 39-42.
- [3] YANG F, RAHMAT-SAMII Y. Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering [M]. Newyork: Cambridge University Press, 2008.
- [4] ZAMAN M I, HAMEDANI F T, AMJADI H. A new EBG structure and its application on Microstrip patch antenna [C]. IEEE International Symposium on Antenna, 2012.
- [5] LIN P, RUANC L, JIANG X. Compact EBG for multi-band applications [J]. IEEE Transaction On Antennas And Propagation, 2012, 60(9): 4440-4444.
- [6] LIANG J, YANG H Y D. Radiation characteristics of a microstrip patch over an electromagnetic band gag surface [C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2007: 1691-1697.
- [7] YANG L, FENG Z H, Advanced methods to improve compactness in EBG design and utilization [C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, 2004.
- [8] KAMGAING T, RAMAHI O M. Design and modeling of high-impedance electromagnetic surfaces for switching noise suppression in power planes [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(3): 479-489.
- [9] 郑秋容,袁乃昌,付云起. 紧凑型电磁带隙结构在短路微带天线中的应用 [J]. 电子与信息学, 2007, 29(6): 1500-1502. ZHENG Q R, YUAN N CH, FU Y Q. Application of compact electromagnetic band gap structure to shorted micro-strip antenna [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(6): 1500-1502.
- [10] HONG T, GONG S X, LIU Y, et al. Monopole antenna with quasi-fractal slotted ground plane for dual band applications [J]. IEEE Antenna Wireless Propagation Lett, 2010, 58(9): 595-598.
- [11] 季欣奕,陈平,蒋爱敏,等. 具有一维 EBG 结构的微带耦合器 [J]. 微波学报, 2008, 24(2): 46 -49. JI X Y, CHEN P, JIANG AI M, WU R X. A novel microtrip coupler with 1D EBG circuits [J]. Journal of Micro-waves, 2008, 24(2): 46-49.
- [12] 李东,王艳林. 分布电感对石英晶体测试精度的影响及补偿 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 487-491. LI D, WANG Y L. Effect and compensation of distributed inductance on the test accuracy of quartz crystal [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,

2017, 31(3): 487-491.

- [13] HAN Z J, SONG W, SHENG X Q. Impact of EBG structures' positions on the performance of an EBG antenna[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017(1): 95-99.
- [14] 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(6): 1183-1188.
WANG S L, GUO N, ZHAO Q F, et al. Frequency characterizations of the double-layer and dual band EBG structure [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014(6): 1183-1188.
- [15] 史凌峰, 王海鹏. 一种扩展蘑菇型 EBG 结构阻带带宽的新方法 [J]. 电子与信息学报, 2012(10): 2537-2540.
SHI L F, WANG H P. Novel method to broaden the stop-band width of the mushroom-like electromagnetic band gap structure [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012(10): 2537-2540.

作者简介



王素玲, 1985 年于河南大学获得学士学位, 2005 年于同济大学获得硕士学位, 2008 年于中科院获得博士学位, 现为河南省新乡学院教授, 主要研究方向为电子科学与技术。

E-mail: tjslwang@163.com

Wang Suling received B. Sc. from Henan University in 1985, M. Sc. from Tongji University in 2005, and Ph. D. from Chinese Academy of Sciences in 2008, respectively. Now she is a professor in Xinxiang University. Her main research direction is electronic science and technology.



杨晓策, 2014 年于河南科技学院获得学士学位, 现为新乡学院助教, 主要研究方向为电力系统方面。

E-mail: yangxiaoce1991@sina.com

Yang Xiaoce received B. Sc. from Henan Institute of Science and Technology in 2014. Now he is assistant teacher in Xinxiang University. His main research direction is power system.