

一种提升不同频段天线之间端口互隔离度的方法

黄 河

(西安电子科技大学空间科学与技术学院,陕西西安 710126)

摘要: 在部署第五代(Fifth Generation, 5G)通信基站天线时,通常将它们与现网天线放置在一起,以节省塔面空间.但是工作在不同频段的的天线将相互干扰、导致天线单元之间的互隔离度降低,影响整机性能.为了解决这一问题,作者选取工作在1 710~1 880 MHz频段的第二代(Second Generation, 2G)通信系统天线和工作在3 400~3 800 MHz频段的5G天线作为实施实例,将它们临近放置,并在低频单元辐射臂周围设置双条带结构(Double Strip Structure, DSS).该双条带结构谐振在高频段,可以有效减小低频单元在高频段的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),使低频单元辐射的高频能量被吸收,提升两天线单元在高频段的端口互隔离度.仿真结果显示,设置双条带耦合抑制结构,会使高低频单元同极化端口之间在高频段的互隔离度有5~20 dB的提升,此外,该耦合抑制结构并不会增加低频单元的损耗.对天线样机的测试结果表明,与仿真结果较为吻合.综上所述,本文提出的耦合抑制方法具有集成度高、无增益损失等优点,可应用在多频多制式基站天线系统中.

关键词: 基站天线;双极化天线;互隔离度;耦合抑制;雷达散射截面;多频多制式天线

基金项目: 国家自然科学基金(No.61901321)

中图分类号: TN821+.4;TN828.6

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)04-1135-06

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

DOI: 10.12263/DZXB.20210729

A Method to Enhance the Mutual Isolation of Ports Between Different Antennas

HUANG He

(School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710126, China)

Abstract: In the deployment of fifth generation (5G) base station antenna, the antenna is usually placed together with the original antennas to save tower space. However, antennas working in different frequency bands will inevitably interfere with each other, resulting in the reduction of the mutual isolation between antenna elements, and affecting the antenna performance. To solve the problem, the author selects the second generation (2G) antenna working in the 1 710~1 880 MHz band and the 5G antenna working in the 3 400~3 800 MHz band as the example. They are placed close to each other, and a double-strip structure (DSS) is set around the radiating arms of the low band element. The double-strip structure resonates in the high frequency band. It can effectively reduce the radar cross section (RCS) of the low band element and absorb energy from the low band element in the high frequency band, thus improving the mutual isolation of the two antenna elements' ports in the high band. The simulation results show that the mutual isolation between the low and high band elements with the same polarization is improved by 5~20 dB in the high band when the coupling suppression structure is added. In addition, the coupling suppression structure will not introduce additional loss. The prototype is manufactured and tested, and the measured results are in good agreement with the simulated ones. To sum up, the decoupling method proposed in this paper has the advantages of high integration and no extra gain loss. It can be applied in the multi-frequency and multi-mode base station antenna system.

Key words: base station antenna; dual-polarized antenna; mutual isolation; coupling suppression; radar cross section; multi-frequency and multi-mode antenna

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61901321)

1 引言

随着5G牌照的下发,国内5G基站天线建设规模日益增大.为节省塔面空间和运营成本,通信公司更希望将5G天线与原来的第二、三、四代通信天线集成在一起.这么做会导致不同频段天线之间产生严重干扰、天线整机性能受到影响.不同频段天线之间相互干扰主要体现在两个方面,一是天线方向图的畸变,二是端口互隔离度的下降.针对天线互耦引起的方向图畸变问题,文献[1~3]开展了相关研究.在文献[1]中,高频单元嵌套在低频单元内,其方向图受到低频单元的影响,于是在高低频单元之间设置金属隔离挡板,以改善高频单元方向图.文献[2]采用同轴电缆代替高频单元的接地巴伦,阻断高频单元及其馈电巴伦与地面产生的C形谐振回路,抑制了高频单元方向图畸变.文献[3]中,通过在低频单元辐射臂上设置扼流元件,也达到了抑制高频单元方向图畸变的目的.针对天线互耦引起的端口互隔离度下降问题,文献[4,5]也开展了相关研究.文献[4]提出了一种采用滤波天线单元的双频天线阵,它包含工作频率临近的两个子阵列,每个子阵列由具有带外抑制特性的滤波天线单元组成.这样一来,两个子阵列在对方频段内的辐射将受到抑制,故而可以获得高隔离性.此方法主要聚焦于滤波天线的设计,适用于两个滤波天线水平放置的情形.文献[5]中,作者在两个不同频段天线之间设置了具有“低通高阻”特性的频率选择表面,以削弱它们之间的耦合.对于低频单元来说,该频率选择表面相当于电磁透明结构,能使电磁波穿透并辐射到自由空间,而对于高频单元来说,该频率选择表面相当于人工磁导体,能使入射能量全反射,因此高低频单元之间的端口互隔离度得以提升.此方法聚焦于频率选择表面的设计,适用于高低频单元层叠放置的情形.

本文借鉴文献[2]中“同轴电缆馈电以破坏共地回路”的方法,在此基础上,给低频单元偶极子臂的上下两层设置了双条带结构,这样既抑制了方向图畸变,又提升了端口互隔离度.有别于文献[4]中采用滤波天线的方法和文献[5]中设置频率选择表面的方法,本文采用的双条带结构包裹于低频单元周围,可降低低频单元在高频单元所在工作频段的雷达散射截面^[6],使低频单元辐射的高频能量被吸收,进而提高端口互隔离度.此外,该结构不会对高低频单元的谐振情况和方向图产生影响.综上,该方法具有以下优点:(1)天线采用印刷电路板制作,具有较高的集成度;(2)在天线层面完成了去耦,无需在后端电路部分设置去耦网络;(3)双条带结构是无损结构,它的引入不会带来增益损失.

2 天线结构

如图1所示,该天线系统包含放置在反射板上的低频单元和低频单元,高低频单元之间相距30 mm.低频单元和低频单元与反射板之间的距离分别为33.6 mm和18 mm,约为各自工作频段的中心频点对应波长的四分之一.

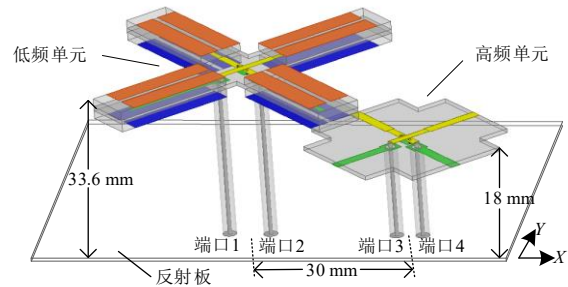


图1 天线结构图

如图2(a)所示,是低频单元的分层结构图,由上至下分别记做第一层、第二层和第三层.第一层和第三层由厚度为1.6 mm、介电常数为4.4的介质板制成,在第一层介质板顶层和第三层介质板底层分别设置有四组双条带结构.每一组双条带结构由两个矩形金属构成,矩形金属长 l_1 为21 mm,宽 w_1 为4 mm,两个矩形金属之间间隔 g 为1 mm.第二层由厚度为0.8 mm、介电常数为2.2的介质板制成,其上设置有两个相互交叉的偶极子^[7],形成双极化辐射^[8].每一个偶极子包含两条辐射臂,其中一个臂印制在介质板顶层,另一个臂印制在介质板底层.为了避免两个偶极子交叉,在其中一个偶极子中央设置了两个金属孔和一小段微带线,其细节放大图也在图2(a)中给出.在对该偶极子馈电时,同轴电缆的外导体与偶极子其中一个臂相连,内导体则与另一个臂相连.图2(b)所示的高频单元结构与图2(a)中低频单元第二层结构类似,仅在尺寸上有所差别.本文采用的双条带结构对低频单元偶极子臂呈包裹态势,可有效降低低频单元在高频段的雷达散射截面,使低频单元辐射的高频能量被吸收,达到削弱高低频单元间耦合、提高它们在高频段端口互隔离度的目的.

3 天线仿真结果与工作原理分析

分析天线S参数和增益曲线,以说明双条带结构的作用.对比设置和未设置双条带结构的两种情况,端口1被激励时的 $|S_{11}|$ 曲线、端口3被激励时的 $|S_{33}|$ 曲线见图3(a);端口1被激励时的 $|S_{21}|$ 曲线,端口3被激励时的 $|S_{43}|$ 曲线见图3(b).从图中可以看出,双条带结构的加载对 $|S_{11}|/|S_{33}|/|S_{21}|$ 曲线的影响不大,对 $|S_{43}|$ 曲线有一定的影响.相较于未加载双条带结构的情况,加载该结构以后,高频单元 $|S_{43}|$ 值有4 dB左右的提升.图3(c)给出了

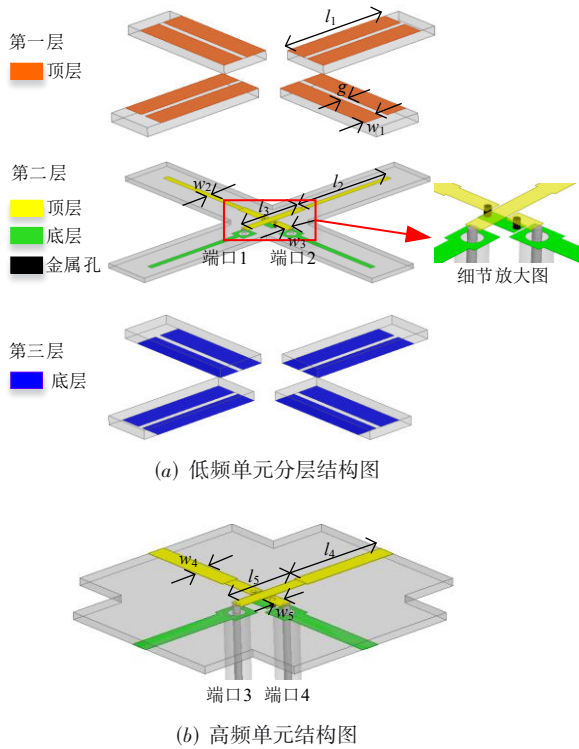


图2 天线结构图($g = 1 \text{ mm}$, $w_1 = 4 \text{ mm}$, $l_1 = 21 \text{ mm}$, $w_2 = 1 \text{ mm}$, $l_2 = 19 \text{ mm}$, $w_3 = 1.5 \text{ mm}$, $l_3 = 12.5 \text{ mm}$, $w_4 = 2 \text{ mm}$, $l_4 = 11.3 \text{ mm}$, $w_5 = 1.5 \text{ mm}$, $l_5 = 8.5 \text{ mm}$)

未设置和设置该双条带结构时,高低频单元同极化端口之间的互隔离度曲线,即 $|S_{31}|$ 曲线.从图3中可以看出,低频单元偶极子臂上下两层加载双条带结构之后,高频段内互隔离度得到5~20 dB的提升.图3(d)给出了端口1被激励时,未设置和设置双条带结构的情况下,低频单元在整个频带内的增益曲线,可以看出,是否设置双条带结构,对低频单元带内(1 710~1 880 MHz)增益影响不大,增益平均值在8.5 dBi左右,这说明双条带结构不会给低频单元带来额外的损耗;而在带外(3 400~3 800 MHz),双条带结构的引入使增益下降了8 dBi左右,这说明此时低频单元的能量被双条带结构吸收,高低频单元之间的相互耦合被削弱,这与图3(c)中高频段内的 $|S_{31}|$ 曲线由-15 dB下降到-20 dB以下的变化趋势相吻合.图3(e)给出了当端口3被激励时,未设置和设置双条带结构的情况下,高频单元在整个频带内的增益曲线,这两条曲线在低频段内的增益均保持在-12.5 dBi左右,说明高频单元原本在低频段就感应不到低频单元的能量,这与图3(c)中低频段内 $|S_{31}|$ 曲线维持在-25 dB左右的低水平状态相吻合.

下面分别从电磁场和电路两个角度对双条带结构的耦合抑制原理进行分析.从电磁场角度来说,加载于低频单元上的双条带结构具有选频特性,它能在工作频带外消除天线的反射,直接减小天线的结构散射和模式散射,从而使低频单元在高频段的雷达散射截面

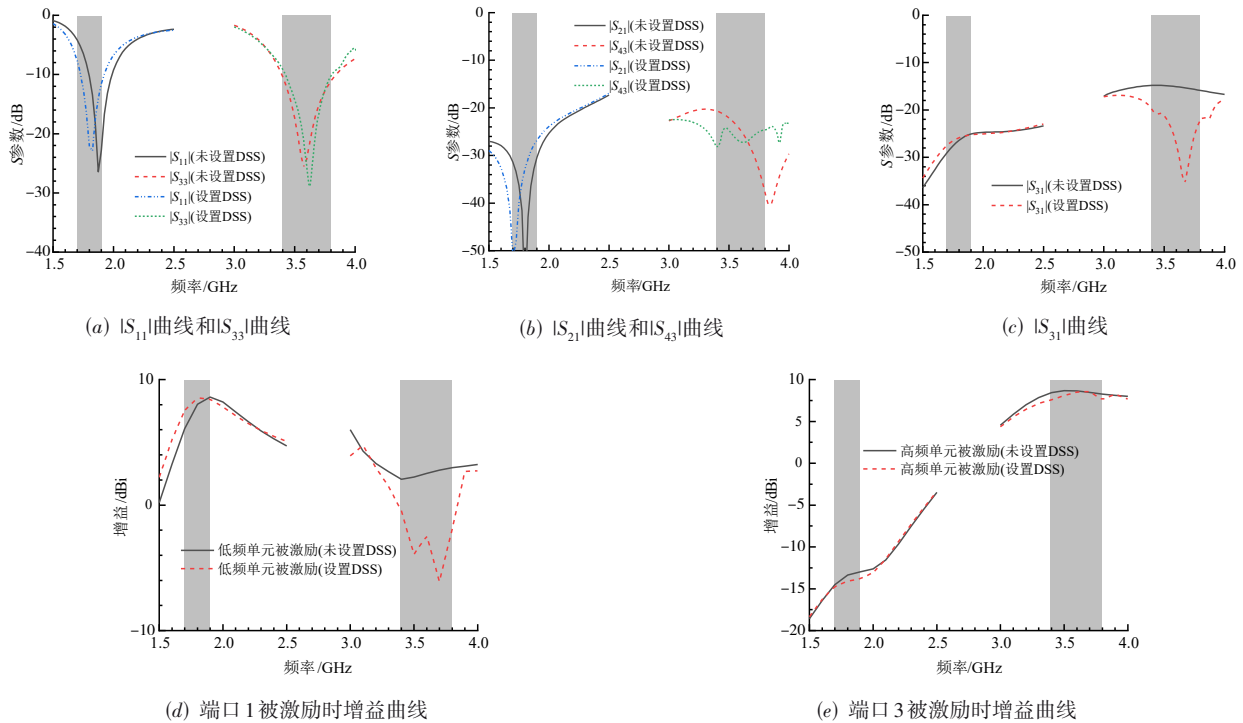


图3 未设置和设置该双条带结构对应的参数曲线

降低. 图4给出了低频单元上下两层未设置和设置双条带结构对应的双站 RCS 曲线, 从图中可以看出, 设置双条带结构后, 低频单元在高频段的雷达散射截面下降了 10 dB 以上, 此时低频单元对高频单元实现了“隐身”, 故而低频单元和高频单元的相互耦合被削弱, 具体表现为高频段内互隔离度的提升.

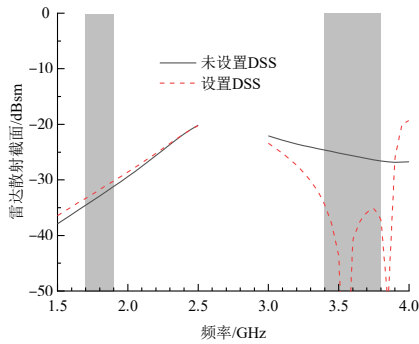


图4 未设置和设置双条带结构对应的雷达散射截面曲线

从电路角度来说, 设置于低频单元辐射臂上下层的双条带结构相当于引入了一个谐振电路, 其谐振频率符合式(1)

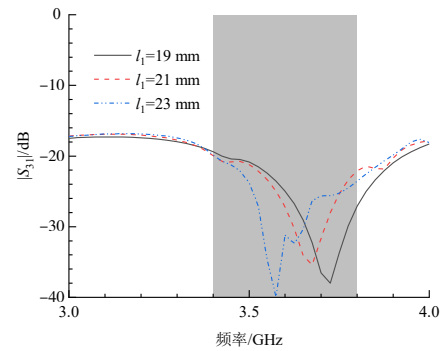
$$f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

其中, L 表示等效电路中的电感, C 表示等效电路中的电容. 通过选择合适的条带长度和宽度, 使其谐振在高频段, 低频单元辐射的高频能量就可以被该双条带结构吸收, 进而削弱了低频和高频单元的相互耦合. 图5(a)和(b)分别给出了该双条带结构的长度 l_1 与条带间缝隙的宽度 g 变化时, 互隔离 $|S_{31}|$ 随频率变化的曲线, 结果表明, 双条带结构的长度越长, 等效电路中的电感值越大, 谐振频率越低, 条带间缝隙的宽度越小, 等效电路中的电容值越大, 谐振频率越低, 以上变化规律符合双条带结构等效电路的谐振频率公式.

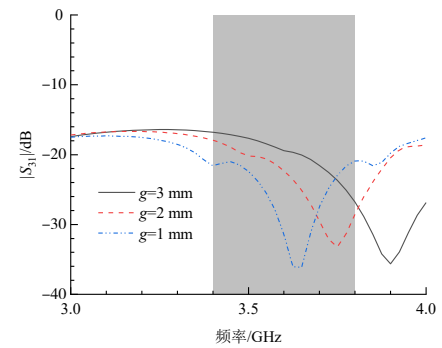
4 仿真与测试结果对比及分析

为了验证本文的设计, 加工了天线实物并进行了测试. 图6展示的是天线的实物图. 图7(a)给出了该天线的仿真和实测 $|S_{11}|$ 、 $|S_{33}|$ 、 $|S_{21}|$ 、 $|S_{43}|$ 曲线, 结果表明低频单元可覆盖 1 710~1 880 MHz 的 2G 频段, 自隔离度仿真值大于 26.8 dB, 实测值大于 31.2 dB, 高频单元可覆盖 3 400~3 600 MHz 的 5G 频段, 自隔离度仿真值大于 24.6 dB, 实测值大于 24.1 dB; 图7(b)给出了低频单元和高频单元端口之间的 $|S_{31}|$ 曲线, 结果表明, 低频段的互隔离度仿真值大于 25.2 dB, 实测值大于 26.1 dB, 高频段的互隔离度仿真/实测值均大于 20 dB. 高低频单元的自隔离度和互隔离度均满足现网电气参数的要求.

由于高低频天线在各自的工作频段内方向图变化较为稳定, 所以图8(a)和(b)仅给出该天线在各自



(a) 双条带的长度 l_1 变化时参数曲线



(b) 条带间缝隙的宽度 g 变化时参数曲线

图5 各参数对应的 $|S_{31}|$ 随频率变化的曲线

频段中心频点处(1 800 MHz 和 3 600 MHz)的仿真和实测方向图. 实测方向图表明, 在 1 800 MHz, 低频单元的半功率波瓣宽度约为 70° , 0° 和 $\pm 30^\circ$, 交叉极化电平分别为 25.4 dB 和 22.7 dB, 在 3 600 MHz, 高频单元的半功率波瓣宽度约为 68° , 0° 和 $\pm 30^\circ$, 交叉极化电平分别为 21.4 dB 和 15.5 dB. 仿真和实测结果说明, 该天线可实现稳定扇区覆盖且具有较强的抗多径能力. 图9给出了低频单元和高频单元在各自频段内的仿真和实测增益曲线. 在 1 700~1 900 MHz 频带范围内仿真和测试增益平均值分别为 8.15 dBi 和 7.63 dBi, 在 3 400~3 800 MHz 频带范围内仿真和测试增益平均值分别为 8.1 dBi 和 7.7 dBi. 增益测试值略低于其仿真值的原因在于介质板损耗、同轴电缆损耗、加工误差、测试环境误差等.



图6 天线的实物图

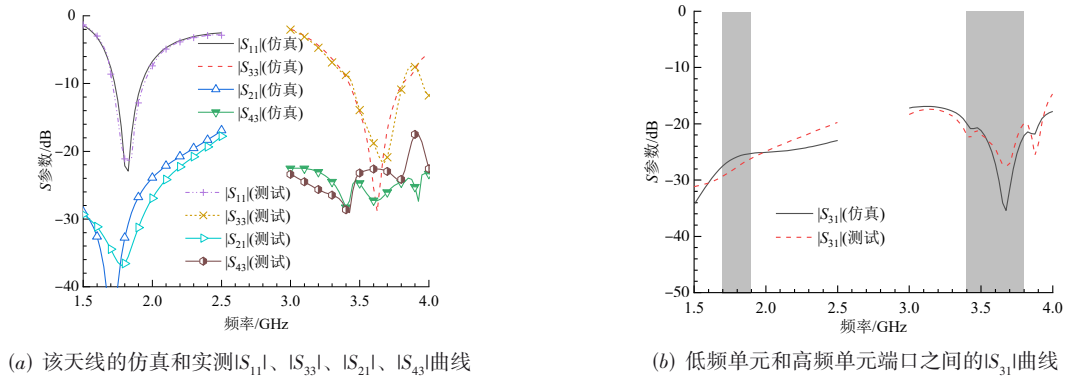


图7 天线放置和测试曲线

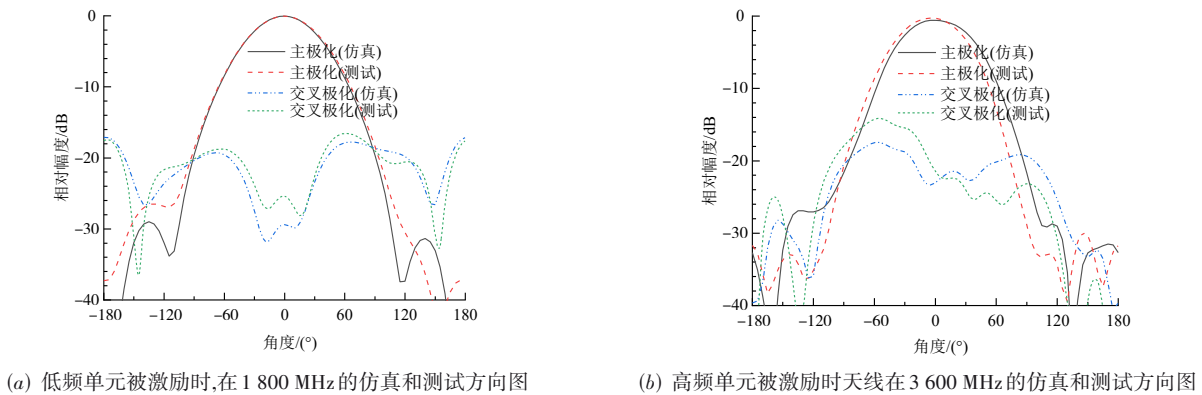


图8 天线仿真和测试方向图

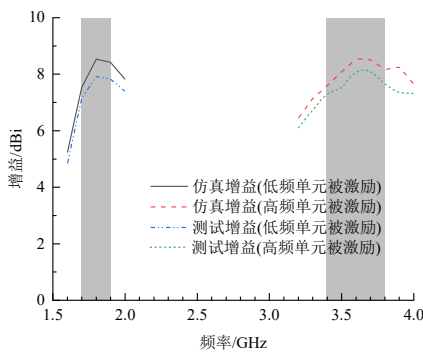


图9 低频单元和高频单元在各自频段的增益

5 结论

本文选取工作在 1 710~1 880 MHz 频段和 3 400~3 800 MHz 频段的两个天线作为研究对象,探讨抑制不同频段天线之间耦合的方法. 通过在低频单元辐射臂上下两层设置双条带结构,提升两天线单元在高频段的端口互隔离度. 作者分别从“场”和“路”的角度论述了其工作原理,并通过实验进一步论证了该方法的有效性和可靠性. 综上所述,在低频单元上设置双条带结

构进行高低频耦合抑制这一方法具有高集成度、无增益损失等优点,可以应用在多频多制式基站天线系统中.

参考文献

[1] HE Y J, PAN Z Z, CHENG X D, et al. A novel dual-band, dual-polarized, miniaturized and low-profile base station antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5399-5408.

[2] HUANG H. An effective way regarding to coupling reduction and pattern correction in base station design[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2018, 60(11): 2707-2712.

[3] SUN H H, DING C, ZHU H, et al. Suppression of cross-band scattering in multiband antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(4): 2379-2389.

[4] ZHANG Y, ZHANG X Y, YE L H, et al. Dual-band base station array using filtering antenna elements for mutual coupling suppression[J]. IEEE Transactions on Antennas

and Propagation, 2016, 64(8): 3423-3430.

- [5] HUANG H. A decoupling method for antennas with different frequencies in 5G massive MIMO application[J]. IEEE Access, 8: 140273-140278.
- [6] KNOTT E F, et al. Radar Cross Section [M]. Dedham, MA: Artech House Inc,1985.
- [7] 常玉梅, 车文荃, 周雍. 印刷带状偶极子天线与经典三维柱状偶极子天线的等效理论研究[J]. 电子学报, 2015, 43(2): 230-235.
CHANG Y M, CHE W Q, ZHOU Y. Equivalence of the strip-dipole antenna printed on dielectric substrate to the classical rod-dipole antenna in air[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(2): 230-235. (in Chinese)
- [8] 张健丰, 李平辉, 朱彤. 高隔离度宽带双极化微带天线设计[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 775-779.
ZHANG J F, LI P H, ZHU T. Design of wideband dual-polarized microstrip antenna with high isolation[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4): 775-779. (in Chinese)

作者简介



黄 河 女, 1990 年出生于西安市. 现为西安电子科技大学空间科学与技术学院副教授、硕士生导师. 主要研究方向为天线理论与设计.

E-mail: huanghe@xidian.edu.cn