

文章编号: 2095-4980(2020)06-1015-05

## 一种应用于 5G 的紧凑型阵列天线设计

唐 灿, 郑宏兴\*, 王 轲, 苗三朋, 王蒙军, 李尔平

(河北工业大学 电子信息工程学院, 天津 300401)

**摘 要:** 提出一种应用于 5G 的紧凑型阵列天线, 由 4 个天线单元相互正交放置, 通过在天线单元之间的上下两个平面分别添加 4 个二分之一波长的微带线, 提高了天线单元间的隔离度。利用高频电磁仿真软件, 对所提天线单元及阵列结构进行分析。实验结果表明, 阵列天线的工作频段分别为 2.72~3.92 GHz 和 4.74~5.42 GHz, 在工作频段内各天线单元间的隔离度均低于 -20 dB, 完全覆盖 5G 所需的 3.3~3.6 GHz 和 4.8~5.0 GHz 两个工作频段。该阵列天线结构紧凑, 体积仅为 68.5 mm×68.5 mm×1.524 mm, 能够被 5G 的小型化便携设备所应用。

**关键词:** 5G; 解耦方法; 阵列天线; 隔离度

**中图分类号:** TN82

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2019214

## Design of a compact antenna array applied to 5G

TANG Can, ZHENG Hongxing\*, WANG Lu, MIAO Sanpeng, WANG Mengjun, LI Erping  
(School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** A compact antenna array applied to 5G is designed, which is set approximately orthogonally by four antenna elements, and four half-wavelength microstrip lines are added to the upper and lower planes between the antenna elements to improve the isolation. The structure of the proposed antenna element and antenna array have been analyzed by high-frequency electromagnetic simulation software, and verified by experiments. The experimental results show that the operating frequency bands of the antenna array are 2.72–3.92 GHz and 4.74–5.42 GHz, respectively. The isolation between antenna elements is lower than -20 dB in the operating frequency band, covering two operating bands of 3.3–3.6 GHz and 4.8–5.0 GHz required for 5G completely. The antenna array is compact, only in the size of 68.5 mm×68.5 mm×1.524 mm, which can be applied to 5G miniaturized portable devices.

**Keywords:** 5G; decoupling methods; antenna array; isolation

随着无线通信的蓬勃发展, 2020 年将成为第五代移动通信系统(5G)的商用化元年。我国工业和信息化部已于 2017 年颁布了《关于第五代移动通信系统使用 3 300~3 600 MHz 和 4 800~5 000 MHz 频段相关事宜的通知》, 确定了我国 5G 的商用频段。近年来关于 5G 的天线研究和设计已经成为了国内外学术研究的热点, 天线作为无线终端设备中的重要功能组件, 为了满足 5G 无线系统容量需求和高速率信息传输, 多输入多输出的阵列天线技术在当前的无线通信中被开发并得以广泛使用。由于终端设备的空间有限, 紧凑型阵列天线的设计能够有效解决该问题。实验结果表明, 随着天线单元的间距缩小, 天线单元之间的相互作用导致的耦合问题会增加天线单元的不利影响, 从而导致遍历多输入多输出信道容量的降低, 同时对于阵列天线的工作效率产生较大影响, 造成方向图畸变等<sup>[1]</sup>。因此, 对于开展紧凑型阵列天线的解耦方法研究极具重要意义。

紧凑型阵列天线的解耦技术中, 地板结构解耦<sup>[2-3]</sup>、中和线解耦<sup>[4-5]</sup>和谐振结构解耦<sup>[6-8]</sup>等是目前比较成熟且应用广泛的解耦方法, 但是这几类方法往往只能针对双单元阵列天线, 并且只能在较窄的频段内实现解耦, 对于不同阵列天线的解耦结构缺乏理论性的指导<sup>[9-12]</sup>。文献[13-14]提出四单元正交放置的超宽带天线的解耦方式, 在无需任何解耦结构下能够达到较好的隔离效果, 但此类结构多适用于超宽带天线单元。文献[15]提出在 2 个天线

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671200); 河北省自然科学基金重点资助项目(F2017202283)

作者简介: 唐 灿(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波与毫米波技术。email:can\_tang@126.com

\*通信作者: 郑宏兴 email:hxzheng@hebut.edu.cn

单元中间添加非对称共面微带线解耦结构，类似于在 2 个相邻的天线单元中间增加一面带有无源振子的“墙”，该结构既有效提高了天线单元间隔离度，同时对于阵列天线的方向图不会产生恶化，但是会增加天线的剖面。

本文首先设计了一种应用于 5G 的双频段天线单元，并利用天线单元的不同极化特性，对 4 个天线单元进行合理布局，将 4 个天线单元相互正交放置，同时通过在 4 个天线单元的辐射贴片和接地面之间引入二分之一波长微带线的方式组成解耦网络，使得天线单元间的耦合度得到有效降低，同时保证阵列天线的工作频带，实现其结构的小型化、低剖面。

## 1 天线结构设计

### 1.1 天线单元结构设计

如图 1 所示，所设计的天线单元印制在体积为 20.5 mm×34 mm×1.524 mm 介质基板上，介质基板的材料为环氧树脂(PTFE,  $\epsilon_r=3.5$ ,  $\tan \delta=0.0018$ )。天线单元的结构包括 3 个部分：环形辐射贴片、微带馈线和接地面，其中环形辐射贴片和微带馈线印刷在介质基板上表面，大小为  $W \times L_g$  的矩形接地面印制在介质基板的下表面。环形辐射贴片关于介质基板中线对称，由两对大小分别为  $L_1 \times W_1$  和  $L_2 \times W_2$  的矩形贴片相互拼接而成，4 个矩形贴片互相垂直贴合，并且在其 4 个连接处的内环和外环部分增加和切去腰长为  $a$  的等腰直角三角形切角。微带馈线位于辐射贴片的下方的一侧，通过在微带馈线的下端的两侧分别切去两个  $L_3 \times W_3$  的矩形来改善天线单元的阻抗匹配。

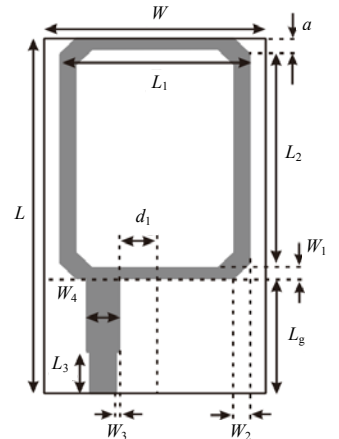


Fig.1 Structure of the antenna element  
图 1 天线单元结构图

### 1.2 阵列天线结构设计

阵列天线的设计如图 2 所示，由上述 4 个单元两两相互垂直正交放置组成 2×2 单元的阵列天线。介质基板的体积为 68.5 mm×68.5 mm×1.524 mm，4 个天线单元的辐射贴片和微带馈线印刷在介质基板上表面，接地面印刷在介质基板的下表面。在 4 个天线单元的中间印刷有解耦网络。解耦网络由 8 个大小为  $L_4 \times W_5$  的矩形微带线组成，分别对称印制在介质基板上表面和下表面。每条微带线距离介质基板的两侧间距分别为  $d_2$  和  $d_3$ 。天线单元及阵列具体尺寸如表 1 所示。

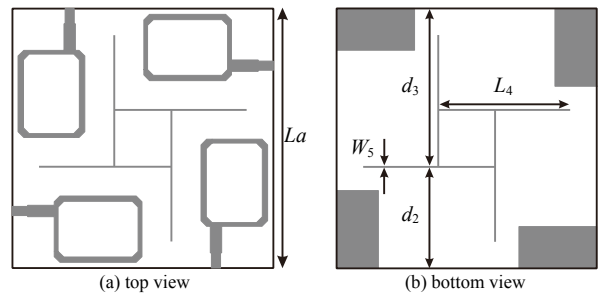


Fig.2 Structure of the antenna array  
图 2 阵列天线结构图

表 1 天线的尺寸(单位: mm)

Table1 Dimension of the proposed antenna (unit: mm)

parameter	$W$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$L_1$	$L_2$
size	20.5	1.0	1.4	0.3	3.0	0.5	17.5	21.0
parameter	$L_3$	$L_4$	$L_g$	$La$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$a$
size	4.0	40.0	11.0	68.5	3.3	26.5	41.5	1.5

## 2 仿真与结果分析

### 2.1 天线单元仿真分析

为了更好地分析上述结构尺寸对天线单元工作频段的影响，采用电磁高频仿真软件对天线单元各结构进行分析。图 3 为天线单元不同结构下的  $|S_{11}|$ (反射系数)曲线图，可以看出在辐射贴片未进行切、补角以及微带馈线未做处理的情况下，该天线单元的工作频段为 2.82~3.58 GHz 和 4.28~5.16 GHz，未能覆盖到 5G 所需的 3.3~3.6 GHz 频段，并且该结构下天线的中心工作频点也不在 3.4 GHz 和 4.9 GHz。进一步地，通过对环形辐射贴片的连接处进行内环补角和外环切角，实现电流路径的缩短和电信号传输的改善。从仿真结果可以看出，天线的工作频段得到拓宽，同时其中心频点发生偏移，此时该天线的工作频段为 2.82~3.74 GHz 和 4.32~5.34 GHz。为了进一步降低天线的反射系数并拓宽其工作频段，在天线的微带馈线末端外侧的对称位置切去 2 个矩形，从

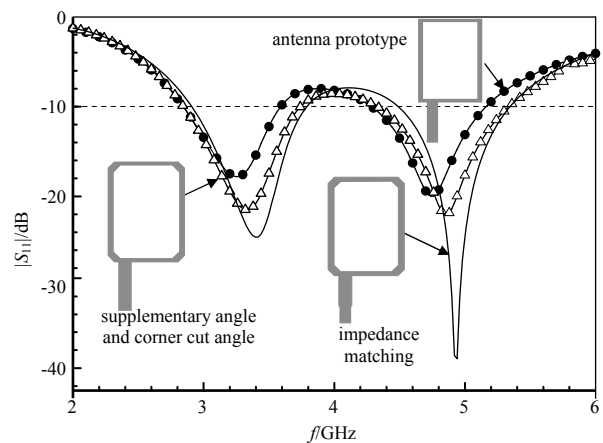


Fig.3 Reflection coefficient of antenna element in different structures  
图 3 不同结构下天线单元  $|S_{11}|$  曲线图

而改善其阻抗匹配。仿真结果表明,该天线的带宽得到有效的拓宽,并且回波反射系数得到有效的降低且中心频点实现右移。该天线单元的工作频段分别为 2.90~3.8 GHz 和 4.50~5.34 GHz, 2 个频带内的中心工作频点分别为 3.4 GHz 和 4.94 GHz, 能够很好地覆盖到 5G 所需频段。

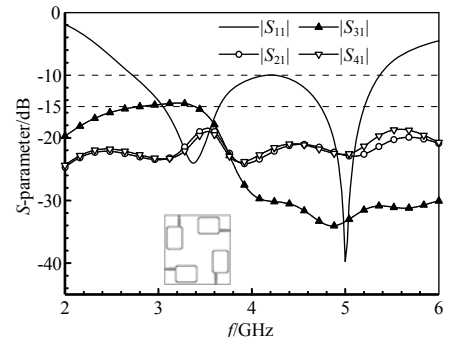
2.2 阵列天线仿真分析

由于该阵列天线具有对称结构,因此该天线各天线单元的 $|S_{11}|$ 相等,同时天线单元间的隔离度满足 $|S_{ij}|=|S_{ji}|(i \neq j; i, j \leq 4)$ 。为了更加方便研究该阵列天线的 $|S|$ 参数(散射参数)变化情况,这里可以只研究天线单元 1 的 $|S|$ 参数。图 4 为该阵列天线 $|S|$ 参数在不同结构下的变化情况。从图 4(a)可以看出,阵列天线在未添加任何解耦网络的情况下,  $|S_{31}|$  在 2.8~3.4 GHz 的工作频段内耦合度高于-15 dB,不能满足天线单元间隔度的要求。为了降低天线单元间的耦合度,通过在 4 个天线单元间分别添加二分之一波长的微带线组成解耦网络,形成类似于无源振子的结构。如图 5 所示,对于 2 个相邻的天线单元,设天线单元 1 的激励为电流  $I$ ,由于耦合将在天线单元 2 上产生电流  $aI$ ,这里的  $a$  为耦合因子,加上微带线后,同理在微带线上的耦合电流为  $bI$ ,  $b$  为耦合因子,而天线单元 2 上的耦合路径有两条:一是原来的单元 1 对单元 2 的耦合  $aI$ ,另外一条是单元 1 对微带线的耦合电流再对单元 2 的耦合  $b^2I$ 。如果通过适当的天线和微带线结构设计来改变耦合因子  $a, b$ ,就有可能使天线单元 2 上的耦合电流接近 0,即:  $aI + b^2I = 0$ 。

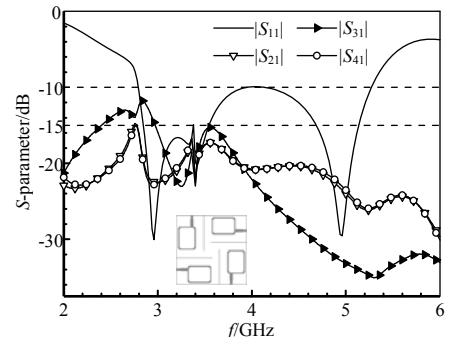
因此,该解耦网络受到天线单元直接耦合场的影响,使得微带线受到天线单元的激励并工作于谐振状态,从而产生间接的耦合场,通过调节微带线的长度、宽度和位置,使得产生的间接耦合场与直接耦合场能量大小相等,相位相反,实现 2 个耦合场的相互抵消,从而达到解耦的目的。考虑到天线单元间的耦合为平面波耦合和空间波耦合,其中平面波耦合是指天线在主板上激发的表面行波,通过主板辐射到另一个天线端口上产生的耦合;空间耦合是指一个天线单元通过空间辐射场辐射到另一个天线单元上产生的耦合,因此选择在单元辐射贴片之间和接地面之间加入解耦网络。此时微带线与介质基板的边缘贴合,从图 4(b)看到 $|S_{31}|$ 在工作频段内得到有效降低,天线各单元的隔离度在 5G 所需的 3.4 GHz 频段和 4.9 GHz 频段内均低于-15 dB,并且在耦合场的作用下,天线在 3 GHz 处产生陷波,阵列天线的工作频段为 2.78~3.98 GHz 和 4.12~5.26 GHz,但是此时在天线 2.78~2.98 GHz 的工作频段内,  $|S_{31}|$  高于-15 dB,隔离度不能在全部的工作频段内达标。

进一步地,为了实现阵列天线在全部工作频段内的隔离度均能够达标,开始调节微带线的位置,通过仿真软件的优化,仿真结果如图 6 所示。最终确定在微带线距离介质基板边缘的距离为 7 mm 时,能够实现工作全频带的天线单元间的隔离度均低于-15 dB。此时该阵列天线的工作频段为 2.57~3.71 GHz 和 4.13~5.23 GHz,中心工作频点分别为 3.42 GHz 和 4.96 GHz, 2 个频段内的相对带宽达到 33.3%和 22.2%。

对 4 个天线单元进行等幅同相馈电,分别得到图 7 天线单元和阵列天线的仿真峰值增益图以及图 8 阵列天线仿真远场方向图。由于解耦网络所产生的间接耦合场与直接耦合场的能量的相互抵消,使得天线单元在工作频段内的峰值增益高于阵列天线的峰值增益。在工作频段内,阵列天线的峰值增益均高于 2.33 dB。由于天线单元的近似正交放置以及阵列天线对称性,可以看出阵列天线在 3.4 GHz 和 4.9 GHz 两个所需的中心频点工作时,  $E$  面和  $H$  面几乎重叠,天线在  $E$  面和  $H$  面辐射具有较好的方向性。



(a) without decoupling structure



(b) with decoupling structure

Fig.4 S-parameters of antenna array

图 4 不同结构下阵列天线 $|S|$ 参数曲线图

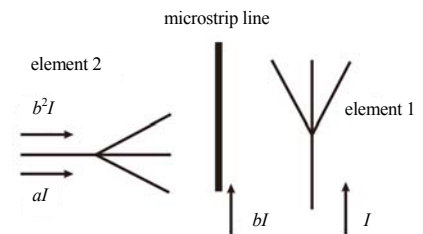


Fig.5 Simplified diagram of decoupling structure

图 5 解耦简化示意图

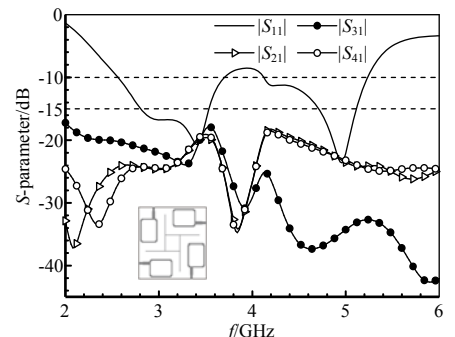


Fig.6 Simulated S-parameters of the proposed antenna array

图 6 所提出阵列天线的 $|S|$ 参数仿真曲线图

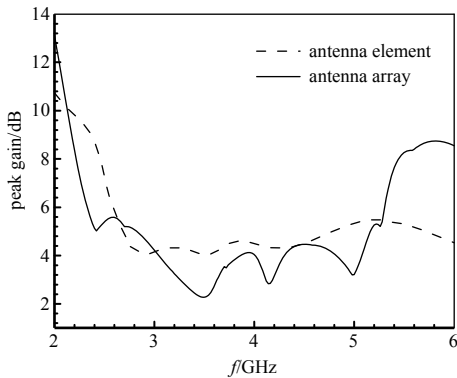


Fig.7 Peak gain of antenna element and antenna array  
图 7 天线单元和阵列天线的峰值增益

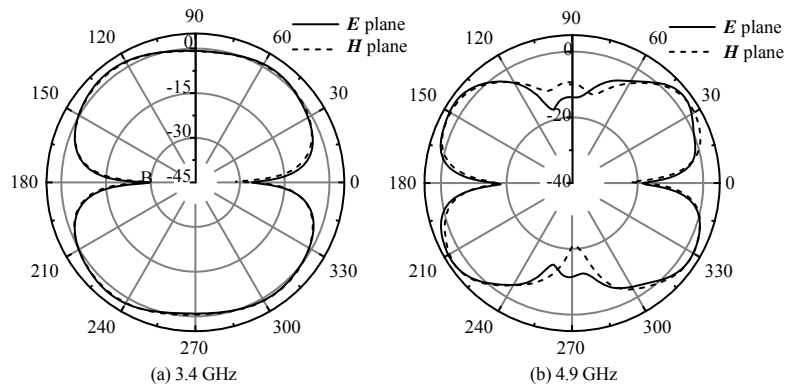
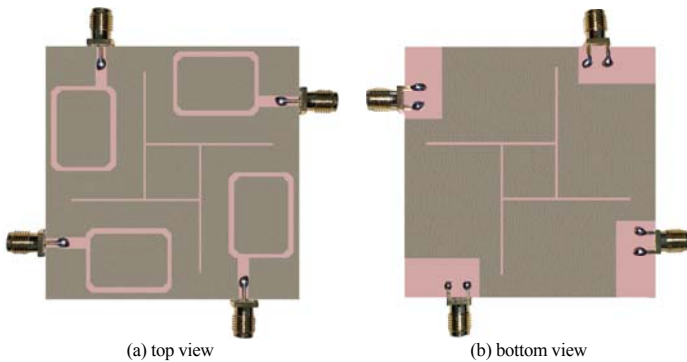


Fig.8 Simulated radiation pattern of antenna array at 3.4 GHz and 4.9 GHz  
图 8 阵列天线仿真远场辐射方向图

### 3 实验结果分析

根据图 2 的结构和表 1 中的尺寸，将阵列天线加工成实物，如图 9 所示。通过矢量网络分析仪(N5244A)和微波暗室对阵列天线的散射参数和远场辐射方向图进行了测量，分别绘制于图 10 和图 11。从图中可以看出，阵列天线的散射系数和远场辐射方向图与仿真的结果吻合度较高，由于测试环境与方法导致的误差，阵列天线的工作频段、中心工作频点整体向右发生偏移，远场辐射方向图也产生了一定的畸变。阵列天线的工作频段为 2.72~3.92 GHz 和 4.74~5.42 GHz，两个频段内的中心工作频点分别为 3.62 GHz 和 5.14 GHz，两个频段的相对带宽分别为 33%和 13%，并且各天线单元间的隔离度均低于-20 dB，能够很好地工作于 5G 所需要覆盖的频段。



(a) top view (b) bottom view  
Fig.9 Photograph of the fabricated antenna array  
图 9 阵列天线实物照片

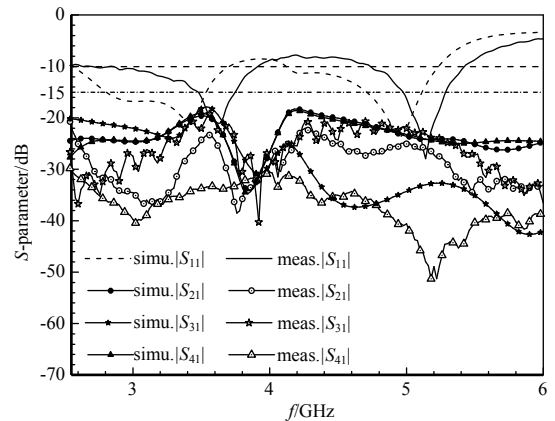


Fig.10 Measured S-parameters of the proposed antenna array  
图 10 所提出阵列天线的|S|参数实测曲线图

### 4 结论

本文设计了一款应用于 5G 的天线单元，进一步通过将所设计的 4 个单元进行合理布局，添加解耦网络，从而组成具有较高隔离度的 5G 紧凑型阵列天线，其具有以下特点：

1) 结构简单、小型化、高带宽的 5G 天线单元，为 5G 的阵列天线设计提供了单元结构；

2) 隔离度是紧凑型阵列天线设计的重要指标。利用天线单元的不同极化特性，将阵列天线中的各天线单元进行合理的布局，通过在单元之间引入二分之一波长微带线，能够使天线单元间的隔离度得到很大提升。相较于其他解耦方法，此类方法设计步骤简单，适用于单元数较多的紧凑型阵列天

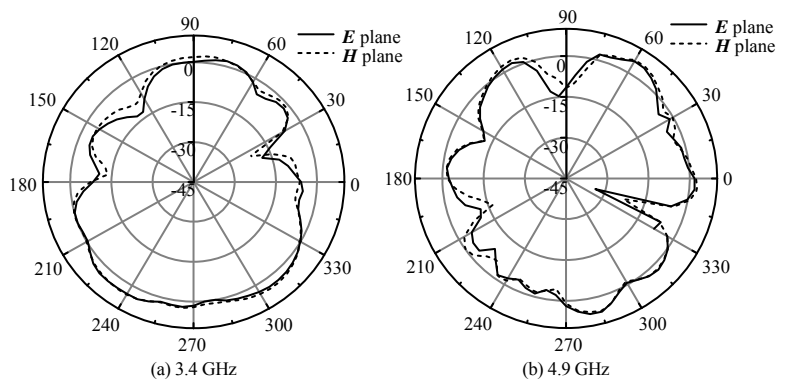


Fig.11 Measured radiation pattern of antenna array  
图 11 阵列天线实测远场辐射方向图

线,并且能够实现阵列天线在多频段、宽频带内解耦。但是天线单元正交放置的组阵方式,对于阵列天线的增益改善不大。

基于特点 2)提出的方法,如何提高此类结构下所设计阵列天线的增益和实现在二维平面内紧凑型无限大阵列天线设计将是下一步的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] 胡秀娟. 紧凑型超宽带 MIMO 天线的研究与设计[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (HU Xiujuan. Research and design of compact ultra-wideband MIMO antenna[D]. Chengdu,Sichuan,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [2] TANG C,ZHENG H X,WANG M J,et al. A dual-band antenna array with high gain and miniaturized structure[C]// 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology(ICEICT). Harbin,China: IEEE, 2019:735-738.
- [3] SUN Q,SUN B,SUN L,et al. Broadband two-element array with hybrid decoupling structures for multimode mobile terminals[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015(14):1431-1434.
- [4] TANG T,LIN K. An ultra-wideband MIMO antenna with dual band-notched function[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2014(13):1076-1079.
- [5] ZHANG S,PEDERSEN G. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015(15):166-169.
- [6] MOHAMMED M B,OMAR F S,OMAR M R. Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2010(9):876-878.
- [7] MAJUMDER B,KRISHNAMOORHTY K,MUKHERJEE J,et al. A novel miniaturized complimentary split ring loaded electromagnetic band gap structure for isolation improvement and absorber applications at microwave frequencies[C]// 2014 8th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. Lyngby,Denmark: IEEE, 2014:49-51.
- [8] ZHAO L,WU K L. A dual-band coupled resonator decoupling network for two coupled antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(7):2843-2850.
- [9] XUN J H,SHI L F,LIU W,et al. Compact dual-band decoupling structure for improving mutual coupling of closely placed PIFAs[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2008(16):1985-1989.
- [10] ZHANG S,YING Z,XIONG J,et al. Ultra-wideband MIMO/diversity antennas with a tree-like structure to enhance wideband isolation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009(8):1279-1282.
- [11] 傅随道,曹振新,汤湘伟,等. 一种可用于卫星导航抗干扰天线的降耦方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(5):781-785. (FU Suidao,CAO Zhenxin,TANG Xiangwei,et al. A decoupling method for anti-jamming antennas for satellite navigation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2018,16(5):781-785.)
- [12] BEIRANVAND E,AFSAHY M,SHARBATI V. Reduction of the mutual coupling in patch antenna arrays based on EBG by using a planar frequency-selective surface structure[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2017,9(2):349-355.
- [13] SIPAL D,ABEGAONKAR M P,KOUL S K. Easily extendable compact planar UWB MIMO antenna array[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2017(16):2328-2331.
- [14] TOKTAS A,AKDAGLI A. Compact multiple-input multiple-output antenna with low correlation for ultra-wideband applications[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2015(9):822-829.
- [15] 齐宏业. 天线互耦表征及去耦方法的研究[D]. 南京:东南大学, 2016. (QI Hongye. Research on antenna mutual coupling characterization and decoupling method[D]. Nanjing,Jiangsu,China:Southeast University, 2016.)