

文章编号: 2095-4980(2020)03-0439-05

一种具有金属隔条屏蔽作用的电磁材料设计

张润林, 唐涛*, 孙浩然

(成都信息工程大学 电子工程学院, 四川 成都 610200)

摘要: 设计了一种具备金属隔条屏蔽作用的立体微带电磁材料, 可在射频通信系统调试中使用。与金属隔条相比, 该材料具有轻薄、体积小、使用频段可调的优点, 利于实现产品小型化和轻便化设计。该材料由水平电磁带隙(EBG)结构和垂直周期“7”型结构组成, EBG结构具备抑制特定频段串扰信号作用, 其上方垂直放置的周期“7”型接地结构, 可将耦合电流引入地板, 达到增强抑制和进一步净化金属腔体内部电磁环境的作用。通过改变内嵌在材料中的电感值, 可以实现对不同频率的高频串扰信号的抑制。实验结果表明, 该电磁材料可对15~19.25 GHz, 19.4~21 GHz和21.2~24 GHz频段的串扰信号实现抑制度大于35 dBc。

关键词: 信号串扰; 屏蔽; 电磁材料; 电感

中图分类号: TN972

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019020

A design of microstrip electromagnetic material with shielding effect of metal isolation strip

ZHANG Runlin, TANG Tao*, SUN Haoran

(School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan 610200, China)

Abstract: A three-dimensional microstrip electromagnetic material with shielding effect is designed, which can be used for debugging RF communication system. Compared with the traditional metal isolation strip, the presented material has the advantages of being light and thin, small in size and frequency adjustable. Those properties are advantageous for miniaturization and light weight design of the product. The presented material is composed of a horizontal, Electromagnetic Band Gap(EBG) structure and a vertical period “7” type structure. The EBG structure has the function of suppressing crosstalk signals in specific frequency bands. The “7” type structure can introduce the coupling current into the GND to further enhance crosstalk suppression and purify the electromagnetic environment inside the cavity. By adjusting the value of the inductance embedded in the material, the suppression of high frequency crosstalk signals at different frequencies can be achieved. Experimental results show that the presented material can achieve crosstalk signal suppression greater than 35 dBc in 15–19.25 GHz, 19.4–21 GHz, and 21.2–24 GHz bands, respectively.

Keywords: signal crosstalk; shielding; electromagnetic material; inductance

随着现代雷达和通信系统的迅速发展, 通信系统不断朝小型化、多频段和多功能方向发展。现代通信产品设计需要满足预先规定的尺寸要求, 射频系统中数量较多的元器件放置在一个狭小的空间, 导致有限 PCB 印制板面积上走线拥挤, 串扰严重时甚至引起产品无法正常工作, 且无法在复杂电磁环境运用, 导致重新设计, 带来时间、采购、加工和设计等成本的严重浪费^[1]。

目前, 在射频系统中解决内部串扰问题的主要方法有: a) 增大相邻射频通道器件和传输线之间的布局距离^[2], 或使用金属隔条或隔墙加强信号处理通道间的屏蔽^[3]。但布局距离增大可能不满足尺寸要求, 并且隔条常采用铝

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-03-01

基金项目: 四川省科技计划重点研发资助项目(2018GZ0261)

作者简介: 张润林(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统。email:rlinzhang@163.com

*通信作者: 唐涛 email:tangt@cuit.edu.cn

材质，相较于微带材质的电磁材料，质量较重，如对于一个 3 cm×3 cm×1 cm 的小腔体，壁厚 5 mm 的铝制隔条质量约为 10 g 左右，不利于电路的小型化和轻便化设计，工程实践可知铝制隔条对隔离度的改善仅为 20~30 dBc 左右，并且频率越高，隔离度越差。另外，金属腔体一旦加工就难以更改内部结构也是其缺点。b) 调试发现串扰信号来源，采用吸波材料吸收串扰信号能量，或采用锡箔纸封堵^[4]。但高频段吸波材料昂贵，会恶化信号幅值响应，性能下降，且吸波材料存在频段限制；锡箔纸封堵可靠性不佳，不利于产品长期使用。c) 不同层的走线正交分布。但多层 PCB 板加工费用明显增加。

在设计小型化通信产品射频系统过程中，解决全部的串扰信号相当困难^[5]，并且腔体和 PCB 板加工完成后无法更改，如果信号串扰不能解决，产品重新设计将造成成本浪费。因此，寻找有效解决射频信号通道间串扰问题的方法将是实现产品小型化、轻便化设计的关键^[6]。

本文设计了一种具备腔体隔条屏蔽作用的立体微带电磁材料，可在射频系统调试中便捷使用。微带电磁材料主要通过薄介质上敷铜构成，在体积和价格方面具有天然优势，克服了使用金属隔墙和隔条带来的尺寸和质量增加的缺点。与传统方法不同，本设计采用“抑制+吸收”相结合的思路，设计的材料中水平部分采用新型电磁带隙(EBG)结构，EBG 结构具有抑制特定频段信号的特性。垂直部分“7”型结构将腔体内部能量耦合到地，净化内部电磁环境，同时，可起到改变腔体空间布局的效果，防止由于腔体固有谐振恶化通道间耦合。

1 串扰信号分析与材料设计

1.1 串扰信号分析

根据传输线理论，长度 L 的传输线可等效为若干长度为 Δx 的传输线^[7]，而根据 Paul Clayton R 平行传输线理论^[8]，长度为 Δx 的两段平行传输线可等效如图 1 所示电路：其中 L_G 和 L_R 表示自感， C_G 和 C_R 表示自容， L_M 和 C_M 表示互感互容。基于以上模型和 Paul Clayton R 串扰方程^[8]，若有长度为 L 的平行传输线，在传输线 A 上传输高电平信号，传输线 B 上接收到的串扰响应用 $V_R(L)$ 表示，相关符号含义和说明可参考文献[8]，串扰方程为：

$$V_R(L) = \frac{S}{Den} \left[-\frac{Z_{LR}}{Z_{OR} + Z_{LR}} j\omega L_M L I_{GDC} + \frac{Z_{OR} Z_{LR}}{Z_{OR} + Z_{LR}} j\omega C_M L V_{GDC} \right] \tag{1}$$

$$\frac{V_R}{L_m} = \frac{dI_G}{dt} \tag{2}$$

$$\frac{I_R}{C_m} = \frac{dV_G}{dt} \tag{3}$$

由式(1)可以看出串扰是电感耦合(磁场耦合)和电容耦合(电场耦合)的叠加，与平行传输线串扰类似。图 2 为多通道两类信号输出电路简化模型。将多通道简化为双通道传输两类信号，以便更清楚地进行叙述说明。近距离布局通道 A 和通道 B 分别传输高增益高电平的 A 信号和 B 信号，A(B)信号从通道 A(B)通过，在通道 B(A)输出端会接收到通道 A(B)内传输的信号或 2 个信号的互调制杂散，通道间信号串扰将严重恶化产品性能^[9]。产生这种现象主要由于器件和传输线之间互感和互容形成，图中 L_m 即为传输线之间的互感， C_m 为互容，因器件加工工艺已发展非常成熟，器件内部电路经过封装后与相邻通道的器件发生耦合的几率较小，故主要还是由于传输线之间的耦合造成了串扰，尤其是射频通道上存在多个器件，每个器件的输入输出端口与传输线之间都可能存在不匹配情况，这种不匹配将一定程度上增强传输线之间的电磁耦合。实验以平行传输线为模型，通过在图 2 中虚线区域使用设计的材料，减弱通道 A 和通道 B 之间的电磁耦合，阻止通道 A 中的信号因器件端口不匹配等因素串扰到通道 B 中，造成不良影响。

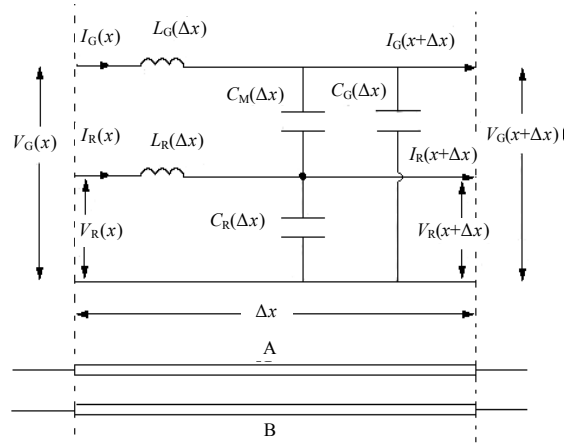


Fig.1 Equivalent circuit of transmission line
图 1 传输线等效电路

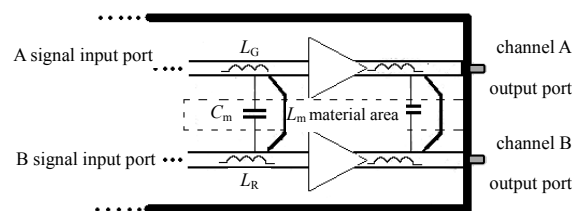


Fig.2 Illustration of the couple between channels
图 2 通道间耦合示意图

1.2 材料设计

材料空间上呈三维立体垂直分布，由水平 EBG 结构部分和垂直的周期“7”型结构部分组成。通过改变内嵌在材料中的集总参数电感值，可实现对不同频率的高频串扰信号的抑制。

EBG 是一种由介质、金属或者其混合体单元按周期性排列所构成的阵列结构^[10-11]。EBG 结构具备类似带阻滤波器性能，能对一定频段串扰信号抑制。传统 EBG 结构占用面积大，EBG 单元间距离通过布拉格(Bragg)散射条件决定导带长度^[12]： $2K=2\pi/d$ ， $K=2\pi/\lambda_g$ ，可以得出 $d=\lambda_g/2$ ，式中 K 是导波波长相应的波数， λ_g 是阻带最高频率对应的波导波长。这样一来，由于 EBG 结构固定，阻带频率不可调谐，且在低频频段导带长度过长，使用不便。本设计中 EBG 结构由弯折的“工”型单元构成，通过弯折“工”型臂，在有限空间内达到阻带最高频率点所需等效电容、电感值，同时有效地缩减了材料体积。单元与单元之间通过金属导带连接，将金属导带等效为电感^[13]，不同导带长度对应不同的等效电感值，通过在导带中间内嵌集总参数电感，改变不同的电感值可以实现对抑制阻带的“移动”，实现对多频段信号的抑制，同时可缩小导带长度。EBG 结构如图 3 所示，对应参数值如表 1 所示。

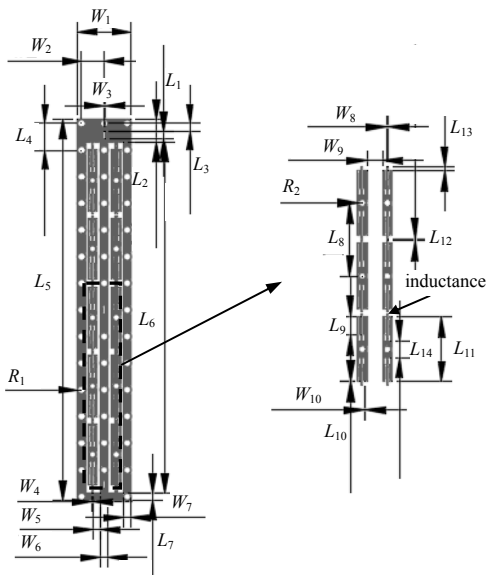


Fig.3 Structure of EBG
图 3 EBG 结构

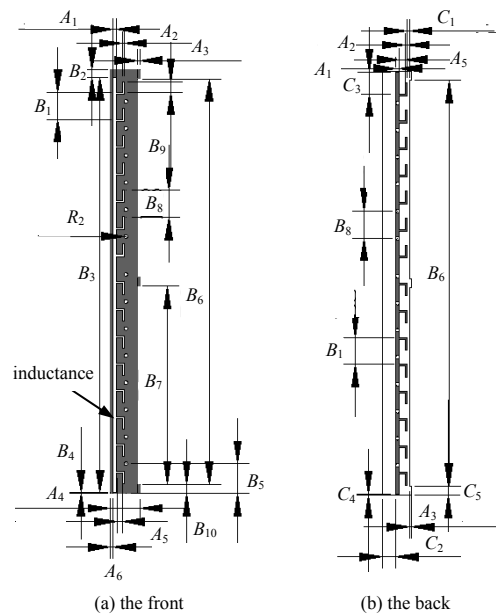


Fig.4 "7" type structure
图 4 "7"型结构

表 1 EBG 结构参数(单位: mm)

Table1 Parameters of EBG structure(unit:mm)

| W_1 | W_2 | W_3 | W_4 | W_5 | W_6 | W_7 | W_8 | W_9 | W_{10} | L_1 | L_2 |
|----------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------|
| 7 | 3 | 0.24 | 0.2 | 0.94 | 1 | 1 | 0.2 | 1.9 | 0.1 | 0.99 | 3 |
| L_{11} | L_{12} | L_{13} | L_3 | L_4 | L_5 | L_6 | L_7 | L_8 | L_9 | L_{10} | |
| 8.1 | 1.1 | 0.47 | 1 | 3.5 | 50 | 40 | 1 | 9 | 2.2 | 0.1 | |

为加强串扰抑制，在 EBG 结构上设计了如图 4 所示的“7”型结构，其参数如表 2 所示。该“7”型结构通过卡槽和导电胶垂直固定在 EBG 结构上方。图中正面和背面分别为周期分布的“7”型缝隙和贴片，通过过孔连接。该结构可将受串扰信号电场、磁场能量驱动产生的感应电流引入参考地^[14]，进一步增强抑制效果，净化内部电磁环境，避免信号间互相调制造成的频谱恶化和信号自调制直流引起的器件损坏，与水平 EBG 结构相似，在图 4 标识位置内嵌集总参数电感，电感采用贴片绕线电感，体积小，质量轻，如 330 μH 可采用 1007 封装绕线电感，通过烙铁焊接固定，以吸收多频段的串扰信号能量。

表 2 “7”结构参数(单位: mm)

Table2 Parameters of "7" structure(unit:mm)

| A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 | B_1 | B_2 | B_3 | B_4 | B_5 | B_6 | B_7 | B_8 | B_9 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.40 | 0.20 | 0.25 | 3.20 | 0.57 | 0.30 | 3.00 | 0.90 | 3.00 | 0.10 | 3.31 | 45.00 | 22.00 | 3.00 | 1.20 | 0.29 | 1.50 | 2.38 | 0.10 | 45.00 |

2 材料仿真与测试

通过图 2 所示的通道示意图,在电磁仿真软件建模,分析验证材料具有抑制串扰特性和抑制频段可调特性。仿真时 A 信号输入端口(port1)输入功率大小为+15 dBm 信号,通过分析 B 通道输出端口(port3)接收到 A 信号电平大小验证材料的上述两种特性。首先验证材料具有抑制串扰特性效果,设置 EBG 单元间金属导电带连接(即不嵌入电感),且“7 型”结构不嵌入电感,分别对平行微带线之间使用电磁材料接地和使用 GND 过孔接地进行仿真,仿真结果如图 5 所示,从结果可以看出,使用材料时,具有更好的抑制效果。其次,验证材料抑制频段可调特性,在 EBG 单元间的连接导带和“7”型结构缝隙中内嵌集总参数电感,改变集总参数电感值对应微带线间的隔离度,如图 6 所示,仿真结果验证了材料抑制频段可调特性,对 15~19.25 GHz,19.4~21 GHz 和 21.2~24 GHz 频段的串扰信号实现隔离度大于 35 dBc。

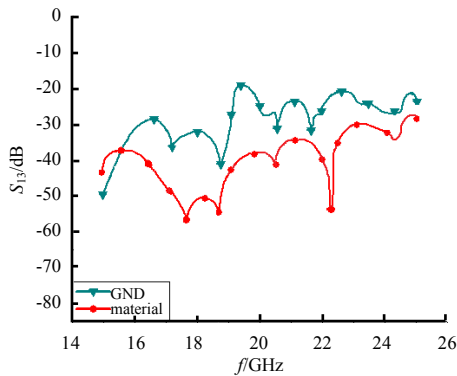


Fig.5 Comparison of results
图 5 抑制效果对比

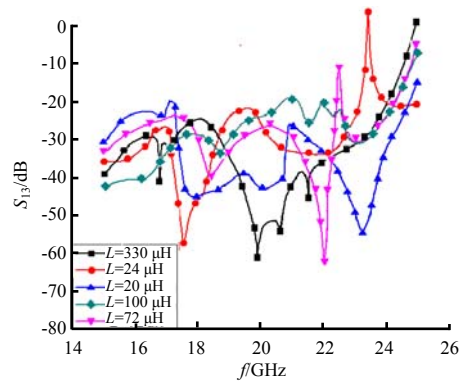


Fig.6 Suppression bands corresponding to different inductance values
图 6 不同电感值与抑制频段

通过在通道间使用电磁材料接地,内嵌不同电感参数值进行测试,测试环境如图 7 所示,测试时,端口 2 和端口 4 接 50 Ω 匹配,端口 1 和端口 3 的测试按照仿真时的条件进行,即 A 信号输入端口(port1)输入功率大小为+15 dBm 信号,通过对输出端口 B(port3)通道接收到 A 信号的大小验证材料的防串扰特性,测试结果与仿真结果的对比如图 8 所示,为方便对比查看,将结果对比在图 8(a)和图 8(b)中分开绘出,图 8(a)为 $L=100 \mu\text{H}$ 和 $L=20 \mu\text{H}$ 的仿真与测试曲线,图 8(b)为 $L=330 \mu\text{H}$ 和 $L=72 \mu\text{H}$ 的仿真和测试曲线。

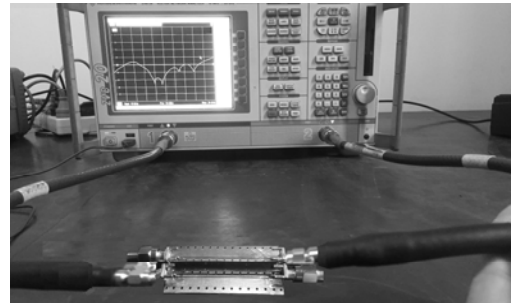
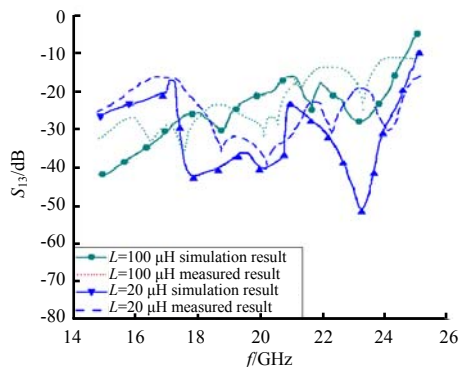
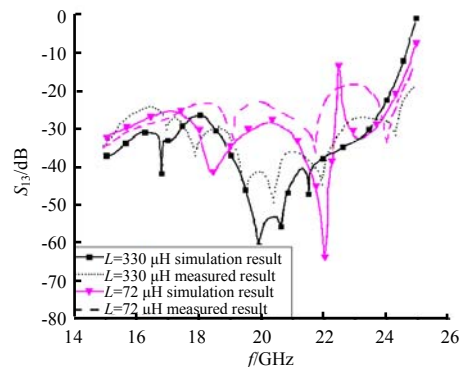


Fig.7 Measurement environment
图 7 测试环境



(a) $L=100 \mu\text{H}$ and $L=20 \mu\text{H}$



(b) $L=330 \mu\text{H}$ and $L=72 \mu\text{H}$

Fig.8 Simulation results and measured results
图 8 仿真结果与测试结果

图 8 测试结果表明,不同集总参数电感值的测试曲线与仿真曲线趋势大致相同,但实测曲线的抑制深度不如仿真值高,差值最多约 20 dB,且抑制尖点个数明显比仿真曲线多。实测信号功率为+10 dBm 时,15~19.25GHz,19.4~21 GHz,21.2~24 GHz 频带内材料对串扰信号抑制制度最高为-60 dBc 左右,最低约为 25 dBc 左右。并且不同

集总参数值对应的抑制深度各不相同。出现仿真值与实测值差别,包括抑制深度和抑制尖点个数差别,主要是由以下原因造成:a)集总参数电感仿真时为理想值,精准且无寄生效应,实际电感的电感值存在误差,且存在寄生效应^[15];b)加工工艺误差,也是引起误差的主要原因;c)介质材料仿真时为理想均匀介质,但是实际做不到非常精准。

3 结论

本文设计了一种用于射频通信系统调试的三维立体微带电磁材料,该材料由水平微带EBG垂直“7”型周期结构构成,具有轻薄和占用体积小特点,有利于产品小型化需求。在材料中使用集总参数电感可实现15~19.25 GHz,19.4~21 GHz和21.2~24 GHz频段串扰信号抑制制度大于35 dBc。采用本材料可以方便快捷地进行系统调试,缩短调试周期,减小调试工作量,有效避免了成本浪费。

参考文献:

- [1] 符淑芹,彭燕,薛原. 雷达装备复杂电磁环境适应性试验需求分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5): 868-870. (FU Shuqin,PENG Yan,XUE Yuan. Analysis on requirements of the complex electromagnetic environment adaptation test for radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):868-870.)
- [2] 陆云龙. 射频无源器件设计:新型耦合机制、谐振器(传输线)研究与应用[D]. 杭州:浙江大学, 2015. (LU Yunlong. Novel coupling mechanism and resonators(transmission lines) for RF passive circuits:research and application[D]. Hangzhou, China:Zhejiang University, 2015.)
- [3] 李照荣,吕立明,黄学骄. 递进型射频 SiP 系统优化法研究[J]. 微波学报, 2018,34(1):29-35. (LI Zhaorong,LYU Liming, HUANG Xuejiao. Progressive optimization method for RF SiP system[J]. Journal of Microwaves, 2018,34(1):29-35.)
- [4] 田川. T/R 组件小型化关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (TIAN Chuan. Research on the key technology of miniaturization of T/R module[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [5] 张海凤. HyperLynx 仿真与 PCB 设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2005. (ZHANG Haifeng. Simulation and PCB design[M]. Beijing:China Machine Press, 2005.)
- [6] 黄战彬. 手持式穿墙雷达信号处理机与显控系统的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (HUANG Zhanbin. Research of hand-held through the wall radar system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [7] TAMIR T,ZHANG S. Modal transmission-line theory of multilayered grating structures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002,14(5):914-927.
- [8] PAUL C R. Solution of the transmission-line equations for three-conductor lines in homogeneous media[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978,20(1):216-222.
- [9] 王雪茹. 信号完整性对雷达对抗系统的影响[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (WANG Xueru. The influence of signal integrity on radar countermeasures system[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2014.)
- [10] 蒋连浩,高卫东,杜道鹏. EBG 结构在 PCB 传输线间串扰抑制中的应用[J]. 电子信息对抗技术, 2008,23(5):69-72. (JIANG Lianhao,GAO Weidong,DU Daopeng. Application of EBG structure to suppress crosstalk between PCB transmission lines[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2008,23(5):69-72.)
- [11] NADERI M,ZARRABI F B,JAFARI F S,et al. Fractal EBG structure for shielding and reducing the mutual coupling in microstrip patch antenna array[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018(93):261-267.
- [12] 凌劲,龚书喜,路宝,等. 电磁带隙结构在天线雷达散射截面减缩中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(8):1225-1229. (LING Jing,GONG Shuxi,LU Bao,et al. Application of electromagnetic bandgap structure in RCS reduction of antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009,21(8):1225-1229.)
- [13] CHRISTENSEN J B,KOEFOD J G,BELL B A,et al. Shape-preserving and unidirectional frequency conversion using four-wave mixing Bragg scattering[J]. Optics Express, 2018,26(13):17145-17157.
- [14] 汪江宇,唐涛,邓彪. 双频双端口天线的隔离度优化设计[J]. 微波学报, 2017,33(4):63-66. (WANG Jiangyu,TANG Tao, DENG Biao. Optimization design of isolation for a dual-band dual port antenna[J]. Journal of Microwave, 2017,33(4): 63-66.)
- [15] LIAO T,ZHANG L. Efficient parasitic-aware hybrid sizing methodology for analog and RF integrated circuits[J]. Integration, 2018(62):301-313.