

文章编号: 2095-4980(2018)05-0781-05

一种可用于卫星导航抗干扰天线的降耦方法

傅随道¹, 曹振新¹, 汤湘伟², 闫双山²

(1.东南大学 毫米波国家重点实验室, 江苏 南京 210096; 2.中国电科 中电科技扬州宝军电子有限公司, 江苏 扬州 225003)

摘 要: 针对基于功率倒置算法的空时自适应抗干扰技术中天线阵元间互耦误差严重恶化算法性能这一问题, 分析比较了目前常见的应对解决方案, 并提出一种新的可用于抗干扰卫星导航终端的天线阵列降耦方法。该方法通过在卫星导航抗干扰天线阵列中加载电磁谐振吸波器, 降低天线阵元间互耦。实验数据表明, 利用该方法可以使阵元间互耦降低 10 dB, 使抗干扰接收机最大抑制干信比提升 5 dB。

关键词: 卫星导航; 空时自适应处理; 阵元互耦; 完美吸收器

中图分类号: TN967.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0781

A method to reduce the coupling for satellite navigation anti-jamming antennas

FU Suidao¹, CAO Zhenxin¹, TANG Xiangwei², YAN Shuangshan²

(1.State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2.CETC Yangzhou Baojun Radio Factory, CETC, Yangzhou Jiangsu 225003, China)

Abstract: The mutual coupling between the antenna elements based on the Power Inversion(PI) algorithm deteriorates the performance of the space-time adaptive anti-jamming. Common solutions to solve the problem are analyzed and compared. A new method which can be applied to reduce the coupling in the anti-jamming satellite navigation positioning between the antenna elements is proposed. The method reduces the mutual coupling between the antenna elements by loading the electromagnetic resonance absorber in the satellite navigation anti-jamming antenna array. The experimental data show that the method can reduce the mutual coupling between the arrays by 10 dB, and therefore the anti-jamming receiver can suppress the maximum Jamming-to-Signal ratio by 5 dB.

Keywords: satellite navigation; space-time adaptive processing; mutual coupling; perfect absorber

空时自适应处理(Space Time Adaptive Processing, STAP)^[1]作为一种先进的信号处理技术, 通过利用信号空间信息和频谱特性形成空时二维调零响应, 可以在抑制干扰的同时自适应地补偿系统误差并提升处理非平稳信号的能力, 因而被广泛用于移动通信和雷达领域。基于功率倒置(PI)算法^[2]的空时自适应抗干扰可以在信号波达方向(Direction Of Arrival, DOA)未知的条件下抑制大功率干扰信号, 保证接收机正常工作, 因此被广泛用于卫星导航终端抗干扰中^[3]。

在空时自适应抗干扰研究中, 通常认为天线阵列单元是理想的, 即各向同性、相互独立^[4]。然而实际阵元间的互耦是不可避免的, 特别是在紧凑尺寸下, 严重的互耦会对空时自适应抗干扰算法性能产生显著影响。本文将研究阵元互耦对基于 PI 算法的空时自适应抗干扰性能影响, 分析目前常见的针对空时自适应阵元互耦问题的解决方案, 最后提出一种新的可用于卫星导航终端的抗干扰天线阵列降耦方法。

1 基于 PI 算法的 STAP 阵元互耦分析

以 N 元线阵为例, 每个阵元后接 $M-1$ 阶时域延迟。空时自适应处理结构如图 1 所示。阵列空时二维导向矢量 $\mathbf{a}$, 期望信号 S 和干扰信号 J 为远场窄带信号且相互独立。通道本底噪声 $\mathbf{N}$ 服从 $(0, \sigma)$ 正态分布。

阵元互耦的数学模型可以用各通道归一化阻抗矩阵表示:

收稿日期: 2016-08-25; 修回日期: 2017-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471117)

$$\mathbf{Z}\mathbf{U} = \mathbf{U}_0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Z}$ 为阵列归一化阻抗矩阵; $\mathbf{U}_0, \mathbf{U}$ 分别是阵列开路电压和输出电压。

理想条件下天线阵列原始独立通道信号 $\mathbf{X}_0$ 为:

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{a}_s S + \mathbf{a}_J J \quad (2)$$

考虑阵元互耦以及通道本底噪声, 修正后通道输出信号 $\mathbf{X}$ 为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z}^{-1}(\mathbf{a}_s S + \mathbf{a}_J J) + \mathbf{N} \quad (3)$$

接收信号协方差矩阵 $\mathbf{R}_{XX}$ 为:

$$\mathbf{R}_{XX} = E[\mathbf{Z}^{-1} \mathbf{X}_0 \mathbf{X}_0^H (\mathbf{Z}^{-1})^H] + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (4)$$

根据 PI 算法约束条件, 空时二维最优权矢量计算式为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{a}_0}{\mathbf{a}_0^H \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{a}_0}$$

式中 $\mathbf{a}_0$ 为 $1 \times NM$ 阶单位向量。

输出信号信噪比(SNR)为:

$$R_{\text{SN}} = \frac{(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{a}_s S)(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{a}_s S)^H}{(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{a}_J J)(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{Z}^{-1} \mathbf{a}_J J)^H + \sigma^2 \mathbf{I}} \quad (5)$$

从式(6)推导结果可以发现阵元间互耦会直接影响系统输出信号信噪比。图 2 所示分别是干信比(Jamming-to-Signal Ratio, JSR)为 40 dB, 60 dB, 80 dB, 100 dB 时, 不同耦合强度下四元方阵一维空域响应图, 其中干扰信号来向 $\theta = 75^\circ$ 。由图 5 可知, 随着阵元间互耦的增强, 空域响应零陷迅速衰减, 并且出现零陷漂移现象, 这将导致阵列输出信号的信噪比减小。此外, 随着干信比增加, 互耦导致的零陷相对衰减愈发显著。当干信比为 40 dB、阵元互耦为 -10 dB 时, 考虑编码抗干扰余量, 此时接收机仍可以正常工作; 当干信比为 80 dB 时, 即使考虑余量, 阵列输出信号的信噪比也远远超过阈值, 卫星信号接收失败。

从上述分析看, 阵元间互耦极大限制了空时自适应抗干扰的空域响应特性, 是制约系统抗干扰性能的核心因素。阵元间互耦的大小直接决定系统最大抑制干信比, 互耦越强, 输出信号信噪比越低, 可抑制干信比也越小。

2 STAP 阵列互耦补偿与抑制

天线阵列间的互耦限制空时自适应抗干扰系统性能^[5], 目前针对此问题的研究通常着眼于两方面: a) 通过引入阵列互耦补偿矩阵校正; b) 改进天线阵元和阵列设计结构, 降低互耦。这 2 个方法分别从信号处理和电磁场的角度, 通过相关方法改善由于互耦导致的系统整体性能衰减。

2.1 STAP 阵列互耦补偿

空时自适应研究中关于互耦补偿的方法通常分为 2 种^[6]。第 1 种是将包含互耦误差的信号矩阵乘以误差矩阵的逆矩阵; 第 2 种是在求取空时最优权矢量时, 对信号空时导向矢量 $\mathbf{a}_0$ 乘以误差矩阵。

对于基于功率倒置算法的空时自适应处理, 在计算最优权矢量时, 通过定义参考对消通道限定 $\mathbf{a}_0$ 为单位向量, 因此对于 PI 算法第 2 种补偿方法是无效的。而第 1 种补偿方法实际上通过引入通道本底噪声互扰, 来确保

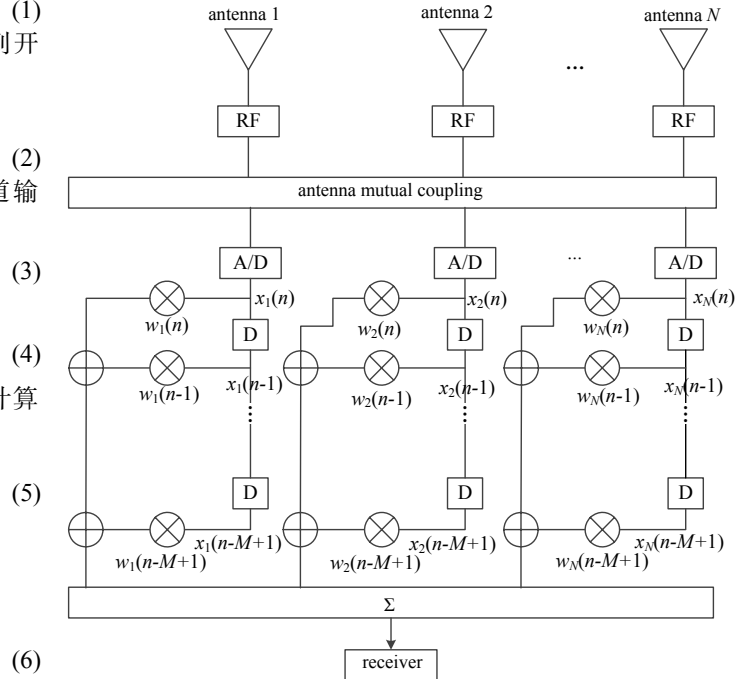


Fig.1 Space-time adaptive processing structure

图 1 空时自适应处理结构图

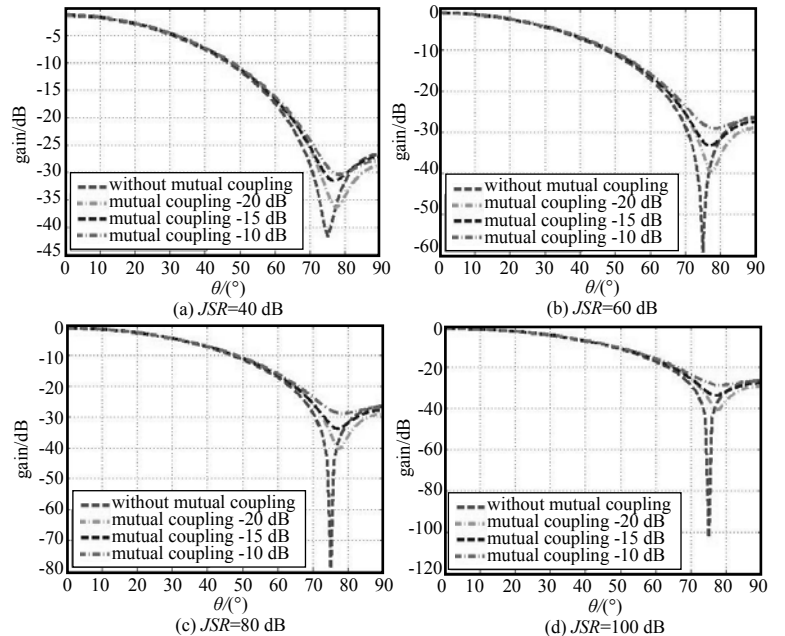


Fig.2 One-dimensional spatial response of four units rectangular array

图 2 四元方阵一维空域响应图

大功率干扰信号的稳定接收。利用式(3)，对接收信号乘以阵列互耦矩阵得到校正后信号：

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{Z}\mathbf{X} = (\mathbf{a}_s \mathbf{S} + \mathbf{a}_j \mathbf{J}) + \mathbf{Z}\mathbf{N} \quad (7)$$

校正后信号协方差矩阵为：

$$\mathbf{R}_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = E[\mathbf{X}_0 \mathbf{X}_0^H] + \sigma^2 \mathbf{Z}\mathbf{Z}^H \quad (8)$$

最终阵列输出信号信噪比为：

$$R_{\text{SN}} = \frac{(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{a}_s \mathbf{S})(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{a}_s \mathbf{S})^H}{(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{a}_j \mathbf{J})(\mathbf{W}_{\text{opt}} \mathbf{a}_j \mathbf{J})^H + \sigma^2 \mathbf{Z}\mathbf{Z}^H} \quad (9)$$

考虑到干扰信号功率远大于通道本底噪声，可以认为阵列无互耦误差输出。图 3 所示为引入互耦补偿矩阵的一维空域响应图。由图 3 可知，通过互耦矩阵补偿，显著改善了因为阵元互耦导致的零陷衰减以及零陷漂移问题，甚至在一定程度上使得阵列输出信号信噪比优于无互耦的理想阵列。但是在改善零陷响应的同时，非干扰方向增益明显下降。由式(9)可知，在无干扰条件下，其分母约等于 $\sigma^2 \mathbf{Z}\mathbf{Z}^H$ 。相较于无互耦补偿时，阵列输出信号信噪比减小。因此互耦矩阵补偿的实质是通过牺牲非干扰方向(包括卫星信号方向)接收增益来补偿干扰方向零陷响应。而非干扰方向接收增益的减小会使阵列空域有效面积缩小，导致卫星信号成功接收概率下降。

此外在实际应用中还存在 2 个难点：首先，理论分析中通常认为互耦是阵列本身特性，与信号方向无关，但实际中信号从不同角度入射时，阵元互耦是不一样的。这就要求测量阵列的全向互耦矩阵并借助相关 DOA 算法判别来向，选择合适矩阵，这在应用中是难以实现的；其次，干扰信号必须是窄带信号。当宽带干扰入射时，系统无法同时对多个频点信号进行互耦补偿，尤其是阵列互耦矩阵在工作带宽内变化剧烈时，无法得到宽带信号的相应补偿矩阵。因此互耦补偿在实际系统中的效果十分有限。

2.2 STAP 阵列互耦抑制

从硬件方法降低互耦也是目前研究的重点。结合现有成果，天线阵元间互耦的产生通常归结为表面波、近场感应以及远场辐射 3 个因素^[7]。一般通过合理设计阵元结构以及阵列构型，可以有效降低阵列互耦。但是随着小型化的要求，阵列结构更加紧凑，互耦也更加严重，已经很难找到合适的硬件设计方法显著降低耦合。

目前在用于卫星导航终端的圆极化微带天线阵列中，主要通过添加电磁带隙结构^[8]和缺陷地结构^[9-10]来抑制表面波或利用 U 型环结构减小近场感应引起的电流。虽然，这些方法在一定程度上可以改善阵元间互耦，但是都存在着尺寸过大以及天线背向辐射增强的问题。总之，这些方法都不适合用于微带圆极化天线阵列中。

3 新型抗干扰天线阵列降耦方法

电磁超材料是一种具有天然常规材料所不具备的特殊电磁特性的人工复合结构或材料^[11]。1968 年，V G Veselago 首次提出了介电常数和磁导率均为负值的左手材料(Left Handed Materials, LHM)，并从理论上分析研究了其电磁特性^[12]。1996 年，J B Pendry 提出利用亚波长开口谐振环周期(Split Resonance Ring, SRR)结构实现负值介电常数和负值磁导率^[13]。2000 年，D R Smith 设计制造了第一块微波频段的左手材料，并通过实验证实了其负折射的传输特性^[14]。通过对超材料的灵活设计和调整，可以实现对电磁波传播特性的调控。

完美吸收器(Perfect Absorber, PA)^[15]是一种基于超材料的可调节电磁波吸波结构，可以在特定频段和特定入射角范围内实现零透射和零反射。利用完美吸收器的这种电磁特性，可以降低紧凑阵元间的近场感应，减小阵元间互耦，并且无需重新设计硬件，因而具有很强的模块化优势。本课题组根据完美吸收器理论，设计了一款基于电磁混合谐振的吸波器单元。该吸波器单元由顶层的特殊电路结构、中间层的高损电磁介质以及底层的金属地构成，具体结构见图 4。在波导中对吸波器周期结构的电磁吸波性能进行测试，由于该结构底层为全覆

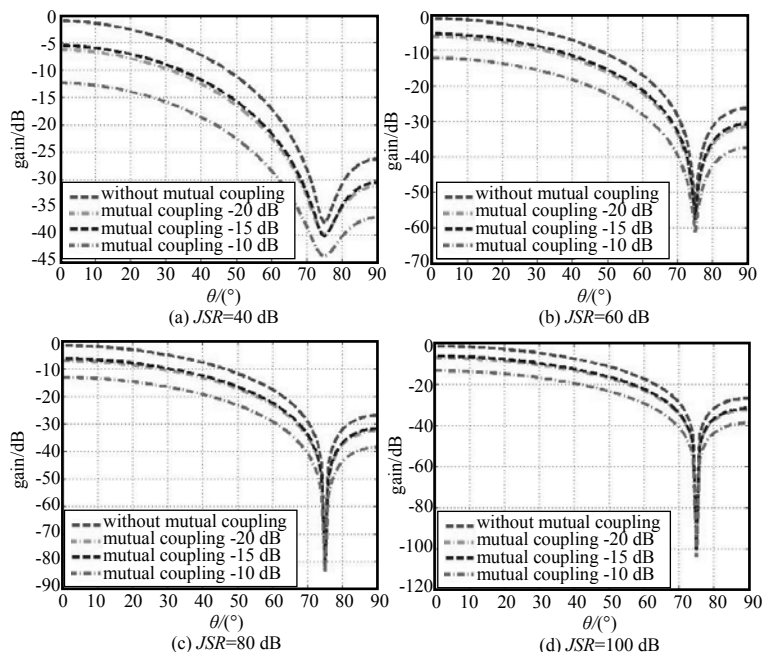


Fig.3 One-dimensional spatial response of four units rectangular array after mutual coupling compensation

图 3 互耦补偿后四元方阵一维空域响应图

盖金属地，因此可通过测试入射/反射电压值考察该结构吸波效果，测试结果如图 5 所示。从图 5 可知，在 1.15~1.3 GHz 范围内电磁波垂直入射该吸波器结构时，反射系数小于-11 dB。因此，在带内电磁波垂直入射条件下，该吸波器结构可实现 90%以上的能量吸收。

仿照相关资料^[16]，设计一款工作于北斗 B3 频段 (1.268 GHz±10.23 MHz)的四阵元天线阵列，该阵列直径 200 mm，阵元间距 0.42λ 。天线阵列实测数据表明：带内驻波小于-15 dB，阵元间隔离度小于-17 dB。同时，根据导航天线阵列结构并结合吸波器工作原理，设计如图 6 所示的双层吸波器阵列和如图 7 所示的吸波器阵列加载方案。加载吸波器阵列后，天线阵列实测数据表明：驻波依旧小于-15 dB，阵元间隔离度小于-27 dB。通过加载吸收器使天线阵列阵元间互耦降低 10 dB。因此，该方法能够显著降低阵元间互耦。

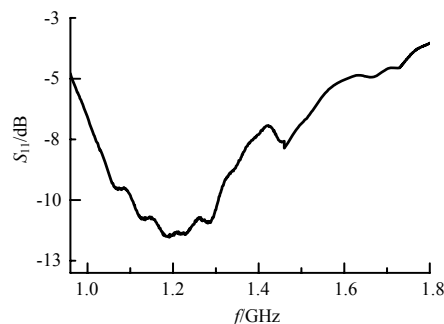


Fig.5 Reflection characteristic of absorber in waveguide
图 5 波导内吸收器反射特性曲线

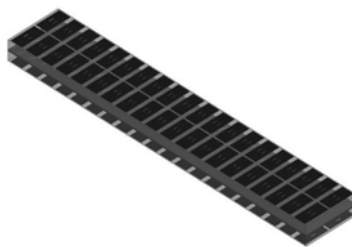


Fig.6 Structure of absorber array
图 6 吸收器阵列结构图

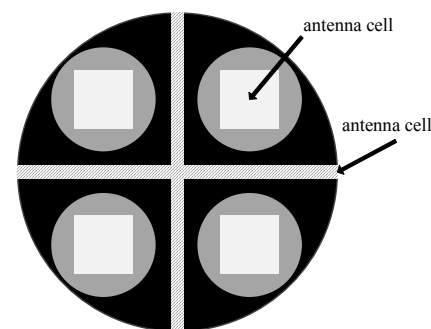


Fig.7 Structure of four units array with absorber loading
图 7 加载吸收器四元阵列结构图

分别对未加载、加载吸收器的空时自适应抗干扰接收机进行测试实验。经过标定，地面实际卫星信号接收功率为-127 dBm，窄带干扰链路损耗 45 dB，宽带干扰链路损耗 47 dB。表 1~表 2 分别为未加载/加载吸收器天线阵抗干扰实测数据，其中√表示接收机可以正常接收坐标信息，×表示接收机无法接收坐标信息或坐标信息超出允许误差。结合卫星信号功率、干扰发射机链路损耗以及天线阵列抗干扰实测数据可以得到接收机实际接收干信比。从表 1 中可知，未加载吸收器情况下系统最大抑制干信比分别为 77 dB/60 dB(单/双窄带干扰)以及 50 dB/45 dB (单/双宽带干扰)。在加载吸收器之后，系统最大抑制干信比为 80 dB/65 dB(单/双窄带干扰)，55 dB/50 dB(单/双宽带干扰)。对比数据可以发现系统总体性能提升约 5 dB。这表明利用吸收器降低阵元间互耦可以有效提升空时自适应抗干扰系统性能。因此，通过进一步改善吸收器性能可更大程度地提升系统整体性能。

表 1 未加载吸收器天线阵抗干扰测试数据/dBm

Table1 Test data of antenna array anti-jamming without absorber loading				
interference power	single narrowband interference	two narrowband interferences	single broadband interference	two broadband interferences
-2	×	×	×	×
-5	√	×	×	×
-7	√	×	×	×
-12	√	×	×	×
-17	√	×	×	×
-22	√	√	×	×
-32	√	√	√	×
-37	√	√	√	√

表 2 加载吸收器天线阵抗干扰测试数据/dBm

Table2 Test data of antenna array anti-jamming with absorber loading				
interference power	single narrowband interference	two narrowband interferences	single broadband interference	two broadband interferences
-2	√	×	×	×
-5	√	×	×	×
-7	√	×	×	×
-12	√	×	×	×
-17	√	√	×	×
-22	√	√	√	×
-32	√	√	√	√
-37	√	√	√	√

4 结论

阵列互耦已经成为制约空时自适应抗干扰性能的核心问题，传统的补偿校准和阵列降耦已经无法满足实际应用需求。本文利用完美吸收器理论，设计了一款吸波器并提出了一种双层吸波器阵列加载天线阵列方案。该方案减小阵元间近场感应，降低阵元间互耦，并通过实际测试证明其对系统性能提升的有效性。该方法具有小

尺寸、模块化的优势，通过进一步设计研究，可以实现对不同导航终端的兼容，具有极大的应用价值。

参考文献：

- [1] FANTE R L, VACCARO J J. Enhanced anti-jam capability for GPS receivers[C]//Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Nashville,TN:[s.n.], 1998:251–254.
- [2] VOLAKIS J L,O'BRIEN A J,CHEN C C. Small and adaptive antennas and arrays for GNSS applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2016,104(6):1221–1232.
- [3] 项建弘. 基于空时自适应处理的 GPS 调零技术应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009. (XIANG Jianhong. Based on the space-time adaptive processing GPS zero technology application research[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2009.)
- [4] 王永良,彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. (WANG Yongliang,PENG Yingning. Space Time Adaptive Process[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2000.)
- [5] SVENDSEN A S C, GUPTA I J. The effect of mutual coupling on the nulling performance of adaptive antennas[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2012,54(3):17–38.
- [6] 于斌,尹成友,黄冶. 阵列天线互耦、阵元位置误差和通道不一致性的校正[J]. 微波学报, 2008,24(4):56–59. (YU Bing, YIN Chengyou,HUANG Ye. The array antenna mutual coupling, array element position error and channel inconsistency correction[J]. Journal of Microwave, 2008,24(4):56–59.)
- [7] YANG F,RAHMAT-SAMII Y. Microstrip antennas integrated with Electromagnetic Band-Gap(EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003,51(10):2936–2946.
- [8] RAJO-IGLESIAS E,QUEVEDO-TERUEL O,INCLAN-SANCHEZ L. Mutual coupling reduction in patch antenna arrays by using a planar EBG structure and a multilayer dielectric substrate[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008,56(6):1648–1655.
- [9] ZHU F G,XU J D,XU Q. Reduction of mutual coupling between closely-packed antenna elements using defected ground structure[C]// IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing,China:IEEE, 2009.
- [10] BAIT-SUWAILAM M M,SIDDIQUI O F,RAHAHI O M. Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9):876–878.
- [11] COSTA F,GENOVESI S,MONORCHIO A,et al. A circuit-based model for the interpretation of perfect metamaterial absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013,61(3):1201–1209.
- [12] VESELAGO V G. The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968,10(4):509–514.
- [13] PENDRY J B,HOLDEN A J,STEWART W J,et al. Extremely low frequency plasmons in merallic mesostructures[J]. Physical Review Letters, 1996,76(25):4773–4776.
- [14] SMITH D R,PADILLA W J,VIER D C,et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000,84(18):4184–4187.
- [15] GRAYDON O. Perfect absorber[J]. Nature Photonics, 2014(1):2.
- [16] 周云林. 一种相位中心稳定的层叠双频导航天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):596–598. (ZHOU Yunlin. A stable phase center of the navigation cascade dual-band antenna design[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):596–598.)

作者简介：



傅随道(1990–)，男，江苏省常州市人，在读博士研究生，主要研究方向为卫星导航抗干扰技术与天线理论.email:fusuidao@sina.com.

曹振新(1976–)，男，江苏省南通市人，博士，副研究员，主要研究方向为阵列信号处理、卫星导航技术与新型天线技术。

汤湘伟(1979–)，男，江苏省扬州市人，硕士，高级工程师，主要研究方向为卫星导航抗干扰技术、射频一体化。

闫双山(1977–)，男，江苏省扬州市人，硕士，高级工程师，主要研究方向为卫星导航抗干扰技术、射频一体化。