

doi: 10.3969/j.issn.1003-3106.2016.03.01

引用格式: 刘颜回, 廖 锐, 程 娟, 等. 二维相控阵的自适应—自适应旁瓣对消策略[J]. 无线电工程, 2016, 46(3): 1-4. 21.

## 二维相控阵的自适应—自适应旁瓣对消策略

刘颜回<sup>1</sup>, 廖 锐<sup>1</sup>, 程 娟<sup>1</sup>, 杨 晶<sup>1</sup>, 王育强<sup>2</sup>

(1. 厦门大学 电子科学系, 福建 厦门 361005;

2. 电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

**摘 要** 传统旁瓣对消方法采用单元天线作为辅助通道, 系统对消输出的信噪比较低, 且合成阵列存在较高的副瓣抬升隐患。针对二维稀疏阵列的应用特点, 提出一种新的自适应—自适应旁瓣对消策略。该方法取代了传统方法中使用的单元天线以及数字加权方法, 使用小型阵列作为辅助通道和射频加权, 并借助辅助通道对干扰方向进行估计, 根据估计得到的干扰方向信息对辅助子阵列内部的射频加权系数进行调整, 使得辅助通道的波束最大可能地对准干扰方向。最后利用恒增益对消技术, 实现主阵列中的旁瓣对消。仿真实验结果表明了该方法的有效性和优势。

**关键词** 旁瓣对消; 自适应—自适应方法; 来波到达角; 波束形成

中图分类号 TN973.3 文献标识码 A 文章编号 1003-3106(2016)03-0001-04

## Adaptive-Adaptive Sidelobe Cancellation Strategy for Two-dimensional Phased Arrays

LIU Yan-hui<sup>1</sup>, LIAO Kun<sup>1</sup>, CHENG Juan<sup>1</sup>, YANG Jin<sup>1</sup>, WANG Yu-qiang<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic Science, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China;

2. Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu Sichuan 610036, China)

**Abstract** The traditional adaptive sidelobe cancellation method uses single antenna as assistant channel, so the signal to noise ratio (SNR) of system output is small and it is possible to uplift the sidelobe in synthetic array. In view of application feature of two-dimensional sparse array, a new method named adaptive-adaptive sidelobe cancellation is proposed in this paper. The new method replaces the single antenna with small synthetic arrays as assistant channel and replaces digital weighting method with RF weighting method and it estimates the direction of the jamming with assistant channel. According to the information about the direction, the new method adjusts the RF weight of assistant channel, and makes the beam of assistant channel align the jamming directions. The sidelobe cancellation method with constant gain is used to perform the sidelobe cancellation. The simulation results prove the effectiveness and advantages of the proposed method.

**Key words** sidelobe cancellation; adaptive-adaptive sidelobe cancellation method; direction of arrival (DOA); beam forming

### 0 引言

随着电磁环境的日益恶化, 雷达接收信号中夹杂的干扰成分也日趋复杂。干扰信号的消除, 尤其是有源干扰信号的消除, 引起了广泛的重视。国内外学者提出了多种抗干扰算法, 主要包括超低旁瓣、旁瓣对消和旁瓣消隐等 3 类技术<sup>[1-3]</sup>。由于阵元耦合及复杂环境的影响, 超低副瓣技术在工程实现具有较大的难度, 且具有损失波束分辨率的缺点。通常而言, 干扰来自于若干个离散的方向, 旁瓣对消技术在这些干扰方向上对方向图调零, 就能达到有效的空间滤波效果。采用这种方式通常比实现超低副瓣天线容易得多。

对于大型阵列而言, 旁瓣对消算法是一种常用的抗干扰策略。该方法使用阵列中的少量阵元作为辅助通道, 其硬件复杂度要远远低于全阵自适应波束置零方法<sup>[4]</sup>。最初形式的旁瓣相消器由 Howells 提出<sup>[5]</sup>, Applebaum 对 Howells 的研究成果进行了推广<sup>[6]</sup>, 可在多个方向形成旁瓣零陷。根据权值的计算方式, 旁瓣对消算法主要可以分为两大类: 一类是非自适应旁瓣对消算法, 如 El-Azhary I 等人提出了基于均匀线阵的非自适应旁瓣对消算法<sup>[7]</sup>, 但

收稿日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61301009); 福建省自然科学基金计划资助项目(2013J01252); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120121120027)。

算法只能对一个旁瓣进行对消。Vendik O G、Sakhaei S M 和 Townsend J P<sup>[8-10]</sup> 等人提出了自适应旁瓣对消算法,可以通过添加更多的辅助阵元来对消更多的干扰。

本文研究面向星载通信系统应用的相控阵旁瓣对消技术。为减少通道数目、降低系统造价,该相控阵采用稀疏布局,且仅有少量通道为数字化通道。根据应用要求,主波束在  $\pm 8^\circ$  之间扫描,而干扰方向在  $\pm 15^\circ$  内,考虑干扰个数最多为 2 个。在传统旁瓣对消方法中,每个辅助通道均由一个单元天线组成,其优点是对不同方向的干扰具有稳定的对消性能。然而,在星载通信系统中,由于信噪比极低,采用这种方法会进一步恶化系统信噪比。为解决问题,可以采用子阵的方式形成辅助通道,即每个辅助通道由若干天线单元通过射频合成的子阵构成。与单元天线相比,射频子阵具有更高的增益、更窄的波束。因此,若子阵波束指向干扰方向或干扰方向附近,则最终可提高旁瓣对消输出的信噪比,反之,若子阵波束的副瓣或零点对准干扰,则会恶化输出信噪比。基于此,提出一种自适应—自适应旁瓣对消策略,该策略首先估计出干扰方向,并使辅助波束主波束指向干扰方向,降低对消时辅助通道所需的权值,提高对消输出的信噪比。仿真结果表明该方法在针对二维稀疏阵列干扰对消这个问题上性能要好于传统对消方法。

### 1 自适应旁瓣对消方法

自适应旁瓣对消结构示意图如图 1 所示。

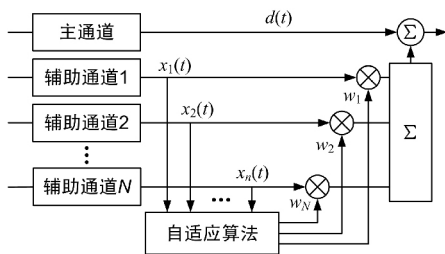


图 1 自适应旁瓣对消结构

自适应旁瓣对消基本原理是:从主天线旁瓣进入的信号和从辅助天线进入的干扰信号同时送入自适应处理器,再根据相应的算法计算最优权值  $W$ ,该权值让各辅助通道加权后的输出刚好对消掉主通道接收到的干扰,从而让系统输出为目标信号。

为消除辅助通道中目标信号的影响,目前应用较广的技术有基于阻塞矩阵的旁瓣对消技术、恒增

益旁瓣对消技术<sup>[11]</sup>以及基于特征空间的特征干扰相消器。当干扰方向与期望信号相差不大时,使用阻塞矩阵也不能达到满意的效果。经研究,采用恒增益旁瓣对消方法。其权值表达式为:

$$W = R_X^{-1} \left[ r_{Xd} - \frac{a_2^T(\theta_0) R_X^{-1} r_{Xd} a_2(\theta_0)}{a_2^T(\theta_0) R_X^{-1} a_2(\theta_0)} \right] \quad (1)$$

式中  $R_X$  为辅助天线的自相关矩阵;  $r_{Xd}$  为主天线与辅助天线的互相关矩阵;  $a_2(\theta_0)$  为辅助通道在期望信号方向的导向矢量。

阵列布局示意图如图 2 所示。采用  $N = 400$  元等激励均匀平面阵列为阵元,阵元间距为 2 倍波长。其中,灰色方形为主阵列阵元,黑色实心圆表示辅助阵元。16 个辅助阵元(如图 2 方框所示)分别构成辅助通道 1、2、3、4。

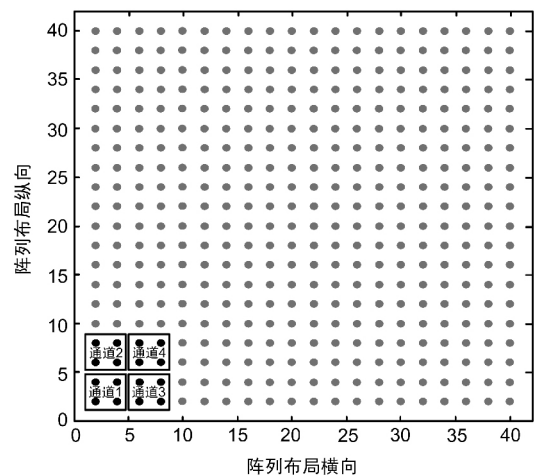


图 2 阵列布局

采用的平面阵列旁瓣对消结构示意图如图 3 所示。其工作过程为:所有阵元接收信号,辅助阵元通过射频加权构成辅助通道输出,主阵列阵元通过射频加权构成主通道输出,然后再根据相应的算法进行自适应旁瓣对消。下面将在该前提下对传统旁瓣对消方法进行仿真。

目标信号为线性调频信号,信号带宽为 2 MHz,信号脉宽为 5 ms,目标信号方向为  $(10^\circ, \rho^\circ)$ 。干扰为 2 个相互独立的高斯白噪声,其方向分别为  $(-2^\circ, \rho^\circ)$ 、 $(-15^\circ, \rho^\circ)$ ,干信比均为 40 dB。假定每个通道都存在高斯白噪声,且单个通道的信噪比为  $SNR = -20$  dB。采用恒增益旁瓣对消方法。对消前后阵列方向图比较(截取  $\varphi = 0$  平面)如图 4 所示。计算总阵列的系统输出信号信噪比为 0.16 dB。为确切知道辅助阵列波束的零点位置,放大图 4 的一部分得到图 5。由图 5 可知,辅助阵列波束的

零点位置接近其中一个干扰方向(  $-15^\circ$   $0^\circ$  ), 从而导致系统虽然能够在干扰方向形成零陷, 但是其方向图的副瓣抬升很大。如果辅助通道阵列波束对准某一干扰方向, 则系统不能在该干扰方向形成零陷。

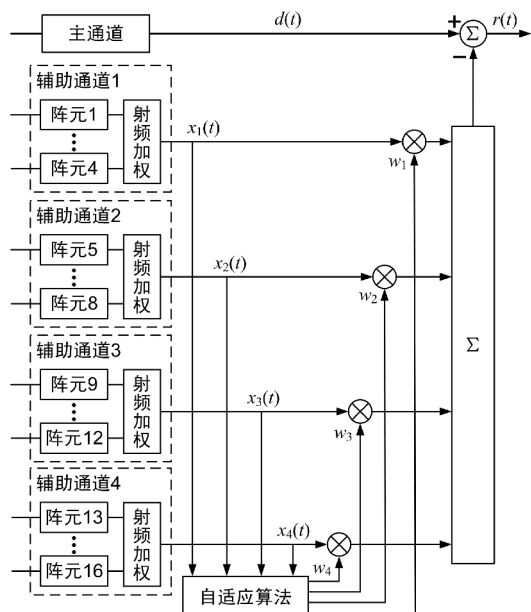


图3 平面阵列旁瓣对消结构

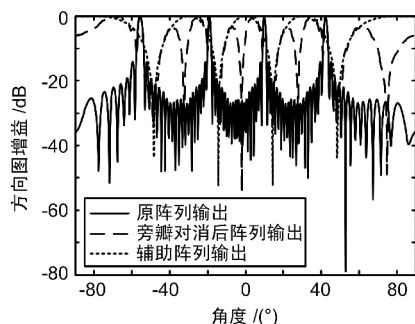


图4 仿真1的旁瓣对消前后阵列方向图比较

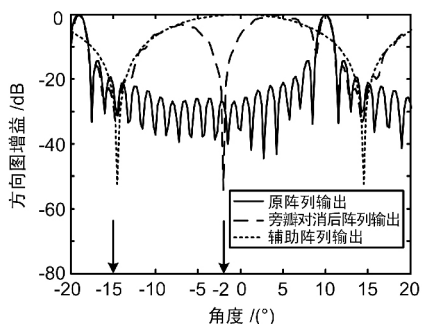


图5 仿真1结果部分放大图

需要指出的是, 若系统不进行旁瓣对消, 输出信号的信噪比为:

$$SNR_{out} = 10 \times \lg(N) + SNR = 6 \text{ dB}. \quad (2)$$

从仿真结果可知, 采用自适应旁瓣对消方法后,

尽管干扰被有效地对消掉, 但是由于辅助通道最大波束指向与干扰方向差别较大, 导致干扰对消后辅助通道的噪声被放大, 从而使得总阵列输出的噪声功率升高, 最终导致系统信噪比下降很多。在该仿真中, 信噪比下降了 5.86 dB。可见, 若不能在对消前估计干扰方向, 并使得辅助阵列波束方向对准干扰方向, 是不能有效提高对消输出信噪比的。

## 2 自适应—自适应旁瓣对消策略

### 2.1 自适应—自适应旁瓣对消策略基本步骤

针对传统方法的不足, 提出自适应—自适应旁瓣对消算法, 其结构示意图如图6所示。

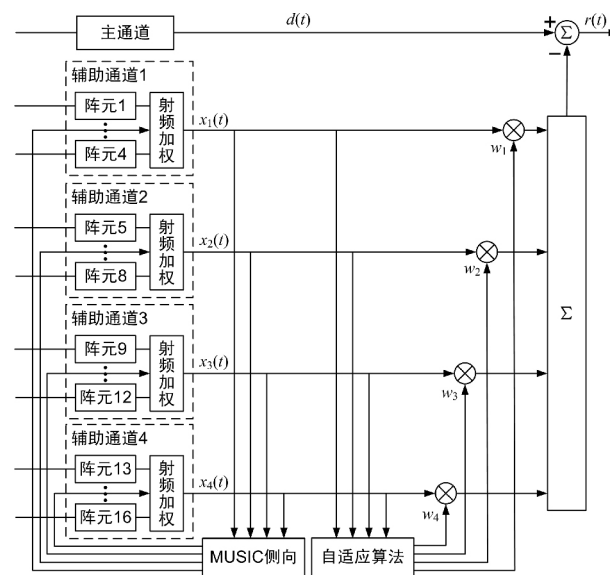


图6 自适应—自适应旁瓣对消结构

#### 2.1.1 干扰方向估计

干扰方向估计本质上是信号到达方向(DOA)估计的问题。利用阵列天线对DOA估计的方法包括最大似然法、熵谱分析和特征分解法等多种。由于基于特征分解的子空间算法多重信号分类算法(MUSIC)算法<sup>[12,13]</sup>具有高分辨率以及较好的鲁棒性能等特点逐渐成为DOA估计的主流算法。本文也采用MUSIC算法估计干扰方向。

MUSIC算法的谱估计公式为:

$$P_{MUSIC} = \frac{1}{a^H(\theta) U_N U_N^H a(\theta)}, \quad (3)$$

$P$ 的极大值方向则是干扰方向。式中,  $a(\theta)$ 为辅助阵列的导向矢量;  $U_N$ 为由阵列数据协方差矩阵特征分解后由小特征值张成的噪声子空间。

#### 2.1.2 波束形成

在估计出干扰方向之后, 自适应—自适应旁瓣

对消方法的关键技术之一是如何综合一个4元阵列,使其在干扰方向形成波峰。通过波束形成技术可以将各个阵元输出进行加权求和,将天线阵列波束导向到某几个方向上(即干扰信号方向),这样就可以解决在特定方向上形成波峰的问题。对比试验了最小方差无失真响应波束形成准则、线性约束最小方差波束形成准则和基于最大信噪比准则的波束形成这3个方法。其中基于最大信噪比准则的波束形成方法在本文问题上具有较好的性能。

采用基于最大信噪比准则的波束形成方法得到的权值表达式为:

$$W_{opt} = R_{i+n}^{-1} a(\theta_0) \quad (4)$$

式中,  $a(\theta_0)$  为辅助通道在期望信号方向的导向矢量;  $R_{i+n}$  为干扰噪声协方差矩阵。

### 2.1.3 射频加权

传统天线阵列综合大多是基于数字加权方法的。数字加权有着精度高的优势,但随着阵列规模的变大,数字加权会带来相当大的计算量,这势必导致系统工作效率降低,工程成本变高。随着射频技术的发展,于是自适应—自适应旁瓣对消策略尝试用射频加权取代数字加权方法,在有效保持系统性能的基础上,既能加快系统速度,又能尽量减少工程成本。

### 2.1.4 自适应—自适应旁瓣对消

首先采用 MUSIC 算法估计信号中干扰方向。然后采用基于最大信噪比准则的波束形成方法求得权值  $W_{opt}$  之后,使用射频加权方法将其加权在4个辅助通道之上,辅助通道的波束的峰值就能够指向估计出的干扰方向,从而实现与干扰环境的匹配。然后再采用恒增益旁瓣对消方法进行旁瓣对消。

### 2.2 自适应—自适应旁瓣对消策略仿真

上节介绍了自适应—自适应旁瓣对消结构以及算法流程。为显示将其与传统自适应旁瓣对消的效果进行对比,下面采用与仿真1相同的仿真条件对自适应—自适应旁瓣对消方法进行仿真。

辅助通道采用最优波束形成技术,4个通道分为A、B两组,每2个通道为一组。A、B两组分别对准一个干扰并分别在干扰方向形成峰值。利用 MUSIC 算法估计出的干扰方向3位谱峰图俯视图如图7所示,从图7中可以看出,在  $(-2^\circ, 10^\circ)$ 、 $(-15^\circ, 10^\circ)$  形成2个能量峰值,那么这2个方向则为判断出的干扰方向。由图8可知,辅助通道A在干扰方向  $(-2^\circ, 0^\circ)$  形成峰值,辅助通道B在干扰

方向  $(-15^\circ, 0^\circ)$  形成峰值。与干扰方向完全吻合,仿真表明辅助通道波束指向与干扰环境较好的实现了匹配。计算系统输出信号信噪比为 6.7 dB,而上文中提到传统旁瓣对消方法系统输出信号信噪比为 0.16 dB。比较图8和图4可知,采用自适应—自适应旁瓣对消方法,在副瓣保形能力以及输出信噪比上要优于传统自适应旁瓣对消方法。

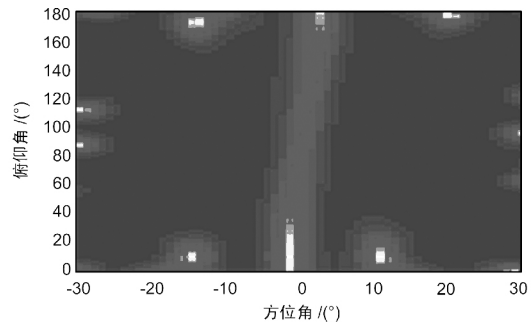


图7 干扰方向估计三维谱峰图俯视图

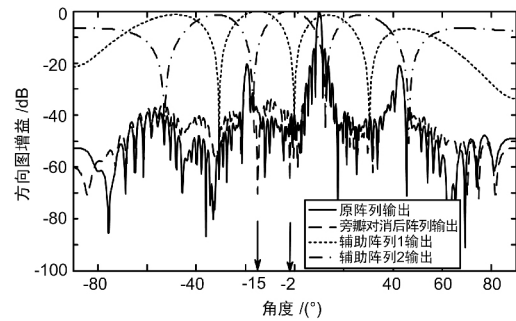


图8 仿真3旁瓣对消前后阵列方向图比较

## 3 结束语

针对传统自适应旁瓣对消方法在二维稀疏阵列应用中的不足,本文提出一种新的旁瓣对消方法——自适应—自适应旁瓣对消策略。该策略在传统方法的基础上,改用射频加权法代替数字加权法;增加了干扰方向估计以及辅助通道波束形成2步,从而实现辅助通道波束与干扰环境最大限度的匹配。从仿真结果可以看出,新方法相较于传统方法有3方面的优点:一是较高的输出信噪比;二是较强的副瓣保形能力;三是有效降低了工程成本。

本文系统采用4个辅助通道,在干扰方向已知的情况下,自适应—自适应旁瓣对消方法能对消4个干扰。如果干扰方向未知,辅助通道在估计干扰个数时将分成2组,此时只能对消2个干扰。如果能有更多的通道用以估计干扰方向,那么新方法能对消与辅助通道数目相同个数的干扰。

(下转第21页)

证据的冲突和不确定性,有效地提高了目标识别的准确率,作为一种信息分类技术,这对于解决干扰条件下多传感器目标融合识别问题提供了一种有效途径,将在信息融合和目标识别等领域有较好的应用前景。



## 参考文献

- [1] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [2] DAVID L H. An Introduction to Multi-sensor Fusion [C]//International Workshop on Data Fusion,2002:112-114.
- [3] 徐峰,张铃.基于商空间的非均匀粒度聚类分析[J].计算机工程,2005,31(3):26-28.
- [4] 杨春,李怀祖.一个证据推理模型及其在专家意见综合中的应用[J].系统工程理论与实践,2001(4):43-48.
- [5] 石闪闪.一种新的基于证据权重的D-S改进方法[J].科学技术与工程,2014,14(8):205-208.
- [6] 周大伟,叶清.基于互冲突量和自冲突量分析的证据聚类方法[J].火力与指挥控制,2011,36(6):39-41.
- [7] SMETS P,KENNES R. The Transferable Belief Model [J]. Artificial Intelligence,1994,66(2):191-234.
- [8] 朱卫未,王卫平,梁樑.基于模糊聚类分析的入侵检测方法[J].系统工程与电子技术,2006,28(3):474-477.
- [9] LAWRENCE A K. Sensor and Data Fusion Concepts and Applications [M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press,1999.
- [10] 徐丽,丁世飞.粒度聚类算法研究[J].计算机科学,2011,38(8):25-28.
- [11] 严晓兰.基于粗集理论证据加权的电子目标识别法[J].现代防御技术,2011,39(4):75-79.
- [12] 卜东波,白硕,李国杰.聚类/分类中的粒度原理[J].计算机学报,2002,25(8):810-816.
- [13] JOUSSELME A L,GRENIER D,BOSSE E. A New Distance Between Two Bodies of Evidence [J]. Information Fusion,2001,2(1):91-101.

## 作者简介

陈婷女(1982—),博士,讲师。主要研究方向:信号处理与模式识别。

郭凯男(1976—),博士,讲师。主要研究方向:无线通信和无人机工程。

(上接第4页)

## 参考文献

- [1] ZARIFI K. Collaborative Null-Steering Beamforming for Uniformly Distributed Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Trans on Signal Processing,2010,58(3):1889-1903.
- [2] 秦振华.用于雷达的自适应旁瓣对消器[J].无线电工程,1999,29(2):13-16.
- [3] 白渭雄,张文,苗森.旁瓣干扰对抗技术研究[J].系统工程与电子技术,2009,34(11):86-90.
- [4] PASANDI M,SISTO M M,DOUCET S. Low-Distortion Optical Null-Steering Beamformer for Radio-Over-Fiber OFDM Systems [J]. Lightwave Technology,2009,27(22):5173-5182.
- [5] HOWELESS P W. Intermediate Frequency Side-Lobe Canceller [P]. US Patent,3202990,1965.
- [6] APPLEBAUM S P. Adaptive Arrays with Main Beam Constraints [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation,1976,24(5):650-662.
- [7] EL-AZHARY I,AFIFI M S. A Simple Algorithm for Side-lobe Cancellation in a Partially Adaptive Linear Array [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation,1988,36(10):1482-1486.
- [8] VENDIK O G,KOZLOV D S. Phased Antenna Array with a Sidelobe Cancellation for Suppression of Jamming [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2012,11:648-650.
- [9] SAKHAEI S M. Optimum Beamforming for Sidelobe Reduction in Ultrasound Imaging [J]. IEEE Trans on Ferroelectrics and Frequency Control,2012,59(4):799-805.
- [10] TOWNSEND J P,DONOHUE K D. Stability Analysis for the Generalized Side Lobe Canceller [J]. Signal Processing Letters,2010,17(6):603-606.
- [11] 廖锟,刘颜回,王育强.恒增益对消技术[J].中国舰船研究,2014,9(2):101-105.
- [12] SCHMIDT R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Spectral Estimation [J]. IEEE Trans,1986,AP-34(3):276-280.
- [13] 闫锋刚,刘帅,金铭,等.基于MUSIC对称压缩谱的快速DOA估计[J].系统工程与电子技术,2012,34(11):2198-2202.

## 作者简介

刘颜回男(1983—),博士,副教授,博士生导师。主要研究方向:天线设计与阵列理论、阵列信号处理。

主持/参与了包括国家二代导航重大专项、国家自然科学基金、国防装备研制课题、研究所横向课题在内的多项科研项目。曾获电子科技大学优秀毕业生、四川省优秀博士学位论文。发表期刊和会议论文60篇,其中SCI/EI收录30余篇,共被Google Scholar引用289次。

廖锟男(1988—),硕士研究生,电磁场与微波技术专业。主要研究方向:阵列天线综合及阵列信号处理。