

# 汽车防刮蹭雷达中的 MIMO 反射波 到达角估计方法

彭章友 朱晶华 马晓颖 张钟浩

(上海大学特种光纤与光接入网省部共建教育部重点实验室 上海 200072)

**摘要:** 汽车防刮蹭雷达旨在避免与前方车辆发生刮蹭事故。系统通过估计前车反射波到达角来估算两车间横向距离。主要讨论 MIMO 反射波到达角估计方法,已有的算法大多以点目标为前提。汽车防刮蹭雷达中,目标的空间特性不能忽略,此时基于点目标假设的估计算法性能会严重恶化,故需要用分布式目标模型对前方车辆进行完整的描述。现有的分布式目标角度参数估计方法复杂度高,针对该问题,提出基于分布式目标模型的 Capon 波束形成估计算法。算法对反射波的中心角度以及角度扩展进行估计,并且假设前方车辆尾部宽度已知,估算出两车间横向距离。理论分析和仿真分析表明,算法有效地降低了复杂度,并具有良好的估计性能。

**关键词:** 汽车防刮蹭雷达; MIMO; 分布式目标; 角度参数估计

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Direction of arrival estimation method based on MIMO in automobile anti-scratch radar

Peng Zhangyou Zhu Jinghua Ma Xiaoying Zhang Zhonghao

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Automobile anti-scratch radar is designed to avoid scratches with the front car. The radar system estimates the cross range between two cars by estimating DOA of the wave reflected by front car. In our radar system, the front car is described by a distributed source model as algorithms based on the assumption of the point source model will seriously deteriorate. We propose an algorithm that estimates the central angle and angular extension of distributed sources in MIMO system unlike most existing algorithms which are on the assumption of point source model. Assuming that the car width is known, we are able to estimate the cross range between two cars. Theoretical analysis and computer simulation show that this method is not only effective but also has good estimation accuracy.

**Keywords:** automobile anti-scratch radar; MIMO; distributed source model; DOA

## 0 引言

随着人们生活水平的提高,汽车走进了千家万户,已经成为生活中重要的交通工具。汽车给人带来便利的同时,汽车安全事故也不断发生,威胁着人们的生命财产安全。汽车防撞雷达可以有效减少交通事故的发生,具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。随着微波集成电路技术的成熟,毫米波汽车雷达成为热门的研究领域,研究主要集中于雷达信号处理<sup>[2-3]</sup>,硬件实现<sup>[4-7]</sup>等方面。

在汽车防撞雷达的基础上,提出汽车防刮蹭雷达的概念。雷达系统通过估计前车反射波的到达角来计算两车间横向距离并判断前车是否存在刮蹭危险。

MIMO 雷达作为一种新体制雷达,受到广泛关注<sup>[8-10]</sup>。目前 MIMO 雷达研究主要集中于两种不同形式的系统,集中式 MIMO 雷达和分布式 MIMO 雷达。集中式 MIMO 雷达同时发射相互正交的信号,产生信号分集,在估计精度、抗干扰等方面优于传统的相控阵雷达。而分布式 MIMO 雷达,其收发天线间距较大,产生空间分集增益达到提高性能的效果。

在汽车防刮蹭雷达系统中,需要知道前车的形状和结构等信息,此时基于点目标模型的 MIMO 反射波到达角估计方法性能会严重恶化,故用分布式目标模型对前车进行更完整的描述<sup>[11]</sup>。根据反射波信号成分是否相干,分布式目标模型可分为相干分布式(CD)目标模型和非相干分布

式(ID)目标模型。本文研究基于集中式 MIMO 雷达的相干分布式目标到达角估计方法。

基于天线阵列的分布式目标角度估计算法已取得一定的研究成果。文献[12]在多重信号分类(MUSIC)算法的基础上,提出了分布式目标参数估计(DSPE)算法,该算法估计精度较高,然而为了估计中心到达角和扩展角度,要进行二维谱峰搜索,计算量较大。文献[13]将 ESPRIT 算法推广至分布式目标中,提出了总体最小二乘法旋转不变性(TLS-ESPRIT)算法。该算法利用接受阵列两子阵的旋转不变性,对中心到达角进行估计,进一步利用 DSPE 算法对扩展角度进行一维谱峰搜索。该算法在牺牲了一定的精度情况下,降低了计算量,但算法仍然需要进行协方差计算和特征值分解,故无法应用于实际系统中。为了降低算法复杂度,文献[14]提出了一种广义 ESPRIT 算法,该算法将相干分布式信源的广义导向矢量化简为点目标的导向矢量和实向量的积,推导出该矢量具有旋转不变性,再通过广义特征值分解得到目标的到达角信息。该方法无需进行二维谱峰搜索,一定程度地降低了复杂度。

上述研究成果均是在天线阵列中的分布式目标角度估计算法。基于 MIMO 雷达的分布式目标角度估计方法研究还有待深入,文献[15]研究了基于 MIMO 雷达的分布式目标角度估计的 Cramer-Rao 下界,指出 MIMO 雷达由于空间分集的作用,估计结果优于阵列雷达。文献[16]提出将广义 ESPRIT 算法推广至 MIMO 雷达系统,该算法虽然在避免了二维谱峰搜索,但需要进行多次特征值分解,计算量仍然较大。针对上述问题,本文提出基于分布式目标模型的 Capon 波束形成到达角估计算法。算法对 MIMO 反射波的中心角度以及角度扩展进行估计,并且假设前方车辆尾部宽度已知,计算出两车间横向距离。理论分析和仿真分析表明,算法有效地降低了复杂度,并具有良好的估计性能。

## 1 研究内容

### 1.1 分布式目标信号模型

本文研究基于单基地 MIMO 雷达的汽车防刮蹭系统,结构如图 1 所示。

图 1 中只画出单根天线接受信号的情况,并省略了发射天线阵列。发射天线和接受天线均采用均匀线阵,天线数分别为  $M$  和  $N$ ,天线间隔分为  $d_i$  和  $d_r$ ,各个发射天线发送相互正交的信号。单基地 MIMO 雷达中,中心波离方向和中心波达方向相同。在单目标情况下,目标后向散射信号主要由前车尾部产生,如图 1(b)所示。假设目标后向散射信号为  $L$  个多径信号,因此接受信号会产生角度扩展。阵列接收信号为:

$$y(t) = \beta \sum_{i=1}^L \mathbf{a}_r(\theta_0 + \theta_i) \mathbf{a}_t^T(\theta_0 + \theta_i) s(t) + N(t) \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为目标反射系数,假设  $\beta = 1$ ,  $\theta_0$  表示分布式目标中

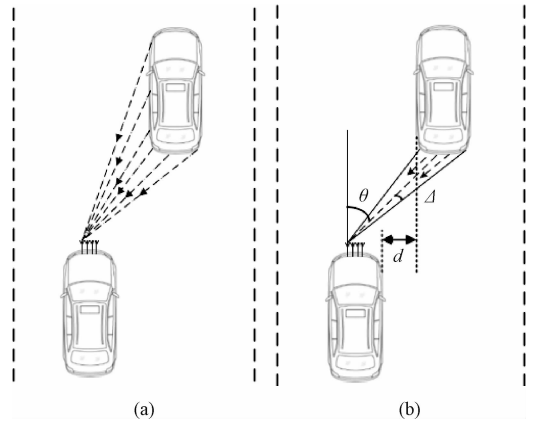


图 1 (a) 汽车反射波分布情况;  
(b) 汽车防刮蹭雷达系统结构

心波达方向,  $\theta_i$  表示第  $i$  个信号在空间上的角度偏移。  $N(t) \sim N^c(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_M)$  为高斯白噪声。  $s(t)$  为  $t$  时刻信号复振幅。  $\mathbf{a}_r(\theta)$  和  $\mathbf{a}_t(\theta)$  分别为发射导向矢量和接受导向矢量:

$$\mathbf{a}_r(\theta) = [1, e^{j\frac{2\pi d_r \sin \theta}{\lambda}}, \dots, e^{j\frac{(N-1)2\pi d_r \sin \theta}{\lambda}}]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_t(\theta) = [1, e^{j\frac{2\pi d_i \sin \theta}{\lambda}}, \dots, e^{j\frac{(M-1)2\pi d_i \sin \theta}{\lambda}}]^T \quad (3)$$

当  $L \rightarrow \infty$  时,对于相干分布式目标,接收信号可以用积分求和的形式表示为:

$$y(t) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mathbf{a}_r(\theta) \mathbf{a}_t^T(\theta) \mathbf{S}(t) g(\theta, \psi) d\theta + N(t) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{S}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$  为  $t$  时刻发射天线发射的正交信号。  $g(\theta, \psi)$  为确定性角信号分布函数。  $\psi = (\theta_0, \Delta)$ ,  $\Delta$  表示扩展角度,  $\theta_0$  表示中心到达角。

$$\text{令 } b(\psi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \mathbf{a}_r(\theta) \mathbf{a}_t^T(\theta) g(\theta, \psi) d\theta \quad (5)$$

$$\text{则 } y(t) = b(\psi) \mathbf{S}(t) + N(t) \quad (6)$$

### 1.2 匹配滤波

在接收端,对接收到的回波信号进行匹配滤波,由于发射信号相互正交,每一个接受阵列处有  $M$  个滤波器,每个滤波器与一个发射的信号相互匹配,如图 2 所示。

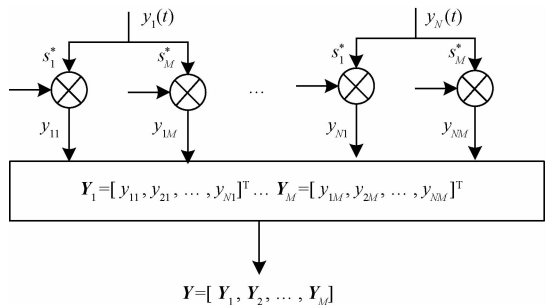


图 2 MIMO 雷达接受阵列匹配滤波

经过匹配滤波,输出数据为:

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_M] = y(t) \mathbf{S}^H(t) \quad (7)$$

对  $\mathbf{Y}$  矩阵向量化:

$$\begin{aligned} \text{vec}(\mathbf{Y}) &= \text{vec}(y(t)\mathbf{S}^H(t)) = \text{vec}([b(\psi)S(t) + \\ N(t)]\mathbf{S}^H(t)) &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [\mathbf{a}_r(\theta) \otimes \mathbf{a}_t^T(\theta)]g(\theta, \psi)d\theta + \\ \text{vec}(N(t)\mathbf{S}^H(t)) &= \mathbf{a}(\psi) + n \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\text{vec}(\cdot)$  代表矩阵矢量化操作,  $\mathbf{a}(\psi)$  为 MIMO 雷达的导向矢量,  $\otimes$  表示 Kronecher 积, 而矢量化的高斯白噪声  $n \sim N(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_N)$ 。

接受数据协方差矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= E(\text{vec}(\mathbf{Y})\text{vec}^H(\mathbf{Y})) = \mathbf{a}(\psi)\mathbf{a}^H(\psi) + \sigma_n^2 \mathbf{I}_{N \times N} = \\ \mathbf{U}_s \sum_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_N \sum_N \mathbf{U}_N^H \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{U}_s$  为信号子空间,  $\mathbf{U}_N$  为噪声子空间。

## 2 基于 MIMO 雷达的分布式目标角度估计方法

### 2.1 DSPE 算法

DSPE 算法是经典 MUSIC 算法从点目标模型推广到分布式目标的一种常用方法。可估计相干分布式目标的中心到达角以及扩展角度。算法根据信号子空间和噪声子空间的正交性, 对两个参数进行二维谱峰搜索。DSPE 谱峰搜索函数:

$$P(\psi) = \frac{1}{\|\mathbf{a}^H(\psi)\mathbf{U}_n\|^2} \quad (10)$$

考虑到 DSPE 算法复杂度较高, 本文将基于点目标模型的 Capon 波束形成算法推广至分布式目标模型。算法有效地降低了复杂度, 并具有良好的估计性能。

### 2.2 基于点目标模型的 Capon 波束形成

Capon 波束形成算法应用于点目标模型, 并且具有良好的估计性能。Capon 算法通过选择适当的参数, 保证在期望方向上的信号可以被正确接收的同时, 将非期望方向上的信号完全抑制。即在期望方向的信号输出为常数的约束下, 使阵列的输出能量最小。

$$\begin{cases} \min \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_r(\theta) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{R}$  表示接收信号的相关矩阵,  $\boldsymbol{\omega}$  表示加权向量。式(11)是约束最优化问题, 利用拉格朗日乘法, 目标函数为:

$$L(\boldsymbol{\omega}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\omega} - \mu (\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_r(\theta) - 1) \quad (12)$$

由式(12)得:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}} = \mu \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_r(\theta) \quad (13)$$

由于  $\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{a}_r(\theta) = 1$ , 所以有:

$$\mu = \frac{1}{\mathbf{a}_r^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_r(\theta)} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_r(\theta)}{\mathbf{a}_r^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_r(\theta)} \quad (15)$$

对于任意角度  $\theta$ , Capon 波束形成算法的输出表达式为:

$$P_{\text{capon}}(\theta) = \boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}^H(\theta) \mathbf{R} \boldsymbol{\omega}_{\text{opt}}(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}_r^H(\theta) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}_r(\theta)} \quad (16)$$

式(10)表明当有信号从  $\theta_i$  方向到达接受天线阵列时,

$P_{\text{capon}}(\theta)$  函数会在  $\theta = \theta_i$  处取得最大值。

### 2.3 基于分布式目标的 Capon 波束形成

对于分布式目标角度估计问题, 上述方法需要做相应的改动。将式(8)的约束条件进行改变:

$$\begin{cases} \min \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R}_s(\psi) \boldsymbol{\omega} = 1 \end{cases} \quad (17)$$

其中:

$$\mathbf{R}_s(\psi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} a(\theta) p(\theta, \psi) \mathbf{a}^H(\theta) d\theta \quad (18)$$

$$\mathbf{a}(\theta) = \mathbf{a}_r(\theta) \otimes \mathbf{a}_t^T(\theta) \quad (19)$$

式中:  $p(\theta, \psi)$  为目标的角度功率密度。利用拉格朗日函数, 目标函数为:

$$L(\boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\omega} - \lambda (\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R}_s(\psi) \boldsymbol{\omega} - 1) \quad (20)$$

对  $\boldsymbol{\omega}^H$  求导, 可得:

$$\mathbf{R} \boldsymbol{\omega} = \lambda \mathbf{R}_s(\psi) \boldsymbol{\omega} \quad (21)$$

拉格朗日乘子  $\lambda$  是矩阵  $[\mathbf{R}, \mathbf{R}_s(\psi)]$  的广义特征值。上式两边同时左乘  $\boldsymbol{\omega}^H$ , 再利用约束条件  $\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R}_s(\psi) \boldsymbol{\omega} = 1$ , 可得  $\lambda = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\omega}$ 。因此当满足约束条件  $\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R}_s(\psi) \boldsymbol{\omega} = 1$  时,  $\min \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R} \boldsymbol{\omega}$  就是矩阵  $[\mathbf{R}, \mathbf{R}_s(\psi)]$  最小广义特征值。再由式(21), 可得:

$$P_{\text{capon}}(\theta, \psi) = \frac{1}{\sigma_{\max}(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{R}_s(\theta, \psi))} \quad (22)$$

式中:  $\sigma_{\max}(\cdot)$  为矩阵的最大特征值。此时在二维空间上根据  $P_{\text{capon}}(\theta, \psi)$  的峰值对中心波达方向以及扩展角度进行估计。

Capon 算法相比于 DSPE 算法减少了接收信号特征值特分解过程。该部分的计算量为  $O(MN(MN+q)^2)$ , 其中  $q$  为目标个数。所以算法复杂度降低。

### 2.4 横向距离计算方法

汽车防刮蹭雷达是通过估算两车间横向距离以实现防刮蹭目的的雷达系统。本文提出一种计算两车间横向距离的方法, 如图 3 所示。

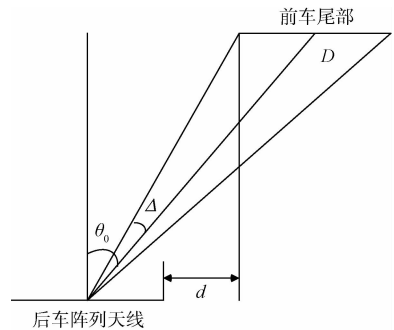


图 3 横向距离计算示意图

如图 3 所示, 车辆宽度作为先验信息记作  $D$ , 根据 2.3 节 Capon 算法可估计前方车辆反射波的中心到达角  $\theta_0$ , 角

度扩展  $\Delta$ 。此时可计算两车间横向距离  $d$  和两车间径向距离  $h$ ：

$$d = \frac{\tan(\theta_0 - \Delta)D}{\tan(\theta_0 + \Delta) - \tan(\theta_0 - \Delta)} - \frac{D}{2} \quad (23)$$

$$h = \frac{D}{\tan(\theta_0 + \Delta) - \tan(\theta_0 - \Delta)} \quad (24)$$

### 3 仿真分析

本文考虑单目标情况,对上述两种算法进行仿真对比。收发端由8天线的均匀线阵组成,假设分布式目标的每条多径信号分量之和服从方差为  $\Delta^2$ ,均值为  $\theta_0$  的高斯分布。中心角度为  $20^\circ$ ,扩展角度  $2^\circ$ 。信噪比为 10 dB,快拍数 1024。仿真结果如图 4、5 所示。

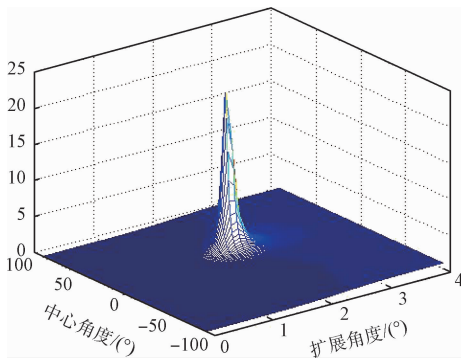


图4 DSPE 算法仿真结果

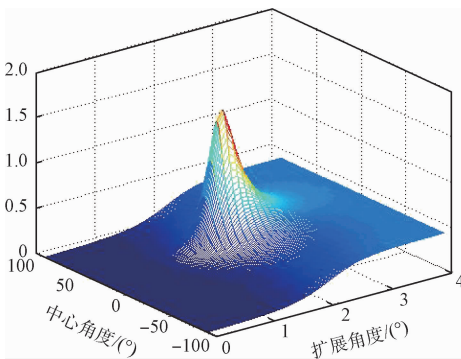


图5 Capon 算法仿真结果

图 4、5 中, DSPE 算法可以准确估算目标的中心角度和扩展角度,而 Capon 算法估计精确较低。然而从图 6、7 的仿真结果来看,Capon 算法估计性能趋近于 DSPE 算法。在满足性能要求的同时降低了算法的复杂度。

### 4 结论

本文首先指出了汽车防刮蹭系统中,为了更全面的描述前方目标,需要将其当作分布式目标处理,并给出了 MIMO 雷达中的分布式目标信号模型。在此基础上,估计其中心波达方向和扩展角度。在汽车防刮蹭系统中,实时

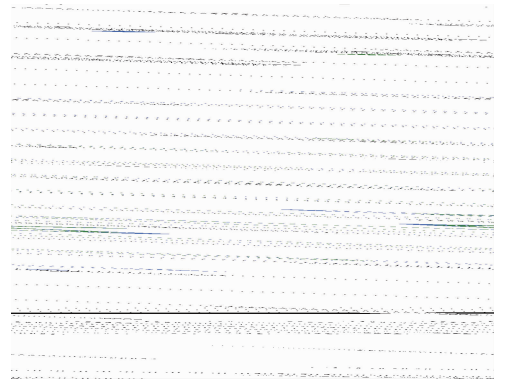


图6 扩展角度估计性能对比

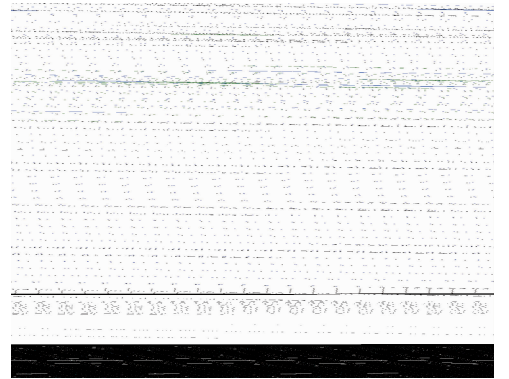


图7 中心角度估计性能对比

性是一个非常重要的指标,本文针对现有的分布式目标参数估计算法计算量较大的问题,将应用于点目标模型的 Capon 波束形成算法推广至分布式目标模型。理论分析和仿真结果表明,该方法在牺牲了一定精度的情况下,降低了计算量。对今后的研究具有一定的意义。

### 参考文献

- [1] 韩峻峰,张惠敏,潘盛辉,等. 汽车防撞雷达概述[J]. 广西科技大学学报,2011,22(4):54-58.
- [2] LUO Z. Research on automobile intelligent anti-collision system[C]. Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, IEEE, 2011: 4309-4312.
- [3] 陆兴华. 基于回波探测的汽车防撞系统智能测距方法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6): 126-129.
- [4] SUN S,WANG Y. A low cost K-band FMCW radar system for automobile application [C]. IEEE International Conference on Communication Problem-Solving, 2014: 157-160.
- [5] 帅盼,张海宁,白福,等. 基于超声波测距的汽车倒车避障系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(10):54-57.

- [6] 于卫东,涂亚庆,詹启东,等.基于改进 Rife 算法的 LFM CW 雷达测距方法及实现[J].电子测量与仪器学报,2015,29(4):550-557.
- [7] 任明秋,严革新,朱勇,等.复杂电磁环境下雷达抗干扰性能测试方法研究[J].仪器仪表学报,2016,37(6):1277-1282.
- [8] 陈浩文,黎湘,庄钊文.一种新兴的雷达体制--MIMO 雷达[J].电子学报,2012,40(6):1190-1198.
- [9] WANG Y,ZHANG Z,CHEN J,et al. Analysis of the estimation of doa for the mimo radar[J]. Electronic Science & Technology, 2010, 23(3):76-80.
- [10] ZHENG G M. Unitary ESPRIT algorithm for bistatic MIMO radar[J]. Electronics Letters, 2012, 48(3): 179-181.
- [11] NAGY L, SZALAY Z. Radar target as distributed source for DOA estimation[C]. European Conference on Antennas and Propagation, IEEE, 2014: 2323-2327.
- [14] ZHANG Y, WANG X. A new ESPRIT algorithm for coherently distributed source DOA estimation [C]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2007: 1-4.
- [15] 江胜利,刘中,邓海.基于 MIMO 雷达的相干分布式目标参数估计 Cramer-Rao 下界[J].电子学报,2009,37(1):101-107.
- [16] GUO Y D, ZHANG Y S, TONG N. Central angle estimation of coherently distributed targets for bistatic mimo radar[J]. Electronics Letters, 2011, 47(7): 462-463.

## 作者简介

**彭章友**,教授,博士生导师,主要研究方向为通信信号处理、毫米波通信技术等。

**朱晶华**,硕士研究生,主要研究方向为汽车防撞雷达技术、雷达信号处理。

E-mail:18717803668@163.com

**马晓颖**,硕士研究生,主要研究方向为汽车防撞雷达技术、MIMO 雷达。

**张钟浩**,讲师,主要研究方向为雷达信号处理。