

基于阵列信号融合的路面平整度检测原理研究

王建锋¹, 宋宏勋¹, 马荣贵²

(1 长安大学 陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究中心, 陕西 西安 710064;

2 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 提出了一种基于阵列信号分析原理的激光路面平整度检测方法. 利用阵列信号处理方法, 将路面信号转化为阵列信号源个数的估计; 将激光检测系统相对于路面的运动转化为阵列信号波达方向的估计; 将多传感器检测数据共同信息的提取转化为阵列信号中多信号权向量的加权处理; 利用最佳权向量重构出路面断面形状. 实验证明此方法简单实用, 可以为路面平整度检测设备的改良提供一种全新且好用的方法.

关键词: 阵列信号; 平整度; 最佳权向量; DOA 估计; 激光位移传感器

中图分类号: TP319

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2012)10-0069-05

Road Roughness Detection Method Based on Array Signals Processing

WANG Jian-feng¹, SONG Hong-xun¹, MA Rong-gui²

(1 Road traffic intelligent detection and engineering technology research center of shaanxi, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2 School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A road roughness detection method based on array signals processing is proposed. Firstly, translate road signal to the number estimation of array source number using the method of array signal processing. Secondly, translate the movement of the laser detection system relative to the road surface to the DOA estimation of array signals. Thirdly, translate the information extraction of multiple sensor common detection data to the weighted processing of array signals. Finally, reconstructed pavement section shape using the optimal weight vector. Contrastive experiments show that the method is simple and practical. This method provides a new and useful method for the improvement of pavement roughness measurement based on inertial reference.

Key words: array signals processing; roughness; optimally weight vector; DOA estimation; laser displacement

1 引言

道路路面平整度反应路面的凹凸不平或高程变化, 是路面的一种客观存在, 它直接影响行驶车辆的动力特性、行驶质量和路面所受的动载^[1-2]. 对路面平整度的研究无论是在路面养护还是在路面-车辆相互作用等研究方面都具有重要的意义, 路面平整度的精确、快速测量成为了工程界研究的重点^[3-4].

目前, 国内外主要采用基于惯性基准的激光检测方法测量路面平整度, 该方法是在测试车车身上安置竖向加速度传感器测量检测车的竖直加速度

值, 对加速度进行两次积分获得惯性参考系下的车身振动量, 然后通过激光位移传感器测量车身同路表面之间的距离, 两者相结合得到路面纵断面高程^[5-6], 然后根据高程来计算路面平整度的评价指标, 该方法最大的缺点是检测速度不能低于 20km/h^[7]. 长安大学提出了基于基准传递的路面平整度检测方法, 并把基于该方法开发的检测系统应用到了工程实践中; 该方法最大的优点是能够实现 0~120km/h 的全速检测, 解决了惯性基准不能低速检测的难题, 但是该方法的计算处理比较复杂.

本文在采用基准传递原理测量路面平整度方法

收稿日期: 2012-03-04; 修回日期: 2012-04-05

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2006AA110116); 陕西自然科学基金项目(SJ08E215); 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2011JC147); 国家西部交通建设科技项目(200431881213)

的基准上,提出了利用阵列信号处理方法来检测路面平整度的方法;重点分析了基于阵列信号测量路面平整度的具体实现方法,并通过实验对其方法进行了验证^[8].

2 基于阵列信号的平整度检测原理

本文在基准传递原理的基础上,利用阵列信号处理的方法来计算路面的平整度,其检测原理如图1所示.

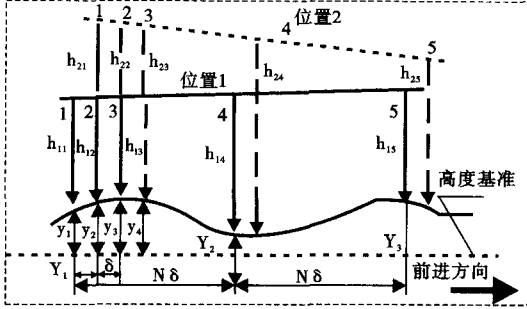


图1 阵列信号路面平整度检测原理

把刚性检测梁安装到检测车上,检测梁与路面之间的距离控制在传感器的测量范围内,同时在刚性检测梁的1、2、3、4、5五个位置处分别安装一个激光位移传感器.图1中激光位移传感器1和2,2和3之间各间隔为 δ 长度,激光位移传感器1和4,4和5之间各间隔为 L 长度.刚性检测梁沿前进方向移动,检测梁上的5个激光位移传感器同时测得路面相对高程值.

本文采用的基于阵列信号融合处理的平整度检测的原理是对检测得到的5路激光位移传感器信号进行处理分析,计算出阵列信号的最佳权向量,重构出路面的相对高程值,完成路面平整度的检测.

3 阵列信号处理理论及其应用

基于阵列信号处理的路面平整度检测方法是在在刚性检测梁上纵向布置多个激光位移传感器进行信号采集.把这些传感器作为传感器阵列,采用阵列信号处理方法来计算路面的平整度信息.

阵列处理的基本思路是先对检测梁上安装的多个传感器的采集信号进行信源估计处理,判断传感器的阵列信号是否都是由路面激励产生,否则需要对检测系统的布置方式进行适当的调整,直到信号源个数为1为止.然后对检测过程中的传感器阵列进行波达方向估计,利用估计得到的波达方向计算阵列的最佳权向量.最后利用最佳权向量对采集信

号进行处理,获得路面的相对高程值,以实现路面平整度的检测.以下说明具体的实现过程:

3.1 信号源个数估计

为了验证传感器阵列信号来源于路面,需要对检测系统的传感器阵列的信号源个数进行估计.信号源个数估计是通过对方差的特征值分解来实现的,具体方法如式(1)所示:

$$\begin{aligned}\hat{R}_0 &\approx \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_0(k) X_0^H(k) \\ &= \sum_{i=1}^M \hat{\lambda}_i \hat{V}_i \hat{V}_i^H\end{aligned}\quad (1)$$

如果能否得到平整度检测系统的协方差矩阵,就可以利用小特征值相等来估计信号源的个数.但由于实际应用的复杂性,很难获得真正的协方差矩阵,只能获得协方差的估计值.通常阵列的协方差矩阵的特征 $\hat{\lambda}_i, i=P+1, P+2, \dots, M$ 值互不相等,实际应用中主要采用AIC准则和MDL准则来实现阵列信号源个数的估计^[9].这两个准则定义如下:

$$\begin{aligned}AIC &= \min_{\hat{p}} \{2N(M-\hat{p}) \lg[L(\hat{\lambda}_{\hat{p}+1}, \\ &\hat{\lambda}_{\hat{p}+2}, \dots, \hat{\lambda}_M)] + \hat{p}(2M-\hat{p})\}\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}MDI &= \\ \min_{\hat{p}} \{N(M-\hat{p}) \lg[L(\hat{\lambda}_{\hat{p}+1}, \hat{\lambda}_{\hat{p}+2}, \dots, \hat{\lambda}_M)] + \\ \frac{1}{2} \hat{p}(2M-\hat{p}) \lg N\}\end{aligned}\quad (3)$$

$L(\hat{\lambda}_{\hat{p}+1}, \hat{\lambda}_{\hat{p}+2}, \dots, \hat{\lambda}_M)$ 是AIC和MDL准则中的似然函数,可以通过式(4)计算得到:

$$L(\hat{\lambda}_{\hat{p}+1}, \hat{\lambda}_{\hat{p}+2}, \dots, \hat{\lambda}_M) = \frac{1}{M-\hat{p}} \sum_{i=\hat{p}+1}^M \hat{\lambda}_i \quad (4)$$

$$\left(\prod_{i=\hat{p}+1}^M \hat{\lambda}_i \right)^{\frac{1}{M-\hat{p}}}$$

从式(2)、(3)可知,以上两个准则的相同之处是各自的似然函数相同,不同之处是罚函数有所不同.其估计过程是通过对阵列信号的协方差进行特征值 $\hat{\lambda}_i, i=1, 2, \dots, M$ 分解来实现的.但协方差的估计矩阵是较难获得的,文献[10]给出了在不知道协方差估计矩阵和特征值时进行信号源格式估计的方法.在不知道协方差估计矩阵和特征值时,可以通过式(5)来计算这两个准则的似然函数.

$$L(\hat{\sigma}_{d_{\hat{p}+1}}^2, \hat{\sigma}_{d_{\hat{p}+2}}^2, \dots, \hat{\sigma}_{d_M}^2) = \frac{1}{M-\hat{p}} \sum_{i=\hat{p}+1}^M \hat{\sigma}_{d_i}^2 \quad (5)$$

$$\left(\prod_{i=\hat{p}+1}^M \hat{\sigma}_{d_i}^2 \right)^{\frac{1}{M-\hat{p}}}$$

式(5)中的 $N \rightarrow \infty$ 时,式(6)按概率1成立.

$$L(\hat{\sigma}_{d_{\hat{p}+1}}^2, \hat{\sigma}_{d_{\hat{p}+2}}^2, \dots, \hat{\sigma}_{d_M}^2) = L(\hat{\lambda}_{\hat{p}+1}, \hat{\lambda}_{\hat{p}+2}, \dots, \hat{\lambda}_M) \quad (6)$$

式(6)中 $\hat{D}_M$ 是矩阵 D_M 的估计矩阵, $\hat{\sigma}_{d_i}^2$ 是 $\hat{D}_M$ 第 i 个主对角线上的元素。

由式(2)~(6)可知 $\hat{\sigma}_{d_i}^2$ 是 $\hat{p}$ 的函数,通过式(2)、(3)计算 AIC 和 MDL 的最小值,信号源的个数由准则最小时的 $\hat{p}$ 决定。

由于实际路面平整度检测过程中检测车和传感器的相互作用较复杂,因此必须保证传感器阵列所采集的信号都是来自唯一的信号源——路面。因此需要对平整度检测系统的阵列信号进行信号源个数估计。

平整度检测系统传感器阵列信号源估计的具体方法是:在检测梁上的同一平面中安装 5 个激光位移传感器并且使其组成一个线性的阵列,这种布置方式保证 5 个传感器组成一个线性阵列。然后对传感器阵列所采集的信号进行信号源个数估计。如果估计个数不为 1,就需要对检测系统进行改进,直到信号源的估计值是一为止。

所开发的路面平整度检测系统中安装在检测梁上的 5 个激光位移传感器不是等间隔的,为了处理方便常采用等间隔的阵列进行处理。为了处理方便,最好使线性阵列中各个传感器的间隔相等。因此由图 1 可知,本文所采用的传感器阵列分为两类,一类由传感器 1、4、5 组成,一类由传感器 1、2、3 组成。

分别对这两种阵列进行了试验验证,试验中选择的路面是长安大学测试中心东侧的一段水泥路面,该路面的长度大约为 80m。在试验过程,传感器的采样步长为 0.25m,对采集的阵列信号进行信号源个数估计。

第一类传感器阵列的特征值为:

$$\lambda_1 = 2.7920 \times 10^7, \lambda_2 = 0.0007 \times 10^7, \lambda_3 = 0.0002 \times 10^7$$

第二类传感器阵列的特征值为:

$$\lambda_1 = 2.8126 \times 10^7, \lambda_2 = 0.0004 \times 10^7, \lambda_3 = 0.0001 \times 10^7$$

由特征值计算结果可知,以上两类的传感器阵列信号的特征值满足 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 。所以,路面平整度检测系统的数据都来自路面这唯一的一个信号源。

3.2 信号源 DOA 估计理论及其实现

由信号源个数估计试验证实,路面平整度检测系统的传感器阵列采集的数据都来自地面。如果能够得到传感器阵列信号的最佳权向量,就能够从阵

列信号中重构出路面相对高程信息。而最佳权向量的计算是以信号源的来波方向 DOA 估计为前提。对来波方向进行估计的思路如下:对阵列信号接收方向的增益进行调整,使阵列信号在某个方向上的输出功率最大,那么这个方向就是需要计算的来波方向。

目前,在阵列信号 DOA 估计研究方面取得了较多的成果,DOA 估计方法也比较多。使用最多的有最大熵线性预测法(MEM/LP)、最小范数法(MNMF)、最小方差不失真响应法(MVDR)和多重信号分类法(MUSIC)法^[11-12]。由于 MUSIC 法能够实现互不相干窄带信号 DOA 的渐近无偏估计,当阵列中传感器个数比信号源个数多并且信号源独立时, MUSIC 法的来波估计分辨率和效率都比较高,所以本文采用此方法来实现阵列信号的 DOA 估计。

MUSIC 方法是把采集到的阵列信号分为信号和噪声两部分,通过计算阵列信号的协方差来实现信号和噪声的分离。由于信号和噪声的方向向量正交,所以通过寻找与噪声空间正交的向量阵列,就能够实现阵列信号来波的 DOA 估计,以下简述其算法过程:

设信号阵列用 $x(k)$ 表示,那么信号阵列的协方差表示为 $R = E\{x(k)x^H(k)\}$ 。将其进行特征值分解,设分解后的特征值为: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \geq \lambda_{N+1} = \dots = \lambda_M \geq \sigma^2$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 表示较大的特征值,其余为较小的特征值。设较大的特征值对应的特征向量为 $e_1, e_2, \dots, e_N$, 较小的特征对应的特征向量为 $e_{N+1}, e_{N+2}, \dots, e_M$ 。由于大特征值对应有用信号,小特征值对应噪声,所以可以通过信号和噪声矢量的正交来计算信号的 MUSIC 谱,以此来进行阵列信号的 DOA 估计。本文通过式(7)来计算阵列信号的 MUSIC 谱。

$$P_{\text{MUSIC}}(\alpha, \beta) = \frac{1}{\alpha^H(\alpha, \beta) e_m e_m^H \alpha(\alpha, \beta)} \quad (7)$$

其中: $e_m = [e_{N-1}, e_{N-2}, \dots, e_M]$ 。

理论上 MUSIC 谱中信号方向上的峰值为无穷大,因此只要找到谱线中峰值所对应的 θ_i ($i=1, 2, \dots, N$) 值,也就估计出了阵列信号的波达方向。

由于实际的平整度检测时阵列信号中通常具有有色高斯噪声,为了在实际检测状态下能够获得精确的 DOA 估计值,在实际使用中利用阵列信号的高阶累积量来计算 MUSIC 谱。具体的过程是先计算出传感器阵列数据的高阶累积量,然后从累积量

的 MUSIC 谱中计算出阵列信号的来波方向角。

对试验路面进行两种阵列信号的信源 DOA 估计,得到波达角为: $\theta_{DOA1} = -35.6467$, $\theta_{DOA2} = -38.4261$ 。

获得了平整度检测阵列检测系统的波达方向,然后利用波达方向计算最佳权向量,由最佳权向量就可以计算路面的高程。

3.3 波束形成最佳权向量理论及其应用

波束形成的基本思想是对阵列信号中的由信号源产生的信号进行加强,对由干扰源产生的信号进行抑制处理,从而从阵列信号中重构出信号源信号^[13-14]。具体的实现方法为:对传感器阵列采集的信号进行加权求和,使阵列信号在同一时刻在信号源方向上的输出功率最大。以下具体分析如何正确计算阵列信号的加权系数,获得加权系数也就获得了最佳权向量。

设 $x(n)$ 是传感器阵列的采集值, $\omega = [\omega_1, \dots, \omega_M]^T$ 为阵列信号的加权向量,那么传感器阵列的有用信号为 $y(n) = \omega^H x(n)$ 。设阵列信号中的有用信号 $d(t)$ 的波达方向为 θ_d ; $i_j(t)$ 是噪声信号 $i_j(t)$, $j=1, \dots, J$ 的 DOA 方向。在分析中,假设阵列中的传感器的信号为具有相同方差 σ_s^2 的白噪声 $n_k(t)$ 。那么阵列中第 k 传感器上采集到的信号为:

$$x_k = a_k(\theta_d)d(t) + \sum_{j=1}^J a_k(\theta_{i_j})i_j(t) + n_k(t) \quad (8)$$

式中,等号右边的第一项是用信号,第二项是干扰信号,第三项是噪声。也可以表示为如式(9)所示的连续形式

$$x(t) = a(\theta_d)d(t) + \sum_{j=1}^J a(\theta_{i_j})i_j(t) + n(t) \quad (9)$$

式中, $\theta_k (k=d, i_1, i_2 \dots)$ 为波达方向; $[a_1(\theta_k), \dots, a_M(\theta_k)]^T$ 为信号源在 θ_k 上方向向量。利用波束算法计算获得的传感器阵列信号的输出为 $y(t) = \omega^H x(t) (t=1, \dots, N)$, 输出的平均功率表示为:

$$p(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |\omega^H x(t)|^2 \quad (10)$$

为了处理简单,对式(10)定义了一些边界条件,如不考虑信号源之间的交叉项并且认为信号源噪声的方程都为 σ^2 。当 $N \rightarrow \infty$ 时,式(10)简化为:

$$p(\omega) = E\{|dt|^2\} |\omega^H a(\theta_d)|^2 + \sum_{j=1}^J \{ |i_j(t)|^2 \} |\omega^H a(\theta_{i_j})|^2 + \sigma^2 \|\omega\|^2 \quad (11)$$

为了增大自信号源方向 θ_d 上的信号的输出功率,并且让其他方向上的功率最小,即让干扰信号置零。因此,对式(11)设置如式(12)所示的约束条件。

$$\begin{cases} \omega^H a(\theta_d) = 1 \\ \omega^H a(\theta_{i_j}) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

经过约束处理,信号的平均功率为:

$$p(\omega) = E\{|dt|^2\} + \sigma^2 \|\omega\|^2 \quad (13)$$

把式(13)中的干扰全部置 0 并不是最佳的方法,因为这不利于提高信号的信噪比。因此本文采用误差均方值最小原则,利用 lagrange 算子法计算向量 ω , 以下简述其具体算法过程:

$$\min_{\omega} E\{|y(t)|^2\} = \min_{\omega} E\{\omega^H \hat{R} \omega\}$$

目标函数为:

$$L(\omega) = \omega^H \hat{R} \omega + \lambda [\omega^H a(\theta_d) - 1]$$

对 $L(\omega)$ 求偏导数:

$$\frac{\partial L(\omega)}{\partial \omega} = 2R\omega + \lambda a(\theta_d)$$

令 $\frac{\partial L(\omega)}{\partial \omega} = 0$, 就可以计算出自方向 θ_d 上信号

的最佳向量为:

$$\omega_{opt} = \mu R^{-1} a(\theta_d) \quad (14)$$

μ 可以通过式(15)实现^[15-16]; θ_d 是阵列信号中信号源的波达方法。

$$\mu = \frac{1}{a^H(\theta_d) R^{-1} a(\theta_d)} \quad (15)$$

利用上述方法就看计算出传感器阵列的最佳权向量。利用最佳权向量对传感器阵列信号加权求和,就能从阵列信号中分离出完全由地面这个唯一信号源激励的信号。通过路面实际试验,得出本文所采用的两种传感器布置方式的最佳权向量分别为:

$$f_1 = [0.4642 \ 0.4188 \ 0.2045]^T$$

$$f_2 = [0.4375 \ 0.3759 \ 0.2146]^T$$

利用最佳权向量对检测梁上安装的传感器阵列信号进行加权计算,就可以计算路面的相对高程值。具体的试验结果图 2 和图 3 所示。图中虚线表示的是基于阵列信号融合方向计算得到的路面相对纵断面 IRI 曲线。实线表示的是通过水平仪检测得到的路面相对纵断面和 IRI 曲线。

由图 2 可知,采用基于阵列信号处理方法获得的路面断面值和用水准仪测量的路面断面相差较小,完全能够实现路面纵断面的检测。

由图 3 可知,以阵列信号融合获得的断面值为基础计算的国际平整度指数 IRI 和以水准仪测量的断面值为基础计算的国际平整度指数 IRI 也相差较小。

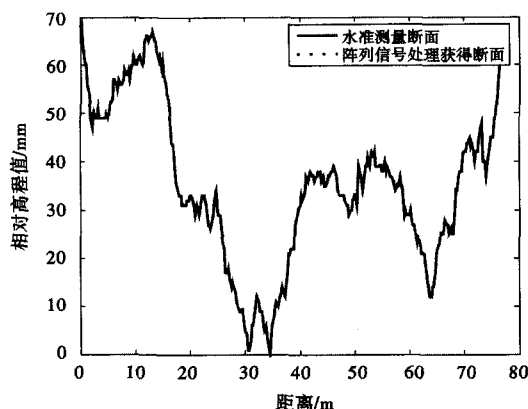


图2 阵列信号融合与水准仪检测结果对比图

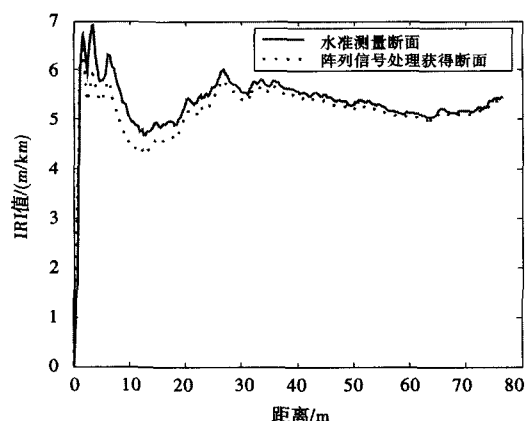


图3 阵列信号融合与水准仪检测 IRI 对比图

4 结束语

通过对阵列信号融合方法和水准仪检测方法的对比结果分析可知,本文采用的基于阵列信号的路面平整度检测方法在路面平整度检测中是可行的。并且该方法简单实用,此方法可以为基于基准传递原理的路面平整度检测设备的改良提供一种全新且好用的方法。

参考文献:

- [1] Papagiannakis A T, Raveendran B. International standards organization compatible index for pavement roughness[J]. Transport ation Research Record, 1998 (1643): 1102-1115.
- [2] 周晓青,孙立军,颜利.路面平整度评价发展及趋势[J].公路交通科技,2005,22(10):18-22.
- [3] 唐光武,贺学锋,颜永福.路面不平度的数学模型及计算机模拟研究[J].中国公路学报,2000,13(1):114-117.
- [4] 张明,叶巧玲,冯晓.路面平整度检测技术现状与发展[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2007,26(4):122-126.
- [5] 刘云,钱振冻.路面平整度及车辆振动模型的研究综述[J].公路交通科技,2008,25(1):51-57.
- [6] 宋一凡,陈榕峰.基于路面不平整度的车辆振动响应分析方法[J].交通运输工程学报,2007,7(4):39-43.
- [7] 王建锋,马建,马荣贵.动位移的加速度精确测量技术研究[J].计算机科学,2010,37(12):201-207.
- [8] 王建锋.激光路面三维检测专用车技术与理论研究[D].西安:长安大学,2010.
- [9] Schwartz G. Estimation the dimension of a model[J]. Ann. Stat,1978(6):461-464.
- [10] 黄磊,吴顺君,张林让,等.快速子空间分解方法及其维数的快速估计[J].电子学报,2005,33(6):977-981.
- [11] Honig M L, Goldstein J S. Adaptive reduced-rank interference suppression based on the multistage wiener filter [J], IEEE Trans. Communications, 2002,5(6): 986-994.
- [12] Zoltowski M D, Joham M, Chowdhury S. Recent advances in reduced-rank adaptive filtering with application to high-speed wireless communications [C] // Proc. of SPIE 2001. West Lafayette, 2001.
- [13] Salim Kayhan A, Moeness G Amin. spatial evolutionary spectrum for DOA estimation and blind signal separation [J]. IEEE transactions on Signal Processing, 2000(48): 791-798.
- [14] Monika Agrawal, Surendra Prasad. Broadband DOA estimation using "spatial-only" modeling of array data [J]. IEEE transactions on Signal Processing, 2000 (48): 663-670.
- [15] John David Hiemstra. Robust implementations of the multistage wiener filter [D]. Barllan Vniversity: Department of Electrical and Computer Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [16] Hien N Nguyen. Robust steering vector mismatch techniques for reduced rank adaptive array signal processing [J]. IEEE 13th annual Wireless and Microwave Technology. Wamicon, Australia, 2012: 1178-1183.

作者简介:

王建锋 男,(1984—),讲师,博士.研究方向为道路交通检测及车载仪器开发。

宋宏勋 男,(1959—),男,教授.研究方向为光学检测及汽车电子等。

马荣贵 男,(1967—),男,教授.研究为智能测控技术等。