

高频返回散射回波到达角探测技术研究

张成峰,王世凯,华彩成,李 强

(中国电波传播研究所,山东青岛 266107)

摘 要: 根据返回散射电离层回波特性,提出了基于 Capon 波束形成、对角加载以及加窗技术的返回散射回波 DOA (Direction Of Arrival) 估计的方法. 利用“L”型短波二维天线接收阵列实现了返回散射电离层回波到达角的探测,获得频率-群路径-回波仰角电离图,收发站的直达波信号和准垂测信号的 DOA 估计结果验证了探测系统的准确性.

关键词: 返回散射探测; 空间谱估计; 对角加载; 仰角

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)09-1868-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.09.027

Research on DOA of HF Backscatter Sounding

ZHANG Cheng-feng, WANG Shi-kai, HUA Cai-cheng, LI Qiang

(China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China)

Abstract: According to the ionospheric backscatter echoes characteristics, a method of DOA (Direction Of Arrival) estimation based on Capon beamforming, diagonal loading and windowing technology is proposed. The arrival angle of backscatter echoes is obtained by using the “L” type short wave two-dimensional receiving array. The frequency-group-elevation ionogram is obtained. The accuracy of the backscatter system is verified by the DOA estimation of direct wave and quasi-vertical signals.

Key words: HF backscatter sounding; spatial spectral estimation; diagonal loading; elevation

1 引言

高频天波返回散射探测作为重要的电离层探测手段,能够实现大区域空间上电离层的连续监测,获取的返回散射扫频电离图显示了探测频率-群路径-回波能量三者之间的关系^[1,2]. 返回散射探测可以获取电离层信道散射函数,从而得到信道的多径时延散布和多谱勒展宽,为海态监测、短波数字通信提供依据^[3-6]. 然而传统的返回散射探测技术只有探测频率-群路径-回波能量信息,通常存在如传播模式不易确定,信道参数不足等一些问题,而含方向信息的返回散射探测技术可以获得每一个频率回波的方位角和仰角信息,可大大提高电离层传播模式识别和电离层参数反演的准确性,为短波应用系统实时提供更大范围内准确可靠的工作参数,从而为大区域短波传播特性研究及应用提供条件^[7-8].

中国电波传播研究所从上世纪 60 年代起开始返回散射探测的研制工作,在系统开发、电离图处理及信息提取、电子浓度反演、海杂波分析及海态反演等方面均开展了大量的研究. 近年在河南新乡建立了“L”型接收天线阵列的电离层返回散射探测试验平台,该试验平

台为收发异地,发射系统和接收系统分别位于新乡洪门和新乡原阳县,发射站相对接收站北偏东 8.1 度,两站相距 30.2km. 发射系统由 4 部 10kW 短波固态宽带发射机,4 单元短波对数周期天线阵列组成;接收系统由 40 路接收机及 40 单元垂直偶极子接收天线阵组成,南北方向与东西方向各 20 接收阵元,构成“L”型阵列,阵元间距为 6.8m.

本文基于前述“L”型二维短波天线阵列,给出了回波到达角的空间谱估计算法,得到指定频率和距离门的来波方向,并利用准垂测对到达角估计准确性进行了验证,最终可以获得传统返回散射扫频电离图、频率-群路径-回波方位电离图以及频率-群路径-回波仰角电离图.

2 阵列信号模型及 DOA 估计

2.1 “L”型天线阵列信号模型

“L”型天线阵由 x 轴方向的天线阵与 y 轴方向的天线阵组成,阵元总数为 M . 假设有 P 个窄带远场信号 $s_k(t)$, 中心波长为 λ , 方位角为 θ_k , 俯仰角为 φ_k , 其中 $k = 1, \dots, P$. 阵列接收信号示意图如图 1 所示. 阵列的输出向量为:

$$\mathbf{X}(t) = \sum_{k=1}^P \mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k) s_k(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k)$ 是 (θ_k, φ_k) 方向的理想导向矢量, $\mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k) = [1, e^{-j2\pi d_{z,k}/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi d_{M,k}/\lambda}]^T$, $d_{M,k}$ 为第 M 个天线单元到目标 $s_k(t)$ 的距离与参考原点到目标 $s_k(t)$ 的距离的差值; $\mathbf{n}(t)$ 是加性噪声向量. 可用矩阵重新表示为

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

其中, \mathbf{A} 的第 k 列为 $\mathbf{a}(\theta_k, \varphi_k)$, $\mathbf{S}(t)$ 的第 k 个元素为 $s_k(t)$.

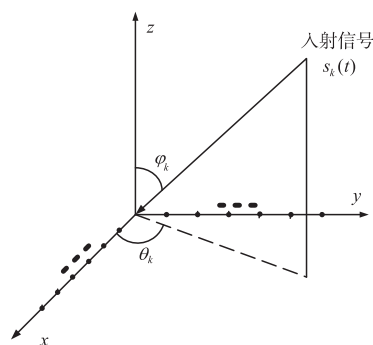


图1 “L”型天线阵列布局及信号接收示意图

2.2 Capon 算法

空间谱估计测向是一种以多元天线阵结合现代数字信号处理为基础的测向技术,常称为 DOA 估计. 空间谱估计算法已有很多,包括基于波束形成的 CBF 法与 Capon 法、基于子空间分解的超分辨算法、以及最具代表性的多重信号分类算法 MUSIC 和旋转不变信号子空间算法 ESPRIT 等^[9,10]. 其中 Capon 法能够突破瑞利限,工程实现较简单,且谱峰直接反映信号强度,因此本文基于该方法进行 DOA 估计.

Capon 算法使噪声以及来自非信源方向的干扰所贡献的功率最小,但又能保持信源方向上信号功率不变. 该算法表述如下:

最小方差无失真准则是在保证对期望信号 $\mathbf{a}(\theta_0)$ 的增益为常数的条件下,使输出总功率最小,即

$$\begin{cases} \min \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} \\ \text{s. t. } \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_0) = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{a}(\theta_0)$ 为期望信号方向, $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{X}^H(t)]$ 为 $\mathbf{X}(t)$ 的协方差矩阵,用拉格朗日乘子法解式(3),得到

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (4)$$

因此可以得到输出功率

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)} \quad (5)$$

协方差矩阵由式(6)估计得到

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mathbf{X}(t_i) \mathbf{X}^H(t_i) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{X}(t_i)$ 表示 t_i 时刻采样数据, K 是距离门个数.

2.3 返回散射回波 DOA 估计

返回散射电离层回波组成比较复杂,不但存在多模,也存在模式模糊. 因此不同频率不同距离门的来波方向都需要进行 DOA 估计.

为了减少其他距离门信号的影响, K 值越小越好,但是如果 K 太小,则对噪声的估计不充分,造成噪声协方差矩阵的特征值分散,相应产生随机形状的噪声特征波束,从而引起自适应波束畸变使得副瓣电平升高. 因此,选取待测点以及待测点左右一段数据为一个处理单元用来求协方差矩阵. 由于引入了其它距离门的数据,会对待测距离门的 DOA 结果产生影响. 本文通过将该单元的数据与高斯窗进行相乘的方法减少其它距离门信号的影响,同时采取了对角加载的方法进一步克服采样快拍数较少所带来的波形失真.

对角加载采用以下协方差矩阵代替采样协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}}_{\text{di}} = \hat{\mathbf{R}} + \lambda_{\text{di}} \mathbf{I} \quad (7)$$

式中: $\hat{\mathbf{R}}_{\text{di}}$ 是对角加载后的协方差矩阵, \mathbf{I} 为单位阵, λ_{di} 为对角加载值.

对角加载是一种有效的稳健波束形成方法,但加载值的大小影响自适应处理的效果. 加载值太小,不能有效控制自适应波束的副瓣高度,加载值过大,又会影响对干扰的抑制,降低干扰抑制灵敏度. 对于加载数值大小的确定问题,很多文献中都有所讨论^[11,12],本文采用的对角加载量为 $10\sigma_n^2$, σ_n^2 为噪声功率.

根据以上分析,返回散射电离层回波到达角估计的具体步骤如下:

(1) 选取一个处理单元 $[x_1, \dots, x_{K/2}, x_d, x_{K/2+1}, \dots, x_K]$, 与高斯窗 W 进行点乘. 其中 x_d 为待测距离门对应的数据, K 为距离门的个数;

(2) 估计噪声功率 σ_n^2 , 令 $\lambda_{\text{di}} = 10\sigma_n^2$, 求对角加载后的协方差矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_{\text{di}} = \hat{\mathbf{R}} + \lambda_{\text{di}} \mathbf{I}$;

(3) 在方位和仰角二维方向上以一定步进求出各方向的输出功率

$$P_{\text{out}} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_0) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_0)};$$

(4) 在输出的二维功率谱上进行峰值搜索,找到最大峰值点,该点对应的方向即为测向结果,记录该点的能量、方位与仰角信息;

(5) 按上述步骤遍历所有频点和距离门,即可得到频率-群路径-回波能量图,频率-群路径-回波方位图与频率-群路径-回波仰角图.

图2为对应返回散射电离层回波到达角估计的处理流程图.

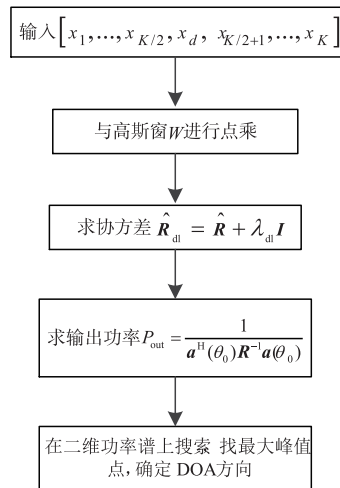


图2 返回散射电离层回波到达角估计流程图

测向精度是衡量测向性能一个重要指标,测向精度越高,DOA 估计结果就越精确.影响测向精度的因素有很多,例如工作频率、信噪比、快拍数、入射角度、阵列本身的特性等.本文重点关注测向精度随频率的变化,因此仅对其它条件固定,只改变工作频率的情况进行仿真.仿真条件如下:

(1)“L”型阵列(南北与东西方向 20 天线阵元,阵元间距为 6.8m);

(2)来波方向(方位 70° ,仰角 30°),方位维与仰角维步进均为 0.001° ;

(3)信噪比为 10dB;

(4)频率范围 3~30MHz,步进 1MHz.

每个频率做 500 次蒙特卡洛仿真取其均方根误差得到的仿真结果如图 3 所示.由空间谱理论知同等条件下天线等效孔径越大,频率越高,则测向精度越高.在本文仿真的来波方向上,阵列孔径在方位维的投影大于仰角维的投影,即方位维的天线等效孔径大于仰角维的天线等效孔径.由图 3 可知,测向均方根误差随频率的增大而减小,仰角的均方根误差大于方位角的均方根误差,仿真结果与空间谱理论相符.

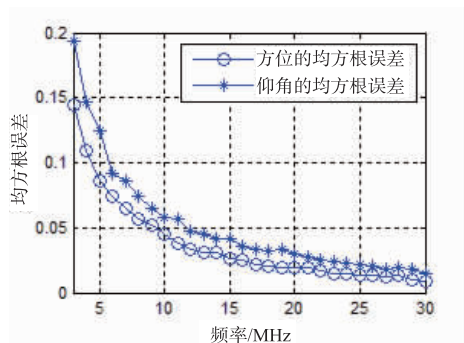


图3 仰角和方位角测向精度与频率的关系

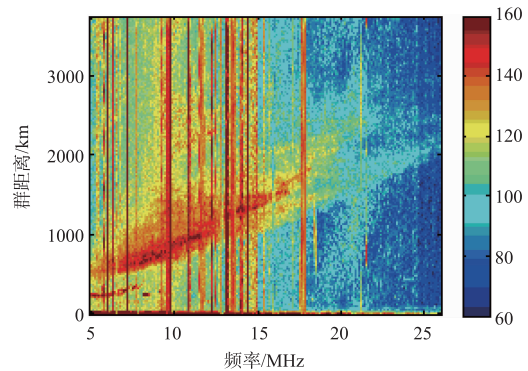


图4 频率-群路径-回波能量图

3 实测数据分析

本次试验时发射方向指向正东,功率为 40kW.图 4 为传统的返回散射电离图,即频率-群路径-回波能量图,由图可知,除了返回散射回波信号外,在 500km 以下还有准垂测信号及直达波信号.

3.1 试验平台 DOA 估计准确性验证

直达波为发射设备辐射的信号通过地波传播被接收设备接收的信号,其具有信号能量稳定、传播模式单一、方向稳定的特点,可以用于验证试验系统的 DOA 估计结果是否正确.设置方位角扫描范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,仰角范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,步进均为 1° ,对各个频点的直达波信号进行 DOA 估计.图 5 为各频点直达波方位维测向结果,可见结果主要集中在 $8^\circ \sim 11^\circ$,偏离该范围的频点为干扰信号.图 6 为各频点直达波仰角维测向结果,可见结果基本全是 0° ,偏离该范围的频点为干扰信号.为了进一步验证仰角准确性,选取具有准垂测回波的频点进行仰角测向.图 7 为对 6.028MHz 的准垂测信号进行仰角测量的结果,测得仰角值为 86° .根据收发站距离为 30km,准垂测信号的反射虚高为 210km,利用等效虚高定理,可得仰角为 85.9° ,与测量结果相符.通过上述分析可知,试验平台 DOA 结果与理论值相符.

3.2 返回散射信号 DOA 结果分析

试验时发射方向指向正东,根据返回散射传播理论以及天线方向图,返回信号的仰角集中在低仰角,方位集中在东部,因此设置方位扫描范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,仰角扫描范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$;根据波束宽度设置方位步进为 0.5° ,仰角步进为 0.5° ,在此范围进行 DOA 估计.

图 8 为频率-群路径-回波方位图,由图 8 可知,返回散射回波方位主要集中在 $70^\circ \sim 140^\circ$ 范围,不同传播模式的回波方位也不同.图 9 为频率-群路径-回波仰角图,由图 9 可知,返回散射回波仰角主要集中在 $10^\circ \sim 40^\circ$ 范围,不同模式回波仰角也不同.选取频率为 14.228MHz,群距离为 1340km 的数据进行详细分析,图 10 为该点在方位和仰角二维方向上的回波能量,可见不同来波方

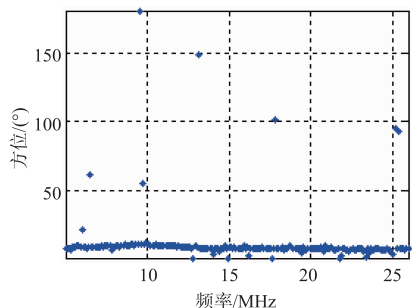


图5 各频点直达波方位维测向结果

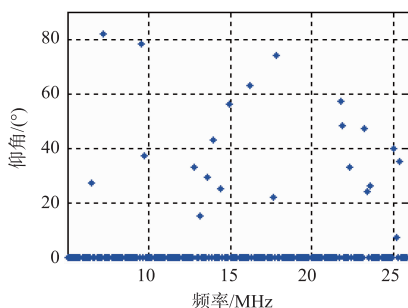


图6 各频点直达波仰角维测向结果

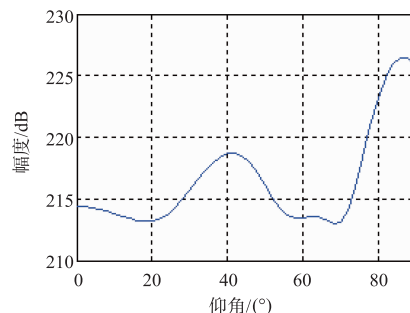


图7 频率为6.028MHz的准垂直测信号仰角维回波能量

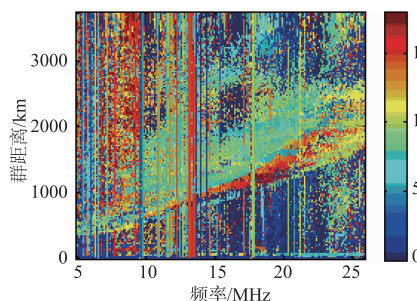


图8 频率-群路径-回波方位图

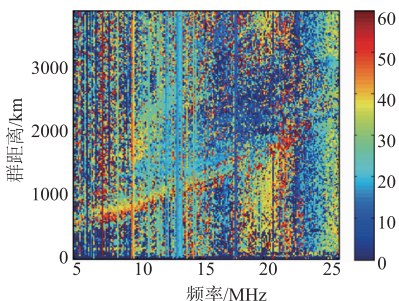


图9 频率-群路径-回波仰角图

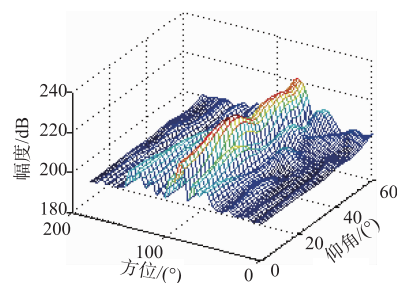


图10 方向-仰角维的回波能量

向的回波能量差异明显,其中最大峰值点对应的方位角为 82.5° ,仰角为 24.5° .图 11 为最大峰值点在方向维的回波能量,峰值下降 3dB 时波束宽度为 6.5° .图 12 为对应的理论仿真结果,峰值下降 3dB 时波束宽度为 3.5° .图 13 为最大峰值点在仰角维的回波能量,峰值下降 3dB 时波束宽度为 12.5° .图 14 为对应的理论仿真

结果,峰值下降 3dB 时波束宽度为 8° .该结果一方面说明了实际的 DOA 估计与理论值相符,另一方面也说明了由于电离层对电波传播的影响,导致实际测量的 3dB 波束宽度出现了扩展,第三方面仰角维的 3dB 波束宽度比方位维宽,这是由于仰角维的阵列等效孔径小于方位维的阵列等效孔径所引起的.

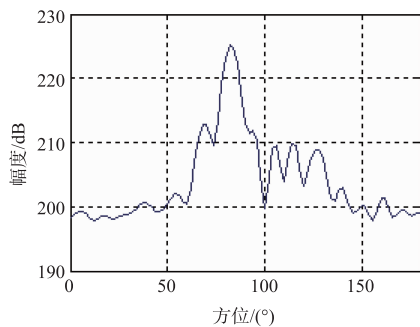


图11 方向维的回波能量 (实测)

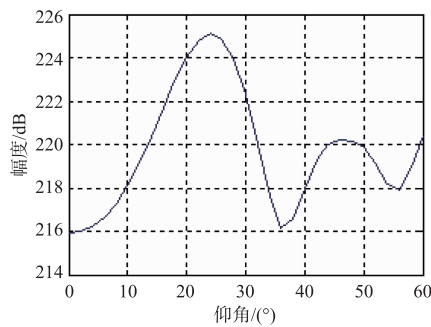


图13 仰角维的回波能量 (实测)

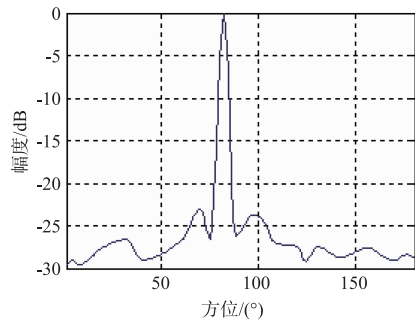


图12 方向维的回波能量 (仿真)

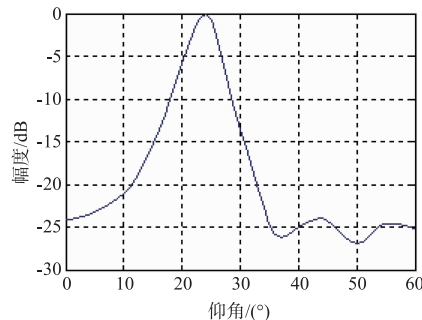


图14 仰角维的回波能量 (仿真)

4 结论

高频天波返回散射探测是电离层诊断的一种重要手段. 本文在通常的探测频率-群路径-回波能量探测方法基础上, 利用“L”型二维短波天线阵列, 根据返回散射电离层回波特性, 提出了基于 Capon 波束形成、对角加载以及加窗技术的返回散射回波空间谱 DOA 估计的方法, 给出了高频天波返回散射回波到达角, 并利用收发站形成的准垂测信号的 DOA 估计结果验证了本方法的有效性. 该方法获得频率-群路径-回波方位电离图、频率-群路径-回波仰角电离图, 为返回散射回波信息提取以及高精度电离层电子浓度反演提供了数据基础.

参考文献

- [1] 焦培南, 张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [2] G F Earl, B D Ward. The frequency management system of the Jindalee over-the-horizon backscatter HF radar[J]. Radio Science, 1987, 22(2): 275 - 291.
- [3] 孙广俊, 齐东玉, 李铁成. 利用返回散射系统监测海洋回波[J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1334 - 1337.
SUN Guang-jun, QI Dong-yu, LI Tie-cheng. Sea echo detection with the system of ionospheric backscatter sounding[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1334 - 1337. (in Chinese)
- [4] 冯静, 倪彬彬. 利用高频天波返回散射反演电离层水平不均匀结构[J]. 地球物理学报, 2016, 59(9): 3135 - 3147.
FENG Jing, NI Bin-Bin. Reconstruction of horizontally-inhomogeneous ionospheric structure using HF sky-wave backscatter ionograms[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(9): 3135 - 3147. (in Chinese)
- [5] 娄鹏, 王世凯, 凡俊梅, 焦培南. 利用高频返回散射技术探测电离层行波扰动[J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1900 - 1903.
LOU Peng, WANG Shi-kai, FAN Jun-mei, JIAO Pei-nan. The detection of traveling ionospheric disturbances by high-frequency backscatter sounding technique[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(9): 1900 - 1903. (in Chinese)
- [6] R J Norman. Mapping the ionosphere using a HF radar backscatter inversion technique[J]. Radio Science, 1997, 32(2): 387 - 396.
- [7] COLEMAN C J. On the simulation of backscatter ionograms[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1997, 59(19): 2089 - 2099.
- [8] E Benito. Inversion of backscatter ionograms optimization by using simulated annealing and genetic algorithms[A]. 2008. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Boston, MA: IEEE, III-1127 - III-1130.
- [9] E Benito. Inversion of HF backscatter ionograms using elevation scans[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70(15): 1935 - 1948.
- [10] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 万群. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [11] Jian, Stoics Petre, Wang Zhi song. On robust capon beamforming and diagonal loading[J]. IEEE Signal Processing, 2003, 51(7): 1702 - 1715
- [12] 刘聪锋, 廖桂生. 最差性能最优通用信号模型稳健波束形成算法[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1249 - 125.
LIU Cong-feng, LIAO Gui-sheng. Robust beam-forming algorithm for general signal models using worst-case performance optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1249 - 125.

作者简介



张成峰 男, 1982 年生, 山东人, 现为中国电波传播研究所高级工程师, 主要研究方向为空间谱估计、雷达信号处理.
E-mail: zhangcf2002cn@126.com



王世凯 (通信作者) 男, 1979 年生, 河北人, 现为中国电波传播研究所研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电离层电波传播及工程应用等.