

高频雷达电台干扰抑制的稳健最小二乘方法

李 雷, 许荣庆, 李高鹏, 刘 源

(哈尔滨工业大学电子工程技术研究所, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 为对抗工作环境下的非平稳短波电台干扰, 本文基于对偶极化的高频地波超视距雷达接收系统提出了新的稳健最小二乘抗干扰算法, 改善高频雷达目标检测的性能. 该方法基于凸空间最优化的思想, 修正水平极化辅助天线接收数据, 设定最大的环境误差范围, 保证在最差误差环境下的最优干扰抑制性能. 通过转换该凸最优的约束方程为简单的一维搜索, 提出了最优加权系数的有效求解方法. 实验数据处理结果表明了方法的有效性.

关键词: 高频雷达; 干扰抑制; 稳健最小二乘; 凸最优

中图分类号: TN956 93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12-2288-05

Robust Least Squares Method for Interference Cancellation in High Frequency Surface Wave Radar

LI Lei, XU Rong-qing, LI Gao-peng, LIU Yuan

(Research Institute of Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: In order to counter the non stationary short wave radio interference and improve the performance of target detection, a robust least squares interference cancellation algorithm based on the dual polar receiver was proposed for high frequency surface wave radar. Based on the idea of convex optimization, we modify the sample of horizontal auxiliary channel, and get the best performance of interference rejection in the worst case error circumstance under the limit of maximum error bound. Converting the convex optimization question to simple one dimension search, we get the effective method to settle the optimal weight coefficient. The experimental result shows that the proposed method is very effective.

Key words: HF radar; interference rejection; robust least squares; convex optimization

1 引言

由于工作在短波频段低端, 高频雷达经常受到工作在相同频带的短波电台干扰. 特别是在夜间, 电离层可以传播远距离电台信号进入雷达接收机^[1], 大量的电台干扰使得系统根本无法选出一个相对“寂静”的频率以供高频雷达正常工作. 图1分别画出了被条状和面状干扰污染后的雷达回波距离速度二维变换后的功率谱, 从中可以发现, 干扰抬高了雷达检测背景的基底, 淹没了期望的目标, 增加了检测的复杂度, 为了更好的检测目标, 人们提出各种干扰抑制技术来提高信干噪比(SINR), 改善检测背景^[2~4].

空域自适应波束形成技术被首先提出来对消进入接收机的电台干扰, 然而, 由于算法本身的缺陷, 空域自适应波束形成不能够用来对抗主瓣干扰, 在抑制主瓣干扰的同时目标响应显著降低, 以至于对消掉目标, 形成漏警. 同时复杂的电磁环境下自适应产生出的波束加权系数, 必然导致方向图恶劣的主旁瓣特性, 极大的影响了后续的测角跟踪等工作, 这就对

雷达抗干扰系统提出了新的要求. 考虑到高频雷达特殊的工作环境, 进入接收机的目标和海浪回波信号是垂直极化的, 而干扰经电离层反射后体现为椭圆极化的特性, 因此基于水平天线的旁瓣对消抗干扰算法应运而生^[5~7].

然而, 实际高频雷达工作背景中, 由于电离层的起伏引起的电台干扰表现为非平稳特性, 海浪与目标回波的非理想垂直极化, 同时水平与垂直极化天线的特性不能做到完全理想, 这都造成辅助水平极化天线中包含部分的海杂波与目标回波. 主辅通道干扰相关性有较大的降低, 严重的影响了传统旁瓣对消方法的有效性.

非平稳环境下的最优干扰抑制可认为是一种在不确定误差环境下的最优化问题, 而大部分的不确定误差环境下最优问题又可转化为凸空间最优化问题, 罚函数“内部点”算法的提出, 使凸最优化问题求解成为可能, 因此, 利用凸最优方法求解成为干扰抑制问题的一个新的研究方向^[8]. 从空域波束形成的角度上来看, 最差误差环境下最优的方法成为近期研究的热点. Vornoboyov等人通过修正期望信号的导向矢量和接

收矩阵, 解决存在导向误差和接收误差情况下干扰抑制性能下降的问题^[9, 10], Lorenz 等人的最小方差波束形成方法^[11], 以及 Stonic 的稳健 Capon 波束形成及其扩展方法^[12]也都是基于上述思想. 这一系列方法的共同点在于: 计算导向矢量存在着的的不确定的误差, 并直接把该不确定因素放入约束方程^[13]. 稳健波束形成方法应用于高频雷达非平稳干扰抑制已得到一定的研究, 效果良好^[14-16].

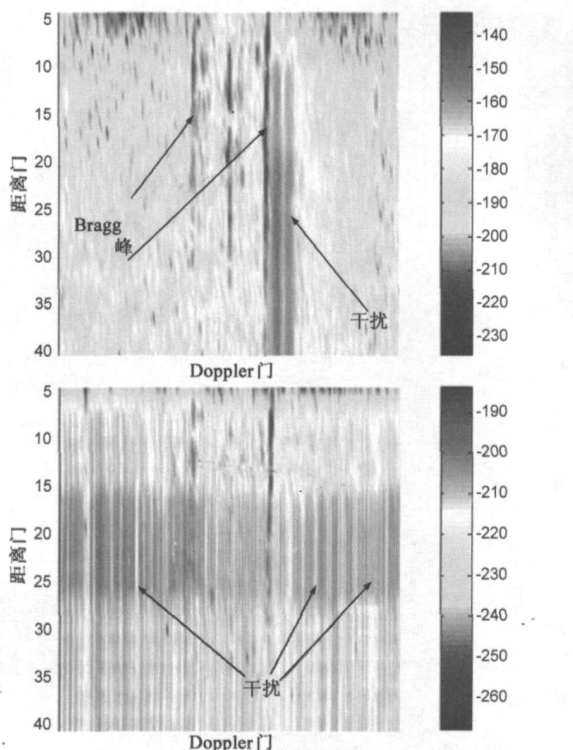


图 1 条状干扰和面状干扰下的距离速度谱

本文基于上述的思想, 从水平辅助天线旁瓣对消的角度出发, 解决非平稳环境下高频雷达干扰抑制的问题. 考虑到主辅通道间存在的各种误差, 设定最大可能的误差范围, 得到最差误差环境下最优的干扰抑制手段. 从凸最优的角度分析约束方程, 通过稳健的最小二乘的方法化简该问题为简单的一维搜索求解加权系数. 通过录取实测高频雷达电台干扰数据并干扰抑制处理, 结果表明了本文提出的方法的有效性.

2 基于水平辅助天线的旁瓣对消原理

高频地波超视距雷达利用高频垂直极化电磁波能够沿海洋表面传播的机理提取视距外目标信息, 其工作原理为发射调频电波, 沿海表面传播后遇目标反射进入接收机. 传统基于水平极化辅助天线的抗干扰原理为: 在常规高频雷达垂直极化天线阵列附近架设水平极化的天线阵列. 根据高频雷达信号传输的特点, 雷达目标回波信号为垂直极化, 其水平极化分量由于在高传导率的海面上长距离传播而衰减殆尽, 可以忽略, 故目标回波仅出现在垂直极化天线中. 而电台干扰通常由电离层反射, 电离层的去极化作用使干扰呈椭圆极化. 这样, 垂直极化天线阵列将同时接收目标回波与干扰信号的垂直分量, 水平极化辅助阵列只接收电台干扰信号的水平分量, 利用

水平天线估计出垂直极化天线中干扰分量并对消, 达到抑制干扰, 保留目标原有信息的目的.

图 2 为基本的旁瓣对消处理框图, 令垂直极化主天线波束形成后输出为 y , 水平极化辅助天线个数为 M , 其接收到的信号为 $x = [x_1, \dots, x_M]^T$, 则旁瓣对消后的输出为^[5]:

$$z = y - xw_{sl} \quad (1)$$

其中 w_{sl} 为自适应加权系数, 其 Wiener 解为:

$$w_{sl} = R_{xx}^{-1} r_{xy} \quad (2)$$

这里, R_{xx} , r_{xy} 分别为辅助天线的自相关矩阵和辅助天线与主天线的互相关矩阵,

$$R_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) x^H(k) \quad (3)$$

$$r_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) y^H(k) \quad (4)$$

其中 N 为采样点数.

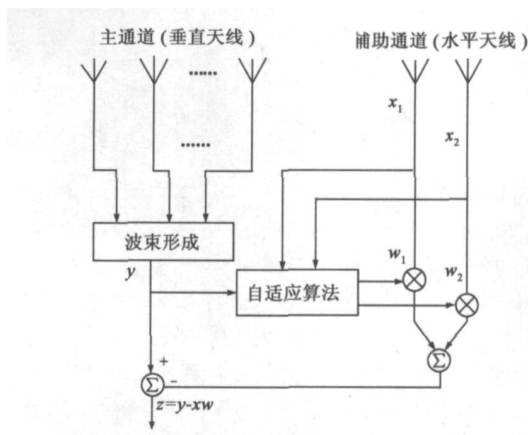


图 2 高频雷达旁瓣对消处理框图

3 影响旁瓣对消干扰抑制性能的因素

高频雷达收到的短波电台干扰主要是通过电离层反射回来的, 其极化状态表现为椭圆极化和部分极化, 夜间电离层的随机起伏导致电台干扰极化特性非平稳, 从而表现在主天线与辅助天线接收数据的相关特性下降, 影响旁瓣对消性能. 图 3 画出了某段连续采样得到的两根天线的干扰极化状态变化, 从中可以看出, 干扰极化角和极化角相差都有一定的起伏变化, 也就影响了主辅天线中干扰相关特性.

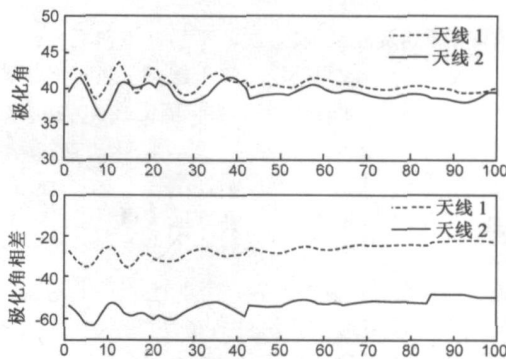


图 3 水平与垂直通道只有干扰的特性变化曲线

理论上, 高频雷达目标信号的水平极化分量是很弱的, 只有干扰才能在水平通道形成较大的回波. 然而实际录取的数据表明, 水平极化通道中的目标信号也有一定的功率, 其强度一般低于垂直极化通道 10dB 以上. 由此可见, 目标极化特性并不是严格的垂直极化, 而是表现为垂直极化附近的线极化或者椭圆极化. 图 4 为距离速度二维变换后某一距离门的功率谱, 图中两个尖峰为对应于一阶海杂波的 Bragg 峰, 从中可以看出, 水平通道杂波谱低于垂直通道 10dB 左右, 这说明水平通道同时也接收到了部分微弱的海杂波数据, 从加权系数的计算来看, 这也会影响对干扰的准确估计, 从而降低干扰抑制的效果.

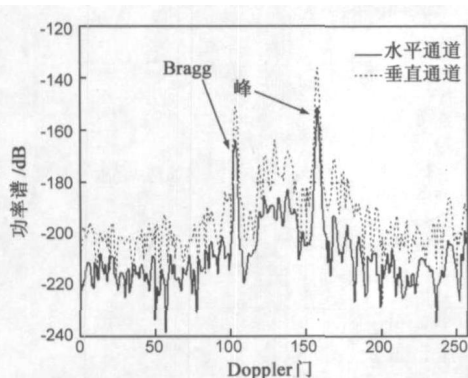


图 4 水平通道与垂直通道同一距离功率谱

另外, 对于实际系统来说, 接收机与天线不可能做得十分理想, 各通道间幅频和相频特性也会有较大的不一致, 因此, 主通道与辅助通道对干扰的估计也存在着较大的误差.

以上表明, 作为主通道的垂直天线和作为辅助通道的水平天线之间, 由于系统和环境的误差将影响旁瓣对消中对干扰估计的准确度, 从而影响到高频雷达的干扰抑制性能, 因此提出了对新的稳健干扰抑制算法研究的要求.

4 基于稳健最小二乘的旁瓣对消算法

凸空间最优的问题近年来被广泛应用于各种信号处理领域以求解非线性最优化的问题, 其优势在于能够保证在某一的误差范围内得出约束问题的最优解^[9]. 基于凸最优的思想, 从空域角度上, 对导向矢量和接收矩阵进行修正, 几种非平稳环境下的波束形成算法被提出, 并体现出适应恶劣条件的鲁棒性^[13].

从高频雷达实际系统出发, 非平稳环境造成高频雷达传统干扰对消方法失效, 为补偿水平天线与垂直天线相关性的差异, 对干扰进行更好的抑制, 对水平极化通道的接收数据进行修正, 令:

$$\mathbf{x} = \Delta \mathbf{x} \quad (5)$$

其中 $\Delta \mathbf{x}$ 为加入的误差矩阵. 然而, 实际环境中的 $\Delta \mathbf{x}$ 是无法预知的, 为保证干扰抑制的稳定性, 设定一个最大的误差范围 $\|\Delta \mathbf{x}\|_2 \leq \eta$, (在实际高频雷达干扰抑制过程中, 对误差范围的选择, 可参考波束形成方法中对角加载系数的选择, 令 η 为估计雷达检测背景基底以上的 35dB), 为保证在该范围内的最差的误差得到最优的干扰抑制效果^[18], 修改旁瓣对消的

约束方程为如下最小最大问题:

$$\min_w \left(\max_{\|\Delta \mathbf{x}\|_2 \leq \eta} \|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})\mathbf{w}\|_2 \right) \quad (6)$$

方法保证在某一最大误差范围内对干扰的抑制最彻底, 提高了方法对系统误差, 干扰非平稳等条件的稳健性, 从而更有效的抑制高频雷达接收系统中的非平稳干扰. S. Boyd 证明这种最差环境最优的方法更趋于稳定的最优解^[8]. 同时, 不同于总体最小二乘方法的是: 由于合理的误差范围假设, 这种不确定性的误差影响不会被过大的估计^[17].

为求解式(6)的最小最大问题, 首先把它转化为一个最小化问题^[19].

引理 1:

$$\min_w \left(\max_{\|\Delta \mathbf{x}\|_2 \leq \eta} \|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})\mathbf{w}\|_2 \right) \Leftrightarrow \min_w \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2 + \eta \|\mathbf{w}\|_2 \quad (7)$$

证明: 假设 $f(\mathbf{x}) = \max_{\|\Delta \mathbf{x}\|_2 \leq \eta} \|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})\mathbf{w}\|_2$,

根据柯西-施瓦兹不等式:

$$\|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})\mathbf{w}\|_2 \leq \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2 + \eta \|\mathbf{w}\|_2 \quad (8)$$

因此

$$f(\mathbf{x}) = \max_{\|\Delta \mathbf{x}\|_2 \leq \eta} \|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})\mathbf{w}\|_2 \leq \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2 + \eta \|\mathbf{w}\|_2 \quad (9)$$

又令: $\Delta \mathbf{x}_0 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w})}{\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2} \frac{\mathbf{w}^H}{\|\mathbf{w}\|_2} \eta$, 有

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= \max_{\|\Delta \mathbf{x}\|_2 \leq \eta} \|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})\mathbf{w}\|_2 \geq \|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}_0)\mathbf{w}\|_2 \\ &= \left\| \mathbf{y} - \left[\frac{\mathbf{x} + (\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w})}{\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2} \frac{\mathbf{w}^H}{\|\mathbf{w}\|_2} \eta \right] \mathbf{w} \right\|_2 = \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2 + \eta \|\mathbf{w}\|_2 \end{aligned} \quad (10)$$

这样, 由式(9)和式(10):

$$f(\mathbf{x}) = \max_{\|\Delta \mathbf{x}\|_2 \leq \eta} \|\mathbf{y} - (\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x})\mathbf{w}\|_2 = \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2 + \eta \|\mathbf{w}\|_2 \quad (11)$$

从而, 式(6)转化为如下最小化问题

$$\min_w \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2 + \eta \|\mathbf{w}\|_2 \quad (12)$$

为求解式(12), 定义:

$$\varphi = \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2 + \eta \|\mathbf{w}\|_2 \quad (13)$$

显然, φ 是一个凸函数, 任何一个 φ 的局部最小点, 也是它的全局最小点, 下面, 我们利用拉格朗日算子求解最优的 $\mathbf{w}$.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{w}} = \frac{1}{\|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2} (\mathbf{x}^H \mathbf{x} + \alpha \mathbf{I}) \mathbf{w} - \mathbf{x}^H \mathbf{y} \quad (14)$$

这里, 我们引入了正实数 α

$$\alpha = \frac{\eta \|\mathbf{y} - \mathbf{x}\mathbf{w}\|_2}{\|\mathbf{w}\|_2} \quad (15)$$

令 $\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{w}} = 0$, 则有

$$\mathbf{w} = (\mathbf{x}^H \mathbf{x} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{x}^H \mathbf{y} \quad (16)$$

为求解关于 $\mathbf{w}$ 的 α , 对奇异值分解

$$\mathbf{x} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \Sigma \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中 $U \in R^{m \times m}$, $V \in R^{n \times n}$ 是正交的, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ 是对角的矩阵, $\sigma_1 \geq \sigma_n \geq 0$ 为对应于 x 的奇异值. 令 $\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = U^H y$, 式(16)带入(15), 并化简, 有

$$\alpha = \eta \frac{\sqrt{\|y_2\|_2^2 + \alpha^2 \|(\Sigma^2 + \alpha I)^{-1} y_1\|_2^2}}{\|\Sigma(\Sigma^2 + \alpha I)^{-1} y_1\|_2} \quad (18)$$

对式(18)求解可转化为:

$$\Theta(\alpha) = y_1^H (\Sigma^2 - \eta I) (\Sigma^2 + \alpha I)^{-2} y_1 - \frac{\eta^2 \|y_2\|_2^2}{\alpha^2} \quad (19)$$

文[19]证明了, 对于 $\alpha \in [0, +\infty)$, $\Theta(\alpha) = 0$ 有且仅有一个根, 利用任何一种数值方法进行求解, 可得到对应的唯一 α , 从而得到最优权系数. 此方法利用简单的一维搜索就可以得到最优的加权系数, 相对于基于内部点法的二次曲锥空间(计算复杂度为 $O(M^3)$)求解从计算复杂度和系统可实现程度来讲具有较大的优势^[18].

5 实测数据处理结果

利用高频地波超视距雷达实测数据进行对消效果分析, 本次实验数据取自 8 元天线阵列的高频雷达系统. 其中包括 6 根垂直极化的线性均匀主天线, 2 根水平极化的辅助天线. 系统载频为 6.2MHz, 通过初步分析数据, 发现数据里面含有强电台干扰和海浪回波, 干噪比约为 20dB. 在距离 100 公里处注入 10Km/h, 信噪比为 10dB 的目标, 分析非平稳干扰抑制效果. 分别用单独主通道, 传统旁瓣对消和稳健最小二乘方法进行处理, 其中稳健最小二乘方法的最大误差范围设定为基底以上 3dB, 几种方法对干扰的抑制效果如图 5 所示. 由于干扰的影响, 未进行干扰抑制的主通道目标完全被淹没了, 根本不能使雷达正常工作, 传统旁瓣对消的方法对干扰的抑制也有明显的不足; 而基于稳健最小二乘的干扰抑制方法成功抑制住了干扰, 同传统方法相比较, 基底明显降低, 信噪比改善约有 5~8dB, 表现出最好的非平稳干扰抑制效果, 提高了高频雷达检测能力, 改进了高频雷达适应恶劣电磁环境的能力.

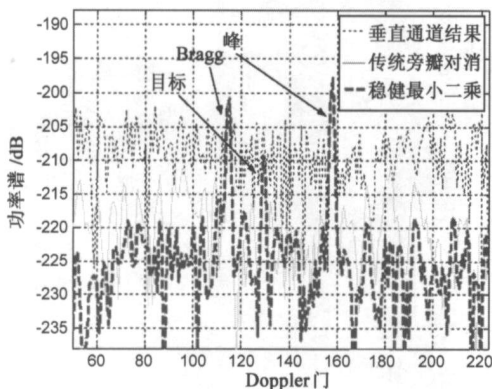


图 5 不同抑制方法第 20 距离门(100Km)Doppler 谱

6 结论

系统和环境的不稳定因素影响了高频地波雷达抗短波电台干扰的性能, 本文通过修正水平辅助天线的接收数据保证在最差误差环境下的最优干扰抑制性能. 利用稳健最小二乘

算法, 化简凸空间最优化问题为简单的一维搜索, 降低了计算复杂度. 实验雷达数据处理结果表明, 该方法能够有效的对抗复杂电磁环境中的不稳定因素, 具有一定的鲁棒性.

参考文献:

- [1] G A Fabrizio, Y I Abramovich, S J Anderson, D A Gray M D Turly. Adaptive cancellation of nonstationary interference in HF antenna arrays[J]. IEE Proc Radar, Sonar and Navigation, 1998, 145(1): 19- 24.
- [2] Yongtan Liu, Rongqing Xu, Ning Zhang. Progress in HFSWR research at Harbin Institute of Technology[A]. Proceedings of the International Conference on Radar[C]. Adelaide, Australia, 2003. 522- 528.
- [3] G A Fabrizio, A B Gershman, M D Turley. Non stationary interference cancellation in HF surface wave radar[A]. Proceedings of the International Conference on Radar[C]. Adelaide: Australia, 2003. 672- 677.
- [4] W Xianrong, K Hengyu. Adaptive ionospheric clutter suppression based on subarrays in monostatic HF surface wave radar [J]. IEE Proc Radar Sonar Navigation, 2005, 152(2): 89- 96.
- [5] Hank Leong. A comparison of sidelobe cancellation techniques using auxiliary horizontal and vertical antennas in HF surface wave radar[A]. IEEE international Radar conference [C], Alexandria: IEEE Aerospace and Electronic systems society, 2000. 672- 677.
- [6] 张国毅, 刘永坦. 高频地波超视距雷达的极化滤波技术研究[J]. 系统工程与电子技术. 2000, 22(3): 55- 57. Zhang Guoyi, Liu Yongtan. Study of polarization filtering technique of HF ground wave radar[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(3): 55- 57.
- [7] Mao Xingpeng, Liu Yongtan, Deng Weibo. Radio disturbance of high frequency surface wave radar[J]. Electronics letters, 2004, 40(3): 202- 203.
- [8] Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe. Convex optimization [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 1- 10.
- [9] Sergiy A Vorobyov A B Gershman, and Zhi Quan Luo. Robust adaptive beamforming using worst case performance optimization: a solution to the signal mismatch problem[J]. IEEE Trans on signal processing, 2003, 52(2): 313- 324.
- [10] S A Vorobyov, A B Gershman, Z Q Luo, and N. Ma. Adaptive beamforming with joint robustness against signal steering vector errors and interference nonstationary[A]. Proc. ICASSP03 [C], Hong Kong: IEEE signal processing society, 2003. 2901 - 2904.
- [11] R Lorenz, S P Boyd. Robust minimum variance beamforming [J]. IEEE Trans. on Signal Processing. 2005, 53(5): 1684- 1696.
- [12] Jian Li, Petre Stoica, Zhisong Wang. On robust capon beamforming and diagonal loading[J]. IEEE Trans. on Signal Pro

cessing, 2003, 51(7): 1702– 1713.

- [13] A B Gershman. Robust Adaptive Beamforming: An overview of recent trends and advances in the field[A]. International conference on Antenna Theory and Techniques [C]. Sevastopol: Ukraine, 2003. 3035.
- [14] Li GP, Li L, Xu RQ. Sky wave interference cancellation for HF surface wave radar[A]. Proceedings of the 2004 China Japan joint meeting on microwaves[C], Harbin: Publishing House of Harbin Institute of Technology, 2004. 363– 366.
- [15] Li Gaopeng, Li Lei, Xu Rongqing. Robust interference cancellation method of high frequency surface wave radar[A]. 2004 7th International Conference on Signal Processing Proceedings [C]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 443– 446.
- [16] 李高鹏, 李雷, 许荣庆. 高频地波雷达干扰抑制方法研究[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 514– 516.
Li Gaopeng, Li Lei, Xu Rongqing. Study of interference rejection methods in high frequency surface wave radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 514– 516.
- [17] Farina, A. Golino, G. Timmoneri, L. Comparison between LS and TLS in adaptive processing for radar systems[J]. IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(1): 2– 6.
- [18] L El Ghaoui and H Lebre, Robust solutions to least squares

problems with uncertain data[J], SIAM J. on Matrix Analysis and Applications. 1997, 18(4): 1035– 1064.

- [19] S Chandrasekaran, G H Golub, M Gu, A H Sayed. Parameter estimation in the presence of bounded data uncertainties[J]. SIAM J. on Matrix Analysis and Applications. 1998, 19(1): 235– 252.

作者简介:



李 雷 男, 1980 年出生于辽宁省, 2004 年于哈尔滨工业大学电子与通信工程系获得硕士学位, 现为哈尔滨工业大学通信与信息系统博士研究生, 主要研究方向为高频雷达干扰抑制技术、阵列信号处理等. Email: lilei@hit.edu.cn

许荣庆 男, 1958 年出生于黑龙江省, 哈尔滨工业大学电子工程技术研究所所长, 教授, 博士生导师, 主要从事新体制雷达系统技术、雷达成像技术和现代信号处理技术研究.

李高鹏 男, 1976 年出生于湖北省, 现为哈尔滨工业大学电子工程专业博士研究生, 主要研究方向为高频雷达空间干扰抑制技术.

刘 源 男, 1978 年出生于北京市, 2001 年于哈尔滨工业大学电子与通信工程系获得硕士学位, 现为哈尔滨工业大学通信与信息系统博士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理.