

某对空情报雷达同频异步冲击干扰抑制方法研究

万显荣¹, 易建新¹, 沈有余², 赵林兵², 李建■²

(1. 武汉大学电子信息学院电波传播实验室, 湖北武汉 430079; 2. 中国兵器装备集团 568 厂, 湖北武汉 430077)

摘 要: 多部雷达同时同地工作面临电磁兼容问题, 某对空情报雷达因对方同频段雷达发射机产生的冲击干扰严重影响了探测性能. 本文根据干扰特性提出一种基于恒虚警检测的冲击干扰时域抑制新算法. 该算法应用恒虚警方式自适应设置干扰检测门限, 利用逻辑判断进行干扰定位, 增强了干扰检测的鲁棒性; 运用时域相消在滤除干扰的同时保留了地杂波, 防止因杂波泄漏而降低雷达探测性能. 实测数据处理验证了算法的有效性.

关键词: 对空情报雷达; 冲击干扰; 恒虚警率检测; 干扰抑制; 电磁兼容

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2012) 03-0587-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.029

Mitigation of Asynchronous Cochannel Impulsive Interference in an Air Surveillance Radar

WAN Xian-rong¹, YI Jian-xin¹, SHEN You-yu², ZHAO Lin-bing², LI Jian-yao²

(1. Radio Wave Propagation Laboratory, School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

2. China Ordnance Equipment Group 568 Factory, Wuhan, Hubei 430077, China)

Abstract: Electromagnetic compatibility is a question when several radars work together. The performance of an air surveillance radar degrades significantly due to impulsive interference generated by rival cochannel radar transmitter. This paper proposed a novel constant-false-alarm-rate (CFAR) detection based impulsive interference mitigation algorithm according to the interference features. With cell average (CA) for adaptive thresholding and logical judgment for interference locating, the interference detection is more robust. What's more, the time-domain cancellation removes the impulsive interference while preserving the fidelity of the clutter component, or the leakage of strong clutter returns desensitizes the radar. The validity of the algorithm is verified by field experimental data.

Key words: air surveillance radar; impulsive interference; CFAR detection; interference mitigation; electromagnetic compatibility

1 引言

雷达是重要的信息获取设备, 是各种先进作战平台和指挥控制系统的耳目, 当多种型号雷达集成于同一平台或共同部署在同一基地以及不同机动雷达平台形成编队时, 必须解决不同设备之间的电磁兼容问题. 某对空情报雷达在实验过程中受基地同频段另一型雷达干扰, 探测性能受到严重影响. 实测数据分析表明, 干扰具有如下特点: (1) 该干扰持续时间短, 一般为微秒量级 (5~20 个采样周期), 仅占据单个脉冲重复周期 (PRI) 的很小比例; (2) 干扰强度高, 高出噪声基底 15~40dB, 但在近距离门不及地杂波强度; (3) 统计分析表明, 冲击干扰的出现规律与对方雷达时序相吻合, 为异步干扰, 系

对方雷达发射机开关电源电路在脉冲前后沿充放电所引起; (4) 干扰为近场直接耦合, 干扰强度与波束指向无关. 类似形态干扰在高频 (天波、地波) 超视距雷达中报道^[1~3]较多, 干扰来源主要是闪电、流星余迹、人为脉冲干扰等, 不同点在于其一般持续若干 PRI. 据作者调研所及, 此种干扰在微波段雷达中鲜有报道, 舰艇编队监视雷达间曾给出过类似的干扰形态^[4], 但其由雷达发射期 (非前后沿) 引起, 与此处产生机理不同. 引用高频雷达中的概念, 文中称为瞬态冲击干扰.

常用的瞬态干扰抑制分空域、时域、空时联合和时频结合的自适应处理方法. 空域和空时联合自适应主要通过自适应设置方位零陷来有效对消瞬态干扰能量, 对残余的干扰再用时域方法抑制, 此方法适用于相控阵体

制雷达且针对具有一定方向性的干扰^[5]. 时域抑制算法遵循“检测—挖除—插值”的思路, 这一思路对突发性的干扰效果较好, 但算法应用面临两个问题: (1) 干扰检测与定位方法, 算法难点在于寻求自适应的干扰检测算法以准确检测出干扰位置, 高频超视距雷达常用杂波抑制后的背景噪声信息确定干扰检测门限^[6,7], 但微波雷达中可能存在强目标信号, 此方法容易将目标也判为干扰; (2) 干扰滤除方法, 采用“挖除—插值”的方式是因为很难直接在时域将干扰、目标、杂波等信号区分开来, 若能通过某种方式区分, 则直接进行干扰滤除将更为简便. 时频域方法如基于高斯基表示^[1]和基于小波变换^[2]的方案. 其它方法还如噪声子空间投影方法^[3]. 上述方法还面临的一个共同问题是运算量及算法实时性, 这使得理论上的一些优化算法可能因运算量大而无法付诸实施.

需要特别说明的是, 天波和地波超视距雷达为脉冲多普勒雷达, 通过长相干累积提取目标距离和速度信息, 信号处理流程与常规微波雷达差异较大, 因此冲击干扰的处理思路无法直接拓展到微波雷达中来. 另外, 本文所述冲击干扰滤除要求如下: (1) 干扰没有表现出方向性, 需在原始时域数据中进行; (2) 要求准确检测干扰时刻, 在滤除干扰的同时保留杂波; (3) 对算法的实时性也要求严苛. 针对此需求, 文章首先给出了雷达回波信号模型, 接着根据冲击干扰的特性, 综合考虑算法有效性和实用性, 提出了一种基于恒虚警的自适应干扰检测和时域相消的干扰抑制方案, 最后结合实测数据分析了算法抑制干扰的效果.

2 信号模型

设发射波形为 $s(\hat{t})$, 第 n 个 PRI 雷达信号回波一般形式可表示如下

$$r_n(\hat{t}) = s_n(\hat{t}) + c_n(\hat{t}) + w_n(\hat{t}) + i_n(\hat{t}), \hat{t} = 1, \dots, M \quad (1)$$

其中, $\hat{t}$ 为快时间, M 为一个脉冲周期中的快拍数. $s_n(\hat{t})$ 为目标回波, 是经多普勒调制的延迟发射信号;

$c_n(\hat{t})$ 为地杂波, 是静地散射回波, 在近处强度大, 能量集中在零多普勒频率附近; $w_n(\hat{t})$ 为高斯白噪声, 由热噪声和外部环境噪声引起; $i_n(\hat{t})$ 为冲击干扰, 强度远高于噪声基底, 但在近距离门被强地杂波所淹没.

将单个 PRI 的所有快拍记为列向量的形式

$$\mathbf{r}_n = [r_n(1), r_n(2), \dots, r_n(M)]^T \quad (2)$$

其中上标“T”为转置运算符. 依此类推可得

$$\mathbf{r}_n = \mathbf{s}_n + \mathbf{c}_n + \mathbf{w}_n + \mathbf{i}_n \quad (3)$$

为考察冲击干扰在脉压后的表现形式, 可将其建模为一个冲激, 用狄拉克函数 ($\delta(\cdot)$) 表示

$$i_n(\hat{t}) = A_i \delta(\hat{t} - \hat{t}_0) \quad (4)$$

其中 A_i 为复数幅度, $\hat{t}_0$ 为冲击干扰的快时间位置. 脉压冲激响应为 $s^*(-\hat{t})$, 则脉压后得

$$i_{pc,n}(\hat{t}) = i_n(\hat{t}) * s^*(-\hat{t}) = A_i s^*(\hat{t}_0 - \hat{t}) \quad (5)$$

可见脉压后冲击干扰在快时间上的影响范围与发射脉冲宽度相近, 其高强度使得噪声基底显著抬高, 增加系统虚警率, 严重时使系统无法正常工作.

3 干扰检测

由前述讨论可知, 脉压前冲击干扰能量集中, 脉压后能量扩散, 所以干扰检测宜在脉压前进行. 实测数据显示在近距离门冲击干扰被地杂波所淹没, 因此干扰检测应在地杂波抑制之后, 然而杂波对消时不可避免的会有部分杂波能量残余, 此外还可能有强目标信号的存在, 因此检测时要求尽量少将杂波和目标误判为干扰, 此时固定门限的检测方法无法满足实际需求, 需要寻求自适应的干扰检测方式, 针对干扰时域特征文中引入恒虚警检测法.

根据上述分析, 干扰检测分为如下三步:

(1) 三脉冲对消抑制地杂波. 即

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{r}_n + \mathbf{r}_{n+2} - 2\mathbf{r}_{n+1} \quad (6)$$

实测数据中经三脉冲对消抑制地杂波的效果如图 1 所示. 图 1(a) 为原始数据, 在远距离门可以观察到冲击干扰, 但在近处地杂波区, 冲击干扰被强地杂波所掩盖. 图 1(b) 给出了三脉冲对消后的数据, 此时, 绝大部分地杂波能量被抑制, 平均抑制达 25dB 以上, 噪声基底大致为 32dB, 冲击干扰高出基底 15~40dB 不等, 干扰出现频繁, 一个 PRI 平均 1~2 次, 相邻干扰时间间隔大 (百微秒量级).

(2) 恒虚警法自适应设置检测门限. 从图 1(b) 可清

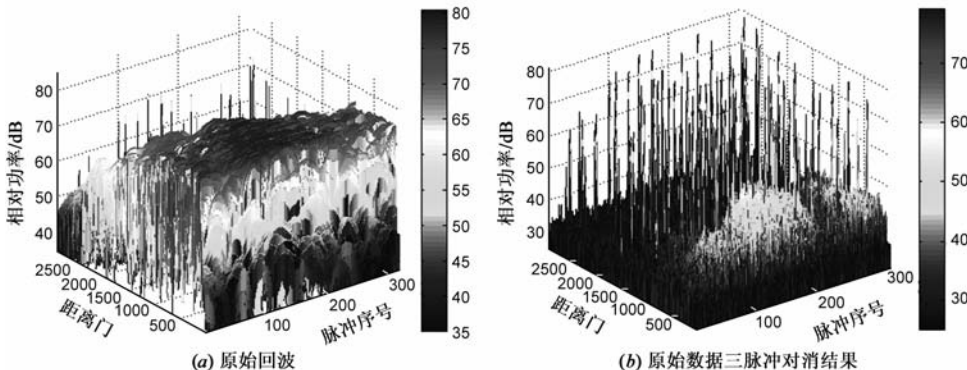


图1 三脉冲对消抑制地杂波效果

楚观察到,脉压前冲击干扰持续时间短,强度大,极似脉压后的目标(尖峰状,主瓣窄,强度大),为提高杂波残余及强目标信号存在背景下的干扰检测性能,此处借鉴恒虚警率检测的思想.引言和图1的统计结果均指出,相邻干扰时间间隔较大(百微秒量级),无需考虑干扰间的遮蔽效应.而脉压前目标回波呈脉冲状,若干扰在目标回波背景下未能检测出,说明干扰能量相对较弱,脉压后对探测性能影响较小,边缘效应的影响与此类似.经上分析可知单元平均法适用于此.针对其它应用可根据信号特征选取适合的恒虚警检测方法.

单元平均检测^[8]的距离维参考窗如图2所示.

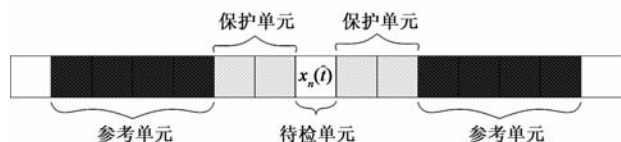


图2 单元平均检测距离维参考窗示意图

考虑平方律检测,即 $y_n(\hat{t}) = |x_n(\hat{t})|^2$. 检测门限表达式为:

$$\hat{T}_n(\hat{t}) = \frac{\alpha}{K} \sum_k y_n(k) \quad (7)$$

其中 K 为参考单元数, k 为参考单元的快时间序号, α 为门限乘积因子,典型情况, $\frac{\alpha}{K} = \bar{P}_{FA}^{-1/K} - 1$, $\bar{P}_{FA}$ 为虚警率. 比如,若取 $\bar{P}_{FA} = 10^{-6}$, $K = 16$,则: $\frac{\alpha}{K} \approx 1.3714$.

此外,基于恒虚警的检测方法可推广到对只存在于若干个 PRI 的瞬态干扰的检测,此时干扰在脉压维呈尖峰状,需采用脉冲维参考窗.

(3) 确定原始数据中的冲击干扰位置,即干扰定位.原始数据中的一个冲击干扰因三脉冲对消可能存在于对消后的 1~3 个 PRI 之中.具体而言,可能有三种情况:①原始数据中第 1 个 PRI 中的冲击干扰只存在于对消后的第 1 个 PRI 之中;②原始数据中第 2 个 PRI 中的冲击干扰存在于对消后的第 1 和第 2 个 PRI 之中;③原始数据中第 3 个及以后 PRI 中的冲击干扰存在于对消后的连续 3 个 PRI 之中.实际判断时,利用对消后数据中检测到的干扰去反推原始数据中存在干扰的位置.为此,首先进行比较,比较结果为布尔变量

$$b_n = y_n > \hat{T}_n \quad (8)$$

接着进行“相与”操作

$$B_n = b_n \text{ and } b_{n+1} \text{ and } b_{n+2} \quad (9)$$

其中 and 为相与操作符.若 B_n 中某一距离门为 true,则判定原始数据 r_{n+2} 中的相应距离门存在冲击干扰.对于原始数据中第 1,2 个 PRI 的判断,需要单独处理.

图3更为直观地展示了上述逻辑判断的原理.图中的 P 表示冲击干扰峰, C 表示杂波引起的误检,若原始

数据 (R_6, C_1) 位置存在冲击干扰 P ,则对消后数据在 $(R_6, A_2), (R_6, B_2), (R_6, C_2)$ 均存在冲击干扰.反过来,如 $(R_6, A_2), (R_6, B_2), (R_6, C_2)$ 均存在干扰,则可知原始数据中 (R_6, C_1) 存在干扰; $(R_4, A_2), (R_4, B_2), (R_4, C_2)$ 有一个不存在干扰,可知原始数据中 (R_4, C_1) 不存在干扰.

上述逻辑判断对冲击干扰的检测具有较强的鲁棒性.例如,若对消后数据 (R_3, B_2) 的杂波超过门限,但 $(R_3, A_2), (R_3, C_2)$ 位置的杂波没有超过门限,逻辑判断后便不会将其视为干扰.

需要注意的是,上述逻辑判断是冲击干扰存在时的必要条件.它不是充分条件,比如若 (R_6, B_1) 和 (R_6, D_1) 均存在冲击干扰, (R_6, C_1) 不存在冲击干扰,

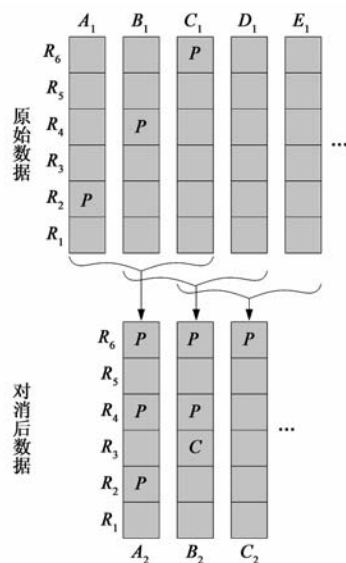


图3 三脉冲对消导致的干扰分布图

三脉冲对消后也可能在 $(R_6, A_2), (R_6, B_2), (R_6, C_2)$ 位置连续存在干扰.但考虑到冲击干扰为异步干扰,且干扰主瓣窄,三个 PRI 中同一距离门出现该冲击干扰分布的情况可以忽略,所以该逻辑判断可近似为充要条件.

4 干扰抑制算法

系统后续数据处理要求干扰滤除直接在原始数据中进行,这时若对干扰所在位置的数据直接置零而不进行插值,那么该位置的杂波也为零,这相当于人为给杂波引入了一个冲击,会引起杂波频谱扩散,MTI(或MTD)处理后不能很好得对消杂波,导致杂波过量剩余,此即杂波泄漏^[9],同样影响雷达的探测性能.

冲击干扰为异步干扰,且强度高,此处提出一种时域相消的滤除方法.设 3 个相邻脉冲的观测数据为 $r_n(\hat{t}), r_{n+1}(\hat{t}), r_{n+2}(\hat{t})$,则杂波对消后数据为: $x_n(\hat{t}) = r_n(\hat{t}) + r_{n+2}(\hat{t}) - 2r_{n+1}(\hat{t})$,若 $r_{n+2}(\hat{t})$ 是被冲击干扰掺杂的数据,则 $x_n(\hat{t})$ 的能量主要由冲击干扰贡献,干扰滤除可通过将原始数据减去对消后数据实现,即

$$\hat{r}_{n+2}(\hat{t}) = r_{n+2}(\hat{t}) - x_n(\hat{t}) \quad (10)$$

$\hat{r}_{n+2}(\hat{t})$ 表示经时域相消后的数据.

时域相消法可以避免杂波泄漏,因为

$$\hat{r}_{n+2}(\hat{t}) = r_{n+2}(\hat{t}) - x_n(\hat{t}) = 2r_{n+1}(\hat{t}) - r_n(\hat{t}) \quad (11)$$

将式(1)代入式(11)中得

$$\begin{aligned} \hat{r}_{n+2}(\hat{t}) = & 2s_{n+1}(\hat{t}) - s_n(\hat{t}) + 2c_{n+1}(\hat{t}) - c_n(\hat{t}) \\ & + 2w_{n+1}(\hat{t}) - w_n(\hat{t}) + 2i_{n+1}(\hat{t}) - i_n(\hat{t}) \quad (12) \end{aligned}$$

冲击干扰为异步干扰, $\hat{r}_{n+2}(\hat{t})$ 中存在冲击干扰时, $\hat{r}_n(\hat{t}), \hat{r}_{n+1}(\hat{t})$ 中不存在冲击干扰, 即 $i_n(\hat{t}), i_{n+1}(\hat{t}) = 0$. 从而

$$\begin{aligned} \hat{r}_{n+2}(\hat{t}) = & 2s_{n+1}(\hat{t}) - s_n(\hat{t}) + 2c_{n+1}(\hat{t}) - c_n(\hat{t}) \\ & + 2w_{n+1}(\hat{t}) - w_n(\hat{t}) \quad (13) \end{aligned}$$

由于地杂波接近于静杂波, 具有随时间慢变的特征, 常规的“挖除—插值”方式基于这一假设对杂波进行插值重构. 三脉冲对消对此类杂波具有较好抑制效果, 第3节实测数据处理也表明三脉冲对消可抑制掉绝大部分地杂波能量. 故有下式成立

$$\left| \frac{c_n(\hat{t}) + c_{n+2}(\hat{t}) - 2c_{n+1}(\hat{t})}{c_{n+2}(\hat{t})} \right| \ll 1 \quad (14)$$

即 $2c_{n+1}(\hat{t}) - c_n(\hat{t}) \approx c_{n+2}(\hat{t})$, 将其代入式(13)得

$$\hat{r}_{n+2}(\hat{t}) \approx 2s_{n+1}(\hat{t}) - s_n(\hat{t}) + c_{n+2}(\hat{t}) + 2w_{n+1}(\hat{t}) - w_n(\hat{t}) \quad (15)$$

可见上述时域相消法能够在滤除冲击干扰的同时保留地杂波, 从而完成了常规的“挖除—插值”两步实现的功能. 当然, 时域相消对目标信号可能有损失, 但由于冲击干扰占据时间短, 时域相消导致的损失对目标能量影响可忽略不计.

结合之前的干扰检测, 图4给出了算法整体流程图. 从算法各个步骤可知, 处理一个 PRI 数据的算法复杂度为 $O(M)$, M 为一个 PRI 的快拍数.

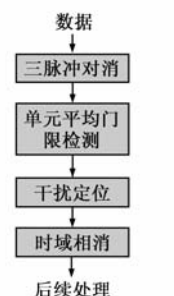
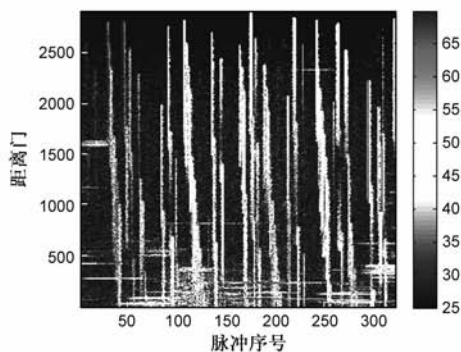


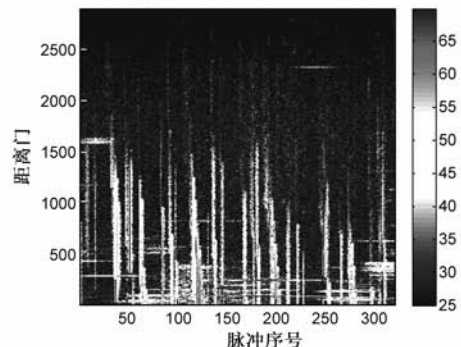
图4 算法整体流程图

5 干扰滤除效果

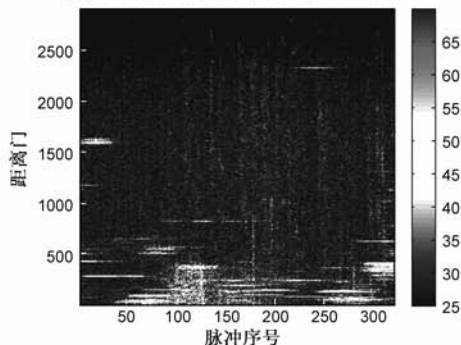
该对空情报雷达典型录取数据的处理结果如图5所示. 图5(a)为经三脉冲对消后直接进行脉压的结果, 此时冲击干扰在脉冲内展宽, 呈现竖条状, 与第2节中分析结果一致, 干扰的频繁出现导致噪声基底整体抬高, 严重影响了探测性能. 图5(b)是将置零代替算法流程中的时域相消的处理结果. 此时远处干扰得到有效抑制, 但近处仍保留有竖条状的干扰, 它比图5(a)中的相应位置更强. 这是地杂波引入的, 即第4节中分析的杂波泄漏. 图5(c)给出了应用文中干扰抑制算法处理后脉压的结果, 将其与图5(a)比对可知, 去干扰后基底变得平整, 信号干扰噪声比明显提高, 且无图5(b)中出现的杂波过量剩余情况. 图5(d)给出了第273个PRI去干扰前后的脉压数据对比. 冲击干扰将基底抬高到50dB左右, 干扰抑制后, 基底降到35dB以下, 信干比提高近15dB.



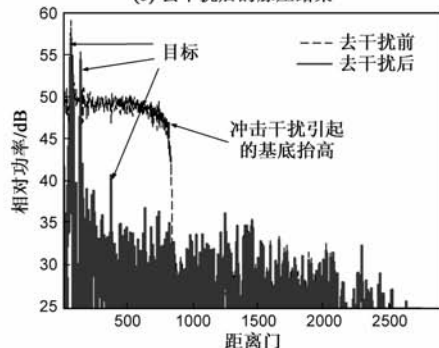
(a) 未去干扰时的脉压结果



(b) 将时域相消用置零替代时的处理结果



(c) 去干扰后的脉压结果



(d) 第273脉冲周期去干扰前后脉压数据对比

图5 算法处理效果

6 结论

本文根据冲击干扰为异步干扰、无明显方向性、持续时间短、强度大的特点, 将恒虚警法引入到干扰检测之中, 提高了杂波残余及强目标信号存在背景下的干扰检测性能; 干扰定位时通过采用逻辑判断方法, 增强

了干扰检测的鲁棒性;同时利用干扰时域相消简化了干扰滤除过程,算法实时性好,算法复杂度为 $O(M)$ 。其中基于恒虚警的干扰检测方法可推广到瞬态干扰的检测,时域相消抑制算法适用于异步冲击或脉冲干扰。实测数据处理效果改善明显,信干比显著提高。目前该算法已应用于实际装备中。

参考文献

- [1] Xin Guo, Sun Hongbo, Tat Soon Yeo. Transient interference excision in over-the-horizon radar using adaptive time-frequency analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4): 722 – 735.
- [2] Yuan Yuan He, Chang Jun Yu, Tai Fan Quan, Xin Jin. Impulsive interference detection method based on Morlet wavelet and maximum likelihood estimation [A]. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics [C]. Daejeon, Korea: IEEE Industrial Electronics Society, 2006. 1678 – 1683.
- [3] T Liu, X Chen, J Wang, Y Gong. Subspace impulsive interference suppression in OTHR [J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2009, 7(13): 167 – 181.
- [4] 王强. 舰艇编队监视雷达间的同频干扰分析[J]. 舰船电子对抗, 2009, 32(2): 10 – 13.
Wang Qiang. Analysis of shared-frequency interference among surveillance radars in ship formation [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2009, 32(2): 10 – 13. (in Chinese)
- [5] Marshall D F. Adaptive cancellation of impulsive interference in phased array radar [A]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology [C]. Boston, USA: IEEE Boston Section, 2010. 83 – 88.
- [6] 邢孟道, 保铮, 强勇. 天波超视距雷达瞬态干扰抑制[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 823 – 826.
Xing Meng-dao, Bao Zheng, Qiang Yong. Transient interference excision in OTHR [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 823 – 826. (in Chinese)
- [7] Liu T, Y Gong, et al. OTHR impulsive interference detection in

strong clutter background [A]. International Conference on Communications, Circuits and Systems [C]. San Francisco, USA: International Association of Engineers, 2009. 410 – 413.

- [8] Mark A Richards. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008. 262 – 265.
- [9] Gregers-Hansen V, M T Ngo. EMI repair in pulse doppler radar [A]. IEEE Radar Conference [C]. Rome, Italy: IEEE Aerospace and Electronics Systems Society, 2008. 1 – 6.

作者简介



万显荣 男, 湖北人, 1975 年出生, 博士. 武汉大学电子信息学院教授, 博士生导师, 研究兴趣包括: 新体制雷达系统设计、阵列信号处理等.
E-mail: xrwan@whu.edu.cn



易建新 男, 湖南人, 1989 年出生, 武汉大学硕博在读, 研究方向涉及雷达系统建模和信号处理.
E-mail: yi_jianxin@126.com



沈有余 男, 湖北人, 1968 年出生, 研究员. 中国兵器装备集团 568 厂, 长期从事雷达总体与雷达信号处理研究.