

航管一次雷达抗风电场干扰目标检测方法

吴仁彪* 毛建 王晓亮 贾琼琼

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室 天津 300300)

摘要:近年来,全球风力发电装机容量呈指数型增长。然而,现有航管一次雷达的动目标检测(Moving Target Detector, MTD)技术无法抑制具有非零频成分的风电场杂波,可能导致目标遮蔽和虚警率上升。针对此问题,该文提出了一种在风电场杂波下航管一次雷达的目标检测方法。该方法在MTD前端设置风电场杂波抑制器。在该抑制器中首先估计雷达回波每个距离单元的谱中心,并把所有距离单元的谱中心移到零频。其次利用类似于对消固定杂波的方法对消目标回波,而具有较宽频谱宽度的风电场杂波经对消后仍有大部分的能量剩余。然后采用恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测确定杂波所在的距离单元,并剔除待检测数据中所有杂波单元,解决了风电场杂波进入非零频多普勒滤波器可能导致当前航管一次雷达MTD检测性能急剧恶化的问题。实验结果表明该方法对风电场杂波强度不敏感,有效地消除了杂波对目标的遮蔽现象并控制了由杂波引起的虚警率上升。

关键词: 目标检测; 动目标检测; 航管一次雷达; 风电场; 恒虚警率

中图分类号: TN958.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)03-0754-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00923

Target Detection of Primary Surveillance Radar in Wind Farm Clutter

Wu Ren-biao Mao Jian Wang Xiao-liang Jia Qiong-qiong

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In recent years, the global wind power installed capacity is growing exponentially. However, current Moving Target Detector (MTD) of primary surveillance radar can not suppress the wind farm clutter. The non-zero frequency components of the wind farm clutter may produce target losing and higher false alarm. A novel method for radar target detection in wind farm clutter is proposed. The method sets a wind farm clutter suppressor before current MTD. First, the center Doppler frequency of each range cell is estimated and the spectral center of each range cell is shifted to the zero frequency. Then, target echo is removed with the method similar to canceling stationary clutter. The wind farm clutter with rather wide spectral width still reserves most of energy after canceller process. Finally, the clutter units detected by Constant False Alarm Rate (CFAR) are eliminated. The proposed method prevented the obvious deterioration of current MTD detection due to clutter energy spreading into non-zero Doppler filters. The experimental results indicate that the method conquers the problem of masked target and decreased false alarms effectively are not sensitive to the power of the wind farm clutter.

Key words: Target detection; Moving Target Detector (MTD); Primary surveillance radar; Wind farm; Constant False Alarm Rate (CFAR)

1 引言

近年来,全球风力发电装机容量呈指数型增长^[1]。然而,国外有关部门和组织的调查报告^[2-9]已经指出了风电场可能会影响雷达的性能。现有航管一次雷达采用基于多普勒滤波器组的动目标检测

(Moving Target Detector, MTD)技术。当杂波能量只落在零频多普勒滤波器时,这种技术具有相当好的工作性能,而风轮机旋转叶片调制雷达信号,产生具有连续变化的多普勒频移的雷达回波,使得风轮机杂波扩散到多个非零频多普勒滤波器,导致在风电场杂波单元附近产生目标遮蔽,以及在杂波单元引起虚警率上升。

近些年已经提出了一些抑制风电场杂波的方案。在风轮机方面, Cornwall 提出在风轮机材质上选用吸波材料^[10]来降低雷达散射截面(Radar Cross Square, RCS),但由于成本太高,无法大面积推广。

2012-07-19 收到, 2012-11-02 改回

国家自然科学基金委员会与中国民航局联合资助项目(U1233109), 国家科技支撑计划项目(2011BAH24B12), 中央高校基本科研业务费项目(ZXH2011C006)和中国民航大学科研启动基金项目(2010QD03S)资助课题

*通信作者: 吴仁彪 rbwu@cauc.edu.cn

Pinto 等人^[1]提出通过修改风轮机物理结构来降低风轮机 RCS，但修改后的风轮机结构不利于有效地利用风能。雷神公司^[9]提出了在检测前、中和后抑制风轮机回波的设想，但相关技术处于严格的保密中。可以采用距离方位门方法抑制特定位置的杂波，然而无法抑制多径杂波。目标回波往往处于多普勒失配状态，使得目标回波旁瓣较高，导致目标能量也会进入多个多普勒滤波器。因此无法通过对多普勒通道检测结果进行融合处理来抑制杂波。

针对上述情况，本文根据风电场杂波的谱宽特征提出了一种在风电场杂波下的航管一次雷达目标检测方法。该方法利用风电场杂波进入固定凹口的滤波器后仍有大部分的能量剩余来确定杂波所在的距离单元并剔除杂波单元，可以在处理器的初级就消除杂波。仿真结果表明该方法对风电场杂波强度不敏感，有效地消除了杂波对目标的遮蔽现象并控制了由杂波引起的虚警率上升。

2 数据模型

风轮机由叶片、桅杆、轮机舱组成。远场情况下，叶片可等效为细长的圆柱体，叶片回波等效为一系列薄圆片回波的合成，桅杆和轮机舱回波等效为静止点目标回波，因此风轮机直达路径回波的模型^[12]为

$$c_D(t_n, t_m) = \sigma_0 p\left(t_n - \frac{2r}{c}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi r}{\lambda}\right) + \sigma \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p\left(t_n - \frac{2R_{i,j}(t_m)}{c}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi R_{i,j}(t_m)}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中 t_n 为快时间， t_m 为慢时间， $p(t)$ 为矩形脉冲函数， λ 为雷达工作波长， c 为光速， d 为风轮机到雷达的径向距离， l_j 为叶片上第 j 个薄圆片到轴心的距离， α 为叶片旋转面与雷达的夹角， f_{rot} 为叶片的旋转速度(Rotation Per Minute, RPM)， N 为叶片数量， σ_0 为桅杆和轮机舱上散射点的等效散射强度， σ 为叶片上散射点的散射强度， $R_{i,j}(t_m)$ 为第 i 张叶片上第 j 个薄圆片到雷达的径向距离， $\theta_i(t_m)$ 为第 i 张叶片与雷达视线在叶片旋转面上投影线的夹角。根据图 1 中风轮机与雷达的位置关系，有

$$R_{i,j}(t_m) = d - l_j \cos(\alpha) \cos(\theta_i(t_m)) \quad (2)$$

$$\theta_i(t_m) = 2\pi \frac{f_{rot}}{60} t_m + 2\pi \frac{i-1}{N} + \theta_0 \quad (3)$$

多径效应导致雷达接收到的风轮机回波是直达波与反射波的叠加，故风轮机多径回波为

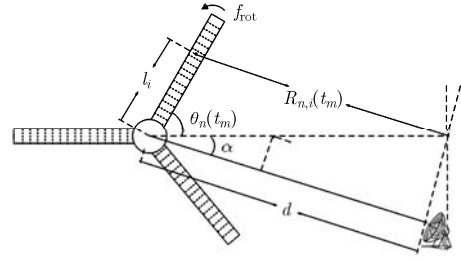


图 1 雷达照射风轮机示意图

$$c(t_n, t_m) = c_D(t_n, t_m) + \sum_{k=1}^K \sigma_k \left\{ \sigma_0 p\left(t_n - \frac{2r'_k}{c}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi r'_k}{\lambda}\right) + \sigma \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p\left(t_n - \frac{2R'_{k,i,j}(t_m)}{c}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi R'_{k,i,j}(t_m)}{\lambda}\right) \right\} \quad (4)$$

式中 σ_k 为第 k 条反射路径的反射系数， $2R'_{k,i,j}$ 为第 i 张叶片上第 j 个薄圆片与雷达之间的第 k 条反射路径的双程距离， $2r'_k$ 为风轮机与雷达之间的第 k 条反射路径的双程距离。

3 目标检测方法

图 2 为本文所提航管一次雷达抗风电场干扰目标检测方法的实现框图，具体步骤如下：

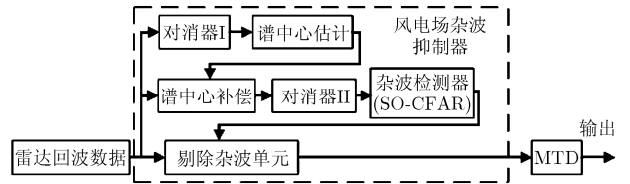


图 2 本文方法实现框图

第 1 步 固定杂波抑制 通过对消器 I 消除雷达回波数据中的固定杂波。

第 2 步 谱中心估计与补偿 估计雷达回波数据每个距离单元的谱中心，并将每个距离单元的谱中心移至零频。谱中心估计方法主要有传统的熵谱估计法、相关函数法、质心法等。质心法在保持较高精确度的条件下具有较小的计算量，便于工程实现，因此采用质心法。设航管一次监视雷达的 2 维回波数据为 $y(t_n, m)$ ，根据经典的周期图谱估计方法，其功率谱为

$$P_y(t_n, l) = \frac{1}{M} \left| \sum_{m=0}^{M-1} y(t_n, m) \exp\left(-j \frac{2\pi}{M} ml\right) \right|^2 \quad (5)$$

式中 t_n 为快时间， m 为脉冲数， $m = 0, 1, \dots, M-1, l$

为频率点, $l = 0, 1, \dots, M - 1$ 。根据周期图方法可以粗略地估计信号谱中心 $\hat{f}_c(t_n)$ 和 3 dB 谱宽 $\Delta\hat{f}_c(t_n)$, 则近似认为信号谱主要能量分布在 $[\hat{f}_c(t_n) - n\Delta\hat{f}_c(t_n) - \hat{f}_{\text{error}}(t_n), \hat{f}_c(t_n) + n\Delta\hat{f}_c(t_n) + \hat{f}_{\text{error}}(t_n)]$ 范围内。 $\hat{f}_{\text{error}}(t_n)$ 是 $\hat{f}_c(t_n)$ 在快时间 t_n 时刻所对应的距离单元的最大估计误差。 n 的取值与谱中心估计的精度和计算量有关, 一般可以认为信号谱为高斯型, 折中考虑算法精度和计算量, n 可取为 3^[13]。设 $\hat{f}_c(t_n)$ 对应的频率点为 N , $n\Delta\hat{f}_c(t_n) + \hat{f}_{\text{error}}(t_n)$ 所占的频率点数为 L , 采用质心法^[13], 可以得到归一化的信号谱中心多普勒频率为

$$f_c(t_n) = \frac{\frac{1}{M} \sum_{m=N-L}^{N+L} \frac{m}{M} P_y(t_n, \text{mod}(m, M))}{\frac{1}{M} \sum_{m=N-L}^{N+L} P_y(t_n, \text{mod}(m, M))} \quad (6)$$

式中 $\text{mod}(m, M)$ 是指 m 对 M 求模。

第 3 步 风电场杂波抑制 利用风电场杂波进入固定凹口的滤波器(对消器 II)后仍有大部分的能量剩余来确定杂波的位置并剔除杂波单元。风电场属于多杂波环境。在均值 CFAR 检测器中最小单元 (Smallest Of, SO)CFAR 方案可以解决单边滑窗中出现多个干扰杂波时引起检测性能下降的问题, 具有多杂波分辨能力。因此本文检测杂波采用 SO-CFAR 检测器, 虽然 SO-CFAR 有多杂波分辨能力, 但无法把所有杂波都分辨出来。因此, 需进行多次循环检测, 即先把检测到的杂波剔除, 再继续检测杂波, 直到没有杂波再被检测出为止。另外, SO-CFAR 虚警率(阈值)需折中考虑。

第 4 步 MTD 处理 最后, 将杂波抑制后的数据输入当前航管一次雷达 MTD 检测系统。

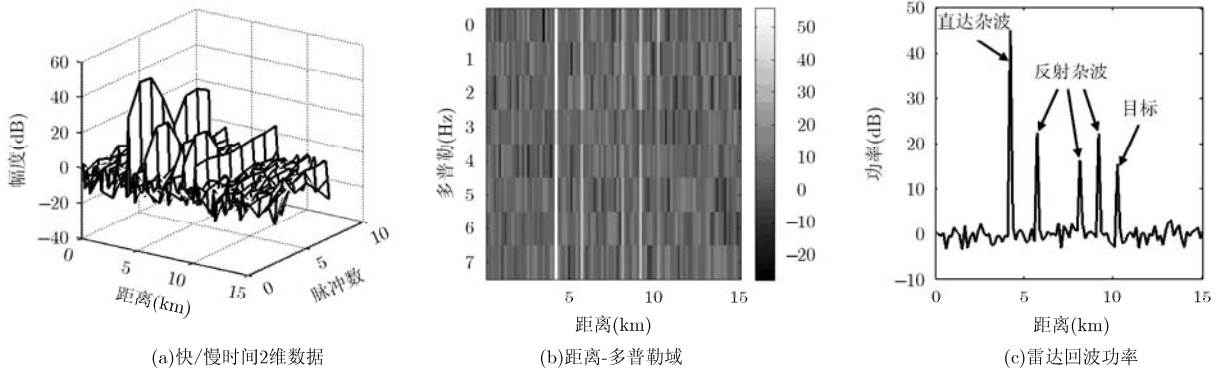


图3 雷达回波数据

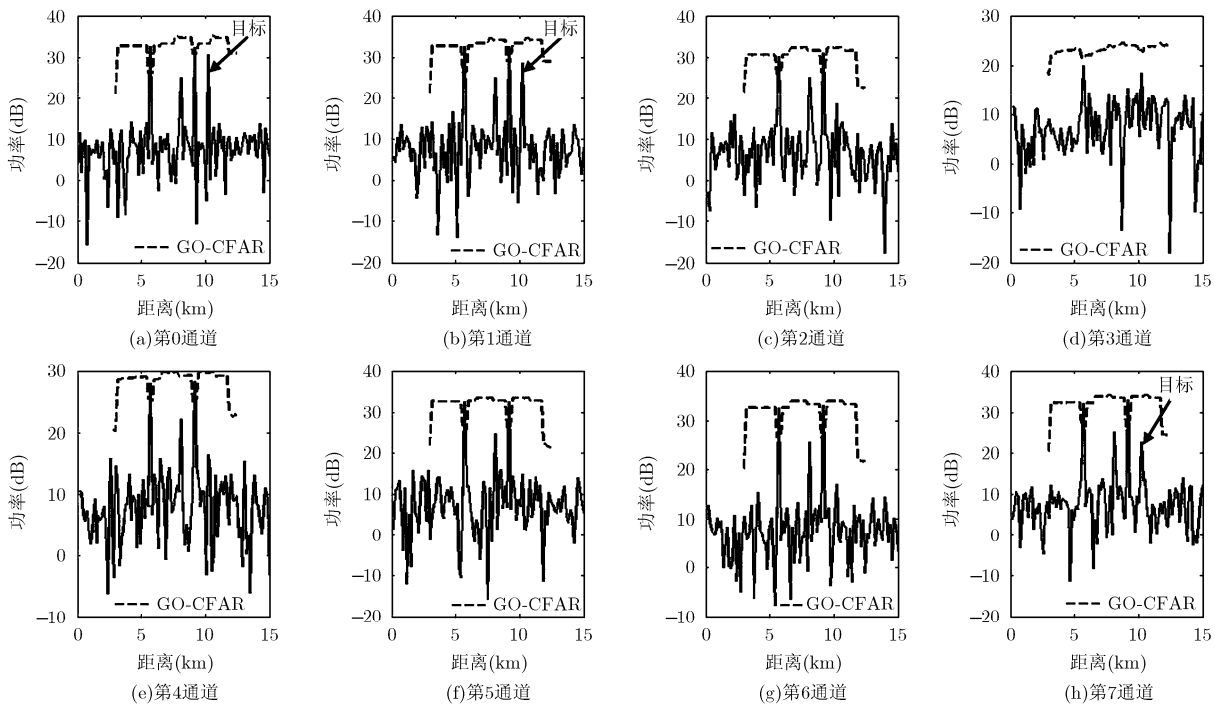


图4 当前航管一次雷达MTD检测结果(虚线“--”为GO-CFAR阈值)

4 仿真实验及分析

实验条件为：(1)雷达参数：载频为 2.9 GHz，脉冲宽度为 1 μ s，脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)为 1500 Hz, MTD 检测系统设置为 8 个多普勒滤波器，最大单元(Greatest Of, GO)CFAR 虚警率为 10^{-6} ；(2)风轮机参数：叶片数量为 3，叶片长度均为 34.4 m，风轮机叶片旋转速度为 17 r/min，叶片旋转面与雷达视线夹角为 10° ；(3)其它参数：风轮机回波有 4 条路径，直达杂波路径双程距离为 16.8 km，反射杂波路径双程距离分别为 22.8 km、32.4 km 和 38.6 km，反射路径的反射系数服从瑞利分布，反射路径平均回波功率为直达波功率的 0.01 倍，目标与雷达初始径向距离为 10.2 km，SNR=15 dB，CNR=45 dB。

雷达回波数据如图 3 所示。由于多径效应，风

电场杂波通常包含直达杂波和反射杂波。图 4 为根据风轮机位置的先验信息剔除直达杂波后当前航管一次雷达 MTD 系统的检测结果。反射杂波进入非零多普勒滤波器通道后，导致图 4 中第 0, 1 和 7 通道在 10.2 km 处的目标被附近的杂波遮蔽，并在第 0, 1, 2, 4, 5, 6 和 7 通道中的反射杂波所在距离单元 5.7 km 和 9.15 km 处出现虚警。

本文方法通过对雷达回波数据的每个距离单元进行谱中心补偿，使目标回波频率对准零频，此时，目标的主要能量集中在零频，旁瓣较低，如图5(b)所示。杂波抑制前、后对比可知，如图5(a)和图5(c)所示，本文方法已完全抑制风电场杂波。航管一次雷达MTD的检测结果是由所有多普勒通道的检测结果进行数据融合得到的。本文方法检测结果如图6所示，能很好地检测出目标。图7为蒙特卡洛实验取

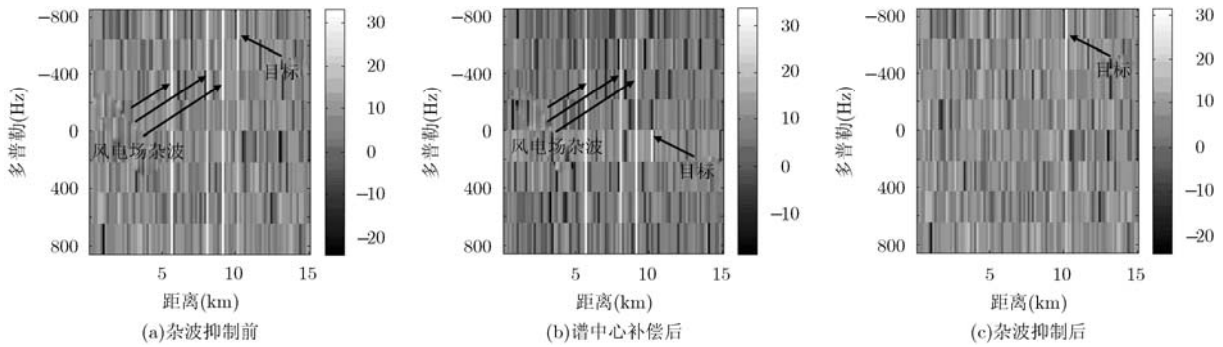


图 5 多径杂波(不包括直达波)抑制前、后对比

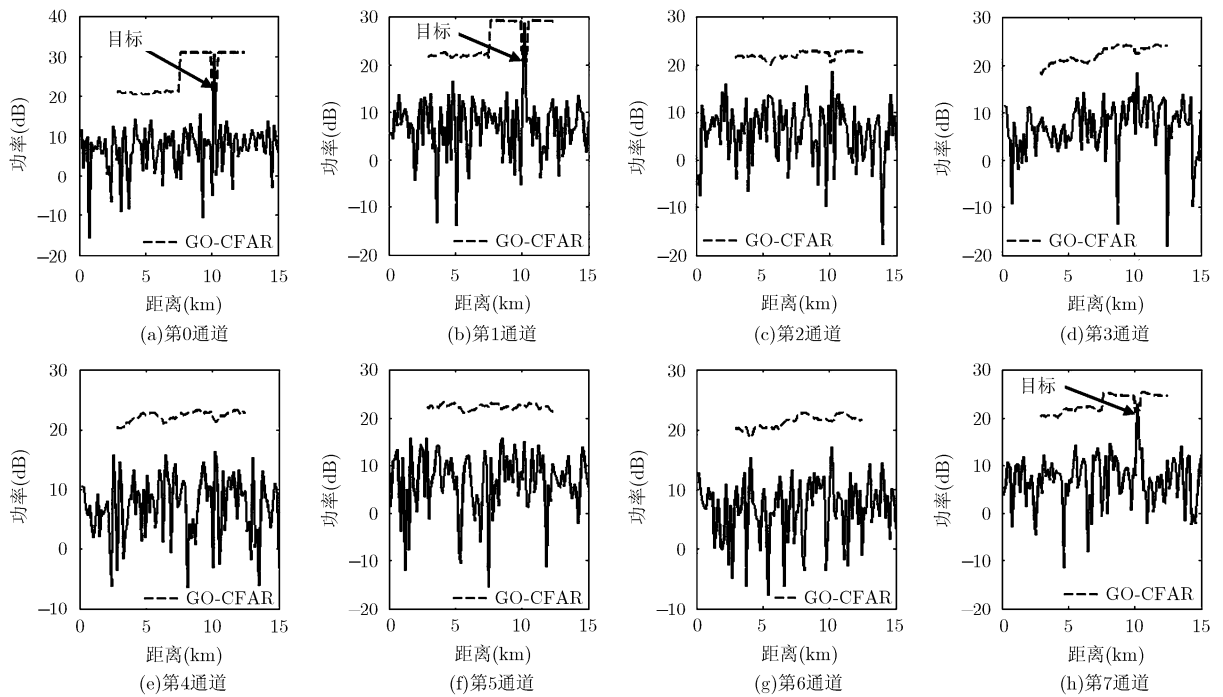


图 6 杂波抑制后检测结果(虚线“---”为 GO-CFAR 阈值)

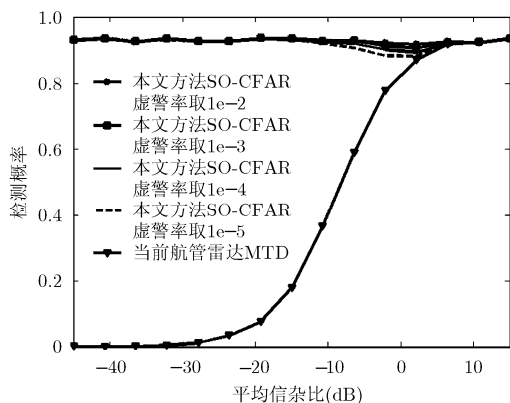


图 7 多径杂波进入目标背景单元时本文方法检测性能曲线

1000次, SO-CFAR虚警率分别取 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} 和 10^{-5} 的检测性能曲线。对于SO-CFAR不同的虚警率取值, 该方法的检测概率几乎不变。表明在该方法中, SO-CFAR虚警率可以在较大的范围内选取。当信杂比(此处杂波功率特指目标背景单元中杂波的平均功率)逐渐降低时, 当前航管雷达的检测性能急剧恶化, 甚至无法工作, 而本文方法的检测概率几乎不受信杂比的影响。

5 结束语

风电场杂波进入非零频多普勒滤波器, 可能导致现有航管一次雷达目标遮蔽和虚警率上升。本文主要研究在风电场杂波下的航管一次雷达目标检测方法。该方法在现有航管一次雷达 MTD 前端设置风电场杂波抑制器, 该抑制器利用风电场杂波进入固定凹口的滤波器后仍有大部分的能量剩余来确定杂波的位置并剔除杂波单元。文中给出了所提方法的目标检测结果, 实验结果与当前航管一次雷达 MTD 检测性能的对比表明本文方法对风电场杂波强度不敏感。当目标和杂波不在同一距离单元时, 该方法具有较好的工作性能。然而, 当目标和杂波在同一距离单元时, 该方法在剔除杂波的同时也会剔除目标。为使该方法更加稳健, 今后工作将继续解决目标和杂波在同一距离单元导致目标漏检的问题。

参考文献

- [1] 孙丽梅. 风能利用现状及前景分析[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 6(24): 9-16.
Sun Li-mei. Status quo of wind power utilization and its prospects analysis[J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2010, 6(24): 9-16.
- [2] Van Ewijk L J, and Vossen S H J A. Radar and communication disturbance as a consequence of wind turbines near the Noordzeekanaal[R]. TNO report FEL-03-C158, 2003.
- [3] Lute C and Wieserman W. ASR-11 radar performance assessment over a wind turbine farm[C]. Radar Conference, Kansas, 2011: 226-230.
- [4] Trisha Auld. Effects of wind turbines on radar: a pilot study of US concerns[D]. [Master dissertation], Murdoch University, 2011.
- [5] Lemmon J J, Carroll J E, Sanders F H, *et al.*. Assessment of the effects of wind turbines on air traffic control radars[R]. NTIA report TR-08-454, 2008.
- [6] Poupart G J. Wind farm impact on radar aviation interest — final report[R]. QinetiQ report FES W/14/00614/00/REP, 2003.
- [7] Vogt R J, Crum T D, Sandifer J B, *et al.*. A way forward, wind farm — Weather radar coexistence[R]. NOAA NEXRAD Radar Operations Center report, 2009.
- [8] Perry J and Biss A. Wind farm clutter mitigation in air surveillance radar[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007, 22(7): 35-40.
- [9] Raytheon. Report on advanced mitigating techniques to remove the effects of wind turbines & wind farms on the Raytheon ASR-IO/23SS radars [EB/OL]. <http://www.dti.gov.uk/energy/sources/renewables/planning/onshore-wind/aeronautical/page37015.html>, 2012.3.
- [10] Cornwall J M. Mitigation of wind turbine effects on FAA and military radars[R]. Adapted from Jason report JSR-07-126, 2007.
- [11] Pinto J, Matthews J C G, and Sarno G C. Stealth technology for wind turbines[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 126-133.
- [12] Gallardo-Hernando B. Wind turbine clutter observations and theoretical validation for meteorological radar applications[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(2): 111-117.
- [13] 黄勇, 彭应宁, 王秀坛, 等. 杂波谱中心 Doppler 频率和谱宽的快速估计算法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2001, 41(1): 33-36.
Huang Yong, Peng Ying-ning, Wang Xiu-tan, *et al.*. Fast method for estimating center Doppler frequency and bandwidth of clutter spectrum[J]. *Tsinghua University: Science and Technology*, 2001, 41(1): 33-36.

吴仁彪: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 主要研究方向为自适应信号处理、阵列信号处理、现代谱估计及其在雷达、卫星导航、空管等方面的应用。

毛建: 男, 1987年生, 硕士生, 研究方向为风电场雷达回波仿真、风电场杂波抑制技术。

王晓亮: 男, 1982年生, 讲师, 博士, 主要研究方向为雷达信号处理、图像处理与识别等。