

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.014

基于奇异值分解的风电场杂波微动特征提取*

何炜琨 郭双双 王晓亮 吴仁彪

(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:风电场作为一种特殊的大型建筑物,会影响航管监视雷达对飞机目标的准确探测。同时,由于风电场通常分布在某一大面积区域,风轮机之间具有多径传输特性,进而会影响航管监视雷达对飞机目标的定位和测速。因而,分析风电场杂波的微动特征有助于检测和识别风电场杂波信号,提高雷达探测目标的准确性。基于航管监视雷达风电场回波信号模型,利用奇异值分解技术分析风电场回波信号的微动特征,并构造相应的特征量实现其微动特征的提取。同时,在飞机目标存在背景下,提取了风电场回波的微动特征,并将其与飞机目标的多普勒特征进行对比分析,仿真结果证明了所提方法的有效性。

关键词:风电场;多径散射;奇异值分解;微动;特征提取

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Micro-motion features extraction of wind farm echoes based on singular value decomposition

He Weikun Guo Shuangshuang Wang Xiaoliang Wu Renbiao

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

Abstract: As a special kind of large buildings, wind farm will affect the accurate detection of the aircraft target by the air traffic control radar. Simultaneously, wind farms are usually composed of many wind turbines distributed in a large area and possess the characteristics of multipath transmission, so they can cause the traffic control radar to misjudge the location and radial speed of the targets. The analysis of the micro-motion features of wind farms echoes is of great significance for the identification and detection of the wind farms clutter accurately. Based on the model of wind farm echoes for air traffic control radar, the micro-motion feature of wind farm echoes signal is analyzed by using the singular value decomposition technique, and then the micro-motion feature of wind farm echoes signal is also extracted by constructing the corresponding characteristic variables. Simultaneously, the micro-motion feature of the wind farm echoes is analyzed in the presence of the aircraft target and compared with that of the aircraft target echoes. The simulation results demonstrate the effectiveness of the method proposed in this paper.

Keywords: wind farm; multi-path scattering; singular value decomposition; micro-motion; feature extraction

1 引言

近年来,风能作为一种“绿色”、天然、低成本以及环境友好型新能源已经在世界各国中备受关注。世界各国对风电产业的资金投入继续扩大,世界风力发电累计装机容量每年呈现指数增长的趋势。然而,用于风力发电

的风电场对雷达探测目标也会产生不容忽视的负面影响。风轮机作为一种特殊的运动的高大建筑物,可能对雷达探测目标产生显著影响,这类影响比一般静止障碍物的影响更为严重、更难消除。同时,风电场通常占地面积较广,且风轮机之间存在多径传输的特性,进而使得雷达在探测目标过程中产生大量的虚假警报,影响雷达对目标的位置、速度等信息的解析,导致航管雷达产生误检

收稿日期:2016-08 Received Date: 2016-08

* 基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民航局联合项目(U1533110)、国家自然科学基金(61571442)、中国民用航空局空中交通管理局科技项目、中央高校基本科研业务费(3122015D005)资助项目

测和误跟踪。因此研究分析风电场回波信号的微动特征对风电场杂波识别与抑制、保证航管雷达准确探测目标有重要的应用价值。

微动特征作为雷达目标自身的一种典型运动特征,通过现代信号处理技术提取目标的微动特征,进而应用到雷达对非合作目标的探测与识别领域,近年来受到了国内外研究者的广泛关注^[1-2]。雷达目标回波的“微多普勒效应”是雷达目标微动特征提取的主要理论依据^[3]。从目前研究现状来看,主要的微动特征分析与提取方法有时频分析法、图像处理法、正交匹配追踪分解法、经验模式分解法和高阶矩函数分析法等^[4]。其中,以时频分析方法最为常用,成为观察目标微多普勒效应最为直观的技术手段之一。但若实现微多普勒特征的识别与提取,时频分析方法还需要与其它信号处理算法相结合。奇异值分解(singular value decomposition, SVD)是线性代数中一种重要的矩阵分解,鉴于谱分析理论,奇异值分解根据它的主成分分解特性可作为雷达目标信息提取的有效方法^[5],例如目标的速度、频谱的周期以及频谱宽度均可从奇异矢量中提取出来。

本文首先通过奇异值分解技术对航管雷达单个风轮机回波信号的微动特征进行分析,并在此基础上,引入风电场多径散射信号模型,通过构造特征量实现风电场中直达回波信号和多径回波信号的微动特征提取,同时,将出现在雷达扫描场景中的飞机目标的多普勒特征与风电场杂波的微动特征进行对比分析,为航管雷达风电场杂波检测与识别提供理论依据。

2 基于SVD的单个风轮机回波信号的微动特征分析

首先,以风轮机的轮机舱为中心,垂直于叶片旋转面的方向为X轴,建立风轮机回波信号几何模型,如图1所示。

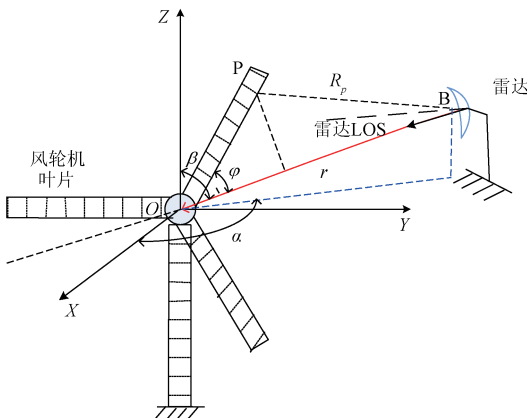


图1 风轮机回波信号的几何模型

Fig. 1 Schematic diagram of the geometry model of wind turbine echoes signal

图1中, R_p 为风轮机叶片上任一点散射点 P 到雷达的距离, φ 为雷达视线(line of sight, LOS)与风轮机叶片的夹角,雷达LOS在 XOY 面内的投影与 X 轴的夹角为雷达相对于风轮机的方位角 α , 雷达LOS与 Z 轴的夹角为雷达相对于风轮机的俯仰角 β , ρ_n 为第 n 个叶片上散射点的散射系数, 设雷达发射波波长为 λ , 传播速度为 c , 基于目标散射点叠加理论^[6], 则单个风轮机叶片回波信号为^[7]:

$$s_{blade}(t) = \sum_{n=1}^3 s_n(t) = \sum_{n=1}^3 \sum_{i=1}^P \rho_n(t) \cdot u(t - \frac{2R_p}{c}) \cdot \exp(-j \frac{4\pi R_p}{\lambda}) \quad (1)$$

假设 ρ_{tower} 表示轮机舱和桅杆上散射点的散射系数, r 表示风轮机叶片轴心到雷达的距离, 则可等效为具有零多普勒频率的静止目标的风轮机桅杆的回波信号表达式为:

$$s_{mast}(t) = \rho_{tower} \cdot u(t - \frac{2r}{c}) \cdot \exp(-j \frac{4\pi r}{\lambda}) \quad (2)$$

则风轮机回波信号的表达式为:

$$s_{WT}(t) = s_{blade}(t) + s_{mast}(t) \quad (3)$$

由于雷达处于扫描模式, 当雷达照射到风轮机时, 雷达LOS与风轮机起始叶片的夹角呈现随机性。雷达发射波束LOS经风轮机叶片调制后, 其回波的多普勒频率会呈现频带展宽的现象, 且其多普勒带宽由叶尖的径向速度决定^[8], 这使得风轮机杂波与一般静止目标杂波的特性有所不同。

SVD是一种通过分离信号分量来提取目标特征量的有效方法^[9]。这里为便于分析风电场杂波信号的微多普勒频谱特性, 将风电场回波信号的距离-多普勒谱矩阵 \mathbf{X} 作奇异值分解^[2]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (4)$$

式中: $\mathbf{\Sigma}$ 是由经奇异值分解后的奇异值组成的对角矩阵, $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}[\lambda_1^2, \lambda_2^2, \dots, \lambda_N^2]$, $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$, N 为奇异值的个数。 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 是标准正交矩阵, 分别是左奇异矢量组成的左奇异矩阵和右奇异矢量组成的右奇异矩阵。它的左奇异矢量表示回波信号的频率信息, 右奇异矢量表示回波信号的距离信息。因此, 风轮机回波信号频谱分量的特征可通过左奇异矢量来反映, 并利用其展现的谱宽特性作为待检测目标信号的特征来辨别信号的类型。

利用表1所示雷达风轮机仿真参数建立单个风轮机回波信号模型并分析风轮机回波信号的微动特征。由于雷达发射波采用S波段频率, 在不考虑多普勒模糊的情况下, 这里将雷达设置在相对风轮机方位角 $\alpha = 20^\circ$ 以及俯仰角 $\beta = 90^\circ$ 的位置。当雷达波束LOS与风轮机起始叶片的夹角 φ_0 分别为 0° 和 30° 时, 观察风轮机回波信号的距离-多普勒频谱及其奇异值分解后对应的左奇异矢量如图2所示。

表1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

参数类型	数值
发射信号频率	2.8 GHz
脉冲重复频率	1 000 Hz
脉冲宽度	1 μs
雷达扫描周期	7.2 s
叶片平均转速	20 r/min
叶片长度	26 m
桅杆高度	55 m
叶片个数	3
叶片中心到雷达的距离	10.2 km
相干处理脉冲个数	20

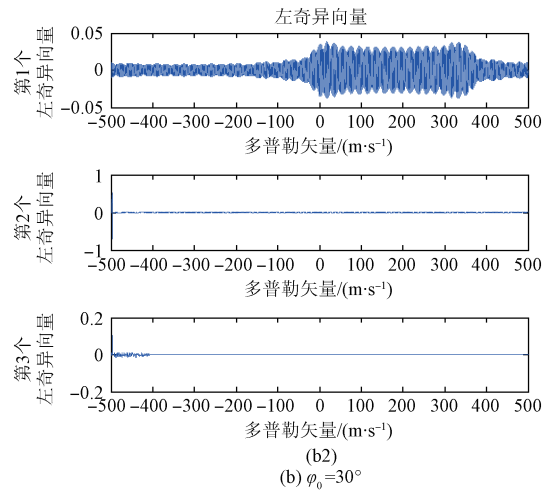


图2 风轮机回波信号的距离-多普勒谱(a1)、(b1)及其对应的前3个左奇异矢量(a2)、(b2)

Fig. 2 The range-Doppler spectrum of wind turbine echoes signal (a1), (b1) and its corresponding to the first three left singular vectors (a2), (b2)

图2中,左奇异矢量为风轮机回波信号的距离-多普勒频谱在频率轴上的投影,由它可以估计出风轮机回波的多普勒谱宽以及叶尖的径向速度。特征谱中的第1个奇异值对应的左奇异矢量表示风轮机3个叶片散射点回波叠加之后回波能量较强的频谱信息。可见,由第1个左奇异矢量可提取出风轮机回波信号的主要频谱特征。例如图2(b2)所示,第1个左奇异矢量表示与雷达LOS垂直的叶片回波的频谱信息,由于此时该叶片上的各个散射点距离雷达相等,导致经该风轮机叶片调制的雷达回波相位相同,叶片上各个散射点回波信号叠加后能量急剧增大,回波能量较强。并且,此时回波谱的最大多普勒频率值为风轮机叶尖的最大多普勒频率347.63 Hz(即

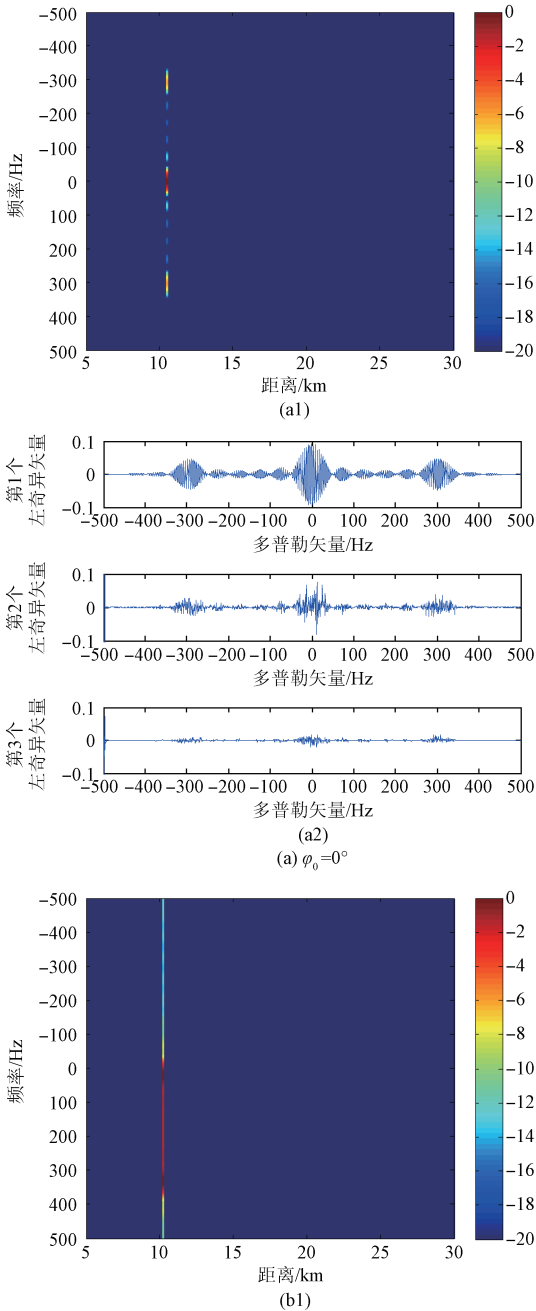
$$f_{dmax} = \frac{2v_{max}}{\lambda} = \frac{2v_{max}f_c}{c} = 347.63 \text{ Hz}$$

其中 v_{max} 是叶片叶尖

径向线速度, $v_{max} = 2\pi \frac{f_{rot}}{60} \cdot L \cdot \sin(\alpha) = 18.62 \text{ m/s}$, 与仿真结果一致)。利用左奇异矢量中风轮机叶片回波的微多普勒频谱信息作为风轮机直达回波信号的一种隐含特征,以应用于风电场回波信号特征的提取。

3 基于SVD的风电场回波信号的微动特征分析

风电场回波信号中除了存在直达回波信号外,还存在由于多径反射导致的多径回波信号。如图3所示,为简明分析,本文首先简单建立两个风轮机存在的情况下风电场多径回波信号模型^[10],风轮机坐标设置如表2所



示,则雷达探测到来自风轮机1的回波信号主要通过以下路径:1)雷达—风轮机1—雷达;2)雷达—风轮机1—风轮机2(反射体)—雷达;3)雷达—风轮机2(反射体)—风轮机1—雷达。

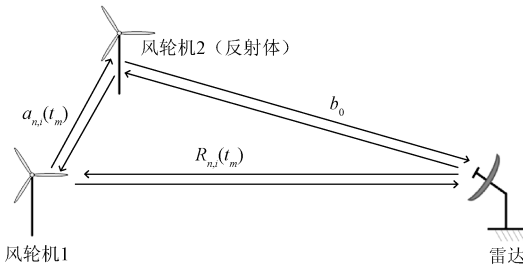


图3 风电场两个风轮机之间多径回波信号模型几何关系

Fig.3 Schematic diagram of the multipath model geometric relation between two wind turbine in the wind farms

由图3可以看出,风电场多径回波信号模型与单个风轮机回波信号模型的区别在于不同的双程距离函数。则风轮机1的第*n*个叶片的第*i*个散射点经风轮机2反射导致的多径回波信号的双程距离函数为:

$$2R'_{n,i}(t_m) = R_{n,i}(t_m) + a_{n,i}(t_m) + b_0 \quad (5)$$

其中, $R_{n,i}(t_m)$ 是雷达与风轮机1的第*n*个叶片的第*i*个散射点之间的径向距离, $a_{n,i}(t_m)$ 是风轮机1的第*n*个叶片的第*i*个散射点与风轮机2之间的径向距离, b_0 是雷达到风轮机2的径向距离。将 $2R'_{n,i}(t_m)$ 代换到单个风轮机叶片回波信号表达式中的 $2R_p$, 并改变散射点的散射系数 ρ_n , 即可得风电场多径回波信号模型。

表2 风轮机参数

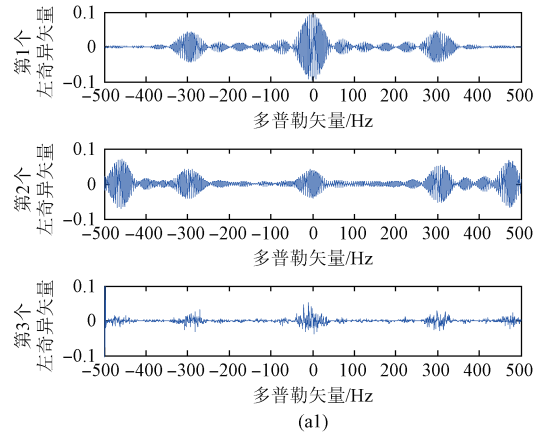
Table 2 The wind turbine parameters

风轮机编号	坐标/km	转速/(r · min ⁻¹)
风轮机1	(2,10)	20
风轮机2	(12,8)	20

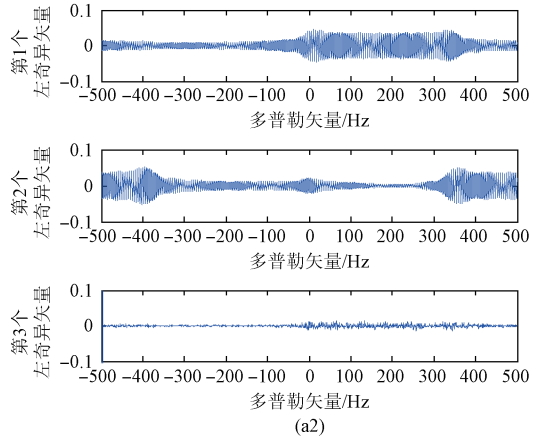
风电场杂波产生的多径散射特性使得风电场多径回波除了具有与单个风轮机回波类似特征外又具有其特殊性。由于风电场多径回波信号与风轮机直达回波信号相比,风轮机叶片上同一散射点回波的径向速度不同,从而引起风轮机叶尖上的散射点在经过多径反射后回波的多普勒频率与直达回波的不同,也即叶片回波的多普勒谱宽不同。在假定雷达 LOS 相对风轮机1的方位角一定的情况下,经风轮机2反射的雷达回波波束相对风轮机1的方位角则表现出随机性。基于风电场中两个风轮机之间多径回波信号模型,对风电场回波信号的距离-多普勒谱进行奇异值分解,得到几组风电场回波信号的距离-多普勒谱对应的左奇异矢量如图4所示。

由图4可以看出,风电场回波信号的微多普勒谱特征可以由特征谱中的前两个大奇异值所对应的左奇异矢量反映出来。与单个风轮机回波信号的频谱特征类似,第1个左奇异矢量主要反映风轮机直达回波中回波信号能量较强的叶片回波的频谱信息,第2个左奇异矢量则主要反映能量较强的叶片回波经风轮机反射导致的多径回波信号的频谱信息。

如图4(a1)所示,风轮机2的散射波波束相对风轮机1的方位角 $\alpha_2 = 60^\circ$, 风轮机1的起始叶片与雷达 LOS 的夹角 $\varphi_0 = 0^\circ$ 时,两个叶片位置相对雷达 LOS 对称,两

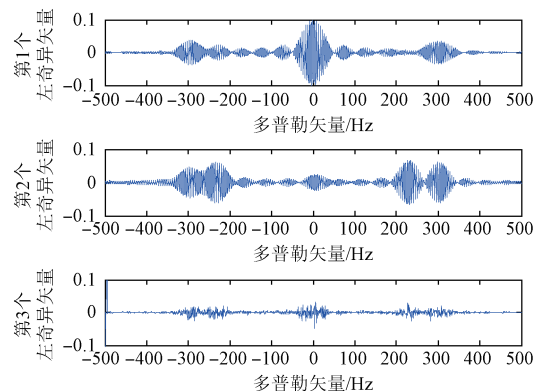


(a1)



(a2)

(a) 多径反射波的方位角 $\alpha_2 = 60^\circ$ 时 $\varphi_0 = 0^\circ$ (a1) 和 $\varphi_0 = 30^\circ$ (a2)
(a) The azimuth of multipath reflection echoes $\alpha_2 = 60^\circ$, $\varphi_0 = 0^\circ$ (a1) and $\varphi_0 = 30^\circ$ (a2)



(b1)

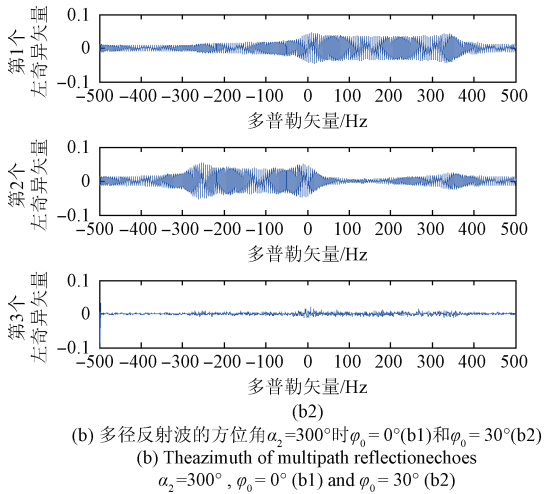


图4 风电场回波信号的距离-多普勒谱对应的
前3个左奇异矢量

Fig. 4 The first three left singular vectors corresponding to range-Doppler spectrum of wind turbine echoes signal

个叶片回波的相位对称,叶片上的散射点回波叠加后的幅度在正负频率上出现部分相互抵消,导致回波能量分散分布在正负频率轴上。通过将风电场回波信号的距离-多普勒矩阵作奇异值分解,得到的第1个左奇异矢量即表示部分直达路径回波的频谱分布信息。风电场直达波中3个叶片叶尖回波的频率可由多普勒频率计算公式^[11-12] $f_i(t_0) = f_{dmax} \sin(\frac{2\pi t_0}{T} + \frac{2\pi}{3}i)$ 得出,它们分别为0、-301.06、301.06 Hz($i=0,1,2$)。第2个左奇异矢量则表示包含经风轮机反射的多径回波的频谱分布信息,其回波中3个叶片叶尖处的多普勒频率分别为0、-531.68、531.68 Hz($i=0,1,2$)。此时,经风轮机2反射的多径回波出现了多普勒频率模糊的情况($PRF=1000$ Hz)。可见,仿真结果与理论值相吻合。

同理,如图4(b2)所示,若风轮机2的散射波波束相对风轮机1的方位角 $\alpha_2=300^\circ$,雷达LOS与风轮机1的起始叶片的夹角 $\varphi_0=30^\circ$ 时,即风轮机存在某个叶片直于雷达LOS,其回波能量达到最大,第1个左奇异矢量表示的风电场直达波中回波能量最大的叶片叶尖回波的多普勒频率为347.63 Hz。第2个左奇异矢量表示的风电场多径回波中回波能量的最大的叶片叶尖回波的多普勒频率为-266.30 Hz。并且此时经风轮机2反射的回波信号未出现多普勒频率模糊的现象。同样,仿真结果与理论值相符。因此,无论风电场回波信号是否出现多普勒频率模糊,均可以利用前两个左奇异矢量分析风电场回波信号的微多普勒特征。

4 风电场回波信号的微动特征提取

当雷达波束照射到风轮机杂波时,由于雷达发射信号的直达回波频谱与经风轮机反射的多径回波的微多普勒频谱均存在不同程度的展宽,且随着扫描时刻的变化而变化,即回波信号调制谱与其他雷达目标相比具有一定规律变化的频带展宽特性,因此,可利用反映在左奇异矢量中的调制谱谱宽特征^[13]来判别目标回波中是否存在风电场回波信号。为了识别和检测风电场直达和多径杂波,对文献[14]中用于识别不同类型目标(直升机、涡轮螺旋桨飞机以及涡轮喷气飞机)的其中两个特征进行改进,提出以下两个特征量实现风电场回波的微动特征提取。

特征1,大奇异值修正的归一化特征谱能量的熵:

$$f_1 = \zeta \cdot \delta \quad (6)$$

式中: $\zeta = \zeta / \ln N$ 表示归一化的能量熵, $\delta = \lambda_1^2 / \sum_{n=1}^N \lambda_n^2$ 表示归一化的大奇异值, $\zeta = - \sum_{n=1}^N \varepsilon_n \ln \varepsilon_n$, $\varepsilon_n = E_n / \sum_{n=1}^N E_n$, $E_n = |U_{n,1}|^2$ 表示第 n 个样本信号的第1个左奇异矢量信号能量, N 为样本信号长度。

特征2,特征谱能量的熵:

$$f_2 = - \sum_{n=1}^N p_n \ln p_n \quad (7)$$

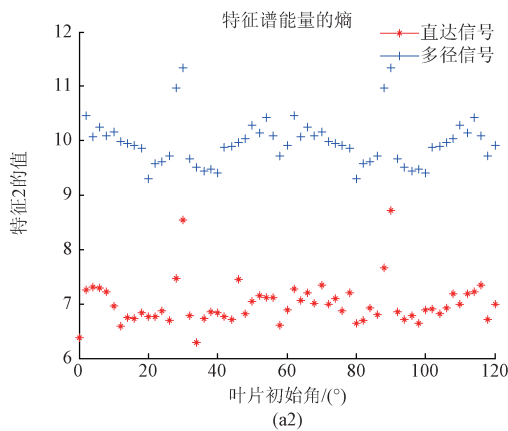
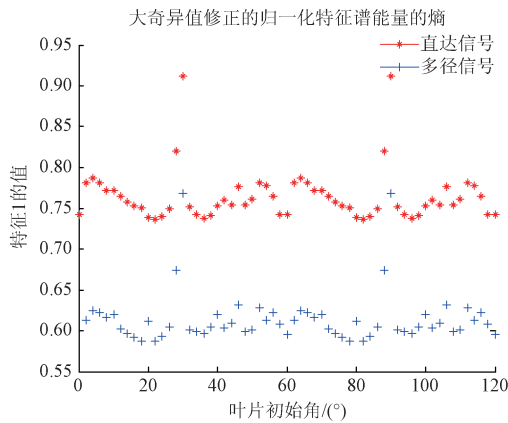
式中: $p_n = E_n / (\lambda_1^2 + \sum_{n=1}^N \lambda_n^2)$, $E_n = (|U_{n,1}|^2 + |U_{n,2}|^2)$, $|U_{n,1}|^2$ 和 $|U_{n,2}|^2$ 分别表示第 n 个样本信号的第1个和第2个左奇异矢量信号的能量。

这里,同样将雷达设置在相对风轮机1方位角 $\alpha_1=20^\circ$,经风轮机2的散射波波束相对风轮机1的方位角 α_2 分别为 60° 和 300° 。由于雷达回波随着雷达LOS与起始叶片夹角 φ_0 以 $0^\circ \sim 120^\circ$ 为一个周期呈周期性的规律变化,故这里仅提取 φ_0 为 $0^\circ \sim 120^\circ$ 一个周期内风电场杂波信号微动特征。

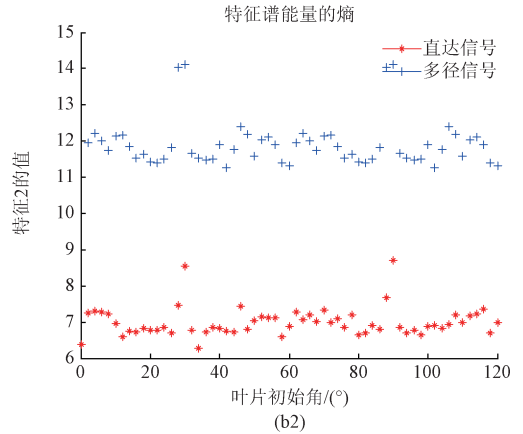
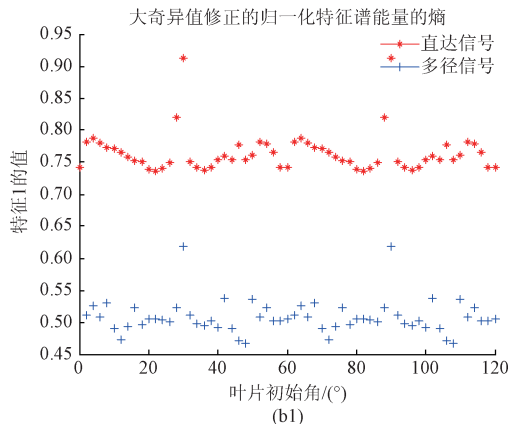
图5(a)和(b)分别反映了经风轮机2反射的回波波束相对风轮机1的方位角 α_2 为 60° 和 300° 时,风电场直达和多径回波信号的微动特征提取结果。可以看出,尽管经风轮机2反射的多径回波相对风轮机1的方位角 α_2 的角度发生了变化,随着雷达LOS与起始叶片夹角 φ_0 从 $0^\circ \sim 120^\circ$ 变化过程中,风电场中直达回波的微多普勒特征与多径回波的微多普勒特征仍然得以分开并提取。如图5(a1)所示,直达路径回波信号特征1的值与多径回波信号特征1的值相比较。这主要是由于多径回波信号特征谱的大奇异值个数比直达信号特征谱的大奇异值个数要多,导致多径回波特征谱的归一化的大奇异值比直达回波的要小,并且由于经风轮机反射后的多径回波

信号能量分布较为分散,导致多径回波信号的特征1的值随着 φ_0 的变化离散性更强。

根据熵的微观物理意义,系统的熵值越大,它所处的状态(这里指频谱分布)越是无序,离散性越强。如图5(a2)所示,由于风电场多径回波信号的特征谱中的大奇异值个数较多,即回波谱能量分布更为分散,同时,由于经风轮机反射导致的多径回波信号较直达路径回波信号更复杂,也即多径回波信号的不确定性要比直达路径回波信号的不确定性大,因此多径回波特征谱能量的熵值与直达回波特征谱能量的熵值相比较,且分布离散性



(a) 多径反射波方位角 $\alpha_2=60^\circ$ 时特征1(a1)和特征2(a2)
(a) Theazimuth of multipath reflection echoes $\alpha_2=60^\circ$, feature1(a1) and feature2(a2)



(b) 多径反射波方位角 $\alpha_2=300^\circ$ 时特征1(b1)和特征2(b2)
(b) Theazimuth of multipath reflection echoes $\alpha_2=300^\circ$, feature1(b1) and feature2(b2)

图5 风电场回波信号的微动特征提取结果

Fig. 5 The feature extraction results of wind farm echoes signals

更强,而直达波的特征2的值更加局限于均值附近以及随着 φ_0 的变化有较小的幅度变化。

综上所述,本文微动特征提取中所用的特征量不受多普勒频率模糊的影响,具有一定的鲁棒性和稳定性。能够很好地区分出雷达回波有无多径干扰的现象,为雷达视野范围内虚假目标的判定提供一定理论基础。

5 飞机目标存在背景下风电场杂波的微动特征提取

为了使雷达在探测飞机目标时,准确地检测风电场杂波产生的虚假目标,基于飞机目标的雷达回波模型^[15],利用大奇异值修正的归一化特征谱能量的熵和特征谱能量的熵两个微动特征提取风电场杂波和飞机目标的微动特征,并对其进行对比分析。

假设雷达扫描到风轮机时,某个飞机目标同时出现在雷达扫描场景内,飞机目标的参数设置如表3所示,其他设置参数与表1和2一致。仿真结果如图6所示。

表3 飞机目标参数

目标	坐标/km			速度/($m \cdot s^{-1}$)		
	x	y	z	V_x	V_y	V_z
飞机	5	25	2	200	0	60

图6为雷达扫描场景中出现风电场和飞机目标时,飞机目标回波、风轮机回波以及风电场多径回波信号的微动特征。如图6(a)所示,由于飞机目标的强散射性及其回波信号频谱在较窄的带宽内均匀分布,导致飞机目标的特征谱中仅存在一个大奇异值,并且由于回波谱的

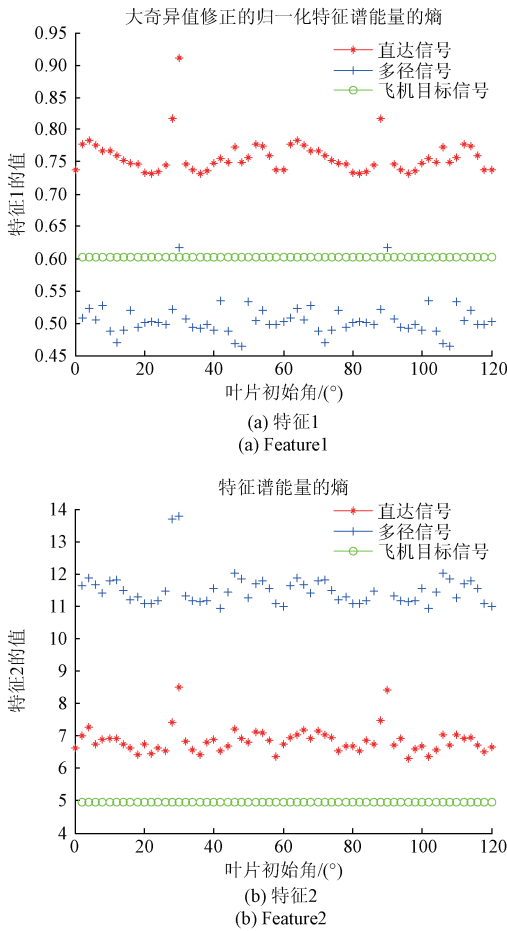


图 6 飞机目标存在时风电场杂波的微动特征提取
Fig. 6 The micro-motion feature extraction of wind farms echoes in the presence of the aircraft target

能量分布较为集中稳定,导致其归一化的特征谱能量的熵不随雷达 LOS 与风轮机起始叶片夹角 φ_0 (或雷达扫描时刻)的变化而变化。从而导致飞机目标信号的特征 1 的值在雷达 LOS 与风轮机起始叶片夹角 φ_0 在 $0^\circ \sim 120^\circ$ 变化范围内保持不变。同时,由于飞机目标的特征谱分布较为陡峭,即从大奇异值拐点后的奇异值均为 0,回波谱能量分布最为集中(能量分布越集中,特征 2 的值越小)。导致如图 6(b)所示,飞机目标特征谱能量的熵值最小且其幅值保持恒定不变。因此以上两个特征均可用来实现对飞机目标存在背景下风电场杂波的微动特征提取。

6 结 论

本文将奇异值分解技术应用于风电场回波的微多普勒特征分析与提取领域。首先,在风电场回波信号模型的基础上,利用奇异值分解中特征谱的奇异矢量分析了风电场回波信号的微动特征。同时,基于飞机目标回波

谱的能量分布较为集中性的特点,利用大奇异值修正的归一化特征谱能量熵以及特征谱能量熵两个微动特征,实现了飞机目标存在背景下风电场杂波微动特征的提取,上述两种特征从不同角度均能实现对风电场杂波和飞机目标的分类与识别,对检测风电场杂波导致的虚假目标有重要的应用价值,同时也为后续风电场杂波检测与抑制技术的研究提供理论依据。

由于实验条件的限制,本文研究方法目前尚在仿真 = 数据的基础上完成,利用雷达多次扫描风电场实测数据进行上述特征提取方法的论证与实验,将是下一步要考虑的研究工作。

参考文献

[1] 张群,罗迎,何劲. 雷达目标微多普勒效应研究概述[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011, 12(2):22-26.
ZHANG Q, LUO Y, HE J. Radar target micro-Doppler effect research overview [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science, 2011, 12(2): 22-26.

[2] HERNAN-VEGA O, LOPEZ-RODRIGUEZ P, ESCOT-BOCANEGRA D, et al. Non-cooperative target identification based on singular value decomposition[C]. International Radar Symposium (IRS), 2015:882-887.

[3] 维克托 C 陈. 吴顺君,杜兰,刘宏伟,译. 雷达中的微多普勒效应[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
CHEN V C. The Micro-Doppler Effect in the Radar[M]. Beijing: The Electronic Industrial Press, 2013.

[4] 张群,罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京:国防工业出版社,2013:99-190.
ZHANG Q, LUO Y. Micro-Doppler effect of radar targets[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013:99-190.

[5] DE WIT J J M, HARMANNY R I A, MOLCHANOV P. Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition [C]. International Radar Conference, 2014:1-6.

[6] RASHID L S, BROWN A K. Impact modeling of wind farms on marine navigational radar[C]. IET International Conference on Radar Systems, 2007:1-5.

[7] 何炜琨,石玉洛,王晓亮,等. 风轮机雷达回波的仿真与分析[J]. 系统仿真学报,2015, 27(1):50-56.
HE W K, SHI Y L, WANG X L, et al. The simulation and analysis of the radar echoes from wind turbine[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27 (1): 50-56.

[8] KONG F X, ZHANG Y, PALMER R. Characterization of micro-Doppler radar signature of commercial wind turbines [C]. Proceedings of SPIE-the International

Society for Optical Engineering, 2014, 9077 (2): 245-259.

- [9] FIORANELLI F, RITCHIE M, GRIFFITHS H. Classification of unarmed/armed personnel using the NetRAD multistatic radar for micro-doppler and singular value decomposition features [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2015, 12(9):1933-1937.
- [10] WU R B, MAO J, WANG X L, et al. Simulation of wind farm radar echoes with high fidelity [C]. International Conference on Signal Processing, 2012: 1998-2002.
- [11] GALLARDO-HERNANDO B, MUNOZ-FERRERAS J M, PEREZ-MARTINEZ F. Super-resolution techniques for wind turbine clutter spectrum enhancement in meteorological radars [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, 5(9):924-933.
- [12] 何炜琨, 郭双双, 王晓亮, 等. 扫描工作模式的航管监视雷达风电场回波信号的微多普勒特征分析[J]. 信号处理, 2015, 31(10):1240-1246.
- HE W K, GUO SH SH, WANG X L, et al. Micro-Doppler features analysis of wind farm echoes for air traffic control radar in scanning mode [J]. Journal of Signal Processing, 2015, 31(10):1240-1246.
- [13] DU L, LI L S, WANG B SH, et al. micro-doppler feature extraction based on time-frequency spectrogram for ground moving targets classification with low resolution radar [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(10): 3756-3763.
- [14] WANG B SH, LI W L, DU L, et al. Modeling of micro-Doppler signatures from rotor blades [C]. IET Radar Conference, 2015.
- [15] 姜悦. 基于微多普勒的飞机目标时频域特征提取方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- JIANG Y. Based on micro Doppler frequency domain when the plane target feature extraction method research[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.

作者简介



何炜琨(通讯作者), 2000年于中央民族大学获得学士学位, 2003年于中国民航大学获得硕士学位, 2012年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学副教授, 主要研究方向为雷达信号处理、风电场杂波抑制。

E-mail: hwkcauc@126.com

He Weikun (Corresponding author) received B. Sc. from Minzu University of China in 2000, M. Sc. from Civil Aviation University of China in 2003, and Ph. D. from Tianjin University

in 2012, respectively. Now she is an associate professor in Civil Aviation University of China. Her main research interests include radar signal processing and wind farm clutter suppression.



郭双双, 2014年于石家庄学院获得学士学位, 现为中国民航大学硕士研究生, 主要研究方向为风电场杂波信号特征提取与检测。

E-mail: ssguocauc@163.com

Guo Shuangshuang received B. Sc. from Shijiazhuang University in 2014. Now she is a M. Sc. candidate in Civil Aviation University of China. Her main research interest includes wind farm clutter signal feature extraction and detection.



王晓亮, 2004年于中国传媒大学获得学士学位, 2006年于北京航空航天大学获得硕士学位, 2010年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为中国民航大学讲师, 主要研究方向为雷达信号处理、图像处理与识别。

E-mail: wxl_ee@126.com

Wang Xiaoliang received B. Sc. from Communication University of China in 2004, M. Sc. from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2006, and Ph. D. from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2010, respectively. Now he is a lecturer in Civil Aviation University of China. His main research interests include radar signal processing, image processing and recognition.



吴仁彪, 1991年于西北工业大学同时获得学士学位和硕士学位, 1994年于西安电子科技大学获得博士学位, 1996年于西北工业大学获得博士后学位, 1997年于美国 Virginia Tech 大学智能交通运输(ITS)研究中心获得博士后学位, 1998年于美国 Florida 大学电子与计算机工程系获得博士后学位, 现为中国民航大学教授, 西安电子科技大学和天津大学博士生导师, 主要研究方向为自适应信号处理和阵列信号处理在雷达、通信和导航中的应用。

E-mail: rbwu@cauc.edu.cn

Wu Renbiao received M. Sc. from Northwestern Polytechnical University in 1991, Ph. D. from Xidian University in 1994, post-Ph. D. from NWPU in 1996, post-Ph. D. from Virginia Tech in 1997, and post-Ph. D. from University of Florida in 1998, respectively. Now he is a professor in Civil Aviation University of China and a Ph. D. supervisor in Xidian University and Tianjin University. His main research interests include adaptive signal processing, array signal processing and its application on the radar, communication and navigation systems.