

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107599

基于双站散射的地面背景下风电机叶片回波模拟*

黄力^{1,2} 代朝阳¹ 唐波^{1,2} 刘钢¹ 谢黄海¹

(1.三峡大学电气与新能源学院 宜昌 443002; 2.三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心 宜昌 443002)

摘要: 准确模拟风电机雷达回波信号,对解决风电机对雷达台站的无源干扰问题具有重要意义。针对现有方法仅能考虑单站散射的问题,根据多径效应,推导了地面背景下风电机叶片的双站回波公式,并根据镜等效像原理推导了风电机叶片与地面之间各散射路径的等效计算模型,提出了半空间中风电机叶片双站散射回波的模拟方法。以 Vestas-V82 型风电机作为算例,对地面背景下的风电机叶片双站回波进行模拟,并与单站回波进行对比分析,结果表明发射雷达与接收雷达位置不同时,会导致回波增加一组多普勒闪烁并减小回波的最大多普勒频率,该研究为风电机雷达回波信号的识别提供了参考。

关键词: 风电机叶片;双站散射;多径效应;回波;多普勒特征

中图分类号: TM315;TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Simulation of wind turbine blade echo in the presence of ground based on bistatic scattering

Huang Li^{1,2} Dai Chaoyang¹ Tang Bo^{1,2} Liu Gang¹ Xie Huanghai¹(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Accurate simulation of wind turbine radar echo signals and analysis of its Doppler characteristics are of great significance to solving the problem of passive interference from wind turbine to radar stations. Aiming at the problem that existing methods can only consider monostatic scattering, this paper derives the bistatic echo formula of the wind turbine blade in the presence of ground based on the multipath effect. The equivalent calculation model of the scattering paths between the wind turbine blade and the ground is deduced based on the principle of mirror image and the simulation method for the bistatic echo of wind turbine blade in a half-space is proposed. In the case of the Vestas-V82 wind turbine, the wind turbine blade bistatic echo in the presence of ground is simulated and compared with the monostatic echo. The results show that when the position of the transmitting radar and the receiving radar are different, it will cause the echo to increase a set of Doppler flicker and reduce the maximum Doppler frequency of the echo. It provides a reference for the identification of wind turbine radar echo signals.

Keywords: wind turbine blade; bistatic scattering; multipath effect; echo; Doppler characteristic

0 引言

随着风力发电近年来被广泛使用^[1-2],风电场对其周边雷达台站产生日益严重的无源干扰问题已经不可忽视^[3-4]。在雷达侧识别出风电机叶片回波并将其滤除是当前解决此问题的主流方法^[5],此法关键在于通过风电机叶片回波独特的多普勒特征准确识别出风电机叶片回波,而风电机叶片与地面之间存在复杂的电磁散射,要获取准确的风电机

叶片回波信号,地面这一因素必须加以考虑^[6]。

为准确获取地面背景下风电机叶片的多普勒特征,国内外学者对此作了大量研究。Zhang等^[7]和Kong等^[8]通过制作风电机缩比模型来测量地面背景下风电机雷达回波来获取地面背景下风电机叶片的多普勒特征,但制作缩比模型操作复杂且成本较高,一般用于数值计算的验证。文献[9-11]在分析地面与风电机叶片之间的复合电磁散射时,将散射点模型与四路径模型相结合,对地面背景下风电机叶片的雷达

收稿日期:2021-08-16

* 基金项目:国家自然科学基金(51977121)项目资助

回波进行了模拟,但在求解过程中并未考虑发射雷达与接收雷达不在同一位置的情况。文献[12-13]通过真型实验获取了地面背景下的风电机叶片的单站和双站回波,发现单双站回波存在较大差异,并指出使用双基地雷达系统是解决风电场杂波对雷达台站无源干扰问题的一种潜在方法。此外,文献[14]发现在风电机叶片形状对回波的多普勒特征有较大影响,因此,在求解地面背景下风电机叶片双站回波时还应考虑叶片形状对回波的影响。

为此,本文考虑发射雷达与接收雷达不在同一位置的情况,通过计算地面与风电机叶片之间各路径雷达信号传播的总路程,推导出了地面背景下风电机叶片双站回波公式。并根据镜像原理,将风电机叶片与地面之间耦合路径等效成了风电机叶片在自由空间中的双站散射路径,确定了各路径的计算模型,提出了基于散射电场的地面背景下风电机叶片双站回波算法,为风电机叶片雷达回波的识别与杂波抑制提供理论参考。

1 地面背景下风电机叶片单站回波算法

以风电机叶片轴心为坐标系中心,垂直于旋转平面的方向为 x 轴建立如图 1 所示坐标系。 r 为雷达到风电机叶片中心的距离, α 、 β 分别为方位角和俯仰角。 P 为风电机叶片上任意一点, R_p 为雷达到点 P 的距离, θ 为风电机叶片与 y 轴正方向的夹角, φ 为风电机叶片与雷达视线的夹角。根据高频散射的局部性原理^[15],可将目标与地面之间的复合电磁散射简化为多个路径来计算。在考虑地面与目标的复合电磁散射时往往只考虑直接散射路径(雷达—目标—雷达)、一次散射路径(雷达—地面—目标—雷达、雷达—目标—地面—雷达)以及二次散射路径(雷达—地面—目标—地面—雷达),忽略三次及三次以上的散射路径。

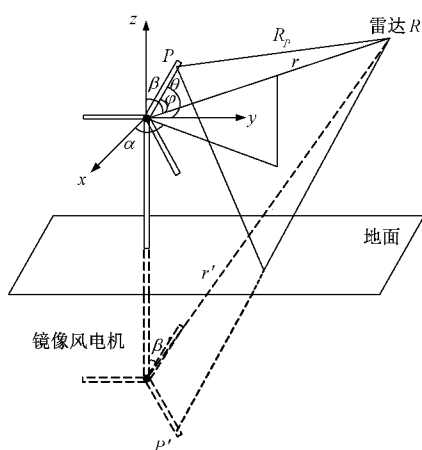


图 1 地面背景下风电机叶片单站回波求解示意图

文献[16]给出了空间中任意观测点风电机回波信号公式,即:

$$s_P(t) = \exp\left\{j\left[2\pi f_c t - \frac{2\pi R}{\lambda}\right]\right\} \quad (1)$$

式中: f_c 和 λ 分别为雷达信号的频率和波长, R 为雷达信号传播的路程。

从式(1)可以看出影响雷达回波的关键因素是雷达信号传播的路程 R 。因此求解出地面与风电机叶片之间各散射路径雷达信号传播的总路程,将其代入式(1)即可得到地面背景下风电机叶片各散射路径的回波。

根据传播路径,直接散射路径的回波可看作自由空间中风电机叶片的回波,将地面考虑成镜面,二次散射路径的回波可看作自由空间中关于地面的镜像风电机叶片的回波。雷达关于镜像风电机的方位角 α' 等于雷达关于风电机的方位角 α ,通过解三角形可求解出雷达到镜像风电机中心的距离 r' 、雷达关于镜像风电机的俯仰角 β' 。

r' 、 α' 、 β' 确定后可根据雷达信号的传播路径和几何关系确定各路径雷达信号传播的总路程。结合式(1)空间任意观测点风电机回波信号公式即可求解镜像风电机雷达回波信号,进而可得 4 条路径的风电机叶片回波信号。

将求得的 4 条路径的风电机叶片回波进行矢量叠加,即可得到地面背景下的风电机叶片单站回波。此法在求解地面背景下的风电机叶片回波时假设信号发射雷达与信号接收雷达位于同一位置,而在双基地雷达系统中,信号发射雷达与信号接收雷达的位置相距较远,地面背景下风电机叶片单站回波算法将不再适用。为模拟双站散射的地面背景下风电机叶片回波,需重新推导地面与风电机叶片之间各散射路径雷达信号传播的总路程。

2 地面背景下风电机叶片双站回波算法

2.1 基于积分算法的地面背景下风电机叶片双站回波模拟方法

将风电机叶片的散射点模型和雷达信号在风电机叶片与地面之间的传播路径相结合可以得到如图 2 所示的地面背景下风电机叶片双站回波求解示意图。

图 2 中 L 为叶片风电机叶片长度; H 为风电机桅杆高度; r_1 、 r_2 分别为发射雷达和接收雷达到风电机中心的距离;点 P 为风电机叶片上任一散射点, l_1 为点 P 到风电机中心的距离; R_{p1} 、 R_{p2} 分别为发射雷达和接收雷达到散射点 P 的距离; r'_1 、 r'_2 分别为发射雷达和接收雷达到镜像风电机中心的距离;点 P' 为点 P 的镜像, R'_{p1} 、 R'_{p2} 分别为发射雷达和接收雷达到点 P' 的距离。由文献[9]可知风电机叶片的回波信号仅与雷达信号传播的总路程有关,因此求解地面背景下风电机叶片的双站回波关键在于确定各路径雷达信号传播的总路程。

设散射点 P 对应 4 条路径的雷达信号传播的总路程为 $R_{P,n}(t)$, $n = 1, 2, 3, 4$, 分别对应 4 条路径的总路程。根据图 2 计算 $R_{P,n}(t)$, $n = 1, 2, 3, 4$, 得:

$$R_{P,1}(t) = R_{p1} + R_{p2} \quad (2)$$

$$R_{P,2}(t) = R_{p1} + R'_{p2} \quad (3)$$

$$R_{P,3}(t) = R'_{p1} + R_{p2} \quad (4)$$

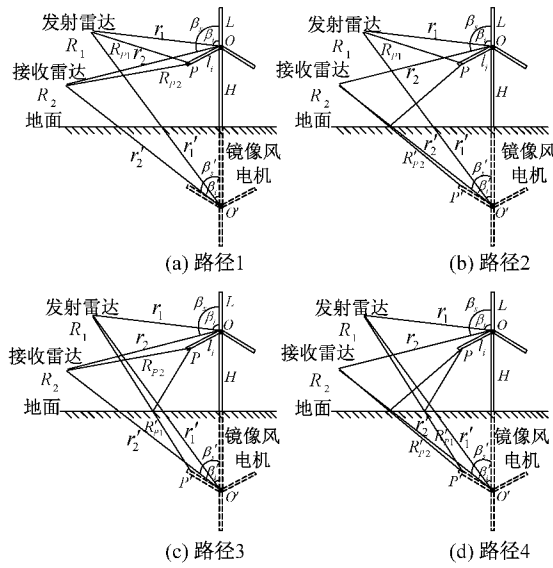


图 2 地面背景下风电机叶片双站回波求解示意图

$$R_{P,1}(t) = R'_{P1} + R'_{P2} \quad (5)$$

R_{P1} 、 R_{P2} 分别可根据发射雷达相对于风电机叶片的方位角 α_i 、 β_i 以及发射雷达到风电机叶片中心的距离 r_1 确定和接收雷达相对于风电机叶片的方位角 α_s 、 β_s 以及接收雷达到风电机叶片中心的距离 r_2 确定。 R'_{P1} 、 R'_{P2} 分别可根据发射雷达相对于镜像风电机叶片的方位角 α'_i 、 β'_i 以及发射雷达到镜像风电机叶片中心的距离 r'_1 确定和接收雷达相对于镜像风电机叶片的方位角 α'_s 、 β'_s 以及接收雷达到镜像风电机叶片中心的距离 r'_2 确定。在发射雷达与接收雷达位置确定后 α_i 、 β_i 、 r_1 、 α_s 、 β_s 、 r_2 即可确定, 可视为已知量。 α'_i 、 α'_s 根据 α_i 和 α_s 确定 $\alpha'_i = \alpha_i$ 、 $\alpha'_s = \alpha_s$ 。在三角形 OR_1O' 和三角形 OR_2O' 中 OR_1 长度为 r_1 、 OR_2 长度为 r_2 、 OO' 长度为 $2H$ 、 R_1O 和 R_2O 与 OO' 的夹角分别为 $\pi - \beta_i$ 和 $\pi - \beta_s$ 。 β'_i 、 β'_s 、 r'_1 、 r'_2 可通过解三角形求得。

$$\begin{cases} r'_1 = \sqrt{r_1^2 + 4H^2 - 4r_1H \cos(\pi - \beta_i)} \\ r'_2 = \sqrt{r_2^2 + 4H^2 - 4r_2H \cos(\pi - \beta_s)} \\ \beta'_i = \arccos \frac{4H^2 + r_1'^2 - r_1^2}{4Hr'_1} \\ \beta'_s = \arccos \frac{4H^2 + r_2'^2 - r_2^2}{4Hr'_2} \end{cases} \quad (6)$$

上述参量确定后根据几何关系就可确定 R_{P1} 、 R_{P2} 、 R'_{P1} 、 R'_{P2} 。

确定 R_{P1} 、 R_{P2} 、 R'_{P1} 、 R'_{P2} 后, 将其代入将式(2)~(5)即可求得散射点 P 的 4 条路径的雷达信号传播的总路程, 将所求得的 4 条路径的雷达信号传播的总路程代入式(1), 可得散射点 P 的 4 条路径的回波为:

$$s_{P1} = \exp\{2\pi f_c t\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(r_1 + r_2)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi(l_1 \cos\varphi_1 + l_i \cos\varphi_2)}{\lambda}\right\} \quad (7)$$

$$s_{P2} = \exp\{2\pi f_c t\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(r_1 + r'_2)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi(l_1 \cos\varphi_1 + l_i \cos\varphi'_2)}{\lambda}\right\} \quad (8)$$

$$s_{P3} = \exp\{2\pi f_c t\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(r'_1 + r_2)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi(l_1 \cos\varphi'_1 + l_i \cos\varphi_2)}{\lambda}\right\} \quad (9)$$

$$s_{P4} = \exp\{2\pi f_c t\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(r'_1 + r'_2)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{2\pi(l_1 \cos\varphi'_1 + l_i \cos\varphi'_2)}{\lambda}\right\} \quad (10)$$

式中: f_c 和 λ 为入射波频率和波长; φ_1 、 φ_2 分别为 OR_1 、 OR_2 与风电机叶片的夹角; φ'_1 、 φ'_2 分别为 $O'R_1$ 、 $O'R_2$ 与镜像风电机叶片的夹角。由空间中两直线的夹角公式, φ_1 、 φ_2 、 φ'_1 、 φ'_2 的余弦值为:

$$\begin{cases} \cos\varphi_1 = \sin\beta_i \sin\alpha_i \cos\theta + \cos\beta_i \sin\theta \\ \cos\varphi_2 = \sin\beta_s \sin\alpha_s \cos\theta + \cos\beta_s \sin\theta \\ \cos\varphi'_1 = \sin\beta'_i \sin\alpha'_i \cos\theta' + \cos\beta'_i \sin\theta' \\ \cos\varphi'_2 = \sin\beta'_s \sin\alpha'_s \cos\theta' + \cos\beta'_s \sin\theta' \end{cases} \quad (11)$$

式中: α_i 、 α_s 分别为发射雷达和接收雷达相对于风电机叶片的俯仰角; α'_i 、 α'_s 分别为发射雷达和接收雷达关于镜像风电机叶片的方位角; β_i 、 β_s 分别为发射雷达和接收雷达相对于风电机叶片的俯仰角; β'_i 、 β'_s 分别为发射雷达和接收雷达关于镜像风电机叶片的俯仰角; θ 、 θ' 分别为风电机叶片和镜像风电机叶片与 y 轴的夹角。

去掉式(7)~(10)的载波和恒定相位项, 可得基带信号, 在叶片的长度 L 上对基带信号进行积分, 可得到各路径单个叶片的回波信号, 再将所有叶片的回波信号相叠加, 就可得到各路径所有叶片总的回波。设风电机叶片有 N 个叶片, OR_1 、 OR_2 与风电机叶片的夹角和 $O'R_1$ 、 $O'R_2$ 与镜像风电机叶片的夹角分别为 φ_{1k} 、 φ_{2k} 、 φ'_{1k} 、 φ'_{2k} ($k = 1, 2, \dots, N$) 则各路径所有叶片总的回波为:

$$S_1(t) = \sum_{k=1}^{k=N} L \cdot \exp\left\{\frac{\pi L (\cos\varphi_{1k} + \cos\varphi_{2k})}{\lambda}\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{L (\cos\varphi_{1k} + \cos\varphi_{2k})}{\lambda}\right\} \quad (12)$$

$$S_2(t) = \sum_{k=1}^{k=N} L \cdot \exp\left\{\frac{\pi L (\cos\varphi_{1k} + \cos\varphi'_{2k})}{\lambda}\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{L (\cos\varphi_{1k} + \cos\varphi'_{2k})}{\lambda}\right\} \quad (13)$$

$$S_3(t) = \sum_{k=1}^{k=N} L \cdot \exp\left\{\frac{\pi L (\cos\varphi'_{1k} + \cos\varphi_{2k})}{\lambda}\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{L (\cos\varphi'_{1k} + \cos\varphi_{2k})}{\lambda}\right\} \quad (14)$$

$$S_4(t) = \sum_{k=1}^{k=N} L \cdot \exp\left\{\frac{\pi L (\cos\varphi'_{1k} + \cos\varphi'_{2k})}{\lambda}\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{L (\cos\varphi'_{1k} + \cos\varphi'_{2k})}{\lambda}\right\} \quad (15)$$

在得到风电机叶片各路径回波后,将各路径风电机叶片总的回波相叠加即可得到地面背景下风电机叶片的双站回波为:

$$S_{\text{Madr}}(t) = \sum_{n=1}^{n=4} S_n(t) \quad (16)$$

显然本节基于积分算法的地面背景下风电机叶片双站回波模拟方法在求解过程中将风电机叶片简化成了散射点模型,该模型虽然较为完整的体现出风电机叶片回波的多普勒特征,但其忽略了风电机叶片形状对回波的影响。为准确模拟风电机叶片的散射情况,需对真实风电机叶片模型提出相应的回波求解方法,进而实现地面背景真实风电机叶片双站回波的精确求解。

2.2 基于散射电场的地面背景下风电机叶片双站回波模拟方法

把风电机叶片与地面之间的复合电磁散射简化成在镜像方向上场的相互作用是多路径模型的基本思想,这样风电机与地面之间的复合电磁散射就可以简化成风电机叶片与无限大平面的相互作用,其总场可以用四条路径的散射场的相干叠加来表示。

如图3所示,路径1(①→②)雷达信号在直接照射风电机叶片后回到信号接收雷达是风电机叶片的单次散射场;路径2和3(①→②→③)分别为风电机叶片前向散射场经过地面反射后的散射场和地面反射场经过风电机叶片散射后的场;路径4(①→②→③→④)是地面反射场经过风电机叶片散射后再通过地面反射后的场。若雷达信号的入射方向为 β_i ,散射方向为 β_s ,则计算风电机叶片在自由空间中 β_s 的双站散射场就可得到路径1对应的散射电场 $E_{\text{path-1}}$ 。

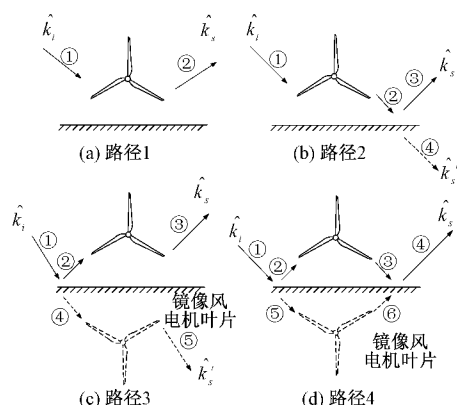


图3 风电机叶片多路径复合散射示意图

四路径思想通常会结合镜像等效原理来分析^[17],即将风电机叶片与地面的耦合路径(2,3,4)用风电机叶片在自由空间的双站路径来等效,这样可以通过计算风电机叶片在自由空间中的双站散射场的方法得到耦合路径的散射场。如图3所示,路径2的等效路径为①→②→④,若雷达信号的入射方向为 β_i ,散射方向为 β_s ,则计算风电机叶片

在自由空间中 $\pi-\beta_s$ 方向的双站散射场即可得到路径2对应的散射电场 $E_{\text{path-2}}$;路径3的等效路径为①→④→⑤,若雷达信号的入射方向为 β_i ,散射方向为 β_s ,计算镜像风电机叶片在自由空间中 $\pi-\beta_s$ 方向的双站散射场即可得到路径3对应的散射电场 $E_{\text{path-3}}$;路径4的等效路径为①→⑤→⑥→④,若雷达信号的入射方向为 β_i ,散射方向为 β_s ,计算镜像风电机叶片在自由空间中 β_s 方向的双站散射场即可得到路径4对应的散射电场 $E_{\text{path-4}}$ 。

至此将风电机叶片与地面的4条散射路径全部等效成了风电机叶片在自由空间中的散射模型,通过求解风电机叶片自由空间中的散射电场即可得到各路径的散射电场。风电机叶片作为电大尺寸物体,其结构复杂,为兼顾计算精度与计算速度,采用物理光学法和矩量法的混合算法(PO-MOM)对风电机叶片自由空间中的散射电场进行求解。由于PO-MOM算法已经较为成熟,本文在此不再赘述,PO-MOM算法求解风电机叶片散射电场具体求解思路见文献[18]。

得到各路径的散射电场后,将各路径的散射电场进行叠加即可得到风电机叶片与地面复合电磁散射的总场。

$$E = E_{\text{path-1}} + E_{\text{path-2}} + E_{\text{path-3}} + E_{\text{path-4}} \quad (17)$$

目标的散射电场与目标回波中的基带信号相对应^[19],在得到地面背景下风电机叶片对应的散射电场 E 后即可得到地面背景下风电机叶片的雷达回波。

3 地面背景下风电机叶片双站回波模拟

3.1 基于积分算法的地面背景下风电机叶片双站回波模拟

以Vestas-V82风电机叶片为仿真模型,风电机叶片的长度为44 m,桅杆高度为70 m,叶片转速为10 r/min,雷达信号的发射频率为1 GHz,脉冲重复频率PRF为1 000 Hz,仿真时间为6 s,发射雷达的方位角和俯仰角分别为 90° 和 30° ,接收雷达的方位角和俯仰角分别为 90° 和 60° ,发射雷达与接收雷达到风电机叶片中心的距离均为10 km,风电机叶片的初始位置与Y轴正方向夹角为 90° 。根据2.1节推导的地面背景下风电机叶片双站回波公式得到地面背景下风电机叶片双站回波,其时频域波形如图4所示。图5为相同仿真条件地面背景下风电机叶片单站回波的时频域波形。

地面背景下的风电机叶片回波信号计算了4条路径的回波信号,相比于自由空间中风电机叶片回波,多出的3条路径是风电机与地面的耦合路径(路径2,路径3与路径4)。但是当发射雷达与接收雷达位置相同时(单站),路径2与路径3的传播轨迹相同,仅方向相反,雷达信号总的传播路程相同,其多普勒闪烁产生了重叠现象,因此路径2与路径3对应的闪烁能量高于路径1与路径4对应的闪烁的能量,并使得多出的3条路径只多了两组多普勒闪烁。如图5所示,当发射雷达与接收雷达位置不同时(双站),路径2与路径3

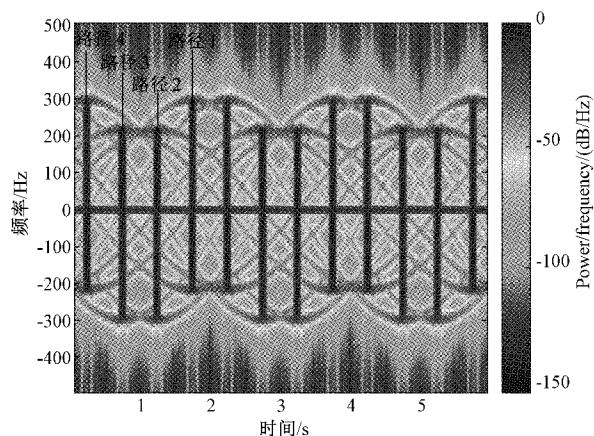


图 4 基于积分算法的地面背景下风电机叶片双站回波

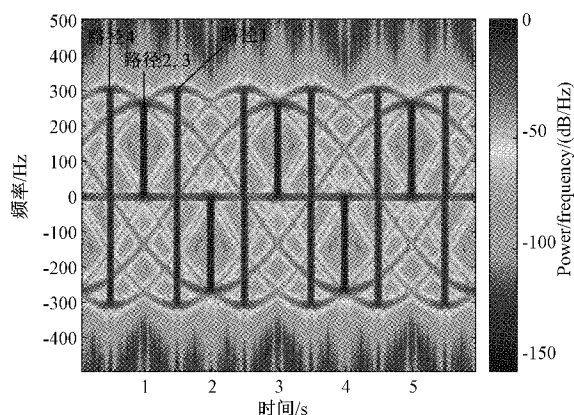


图 5 基于积分算法的地面背景下风电机叶片单站回波

的传播轨迹不再相同,故而雷达信号总的传播路程不相同,路径 2 于路径 3 产生的多普勒闪烁不再重叠,所以地面背景下风电机叶片双站回波有 4 组多普勒闪烁。

3.2 基于散射电场的地面背景下风电机叶片双站回波模拟

根据实际的 Vestas-V82 风电机叶片建立叶片的三维仿真模型,叶片模型如图 6 所示。

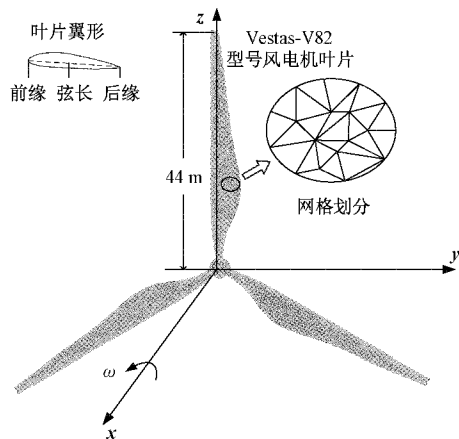


图 6 Vestas-V82 风电机叶片模型

采用和 3.1 节相同的仿真参数,得到地面背景下风电机叶片 4 条路径回波信号的时频域波形分别如图 7 所示。

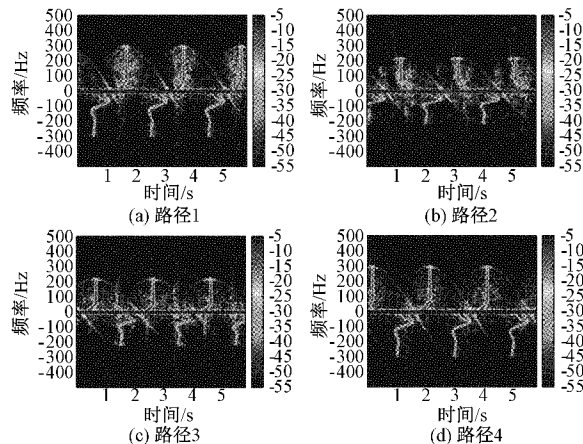


图 7 各路径回波时频域波形

双基多普勒频移为 $f_d = 2f_c v \cos(\delta/2)/c$, 其中 f_c 为入射波频率, c 为光速, v 为最大线速度, δ 为双基角。通过计算可知,44 m 长的叶片,当转速为 10 r/min 时,叶片最大线速度 $v = 46.07$ m/s,路径 1 与路径 4 对应计算模型的双基角为 30° ,故路径 1 与路径 4 对应的最大多普勒频率为 296.5 Hz;路径 2 与路径 3 对应的计算模型双基角为 90° ,故路径 2 与路径 3 对应的最大多普勒频率为 217.1 Hz。与仿真结果一致。发射雷达和接收雷达位置相同时(单站)可看作双基地雷达双基角为零的特殊情况,即 $\cos(\delta/2)$ 等于 1,而在双基地雷达中 $\cos(\delta/2)$ 小于 1,所以地面背景下风电机叶片双站回波最大多普勒频移小于地面背景下风电机叶片单站回波最大多普勒频移。

在得到各条路径的回波信号后,将其进行矢量叠加即可得到地面背景下风电机叶片双站回波时频域波形如图 8 所示。

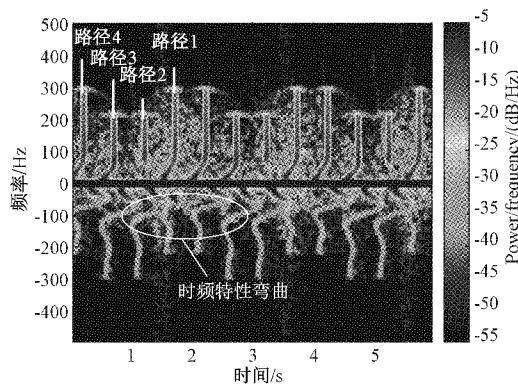


图 8 地面背景下风电机叶片双站回波时频域波形

对比图 4 和 8 可以发现,由于其求解的都是双站散射的地面背景下的风电机叶片回波,所以其时频域波形均有 4 组闪烁,因为仿真参数相同,所以最大多普勒频率相同。而基于散射电场的地面背景下风电机叶片双站回波算法根

据镜像等效原理将地面与风电机叶片之间的耦合路径等效成了风电机叶片在自由空间中的双站散射路径,在计算过程中对风电机叶片整体进行求解,没有对风电机叶片模型进行简化,风电机叶片复杂的外形使得回波的时频域有闪烁弯曲特征。出现正多普勒闪烁时,雷达照射到的是风电机叶片的前缘,前缘结构较厚,回波的能量大。出现负多普勒闪烁时,雷达照射到的是风电机叶片的后缘,后缘结构较薄,回波的能量小,故使得正负多普勒闪烁有明显的能量差异,结果与实际更接近。

风电机有成百上千种型号,不同型号的风电机其叶片形状也千差万别,不同型号的风电机对应的雷达回波信号的时频特征也各不相同。因此准确求解出风电机的回波信号,获取其多普勒特征可以准确的判断出风电机的型号,为风电机雷达回波信号的识别与杂波抑制提供参考。

4 结 论

为准确模拟出地面背景下风电机叶片回波,考虑发射雷达与接收雷达位置不同的情况,根据雷达信号的传播路径,推导出了地面背景下风电机叶片双站回波公式。

以 Vestas-V82 风电机叶片为作为算例,对地面背景下风电机叶片双站回波进行模拟,结果表明地面背景下风电机叶片单站回波与双站回波存在较大差异,地面背景下风电机叶片双站回波比单站回波多一组多普勒闪烁,并且地面背景下风电机叶片双站回波最大多普勒频移小于单站回波最大多普勒频移。为风电机雷达回波信号的识别与杂波抑制提供了参考。

风电场对雷达站的影响属于广域空间中电大尺寸金属散射体大规模阵列条件下的行业系统级电磁兼容问题,本文提出的方法仅模拟了地面背景下单台风电机回波,后续还将开展地面半空间限定下多台阵列分布风电机的回波模拟研究。

参考文献

- [1] 李晓晶,陈新,吴国栋,等.基于谐波小波的风力发电并网电压故障信号特征检测[J].电子测量技术,2019,42(9):45-48.
- [2] 伍双喜,林英明,杨银国,等.基于改进单亲遗传算法的大型海上风电场可靠性评估[J].电子测量技术,2020,43(4):58-61.
- [3] 唐波,刘钢,蔡智勇,等.基于散射中心的风电机叶片散射电场求解[J].微波学报,2020,36(6):1-7.
- [4] 唐波,陈昊,黄力,等.基于电磁散射中心的风电机叶片雷达回波仿真与分析[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7375-7384,7510.
- [5] 唐波,刘任,张建功,等.基于动态 RCS 的风电机叶片多普勒特性[J].高电压技术,2017,43(10):3435-3442.
- [6] 何炜琨,吴仁彪,王晓亮,等.风电场对雷达设备的影响评估与干扰抑制技术研究现状与展望[J].电子与信息学报,2017,39(7):1748-1758.

- [7] ZHANG Y, HUSTON A, PALMER R D, et al. Using scaled models for wind turbine EM scattering characterization: Techniques and experiments [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2011, 60(4):1298-1306.
- [8] KONG F, ZHANG Y, PALMER R D, et al. Wind turbine radar interference studies by polarimetric measurements of a scaled model [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2013, 49(3):1589-1600.
- [9] 唐波,邹芳,孙子昂,等.大地背景下风电机雷达回波信号的仿真与分析[J].太原理工大学学报,2017,48(6):939-945.
- [10] NAQVI A, WHITELOUIS N, LING H. Doppler features from wind turbine scattering in the presence of ground [C]. Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2012:1-2.
- [11] YUCEDAG S M, YUCEDAG O M, SERIM H A. Analytical method for monostatic radar cross section calculation of a perfectly conducting wind turbine model located over dielectric lossy half space[J]. Radar Sonar & Navigation Iet, 2014, 8(8):965-970.
- [12] FIORANELLI F, RIECHIE M, BALLERI A, et al. Experimental analysis of multistatic multiband radar signatures of wind turbines[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(8):1400-1410.
- [13] FIORANELLI F, RIECHIE M, BALLERI A, et al. Practical investigation of multiband mono-and bistatic radar signatures of wind turbines[J]. Radar, Sonar & Navigation, IET, 2017, 11(6):909-921.
- [14] 唐波,郝斌,张建功,等.风电机叶片回波模拟及其多普勒特性分析[J].高电压技术,2019,45(11):3674-3684.
- [15] 郭立新,张民,吴振森.随机粗糙面与目标复合电磁散射的基本理论和方法[M].北京:科学出版社,2014:238-240.
- [16] 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.
- [17] 陈琿.动态海面及其上目标复合电磁散射与多普勒谱研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [18] TANG B, HAO B, HUANG L, et al. Simulation of the Doppler echoes from wind turbine based on scattered electric field calculation[J]. Radar, Sonar & Navigation, IET, 2019, 13(11):2055-2062.
- [19] 刘钢,唐波,谢黄海,等.基于散射电场的飞机旋翼多普勒回波模拟[J].科学技术与工程,2021,21(2):813-819.

作者简介

黄力,博士,主要研究方向为电磁散射理论与计算、输电线路电磁环境。

E-mail: huangli@ctgu.edu.cn

代朝阳,硕士研究生,主要研究方向为电磁散射理论与计算。

E-mail: dchaoyang0@163.com