

引用格式:蒋一,张帆.解运动目标径向速度模糊的多通道干涉 SAR/GMTI 方法[J].电光与控制,2019,26(5):105-109. JIANG Y, ZHANG F. A multi-channel interferometric SAR/GMTI method for solving radial velocity ambiguity of moving target[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(5): 105-109.

解运动目标径向速度模糊的多通道干涉 SAR/GMTI 方法

蒋 一, 张 帆

(安徽新华学院电子通信工程学院,合肥 230088)

摘 要: 针对常规的合成孔径雷达/地面运动目标检测(SAR/GMTI)系统目标径向速度过大导致的速度模糊问题,提出了一种解径向速度模糊的多通道干涉 SAR 运动目标检测方法。该方法通过设置 4 个不等间隔的接收通道并合理设计各通道间距,对两两子图像分别进行干涉对消处理,得到 2 个测速集合,这 2 个集合的交集元素即为目标速度的正确估计,从而有效解决速度模糊问题,实现对目标径向速度的精确估计。理论分析及计算机仿真验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 地面运动目标检测; 速度模糊; 干涉对消

中图分类号: TN957.51 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.05.021

A Multi-channel Interferometric SAR/GMTI Method for Solving Radial Velocity Ambiguity of Moving Target

JIANG Yi, ZHANG Fan

(School of Electronic Communication Engineering, Anhui XinHua University, Hefei 230088, China)

Abstract: In the conventional Synthetic Aperture Radar and Ground Moving Target Indication (SAR/GMTI) system, the excessively high azimuth velocity may cause velocity ambiguity. To solve the problem of radial velocity ambiguity of moving target, a kind of multi-channel interferometric of SAR/GMTI scheme is presented. By setting up four receiving channels with non-uniform intervals and designing each channel spacing reasonably, the method carries out interferometric cancellation respectively on the sub-images of two echo signals. Then, two velocity sets are obtained, and the intersection of the two sets is the correct estimation of the target velocity. Therefore, the problem of velocity ambiguity is solved and the radial velocity of the target is estimated correctly. The validity of the method has been demonstrated by analysis and computer simulation.

Key words: synthetic aperture radar; ground moving target indication; velocity ambiguity; interferometric cancellation

0 引言

运动目标检测及参数估计是合成孔径雷达(SAR)的难点和热点问题^[1-2]。地面运动目标检测(GMTI)技术可以检测地面运动目标,SAR/GMTI 模式可以将

运动目标和 SAR 图像背景结合在一起^[3]。多通道沿航迹向干涉 SAR 是 SAR/GMTI 系统中非常典型的一种,以三通道为例,3 个通道天线保持同步,分别对回波信号数据进行处理,并且对多通道图像按照像素逐个进行相位补偿,采用干涉处理的方法对消地杂波,能有效提高运动目标检测和参数估计性能^[4]。但同时也引发了盲速和速度模糊的问题,这是因为干涉相位以 2π 为周期,当目标的径向速度超过沿迹干涉(Along-Track Interferometry, ATI)检测性能分析中的最大可检测速度值时,干涉相位将发生缠绕。

本文提出一种在 GMTI 模式下运动目标检测和定位的新方法,通过增加一个接收通道并合理设计各通道间距,解决三通道 ATI 系统中存在的速度模糊问题。理

收稿日期:2018-06-25 修回日期:2019-04-08

基金项目:安徽省级质量工程项目(2016jxtd055,2017jyxm1232);安徽新华学院校级重点建设学科项目(zdxk201702);安徽新华学院校级研究所项目(yjs201706);第九批中青年“学科带头人”培养对象项目(2018xxk14)

作者简介:蒋一(1979—),女,安徽合肥人,硕士,讲师,研究方向为雷达图像及信号处理。

论分析及计算机仿真结果验证了本文方法的有效性。

1 速度模糊问题

为了简要说明速度模糊问题,如图1所示,沿着 x 轴航迹上两幅天线排列,构成沿航迹干涉 SAR 系统。

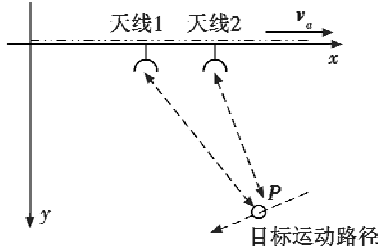


图1 ATI-GMTI 对地观测几何示意图
Fig.1 ATI-GMTI geometric schematic diagram for ground observation

对于地面上的运动目标点 P 来说,用 X_1 和 X_2 分别表示其在两幅天线上所获取 SAR 图像上的像素。运动目标点 P 的干涉相位 φ_P 可表示为

$$\varphi_P = \arg(X_1 \text{conj}(X_2)) = \left| \frac{4\pi}{c} \cdot \frac{f_0 B v_r}{v_a} \right| \quad (1)$$

式中: c 为光速; f_0 为雷达载频; B 为两天线之间的基线长度; v_a 为平台飞行速度; v_r 为 P 点的径向速度。干涉相位是以 2π 为模,因而,雷达系统参数一旦确定,目标径向速度过大就有可能造成相位模糊。

由式(1)可以推导出运动目标径向速度 v 为

$$v = \frac{\varphi_P \cdot \lambda \cdot v_a}{2\pi \cdot d} \quad (2)$$

式中: φ_P 为运动目标的干涉相位; λ 为波长; d 为通道间距。将 $\varphi_P = \pi$ 代入式(2),得到最大不模糊径向速度为

$$|v|_{\max} = \frac{\lambda \cdot v_a}{2d} \quad (3)$$

显然,当目标的径向速度超过该最大不模糊值时,三通道干涉方法中得到的干涉相位值将产生 2π 的模糊,进而导致速度产生模糊。因此,速度模糊成为三通道干涉 SAR 运动目标检测中必须要解决的问题^[5-6]。

2 不等间隔四通道干涉 SAR 运动目标检测

为解决三通道干涉 SAR 运动目标检测方法中因相位缠绕而出现的速度模糊问题,增加一个接收通道并合理地设计各通道间的间距,这样就可以得到 2 个测速的集合,而 2 个集合中的交集元素即是目标运动速度的正确估计。

2.1 回波模型

不等间隔四通道干涉 SAR 空间几何关系如图2所示。

雷达载机沿 x 轴以速度 v_a 、高度 h 直线飞行,阵列

天线由 4 个接收子孔径 A,B,C,D 组成,距离全孔径中心分别为 d_1, d_2, d_3 和 d_4 ,脉冲重复频率为 PRF,全孔径中心发射 4 个子天线同时接收回波数据。初始时刻,载机位置 $(0,0,h)$, γ 表示波束擦地角, θ 表示方位斜视角, R_0 是全孔径中心到参考点 $P(X,Y,0)$ 的距离。

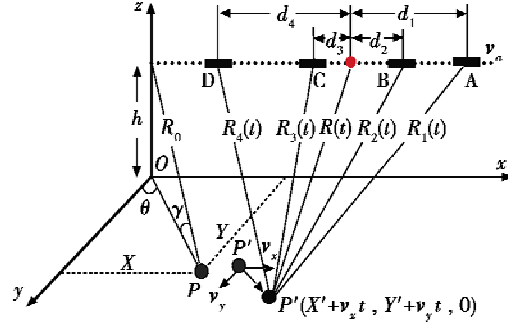


图2 不等间隔四通道 SAR 空间几何关系图
Fig.2 Geometry figure of non-uniformly intervaled four-channel SAR

假设运动目标 P' 的初始位置为 $(X',Y',0)$,与静止参考点 P 在 $t=0$ 时刻处于同一个距离单元。运动目标的速度为 $(v_x, v_y, 0)$,且 $v_x \ll v_a, v_y \ll v_a$ 。

仿照三通道 SAR 回波信号经距离压缩后的形式,A,B,C,D 4 个通道接收的回波信号经距离压缩后可以表示为^[7-8]

$$s_i(t) = G \cdot \exp\{-j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot [R(t) + R_i(t) - 2R_0]\} \quad (4)$$

式中: $i=1, \dots, 4$; j 为虚数单位; G 为复常数,反映了目标的散射特性和天线加权等因素。

2.2 目标检测、定位及测速

对 4 个通道接收的回波信号进行补偿,去掉多普勒中心频率的偏差,以保证目标在 4 幅图像上处于同一位置的像素点处,同时在参考函数中补偿掉由载机运动引起的线性调频相位项。

以同一个距离单元内静止参考点的回波信号与之进行相乘处理,方位向进行傅里叶变换,得到了频域上表示的 A,B,C,D 4 个通道的 4 幅子图像。为抑制地杂波,需要两两子图像干涉对消处理,补偿掉 4 个接收子孔径的位置偏差造成的 4 幅子图像上对应像素产生相位差^[9]。

对 A,B,C 3 个通道对消结果进行干涉处理,运动目标真实方位估计值为

$$X' = \frac{\lambda R_0 \hat{\varphi}_a(\hat{f})}{\pi(d_1 + d_3)} + \frac{\lambda R_0 \hat{f}}{2v_a} + X \quad (5)$$

式中: π 为圆周率; $\hat{\varphi}_a(\hat{f})$ 表示 A,B,C 的干涉相位估计值。距离向估计值 Y' 由运动目标所在单元对应的距离门位置确定,即

$$Y' = \sqrt{R_0^2 - X'^2 - h^2} \quad (6)$$

同理,对 B,C,D 3 个通道对消结果进行干涉处理。目标径向速度的估计值(不考虑速度模糊时)与干涉相位的关系式为

$$\hat{v} = \frac{\hat{\varphi}_a(\hat{f}) \cdot \lambda \cdot v_a}{\pi(d_1 + d_3)} = \frac{\hat{\varphi}_b(\hat{f}) \cdot \lambda \cdot v_a}{\pi(d_2 + d_4)} \quad (7)$$

式中, $\hat{\varphi}_b(\hat{f})$ 表示 B,C,D 的干涉相位估计值。进而得到目标地面方位向与距离向速度的估计值分别为

$$\begin{cases} v_x = \frac{v}{\cos \gamma'} \sin \theta' \\ v_y = \frac{v}{\cos \gamma'} \cos \theta' \end{cases} \quad (8)$$

2.3 解速度模糊

上述定位和测速的推导过程中,均未考虑模糊的问题。当运动目标径向速度增加时,将导致 $\hat{\varphi}_a(f)$ 或 $\hat{\varphi}_b(f)$ 发生相位模糊,使定位和测速出现较大偏差或无法定位和测速,为避免出现测向多值性,必须正确解决相位缠绕问题。

根据目标径向速度和干涉相位之间的关系式可得出 A,B,C 3 个通道干涉处理的最大不模糊径向速度为

$$|v_a|_{\max} = \frac{\lambda \cdot v_a}{(d_1 + d_3)} \quad (9)$$

通过上式可以看出,在机载 SAR 情况下,其最大不模糊径向速度值较小,因此很容易出现速度模糊问题。

假定测速存在模糊,即

$$\begin{cases} v = k |v|_{\max} + \hat{v}_a & k=0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ \varphi_a = \pi \frac{(d_1 + d_3)(X'v_x + Y'v_y)}{\lambda R_0 v_a} = m\pi + \hat{\varphi}_a & m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (10)$$

式中: φ_a 为真实干涉相位; v 为运动目标径向速度实际值; $\hat{\varphi}_a$ 为测量相位; \hat{v}_a 是测量速度;同理可得到 φ_b 。

显然,两路真实干涉相位之比为

$$\frac{\varphi_a}{\varphi_b} = \frac{d_1 + d_3}{d_2 + d_4} \quad (11)$$

在子孔径接收回波图像中进行干涉 SAR 杂波抑制。考虑到避免动目标越分辨单元徙动和横向散焦,子孔径时间相应较短,由此限制了动目标速度的测量范围 $|v \cdot T_s| < \rho_r$,从而决定了模糊数 m, n 的最大取值 M 和 N 。于是,产生 2 个测速集合,即

$$\begin{cases} v = m \cdot |v_a|_{\max} + \hat{v}_a & m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm M \\ v = n \cdot |v_b|_{\max} + \hat{v}_b & n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N \end{cases} \quad (12)$$

式中, M, N 分别为模糊数 m, n 的最大值。需要判断 2 个测速集合的交集情况,表示成如上集合的形式,不需要连等。如果这 2 个集合的交集只有 1 个元素,即为实际

速度,但交集中如果有 2 个以上元素,表明仍存在速度模糊。

假定交集中有 2 个元素,且交集的第 1 个速度满足 $m_1 \cdot |v_a|_{\max} + \hat{v}_a = n_1 \cdot |v_b|_{\max} + \hat{v}_b$,交集的第 2 个速度满足 $m_2 \cdot |v_a|_{\max} + \hat{v}_a = n_2 \cdot |v_b|_{\max} + \hat{v}_b$ 。显然,若 $m_2 > m_1$,则 $n_2 > n_1$ 。两式相减,得到

$$\frac{|v_a|_{\max}}{|v_b|_{\max}} = \frac{(d_2 + d_4)}{(d_1 + d_3)} = \frac{n_2 - n_1}{m_2 - m_1} \quad (13)$$

上式说明:如果 $d_2 + d_4$ (孔径 B,D 间距)与 $d_1 + d_3$ (孔径 A,C 间距)之比为整数,仍存在速度模糊;反之,交集内元素唯一。因此,在实际设计中,对各子孔径中心间距提出了要求。

至此,运动目标径向速度模糊问题得到了有效解决,在此基础上,还可精确估算目标的径向速度。此外,根据实际径向速度可以反求出真实干涉相位,进而对目标进行正确定位。

3 计算机仿真验证

3.1 仿真参数设置

系统主要参数设置:波长 $\lambda = 0.03$ m,发射带宽 $B = 5$ MHz,发射脉冲宽度 $T_s = 20$ μ s,采样频率 $f_s = 10$ MHz,脉冲重复频率 PRF 为 1200 Hz,雷达作用距离 $R_0 = 180$ km,载机高度 $h = 4$ km,载机速度 $v_a = 110$ m/s,方位斜视角 $\theta = 30^\circ$,各接收子孔径相位中心距全孔径相位中心的间距分别为 $d_1 = 1.1$ m, $d_2 = 0.5$ m, $d_3 = 0.2$ m, $d_4 = 1.0$ m。

根据以上仿真参数,经过计算可以得出,A,B,C 3 个通道干涉处理的最大不模糊径向速度为 2.5385 m/s, B,C,D 3 个通道干涉处理的最大不模糊径向速度为 2.2000 m/s,且各通道间距满足本文提出的解速度模糊的设计条件。

仿真中,在地面上围绕区域中心设置 28×28 的点散射体阵列来模拟杂波,且杂波的后向散射系数服从复高斯分布,方差为 1,杂波与噪声之比为 30 dB。

3.2 仿真结果

2 个运动目标设置:运动目标 1 初始位置位于区域中心 $[0$ m, 0 m] 处,径向速度 -4.5 m/s,信杂比为 -10 dB。运动目标 2 初始位置位于 $[150$ m, 180 m] 处,径向速度为 3.6 m/s,信杂比为 -15 dB。从参数设置来看,运动目标 1 和运动目标 2 的径向速度都超过了 3 个通道干涉处理的最大不模糊径向速度值。

图 3 所示为通道 B 的常规 SAR 图像。可以看出,场景中存在大量的杂波且运动目标的信杂比较低,导致运动目标被强大的杂波所淹没而无法得到检测。图 4a、图 4b 分别是通道 A,B,C 杂波对消,通道 B,C,D 杂

波对消的结果显示。

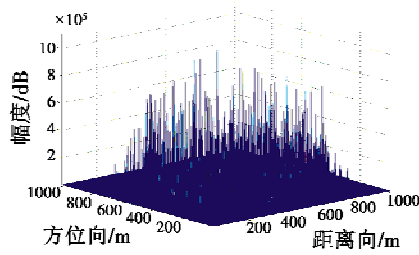
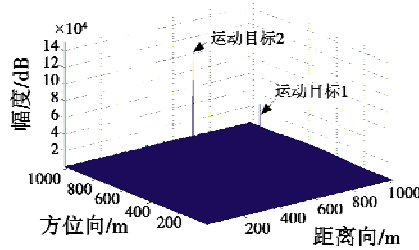
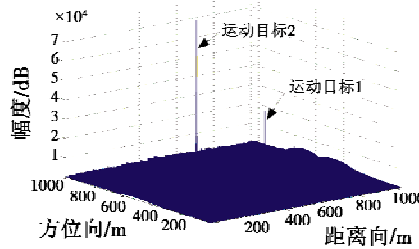


图3 通道B成像结果

Fig.3 Imaging results of channel B



a 通道A,B,C杂波对消结果



b 通道B,C,D杂波对消结果

图4 不同通道杂波对消结果

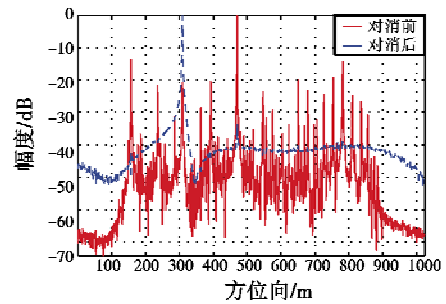
Fig.4 Clutter elimination result of different channels

由图4可以看出,经过杂波对消处理后,大部分杂波被抑制掉,运动目标1和运动目标2聚焦效果明显增强。同时注意到,对消结果中仍存在部分杂波剩余。

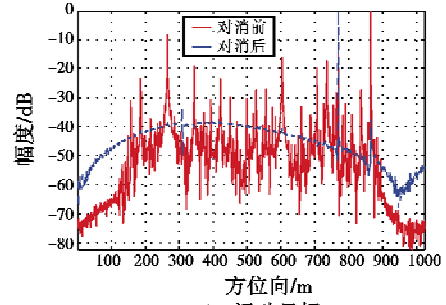
图5a和图5b分别是运动目标1和运动目标2所在距离单元图像。由图5可以看出,杂波对消后同一距离单元内的杂波得到明显抑制,2个运动目标的信杂比均得到很大改善。

在不考虑干涉相位发生缠绕的情况下,A,B,C 3个通道测得的运动目标1对应的干涉相位值为0.7073,测得的运动目标2对应的干涉相位值为-1.8333;在不考虑因相位缠绕引起的速度模糊的情况下,测得的运动目标1和运动目标2的径向速度估计值分别为0.5715 m/s和-1.4794 m/s。

而考虑相位解缠时,A,B,C 3个通道测得的运动目标1对应的干涉相位值为-5.6665,测得的运动目标2对应的干涉相位值为4.4492;在本文解速度模糊情况下,测得的运动目标1径向速度的估计值为-4.4978 m/s,测得的运动目标2径向速度的估计值为3.5950 m/s。



a 运动目标1



b 运动目标2

图5 运动目标1和运动目标2所在距离单元图像

Fig.5 Image of range unit of the two moving targets

表1所示为运动目标的检测、定位及测速结果。由表1可见,在满足通道间距设计条件的情况下,本文方法可以有效地实现解速度模糊,且具有较高的定位与测速精度。

表1 运动目标检测、定位及测速结果

Table 1 Locating and speed detection result of moving targets

目标 编号	实际位置/m		估计位置/m		实际速 度/(m· s ⁻¹)	估计速 度/(m· s ⁻¹)	速度估 计绝对 误差/%
	方位向	距离向	方位向	距离向			
1	0	0	-1.58	1.49	-4.5	-4.4978	0.04
2	150	180	155.66	183.33	3.6	3.5950	0.14

4 结束语

对于多通道干涉 SAR/GMTI 系统,目标径向速度过大产生速度模糊问题,影响对目标的精确定位,而造成径向速度估计模糊的原因是干涉相位的 2π 模糊问题。基于此,分析推导了运动目标干涉相位与雷达系统参数的关系,并提出了一种解径向速度模糊的多通道干涉 SAR 运动目标检测方法。计算机仿真验证了该方法的有效性,可有效解决速度估计模糊问题。

参考文献

[1] NOVELLO C, FORNARO G, MARTORELLA M. Focused SAR image formation of moving targets based on Doppler parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(6):3460-3470.

- [2] 柴国强,吕爱龙,李竹.一种基于 FrFT 的三通道 SAR 运动目标检测与成像算法[J].山西师范大学学报:自然科学版,2017,31(3):53-58.
- [3] DRAGOSEVIC M V, BURWASH W, CHIU S. Detection and estimation with RADARSAT2 moving-object detection experiment modes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(9):3527-3543.
- [4] HUANG L, DONG C X, SHEN Z B, et al. The influence of rebound jamming on SAR-GMTI[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(2):399-403.
- [5] 张学攀,廖桂生,朱圣祺,等.基于双通道距离频率干涉相位解运动目标径向速度模糊方法[J].宇航学报,2013,34(8):1152-1158.
- [6] 王肖洋,高贵,周石琳,等.一种基于双通道 DPCA 的 SAR-GMTI 杂波抑制方法[J].雷达学报,2014,3(2):241-248.
- [7] ZHU S Q, LIAO G S, QU Y, et al. A new slant-range velocity ambiguity resolving approach of fast moving targets for SAR system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1):432-451.
- [8] ZHU S Q, LIAO G S, LIU B C, et al. New approach for SAR Doppler ambiguity resolution in compressed range time and scaled azimuth time domain[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(4):3026-3039.
- [9] 马腾,陈华杰,彭冬亮.双波段 SAR/GMTI 融合解速度模糊[J].现代电子技术,2015,38(14):32-35.

(上接第 38 页)

测值相比于实际失效概率值偏低,在一定程度上存在着低估失效概率的可能,不利于有效控制失效风险,而本文方法预测精度更高、效果更好、更具优势。

表 6 不同方法 ARE 结果对比

Table 6 ARE result of different methods

预测方法	失效概率预测值		平均相对误差/%
	54 个月	60 个月	
M_1	0.1176	0.1343	5.9700
M_2	0.1194	0.1379	3.9900
M_3	0.1201	0.1388	3.3900
M_4	0.1283	0.1461	2.4400

6 结论

针对导弹雷达导引头竞争失效状态预测研究中的瓶颈问题,本文以测试数据为切入点进行失效分析,提出了一个基于退化数据与失效数据的竞争失效状态预测模型,某导弹雷达导引头的实例表明模型有较好的预测表现,验证了模型的可行性和合理性。主要创新点有:

1) 在建立导弹雷达导引头的竞争失效模型时,不仅考虑到退化失效与突发失效之间的竞争,还对导弹雷达导引头不同特征参数之间的退化竞争进行研究,考虑更加全面,模型更加可靠;

2) 针对性能退化数据的小样本、非线性和不确定性特点,采用 RVM 对其分布参数进行预测,并结合 QPSO 和 H-Q 准则实现核参数和嵌入维数的寻优,预测结果表明改进的 RVM 模型预测精度和效果均更优;

3) 考虑到突发失效与退化失效之间的相关性,借助位置-尺度模型对这种相关关系进行刻画,实现对突发失效分布参数的求解。

参考文献

- [1] 丛林虎,徐廷学,王寿,等.基于退化数据与故障数据的导弹竞争故障预测[J].北京航空航天大学学报,2016,42(3):522-530.
- [2] 冯鹏飞,朱永生,王培功,等.基于相关向量机模型的设备运行可靠性预测[J].振动与冲击,2017,36(12):146-149,180.
- [3] 周建宝,王少军,马丽萍,等.可重构卫星锂离子电池剩余寿命预测系统研究[J].仪器仪表学报,2013,34(9):2034-2044.
- [4] 徐公国,段修生,徐宏浩,等.基于 Rényi 信息增量和改进 QPSO 算法的多传感器协同分配[J].电光与控制,2017,24(5):15-19.
- [5] 范庚,马登武,吴明辉,等.电子系统状态时间序列预测的优化相关向量机方法[J].系统工程与电子技术,2013,35(9):2011-2015.
- [6] 邴其春,龚勃文,杨兆升,等.一种组合核相关向量机的短时交通流局域预测方法[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(3):144-149.
- [7] 逄程,徐廷学,张海军,等.改进 RVM 的装备退化状态预测方法[J].现代防御技术,2018,46(2):153-158.
- [8] 温艳清,刘宝亮.完全数据下 Weibull 分布参数的极大似然估计[J].应用数学,2008,21(s1):67-70.