

W 波段 ISAR 包络对齐方法研究

魏一搏^{1,2} 王 辉¹

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100039)

摘要: 在 ISAR 成像处理中,目标整体在距离方向的位移会使散射点的回波无法落在相同的距离单元内,造成成像结果的散焦,因此采用包络对齐的方法对该位移进行补偿。然而在 W 波段的 ISAR 包络对齐处理过程中,较高的分辨率会使回波包络在成像时间内发生变化,导致传统方法产生对齐误差。针对该问题,提出了一种使用 Keystone 变换进行包络规整的方法来提高包络对齐的准确度。在 Keystone 变换之前,使用了目标重心跟踪及补偿的方法来实现回波信号的相干化。实验结果表明,通过包络规整处理,成像结果的极值点强度,图像熵以及图像对比度都得到了较大的提升。

关键词: W 波段; ISAR; 包络对齐; Keystone; 相干处理

中图分类号: TN955⁺.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Study on W-Band ISAR envelope alignment

Wei Yibo^{1,2} Wang Hui¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The movement of target in range direction will make the echo of scatters shift from range cell, and this will cause blur in ISAR imaging process. Thus, the envelop alignment is used to compensate this shift. However, the high resolution in W-Band ISAR will cause the envelop to change its shape during the imaging period. This will cause error in traditional envelop alignment methods. Therefore, a new envelope regular method based on Keystone transform is proposed to increase the accuracy of envelop alignment. Before the Keystone transform, a target center track method is used to make the return signal coherent. The simulation results show that the peak value, entropy and contrast of image are improved by applying this method.

Keywords: W-Band; ISAR; envelop alignment; Keystone; coherent processing

1 引言

逆合成孔径雷达^[1-2] (ISAR) 是合成孔径雷达^[3] (SAR) 的一个分支,主要利用有源微波系统进行高分辨率成像。利用 ISAR 成像获取的二维高分辨率图像可以进行空中飞行目标的识别与检测,舰船目标成像,云层成像研究等,在军事与民用领域都有广阔的发展与应用前景。

W 波段是特指中心频率约为 94 GHz 的电磁波段。近年来,随着 W 波段电子元器件的不断发展与成熟,该波段的 ISAR 应用引起了世界各国的重视,研制并建造了 W 波段的 ISAR 雷达^[4]。W 波段的 ISAR 相比于传统波段具有分辨率高,目标散射特性好,易于对海观测等特点。同时较高的分辨率也为 ISAR 成像中对于目标的补偿提出了较高的要求。

包络对齐是 ISAR 运动补偿中的重要研究方向,在 ISAR 成像的发展过程中,已经提出了许多包络对齐方法^[5-6]。但这些方法主要针对传统波段进行处理。在 W 波段的 ISAR 成像中,由于分辨率的提高,目标的转动会带来严重的距离向徙动,造成包络的变化。使上述方法的对齐结果出现错误。本文针对这一问题,提出了对回波进行包络规整后再对齐的方法,有效得改进了 W 波段 ISAR 的包络对齐效果。仿真实验的结果验证了该方法的有效性。

2 ISAR 成像与包络对齐

2.1 ISAR 回波模型

ISAR 成像利用发射宽带信号来获取距离向的高分辨,利用目标相对雷达系统转动所产生的多普勒频移来获取目标方位向的高分辨率。

收稿日期:2015-04

将单次回波的方向的时间轴表示为 t_k , 将沿顺次回波方向的时间轴表示为 t_m , 则对于目标上的某点 P , 其与雷达之间的距离可以写为:

$$R_p(t_m) = R_0(t_m) + r - a\theta(t_m) - r \frac{\theta^2(t_m)}{2} \quad (1)$$

式中: $R_0(t_m)$ 为目标中心点与雷达的距离, r 和 a 分别为 P 点相对中心点的 R 方向与 A 方向坐标, $\theta(t_m)$ 为目标随慢时间转过的角度。

在 ISAR 系统的成像过程中, 会使用窄带波束对目标进行跟踪^[7-8], 得到目标相对雷达的距离。之后调整回波的接收窗口, 使目标的反射回波位于接收窗口中。假设在 t_m 时刻, 测量得到的目标距离为 $R_c(m)$, 则接收到的回波信号可以表示为:

$$s(t_k, t_m) = A \text{rect} \left[\frac{t_k - \tau_p(t_m)}{T_p} \right] \exp[j\pi\mu(t_k - \tau_p(t_m))^2] \exp[j2\pi f_0(t_k - \tau_p(t_m))] \quad (2)$$

式中:

$$\tau_p(t_m) = \frac{2[R_0(t_m) - R_c(t_m)]}{c} + \frac{2r}{c} - \frac{2a\theta(t_m) + r\theta^2(t_m)}{c} \quad (3)$$

对得到对回波使用匹配滤波的方法进行脉冲压缩后, 可以得到波形:

$$s(t_k, t_m) = A \text{rect} \left[\frac{t_k - \tau_p(t_m)}{2T_p} \right] \text{sinc}[\mu T_p(t_k - \tau_p(t_m))] \exp[-j2\pi f_0 \tau_p(t_m)] \quad (4)$$

从式(4)中可以看出, 某一个脉冲对于目标上 P 点的回波, 在经过匹配滤波后, 峰值点出现在 $t_k = \tau_p(t_m)$ 处。

2.2 包络对齐处理

通过式(3)与式(4)可以看出, 由于 ISAR 成像系统的窄带跟踪误差所造成的影响, 即 $R_0(t_m) - R_c(t_m)$ 项会造成目标点在距离向, 也即 t_k 方向进行匹配滤波后的峰值点发生偏移。因此要进行成像, 首先需要将同一目标点在距离方向上补偿到一个距离门以内。这一过程主要是通过包络对齐方法来实现, 如图 1 所示。

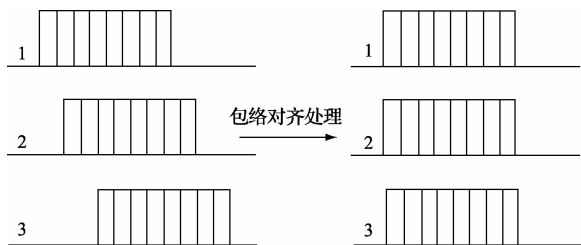


图 1 包络对齐示意

相关法是最早提出的包络对齐方法, 它主要利用了相邻回波间较强的相关性来计算回波间的距离向误差并进行补偿。一阶距离最小法是另一种 ISAR 成像运动补偿中的包络对齐算法, 它与相关法采用了不同的对齐判定准则。由于采用了较低阶的距离作为评判标准, 因此对于闪

烁点有着更好的处理效果。

相关法与一阶距离最小法都是通过对相邻回波做差, 通过得到的差值, 以相应的评价方法来进行延时误差的估计。可以想象, 当相邻回波的延时误差较小时, 做差得到的主要是由 2 个波形中不相同的部分组成, 也即很大一部分是由随机误差所组成的。这样, 当补偿到较高的精度时, 对误差估计造成主要影响的将不是包络的主要部分而是随机误差, 影响进一步估计的准确度。由此包络最小熵法被提出, 它以各包络和的锐化程度来作为包络的对齐判定标准。包络最小熵法充分利用了目标的所有信息, 相比于回波相似性的包络对齐方法具有较好的稳健性。

在对经过包络对齐处理后的数据进行进一步相位补偿^[9]后, 利用 ISAR 成像方法^[10-12], 就可以得到目标的二维高分辨率成像结果。

3 包络规整处理

在进行 ISAR 回波包络对齐的过程中, 由于目标的平动以及转动, 时常会在图像的某次回波中出现闪烁点, 造成相邻包络差距较大, 影响回波的对齐结果。同时如果只对相邻的回波进行处理, 在处理过程中产生的细小误差由于没有纠错机制, 会不断得积累, 造成回波随着慢时间的变化而不断偏移。因此这里可以采用之前多次回波的加权平均来作为对齐的标准。该处理可以看做对回波的加窗处理。而窗长越长, 对于闪烁点以及累计误差的抑制效果越好。

在传统波段成像过程中, 这样的处理并不会带来任何问题, 因为在成像时间内目标点一般不会越过分辨单元, 造成包络明显的变化。然而在 W 波段的 ISAR 成像过程中, 由于分辨率的提高, 距离单元缩短, 目标的转动会带来目标上的反射点越过多个距离单元, 造成较为明显的徙动。如果直接使用较长的矩形窗累积补偿, 则会造成较为严重的误差, 甚至对齐结果完全错误。

假设在目标上存在 P, Q 两点。 P 点与 Q 点处于相同的距离向位置即它们具有相同的回波时延, 同时在方位向上位于目标的两侧。根据式(3)得到的回波时延, 当目标以均匀的角速度转动时, 可以得到在成像过程中两点的时延如下:

$$\Delta t_k = |t_{kp} - t_{kq}| = \left| \frac{(2 + \omega^2 t_m^2)}{c} \Delta r - \frac{2\omega t_m}{c} \Delta a \right| \quad (5)$$

如果目标的转动角速度为 $\omega = 0.1 \text{ rad/s}$, 目标的尺度 $D = 50 \text{ m}$, 成像时间 $T_p = 0.5 \text{ s}$, 则可以估算得到成像过程中目标的距离向移动如下:

$$\Delta r_{\text{image}} = \frac{2\omega t_m D}{c} \times c = 2\omega D T_p = 5 \text{ m} \quad (6)$$

可以看出, 这一位移远远超出了 W 波段 ISAR 成像大约 0.03 m 的分辨率, 并由此带来了距离压缩后回波包络明显的变化。

如果对 W 波段距离压缩后的数据, 进行较长窗长的对齐处理, 由于包络较为明显的变化, 会造成对齐结果明显的错误, 使经后续处理后的成像结果散焦。如果使用较

短的窗长,又会由于对齐误差的积累而造成包络的偏移,使得图像散焦。

针对这一现象,提出了一种基于包络规整的包络对齐处理方法。即首先对距离压缩结果,利用 Keystone 变换将其距离徙动进行补偿,使得在成像时间内,目标的回波包络基本一致。在经过包络规整后,再利用长窗长的对齐处理,对数据进行对齐。

3.1 Keystone 变换

Keystone 变换^[13]是一种变标算法,对于距离压缩后的数据,先对其在距离向做 FFT 变换,使得回波图像变换到 $f-t_m$ 域。接下来在方位向进行变标操作,取:

$$\tau_m = \frac{f_c}{f_c + f} t_m \quad (7)$$

式中: t_m 与 τ_m 分别为变换前后方位向的坐标, f_c 与 f 分别为系统的中心频率与调频信号产生的附加频率。Keystone 的变标如图 2 所示。

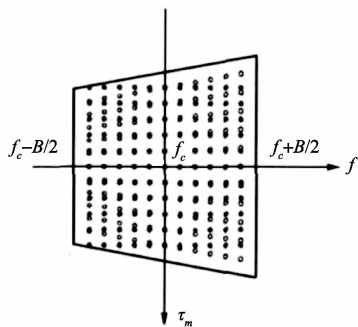


图 2 Keystone 变换变标示操作

对变换后的结果,在距离向进行 IFFT,使图像重新回到 t_k-t_m 域,完成 Keystone 变标变换。通过 Keystone 变换,可以将信号的距离向位移与信号的线性频率变化相乘的交叉项去除,进而消除目标在距离向的徙动。在进行距离向徙动的校正后,图像中各回波的包络间的变化将被大幅度削弱,进而使得包络对齐获得较好的结果。

为了实现 Keystone 变换中的变标处理,最简单的方法是根据变标公式,直接在方位向进行插值。但这样直接计算的计算复杂度较高。在这里可以利用 Chirp-Z 变换进行处理。Chirp-Z 变换可以计算在单位圆上离散傅里叶变换的任意一组等间隔样本。利用 Chirp-Z 变换,按照变标比例,将方位向的信号变换到频率域,再使用逆傅里叶变换进行反变换。通过这样的方法,基于快速傅里叶变换,可以大幅降低计算的复杂度。

3.2 信号相干化处理

由于 Keystone 处理要求信号是相干的,因此在进行 Keystone 变换前,需要对回波进行相干化处理。对于飞机、卫星等惰性目标,可认为目标相对于雷达的平动运动在去除雷达的跟踪误差后,是连续变化的。而目标准确的回波时间是较容易记录得到的。因此若在跟踪的过程中,

使用连续移动的回波窗口,则可以认为目标在窗口中的运动是连续变化的。因此通过对目标在回波窗口中的运动的轨迹进行拟合,再利用拟合结果对其运动所产生的相位变化进行补偿,来实现回波信号的相干化处理的。

由于 W 波段的分辨率较高,同时目标的散射特性较好,因此目标上的散射点分布一般较为均匀。由此可以认为在某一次回波中,目标回波包络的加权重心即为目标在回波窗口中的重心,通过对目标重心的跟踪,即可得到目标在回波窗口中的运动轨迹。

但实际的飞机飞行过程中,因发动机以及空气湍流的影响,会发生小幅度的振动,该振动会使得实际的雷达回波相位偏离拟合得到的轨迹。这里可以采用较短窗长的对齐处理,根据拟合的运动轨迹,在附近较小的范围内进行搜索,来获得目标小幅度振动的信息。通过拟合得到的目标重心运动轨迹,结合搜索得到的目标小范围振动信息,就可以计算相邻包络间由于目标平移所带来的相位变化量,完成回波信号的相干化。

3.3 基于包络规整的对齐处理流程

根据以上的分析,这里给出基于包络规整的对齐方法的处理流程。

第 1 步:通过距离压缩的结果估计目标重心位置,并拟合重心移动曲线。

第 2 步:根据重心的移动曲线,在曲线附近进行窗长较短,范围较小的对齐处理,得到目标在距离向小范围振动的幅度。

第 3 步:根据前两步得到的结果,计算需要补偿的相位,叠加进距离压缩结果,使其相干化。

第 4 步:对相干后的数据进行 Keystone 变换,补偿距离向的徙动,完成包络规整处理。

第 5 步:使用较长的窗长,对包络规整处理后的数据进行对齐,得到对齐结果。

详细的处理流程如图 3 所示。

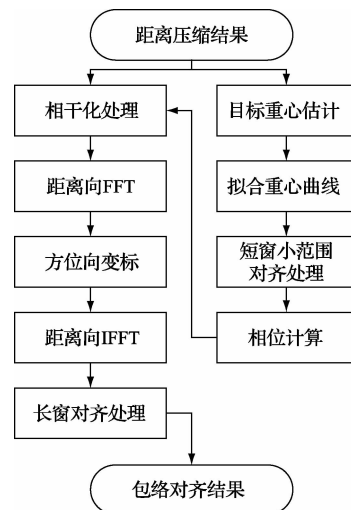


图 3 基于包络规整的对齐处理流程

4 仿真验证与分析

4.1 仿真平台和系统参数

为了证明本文所提出的包络规整算法,通过仿真实验对该方法进行了验证。仿真系统所采用的参数如表 1 所示。对 37 个点组成的模拟飞机目标进行了回波生成及包络对齐仿真。仿真中目标经过跟踪后的残余移动速度为 4 m/s,加速度为 -4 m/s^2 。同时给目标加上了幅度为 0.1 m 的随机振动。

表 1 仿真系统参数表

仿真参数	数值
中心频率	94 GHz
信号带宽	5 GHz
采样频率	6 GHz
脉冲重复频率	4 000
脉冲持续时间	1 μs
测量持续时间	0.5 s
目标角速度	0.1 rad/s

4.2 相干化处理

对回波中目标重心的估计结果如图 4 所示,可以看出,由于散射点之间的干涉作用,回波的重心有较为剧烈的变化。

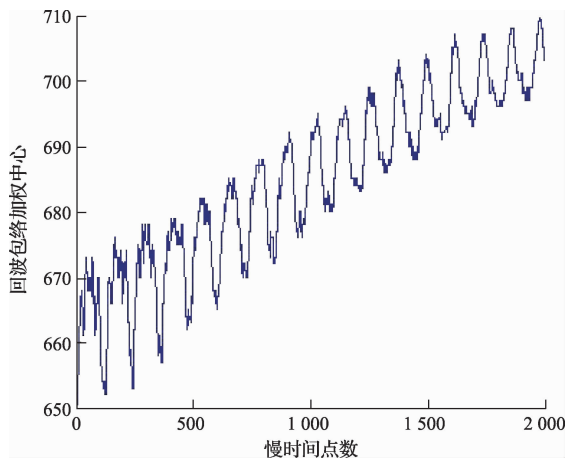


图 4 目标重心位置

通过对目标的重心进行拟合,得到的目标重心移动拟合结果如图 5 所示,可以看出,拟合的结果能够较为准确的反映目标的运动趋势。

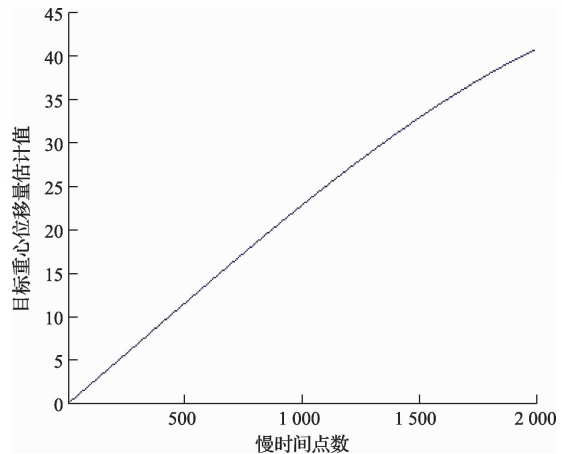


图 5 目标重心移动拟合曲线

通过短窗长的对齐处理,得到目标的振动幅度,叠加上目标的运动趋势拟合曲线,得到的目标重心实际偏移值如图 6 所示。

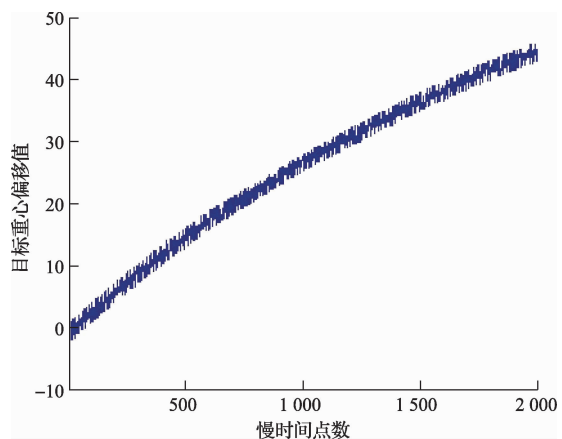


图 6 目标重心偏移值

利用图 6 所得到的目标偏移值,即可计算补偿所需的相位,实现回波信号的相干化处理。

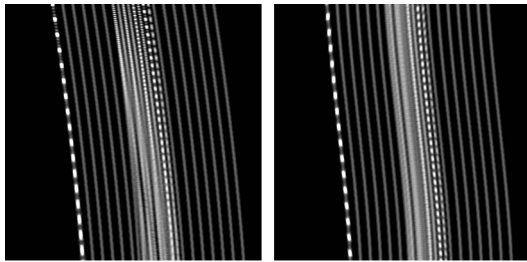
4.3 包络规整处理

本文分别使用相关法,一阶距离法和最小熵法对规整前以及规整后的包络进行了处理。因成像结果较为相似,这里只给出了最小熵法处理得到的图像。其他方法的处理效果通过数值评估的方法如表 2 所示。

图 7(a)即为通过仿真获得的回波信号经过距离压缩后的结果。而图(b)为对图(a)进行包络规整后得到的结果,可以看出在图(a)中,随着方位向(竖直方向)时间的变化,回波包络产生了较为明显的变化,而图(b)经过规整后的包络基本上没有发生变化。

表2 包络规整效果对比表

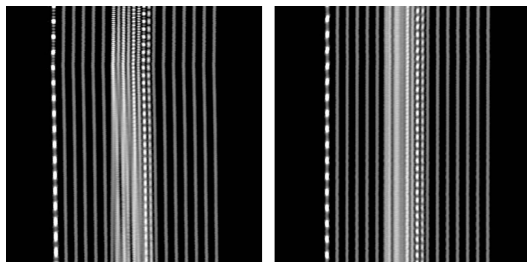
方法	是否规整处理	极值点强度/dB	图像熵	图像对比度
相关法	是	122.5	8.59	16.7
	否	116.0	8.69	13.3
一阶距离法	是	120.3	8.69	16.3
	否	112.9	9.13	13.0
最小熵法	是	122.6	8.60	16.7
	否	116.2	8.69	13.4



(a)未经包络规整 (b)经过包络规整

图7 距离压缩结果

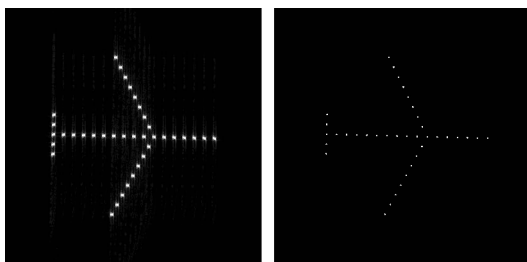
对图7中的两图分别进行包络对齐处理后的结果如图8所示,可以看出直接对距离压缩结果进行包络对齐的结果由于包络的变化,产生了弯曲的现象,而对于包络规整后的图像进行处理的结果则对齐较为准确。



(a)未经包络规整 (b)经过包络规整

图8 最小熵法包络对齐结果

经过进一步成像处理得到的结果如图9所示。可以看出,未经过包络规整的处理结果在距离向有明显的散焦,对成像的分辨率造成了较严重的影响,而经过包络规整后的成像结果聚焦结果非常理想,可以达到较高的分辨率。



(a)未经包络规整 (b)经过包络规整

图9 最小熵法成像结果

为了对成像的结果进行评估,本文采用了图像的极值

点强度、图像的熵值、图像的对比度3个参数对包络规整前后的相关法,一阶距离法以及最小熵法进行了评估,得到结果如表2所示。

通过对比可以看出,通过包络规整处理,各对齐算法成像结果中的极值点强度都有较大幅度的提升,大约能够达到6 dB。同时整体图像的熵在下降,说明图像成像结果得到了锐化。图像的对比度也有较大程度的提升。

5 结论

本文研究了W波段ISAR成像中的包络对齐处理,指出其中存在的包络变化问题,并给出了数值估计。在此基础上,提出了一种基于Keystone变换的包络规整处理方法。通过该处理,能够将目标不同时刻的回波补偿为相似的包络,进而得到更准确的包络对齐结果。最后使用仿真得到结果的成像质量差距证明了该方法对于W波段ISAR成像包络对齐处理改进的有效性。

参考文献

- [1] 保铮,刑孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [2] 张直中. 逆合成孔径雷达(ISAR)成像[J]. 中国电子科学研究院学报,2006,1(5):391-404.
- [3] 雷斌,丁赤飏. 一种基于SAR图像视觉特征的改进像素掩蔽方法[J]. 电子测量技术,2014,37(11):37-41.
- [4] Lexington, Massachusetts; Lincoln Laboratory, MIT Lincoln Laboratory 2009 Annual Report. 2009. [EB/OL]. [2015-3-20] http://www.ll.mit.edu/publications/Annual_Report_2009.pdf.
- [5] 刘爱芳,李或展,朱晓华. 用改进的包络最小熵法进行包络对齐[J]. 信号处理,2005,21(1):49-51.
- [6] WANG J F, LIU X ZH. Improved global range alignment for ISAR[J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2007, 43(3): 1070-1075.
- [7] 王颖,雷斌. 基于雷达信噪比模型的目标跟踪算法研究[J]. 国外电子测量技术,2015,34(1):28-31,35.
- [8] SU J, XING M, WANG G. et al. High speed multi target detection with narrowband radar [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2010, 4(4):595-603.
- [9] 阚晓博,宁宇. 逆合成孔径雷达相位补偿算法研究[J]. 国外电子测量技术,2010,29(9):33-35.
- [10] BAO ZH, WANG G Y, LUO L. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging of Maneuvering Targets[J]. Optical Engineering, 2005(5): 1582-1588.
- [11] TIAN J, CUI W, WU S. A novel method for parameter estimation of space moving targets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 389-393.

(下转第56页)

保各设备工作电平在一个合理的动态区间内,裕量充分。做好定期的链路维护工作及设备监控的预警报警,做到防患于未然。

4 结论

本文以 FY-2 静止气象卫星为研究对象,重点分析、讨论了地面信道中易忽视且影响重大的监控采集及信号中断故障实例,给出排查方法、流程分析、及检测结果,并提出预防措施,实用性强。若要提高信道运行的可靠性及稳定性,未来可以从建立信道维修档案、监测重点参数变化趋势、制定例检维护方案等方面考虑,从细节处着手、提高测试方法的智能化水平,为故障分析做好预判,从而为卫星通信业务提供切实的保障。

参考文献

- [1] 冯庆玉,岳江水,夏景林,等. FY-2F 地面应用系统信道干扰排查及优化[J]. 空间电子技术, 2014, 11(2):75.
- [2] 郑红梅,王有杰,陈科,等. 塔机群无线远程安全监控系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 520-527.
- [3] 杨英华,魏玉龙,李召,等. 基于子空间混合相似度的过程监测与故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(4):935-941.
- [4] 李景峰. Visual C++ 串口通信技术详解 [M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社,2013:77-79.
- [5] 冯庆玉,夏景林. FY-2 静止气象卫星地面信道监控设计及维护[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3):47-48.
- [6] 梁金山,刘薇. 一种卫星通信网络管理系统设计[J]. 无线电通信技术, 2010, 36(2):10-12.
- [7] 孙玉伟,齐昶,冉祥东. 卫星通信网集中监控管理系统设计[J]. 计算机与网络, 2006(6):41-43.
- [8] 毛钧杰. 微波技术与天线[M]. 北京:科学出版社, 2006:63-68.
- [9] 王少荣,程时杰. 实现电力监控嵌入式系统可靠数据交换的串行通信旭 Agent [J]. 继电器, 2007, 35(19):38.
- [10] 孙学康,张政. 微波与卫星通信 [M]. 第 2 版. 北京:人民邮电出版社,2007:88-92.

作者简介

冯庆玉,1983 年出生,硕士研究生,工程师。主要研究方向为气象卫星的地面数据接收与发射。
E-mail: fqy2311@126.com

(上接第 47 页)

- [12] 江建军,黄云雪,孙彪,等. 基于随机解调器的宽带雷达信号探测[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 709-713.
- [13] ZHANG SH SH, ZHANG W, WANG Y. Multiple targets' detection in terms of Keystone transform at the low SNR level[A]. International Conference on Information and Automation, 2008:1-4.

作者简介

魏一搏,硕士研究生。主要研究方向为 W 波段 ISAR

运动补偿技术及成像徙动补偿。
E-mail: ghost200802@163.com

王辉,博士,副研究员。主要研究方向为星载毫米波 SAR。作为项目负责人承担了 XX 高分预先研究项目:“星载毫米波 SAR 技术特点及应用前景分析”、XX 预研基金-公用技术基础项目:“星载毫米波 SAR 数字波束合成(DBF)技术研究”、XX 高分新型载荷项目“星载毫米波 SAR-GMTI 技术”等研究工作。
E-mail: wanghui@mail. ie. ac. cn