

# 最小割集法在极限改善因子故障诊断中的应用

刘光普<sup>1,2</sup> 梁莺<sup>1</sup> 任雍<sup>1</sup> 吴昌叨<sup>1</sup> 韩伟中<sup>1</sup>

(1.福建省大气探测技术保障中心 福州 350008; 2.南京信息工程大学大气物理学院 南京 210044)

**摘要:** 新一代天气雷达极限改善因子是否达标直接影响雷达回波信号的谱估计和滤波能力,为了更好地解决极限改善因子中不同频率的毛刺干扰问题,介绍了极限改善因子参数的测试原理,详细阐述了最小割集法的原理,并结合信号的功率、脉冲包络参数指标,对影响极限改善因子的发射和接收链路逐一进行分析,并以相关故障诊断实例说明最小割集法的实现过程。通过分析极限改善因子异常的原因,不仅可以为雷达技术人员更好的完成雷达现场测试和维修维护提供指导和帮助,而且能够提高测试效率,保障雷达正常稳定运行。

**关键词:** 最小割集法;雷达极限改善因子;毛刺干扰;维修维护

**中图分类号:** TN957.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.1520

## Application of minimum cut sets method in analysis and diagnosis for limit improvement factor

Liu Guangpu<sup>1,2</sup> Liang Ying<sup>1</sup> Ren Yong<sup>1</sup> Wu Changdao<sup>1</sup> Han Weizhong<sup>1</sup>

(1. Atmospheric Sounding and Technical Support Centre of Fujian Province, Fuzhou 350008, China;

2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** The limit improvement factor of CINRAD/SA transmitter, which is the abbreviation of SA model of China New Generation Radar, is including two parts of transmitter input and output limit improvement factors. It can affect the spectrum estimation of radar echo signal and the filtering capabilities. In order to analyze and diagnose for abnormal limit improvement factor of CINRAD/SA transmitter, we introduce its principle firstly in this paper, elaborate mathematical model of minimum cut sets method, combining with the signal power and pulse envelope, then analyze the transmitter and receiver circuits which can impact the limit improvement factor, and last classify the disturbance causes of different frequency. We can find the causes for interfering and provide relevant solutions in this way, give better advice and assist for radar technologists to complete test on site and the work of maintenance and service, ensure CINRAD/SA running smoothly.

**Keywords:** minimum cut sets method; radar limit improvement factor; disturbance causes; maintenance and service

## 0 引言

新一代天气雷达观测气象回波时容易受到海浪杂波、地物杂波和昆虫飞鸟运动的影响,为了从杂波环境中提取出有用的气象回波,获取多普勒参数,对雷达的杂波抑制和相位稳定能力提出了较高的要求。新一代天气雷达作为一种集成度很高的遥感探测设备,不同组件或器件的性能指标会对雷达探测能力产生较大的影响。

雷达发射系统的输入/输出极限改善因子,即单边带相位噪声,是反映一定条件下的信号功率谱和噪声功率谱相互关系的重要参数。极限改善因子的变化不仅影响雷达回波信号的谱估计和雷达回波的滤波能力,而且较差的极限

改善因子指标会直接影响雷达的地物抑制能力,造成雷达产品中会存在较多的杂散点,影响预报员判断不同天气回波的强度变化<sup>[1]</sup>。为了保证雷达极限改善因子指标正常,按照中国气象局制定的天气雷达定标业务规范要求,当雷达脉冲重复频率为 1 282 Hz 的高重复频率时,雷达发射系统输出极限改善因子应优于 52 dB,即信噪比  $S/N$  应大于 78.308 dB,发射系统输入极限改善因子应优于 55 dB,即信噪比  $S/N$  应大于 81.308 dB<sup>[2]</sup>。雷达发射系统极限改善因子是雷达维护维修和定标工作的一项重要内容,由于受到雷达发射系统和接收系统组件的影响,各雷达站大多存在不同的极限改善因子干扰因素<sup>[3]</sup>。为了准确定位影响雷达输入输出极限改善因子的组件,提高测试的效率和准确度,

本文在分析雷达输入输出极限改善因子的链路的基础上,将最小割集法应用到极限改善因子的故障诊断中,结合雷达脉冲功率和包络等相关参数,建立不同类型的分析测试流程,认真分析查找故障原因,能够帮助雷达技术人员更好的完成雷达维护维修和定标工作。

## 1 极限改善因子和最小割集法原理

### 1.1 极限改善因子原理

新一代天气雷达发射激励为脉冲调制信号,在时域中表现为持续一定时间宽度的矩形信号,在频域中表现为间隔等于脉冲重复频率的一根根谱线以及分布在谱线之间的噪声。脉冲调制信号频谱包络为 Sinc 函数,该函数的第一个零值点出现在相对于载频为  $\pm 1/\tau$  的频点上,脉冲重复频率  $F_r = 1/\tau$ ,表示各个谱线之间的间隔各个频谱分量上的载波能量随着占空比而增加, $\tau$  表示发射系统脉冲宽度,实际宽度可由示波器测量得到<sup>[4]</sup>。为了保证雷达持续产生较高的发射功率,发射脉冲需要一定的持续时间积聚能量,同时由于雷达元器件制作工艺的限制,在实际应用中,时域中的脉冲调制信号不是理想的矩形信号,其频谱也不是一系列离线的多根谱线,而是具有一定宽度的频谱,实际测量的脉冲调制信号频谱如图 1 所示,其中  $S/N$  表示信号噪声比<sup>[5]</sup>。

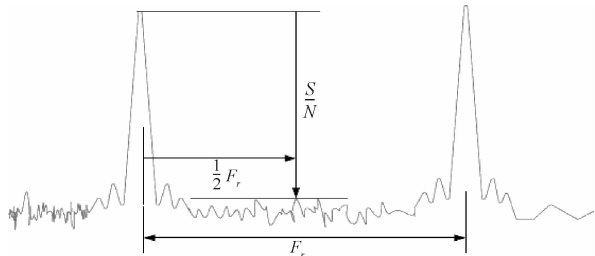


图 1 实际雷达发射信号极限改善因子频谱

使用高质量、高分辨率和大动态范围的频谱分析仪,能够准确得到雷达输入输出极限改善因子指标。依据射频信号的测量原理,测试人员按照新一代天气雷达定标业务规范的要求,综合考虑不同的频谱分析带宽和脉冲重复频率对极限改善因子指标的影响,直接测量得到不同参数下的信噪比,然后按照式(1)间接计算获取雷达发射通道的输入输出极限改善因子。

$$I(\text{dB}) = 10 \lg \frac{S}{N} + 10 \lg \frac{B_w \times B_r}{F_r} \quad (1)$$

式中: $I$  表示发射系统极限改善因子, $B_w$  表示频谱仪分析带宽, $B_r$  表示无脉压条件下的时宽-带宽积,测试中其取值为 1<sup>[6]</sup>。

图 2 所示为雷达发射机的输入输出极限改善因子指标测试图,雷达输入极限改善因子的好坏主要受到频率源、混频器和高频放大链路中固态放大器、脉冲形成器、可变衰减器的影响;雷达输出极限改善因子除了受到上述影响因素外,还会受到低压电源(灯丝电源、钛泵电源和磁场电源)和

高压组件(电容组件、充电开关组件和后充电电平组件)的影响。

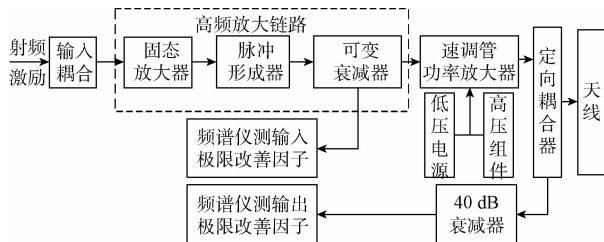


图 2 雷达发射机极限改善因子测试

### 1.2 最小割集法原理

运用最小割集法设计相应的诊断流程,能够准确的分析判断雷达极限改善因子中毛刺干扰的成因,同时结合信噪比频谱图以及其他仪器仪表和雷达机内 RDASOT 软件的测试数据,综合分析信噪比、功率、脉冲包络等参数,可以完成雷达射频激励信号从频率源输出到速调管输入链路中相关元件和组件的故障分析。

最小割集法数学模型是将故障现象作为方法设计中的顶层事件,通过逻辑关系和专家经验层层推导,将定位确定的故障模块单位作为底层事件,并通过各事件的概率重要度作为判断诊断是否准确的依据<sup>[7]</sup>。概率重要度是最小割集法是否可信的关键参数,它表示的是底层事件概率变化情况对顶层事件概率变化的难易程度,而不是底层事件之间相互变化的难易程度<sup>[8]</sup>。

通过归纳总结可知共有 14 种类型会对雷达发射机极限改善因子产生毛刺干扰,并且大部分类型之间是“或”关系,将其作为底层事件并用  $\{X_i\}$  表示,其中  $i$  表示事件类型。假设在同一时次仅有 1 个底层事件引起顶层事件发生,而且各底层事件之间是独立发生且不相容,因此,最小割集中各基本事件的失效概率乘积与顶层事件的失效概率之比表示最小割集重要度,并根据其大小作为最小割集法的排序标准<sup>[9]</sup>。

假设 1 次故障诊断事件共有  $k$  个最小割集层,顶层事件发生的概率与互不相容的底层事件发生概率的关系表示为:

$$P(T) = P(K_1 \cup \dots \cup K_k) = \sum_{i=1}^k P(K_i) -$$

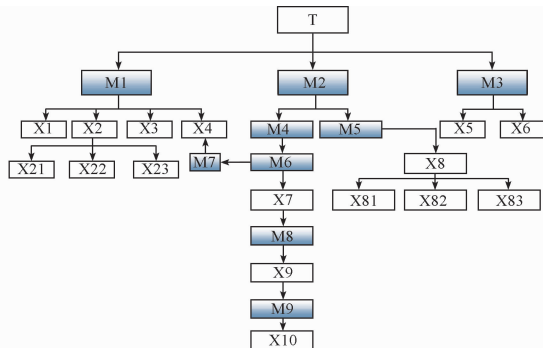
$$\left[ \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k P(K_i K_j) + \dots + (-1)^{k-1} P(K_1 \dots K_k) \right] \quad (2)$$

式中: $P(T)$  表示顶层事件发生的概率, $P(K_i)$  表示各割集层中基本事件发生的概率。当最小割集的不可信度很小的时候,顶层事件发生的概率可近似表示为各底层时间发生概率的总和:

$$P(T) \approx \sum_{i=1}^k P(K_i) \quad (3)$$

雷达极限改善因子产生不同频率毛刺干扰的成因,主要涉及高压组件、低压电源、混频器或机械振动等原因造成

的毛刺干扰<sup>[10]</sup>。按照毛刺干扰频率的不同,对干扰类型归纳分类,逐级排查各雷达组件,同时结合脉冲包络和信号功率等参数,最终确定干扰成因。图 3 所示为使用最小割集法分析雷达极限改善因子干扰原因的流程。



符号	含义	一级符号	含义	二级符号	含义
T	极限改善因子受干扰	X1	油泵故障	X21	聚焦线圈风机故障
M1	50Hz 整数倍毛刺干扰	X2	风机故障	X22	速调管风机故障
M2	1/2 重复频率毛刺干扰	X3	低压电源故障	X23	发射机机柜风机故障
M3	其它频点毛刺干扰	X4	频率源故障	X81	电容组件故障
M4	输入极限改善因子毛刺干扰	X5	机械振动产生毛刺干扰	X82	充电开关组件故障
M5	输出极限改善因子毛刺干扰	X6	不合理布线产生毛刺干扰	X83	后充电校准组件故障
M6	频率源激励信号毛刺干扰	X7	固态放大器故障		
M7	频率源功率不达标	X8	发射机高压组件故障		
M8	固态放大器信噪比有毛刺干扰	X9	脉冲形成器故障		
M9	脉冲形成器信噪比有毛刺干扰	X10	可变衰减器故障		

图 3 最小割集法分析极限改善因子干扰成因

根据干扰频率的不同,将干扰成因分为 50 Hz 整数倍的毛刺干扰、1/2 脉冲重复频率  $F_r$  毛刺干扰和其他频率毛刺干扰等 3 种类型,针对每一类干扰再进一步分析,最终定位到影响雷达极限改善因子性能的组件。

## 2 实例分析

在雷达站使用频谱仪进行发射系统输入极限改善因子指标测量的过程中,出现信噪比随时间逐渐降低的现象。图 4 所示为 1 282 Hz 的脉冲重复频率时,输入端信噪比从 73.315 dB 逐渐降低至 66.404 dB 的频谱示意图。根据雷达极限改善因子发生的故障现象,按照图 3 所示的雷达极限改善因子干扰原因分析流程,根据最小割集重要度的大小逐步分析实现故障组件的查找和定位。

由于上述底层事件的不可信度很小,根据式(3)计算得到顶层事件的发生概率:

$$P(T) \approx \sum_{i=1}^{10} P(K_i) = P(K_1) + P(K_2) + P(K_3) + P(K_4) + P(K_5) + P(K_6) + P(K_7) + P(K_8) + P(K_9) + P(K_{10}) = 1.14671 \times 10^{-3}$$

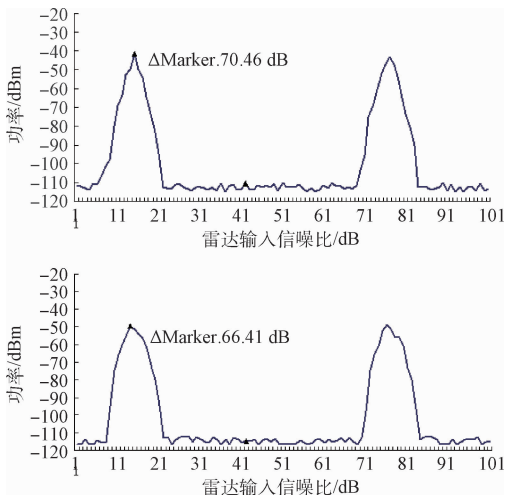
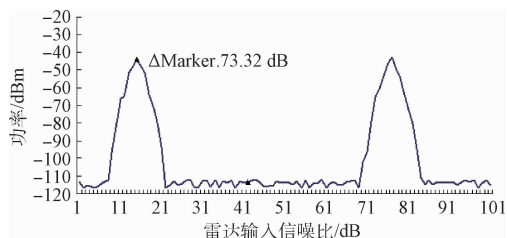


图 4 输入极限改善因子随时间逐渐降低示意

$R_i(t) = e^{-\gamma_i t}$  表示在  $[0, t]$  时间段内第  $i$  个底层事件发生的可靠度,则相应的不可靠度为  $F_i(t) = 1 - R_i(t) = 1 - e^{-\gamma_i t}$ ,其中  $\gamma_i$  表示各底层事件发生的概率,将时间区间设为 1 000 h,从而能够尽可能获取足够的故障个例。各底层事件发生概率和可信度之间的关系如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

表 1 各底层事件发生概率和可信度分析

底层事件	发生概率/ $10^{-6}$	可信度
可变衰减器故障	3.18	0.996 8
高频脉冲形成器故障	0.48	0.999 5
聚焦线圈风机故障	12.5	0.987 5
后充电校准组件故障	20.8	0.979 4
充电开关组件故障	1.38	0.998 6
电容组件故障	45.36	0.955 6
频率源故障	38.1	0.962 6
固态放大器故障	1.22	0.998 8
速调管风机故障	27.19	0.973 2
发射机机柜风机故障	1.48	0.998 5

由表 1 可知,不同组件发生的概率均不相同,均具有较高的可信度。高频脉冲形成器发生故障的概率最低,但是由于高频脉冲形成器故障引起雷达极限改善因子随时间减小的可能性最大。为了检验最小割集法的分析结果,需要根据测量的信号频谱、功率和包络等参数分析判断。

根据故障现象首先检查测量频率源 J3 输出信号功率和信噪比,信号输出功率为 23.12 dBm,信噪比为 90.02 dB,并且没有毛刺干扰,指标满足雷达测试要求,说明频率源输出信号正常;其次检查固态放大器输出信号脉冲宽度、功率和信噪比,窄脉冲宽度为 1.62  $\mu$ s,信号功率为 46.8 dBm,信噪比为 89.37 dB 并且没有毛刺干扰,各项指标均满足测试要求并基本保持不变,说明高频激励器输出信号正常;然后检查高频脉冲形成器输出信号的信噪比,其

信噪比随时间逐渐降低<sup>[12-13]</sup>。按照测试流程完成相关组件输入输出信号的信噪比后,分析上述测试结果,初步怀疑是高频脉冲形成器性能变差影响雷达发射系统输入极限改善因子指标。为了进一步确定故障原因,在保证人工线电压指标正常的前提下,使用雷达机内指标测试软件 RDASOT 控制雷达发射不同宽度的脉冲信号,用示波器检查高频脉冲形成器输出包络指标是否正常<sup>[14]</sup>。通过测试发现宽脉冲信号指标满足测试要求,脉冲宽度基本保持在  $4.57 \mu\text{s}$ ,而窄脉冲信号脉冲宽度随时间逐渐减小,从  $1.62 \mu\text{s}$  逐渐降低至  $1.43 \mu\text{s}$ 。由于仅仅是窄脉冲信号包络在逐渐减小,说明不是高频脉冲形成器主控电路故障。根据高频脉冲形成器原理,判断是脉冲形成驱动器中控制窄脉冲宽度的单稳态器件 D2B 性能变差导致<sup>[15]</sup>。更换高频脉冲形成器后,首先重新检测其脉冲包络和功率,均符合测试的指标要求,然后再次测量雷达发射系统输入极限改善因子,不同脉冲重复频率的信噪比指标均能够满足测试要求并基本保持不变,从而完成此次故障的分析和诊断。

### 3 结 论

新一代天气雷达发射系统输入/输出极限改善因子是雷达维护维修和定标的主要技术参数,通过测量信号的信噪比参数计算得到。信噪比测试中不同频率的毛刺会干扰发射系统的相位稳定度,从而直接影响雷达回波信号中滤除噪声和干扰的能力,最终影响雷达产品质量。为了保证极限改善因子指标的准确性,本文在分析雷达极限改善因子干扰原因流程的基础上,运用最小割集法分析不同频率毛刺的成因,通过统计分析最小割集法中底层事件的发生概率和事件可信度。每次发生雷达极限改善因子故障时,依据事件可信度的大小对可能发生故障的组件进行排序,并结合功率计、示波器等测试仪表测量信号的功率和脉冲包络等参数,综合诊断影响极限改善因子指标的因素。及时判断和解决影响发射系统极限改善因子指标的问题,不仅能够为雷达技术人员开展维护维修和定标工作提供帮助和指导,而且能保障新一代天气雷达稳定可靠运行,提高雷达的产品质量,充分发挥雷达在气象业务中的关键作用。

### 参考文献

- [1] 柴秀梅,潘新民,汤志亚,等.新一代天气雷达回波强度异常分析与处理方法[J].气象,2011,37(3):379-384.
- [2] 汪俊,高玉春.虚拟仪器在天气雷达接收机测试中的应用[J].气象科技,2013,41(6):998-1002.

- [3] 吴少锋,项颂翔,胡东明,等. CINRAD/SA 发射系统典型故障分析处理[J].气象科技,2012,40(3):358-362.
- [4] 任雍,杨苏勤,汪学渊,等. 轴角编码单元在 CINRAD/SA 雷达中的应用[J]. 电子测量技术,2016,39(3):85-90.
- [5] 陈福彬,柴海莉,高晶敏. 基于 LabVIEW 的自动化测试平台设计[J]. 国外电子测量技术,2012,31(11):9-14.
- [6] 张玲,侯亮,田鹏飞,等. CINRAD/SA 雷达发射系统常见故障解析[J]. 气象水文海洋仪器,2014,6(2):99-102.
- [7] 邓勇,于晨松,文浩. 基于倒谱和决策树的模拟电路故障诊断[J]. 电子测量和仪器学报,2017,31(3):430-435.
- [8] 王燕,宋小安,曹子剑. 某两型雷达综合测试系统设计与实现[J]. 电子测量技术,2014,37(11):117-121.
- [9] 陈凤友,陈忠一. 故障树分析法在雷达发射机故障诊断中的应用[J]. 电子机械工程,2013,29(3):61-64.
- [10] 王杰,何建新. 故障树分析法在新一代天气雷达故障诊断中的应用[J]. 南京信息工程大学学报,2013,5(2):147-153.
- [11] 焦卫东,林树森. 整体改进的基于支持向量机的故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(8):1861-1870.
- [12] 潘新民,崔炳炅,王全周,等. 新一代天气雷达天馈系统故障分析诊断方法与技巧[J]. 气象科技,2013,41(6):982-987.
- [13] 陈福彬,柴海莉,高晶敏. 基于 LabVIEW 的自动化测试平台设计[J]. 国外电子测量技术,2012,31(11):9-14.
- [14] 谈恩民,何正岭. 模拟电路故障重叠诊断方法研究[J]. 国外电子测量技术,2015,34(6):33-36.
- [15] 胡梅,樊敏. 一种模拟电路功能模块故障诊断的方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(5):676-684.

### 作者简介

刘光普(通信作者),工学硕士,工程师,主要研究方向为气象雷达测试技术和雷达信号与信息处理。

E-mail:lgp\_2208286@163.com

梁莺,工学硕士,工程师,主要研究方向为雷达信号与信息处理。

E-mail:zijingling999@163.com