

· 自动化技术 ·

采用多信号流图模型的雷达接收机故障诊断方法

陈世杰, 连 可, 王厚军

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

【摘要】介绍了多信号流图模型建模的基本方法。利用多信号流图模型建立了雷达接收机的故障诊断模型,得到了反映故障源和测试结果之间对应关系的故障依赖矩阵。在此基础上结合故障源先验故障概率信息推导了一种计算故障源贝叶斯最大后验概率的算法。将该算法应用于某型雷达接收机故障诊断中,以故障后验概率最大为判断准则,实现了对雷达接收机系统的在线多故障实时诊断。

关键词 贝叶斯后验概率; 故障诊断; 多信号流图模型; 雷达接收机
中图分类号 TM93; O122 文献标识码 A

Fault Diagnosis Method of Radar Receiver Using Multi-Signal Flow Graphs Model

CHEN Shi-jie, LIAN Ke, and WANG Hou-jun

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The fault diagnosis model of radar receiver is built by applying multi-signal flow graphs. Based on the model the dependence matrix which relates faults and tests is generated and an algorithm calculating Bayes maximal posteriori probability of fault sources is derived. This algorithm is applied in fault diagnosis of radar receiver, and the real-time multi-fault locations are realized by using the maximal posteriori probability of fault sources as judging rule.

Key words Bayes posteriori probability; fault diagnosis; multi-signal flow graphs model; radar receiver

雷达接收机系统是雷达系统的关键组成部分,长期以来一直是雷达整机中发生故障频率较高的分机之一。目前的故障诊断方法是对接收机系统关键部件设计BIT装置和进行状态监控^[1-2],当状态超出预置则给出故障报警提示。该方法的优点是简单易行,但缺点是缺乏故障推理机制,对多故障并发的情况无定位能力。

本文针对雷达接收机系统的特点,提出一种基于多信号流图模型的雷达接收机故障诊断方法。

1 接收机系统多信号流图模型

雷达接收机系统是一类典型的复杂电子系统,目前常用的定量模型、定性模型、结构模型和依赖模型等均难以满足其故障诊断建模的需求^[3-5]。“多信号流图”模型是文献[6]提出的一种建模方法。该

模型通过跟踪系统每一组件影响的信号以及每一测试节点可以检测的信号流向,在系统结构模型的基础上描述信号间的依赖关系,成功地融合了结构模型和依赖模型的优点,非常适合大型复杂系统的故障建模。

从形式上讲,多信号流图模型由下列元素组成:有限的系统故障源 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_L\}$ 及与故障源相关的信号集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_K\}$; n 维可用的测试集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$; P 维的测试点集 $TP = \{TP_1, TP_2, \dots, TP_p\}$; 每个测试点 TP_i 对应一组测试集 $SP(TP_i)$; 每个故障源 c_i 对应一组信号集 $SC(c_i)$; 每个测试 t_j 检测一组信号 $ST(t_j)$ 。

本文利用“多信号流图”模型建模方法对某型雷达接收机系统建立故障诊断模型,组成框图如图1所示,其主要的功能是对微弱的回波信号进行幅度

收稿日期: 2008-05-31; 修回日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60673011)

作者简介: 陈世杰(1963-), 男, 在职博士生, 高级工程师, 主要从事自动测试技术与故障诊断方面的研究。

和频率变换。根据分析,容易发生故障的是PIN开关、放大器、近程增益控制(STC)、滤波器、混频器、本振、相干振荡器、相位检波器等模块,而隔离器和

耦合器模块出现故障的概率机率很小。因此选择PIN开关等14个容易发生故障的系统模块为待监测的故障源,选择图1所示Pt₁~Pt₁₁等11个节点为测试点。

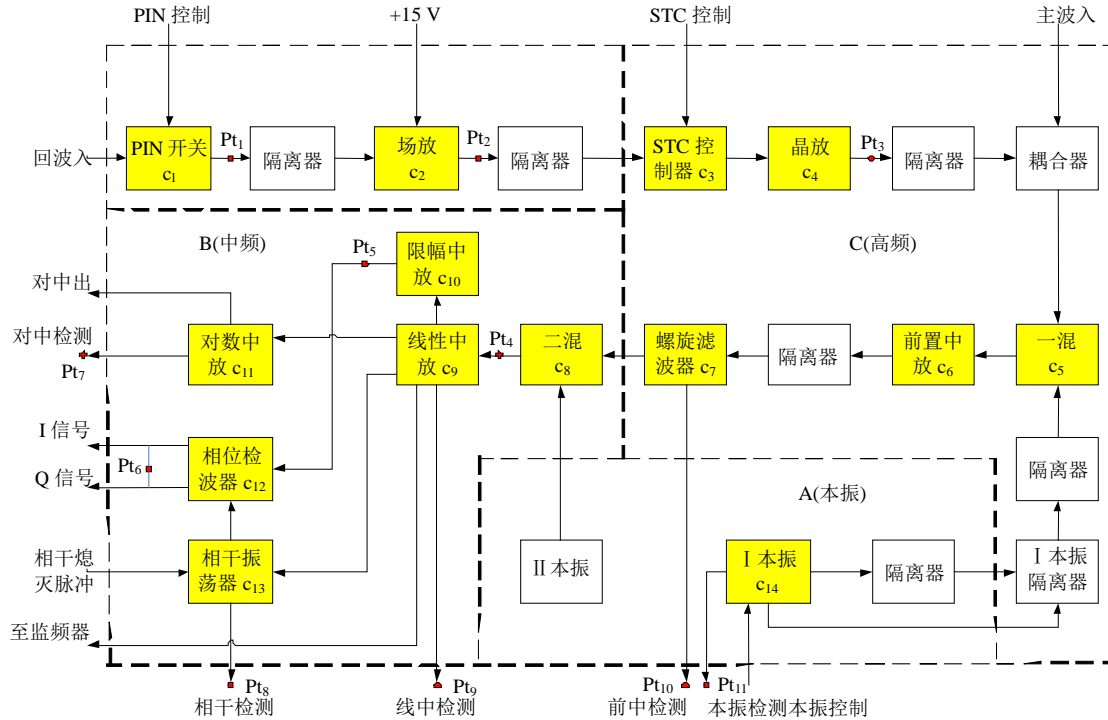


图1 某型雷达接收机组成框图

表1 某雷达接收机多信号流图模型组成元素关系

| C | S | T | SP(TP _i) | SC(c _i) | ST(t _j) |
|---------------------------|--|------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| c ₁ : PIN模块 | s ₁ : 脉冲信号串 | t ₁ : 信号通/断测试 | SP(TP ₁) | SC(c ₁) | ST(t ₁) |
| c ₂ : 场放模块 | s ₂ : 27.2 dB增益信号 | t ₂ : 27.2 dB信号幅度增益测试 | SP(TP ₂) | SC(c ₂) | ST(t ₂) |
| c ₃ : STC控制器模块 | s ₃ : 近程增益控制信号 | t ₃ : 近程增益衰减测试 | SP(TP ₁₀) | SC(c ₃) | ST(t ₃) |
| c ₄ : 晶放模块 | s ₄ : 30.2 dB增益信号 | t ₄ : 30.2 dB信号幅度增益测试 | SP(TP ₃) | SC(c ₄) | ST(t ₄) |
| c ₅ : 第一混频器 | s ₅ : 281.25 MHz中频信号 | t ₅ : 频率测试 | SP(TP ₁₀) | SC(c ₅) | ST(t ₅) |
| c ₆ : 前置中放模块 | s ₆ : 40.7 dB增益信号 | t ₆ : 40.7 dB信号幅度增益测试 | SP(TP ₁₀) | SC(c ₆) | ST(t ₆) |
| c ₇ : 螺旋滤波器模块 | s ₇ : 20 dB信噪比信号 | t ₇ : 信噪比测试 | SP(TP ₁₀) | SC(c ₇) | ST(t ₇) |
| c ₈ : 第二混频器 | s ₈ : 6.25 MHz中频信号 | t ₈ : 频率测试 | SP(TP ₄) | SC(c ₈) | ST(t ₈) |
| c ₉ : 线性中放模块 | s ₉ : 51.7 dB增益信号 | t ₉ : 51.7 dB信号幅度增益测试 | SP(TP ₉) | SC(c ₉) | ST(t ₉) |
| c ₁₀ : 限幅中放模块 | s ₁₀ : 67.7~81.7 dB增益信号 | t ₁₀ : 16~30 dB信号幅度增益测试 | SP(TP ₅) | SC(c ₁₀) | ST(t ₁₀) |
| c ₁₁ : 对数中放模块 | s ₁₁ : 111.7 dB增益信号 | t ₁₁ : 111.7 dB信号幅度增益测试 | SP(TP ₇) | SC(c ₁₁) | ST(t ₁₁) |
| c ₁₂ : 相位检波器模块 | s ₁₂ : I信号相位 s ₁₃ : Q信号相位 | t ₁₂ : I、Q信号相位差测试 | SP(TP ₆) | SC(c ₁₂) | ST(t ₁₂) |
| c ₁₃ : 相干振荡器模块 | s ₁₄ : 相干振荡信号 | t ₁₃ : 相干信号相位同步测试 | SP(TP ₈) | SC(c ₁₃) | ST(t ₁₃) |
| c ₁₄ : I本振模块 | s ₁₅ : XXXX MHz本振信号 | t ₁₄ : 频率及功率测试 | SP(TP ₁₁) | SC(c ₁₄) | ST(t ₁₄) |

根据多信号流图模型建模方法, 某型雷达接收机多信号流图模型中 C 、 S 、 T 、 $SP(TP_i)$ 、 $SC(c_i)$ 、 $ST(t_j)$ 及其之间关系分别如表1所示。定义完全故障(G故障)为监测对象完全失去功能, 不能完成即定工作; 功能性故障(F故障)为监测对象功能指标偏离设计范围, 不能正常工作。经过分析, 某型雷达接收机可能发生G故障的故障源有: c_1 、 c_3 、 c_5 、 c_8 、 c_{10} 、 c_{12} 、 c_{13} ; 既可能发生G故障又可能发生F故障的故障源有: c_2 、 c_4 、 c_6 、 c_7 、 c_9 、 c_{11} 、 c_{14} (其中 c_{11} 由

于是系统输出, 可忽略其F故障影响)。根据可及性分析, 某型雷达接收机系统的故障依赖矩阵(D 矩阵)如表2所示。

故障依赖矩阵 $D=[d_{ij}]$ 反映了测试 $t_j \in T$ 的诊断能力。如果 c_i 发生故障, 能被 t_j 检测到, 则 $d_{ij}=1$; 反之, $d_{ij}=0$ 表示故障源 c_i 不能被 t_j 检测到。得到 D 矩阵是利用多信号流图模型进行复杂系统故障诊断的核心和关键, 本文的故障定位算法将在此基础上进行。

表2 某型雷达接收机故障依赖矩阵(D 矩阵)

| C/T | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | t_8 | t_9 | t_{10} | t_{11} | t_{12} | t_{13} | t_{14} |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $c_1(G)$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_2(G)$ | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_2(F)$ | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $c_3(G)$ | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| $c_4(G)$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_4(F)$ | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $c_5(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_6(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_6(F)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $c_7(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_7(F)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| $c_8(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_9(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $c_9(F)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $c_{10}(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| $c_{11}(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $c_{12}(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $c_{13}(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| $c_{14}(G)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $c_{14}(F)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

2 基于贝叶斯最大后验概率准则的故障定位算法

传统的故障诊断方法都假设系统在同一时刻最多只存在一个故障。但是对于诸如雷达系统等复杂电子系统而言, 系统组件和测点数目非常庞大, 经常会发生多故障并发的情况, 传统的BIT方法对该类故障往往没有诊断能力。

根据贝叶斯理论, 在已知系统故障依赖矩阵 D 及故障源先验故障概率向量 $p(C)=[p(c_1), p(c_2), L, p(c_L)]^T$ 的条件下, 系统的多故障诊断问题可以表述为^[7]: 根据测试点上各传感器的测试结果, 确定可疑故障集 $X \subseteq C$, 使其后验故障概率最大, 即求解:

$$\max_{X \subseteq C} \text{Prob}(X | T_p, T_f) \quad (1)$$

式中 T_f 为测试异常的测试集, T_p 为测试正常的测

试集。系统运行过程中, 通过检测设置在观测点上的传感器状态就可以实时评估系统的运行状态。为此, 定义 $L \times 1$ 维指示向量 x , 当故障源 $c_i \in X$ 时 $x_i=1$; 反之 $x_i=0$ 。根据Bayes理论:

$$\max_{X \subseteq C} \text{Prob}(X | T_p, T_f) =$$

$$\max_{X \subseteq C} \text{Prob}(T_p, T_f | X) \text{Prob}(X) / \text{Prob}(T_p, T_f) \quad (2)$$

由于 $\text{Prob}(T_p, T_f)$ 与 X 无关, 故可以看作常量, 式(2)等价于:

$$\arg \max_{X \subseteq C} \text{Prob}(T_p, T_f | X) \text{Prob}(X) =$$

$$\arg \max_{X \subseteq C} \text{Prob}(T_p | X) \text{Prob}(T_f | X) \text{Prob}(X) \quad (3)$$

式中

$$\text{Prob}(X) = \prod_{i=1}^L p(c_i)^{x_i} (1 - p(c_i))^{(1-x_i)} \quad (4)$$

$\text{Prob}(T_p | X)$ 和 $\text{Prob}(T_f | X)$ 则取决于系统的 D 矩阵

信息:

$$\text{Prob}(T_p | X) = \prod_{t_j \in T_p} \text{Prob}(t_j \in T_p | X) \quad (5)$$

$$\text{Prob}(T_f | X) = \prod_{t_k \in T_f} \text{Prob}(t_k \in T_f | X) \quad (6)$$

其中:

$$\text{Prob}(t_j \in T_p | X) = \prod_{i=1}^L (1 - d_{ij})^{x_i} \quad (7)$$

$$\text{Prob}(t_k \in T_f | X) = 1 - \text{Prob}(t_k \in T_p | X) \quad (8)$$

对于可靠测试, 如果测试 j 正常, 认为该测试所覆盖的所有组件 (\mathbf{D} 矩阵中 $d_{ij}=1$ 对应的行) 为正常组件; 对于检测异常的测试 k , 在第 k 列中将对应 $d_{ij}=1$ 的元素用 $d_{ik}=0$ 替代, 表示排除掉测试 k 覆盖的可疑故障组件中已确定为正常的组件。在此基础上去掉 \mathbf{D} 矩阵中所有检测正常测试对应的列得到新矩阵, 这是一个 $L \times |T_f|$ 矩阵, $|T_f|$ 表示检测异常的测试数。将新矩阵的列按测试成本的升序, 测试成本相同的列, 按其覆盖组件数的降序重新排列。这意味着, 对新矩阵中的任一行 i , 列 $\min[j | a_{ij}=1, j=1, 2, \dots, |T_f|]$ 是覆盖第 i 行的最好测试。将重新排列后的矩阵转置, 令其为 \mathbf{W} , 与原 \mathbf{D} 矩阵相比, \mathbf{W} 矩阵通过排除已知正常的组件大大地简化了计算量。

为了求解式(3), 首先引入下面的引理。

引理 $\text{Prob}(T_p | X) \text{Prob}(T_f | X)$ 取得最大值, 当满足如下条件:

(1) 如果 $t_j \in T_p$ 且 $d_{ij}=1$, 则 $x_i=0$ 。(2) 如果 $t_k \in T_f$, 则必然存在至少一个 $x_i=1$ 使 $d_{ik}=1$ 。

证明: 由假设可知, $\text{Prob}(T_p | X)$ 和 $\text{Prob}(T_f | X)$ 只有两个可能的取值0或1。为了最大化式(3)目标函数, 必须使 $\text{Prob}(T_p | X)$ 和 $\text{Prob}(T_f | X)$ 都同时为1。

当 $t_j \in T_p$, $d_{ij}=1$ 时, 要使 $(1-d_{ij})^{x_i}=1$, 必有 $x_i=0$; 当 $d_{ij}=0$ 时, 无论 x_i 取值如何, $(1-d_{ij})^{x_i}=1$, 故条件(1)得证。当 $t_k \in T_f$ 时, 要使 $1 - \prod_{i=1}^L (1-d_{ik})^{x_i}=1$,

则至少存在一个 $x_i=1$ 使 $d_{ik}=1$ 。条件(2)得证。

利用引理, 式(3)目标函数中的前半部分, 即:

$\text{Prob}(T_p | X) \text{Prob}(T_f | X)$ 可以等价于约束集:

$$\mathbf{W}\mathbf{x} \geq \mathbf{e} \quad t_j \in T_f \quad (9)$$

式中 \mathbf{W} 是 $|T_f| \times L$ 维矩阵; \mathbf{e} 为单位列向量。

将式(4)取负自然对数并忽略常量, 则原问题可归纳为下面的集合覆盖问题(SCP):

$$z_{\text{sc}} = \min_{\mathbf{x} \in C^-} \sum_{c_i \in C^-} b_i x_i$$

$$\text{s.t. } \mathbf{W}\mathbf{x} \geq \mathbf{e}, x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, L \quad (10)$$

式中 C^- 是 C 中除去已确认未发生故障的故障源后形成的集合;

$$b_i = -\ln(p(c_i)/(1-p(c_i))) \quad i=1, 2, \dots, L \quad (11)$$

SCP是NP完全问题^[8]。对于大型复杂系统, 当 \mathbf{D} 矩阵的维数过大时, 现有的最优化算法均无法在多项式时间内得到最优解。一个折中的方法是利用启发式算法在可接受的计算时间内得到问题的近优解。本文采用拉格朗日松弛算法。

根据拉格朗日松弛理论^[9], 将式(10)松弛为如下优化问题:

$$z_{\text{LRSC}}(\boldsymbol{\mu}) = \min \sum_{j=1}^L l_j x_j + \sum_{i=1}^{|T_f|} \mu_i \quad (12)$$

$$\text{s.t. } x_i \in \{0, 1\}, i=1, 2, \dots, L$$

式中 $l_j = b_j - \sum_{i=1}^{|T_f|} \mu_i w_{ij}$, $\mu_i \geq 0, (i=1, 2, \dots, |T_f|)$ 为

拉格朗日乘子。可以通过次梯度优化算法求解式(12)的下确界 $z_{\text{LD}} = \max z_{\text{LRSC}}(\boldsymbol{\mu})$ 。令 z_{LD} 、 z_{UB} 、 z_{LB} 分别代表算法已搜索到的下确界, 式(10)的最优可行解对应的最优值和式(12)的一个可行解对应的最优值。根据前面的讨论, 基于拉格朗日松弛次梯度优化的多故障诊断算法步骤为^[10]:

1) 初始化, $z_{\text{LD}} = -\infty$, $z_{\text{UB}} = \infty$, $\mu_i = \min[b_j | w_{ij}=1, j=1, 2, \dots, L], i=1, 2, \dots, |T_f|$ 。

2) 用当前的 $\boldsymbol{\mu}$ 求解式(12), 令其最优值为 z_{LB} , 更新 $z_{\text{LD}} = \max(z_{\text{LD}}, z_{\text{LB}})$ 。

3) 构造原始SCP的一个可行解 S :

(1) 令 $S = [j | x_j=1, j=1, 2, \dots, L]$ 。(2) 对未被覆

盖的行 i (即 $\sum_{j=1}^m w_{ij} x_j = 0$), 将对应于 $\min[j | w_{ij}=1,$

$b_j < \infty, j=1, 2, \dots, L]$ 的 j 添加到 S 。(3) 将 $j \in S$ 按降序排列。如果 $S - [j]$ 仍然是 SCP 的可行解,

$S = S - [j]$ 。(4) 更新 $z_{\text{UB}} = \min(z_{\text{UB}}, \sum_{j \in S} b_j)$ 。

4) 如果 $z_{\text{LD}} = z_{\text{UB}}$, 转步骤10。

5) 计算次梯度 $g_i = 1 - \sum_{j=1}^m w_{ij} x_j, i=1, 2, \dots, |T_f|$ 。

6) 如果 $\sum_{i=1}^{|T_f|} (g_i)^2 = 0$, 转步骤10。

7) 计算迭代步长 $\delta = \frac{f(1.05z_{\text{UB}} - z_{\text{LB}})}{\sum_{i=1}^{|T_f|} (g_i)^2}$, 其中初

始 $f=2$ 。如果 z_{LD} 在连续30次迭代中没有增加, 则

将 f 折半。

8) 如果 $f \leq 0.005$, 转步骤10。

9) 更新拉格朗日乘子 $\mu_i = \max(0, \mu_i + \delta \cdot g_i)$, $i = 1, 2, \dots, |T_f|$, 转步骤2。

10) 输出 $\text{opt}X = \{x_1, x_2, \dots, x_L\}$ 。

3 仿真实验

由实验结果可见, 对于单故障情况, 诊断正确率达到了 100%; 双故障并发情况诊断正确率达到了 80%。平均诊断正确率为 90%, 诊断覆盖率达到了 93.3%; 两种故障情况下诊断算法均在可接受的时间内给出了诊断结论。

仿真实验条件设置为: 待测故障源先验故障概率在区间(0,1)上服从均匀分布, 传感器不存在虚警和漏警(理想传感器状态), 随机选择 5 种单故障状态和 5 种多双故障状态作为预置故障。诊断算法运行在 CPU 2.0GHz、内存 1 GB 的 PC 机上。实验结果如表 3 所示。

表3 理想输入条件下的故障定位算法诊断结果

| 故障状态 | 报警传感器 | 诊断结论 | 诊断时间/s |
|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------|
| $c_2(G)$ | 2,4,6,7,9, 10,11,12,13 | $c_2(G)$ | 0.001 379 |
| $c_3(G)$ | 3,4,6,9, 10,11,12 | $c_3(G)$ | 0.034 973 |
| $c_6(F)$ | 6,7, 9,11 | $c_6(F)$ | 0.001 107 |
| $c_9(G)$ | 9,10,11, 12,13 | $c_9(G)$ | 0.001 096 |
| $c_{13}(G)$ | 12,13 | $c_{13}(G)$ | 0.000 904 |
| $c_6(G),c_{10}(G)$ | 6,7,9,10, 11,12,13 | $c_6(G)$ | 0.001 034 |
| $c_{11}(G),c_{12}(G)$ | 11,12 | $c_{11}(G),c_{12}(G)$ | 0.000 787 |
| $c_4(G),c_{14}(F)$ | 4,5,6,7,8, 9,10,11, 12,13,14 | $c_4(G),c_{14}(F)$ | 0.075 016 |
| $c_7(F),c_9(F)$ | 7,9,11, 12,13 | $c_7(F),c_9(F)$ | 0.001 064 |
| $c_5(G),c_6(G)$ | 5,6,7,8,9, 10,11,12,13 | $c_5(G),c_6(G)$ | 0.031 627 |
| 诊断正确率/(%) | | 90 | |
| 诊断覆盖率/(%) | | 93.3 | |
| 平均诊断时间/s | | 0.014 899 | |

4 结 论

本文将一种基于多信号流图模型的故障诊断方法应用到某型雷达接收机故障诊断系统设计中。建

立了雷达接收机的多信号流图故障诊断模型, 推导了以贝叶斯最大后验概率为准则的故障定位推理算法。诊断实例表明, 该故障诊断方法对雷达接收机系统单故障和多故障情况均有较高的故障诊断能力, 故障定位时间可以满足在线故障监测要求。

参 考 文 献

[1] 都学新, 夏明飞, 王志云. 某型雷达BIT的设计与实现[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(2): 94-96.
DU Xue-xin, XIA Ming-fei, WANG Zhi-yun. The design and realization of a radar BIT circuit[J]. Fire Control and Command Control, 2004, 29(2): 94-96.

[2] 察 豪, 杨 智, 冷东方. 边界扫描测试技术在雷达BIT电路中的应用[J]. 现代雷达, 2000, (1): 50-53.
CHA Hao, YANG Zhi, LENG Dong-fang. The application of boundary scan test technology in radar BIT circuit[J]. Modern Radar, 2000, (1): 50-53.

[3] ISERMANN R. Process fault detection based on modeling and estimation methods-A survey[J]. Automatica, 1984, 20(2): 387-404.

[4] KUIPERS B. Qualitative simulation: Then and now[J]. Artificial Intelligence, 1993, 59(3): 133-140.

[5] KUIPERS B. Qualitative reasoning: Modeling and simulation with incomplete knowledge[C]International Federation of Automatic Control, 1989, 571-585.

[6] DEB S, PATTIPATI K R, RAGHAVAN V, et al. Multi-signal flow graphs: A novel approach for system testability analysis and fault diagnosis[J]. IEEE AES System Magazine, 1995: 14-25.

[7] SHAKERI M, PATTIPATI K, RAGHAVAN V, et al. Optimal and near-optimal algorithms for multiple fault diagnosis with unreliable tests[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1998,28(3): 431-440.

[8] GAREY M R, JOHNSON D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness[M]. New York: W H Freeman, 1993: 107-156.

[9] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
XING Wen-xun, XIE Jin-XING. Modern optimization algorithm [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[10] 连 可, 龙 兵, 王厚军. 基于贝叶斯最大后验概率准则的大型复杂系统故障诊断方法研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(3): 352-356.
LIAN Ke, LONG Bing, WANG Hou-jun. A fault diagnosis approach of the large complex system based on Bayes theory[J]. Acta Armamentarii, 29(3): 352-356.

编辑 漆 蓉