

基于变力度组合覆盖的信号处理软件测试用例生成

李 萍, 郭伟全

(工业和信息化部电子第五研究所, 广东 广州 510610)

摘 要: 信号处理软件参数间交互关系复杂多变、冗余无效参数多、参数有效等价类难以确定, 传统测试用例设计方法设计的测试用例规模大, 测试效果不明显. 针对该问题将变力度组合覆盖技术应用到信号处理软件测试用例设计中, 结合信号处理软件算法高密度的特点给出该技术应用的一般方法. 基于算法可形式化表达特点, 提出一种优化覆盖需求的方法. 试验结果表明, 优化后的覆盖需求对应的测试用例规模减小了, 而且测试用例的质量提高了.

关键词: 信号处理软件; 变力度组合覆盖; 测试用例生成

中图分类号: TP319

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2017)06-0109-05

Test Generation of Signal Processing Software Based on Variable Strength Combinatorial Coverage

LI Ping, GUO Wei-quan

(Fifth Electronics Research Institute, Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The relationships between factors in signal processing software is complicate, even some factors is redundant. And it's difficult to determine equivalence classes of factors. Traditional methods deal badly with test generation of signal processing software, by lager size and poor result. This paper discusses a new way of using variable strength combinatorial coverage into test generation of signal processing software. On the basis of the density algorithm, the application steps of the approach are given. Based on formalization expression of algorithm, a method is suggested to optimize coverage requirement. Experimental results show that the suggested method reduces the size of test cases, and improves the effect of test cases.

Key words: signal processing software; variable strength combinatorial coverage; test generation

1 引言

对待测系统 SUT (Software Under Testing) 参数的所有取值进行组合, 能够形成完备的测试用例集. 例如对一个具有 n 个参数的 SUT, 这些参数分别有 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 个离散量取值, 完全测试该系统需要 $\prod_{j=1}^n a_j$ 个测试用例, 这个组合数是一个庞大的数字, 而且经研究发现软件系统的故障往往是由少数几个参数的相互作用导致. 如何选取一个规模较小的测试用例子集, 在保证测试用例集错误检测能力的同时, 能够尽可能地降低测试成

本, 人们提出了基于组合覆盖的软件检测 (简称组合测试, Combinatorial Testing 或 Interaction Testing) 方法.

对于软件的组合测试方法有大量的研究成果, 本文主要介绍变力度组合覆盖, 并将其应用在信号处理软件测试用例设计中, 最后以雷达信号处理软件中常用的连续脉冲串脉冲压缩算法为实例进行讨论.

2 变力度组合测试模型

在很多软件系统中, 因素之间的交互关系可能

会比较复杂,不同因素间交互的力度往往也是不同的,为了扩展组合测试使用,人们提出了变力度组合覆盖,目前对于变力度组合覆盖的研究分为狭义和广义两种^[1-3],本文只讨论广义变力度组合覆盖。

首先要确定 SUT 测试场景空间的各个参数,这些参数可以是配置参数、内部事件、用户输入参数以及外部事件参数等。假设影响 SUT 的因素共有 n 个 $f_1, f_2, \dots, f_n$, 形成集合 $F = f_j (1 \leq j \leq n)$, 这 n 个因素分别取一组离散值 $V_1, V_2, \dots, V_n$, 构成因素的取值组合 $V = V_j (1 \leq j \leq n)$, 其中 V_j 表示参数 f_j 可取的有限离散点集, 并假设 a_j 表示参数 f_j 可取值的个数。

设 $A = (a_{i,j})_{m \times n}$ 为一个 $m \times n$ 的矩阵, 第 j 列表示 SUT 的因素 f_j , 任意元素 $a_{i,j} \in V_j$, 即矩阵 A 的所有元素均取自集合 $V_j (1 \leq j \leq n)$ 。第 i 行的 n 元组 $test = (a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n})$ 为 SUT 的一条测试用例, A 为 SUT 的一个组合测试用例集(或组合覆盖表)。

广义的变力度组合测试需要给出描述因素相互作用的模型。对于 F 中一组相互之间存在交互作用的因素构成子集 $r \subseteq F$, r 子集中包含所有因素间存在一个 $|r|$ 维的相互作用。相应的组合覆盖表必须覆盖 r 中所有因素的全部 $|r|$ 维取值组合。类似的 SUT 中所有因素间相互作用均可抽象为这样的子集。假设 SUT 中存在 t 组不同因素间相互作用, 则可得到一个因素间相互作用的集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_t\}$ 。

对于集合 R 中的任意一个 r_k , 由 r_k 中的 n_k 个因素所对应的列可组成一个 $m \times n_k$ 的子阵 A_k , 若该 n_k 个因素的所有 n_k 维取值组合均在 A_k 中出现至少一次, 则 A 为满足因素交互关系 R 的组合覆盖表, 即所谓的广义变力度组合覆盖表。

3 信号处理软件测试用例生成

信号处理是指对信号进行分析、变化、滤波、检测等处理, 以完成各种不同的预期目的, 即对一定规范的输入, 在有限时间内获得所要求的输出。处理的过程往往可以描述为一系列形式化的算法, 信号处理软件则是对这一系列形式化算法的实现。由此可见信号处理软件特点是算法高密度, 软件测试的重点在于验证算法实现正确性。

黑盒测试的测试目标为测试需求的全部覆盖, 而信号处理软件的黑盒测试目标应当为算法的全部覆盖。假设一个待测的信号处理软件包含 l 个算法, 那么测试目标是算法集合 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_l\}$ 。针对每一个算法 $m_j (1 \leq j \leq l)$ 设计测试用例集 $A_{mj} (1 \leq j \leq l)$, l 个算法的测试用例集直接求并后, 构成整个信号处理软件的测试用例集 $A = \bigcup_{j=1}^l A_{mj}$ 。

在信号处理软件测试环境中, 影响算法 m_j 的因素 F 包含两部分: 信号源因素 $F_{SG} = \{f_1, f_2, \dots, f_{n'}\}$ 、系统因素 $F_{SY} = \{f_{n'+1}, f_{n'+2}, \dots, f_n\}$, 且两类因素之间耦合性较小, 使用变力度组合覆盖更能有效地减少测试用例。算法 m_j 对应覆盖需求为 R_j 相应的包含以下 3 个部分。

(1) 信号源因素覆盖需求:

$$R_{j-SG} = \{r_1, r_2, \dots, r_t\} \quad r \subseteq F_{SG}$$

(2) 系统因素覆盖需求:

$$R_{j-SY} = \{r_{t'+1}, r_{t'+2}, \dots, r_t\} \quad r \subseteq F_{SY}$$

(3) 交叉因素覆盖需求:

$$R_{j-SGSY} = \{r_{t'+1}, r_{t'+2}, \dots, r_t\}$$

在 $R_{j-SG}, R_{j-SY}, R_{j-SGSY}$, 以及因素的离散量取值已知的情况下, 根据已有的变力度组合测试用例生成算法如 Union、ReqOrder、ParaOrder、Greedy 等, 以及工具如 PIC 等^[3-5] 生成相应的测试用例集 $A_{mj_1}, A_{mj_2}, A_{mj_3}$ 。那么算法 m_j 对应的测试用例集 A_{mj} 、测试用例个数 m_j 分别为

$$A_{mj} = A_{mj_1} \cup A_{mj_2} \cup A_{mj_3};$$

$$m_j = m_{j_1} + m_{j_2} + m_{j_3}.$$

系统因素间相互关系较为明确, 因素离散取值可通过常规的等价类划分、边界值分析等方法快速确定。信号源因素间相互关系隐含性较强, 多存在冗余的因素, 且因素的等价类、边界值难以确定^[6]。以雷达系统目标速度 v 为例, 在无法确定等价类的情况下, 工程中常用的测试数据选择方法有两种: 一是给定的范围内随机选取几组速度值; 二是以较小步进选取速度值。方法一测试数据的选择无依据, 导致测试效果较差, 方法二因素离散量取值个数较大, 导致测试用例数暴增, 增加测试成本。

综上信号处理软件测试用例形成的难点在于确定信号源因素覆盖需求 R_{j-SG} 及集合 F_{SG} 中因素的离散取值。由于算法可形式化表述, 本文提出从算法模型本身出发, 对比输入、输出变换规律, 将影响算

法输出结果的信号源因素作为覆盖需求 R_{j-s_g} , 并确定集合 F_{s_g} 中因素的离散取值. Schroeder 等人最早提出变力度组合覆盖, 便是基于程序输入输出关系的测试用例生成和简约问题, 故将变力度组合覆盖应用于信号处理软件测试用例生成是可行的. 以下以雷达信号处理软件中连续脉冲串脉冲压缩算法^[7-8]为实例详细说明.

4 连续脉冲串脉冲压缩算法测试用例生成

4.1 连续脉冲串脉冲压缩输出计算

脉冲压缩主要通过匹配滤波实现, 其原理是为获得最大输出的信噪比(SNR), 使接收滤波器和信号波形匹配, 假设信号波形为 $x(t)$, 匹配滤波器时域和频域冲激响应函数分别为

$$h(t) = \alpha x^*(T_M - t) \quad (1)$$

$$H(\Omega) = \alpha X^*(\Omega) e^{-j\Omega T_M} \quad (2)$$

式中, α 为恒定增益, 通常被置为 1; T_M 时刻 SNR 最大, 以下假设为 0.

使用连续 M 个周期为 T 、脉冲宽度为 τ 的单脉冲作为发射波形, 其定义为

$$x(t) = \sum_{m=0}^{M-1} x_p(t - mT) \quad (3)$$

$$x_p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \tau \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

工程实现过程中一般不针对整个脉冲串波形 $x(t)$ 构造一个明确的匹配滤波器, 而是通过对每个单脉冲进行匹配滤波, 再对输出合成实现, 该模型有效的条件为目标在 MT 时间内运动距离不会超过一个距离单元, 即目标的 M 个回波会在相同距离单元出现:

$$MTv < \frac{c\tau}{2} \quad (5)$$

但由于目标速度无法预知, 一般情况下只能假设或预设匹配滤波器的多普勒频移为 F_i , 第 m 个发射脉冲的滤波器输出为

$$\begin{aligned} y_m(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(s - mT) e^{j\Omega_d(s - mT)} x(s - t) e^{-j\Omega_i(s - t)} ds \\ &= \frac{e^{j2\pi F_i(t - mT)}}{j2\pi(F_d - F_i)} (e^{j2\pi(F_d - F_i)\tau} - e^{j2\pi(F_d - F_i)(t - mT)}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,

$$mT - \tau \leq t \leq mT + \tau$$

$$0 \leq m \leq M - 1$$

$$F_i = \frac{2v_i}{\lambda}$$

$$F_d = \frac{2v}{\lambda}$$

对慢时间样本进行合成得到连续 M 个脉冲串匹配滤波输出为

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{m=0}^{M-1} y_m(t) \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \frac{e^{j2\pi F_i(t - mT)}}{j2\pi(F_d - F_i)} (e^{j2\pi(F_d - F_i)\tau} - e^{j2\pi(F_d - F_i)(t - mT)}) \end{aligned} \quad (7)$$

要使脉冲串中的单个脉冲的脉冲压缩结果满足线性平移不变性, 需满足指数函数的周期性, 则脉冲周期需满足以下关系:

$$T \geq \frac{1}{|F_d - F_i|} = \frac{1}{\Delta F} \quad (8)$$

4.2 信号源因素覆盖需求确定

雷达系统连续脉冲串波形的信号源参数包括载波频率、采样率、时宽、脉冲重复频率(或脉冲重复周期)、连续脉冲个数、目标速度、目标距离等. 以下通过对比连续脉冲串脉冲压缩算法的输入、输出, 确定以上信号源参数的需求覆盖, 以及参数的离散量取值.

根据以上连续脉冲串脉冲压缩算法输入输出关系可得到信号源因素覆盖需求 $R_{j-s_g} = \{(M, T), v\}$, 由于 (M, T) 为系统已知的一组或多组数值, 故只对 (M, T) 与 v 进行两两组合. 以下通过输入输出关系确定 v 离散量取值.

(1) 由式(5)、(8) 确定 v 的等价类为

$$\left[-\frac{c\tau}{2MT}, \frac{c\tau}{2MT}\right]$$

$$(-\infty, -\frac{c\tau}{2MT}) \cup (\frac{c\tau}{2MT}, +\infty)$$

$$(-\infty, v_i - \frac{\lambda}{2T}] \cup [v_i + \frac{\lambda}{2T}, +\infty)$$

$$(v_i - \frac{\lambda}{2T}, v_i + \frac{\lambda}{2T})$$

(2) 从式(8) 可以看出 ΔF 为 0 时, 匹配滤波计算过程中存在除 0 操作, 故确定特殊等价类 v_i .

(3) 假设 $T = 10\tau$, 以下给出 M 分别为 3, 100, ΔF 分别为 0.1, 0.6, 1.0, 1.5 时, 匹配滤波后输出信号幅度随时间变化曲线图, 其中 X 轴表示归一化时

间(τ 的倍数),Y轴表示匹配滤波输出幅度.如图1、2所示.

M 分别为3,100时,相同多普勒失配值其匹配滤波输出结果变化趋势近似一致,只是连续脉冲数越大输出信号幅值越强.由于已假设 $T_M = 0$,故匹配滤波输出最大值应当在 $t = 0$ 处.从图1、2中可以看出随着多普勒偏移的增大脉冲压缩后的宽度逐步增大,峰值能量逐步减小,当 $\Delta F < 1$ 时,0时刻输出最大值幅值,峰值虽有衰减但衰减幅度不大;当 $\Delta F > 1$ 时,峰值衰减逐步增大,归一化时间内出现多个峰值,最大峰值未出现在0时刻,以上可导致检测到与真实目标幅度、速度相同而距离不同的虚警目标,或检测不到目标.根据以上确定 v 的等价类为 $[v_i - \frac{\lambda}{2}, v_i) \cup (v_i, v_i + \frac{\lambda}{2}]$ 和 $(-\infty, v_i - \frac{\lambda}{2}) \cup (v_i + \frac{\lambda}{2}, +\infty)$.

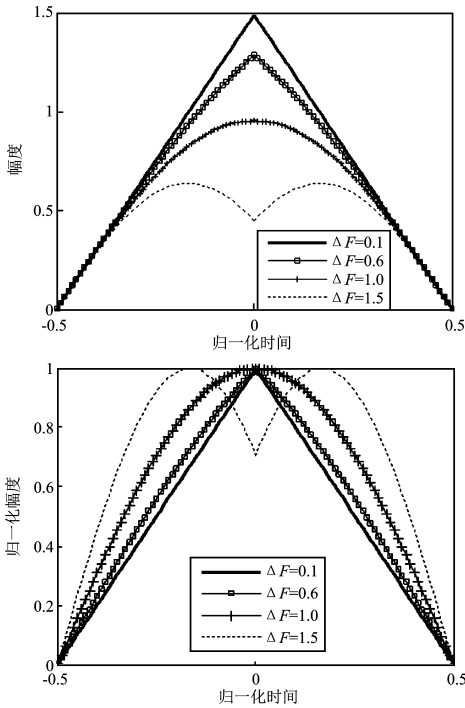


图1 多普勒失配对匹配滤波输出影响($M=3$)

综上速度 v 的有效等价类为

$$\begin{aligned} &(-\infty, -\frac{c\tau}{2MT}) \cup (\frac{c\tau}{2MT}, +\infty) \\ &[-\frac{c\tau}{2MT}, v_i - \frac{\lambda}{2}) \cup (v_i + \frac{\lambda}{2}, \frac{c\tau}{2MT}] \\ &[v_i - \frac{\lambda}{2}, v_i] \cup [v_i, v_i + \frac{\lambda}{2}] \end{aligned}$$

选取等价类、对边界值分析得到速度 v 的离散

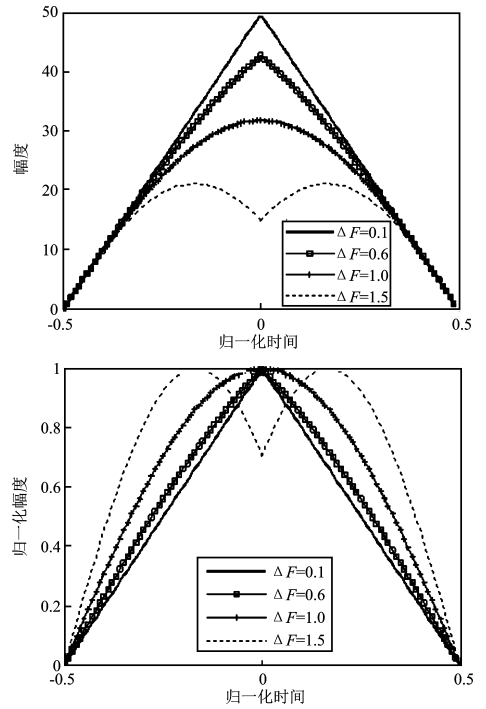


图2 多普勒失配对匹配滤波输出影响($M=100$)

量取值.至此通过对比连续脉冲串脉冲压缩算法输入输出,确定了有效的信号源参数、信号源参数(速度)的有效等价类,以及组合力度(二维覆盖).连续脉冲串脉冲压缩算法信号源因素对应的测试用例集可自动生成.

5 结论

通过对比连续脉冲串脉冲压缩算法输入输出不但自动生成了测试用例集,而其减小了测试用例个数.

连续脉冲串脉冲压缩算法信号源因素集合为 $F_{SG} = \{\text{载波频率、采样率、时宽、脉冲周期和连续脉冲个数、目标速度、目标距离}\}$,6个因素对应的离散量个数 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\}$;对比连续脉冲串脉冲压缩算法输入、输出后确定的信号源因素集合为 $F_{SG}' = \{\text{脉冲周期和连续脉冲个数、目标速度}\}$,相应的离散量个数 $V' = \{V_4, V_5\}$.

信号源因素间进行二维组合覆盖, F_{SG} 对应测试用例集为 $A_{m_1 \times 2}$, F_{SG}' 对应测试用例集为 $A_{m_2 \times 2}$.其中, m_1, m_2 表示测试用例个数. $A_{m_2 \times 2}$ 为 $A_{m_1 \times 6}$ 的一个子集,即 $A_{m_2 \times 2} \subseteq A_{m_1 \times 6}$, m_1 与 m_2 满足以下关系^[9]:

$$\max_{1 \leq i < j \leq 6} (V_i \times V_j) \leq m_1 \leq (pri(\max(\max_{1 \leq i \leq 6} V_i, 5)))^2$$

$$m_2 = V_4 \times V_5$$

$$m_2 \leq m_1 \tag{9}$$

式中, $pri(x)$ 表示大于等于 x 的最小素数或素数方幂.

假设因素离散量个数: $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ 均相等, 以下给出分别为 3, 6, 9, 12, 17, 20, 信号源因素约简前、约简后测试用例个数的比较.

因素离散量个数	m_1		m_2
	最小值	最大值	
3	9	25	9
6	36	49	36
9	81	81	81
12	144	169	144
17	289	289	289
20	400	529	400

因素离散量个数越大, 测试用例数成倍增大. 当因素离散量个数不为素数、或素数方幂时, 信号源因素约简后的测试用例个数减少量还是很明显的, 如因素离散量个数均为 20, 与约简前的最大测试用例数比较, 测试用例数减少了近似 1/4.

6 结束语

本文给出了应用变力度组合覆盖技术自动生成信号处理软件测试用例的关键技术, 并基于信号处理软件算法高密度、算法可形式化描述的特点, 提出一种简化信号源因素、确定有效等价类、减少测试用例数的方法. 最后一个具体的实例验证了本文提出方法的有效性.

目前组合测试技术在信号处理软件测试中应用较少, 本文的研究工作只是一个初步尝试, 下一步我们将在工程实践中应用本文提出的方法, 结合工程实践的经验进一步研究如何生成信号处理软件的最

优测试用例.

参考文献:

[1] Cohen M B, Gibbons P B, Mugridge W B, et al. Variable strength interaction testing of components[C]// Proceedings of the 27th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC2003). Dallas, TX, USA, 2003:413-418.

[2] 王子元, 徐宝文, 聂长海. 组合测试用例生成技术[J]. 计算机科学与探索, 2008, 2(6): 571-588.

[3] 严俊, 张健. 组合测试: 原理与方法[J]. 软件学报, 2009, 6(20): 1393-1405.

[4] 王子元, 钱巨, 陈林, 等. 基于 One-test-at-a-time 策略的可变力度组合测试用例生成方法[J]. 计算机学报, 2012, 35(12): 2451-2552.

[5] 周晓宇, 聂长海, 徐宝文, 等. 两两组合覆盖测试数据自动生成集成工具的设计与实现[J]. 计算机科学, 2005, 32(1): 118-120.

[6] 职晓, 裴阿平, 张江华. 基于分类树的雷达软件测试用例设计[J]. 火控雷达技术, 2014, 43(4): 16-20.

[7] Mark A Richards. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2008.

[8] 丁鹭飞, 陈建春. 雷达原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

[9] 聂长海, 徐宝文. 基于接口参数的黑箱测试用例自动生成算法[J]. 计算机学报, 2004, 27(3): 382-388.

作者简介:

李萍女, (1985-), 硕士研究生, 工程师. 研究方向为雷达系统软件测试、导航系统软件测试等.
E-mail: firstrate_apple@aliyun.com.

郭伟全男, (1971-), 高级工程师. 研究方向为雷达系统软件测试、控制系统软件测试等.