基于灰色系统理论的软件可靠性综合评价框架

李海峰 陆民燕 王智新 李 震

(北京航空航天大学 工程系统工程系, 北京 100191)

摘 要: 从系统工程的角度出发,提出一套完整的基于灰色系统理论的软件可靠性综合评价框架. 首先,在 ISO/IEC 9126软件质量模型的基础上,建立起软件可靠性综合评价体系,并利用灰关联分析方法计算每个度量元与软件可靠性之间的相关程度,由此确定度量元在评价体系中的权重值. 在此基础上,提出基于灰色聚类的软件可靠性综合评价方法. 初步的实验结果表明,基于灰色系统理论的软件可靠性综合评价框架具有方便实用、全寿命周期评价、数据来源广泛、且可准确反映当前软件可靠性指标水平等优点,适合于软件可靠性工程决策活动.

关 键 词: 软件工程;灰色系统理论;综合评价;可靠性理论

中图分类号: TP 311.5; N 941.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)11-1261-05

Framework for software reliability comprehensive evaluation based on grey system theory

Li Haifeng Lu Minyan Wang Zhixin Li Zhen

(Dept. of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: From the viewpoint of system engineering, a useful framework was explored for software reliability comprehensive evaluation based on grey system theory which has been acknowledged as a powerful technique for system comprehensive evaluation. According to the software quality model in ISO/IEC 9126, software reliability metrics were regarded as the evaluation index, and the grey relational degree between each metric and reliability was analyzed which can be used to identify the weights of metrics. Consequently the software reliability comprehensive evaluation method based on grey cluster theory was proposed. Finally, a primary experiment research was conducted to show that the framework for software reliability comprehensive evaluation based on grey system theory can reflect the level of reliability accurately with the values of these reliability metrics which can be collected easily in each development phase. Therefore the proposed framework is suitable for reliability engineering practice.

Key words: software engineering; grey system theory; comprehensive evaluation; reliability theory

随着软件自身及开发过程的日益复杂,基于软件可靠性模型的传统可靠性评估方法呈现出应用时间过晚,应用性不好等弊端. 许多研究成果在传统模型的基础上,就若干影响软件可靠性的因素(软件复杂度、测试覆盖率等)及其与软件可靠性之间的相关性进行定量研究,试图改进传统模型的评估效果,但改进后的模型十分复杂,精度和适用性却未有很明显的改善[1].

传统软件可靠性建模方法偏执于纯理论的数学推演,却忽视测试过程中的实际情形. 钱学森指出:"要正视传统定量分析理论的不足,定性与定量相结合的系统综合分析方法是传统建模思想的重要增强与扩充". 在 ISO/IEC 9126软件质量模型[2](简称 9126模型)中,软件可靠性可被视为一个系统级对象,这是因为:软件可靠性反映了软件自身及整个开发过程的可信程度(目的性),并

收稿日期: 2007-11-23

作者简介: 李海峰(1981-),男,辽宁盘锦人,博士生, lihaifeng@dse.buaa.edu.cn.

且软件可靠性及其子特性以及若干可靠性度量元自上而下共同组成一个金字塔形的层次型体系结构(集合性,相关性,阶层性,整体性),因此,软件可靠性具备系统对象的所有特点[3],从系统层面来研究软件可靠性活动,或许可以摆脱传统建模理论假设的束缚,为建立新的软件可靠性评价方法提供可能.

Rome中心的 S-R和 M-R法利用软件固有特征以及开发特征进行可靠性早期预计,其对软件的编写要求极为严格;Littlewood多维模型列出可用于软件可靠性综合评价的产品、过程和资源度量,但未对具体的评价方法进行研究.国内许多软件可靠性综合评价方法[4-5]则借助了大量专家经验,主观性太强.

灰色系统综合评价方法能够从已知信息中提取有价值的信息,实现对系统行为的正确描述,对比其它综合评价方法,其具有能处理贫信息系统,充分利用已知信息、客观性好等优点[3].软件可靠性度量的观测值是确定的,但软件开发测试过程中存在着许多对观测值的真实性有影响的不确定因素,因此人们对可靠性的认识又是不确定的,所以软件可靠性可被视为一个灰色量.已经有研究成果将灰色系统理论应用于软件可靠性工程领域[6],但将其应用于软件可靠性综合评价中的研究却还未见.本文提出一套基于灰色系统理论的软件可靠性综合评价框架.主要内容包括:①建立软件可靠性综合评价体系;②基于灰色聚类的软件可靠性综合评价方法;③实例研究.

1 软件可靠性综合评价框架

基于灰色系统理论的软件可靠性综合评价框架(图 1)主要包括两部分内容:软件可靠性综合评价体系和基于灰色聚类的综合评价方法.若评价指标集为 S,指标权重集为 W,评价方法为 M,则软件可靠性 R 可表述为:

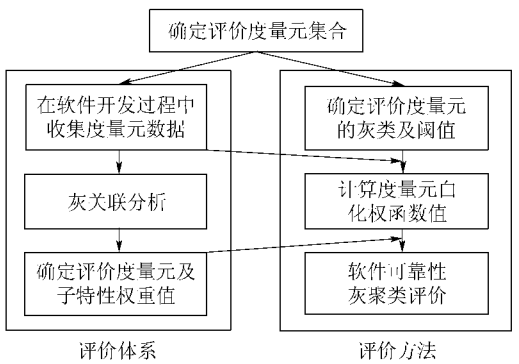

图 1 软件可靠性综合评价框架示意图

$$R = M(S, W) \tag{1}$$

2 软件可靠性综合评价体系

2.1 软件可靠性综合评价指标集

9126模型是一个成熟且得到广泛认可的软件质量体系,本文的软件可靠性综合评价体系将借鉴该模型的三层次金字塔型结构,模型中的软件可靠性度量元集将作为评价体系中的指标集.具体的软件可靠性子特性以及度量元请参见文献[2].有两点值得说明:①不是所有度量元都应被用来进行综合评价,应根据软件特点以及实际情况来选择最适合的评价度量元集;②9126模型中有内、外部两套度量元集.其中内部度量元集适用于软件测试阶段前的早期可靠性评价,外部度量元集合则适用于测试阶段的可靠性评价.

2.2 评价指标的灰关联分析与权重确定

符号约定:N 个同类型被测软件(或同一软件的 N 个版本);$r(k)$ 为第 k 个软件的可靠性参数值;n_i 为第 i 个子特性下的度量元数目($i=1\sim4$,9126模型中有 5个子特性,其中子特性"可靠性依从性"的实践性很差,故本文未选取该子特性);m_{ij} 为第 i 个子特性下第 j 个度量元($j=1\sim n_i$);$\varepsilon_{0,ij}(\gamma_{0,ij}, \phi_{0,ij})$ 为 m_{ij} 与软件可靠性之间的灰色绝对(相对,综合)关联度;$R_0=(r_0(1), \cdots, r_0(N))$ 为可靠性参数观测值序列;$M_{ij}=(m_{ij}(1), \cdots, m_{ij}(N))$ 为 m_{ij} 的观察值序列;ρ_{ij} 为 m_{ij} 的权重值.

1)计算灰色绝对关联度.可靠性与各度量元值的初始点零化像序列为

$$X_0^0 = (r_0(1) - r_0(1), r_0(2) - r_0(1), \cdots, r_0(N) - r_0(1)) = (x_0^0(1), \cdots, x_0^0(N))$$

$$X_{ij}^0 = (m_{ij}(1) - m_{ij}(1), m_{ij}(2) - m_{ij}(1), \cdots, m_{ij}(N) - m_{ij}(1)) = (x_{ij}^0(0), \cdots, x_{ij}^0(N))$$

记

$$s_0 = \int_1^N (R_0 - r_0(1))\,\mathrm{d}t$$

$$s_{ij} = \int_1^N (M_{ij} - m_{ij}(1))\,\mathrm{d}t$$

则有

$$|s_{ij} - s_0| = \left| \sum_{k=2}^{N-1} (x_{ij}^0(k) - x_0^0(k)) + \frac{1}{2}(x_{ij}^0(N) - x_0^0(N)) \right|$$

可得灰色绝对关联度为

$$\varepsilon_{0,ij} = \frac{1 + |s_0| + |s_{ij}|}{1 + |s_0| + |s_{ij}| + |s_{ij} - s_0|} \tag{2}$$

2)计算灰色相对关联度.可靠性与各度量元值的初值像序列为

$$R_0' = \left(\frac{r_0(1)}{r_0(1)}, \frac{r_0(2)}{r_0(1)}, \cdots, \frac{r_0(N)}{r_0(1)} \right) = (r_0'(1), r_0'(2), \cdots, r_0'(N))$$

$$M_{ij}' = \left(\frac{m_{ij}(1)}{m_{ij}(1)}, \frac{m_{ij}(2)}{m_{ij}(1)}, \cdots, \frac{m_{ij}(N)}{m_{ij}(1)} \right) = (m_{ij}'(1), m_{ij}'(2), \cdots, m_{ij}'(N))$$

则可靠性与各度量元的初始零化像序列为

$$X_0^0 = (r_0'(1) - r_0'(1), r_0'(2) - r_0'(1), \cdots, r_0'(N) - r_0'(1)) = (x_0^0(1), \cdots, x_0^0(N))$$

$$X_{ij}^0 = (m_{ij}'(1) - m_{ij}'(1), m_{ij}'(2) - m_{ij}'(1), \cdots, m_{ij}'(N) - m_{ij}'(1)) = (x_{ij}^0(1), \cdots, x_{ij}^0(N))$$

同理有

$$|s_{ij} - s_0| = \left| \sum_{k=2}^{N-1} (x_{ij}^0(k) - x_0^0(k)) + \frac{1}{2}(x_{ij}^0(N) - x_0^0(N)) \right|$$

则可得灰色相对关联度为

$$\gamma_{0,ij} = (1 + |s_0| + |s_{ij}|) / (1 + |s_0| + |s_{ij}| + |s_{ij} - s_0|) \quad (3)$$

3)灰色综合关联度为

$$\phi_{0,ij} = \theta\varepsilon_{0,ij} + (1 - \theta)\gamma_{0,ij} \quad (4)$$

其中,θ为分辨系数,$0 \le \theta \le 1$,一般 $\theta = 0.5$. $\phi_{0,ij}$越大的度量元与软件可靠性的相关性越大.

4)子特性下软件可靠性度量元的权重值为

$$\rho_{ij} = \phi_{0,ij} \Big/ \sum_{j=1}^{n_i} \phi_{0,ij} \quad (5)$$

3　灰聚类评估综合评价方法

符号约定:s为度量元的灰类个数;$f_{ij}^k(m_{ij})$为m_{ij}关于第 k个灰子类的三角白化权函数,$k = 1 \sim s$;w_i为第 i个子特性的权重值;σ_k为软件可靠性关于灰类 k的综合聚类系数.

1)确定度量元的灰类及其阈值. 设有 s个灰类,每个度量元的取值范围可被划分为 s个区间:

$$[a_{ij}^1, a_{ij}^2], [a_{ij}^2, a_{ij}^3], \cdots, [a_{ij}^{k-1}, a_{ij}^k], \cdots, [a_{ij}^s, a_{ij}^{s+1}]$$

其中,阈值 $a_{ij}^k (k = 1, 2, \cdots, s, s+1)$应由专家根据经验及软件的特点进行确定.

2)计算度量元的三角白化权函数值. 给定度量元值 m_{ij},可得 $f_{ij}^k(m_{ij})$为[3]

$$f_{ij}^k(m_{ij}) = \begin{cases} 0 & m_{ij} \notin [a_{ij}^{k-1}, a_{ij}^{k+2}] \\ \dfrac{m_{ij} - a_{ij}^{k-1}}{\lambda_{ij}^k - a_{ij}^{k-1}} & m_{ij} \in [a_{ij}^{k-1}, \lambda_{ij}^k] \\ \dfrac{a_{ij}^{k+2} - m_{ij}}{a_{ij}^{k+2} - \lambda_{ij}^k} & m_{ij} \in [\lambda_{ij}^k, a_{ij}^{k+2}] \end{cases} \quad (6)$$

$\lambda_{ij}^k = a_{ij}^k + a_{ij}^{k+2}/2$,关于 $f_{ij}^1(m_{ij})$及 $f_{ij}^s(m_{ij})$,可将度量元取值范围向左、右延拓至 a_{ij}^0与 a_{ij}^{s+2}.

3)子特性的权重值 w_i可根据具体的软件特点和用户需求来确定,不属于本文的研究范围.

4) $$\sigma_k = \sum_{i=1}^{4} \sum_{j=1}^{n_i} w_i f_{ij}^k(m_{ij}) \rho_{ij} \quad (7)$$

若 $\max\limits_{1 \le k \le s} \{\sigma_k\} = \sigma_{k^*}$,则软件可靠性灰色聚类综合评价结果落在灰类 k^*中. 根据 σ_k的大小可确定同属于灰类 k^*中的可靠性评价结果的优劣.

4　实例计算与分析

4.1　实验方案介绍

①被测程序:小型批处理软件 ——计算器. 3组同等级同数目的不同缺陷集合分别注入被测程序,形成 3个版本;②根据计算器的特点,本次实验所选用的评价度量元见表 1,度量元计算公式见文献[2];③可靠性参数为:MTBF(Mean Time Between Failures);④针对每一个版本进行实验. 每组实验分为两个阶段. 第一阶段:代码走查,记录各种内部度量元数据,走查之后进行软件可靠性摸底测试得到 MTBF值;第二阶段:排除走查阶段发现的缺陷后,执行软件可靠性增长测试,收集外部度量元数据与 MTBF值;⑤本实验中子特性权重相同;⑥本文利用初始点零化像方法进行度量元无量纲处理;⑦度量元取值分为 3个灰类:“优秀”,“良好”,“一般”.灰类阈值水平见表 2.

4.2　实验结果

度量元实验数据及其综合灰关联度结果见表 1. 以版本 1为例,灰聚类综合评价结果见表 3.

4.3　实验结果分析

表 1　度量元数据及其综合灰关联度

度量元	V(1)	V(2)	V(3)	综合关联度
故障检测(I)	0.917	0.545	0.8	0.676
故障排除(I)	0.818	0.833	0.875	0.691
测试充分性(I)	0.595	0.559	0.625	0.721
避免失效(I)	0.333	0.312	0.437	0.680
MTBF(第一阶段)/s	121.6	108	117.4	
估计潜在的故障密度(E)	0.0476	0.0559	0.0562	0.671
针对测试用例的失效密度(E)	0.0298	0.0279	0.0437	0.673
故障密度(E)	0.0536	0.0559	0.0562	0.725
失效解决(E)	0.2	0.048	0.037	0.595
故障排除(E)	0.4	0.2	0.2	0.623
测试的成熟性(E)	0.833	0.782	0.875	0.755
避免失效(E)	0.556	0.456	0.556	0.705
有效利用率(E)	0.95	0.95	0.95	0.752
MTBF(第二阶段)/s	503.2	491	507	

注:I表示内部度量元;E表示外部度量元;V(k)表示该列度量元值对应第 k个软件版本,$k = 1 \sim 3$.

表 2 度量元灰类阈值

度量元	优秀	良好	一般
测试充分性	[0.85,0.95]	[0.6,0.85]	(0.1,0.6)
故障检测	[0.85,0.95]	[0.6,0.85]	(0.1,0.6)
故障排除	[0.8,0.95]	[0.4,0.8]	(0.1,0.4)
避免失效	[0.8,0.95]	[0.4,0.8]	(0.1,0.4)
测试的成熟性	[0.75,0.95]	[0.4,0.75]	(0.1,0.4)
有效利用率	[0.85,0.98]	[0.4,0.85]	(0.1,0.4)
故障密度	[0.9,0.98]	[0.6,0.9]	(0.1.0.6)
避免失效	[0.8,0.95]	[0.5,0.8]	(0.1,0.5)
针对测试用例的失效密度	[0.8,0.98]	[0.6,0.8]	(0.05,0.6)
估计潜在的故障密度	[0.85,0.98]	[0.7,0.85]	(0.05,0.7)
失效解决	[0.55,0.95]	[0.3,0.55]	(0.1,0.3)
故障排除	[0.55,0.95]	[0.3,0.55]	(0.1,0.3)

注:每个度量元灰类阈值的左延拓为 0,右延拓为 1.

表 3 版本 1软件可靠性灰聚类综合评价结果

度量元	一般	良好	优秀
故障检测(Ⅰ)	0.83	0.15	0
故障排除(Ⅰ)	0.88	0.38	0
测试充分性(Ⅰ)	0.51	0.79	0
避免失效(Ⅰ)	0.85	0.47	0
软件可靠性综合评价结果(第一阶段)	0.34	0.45	0.22
估计潜在的故障密度(E)	0	0.035	0.271
针对测试用例的失效密度(E)	0	0.135	0.56
故障密度(E)	0.048	0.611	0.714
失效解决(E)	0	0.678	0.654
故障排除(E)	0	0.624	0.717
测试的成熟性(E)	0	0.312	0.962
避免失效(E)	0.488	0.829	0.148
有效利用(E)	0	0.085	0.588
软件可靠性综合评价结果(第二阶段)	0.11	0.49	0.51

1)度量元灰色关联度计算结果分析

由表 1,内部度量元关联度排序结果为:测试充分性 >故障排除 >避免失效 >故障检测.总体上这 4个度量元的相关性差别不大. ①计算器类软件的分支路径较为简单,很容易达到较高的测试充分性,则可以发现大部分植入与潜在故障,因此"测试充分性"对其它 3个内部度量元有着重要影响,其相关性最大是可以理解的; ②走查阶段,"故障排除"和"避免失效"度量值的高低对第一阶段的 MTBF值有重要影响,只有将所发现的故障排除,才能有效提高软件可靠性水平.

由表 1,外部度量元关联度排序结果为:测试的成熟性 >有效利用率 >故障密度 >避免失效 >针对测试用例的失效密度 >估计潜在的故障密度 >故障排除 >失效解决.总体上这 8个度量元的相关性也差别不大.前 4个可视为第一类(相关性较高),之后 2个为第二类(次高),最后 2个为第三类(较低). ①"测试成熟性"相关性较高的原因与"测试充分性"类似; ②"有效利用率"体现的是软件被正常使用次数的比率,其值越接近于 1,则软件无失效的时间就越长; ③测试过程中所发现的失效立即被改正,因此检测到的故障数(即"故障密度")越多,软件可靠性增长的就越快.同理,防止的潜在故障越多(即"避免失效"),则可能的失效越少,软件可靠性增长的就越快; ④值得注意的是,"故障排除"和"失效解决"的相关性较低.这是因为第二阶段所进行的可靠性增长测试假设一旦发生失效,就必须立即被解决,即使暂时不能解决,之后若再次发现该失效则不计数,因此这两个度量值对第二阶段可靠性指标的影响不如第一阶段那么明显.

2)版本 1可靠性综合评价结果分析

由表 3,第一阶段软件可靠性的灰聚类评价值为(0.34,0.45,0.22),最终评价结果落入灰类"良好"中,并且接近"一般".MTBF此时的值(121.6 s)也反映出当前可靠性水平确实一般."测试充分性"属于灰类"良好"的三角白化权函数值为 0.79,是 3个灰类中最大的.这也证明了第一阶段"测试充分性"对软件可靠性有着关键影响.

由表 3,第二阶段软件可靠性的灰聚类评价值为(0.11,0.49,0.51),最终评价结果落入灰类"优秀"中,且接近"良好".MTBF(503.2 s)也反映出此时可靠性水平已经到较为不错的水平."测试的成熟性"属于灰类"优秀"的三角白化权函数值为 0.962,在 3个灰类中最大,由于其是外部度量元中与软件可靠性最为相关的,所以软件可靠性综合评价结果为"优秀"是可以理解的.之所以综合评价结果还比较接近"良好",是因为"避免失效"属于灰类"良好"的白化权函数值为 0.829,其在灰类"一般"上的评价结果也比较高(0.488),由于该度量元与可靠性的关联度也较高,所以可初步认定该度量元是一个较为薄弱的环节,应当采取针对性的改进措施.由表 3还可看出,第二阶段软件可靠性综合评价结果较第一阶段有了明显的进步,这恰好反映了 MTBF的显著增长趋势(121.6 s升至 503.2 s).

5 结 论

本文的研究成果具有如下意义: ①较强的客观性,对数据量要求不高; ②可用于度量元与可靠性的相关性分析; ③评价结果与定性分析结果较为吻合,不仅能够反映当前软件可靠性水平,还能指出对当前软件可靠性影响较大的薄弱环节; ④

数据可来源于需求、设计和测试 (不限于可靠性测试)等阶段,可实现全寿命可靠性评价.

本文只是初步的研究成果,有如下几点注意事项: ①特别适用于同一类软件版本进化过程中的软件可靠性评价活动; ②同一类型的软件产品,只需进行一次严格的灰关联分析; ③目前其只能在对可靠性指标不做严格定量要求的决策活动中作为传统定量评估方法的一种有效补充方法.

参考文献 (References)

[1] Alan Wood. Software reliability growth models: assumptions vs reality [C]//Los Alamitos. Proceedings of the 8th International Symposium on Software Reliability Engineering. New Mexico: IEEE Computer Society Technical Council on Software Engineering, 1997: 136 - 141

[2] ISO/IEC 9126-1 2001, Software quality characteristics and metrics-part1: quality model [S]

[3] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京:科学出版社, 2004
Liu Sifeng. Grey system theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2004 (in Chinese)

[4] 王铁江,郦萌. 软件可靠性的模糊综合评估模型 [J]. 计算机工程与应用, 2002, 20: 23 - 26
Wang Tiejiang, Li Meng. A fuzzy comprehensive evaluation model for software reliability [J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 20: 23 - 26 (in Chinese)

[5] 刘斌,陆民燕,阮镰. 基于模糊神经网络的软件可靠性早期预计方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 237 - 240
Liu Bin, Lu Minyan, Ruan Lian. Early software reliability prediction: an approach based on fuzzy neural network [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(2): 237 - 240 (in Chinese)

[6] 梅登华,闵华清. 基于灰色系统理论的软件可靠性分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(7): 1103 - 1105
Mei Denghua, Min Huaqing. Reliability analysis for the software system in grey systems theory [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(7): 1103 - 1105 (in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)

(上接第 1260页)

利用 General Photonics生产的 DOP-101测试光纤激光器输出的偏振度为 99.9%,并且长时间 (30 min测量时间)保持稳定.

3 结　论

本文采用环行腔结构对单频掺铒光纤激光器进行了实验研究,采用较长的未抽运掺铒光纤作为饱和吸收体,并选用高反射率的光纤光栅作为选频元件,获得的环行腔掺铒光纤激光器在抽运功率为 275 mW时,最大输出功率 55.4 mW.通过采用光纤延迟自外差法的线宽测试技术测量出该环行腔掺铒光纤激光器的 20 dB线宽为 3 kHz,光纤激光器输出的偏振度为 99.9%,并且长时间保持稳定.该单频单偏振掺铒光纤激光器在光纤传感以及相干激光雷达等领域具有很好的应用前景.

参考文献 (References)

[1] Ball G A, Morey W W, Glenn W H. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(7): 613 - 615

[2] Zyskind J L, Mizrahi V, Digiovanni D J, et al. Short single frequency erbium-doped fibre laser [J]. Electronics Letters, 1992, 28(15): 1385 - 1387

[3] Frisken S J. Transient bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 1992, 17(24): 1776 - 1778

[4] Spiegelberg C, Jihong G, Yongdan H, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003) [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 57 - 62

[5] Zhang Renjie, Yu Benli, Cao Zhigang, et al. Frequency modulated and polarization maintaining fiber laser with narrow linewidth [J]. Optics Communications, 2007, 274(2): 392 - 395

[6] Wang T S, Guo Y B, Wang K. Analyzing longitudinal-mode of single-frequency ring fiber laser [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(6): 1494 - 1497

[7] Richter L E, Mandelberg H I, Kruger M S, et al. Linewidth determination from self-Heterodyne measurements with subcoherence delay times [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, QE-22(11): 2070 - 2074

[8] Chen Xiaopei, Han Ming, Zhu Yizheng, et al. Implementation of a loss-compensated recirculating delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. Applied Optics, 2006, 45(29): 7712 - 7717

[9] 贾豫东,欧攀,杨远洪,等. 短光纤延时自外差法测量窄线宽激光器线宽 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 568 - 571
Jia Yudong, Ou Pan, Yang Yuanhong, et al. Short fibre delayed self-heterodyne interferometer for ultranarrow laser linewidth measurement [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 568 - 571

(责任编辑:张　嵘)