

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108571

分布式光纤测温系统分辨率影响因素研究

王泽润, 叶志浩, 夏益辉, 杨超

(中国人民解放军海军工程大学电气工程学院 武汉 430000)

摘要:应用分布式光纤测温系统对船舶电力系统进行在线监测时,由于船舶电缆的特殊运行环境,对测温系统的空间分辨率和温度分辨率提出了更高的要求,而在基于拉曼散射双路解调的分布式光纤测温系统中,系统的空间分辨率、温度分辨率、时间分辨率和测温距离相互制约。为设计满足船舶电力系统在线监测需求的测温系统,分析了系统空间分辨率的影响因素,并在此基础上建立了基于光时域反射技术的分布式光纤测温系统的等效模型,分析了不同影响因素之间的主次关系;基于拉曼散射光强度公式推导出了准确性更高的系统温度分辨率影响模型;在此基础上得到了空间分辨率、温度分辨率、时间分辨率和测温距离之间的相互影响公式,为分布式光纤测温系统的性能指标设计提供了参考,在测温距离较短时,通过进一步增大累加次数和减小泵浦光脉宽,可在保证空间分辨率和时间分辨率的条件下提高空间分辨率。搭建实验平台对所提出的方法进行验证,通过调节累加次数和脉冲宽度在500 m的测温距离达到了温度分辨率0.65℃、空间分辨率1 m、时间分辨率1 s的分辨率指标。

关键词: 分布式光纤测温;空间分辨率;温度分辨率;分辨率相互关系

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Factors influencing resolution of raman distributed temperature measurement system

Wang Zerun, Ye Zhihao, Xia Yihui, Yang Chao

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, PLA, Wuhan 430000, China)

Abstract: Due to the special operating environment of Marine cables, higher and higher spatial resolution and temperature resolution are required for existing distributed optical fiber temperature measurement systems. However, in the distributed optical fiber temperature measuring system based on Raman scattering demodulation, the spatial resolution, temperature resolution, temporal resolution and temperature measuring distance are mutually restricted. To design a temperature measuring system for meeting the on-line monitoring requirements of the ship power system, the influencing factors of the spatial resolution of the system are analyzed. On this basis, the equivalent model of distributed optical fiber temperature measurement system based on the optical time domain reflection technology is formulated, and the priority of each influencing factors is obtained. A more accurate influence model of system temperature resolution is deduced, which is based on the Raman scattering light intensity formula. Finally, the interaction formula among spatial resolution, temperature resolution, temporal resolution and temperature measurement distance is achieved, which provides a reference for the design of performance index of the distributed fiber temperature measurement system. By further increasing the accumulation times and decreasing the pulse width of pump light, the spatial resolution can be improved while ensuring the spatial resolution and temporal resolution in a short measurement distance. An experimental platform is established to evaluate the proposed method. By adjusting the accumulation times and pulse width in 500 m temperature distance, the temperature resolution is 0.65℃, the spatial resolution is 1 m, and the temporal resolution is 1 s.

Keywords: distributed optical fiber temperature measurement; spatial resolution; temperature resolution; relationship of resolutions

0 引言

随着现代化舰船容量提高,船舶电力系统容量不断增大,特别是船舶综合电力系统的应用使其容量及用电需求提升到一个更高的水平^[1],由之带来的电力系统运行风险提高,故障后果严重,为提高船舶电力系统运行安全性,对其运行状态进行实时在线监测已是电力系统维护的必然发展方向^[2]。

由电力设备的温度反映其运行状态是电力系统监测中常用的方法,相较于传统的热电阻、热电偶等温度传感器,基于拉曼散射和光时域反射技术的分布式光纤测温技术(Raman distributed temperature measurement system, RDTS)能够实现全面、实时、精准的温度监测,且具有电绝缘性好、耐化学腐蚀、耐高温、灵敏度高、响应快、抗电磁干扰等优势^[3],更适合应用于船舶电力系统在线监测。目前由于其性能限制,该技术尚未应用在船舶电力系统监测方面,但在其他方面已经有广泛应用,张文平等^[4]研究了RDTS在地下高压输电线路监测方面的应用;Ding等^[5]就RDTS在高压电气设备在线监测方面的应用进行了研究;邢豪健等^[6]研究了RDTS在核电站泄漏点检测方面的应用;Holler等^[7]研究了传感光纤的二维布线方法,实现了对冷却管道管壁的温度测量;Kim等^[8]研究了RDTS在核电站乏燃料池温度监测方面的应用;Mirzaei等^[9]将研究了RDTS在输油管道泄漏监测方面的应用;Fernandez等^[10]研究了RDTS在核设施温度监测方面的应用。相对于以上应用场景而言,船舶电力系统在线监测由于船舶空间较小,设备分布在相对狭窄密集的舱室中,且其负载变化较为频繁,因此对RDTS的空间分辨率和温度分辨率提出了更高要求。

目前,国内外学者针对RDTS的性能优化设计进行了大量研究,但大多只针对其一项性能进行优化,文献[11-12]通过在解调过程中引入拟合衰减差的方法对系统的测温误差进行修正,提出了基于SOA的脉冲光调制方法,显著提高探测光消光比,进而优化光纤传感系统的测量精度和传感距离;王焱等^[13]对传统的解调方法进行了优化,修正了由光纤损耗与色散造成的测量误差;Sun等^[14]对应用于火灾预警的RDTS进行了优化设计,使用线性拟合校正的方法提高了RDTS的空间分辨率;文献[15-16]通过拟合修正的方法消除由附加损耗导致的测温误差。还有学者对系统进行改进使其能够同时实现对多种物理量的测量,向洋等^[17]设计了能够同时测量温度和流量的光纤传感装置;Li等^[18]实现了通过光纤同时实现对磁场和温度的测量;Schenato等^[19]设计了一种用于河岸水压力和温度测量的光纤传感系统;Hu等^[20]采用多模光纤-光纤布拉格光栅-多模光纤结构实现了对

液体折射率和温度的测量。现有的研究大多采用拟合补偿的方法提高系统性能,而对不同RDTS不同性能指标之间的耦合关系和协调优化设计研究较少,为此,本文分析了系统空间分辨率的影响因素,推导了系统脉冲光源脉宽、测温距离、累加次数及测温范围对系统温度分辨率的影响关系,在此基础上建立了空间分辨率、温度分辨率、时间分辨率及测温距离之间的互耦合关系,为系统的协调优化设计提供参考。

1 RDTS工作原理

当光纤中发生拉曼散射时,其后向散射光强度如式(1)和(2)所示,RDTS可通过强度调制型技术实现对光纤沿线的温度信息的解调。

$$P_{as} = P_0 \eta K_{as} S_b \nu_{as}^4 \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})l] \quad (1)$$

$$P_s = P_0 \eta K_s S_b \nu_s^4 \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{kT}\right)} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)l] \quad (2)$$

式中: η 表示激光器与光纤的耦合系数, K_{as} 和 K_s 分别表示反斯托克斯光及斯托克斯光的散射系数; S_b 表示光纤中的后向散射因子; α_0 、 α_{as} 、 α_s 分别表示入射光、反斯托克斯光和斯托克斯光3种光的损耗系数; k 表示玻尔兹曼常量; h 表示普朗克常量; $\Delta\nu$ 为光纤中发生拉曼散射的频移,其值约为 8.8988×10^6 。

光时域反射技术是RDTS能够实现分布式测温的理论基础,该技术的原理示意图如图1所示。

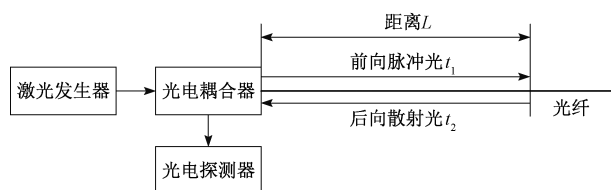


图1 光时域反射技术原理

Fig. 1 Schematic of optical time domain reflection technique

由图1可得到被测位置 L 的计算公式,如式(3)所示,在入射光和后向散射光、光电耦合器和光电探测器的响应时间都已知的条件下,可以由从发出激光到光电探测器探测到散射光所用的时间 t 确定散射点的位置信息。

$$\begin{cases} L = v_1 t_1 = v_2 t_2 \\ t = t_0 + t_1 + t_2 \\ L = \frac{v_1 v_2 (t - t_0)}{v_1 + v_2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_1 、 v_2 分别为前向脉冲光和后向散射光在光纤中的传播速度。在测温距离较短时,可忽略入射光与后向散射光的速度差,认为 $v_1 = v_2 = v$ 。

2 RDTs 不同分辨率相互关系研究

2.1 系统空间分辨率模型

分布式光纤测温系统的空间分辨率定义为系统所能分辨的最小距离单元,即系统解调出正确的温度信息所需的最短光纤长度,一般将能使测量到的温度变化量达到实际温度变化量 95% 所需的最小距离定义为其指标值,RDTs 的空间分辨率主要取决于泵浦光的脉宽、光电转换器件的响应时间、放大电路的频带宽度和 A/D 转换速度等因素。

1) 泵浦光脉宽对空间分辨率的影响

当泵浦光在光纤中发生拉曼散射时,其散射过程如图 2 所示。

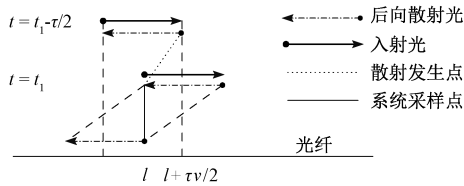


图 2 拉曼散射过程

Fig. 2 Raman scattering process

当入射光脉宽为 τ 时,图中最上方的点划线表示 $t = t_1 - \frac{\tau}{2}$ 时刻散射光发生位置,中间点划线表示 $t = t_1$ 时刻散射光发生位置,最下方的点划线表示 $t = t_1 - \frac{\tau}{2}$ 时刻发生的散射光在 $t = t_1$ 时刻所处的位置。由图 2 可以看出在 $t = t_1$ 时刻脉冲首端产生的后向散射光与 $t = t_1 - \frac{\tau}{2}$ 时刻脉冲尾端产生的后向散射光重合,然后同时返回光纤首端被采集器采集。由图 2 可以看出任意时刻系统采样点采集到的信号由光纤上 l 到 $l + \frac{\tau v}{2}$ 处产生,所以系统所能识别的最小空间距离单元长度为 $\frac{\tau v}{2}$,则由系统脉冲宽度决定的系统空间分辨率为:

$$\delta L_1 = \frac{\tau v}{2} \quad (4)$$

由于采集卡的采样频率不可能无限大,因此系统采集到的时间信息并非连续的,则在光纤上对应测温空间位置之间的距离不可能无限小,相邻两个测温点之间的距离计算公式为:

$$\delta L_2 = \frac{v}{2f} \quad (5)$$

式中: f 为系统采样频率。

由式(4)和(5)可将分布式光纤测温系统等效为一系列均匀分布在光纤上的点式测温装置,如图 3 所示, L 处的点式测温装置的测温范围为区间 $\left[L - \frac{\delta L_1}{2}, L + \frac{\delta L_1}{2} \right]$,其测温结果由 $\left[L - \frac{\delta L_1}{2}, L + \frac{\delta L_1}{2} \right]$ 区间内所有点的温度决定,相邻两个等效点式测温装置之间的距离为 δL_2 。

由图 3 可以看出,当 $\delta L_2 > \delta L_1$ 时,系统无法实现对光纤沿线温度的全面测量,会发生温度的漏测量,而当 $\delta L_2 < \delta L_1$ 时,相邻两个测温点之间测温范围会有重叠,同一点温度会被多次测量,测温结果更加准确。

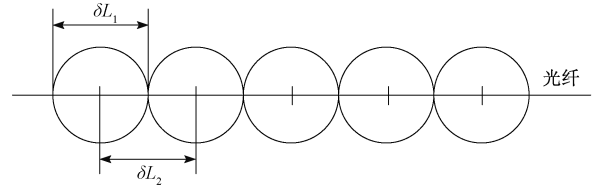


图 3 分布式光纤测温等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the distributed optical fiber temperature measuring system

由以上分析可得,系统的泵浦光的最小脉宽受系统采样频率限制,如式(6)所示。

$$\tau \geq \frac{1}{f} \quad (6)$$

由以上分析可知,在保证系统可实现对光纤沿线温度的分布式测量的条件下,系统的空间分辨率由脉冲光源的脉宽决定,即:

$$\delta L = \delta L_1 = \frac{\tau v}{2} \geq \delta L_2 = \frac{v}{2f} \quad (7)$$

2.2 系统温度分辨率模型

分布式光纤测温系统的温度分辨率 δT 一般定义为当温度变化时系统能够响应的最小的温度变化值,它描述了系统对温度变化的灵敏度。由于测温过程中存在噪声,系统测得的温度 T_m 为受到系统噪声影响的随机值,如式(8)所示。

$$T_m \in \left(T_t - \frac{\delta T_g}{2}, T_t + \frac{\delta T_g}{2} \right) \quad (8)$$

式中: T_t 为被测点的实际温度, δT_g 为由系统噪声带来的测温误差,表示系统总噪声电流的均方根值导致的测量温度变化量,只有当被测点实际温度 T_t 的变化量大于由系统噪声带来的测温误差 δT_g 时,系统才能正确反映被测点的温度变化,因此系统的温度分辨率 $\delta T = \delta T_g$,即系

统的温度分辨率为产生大小与系统总噪声电流的均方根相等的信号光电流变化所需要的温度变化量。

由于泵浦光与拉曼散射光在光纤传播过程中存在衰减,所以光纤上每一个点所对应的温度分辨率都不同,且测量点越靠近光纤末端,所对应的温度分辨率指标值越大,因此系统的温度分辨率指标取决于光纤末端所能达到的温度分辨率。

设激光器向光纤发射功率为 $P(t)$,脉宽为 τ 的任意脉冲光,由图 2 可以看出,脉冲光在光纤末端 L 处发生散射时,向后传播的散射光功率为入射光全波形散射光的叠加,因此光电接收器采集到的反斯托克斯光和斯托克斯光功率分别为:

$$P_{as} = \left[\int_0^\tau P(t) dt \right] \eta K_{as} S_b \nu_{as}^4 \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] \quad (9)$$

$$P_s = \left[\int_0^\tau P(t) dt \right] \eta K_s S_b \nu_s^4 \cdot \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{kT}\right)} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] \quad (10)$$

当光纤末端温度为 T_1 时,系统采集到的反斯托克斯光产生的信号光电流为:

$$I_{as1} = rP_{as1} + N(L) = r \left[\int_0^\tau P(t) dt \right] \eta K_{as} S_b \nu_{as}^4 \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_1}\right) - 1} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] + N(L) \quad (11)$$

当光纤末端温度为 T_2 时,系统采集到的反斯托克斯光产生的信号光电流为:

$$I_{as1} = rP_{as2} + N(L) = r \left[\int_0^\tau P(t) dt \right] \eta K_{as} S_b \nu_{as}^4 \frac{1}{\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT_2}\right) - 1} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] + N(L) \quad (12)$$

由于斯托克斯光强度对温度不敏感,因此忽略温度对斯托克斯光的影响,系统采集到的斯托克斯光产生的信号光电流为:

$$I_s = rP_s + N(L) = r \left[\int_0^\tau P(t) dt \right] \eta K_s S_b \nu_s^4 \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{kT}\right)} \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L] + N(L) \quad (13)$$

式中: r 为光电探测器的响应度; $N(L)$ 为系统总噪声电流。

将测得的光信号进行降噪处理后,按照双路解调的

方法进行解调,则温度 T_1, T_2 所对应的反斯托克斯光与斯托克斯光的分别比值为:

$$R(T_1) = \frac{rP_{as1} + \frac{N(L)}{SNR}}{rP_s + \frac{N(L)}{SNR}} \quad (14)$$

$$R(T_2) = \frac{rP_{as2} + \frac{N(L)}{SNR}}{rP_s + \frac{N(L)}{SNR}} \quad (15)$$

式中: SNR 为系统降噪系数,由于对采集信号进行降噪处理后,有 $\frac{N(L)}{SNR} \ll rP_s$, 即噪声信号的强度远小于斯托克斯光信号强度,因此式(14)、(15)可简化为:

$$R(T_1) = \frac{kP_{as1} + \frac{N(L)}{SNR}}{kP_s} \quad (16)$$

$$R(T_2) = \frac{kP_{as2} + \frac{N(L)}{SNR}}{kP_s} \quad (17)$$

由式(9)和(10)可知,光纤温度与信号强度之间并非简单线性关系,在温度不同时,使系统信噪比为 1 所需的温度变化量不同,因此,系统的温度分辨率应表示为在系统测温范围内,使得信噪比为 1 所需的最大温度变化量。

对式(12)求导结果如式(18)所示,可以看出,光纤温度越高, $P'_{as}(T)$ 越小,使得信噪比为 1 所需的温度变化量越大。

$$P'_{as}(T) = A \frac{h\Delta\nu}{kT^2} \exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right) - 1\right]^2} \quad (18)$$

由于式(18)中 $\frac{h\Delta\nu}{kT}$ 很小,仅有 10^{-11} 数量级,因此将其忽略,式(18)简化为:

$$P'_{as}(T) = A \frac{h\Delta\nu}{kT^2} \quad (19)$$

$$A = \left[\int_0^\tau P(t) dt \right] \eta K_{as} S_b \nu_{as}^4 \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{as})L] \quad (20)$$

由式(19)和(20)可得,当系统最大测量温度时温度变化引起的信噪比为 1 时,有:

$$r(P_{as\max} - P_{as2}) = \frac{N(L)}{SNR} \quad (21)$$

对上式进行微分可得:

$$P_{as\max} - P_{as2} \approx (T_{\max} - T_2) \cdot P'_{as}(T_1) = \delta T \cdot P'_{as}(T_{\max}) \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)可得:

$$\delta T = \frac{N(L)}{rP'_{as}(T_{\max})SNR} \quad (23)$$

将式(23)代入式(26)可得:

$$\delta T = \frac{N(L)kT_{\max}^2}{rAh\Delta\nu SNR} \quad (24)$$

2.3 系统时间分辨率模型

时间分辨率 δt 表征系统对温度监测的实时性,指系统完成两次指定温度分辨率的温度测量之间的间隔时间,当系统采用极限的脉冲光源频率时,系统能达到的最高时间分辨率可表示为:

$$\delta t = m \frac{2L}{v} \quad (25)$$

式中: m 为系统进行累加降噪处理时的累加次数。

2.4 系统分辨率相互关系

由于系统采用累加平均算法对信号进行降噪处理,因此系统降噪系数 SNR 与累加次数 m 有关,二者之间的关系为:

$$SNR = \sqrt{m} \quad (26)$$

假设测温系统的光电转化频率和 A/D 转换频率足够高,则系统的空间分辨率由泵浦光脉宽决定,结合式(7)、(24)、(25)、(26)可得:

$$(\delta L \cdot \delta T)^2 \cdot \delta t = \frac{(N(L)kT_{\max}^2)^2 v}{2[rP(t)\eta K_{as}S_b\nu_{as}^4 h\Delta\nu]^2} \times$$

$$L \exp[2(\alpha_0 - \alpha_{as})L] = aL \exp[2(\alpha_0 - \alpha_{as})L] \quad (27)$$

式中: a 为固定常数,由式(27)可以看出,系统的空间分辨率、温度分辨率、时间分辨率以及测温长度并非相互独立的,在设计系统指标时,应该综合考虑以上 4 个指标。

目前常规的分布式光纤测温系统的测温光纤长度一般大于 5 km,而船舶电力系统的电缆在线监测所需的测温光纤长度 L 通常不超过 500 m,因此其完成单次测温所需时间仅有常规测温系统的 1/10,可达到的最大脉冲频率更高,因此可以采用增大累加次数的方式提高温度信号的信噪比,进而在保证时间分辨率的条件下提高系统的温度分辨率;此外,由于船舶电力系统监测所用的 RDTs 测温光纤更短,泵浦光在光纤内的损耗更低,达到相同信号强度所需的泵浦光总能量更低,因此可以在相同峰值功率下采用脉宽更窄的泵浦光,在保证系统温度分辨率的条件下,提高系统的空间分辨率。

3 实验验证

3.1 实验系统

为验证理论推导得到的分布式光纤测温系统分辨率相互关系的正确性,搭建了如图 4 所示的实验平台。

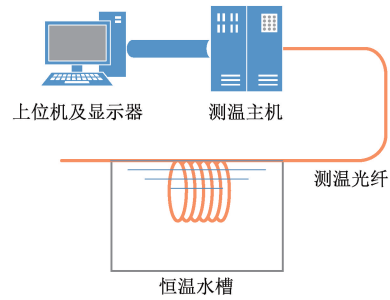


图 4 实验平台

Fig. 4 The experiment platform

平台由分布式光纤测温主机、长度为 2 km 的测温光纤和控温精度为 0.1℃ 的恒温水箱组成,其中测温主机的脉冲激光器发射的泵浦光脉宽及频率可调;数据处理阶段,其累加次数可调,可通过调节系统泵浦光脉宽和累加次数改变系统的空间分辨率、温度分辨率和时间分辨率,以验证理论推导所得的结果。

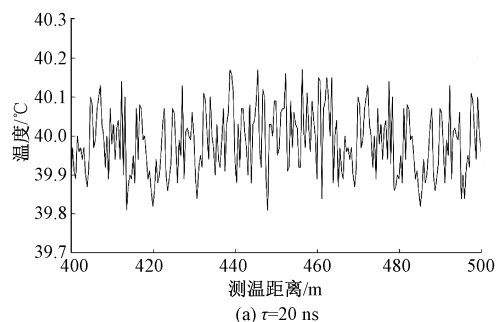
3.2 实验结果

分别改变实验所用的分布式光纤测温系统的脉冲宽度、累加次数、恒温箱温度及放入恒温箱中的光纤距离,对不同情况下系统的空间分辨率、温度分辨率及时间分辨率指标进行测试。实验系统默认参数为:脉冲光发射频率为 20 kHz,脉宽为 10 ns,系统累加次数为 20 000 次、恒温箱温度为 40℃。

1) 改变系统脉冲宽度

保持其他参数不变,分别设置系统的脉冲宽度为 $\tau = 20$ ns, $\tau = 15$ ns, $\tau = 10$ ns,调整浸入恒温箱的光纤长度,记录准确测得恒温箱温度所需的最短光纤长度为系统的空间分辨率;在光纤上 400 ~ 500 m 处取长度为 100 m 的光纤绕成直径大于 15 cm 的线圈,将其放置于恒温箱中进行加温,记录其测得温度的极差为系统的温度分辨率,如图 5 所示。

记录两次数据刷新之间的时间间隔为时间分辨率,各项指标测试结果如表 1 所示。



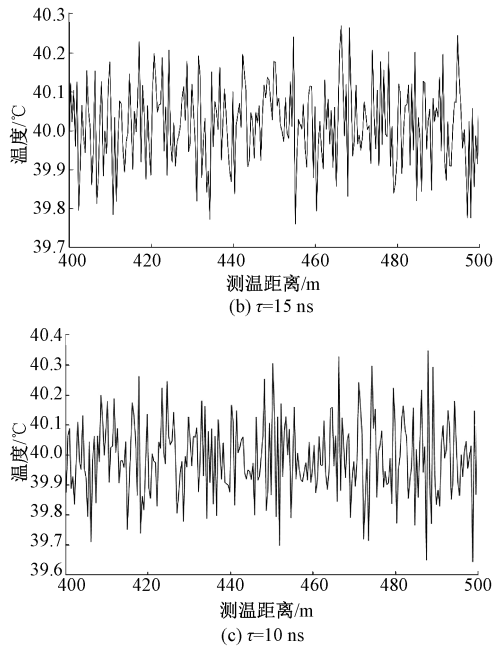


图5 不同脉宽下系统温度分辨率测试结果

Fig. 5 Test results of temperature resolution of the system under different pulse widths

表1 不同脉宽下 RDTs 分辨率指标测试结果

Table 1 Test results of resolutions of the RDTs under different pulse widths

脉宽 τ/ns	10	15	20
空间分辨率 $\delta L/\text{m}$	1.0	1.5	2.0
温度分辨率 $\delta T/^\circ\text{C}$	0.65	0.50	0.40
时间分辨率 $\delta t/\text{s}$	1.0	1.0	1.0

注:实验测量数据存在误差,其中空间分辨率误差小于0.1 m,误差来自对浸入恒温箱中光纤长度的测量误差;温度分辨率误差为0.1°C,误差受恒温箱温度精度影响;时间分辨率测试误差为纳秒级,可忽略。

当 RDTs 脉冲光源的脉宽发生改变时,系统的空间分辨率和时间分辨率的测试值与理论计算结果一致,而温度分辨率测试值与理论值存在一定出入,通过脉宽为10 ns 的实验数据计算式(24)中的相关参数,进而计算不同脉宽下系统的温度分辨率的理论值,将温度分辨率测试值与理论值进行对比,如图6所示。

由实验结果可以看出,当 RDTs 其他参数固定,仅脉冲光源的脉宽发生改变时,测温空间分辨率和温度分辨率随之改变,系统的空间分辨率与脉宽成正比关系,实验的测试结果与理论值一致;温度分辨率与脉宽成近似反比的关系,但理论与实验的测试结果有所出入,这是因为在实验过程中,当系统脉宽增大时,系统的入射光功率增大,导致由瑞利散射和布里渊散射造成的噪声强度增大,进而使系统的信噪比降低,使温度分辨率实验值大于理论值。

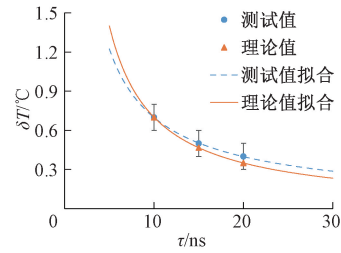


图6 不同脉宽下 RDTs 温度分辨率测试值与理论值对比图

Fig. 6 Comparison between experimental and theoretical values of RDTs temperature resolution under different pulse widths

此外,系统不同分辨率之间的关系与式(27)的理论分析结果一致。

2) 改变测温距离

保持系统参数设置不变,分别测试系统在450、950、1 450、1 950 m 处的空间分辨率,分别在光纤上400~500 m 处、900~1 000 m 处、1 400~1 500 m 处、1 900~2 000 m 处取长度为100 m 的光纤绕成直径大于15 cm 的线圈,将其放置于恒温箱中进行加温,测试不同测温距离下系统的各项分辨率,测试结果如表2所示。

表2 不同测温距离下系统分辨率指标测试结果

Table 2 Test results of system resolution index under different temperature measurement distances

测温距离 L/m	450	950	1 450	1 950
空间分辨率 $\delta L/\text{m}$	1.0	1.0	1.0	1.0
温度分辨率 $\delta T/^\circ\text{C}$	0.65	0.85	1.20	1.70
时间分辨率 $\delta t/\text{s}$	1.0	1.0	1.0	1.0

通过测温距离为450 m 处的实验数据计算式(24)中的相关参数,进而计算出不同测温距离下系统温度分辨率的理论值,将温度分辨率实验测试值与理论值的对比,如图7所示。

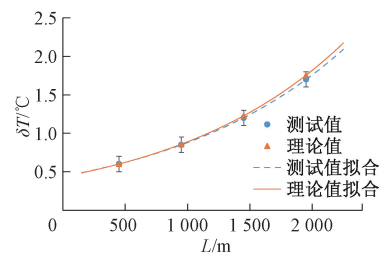


图7 不同测温距离下 RDTs 温度分辨率测试值与理论值对比

Fig. 7 Comparison between experimental and theoretical values of RDTs temperature resolution at different temperature measurement distances

随着分布式光纤测温系统测温距离增加,系统的空间分辨率基本保持不变,实验所得的测试值与理论值吻合,其温度分辨率随测温距离的增加而增大,通过实验测试得到的温度分辨率值低于理论计算得到的结果,这是因为当测温距离增大时,入射的泵浦光经损耗后功率降低,导致由瑞利散射等其他散射造成的噪声强度降低,使系统的温度分辨率小于理论分析结果。

3) 改变光纤温度

保持系统其他参数不变,分别调节恒温箱温度为 30℃、40℃、50℃、60℃、70℃、80℃、90℃、100℃,在光纤上 600~800 m 处取长度为 200 m 的光纤绕成直径大于 15 cm 的线圈,将其放置于恒温箱中进行加温,进行测温实验,测试系统分辨率性能指标,测试结果如表 3 所示。可以看出系统的空间分辨率不受光纤温度影响,而温度分辨率随光纤温度升高而增大。

表 3 不同待测温度下系统分辨率指标测试结果

Table 3 Test results of system resolution index at different temperature to be measured

温度 $T/^\circ\text{C}$	空间分辨率 $\delta L/\text{m}$	温度分辨率 $\delta T/^\circ\text{C}$	时间分辨率 $\delta t/\text{s}$
30	1.0	0.60	1.0
40	1.0	0.65	1.0
50	1.0	0.70	1.0
60	1.0	0.75	1.0
70	1.0	0.8	1.0
80	1.0	0.85	1.0
90	1.0	0.90	1.0
100	1.0	0.95	1.0

通过被测温度为 30℃ 时的实验数据计算式(24)中的相关参数,进而计算出不同被测温度下系统温度分辨率的理论值,将系统分辨率实验测试值与理论值的对比,如图 8 所示。

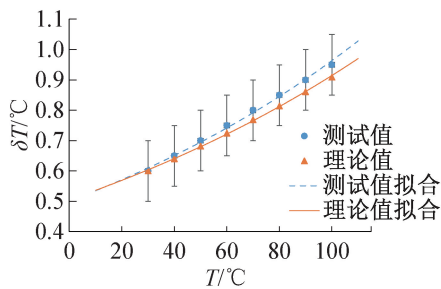


图 8 不同被测温度下 RDTS 温度分辨率测试值与理论值对比
Fig. 8 Comparison between experimental and theoretical values of RDTS temperature resolution at different measured temperatures

由图 8 可知,系统的温度分辨率随光纤温度上升而增大,实验测试值与理论值变化趋势基本一致,测试值略大于理论计算值,造成该误差原因的可能是随着被测温度提高,光纤中产生的噪声增大,以及由系统实验的测试精度不足造成,可以认为测试结果与理论相符。

4) 改变系统累加次数

保持系统其他参数不变,分别设置系统的累加次数为 100、1 000、5 000、10 000、20 000 次,在光纤上 600~800 m 处取长度为 200 m 的光纤绕成直径大于 15 cm 的线圈,将其放置于恒温箱中进行加温,进行测温实验,测试系统分辨率性能指标,测试结果如表 4 所示。

表 4 不同累加次数下系统分辨率指标测试结果

Table 4 Test results of system resolution index under different accumulation times

累加次数	1 000	5 000	10 000	20 000
空间分辨率 $\delta L/\text{m}$	1.0	1.0	1.0	1.0
温度分辨率 $\delta T/^\circ\text{C}$	2.10	1.20	0.85	0.65
时间分辨率 $\delta t/\text{s}$	0.25	0.25	0.50	1.00

通过累加次数为 20 000 时的实验数据计算式(24)和(25)中的相关参数,进而计算出不同累加次数下系统温度分辨率和时间分辨率的理论值,将系统分辨率实验测试值与理论值的对比,如图 9 所示。

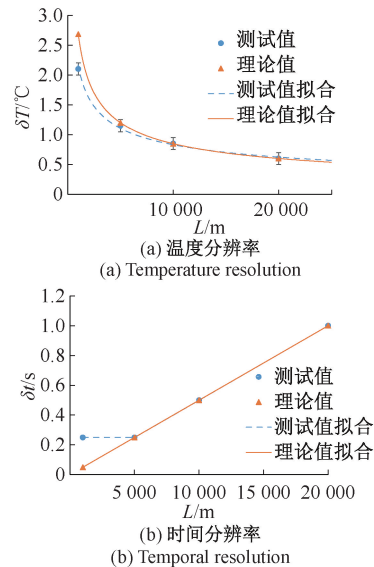


图 9 不同被测温度下 RDTS 分辨率测试值与理论值对比
Fig. 9 Comparison between experimental and theoretical values of RDTS resolution at different measured temperatures

由图 9 可以看出,当累加次数较大时,测试得到的系统温度分辨率与理论计算值吻合较好,而在系统累加次数较小时,测试得到的温度分辨率小于理论计算值,该现

象的主要原因是系统在后期数据处理过程中采用卡尔曼滤波算法对噪声进行滤除,当系统的累加次数较小时,累加后信号中的噪声含量较大,此时卡尔曼滤波的降噪效果更明显,因此测试得到的温度分辨率更小;此外,当系统的累加次数为1 000次时,系统的时间分辨率大于理论值,这是因为在系统的输出端,信息的刷新时间为0.25 s,当系统累加所用的计算时间小于0.25 s时,系统的时间分辨率不再减小。

4 结 论

通过分析 RTDS 的解调原理,研究了其空间分辨率、温度分辨率和时间分辨率的各项影响因素,分别建立了其理论模型,并通过推导得到了不同分辨率指标之间的相互影响关系式。首先,建立了分布式光纤测温系统的等效模型,将其等效为一系列等间距分布的点式温度传感器,相邻两个点式温度传感器之间的距离由系统采样频率决定,每个点式温度传感器的测温范围由系统空间分辨率决定,其测温结果为测温范围内所有点温度的加权平均值,并基于此模型确定了不同影响因素之间的主次关系;其次,基于拉曼散射的强度公式推导了系统温度分辨率的理论模型,该模型综合考虑了各种因素对温度分辨率的影响,经实验测试,其能够更好地拟合实验数据;最后,建立了3种分辨率之间的相互影响关系,为RTDS各项分辨率指标的综合设计提供了参考。

参考文献

- [1] 付立军,刘鲁锋,王刚,等. 我国舰船中压直流综合电力系统研究进展[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 72-79.
FU L J, LIU L F, WANG G, et al. The research progress of the medium voltage DC integrated power system in China[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 72-79.
- [2] 胡海斌,高海波,林治国,等. 船舶电力系统发展历程与展望[J]. 船舶工程, 2019, 41(S2): 138-141.
HU H B, GAO H B, LIN ZH G, et al. Development and prospect of ship power system [J]. Ship Engineering, 2019, 41(S2): 138-141.
- [3] 彭超,赵健康,苗付贵. 分布式光纤测温技术在线监测电缆温度[J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 43-45.
PENG CH, ZHAO J K, MIAO F G. Distributed temperature system applied in cable temperature measurement [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(8): 43-45.
- [4] 张文平,冯军,胡文贵,等. 分布式光纤测温技术在高压电缆中的应用[J]. 光通信技术, 2014, 38(7): 29-31.
ZHANG W P, FENG J, HU W G, et al. Application of distributed optical fiber temperature measurement technology in high voltage cable [J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(7): 29-31.
- [5] DING Y H, DAI X ZH, ZHANG T. Low-cost fiber-optic temperature measurement system for high-voltage electrical power equipment [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2010, 59(4): 923-933.
- [6] 邢豪健,乔秋晓,金钟燮. 基于分布式光纤拉曼测温系统的核电一回路泄漏点监测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 161-167.
XING H J, QIAO Q X, JIN ZH X. Monitoring technology of nuclear power primary circuit leakage point based on distributed temperature sensor [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 161-167.
- [7] HOLLER D, VAGHETTO R, HASSAN Y. High-resolution wall temperature measurements with distributed fiber optic sensors[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145:106042.
- [8] KIM R, PARK C H, MOON J H. Development of a fiber-optic temperature sensor for remote measurement of the water temperature in a spent nuclear fuel pool[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2015, 66(10): 1495-1498.
- [9] MIRZAEI A, BAHRAMPOUR A R, TARA Z M, et al. Transient response of buried oil pipelines fiber optic leak detector based on the distributed temperature measurement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 65:110-65122.
- [10] FERNANDEZ A F, RODEGHIERO P, BRICHARD B, et al. Radiation-tolerant raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 52(6): 2689-2694.
- [11] 马天兵,訾保威,郭永存,等. 基于拟合衰减差自补偿的分布式光纤温度传感器[J]. 物理学报, 2020, 69(3): 54-62.
MA T B, ZI B W, GUO Y C, et al. Distributed optical fiber temperature sensor based on self-compensation of fitting attenuation difference [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(3): 54-62.
- [12] 薛博,白清,张瑜,等. 高消光比脉冲光调制提升BOTDR系统性能研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 84-89.
XUE B, BAI Q, ZHANG Y, et al. Research on improving performance of BOTDR system using high extinction ratio pulse modulation [J]. Journal of

- Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 84-89.
- [13] 王垚,江毅,马维一. 分布式光纤拉曼测温系统中解调算法的优化[J]. 光学技术, 2018, 44(6): 646-650.
WANG Y, JIANG Y, MA W Y. Optimization of demodulation algorithm for the distributed optical fiber raman temperature measurement system [J]. Optical Technique, 2018, 44(6): 646-650.
- [14] SUN M, TANG Y, LI J, et al. Study on spatial resolution improvement of distributed temperature sensor system by linear fitting algorithm [C]. Applied Optics and Photonics China (AOPC2015), 2015, 9679: 967904.
- [15] 汤玉泉,孙苗,李俊,等. 基于喇曼散射的分布式光纤温度传感器的温度修正[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 106-110.
TANG Y Q, SUN M, LI J, et al. Temperature correction of distributed optical fiber temperature sensor based on Raman scattering [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(5): 106-110.
- [16] 汤玉泉,孙苗,李俊,等. 温度附加损耗对分布式光纤拉曼温度传感器测温误差影响研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(5): 847-851.
TANG Y Q, SUN M, LI J, et al. Study on the effect of temperature additional fiber loss on measurement error of Raman distributed optical fiber temperature sensor [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2015, 26(5): 847-851.
- [17] 向洋,孙世政,党晓圆,等. 基于光纤布拉格光栅的流量温度复合传感研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 15-22.
XIANG Y, SUN S ZH, DANG X Y, et al. Research on flow and temperature composite sensing based on fiber Bragg grating [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 15-22.
- [18] LI X G, ZHAO Y, CAI L, et al. Measurement of magnetic field and temperature based on fiber-optic composite interferometer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7): 1906-1911.
- [19] SCHENATO L, ANEESH R, PALMIERI L, et al. Fiber optic sensor for hydrostatic pressure and temperature measurement in riverbanks monitoring [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 82:57-62.
- [20] HU T, ZHAO Y, SONG AN N. Fiber optic SPR sensor for refractive index and temperature measurement based on MMF-FBG-MMF structure [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 237:521-525.

作者简介



王泽润, 2018年于华北电力大学获得学士学位, 2021年于海军工程大学获得硕士学位, 现为海军工程大学博士研究生, 主要研究方向为电力系统保护和安全运行。

E-mail: wzrunfly@163.com

Wang Zerun received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2018, and received his M. Sc. degree from Naval University of Engineering, PLA in 2021. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Naval University of Engineering, PLA. His main research interests include power system protection and safe operation.



叶志浩, 1997年于海军工程大学获得学士学位, 2000年于海军工程大学获得硕士学位, 2005年于海军工程大学获得博士学位, 现为海军工程大学电气工程学院教授, 主要研究方向为综合电力系统、电力系统保护和安全运行。

E-mail: yxyx928@126.com

Ye Zhihao received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Naval University of Engineering, PLA in 1997, 2000, and 2005, respectively. He is currently a professor at the School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, PLA. His main research interests include integrate power systems and power system protection and safe operation.



夏益辉 (通信作者), 2009年于海军工程大学获得学士学位, 2012年于海军工程大学获得硕士学位, 2015年于海军工程大学获得博士学位, 现为海军工程大学电气工程学院副教授, 主要研究方向为电力电子、电力传动。

E-mail: xiayihui2005@163.com

Xia Yihui (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Naval University of Engineering, PLA in 2009, 2012, and 2015, respectively. He is currently an associate professor at the School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, PLA. His main research interests include power electronics, electric machine drives.