

空间目标光学特性实验测量映射关系研究^{*}

李 鹏 李 智 徐 灿

(装备学院 北京 101416)

摘 要:空间目标光学特性实验模拟测量是研究空间目标的光学特性、辅助进行空间目标识别不可或缺的手段。利用空间目标光学特性室内模拟技术,能实现对实际观测过程和观测数据的模拟,其中实验装置的几何布局与映射关系是关键。根据光学实验室的整体布局和“3+1”轴系的设计,建立实验室参考坐标系,研究探测器转动相角和三轴转台转角算法。对探测器不能转动的 $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 半圆区域,利用空间折叠的原理,调整转台三轴转角,实现与不折叠时的系统等效。与STK中太阳、探测器与卫星本体系的夹角对比,验证了映射算法的正确性。

关键词:光学特性;空间目标;室内模拟;参考坐标系;映射关系

中图分类号: O432 TN202 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3060

Research on mapping relationship for experimental measurement of optical characteristic of space target

Li Peng Li Zhi Xu Can

(Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: The experimental simulation technology for optical characteristic of space target is indispensable method to research optical characteristic of space target and space target recognition. It can provide a way about the realization of the observation process and simulation of observed data, which the geometric layout of equipment and mapping relationship are the key. Based on the overall layout of the optics laboratory and the design of the “3+1” axis, a laboratory reference coordinate system was established and the rotation angel of the detector and the three-axis turntable was researched. While in the $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$ semicircle region the detector cannot reach, using the theory of space fold could realize the same effect with un-fold space by adjusting the angle of turntable. Contrasting with the angle between the satellite body coordinate system with sun and detector in the STK, the mapping algorithm is provided to be correct.

Keywords: optical characteristic; space target; experimental simulation; reference coordinate system; mapping relationship

1 引 言

空间目标光学特性研究是进行空间目标探测和识别的重要内容^[1]。目前对空间目标光学特性进行研究主要是利用计算机进行光学特性建模仿真,缺少必要的实测数据对模型进行校验,因此建立空间目标光学特性实验室是非常必要的^[2]。空间目标光学特性室内模拟技术是在实验室模拟空间目标所面临的空間光照条件和光源-目标-探测器的相对几何关系,目的是实现对实际观测过程(地基望远镜观测、天基载荷观测)和观测数据的模拟,可以直接获得被测目标的可见光散

射特性数据,研究相位角、目标几何形状、表面材料、姿态等多类因素对目标光学特性的影响,并可为空间目标光学散射特性分析模型校验提供数据支撑,对识别在轨空间目标具有重要意义^[3-4]。

在进行地面实验室模拟时,考虑到太阳模拟器和接收器通常较重,直接采用和实际观测情况对应的“以卫星本体坐标为基准”的设备布局方法,即目标模型不动,太阳模拟器绕着目标作任意角度的两轴旋转、探测器同时也绕着目标模型作任意角度的两轴旋转,对转动机构的强度和刚度要求太高,不仅增加成本而且还难以保证转动精度。目前,美国国家航空航天局/约翰逊空间中心的光学测量中

收稿日期:2016-01

^{*} 基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(2015AA7046104)

心(optical measurements center)采用角度映射的方法,使光源和探测器的观测相位角始终保持在水平面内,无需上下移动,较以卫星本体为基准的布局设置大大简化了设备布局,降低成本。但由于中央机械臂承重能力小,旋转臂上无法安装大口径太阳模拟器,只能对空间碎片进行室内光学特性测量^[5]。国内对空间目标光学散射特性测试研究较少,李雅男等^[6]在实验室用卤钨灯、一维支架和地面 CCD 相机搭建了测量简单几何体目标及卫星缩比模型的实验装置,由于实验支架只能一维转动,无法对目标进行全方位而又准确的测量。北京 207 所目标与环境光学特征国防科技重点实验室搭建了一套空间目标可见光散射特性测量系统,被测目标放在可调姿态的旋转轴上,首次实现了室内空间目标可见光散射特性的测试。中科院长光所研制了一套高精度紫外-真空紫外反射率测试系统,以真空紫外分光光度计和精密二维转台为光机结构主体,用双光路测试法消除了光源的不稳定性^[7]。上海宇航系统工程研究所牵头研制了空间目标光学动态特性测试系统,探测器在周视测试车上进行升降、方位、俯仰调整,与目标姿态控制系统组成 6 个自由度姿态模拟系统。由于没有采用角度映射方法,使用 6 自由度姿态模拟系统,不仅控制系统复杂还增加了设备成本^[8]。所以通常将太阳模拟器固定不动,卫星做三轴姿态转动,并且采用角度映射的办法,实现与实际观测等效并容易实现的相对几何关系。因此,空间目标光学特性室内模拟的关键技术之一就是装置的几何布局与角度映射方法。

2 四轴转角计算分析

地面模拟时,建立与空间目标实际观测状态等效的光源、探测器、卫星本体的相对位姿关系是整个测量过程的关键。为了确定实验室四轴转角,需要根据实验室布局,建立相关坐标系,并基于光源、探测器、卫星本体等轨道参数进行坐标变换确定它们之间的相对位置关系^[9-10]。

2.1 实验室总体布局及四轴转动轴系分析

空间目标光学特性实验装置主要包括光源、反射镜、三轴转台、探测器、探测器导轨、空间目标模型和探测器支架,具体设计如下。

光源发出的光经过反射镜反射至安装在三轴转台的空间目标模型上;光源中心、反射镜中心、目标模型中心、探测器中心始终在同一平面上;探测器支架一端安装探测器,另一端与三轴转台连接,围绕三轴转台进行 180°运动,且运动轨迹为半圆区域的圆弧,通过探测器转动控制光源-目标模型-探测器三者定义的观测相位角;通过“3+1”轴的设计方法,实现在地面实验室模拟空间目标所面临的室内光照条件和光源-目标-探测器的相对几何关系。

四轴转台系统总轴系如图 1 所示,Axis 1、Axis 2、Axis 3 为三轴转台本体姿态轴,Axis 0 为探测器围绕模型中心的虚拟旋转轴,与三轴转台 Axis 1 重合。Axis 0、Axis 1 始终垂直于地面,Axis 2 以 Axis 1 为轴转动,Axis 3 位于

Axis 1 和 Axis 2 两转角所确定的球坐标位置处。

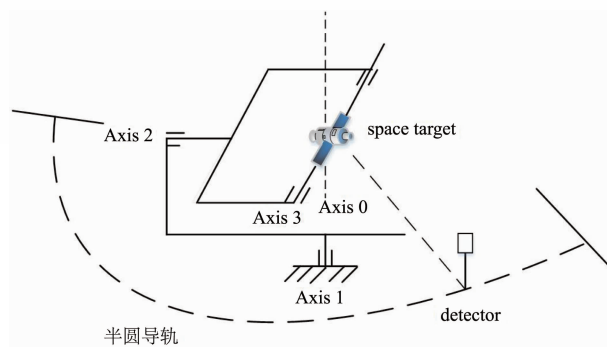


图 1 四轴系统整体轴系

通过四轴系统轴系图分析可以得出,Axis 0 轴控制太阳-卫星-探测器之间的相位角;Axis 1、Axis 2、Axis 3 三轴转台卫星姿态轴,控制太阳矢量、探测器矢量与卫星本体坐标轴的相对姿态关系。

1) STK 中建立参考坐标系

根据实验室布局发现,太阳-卫星-探测器中心始终在同一平面内,所以在 STK 中以太阳矢量和探测器矢量构建参考平面,设太阳矢量为 OX' ,并以探测器矢量和太阳矢量的叉乘得到矢量 OY' ,太阳矢量 OX' 和 OY' 叉乘得到 OZ' ,则在 STK 中建立了参考坐标系 $O-X'Y'Z'$,保证太阳-卫星-探测器中心始终在同一平面内,如图 2 所示。

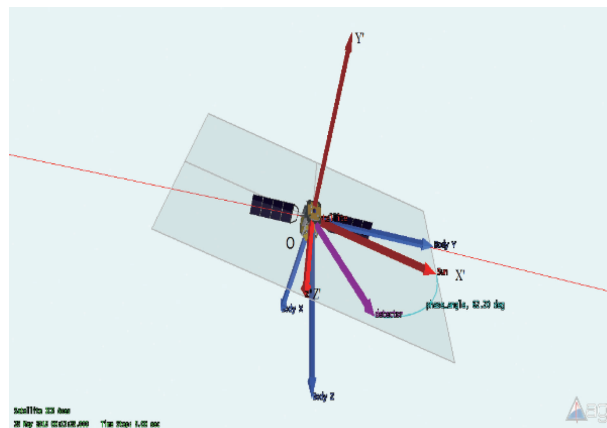


图 2 STK 中构建参考坐标系

2) 实验室建立参考坐标系

J2000 坐标系和空间目标本体坐标系按照 3-1-2 转换顺序的欧拉角分别为 α, β, γ , 则 J2000 坐标系到目标卫星本体坐标系的转换矩阵:

$$R = R_y(\gamma)R_x(\beta)R_z(\alpha) \quad (1)$$

设探测器(地基望远镜观测、天基载荷观测)在 J2000 坐标系下的坐标为 r_d , 太阳在 J2000 坐标系下的坐标为 r_s , 空间目标在 J2000 坐标系下的坐标为 r , 则探测器和太阳在卫星本体坐标系下的坐标分别为:

$$R_d = R(r_d - r) \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{R}(r_s - r) \quad (3)$$

将探测器和太阳在卫星本体坐标系下的坐标 $\mathbf{R}_d$ 和 $\mathbf{R}_s$ 分别单位化,得到太阳在卫星本体坐标系下的单位矢量 $\mathbf{OX}'$ 和探测器在卫星本体坐标系下的单位矢量 $\mathbf{OD}'$,即

$$\mathbf{OX}' = \frac{\mathbf{R}_s}{|\mathbf{R}_s|} \quad (4)$$

$$\mathbf{OD}' = \frac{\mathbf{R}_d}{|\mathbf{R}_d|} \quad (5)$$

构造单位向量 $\mathbf{OY}' = \mathbf{OX}' \times \mathbf{OD}'$, $\mathbf{OZ}' = \mathbf{OX}' \times \mathbf{OY}'$,则在实验室建立与 STK 中完全等效的参考坐标系 $\mathbf{O-XYZ}$,如图 3 所示。规定 $\mathbf{OX}'$ 指向光源方向为正, $\mathbf{OY}'$ 垂直纸面向里为正, $\mathbf{OZ}'$ 正方向由右手法则确定,在太阳-卫星中心-探测器所确立的平面内。令初始时刻三轴转台卫星模型本体坐标系 $\mathbf{O-XYZ}$ 与参考坐标系 $\mathbf{O-XYZ}$ 重合; $\mathbf{OD}'$ 是探测器在卫星本体坐标系下的单位矢量。

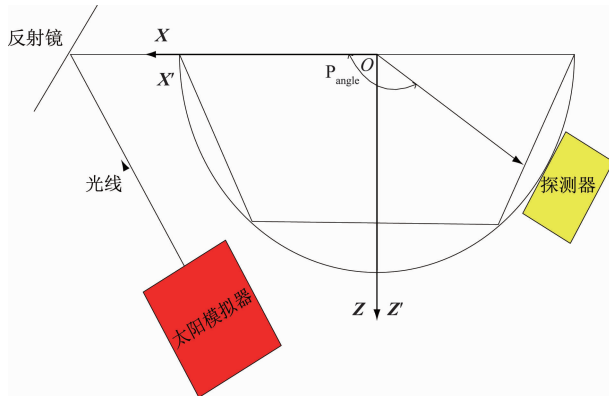


图3 实验室建立参考坐标系俯视图

太阳和探测器的夹角

$$P_{angle} = \cos^{-1} \left(\frac{|\mathbf{OX}' \cdot \mathbf{OD}'|}{|\mathbf{OX}'| |\mathbf{OD}'|} \right) \quad (6)$$

这就是实验室探测器实际转动的相角。

2.2 YXY 顺序旋转的欧拉转角确定

构造矩阵 $\mathbf{M} = [\mathbf{OX}', \mathbf{OY}', \mathbf{OZ}']$,则矩阵 $\mathbf{M}$ 为卫星本体坐标系到参考坐标系的转换矩阵。图 4 给出了按 YXY 顺序旋转下的坐标系的变化情况,各次旋转角度为 ψ, φ, θ ,相应的姿态矩阵分别为 $\mathbf{Ry}(\psi), \mathbf{Rx}(\varphi), \mathbf{Ry}(\theta)$ 。

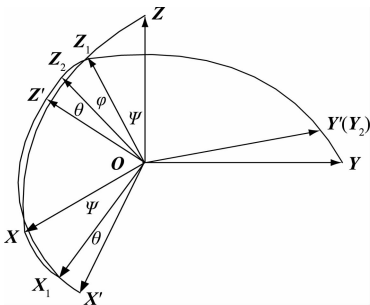


图4 坐标系间的 YXY 欧拉角旋转变换

由此得到卫星本体坐标系 $\mathbf{O-XYZ}$ 到参考坐标系 $\mathbf{O-XYZ}$ 的方向余弦阵为:

$$\mathbf{M} = \mathbf{Ry}(\theta) \mathbf{Rx}(\varphi) \mathbf{Ry}(\psi) = \begin{bmatrix} C\psi C\theta - C\varphi S\psi S\theta S\varphi S\theta - C\theta S\psi - C\psi C\varphi S\theta \\ S\psi S\varphi C\varphi C\psi S\theta \\ C\psi S\theta + C\varphi S\psi C\theta - S\varphi C\theta C\psi C\varphi - S\psi S\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

方向余弦阵元素和欧拉角对照关系为:

$$\begin{cases} \psi = \tan^{-1}(\mathbf{M}(2,1)/\mathbf{M}(2,3)) \\ \varphi = \cos^{-1}(\mathbf{M}(2,2)) \\ \theta = \tan^{-1}(-\mathbf{M}(1,2)/\mathbf{M}(3,2)) \end{cases} \quad (8)$$

此类欧拉转动的奇异点发生在 $\theta = 0^\circ$ 时,为避免 θ 的双重性,限制 θ 在 $0 \sim 180^\circ$ 之间。 ψ, φ, θ 分别为三轴转台 Axis 1、Axis 2、Axis 3 的转角。

考虑到在实验室条件下,光路的方向是固定的,只能通过转动探测器改变相位角 P_{angle} ,理论上探测器应该在 $0 \sim 360^\circ$ 的范围内,即图 3 中虚线圆周上运动,才可以完全模拟相位角的变化。为更有效的利用空间和节约成本,只在 $0 \sim 180^\circ$ 范围内布置探测器导轨,所以需要将相位角在 $180^\circ \sim 360^\circ$ 的情况通过空间折叠映射的原理映射到 $0 \sim 180^\circ$ 范围上,折叠映射的设计原理是当观测相位角需要转到没有导轨的半圆时,通过调整转台三轴旋转角度和探测器相位角虚拟的实现将整个照明-观测系统以光源方向为轴旋转 180° ,探测器接收到的卫星的反射光不变,观测结果与不折叠时的系统完全等效。具体做法是:当观测相位角为 $180^\circ \sim 360^\circ$ 时(即无导轨的半圆), ψ 加负号, φ 变为 $\varphi - 180^\circ$, θ 不变。

3 STK 仿真验证

设置仿真时间为 2015 年 5 月 25 日 00:00:00 UTC—2015 年 5 月 26 日 00:00:00 UTC,时间间隔为 5 min,并设初始时刻为 0。空间目标在 J2000 坐标系下历元时刻 2015 年 5 月 25 日 01:30:00 的轨道根数为 $a = 23\,000\text{ km}$, $e = 1.039\,3\text{e}-006$, $i = 30.014\,7^\circ$, $\omega = 342.447^\circ$, $\Omega = 105.227^\circ$, $M_0 = 17.555\,8^\circ$;J2000 坐标系到目标卫星本体坐标系的转换矩阵由 STK 直接给定。探测器采用地基观测站,在 WGS-84 坐标系的经纬高分别为 $-75.595^\circ, 40.04^\circ, 0\text{ km}$ 。

按照上面的四轴转角的计算方法,得到实验室探测器和三轴转台的转角,如表 1 所示。

表 1 探测器转动相角和三轴转台转角时间/分钟

$P_{angle} / ^\circ$	$\psi / ^\circ$	$\varphi / ^\circ$	$\theta / ^\circ$	
0	73.410 8	72.149 4	-164.110	52.484 9
5	76.059 9	72.110 9	-163.639	55.596 6
.....				
1 435	125.626	-138.322	168.795	70.644 7
1 440	121.886	-134.485	167.852	71.446 5

为验证四轴转角计算方法的正确性,根据表1所求的四轴转角,分别计算出在实验室测量条件下太阳矢量和探测器矢量与卫星本体坐标系 $O-XYZ$ 三轴的夹角,并与 STK 输出结果进行对比,如图5、图6所示。(根据四轴转角计算结果标为实线,STK 输出结果标为虚线)

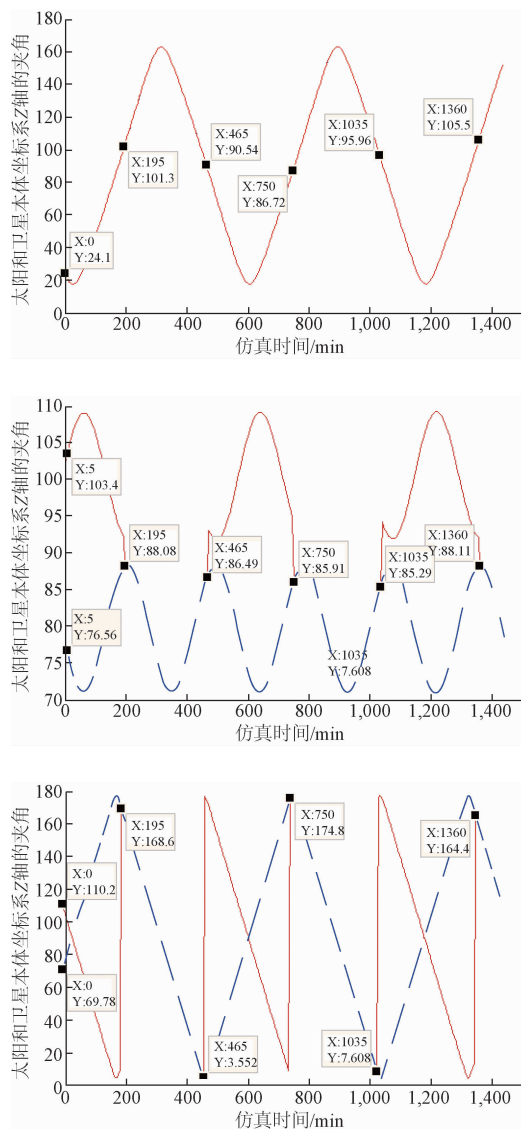


图5 太阳与卫星本体系的夹角

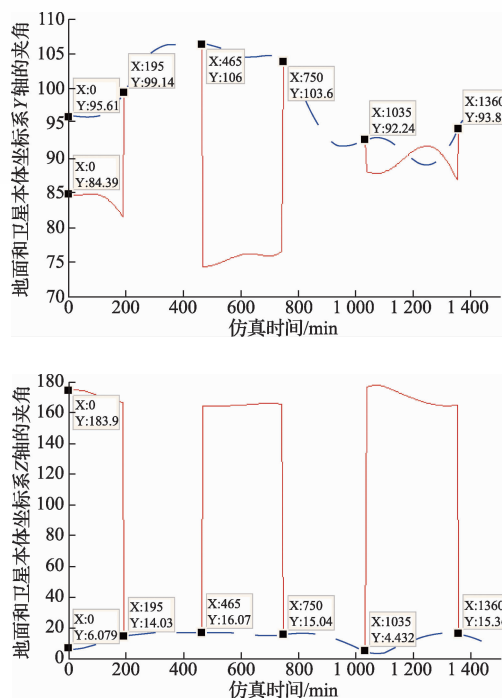
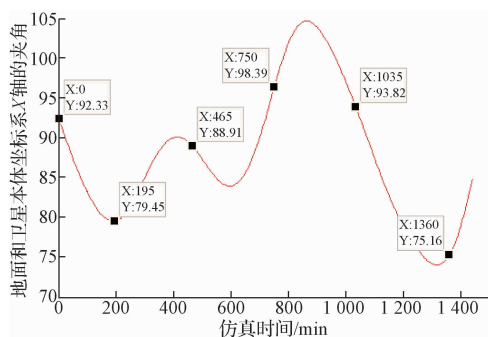


图6 探测器与卫星本体系的夹角

从图5中可以看出, t 在(195,465),(750,1035),(1360,1440)3个时间段内,实线和虚线的曲线都重合,说明此时探测器处于 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的范围内;其他时间内,太阳和卫星本体系的 Y 轴和 Z 轴夹角基本互补,如初始0时刻,这说明此时探测器处于 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 的范围,卫星三轴转台转角进行了映射处理,造成卫星本体系的 Y 轴和 Z 轴翻转,但是光源照射的卫星表面不变,探测器接收到的卫星表面反射光不变,实现了等效平行模拟。因为光源入射方向和卫星本体系的 X 轴不变,所以任何时刻太阳和卫星本体系的 X 轴始终重合。通过图6中探测器和卫星本体坐标轴夹角对比,可以得到同样的结论,验证了所求四轴转角的正确性。该方法对天基观测载荷同样适用。

4 结 论

根据空间目标光学特性实验室布局,分析了四轴转动装置的转动方式,得到探测器转动相角和三轴转台的转角。根据实验室半圆导轨布局,将探测器位于 $180^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 半圆的情况,通过调整三轴转台的转角,实现了与不折叠时完全等效,有效节省了成本。与 STK 仿真对比,验证了算法的正确性,为任意时刻任意姿态的空间目标光学特性的地面模拟提供技术支持,从而为空间目标的探测识别做出贡献。下一步将该算法加入到四轴转台装置的控制程序中去,在地面实验室对空间目标缩比模型进行真实测量,开展空间目标的光学散射特性研究。

参考文献

- [1] XING F. Editorial: Special issue on smart optical instruments and systems for space applications[J]. Instrumentation, 2015, 2(1):1-2.
- [2] 郑茹, 张国玉, 张健, 等. 基于月球真实辐射亮度的月球模拟器光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2116-2122.
- [3] 袁艳, 孙成明, 张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 2097-2103.
- [4] 王付刚, 张伟, 汪洪源, 等. 运动状态对卫星多谱段光学特性的影响分析. [J]. 光学学报, 2012, 32(10): 21-28.
- [5] COWARDIN H, SEITZER P, ABERCROMBY K, et al. Characterization of orbital debris photometric properties derived from laboratory-based measurements[C]. 2010 AMOS Technical Conference, 2010:14-17.
- [6] 李雅男, 孙晓兵, 乔延利, 等. 空间目标光学特性模拟实验研究[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 895-900.
- [7] 汪龙祺, 匡海鹏, 曹小涛. 紫外-真空紫外光谱反射率

测试系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(9): 17-21.

- [8] 魏祥泉, 黄建明, 颜根廷, 等. 空间目标可见光散射动态特性测试校验系统[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 81-85.
- [9] 袁艳, 孙成明, 张修宝. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析[J]. 物理学报, 2010, 59(3): 2097-2103.
- [10] 佟刚, 宋立维, 曹永刚, 等. 车载光测设备测角误差影响因素的分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 974-979.

作者简介

李鹏(通讯作者), 1990年月出生, 工学硕士, 主要研究方向为空间目标光谱散射特性的测量与建模等。

E-mail: 693078757@qq.com

李智, 1973年出生, 博士, 教授, 主要研究方向为空间安全等。

E-mail: lizhizys@263.com

(上接第74页)

参考文献

- [1] 王小强, 欧阳骏, 黄宁淋. ZigBee 无线传感器网络设计与实现[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 吴国宏. 新型温湿度传感器 SHT10 的原理及应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2009, 9(4): 52-54.
- [3] 赵嘉庆, 季福坤. 基于 STC12C5620AD 单片机温湿度控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12): 31-33.
- [4] 严冬, 李瑛, 李景林. 基于 STM32 的无线光照传感器节点的设计[J]. 物联网技术, 2014, 4(2): 16-18.
- [5] 龚文超, 吴猛猛, 刘双双. 基于 CC2530 的无线监控系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2012, 35(6): 33-36.
- [6] 赵莉, 邓跃. 基于 ZigBee 的无线传感网络农业监测系统[J]. 硅谷, 2012, 5(21): 1-2.
- [7] 鲍贤亮, 陈年海, 徐一凡, 等. 基于 ZigBee 技术的无线脉搏传感网[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 105-108.
- [8] 李娟娟, 雷斌. 基于 WSN 野外冻土地温自动监测系统

的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 86-90.

- [9] 章伟聪, 俞新武, 李忠成. 基于 CC2530 及 ZigBee 协议栈设计无线网络传感器节点[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(7): 184-187.
- [10] 潘雪涛. 传感器原理与检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

作者简介

杜帅, 1994年出生, 男, 陕西兴平人, 陕西理工学院物理与电信工程学院在校学生, 主要研究方向为电子信息无线电。

秦伟(通讯作者), 1982年出生, 男, 陕西汉中, 陕西理工学院物理与电信工程学院, 主要研究方向为嵌入式与检测技术。

E-mail: rain301@126.com