

文章编号:1001-9081(2007)05-1086-03

## 无线传感器网络中的被动式红外传感器模型研究

高学彬,张志强,叶世伟,吴健康

(中国科学院研究生院 无线传感网络和应用研究中心,北京 100040)

(xbgao04@mails.gucas.ac.cn)

**摘 要:**针对公共安全的需要,利用无线传感器网络系统进行区域监控已然成为趋势。通过对系统的物理结构分析提出了一种被动式红外传感器模型。该模型对配备被动式红外传感器的无线传感网络的系统设计具有指导意义。传感器节点的测试以及实时系统的试验验证了模型的可靠性。

**关键词:**被动式红外传感器;模型;无线传感器网络

**中图分类号:** TP393.03 **文献标识码:** A

## Research of passive infrared sensor model for wireless sensor networks

GAO Xue-bin, ZHANG Zhi-qiang, YE Shi-wei, WU Jian-kang

(Research Center for Wireless Sensor Networks and Application,

Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China)

**Abstract:** For public security, wireless sensor networks have been widely applied in monitoring public area or target. After in-depth structure analysis, a passive infrared sensor (PIR) model was presented. This model provides some useful suggestion for the wireless sensor networks system design that is equipped with PIR sensor. The sensor test and real-time system experiment validate the reliability of this model.

**Key words:** passive infrared sensor(PIR); model; wireless sensor networks

### 0 引言

当今社会中各种灾难事件频发,人们越发关注公共安全需要一套有效的预警以及灾难救助系统。无线传感器网络的优势是能够将广域的物理环境监测与强大的逻辑处理单元以无线的方式连接起来,从而人们可以更加安全有效地获取广域信息。在公共安全领域,可以利用以上无线传感器网络监控活动目标并预警其异动<sup>[1]</sup>。Werner-Allen 以及 Johnson 利用配备低频声音传感器的无线网络成功监控火山活动状况<sup>[2]</sup>。他们首先利用无线传感器网络捕获到火山爆发的超声信号,而后同其他方式的获取的信号进行了对比,最终验证了无线传感网络的可靠性。

红外传感器目前已经被广泛的应用于目标监测与定位,例如军事目标跟踪,机器人定位等等。其中,P. M. Novotny 以及 N. J. Ferrier 利用主动式红外传感器以及 Phong 光照模型精确的测量了移动机器人与近距离目标(30cm 以内)之间的距离<sup>[3]</sup>。此外,被动式红外传感器具有体积小、性能稳定以及反应灵敏等优点,因此将被动式红外传感器应用于无线传感器网络中可以实现良好的目标监测系统。目前在传感器网络中声音模型已经得到了广泛的研究,而被动式红外传感器模型没有完整的确立。梁振等人对 CMOS 红外传感器从硬件电路的角度上进行了建模<sup>[4]</sup>。为了更好地指导设计实际应用系统的设计,需要完整地提出应用于无线传感器网络的被动式红外传感器模型。

文中提出一种适合于无线传感器网络系统设计的被动式红外传感器模型。模型基于传感器元件的一般组成原理,因此可以保证模型在物理结构层次上的可靠性。随后通过试验验

证了模型的可靠性,同时据此设计的行人监控系统表现良好。

### 1 被动式红外传感器模型

被动式红外传感器一般利用热释电材料作为感应元件来探测外界目标状况。热释电材料具有自发极化的性质,其极化强度正比于器件温升随时间的变化率。当目标物从传感器镜头前穿过,其辐射的红外线能量就会经过镜头的会聚作用照射到红外感应原件上从而使其产生一定的电势差信号。这一微弱的电势差信号经过后续的滤波以及放大电路处理最终被采样输出。系统设计中采用的 MSP410CA 传感器节点在其四周配置 4 组被动式红外感应元件。这些传感器分别与一个特制的光学镜头相连,用以产生一个垂直  $\pm 15^\circ$ 、水平  $\pm 45^\circ$  的感应视场。节点最终输出两种信号:感应目标的方向信号(Quad 信号)以及目标红外辐射的强度信号(PIR 信号)。

为了保证最终模型的结构有效性,将整个被动式红外传感器分解为以下子系统:镜头、信号产生以及信号处理。分别对其进行物理结构分析建模,再将子系统模型结合形成被动式红外传感器模型。

#### 1.1 镜头子系统

镜头子系统主要负责将外界红外辐射的能量聚集到位于镜头内部的感应元件上,从而使其产生电势差。如果不采用镜头来汇聚入射光线,红外感应元件的探测距离在 1~2m。利用菲涅耳(Fresnel)镜头来汇聚外界的入射能量可以使其感应范围扩展到 30m 左右。与此相似的 MSP410CA 的镜头则是利用多重反射的原理实现了相同的功能,为传感器提供了最大 15m 的可探测距离。其自身体积更加小巧,同时突出的开口镜头可以更多的避免来自风以及太阳光线等自然环境

收稿日期:2006-11-30;修订日期:2007-01-17

作者简介:高学彬,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器、网络、目标定位; 张志强,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器、网络、目标定位; 叶世伟,副教授,主要研究方向:机器学习; 吴健康,教授,博士生导师,主要研究方向:无线传感器、网络。

的噪声干扰。

类似“万花筒”的多重反射原理,传感器内部的敏感元件经过镜头在外界会产生多个虚像。每个虚像与传感器镜头之间的连线所包围的空间区域称作 beam。经过系统试验验证单一传感器的2个感应元件存在着12个beams,交替相邻排布。根据光沿直线传播的原理,当目标物位于这些beam空间的时候其发射的红外辐射将会被准确的聚集在传感器感应元件上,从而能够为后续的信号产生提供足够强的红外辐射输入。

### 1.2 信号产生子系统

经过镜头以及红外窗口的辐射能量照射到感应元件上,其热量会导致感应元件上的电子重新排步。当热量足够强的时候,感应元件两端便会产生微弱的电势差。被动式红外传感器的感应单元一般设计成包含两个感应元件。它们以相互“补偿”的方式连接,类似于差压产生器,从而感应元件的电压输出实际是两个感应元件产生的电势差之差。当目标物体辐射的红外能量连续投射到两个传感元件上,感应元件两端会产生交流变化的电压信号。这样受外界环境影响同时在两个感应元件产生的“共模噪声信号”将被消减掉;相反由于物体运动而产生的不同元件电势差的变化将会被保留下来,从而可以依据这一特征来判断目标物体的运动状况。

根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,目标物的单位面积辐射功率为:

$$w = \varepsilon \cdot \delta \cdot T^4 \quad (1)$$

其中主要的常量参数如下:目标物体表面的法向比辐射率,以人体为例  $\varepsilon = 0.98$ ;斯蒂芬-波尔兹曼常数  $\delta = 5.67 \times 10^{-8} (w/m^2 k^4)$ ;物体的绝对温度,以正常人体为例  $T = 310 K$ ,环境温度  $288 K$ 。

考虑到随着传播距离  $d_T$  的增加,目标物体的红外辐射能量会不断的衰减,

$$P_T = w \cdot \tau_a = \varepsilon \delta T^4 \cdot e^{-\phi d_T} \quad (2)$$

其中  $\phi$  表示监测现场的大气透射率,以北京平原地区为例  $\phi$  可取  $70\%$  [5]。

最后根据元件已知的电压响应率  $R_V = 2700 V/W$  (人体运动的频率变化范围很小因此对电压响应率的影响可以忽略) 接受到目标物体辐射后感应元件所产生的电势差为:

$$\begin{aligned} U_{element} &= P_T \cdot R_v \cdot A_s \\ &= \varepsilon \cdot \delta \cdot (T_T^4 - T_{atmo}^4) \cdot e^{-\phi d_T} \cdot R_v \cdot A_s \end{aligned} \quad (3)$$

感应电路的输出实际是两个感应元件产生的电势差之差,而后经由 FET 电压跟随器叠加一个直流偏置信号  $U_p$  之后被输出给后端的信号处理电路,

$$\begin{aligned} U_{IR} &= U_L(A_L) - U_R(A_R) + U_p \\ &= k_{IR} \cdot R_v \cdot (A_{L_L} - A_{L_R}) + U_p \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{其中 } k_{IR} = \varepsilon \cdot \delta \cdot (T_T^4 - T_{atmo}^4) \cdot e^{-\phi d_T}.$$

实际不同感应元件的电压响应率受元件自身的特性影响会有所不同。这里考虑到感应元件在选择的时候会尽量的一致,所以理想情况下可以认为二者一致。从而感应电路的输出主要受到目标物红外辐射强度  $P_T$  以及感应元件接受辐射的实际感应面积  $A_s$  的影响。

### 1.3 信号处理子系统

感应电路的输出电压信号首先经过低通滤波器(截止频率在  $10 Hz$  左右),以滤除高频噪声信号。随后一方面输出到 Quad 信号比较器,对于超过比较器门限(默认  $1.66 V$ ) 的信号,比较器会输出一个高电平信号来表示该方向有目标探测

发生,4路Quad信号可以精确地表达目标物的方向信息;另一方面首先滤除直流偏置电压经过运算放大器放大后,输出给随后的整体加法器。将4路信号求和之后输出到双向比较器判断,超过门限的信号将被采样输出从而整体性的评价一个传感器节点四周的红外辐射的强度。

综合前面三部分的传感器原理与推导过程,最终形成被动式红外传感器节点的输出模型如下:

1) 经过电路分析以及计算推导,感应元件的实际输出电压  $U_{IR}$  满足:

$$U_{IR} = 1.1 + 3.5 \times 10^{-3} \times e^{-0.7 \times d_T} \cdot d_T^2 \cdot f_T^{-0.93} \quad (5)$$

其中,  $d_T$  为传感器与目标物体之间的直线距离;  $f_T$  为目标物体对传感元件辐射的变化频率。

2) Quad 部分,

$$Quad = \begin{cases} 1, & U_{IR} \geq U_{th1} \\ 0, & U_{IR} < U_{th1} \end{cases} \quad (6)$$

3) PIR 部分,

$$U_{PIR} = \sum_{i=1}^4 U_{Qi} = \sum_{i=1}^4 k_{Qi} \cdot (U_{IRi} - U_p) + \eta \quad (7)$$

$$ADC = \frac{U_{PIR} \times 1024}{U_{battery}}, U_{PIR} > U_{th2} \quad (8)$$

其中,  $\eta$  为环境影响以及处理电路产生的高斯噪声,  $U_{Qi}$  为 Quad 信号处理电路的门限比较电压,  $K_{Qi}$  反应电路影响简化取常量 1;  $U_{PIR}$  为 PIR 信号处理电路采样门限比较电压,  $U_{battery}$  为量化参考电压, ADC 为最终采样量化结果 ( $0 \sim 1024$ ); 二者的门限电压均可调节。

## 2 模型试验分析

在进行系统设计之前,首先通过以运动人体为目标进行节点测试,以验证上面建立的单节点模型。测试内容主要包括以下方面:传感器探测距离,探测灵敏度,节点噪声。

### 2.1 传感器探测距离

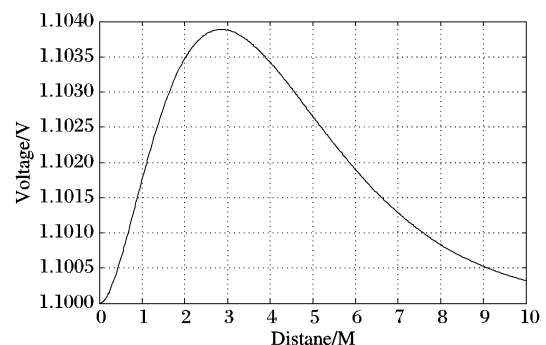


图1 传感器模型感应电压与目标距离温度关系

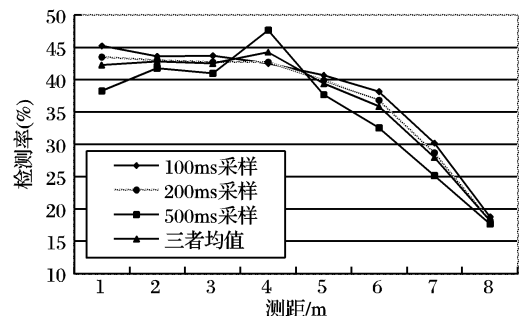


图2 传感器感应与距离的关系

试验中,环境温度  $25 \sim 30^\circ C$ ,传感器离开地面  $1 m$ 。探测成功率在可以接受的情况下 ( $> 10\%$ ),最大探测距离在

8~9m。随后节点依照不同的采样率(100ms,200ms,500ms)分别进行5组对同一目标的监测实验。统计实验结果,计算不同采样率下节点依据距离变化的平均成功探测率,然后求取以上探测率曲线的均值(如图2)。模型中传感器的感应电压实际是其探测性能的真实表现,因为系统实际的探测输出是以感应电压为基础的。

对比模型以及实际数据曲线(如图1)可以发现(依照实际应用考虑,这里只评估节点在1~8m的性能表现):首先,二者一致地反应了节点的探测性能随着距离的增加呈下降趋势;其次,传感器节点在2~4m具有最佳的探测性能,从图2可以发现节点能够保持45%左右的成功率;再次,模型曲线在0~2m并没有同实验保持一致,原因是建模过程中函数的各种近似表达导致二者的如此差异。总之,以上被动式红外传感器模型基本上同节点的实际性能相符合。

## 2.2 传感器探测灵敏度

由于传感器只能探测到运动中的目标物体,因此关注传感器可以成功探测到目标物时所需要的最小相对运动范围,即传感器的灵敏度。试验中可以明显地发现其灵敏度与传感器同目标物之间的距离成反比关系。从模型来分析,这反映了通过镜头的作用传感器的视场被分割成了条状放射性区域(beam)。沿着beam向外伸展的方向,目标物需要运动更大的范围才能够成功的穿越不同的beam从而使感应元件表面所接受到的辐射能量发生足够大的变化,以致感应元件两端形成电势差。

## 2.3 节点噪声

以上在模型建立的过程中没有明确提及噪声问题主要是基于以下原因:首先,在传感器信号产生子系统的双感应元件的设计能够极大的消除环境噪声的影响;其次,信号处理电路中在电压信号产生之后以及进行信号处理之前,应用了截止频率在10Hz左右的低通滤波器再一次将高频环境噪声滤除。在模型的最后附加一个高斯噪声,其中既包含环境噪声又包含信号处理电路附加的噪声。通过在没有目标情况下对传感器节点输出的分析可以验证最终传感器探测输出中所附加的噪声即是高斯噪声,如图3。

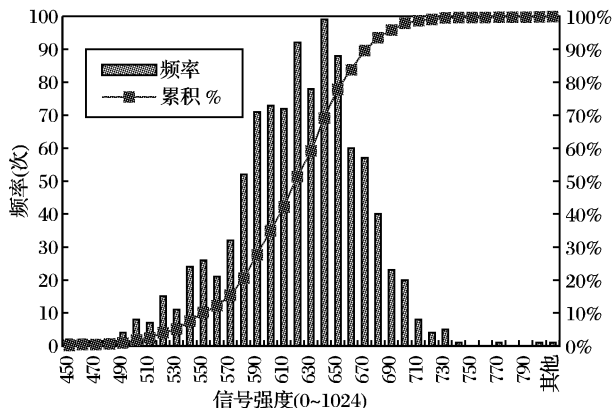


图3 实际噪声分析

## 2.4 模型应用的设计原则

首先,根据传感器探测距离实验、探测灵敏度实验以及模型分析,可以确定在使用多节点覆盖一定区域的系统设计中,需要注意在覆盖尽可能大的区域的同时节点之间的距离不要大于10m以免产生监控缝隙。保证单一节点覆盖5m以内的区域,从而利用传感器的最佳性能。

其次,根据传感器模型分析,节点应该被置于离开地面

1m左右的位置。因为被动式红外传感器在垂直方向包含 $\pm 15^\circ$ 的探测范围,同时人体的高度一般在2m左右,为了更好地利用传感器的效能,传感器应该置于离地一定的高度。

最后,经过多次拟合对比之后可以获得与实验更加吻合的模型。利用这一精确模型在获取了单目标探测的强度信号之后可以推导出目标与节点之间的距离。然而通过节点实验发现:由于控制成本的需要,节点的电路设计在最终信号ADC采样阶段存在缺陷,即感应电压信号在有目标出现的时候很快便处于饱和状态,从而导致前面的应用假设不可实现。因此MSP410CA节点不适合引用于精确的目标定位以及距离测量。

## 3 模型应用的系统性能试验

基于以上对传感器节点模型分析以及验证,利用被动式红外传感器网络实现了行人监控系统。应用系统依照图4使用8个红外传感器节点监控周长24m的区域中行人的运动状况。将该区域划分成25个等大的方形单元用以指定目标的位置,节点布置于监控区域四周。为了避免外界干扰源的影响,将试验区域缩小到整个试验区域的中心19个单元。此外使用一个mica2节点作为基站,实时转发数据到数据处理主机。

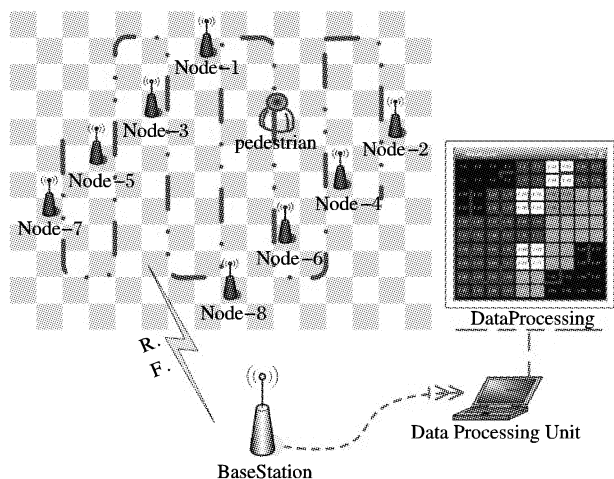


图4 实验系统说明

试验表明该系统具有较高的目标成功监测率。如图4当传感器网络监测到目标人并且数据处理主机能够确定目标人的具体位置时,右侧图中的相应单元的颜色就会发生改变。试验中目标行人以正常的步速依照图4中虚线轨迹运动,右侧的系统显示基本正确地反映了目标的实际运动状况。

在模拟系统中,为了获得最好的试验结果一般将元件的工作状态设置为说明书中的理想状态。在这个实际系统中将错误定义为误警,从而更加全面地衡量实时系统的探测性能。误警再次细分为虚警和漏警两类,即没有目标却报告发现目标,以及目标出现却没有报告或者报告错误。经过多次试验将结果统计如下:

表1 实验结果分析(误警/目标位置总数)

误警	组1	组2	组3	组4	组5	组6
漏警	2/19	1/19	2/19	0	2/19	0
虚警	1/19	0	0	1/19	0	1/19

从中可以看出建立于以上模型的系统的实际效果是很好的,同时模型的真实性以及可靠性再一次得到验证。

(下转第1108页)

会话的建立包含成功地完成客户端和服务端的消息处理。因此,建立会话的全部传输时延  $T_{t_{UDP}}$  为:

$$T_{t_{UDP}} = \sum_{i=1}^N T_t(i)_{UDP} \quad (13)$$

## 4 性能分析

### 4.1 实验参数设置

实验相应的参数设置如下:每一个无线帧的持续时间为 20ms;根据文献[3]中的设置:时延 D 为 100ms,帧间时间  $\tau$  为 20ms,最大的重传数  $N_m$  为 7;对于排队时延,假设  $\mu_s = \mu$ ,  $\lambda_M = 0.1\lambda$ ;在目的地的排队时延计算中假设服务速率的标准偏差  $\sigma$  为平均值的 5%。 $\bar{X}_1^2 = E[X_1]^2$ ,  $\bar{X}_s^2 = E[X_s]^2$ ,  $E[X_1]^2 = \sigma_1^2 + (E[X_1])^2$ ,  $E[X_s]^2 = \sigma_s^2 + (E[X_s])^2$ 。将  $\mu_s$  代入得出  $R = 0.501[\rho_0^2 + \rho_s^2]$ 。SIP 在 ST 的到达速率  $\lambda_M = 50$  请求/s;  $\mu = 70$  请求/s;  $\rho_s = \lambda \times \mu; \rho_0 = 0.7; T_{有线传输} = 100ms$ 。

### 4.2 性能分析结果

表 1 消息长度以及帧的数量

消息	有效载荷/B	消息长度/B	帧的数量(19.2kbps)
SI INVITE	700	728	19
SI P183	835	863	23
SI PPRACK	558	586	16
SI P200OK	545	573	15
SI P180	349	377	10
SI PACK	300	328	9

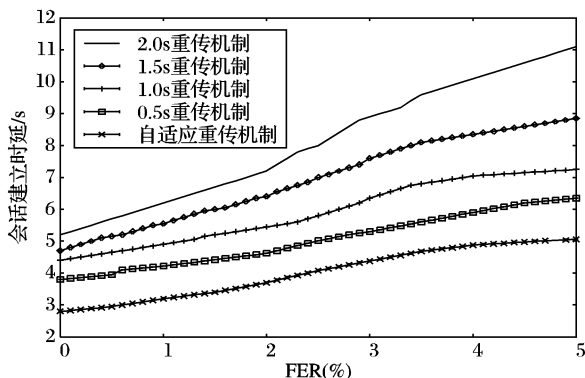


图 2 两种重传机制的平均会话建立时延性能比较

通过前面数学模型的分析可以看出 SIP 会话建立时延随着 FER(模型中的  $p$ ) 增长以指数规律增长。交换的消息的数量、消息长度以及重传机制对于会话建立的时延有很大的影响,这些方面的优化将可以缩短会话建立时延。假定每一

个 UDP 数据报由一个 IP 包来传送。表 1 中给出了 UDP 数据报的长度以及信道上每个数据报所包含的帧的数量。SIP 重传计时器  $T_r$  用于实现 SIP 消息的重传,缺省值为 0.5s,但是由于 SIP 协议是设计用于带宽丰富的有线链路的协议,当应用于无线网络时,由于无线信道的带宽约束和高错误率的特点以及采用的底层传输协议(UDP),其重传的时间将变长(大于 0.5s)<sup>[8]</sup>。因此,本文将  $T_r$  从 0.5s 到 2s 的会话建立时延与自适应重传机制的会话建立时延作了比较。图 2 中显示了比较结果。从图中的比较结果可以看出采用自适应重传机制的性能比固定值重传机制的性能好,对 IMS 中基于 SIP 的会话建立时延有明显的改善。

## 5 结语

本文采用排队机制建立了 IMS 中的端到端时延的数学模型,分析了影响时延的各个因素。根据目前 IMS 中的 SIP 会话采用的固定值重传机制的缺点,本文提出了一种新的可以根据会话建立中的信令包的长度做出调节的自适应重传机制。结果表明自适应重传机制能有效地改善 SIP 会话建立时延。而且,性能的分析还表明 SIP 自适应重传机制的性能可以通过压缩算法来减少 SIP 消息的长度,通过纠错机制或混合 ARQ 校正 SIP 消息避免无线链路上的重传来改进会话建立的时延。

### 参考文献:

- [1] GURBANI VK, JAGADEESAN LJ, MENDIRATTA VB. Characterizing Session Initiation Protocol (SIP) Network Performance and Reliability[A]. ISAS 2005[C]. 2005. 196-211.
- [2] RAJAGOPAL N, DEVETSIKIOTIS M. Modeling and Optimization for the Design of IMS Networks[A]. Proceedings of the 39th Annual Simulation Symposium (ANSS'06)[C]. 2006.
- [3] DAS S, LEE E, BASU K, et al. Performance Optimization of VoIP Calls over Wireless Links Using H.323 Protocol[J]. IEEE Transactions Computers, 2003, 52(6): 742-752.
- [4] ITU-T Recommendation E. 721—Network Grade of Service Parameters and Target Values for Circuit-Switched Services in the Evolving ISDN[S].
- [5] EYERS T, SCHULZRINNE H. Predicting Internet Telephony Call Setup Delay[A]. Tony Evers and Henning Schulzrinne IPTel 2000 (First IP Telephony Workshop)[C]. 2000.
- [6] KIST A, HARRIS RJ. SIP Signaling Delay in 3GPP[A]. Sixth International Symposium on Communications Interworking of IFIP[C]. 2002. 211-222.
- [7] KLEINROCK L. Queueing systems, vol 1: theory[M]. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1975.
- [8] RFC 3261. SIP: Session Initiation Protocol[S].

(上接第 1088 页)

## 4 结语

为被动式红外传感器成功建立了节点模型,从模型中可以发现很多对此后系统设计具有指导意义的原则。依据该模型设计实现了运动人体的监测定位系统。系统试验验证了模型的可靠性同时证实了系统的性能满足准确性应用要求。但是其中也存在着一些问题有待进一步完善。

### 参考文献:

- [1] PAVLIDIS I, MORELLAS V, TSIMMYRTZIS P, et al. Urban Surveillance Systems: From the Laboratory to the Commercial World[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(10): 1478-1497.

- [2] WERNER-ALLEN G, JOHNSON J, RUIZ M, et al. Monitoring Volcanic Eruptions with a Wireless Sensor Network[A]. Proceedings Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN'05)[C]. 2005. 108-120.
- [3] NOVOTNY PM, FERRIER NJ. Using Infrared Sensors and the Phong Illumination Model to Measure Distances[A]. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation [C]. 1999, 2: 1644-1649.
- [4] 梁振,于峰崎,程勇. CMOS 红外传感器的模型研究[J]. 传感器技术. 2005, 24(8): 36-38.
- [5] 张智丰,李向新,彭群生. 基于大气传输模型的动态目标红外成像仿真[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 524-527.