

微波探火及其在低空平台中的系统设计

张 雷^{1,2} 陆建华¹ 梁新刚¹

(清华大学航天航空学院 北京 100084)¹ (中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)²

摘 要 微波遥感可以实现全天时、全天候的对地观测,因此在林火探测的技术领域具有一定的优势。为了采用测定火焰微波辐射强度的方式来判断火灾发生的区域,先后分析了火焰的微波辐射和微波接收原理,并对宽频微波探测接收系统进行了方案设计。为满足应急或灵活探测的需要,对低空平台的 GPS 接收单元和惯性导航单元进行了组合设计,以确保林火微波探测的可靠性和稳定性。

关键词 微波,火灾探测,低空平台

Microwave Fire Detection and System Design Based on Low-altitude Aircraft Platform

ZHANG Lei^{1,2} LU Jian-hua¹ LIANG Xin-gang¹

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)¹

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)²

Abstract Microwave remote sensing can be achieved throughout all-day and all-weather land observation. So, the microwave technology has certain advantage in forest fire detection field. In this paper, in order to determine the fire happening region, the theories of microwave radiation and receiving were analyzed, and broadband microwave receiver system solution was designed. So as to meet the needs of emergency and flexibility detection, GPS receiver module and inertial navigation unit in low-altitude platform were designed to ensure the reliability and stability of microwave forest fire detection.

Keywords Microwave, Fire detection, Low-altitude aircraft platform

火灾是一种在时间和空间上失去控制并造成一定损害的燃烧过程。森林火灾发生时伴随有燃烧气体、烟雾、温度、火焰以及燃烧波等火灾参量,通过对这些火灾参量的测量、分析,就能判定被测区域有无火灾的存在。火灾探测器往往采用光电敏感元件来接收森林火灾产生的气体、烟雾、温度和火焰等,将表征火灾信息的物理量转化为电信号,从而实现火灾报警。微波探测技术不受云、天气等因素的影响,因此微波探测森林火灾具有一定的技术优势。

卫星遥感平台受轨道的限制,每天过顶的时间固定,无法实现森林火灾的应急观测;航空遥感在恶劣的天气条件下,出于安全考虑,载人飞机往往无法升空作业;低空无人飞行平台(以下简称:低空平台)在森林火灾探测方面具有以下几个独特的优势:第一,平台构建、维护以及作业的成本极低;第二,能承受一定的天气影响,作业方式灵活快捷、转移方便;第三,因其飞行高度低,能够接近森林火场范围直接探测或获取数据,在局部信息获取方面有着巨大的优势;第四,不必申请空域,国家对一千米以下的空域不实行管制,因此,采用低空平台来设计微波探测火灾系统是近年来的研究热点。德国 Duisburg 大学的研究人员在该领域取得了巨大成绩。

1 火焰微波辐射原理

森林火灾发生时,往往伴随大量的烟雾和水蒸气。烟雾

产生消光作用,使得火焰辐射能量衰减,造成火焰探测器(如红外火焰探测器、紫外火焰探测器)接收到的信号大部分是烟雾的散射信号,而不是火焰直接辐射的信号,因此有可能产生火警的误报。微波探测技术引人关注,相对于红外和紫外波长,微波穿透能力强,甚至可能穿透建筑物墙壁,因此,采用微波技术,可以在森林火场被遮挡的情况下实现有效探测。

微波的工作波长 λ 为 1~187mm,相应的工作频率 f 为 1.6~300GHz,火灾烟雾颗粒的粒径 d 在 0.0042~7.5 μm 之间。因此,探测火焰的微波辐射时,颗粒粒径与入射波长相对比值的最大值为 $(d/\lambda)_{\text{max}}=0.0075$ 。当烟雾颗粒粒径与入射波长相对比值小于 0.1 时,其散射符合 Rayleigh 散射理论,即烟雾颗粒的散射光强与入射波长的四次方成反比,也就是说波长越长,散射光强越小。在采用微波探测火焰时,烟雾颗粒的散射信号相对较小,可以有效地消除烟雾的消光影响,从而保证微波探测器能接收较大的火焰微波辐射能量。

如图 1 所示, $P_F(f, T)$ 是火焰的辐射能量,其值取决于被考察的辐射电磁波频率 f 和火焰温度 T ; $P_R(f, T)$ 是热辐射强度。微波波段辐射定律遵循 Rayleigh-Jeans 定律,微波辐射能量为:

$$dP_F(f, T) = (2AkT/c_0^2)\omega_E(f, T)f^2 df \quad (1)$$

其中, A 表示火焰面积; k 表示 Boltzmann 常数; c_0 表示光在

到稿日期:2009-05-14 返修日期:2009-07-08 本文受国家“九七三”重点基础研究项目(2007CB310601)资助。

张 雷(1978-),男,博士后,助理研究员,主要研究方向为空间信息技术等, E-mail: leizhang_cm@gmail.com; 陆建华(1963-),男,教授,博士生导师, lujh@wmc.ee.tsinghua.edu.cn(通信作者)。

真空中的传播速度; $\omega_E(f, T)$ 表示辐射发射率。

热辐射强度为:

$$dP_R(f, T) = (A_e(f)/4\pi d^2) dP_F(f, T) \quad (2)$$

其中, $A_e(f)$ 表示微波接收天线的有效接收面积; d 表示火焰与天线之间的距离。

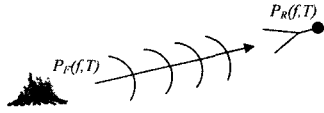


图1 火焰微波辐射原理图

将式(1)代入式(2)进行积分可得:

$$P_R(f, T) = \frac{kAT}{8\pi^2 d^2} \int G(f) \omega_E(f, T) df$$

其中, $G(f) = (A_e(f) f^2 / c_0^2)$ 。

对于中心辐射频率 f_c , 频宽为 Δf 的火焰辐射, 火焰对外微波辐射功率(即热辐射强度)为:

$$P_R(f_c, \Delta f, T) = \frac{kAT}{8\pi^2 d^2} \omega_E(f_c, T) G(f_c) \Delta f \quad (3)$$

以上原理分析, 也可通过计算同质同形黑体对外辐射功率的数值, 在获得火灾中燃烧物质对外辐射微波功率的上限后, 再考虑辐射率函数的影响, 从而可以估算出火焰微波辐射功率的近似值。假设火焰面积 A 为 0.5m^2 , 火焰温度 T 为 1000k , 中心辐射频率 f_c 为 11GHz , 频宽 Δf 为 1GHz , 则火焰微波辐射功率的上限大于 100nW 。显然, 这个功率值可以被传统的微波接收天线探测到。

2 火焰微波探测与宽频接收系统设计

森林火灾发生时, 火焰的微波辐射均匀分布于半球面上(如图2所示), 则投影面积(即微波接收天线的有效接收面积) $A_e(f)$ 接收到微波辐射功率为:

$$P_R(f, T) = \frac{A_e(f)}{2\pi r^2} P_F(f, T) \quad (4)$$

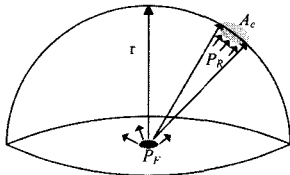


图2 微波探测接收的原理图

由式(4)可知, 接收天线接收到的火焰微波辐射功率 $P_R(f, T)$ 与天线有效接收面积 $A_e(f)$ 成正比; 与天线接收点到火焰中心的距离 r 成反比。

微波天线接收时具有很强的方向性, 即天线会对存在信号变化的某个方向具有相对较高的灵敏度, 这一特性有时会影响到森林微波探测火灾的工作可靠性。为了避免这种方向性, 研究中采用了阵列天线。因此, 在研究中选取 $2\sim 40\text{GHz}$ 为接收频率范围, 并分为 $2\sim 12\text{GHz}$, $12\sim 18\text{GHz}$, $18\sim 26\text{GHz}$, $26\sim 40\text{GHz}$ 的4个宽频。

宽频微波探测接收系统的系统结构如图3所示。为了校准接收的测量误差, 选用 100°C 恒温信号的热载技术。系统中, 热载信号和4个宽频信号由射频开关来选择切换, 然后再进行低噪声放大, 通过混频后产生中频信号并作中频放大, 进行信道选择后就可以完成数据采集及其处理。为了高灵敏高性能地接收与处理微波信号, 这种系统结构采用了超外差接

收技术。下变频前面的高频放大器是低噪声放大器, 因为混频器的噪声系数一般都比较大。前面的射频带通滤波器和镜频抑制滤波器都是无源滤波器, 存在一定的损耗。由多级线性系统级联的噪声公式可知, 如果没有该低噪声放大器, 则整个接收系统的噪声系数将很大。因此, 引入具有一定增益的低噪声放大器可以减弱混频器和后级中频放大器的噪声对整个系统的影响, 从而提高灵敏度。但低噪声放大器的增益小, 不宜过高, 因为混频器是非线性器件, 进入的信号太大, 会产生较多的非线性失真。低噪声放大器的增益一般不超过 15dB , 最前面的射频滤波器在对信号预选时就滤除了很多带外的信号, 其插损一般很小。低噪声放大器后面的镜频抑制滤波器, 用于滤除镜频信号和其他干扰, 同时可以滤除由低噪声放大器的非线性而引入的各种互调失真干扰。图3中的 GPIB 是通用接口总线, 用来控制信号流; GBIP 支持即插即用设备进行数据采集。

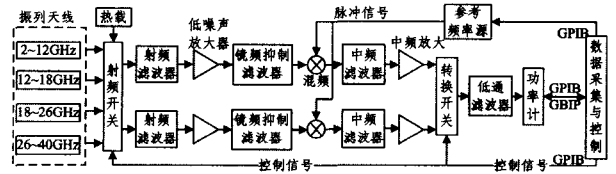


图3 宽频微波探测接收系统的结构图

3 微波探测接收系统在低空平台上的集成设计

低空平台一般是以飞艇或小型无人机为载体, 搭载微波探测接收系统, 需要稳定、精确地跟踪森林火场和保持微波探测的有效作用距离。结合式(4), 假设有效接收面为直径 80cm 的圆, 灵敏度为皮瓦 (10^{-12}) 数量级的接收天线。忽略空气介质对于微波辐射的衰减作用, 计算可得微波接收天线与森林火场中心的最大作用距离约为 96 米。为了低空平台的精确跟踪和引导, 一般需要组合导航系统来实现快速、准确地在火场目标上空进行较长时间的悬停飞行。因此, 低空平台需要集成 GPS 接收单元和惯性测量单元(IMU), 其姿态控制是林火探测系统的重要组成部分, 系统的具体结构如图4所示。

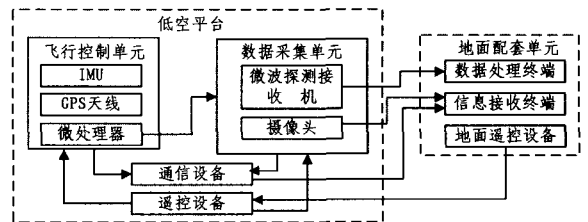


图4 低空平台的系统结构图

其中, GPS 接收单元和 IMU 组合的导航系统采用东北天为其导航坐标系, 通过对系统的性能和各种误差源的分析, 得到了组合导航的系统状态方程。首先研究 IMU 所形成的惯性导航单元(INS)的状态方程:

$$\dot{X}_{INS} = f_{INS}(X_{INS}) + G_{INS} W_{INS} \quad (5)$$

其中, G_{INS} 为系统噪声传递函数; 状态向量 X_{INS} 为有 25 个状态的列向量, 即:

$$X_{INS} = [L, \lambda, h, v_N, v_E, v_D, q_0, q_1, q_2, q_3, b_{ax}, b_{ay}, b_{az}, k_{ax}, k_{ay}, k_{az}, \epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}, b_{gx}, b_{gy}, b_{gz}, k_{gx}, k_{gy}, k_{gz}]^T \quad (6)$$

其中, (L, λ, h) 为低空平台的经度、纬度和高程信息; $(v_N, v_E,$

v_D)为低空平台的北向、东向和地向速度; (q_0, q_1, q_2, q_3) 是用四元数表示低空平台的姿态; b_a 和 k_a 分别表示加速度计的固定偏差和刻度因子; b_g 和 k_g 分别表示陀螺仪的固定偏差和刻度因子。

式(5)中的系统噪声 W_{INS} 为:

$$W_{INS} = [\omega_{ax}^l, \omega_{ay}^l, \omega_{az}^l, \omega_{rx}^l, \omega_{ry}^l, \omega_{rz}^l, \omega_{gx}^l, \omega_{gy}^l, \omega_{gz}^l]^T \quad (7)$$

其中, ω_a 是加速度计噪声项, ω_r 和 ω_g 均是陀螺仪噪声项;其中 ω_r 为一阶马氏过程, ω_r 和 ω_g 均为高斯白噪声。

将GPS接收单元和惯性导航单元(INS)组合后,将式(5)作为组合导航系统的状态方程,用GPS的模型作为测量方程,即:

$$Z = HX_{INS} + V \quad (8)$$

其中, $H = [I_{10 \times 10}, 0_{10 \times 15}]$, V 是系统测量噪声。

将组合导航系统测量得到的各种参量送入机载导航主控系统,结合微波探测火场中心的位置信息,经过卡尔曼滤波器和数据融合后对低空平台执行相应的引导导航与飞行控制,确保低空平台在作业时保持近似“水平”状态来探测森林火场的微波辐射。

4 低空微波探火的应用分析

低空平台森林上空飞行时,根据微波探测接收系统接收到的微波辐射强度和波长来确定森林火灾是否存在、火场的大小以及位置。根据文献[9]可知,森林着火后,上空微波辐射的强度增加,而且辐射亮度温度增加大小与火灾的种类有关。急进地表火的燃烧区,辐射亮度温度增加不大,这是因为火蔓延快,仅燃烧地表枯叶和枯草,释放能量低,也有林冠对微波辐射的屏蔽作用。地表火发生在疏林地和无林地,辐射亮度温度增加。稳进地表火和地下火的燃烧比较彻底,释放能量多,强度大,温度增加,辐射亮度温度增加较大。林冠火烧毁整个林区,燃烧更彻底,强度更大,具有最高的辐射亮度温度。

一般情况下,根据接收到的较高的辐射亮度温度来发现森林火场。在相同条件下,这种可能性还与微波探测接收系统的灵敏度、无线方向图上波瓣的宽度(解象力的大小)和对火灾林区的探测时间长短有关。第3节中的微波探测接收系统具有较高的灵敏度。解象力与波长成反比,与天线直径成正比。因此,增加解象力就要在选定波长时尽量选用较小波长和增加天线的直径。对森林火灾区域的探测时间与飞机的飞行高度和速度有关,在可能的情况下应尽量增加对地面的探测时间。

微波探测接收系统搭载在地空飞行平台上,其工作方式有扫描和不扫描两种。扫描工作方式是微波探测接收系统的天线垂直与航线连续变换角度,按一定探测宽度在地面形成扫描带。将微波探测接收系统接收到的辐射亮度温度数值转

换为图像输出,得到辐射热图。发生森林火灾时,可在热图上出现热点、热区。所以,该系统可用于发现林火、拍摄火场、计算火灾面积等,而且应用微波探测接收系统可拍摄到浓烟下的大火灾。不扫描工作方式是微波探测接收系统的天线固定一个角度,随着低空飞行平台飞行观测区呈线状。微波探测接收系统输出信号可显示在示波器上并打印出来。这种比较适合于森林火灾面积的测量。

结束语 微波技术的一个主要特点在于微波探测的灵敏度受火场中浓烟和水蒸气的影响比较小,具有红外光学不可比拟的优势。考虑到微波火灾探测灵敏度问题,在微波探测接收系统的设计上采用宽频阵列天线等技术。低空平台是应用研究中的一个重要载体,姿态控制要有一个精度相对较高的动态控制过程,因此需要组合导航系统来确保低空平台的稳定悬停和实时调整姿态,并以此来探测火焰的微波辐射。

近年来,国内外研究发展了针对森林火灾探测的诸多新型技术,这些是实现林火监测数字化和智能化控制的重要发展趋势。本文分析和研究的微波探测火灾技术由于受到火场复杂信号的限制,需要做更深层次的技术分析与定量化试验研究。后续的研究工作将配备一个地面微波试验系统,对诸多地被物的微波性能进行定量探测,即微波探测接收系统搭载在低空飞行平台上,飞行高度在200~500米对地面的沼泽、森林火焰、湿森林、干森林等做微波探测特性曲线研究。

参考文献

- [1] 杨亮,庄爽,马建明,等. 浅谈微波技术应用于火灾探测[J]. 消防科学与技术,2006,25(1)
- [2] 吴龙标,方俊,谢启源. 火灾探测与信息处理[M]. 北京:化学工业出版社,2006
- [3] Kempka T, Kaiser T, Solbach K. Microwaves in fire detection [J]. Fire Safety Journal,2006,41:327-333
- [4] Kaiser T, Kempka T. Is microwave radiation useful for fire detection? [C]//Proceedings of 12th international conference on automatic fire detection AUBE'01. vol. 965, Gaithersburg: NIST Special Publication, March 2001
- [5] Pozar D M. Microwave and RF wireless systems [M]. New York: Wiley, 2001
- [6] Derbel F. Wireless communication for alarm systems with short range radio [C]// International Conference on Automatic Fire Detection AUBE'04. 2004
- [7] 吴龙标,袁宏永. 火灾探测与控制工程[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999
- [8] 姬渊,秦志远,王秉杰,等. 小型无人机遥感平台在摄影测量中的应用研究[J]. 测绘技术装备,2008,10(1)
- [9] 姚树人,文定元. 森林消防管理学[M]. 北京:中国林业出版社,2002

(上接第90页)

- [7] Long Jidong, Schwartz D G, Stoecklin S, et al. Application of Loop Reduction to Learning Program Behaviors for Anomaly Detection [C]//ITCC. 2005:691-696
- [8] Jonassen I. Efficient discovery of conserved patterns using a pattern graph [J]. Comput Appl Biosci, 1997:509-522
- [9] Sekar R, Bendre M, Bollinini P, et al. A Fast Automaton-Based Method for Detecting Anomalous Program Behaviors [C]// IEEE Symposium on Security and Privacy. Oakland, CA, 2001: 144-155