

文章编号: 1671-0576(2023)01-0055-06

基于辐射能量分布函数的黑体辐射天地 一致性理论推导

刘 健, 林嘉轩, 朱凌轩, 杜 君

(电磁散射重点实验室, 上海 200438)

摘 要: 针对在地面高温环境中模拟高空飞行器蒙皮较低的温度分布难度大, 且在地面高温背景中低温目标辐射测量误差大的问题, 提出黑体辐射地面静态等效模拟测量一致性理论。通过引入光谱辐射能量分布函数和积分辐射能量分布函数, 理论推导得出黑体辐射能量与温度、波长的关系, 并进行理论自洽验证, 提出了在地面状态下测量高空飞行器低温蒙皮辐射特性的天地一致性理论。该理论表明: 温度为 T 的黑体在波长 λ 上的光谱辐射强度等于温度为 nT 的黑体在波长 λ/n 上的光谱辐射强度的 $(1/n)^5$; 温度为 T 的黑体在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的积分辐射强度等于温度为 nT 的黑体在波长 $\lambda_1/n \sim \lambda_2/n$ 范围内积分辐射强度的 $(1/n)^4$ 。

关键词: 辐射能量分布函数; 天地一致性理论; 光谱辐射强度; 积分辐射强度

中图分类号: V216; O433.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2023.01.010

Derivation of Blackbody Radiation Congruity Theory between High Altitude and Ground Based on Function of Radiation Energy Distribution

LIU Jian, LIN Jiaxuan, ZHU Lingxuan, DU Jun

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering
Laboratory, Shanghai 200438, China)

Abstract: Considering the difficulty of simulating the temperature of high altitude aircraft's surface and the uncertainty of measuring the radiation signature of low temperature target on the ground, a congruity theory of blackbody radiation was developed. The functions of spectral radiation energy distribution and integrated radiation energy distribution were introduced to derive the relationship between the radiation energy and temperature, as well as wavelength, of a blackbody, which was validated by theoretical self-consistent. On the basis of the mathematical relationship, the congruity theory of aircraft's surface radiation measurement between high altitude and ground was developed. The results indicate that the

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 上海市自然科学基金(20ZR1455100, 20ZR1454800); 电磁散射实验室稳定运行基金(622102Y070108)

作者简介: 刘 健(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事目标红外辐射特性研究。

spectral radiation intensity of a blackbody in the wavelength of λ at the temperature of T is equal to $1/n^5$ times the spectral radiation intensity of a blackbody in the wavelength of λ/n at the temperature of nT , and the integrated radiation intensity of a blackbody in the wavelength band between λ_1 and λ_2 at the temperature of T is equal to $1/n^4$ times the integrated radiation intensity of a blackbody in the wavelength band between λ_1/n and λ_2/n at the temperature of nT .

Key words: function of radiation energy distribution; congruity theory between high altitude and ground; spectral radiation intensity; integrated radiation intensity

0 引言

飞行器红外辐射特性是影响飞行器可探测性的重要目标特性之一。飞行器红外辐射能量主要来源于蒙皮和发动机排气系统,其中蒙皮辐射能量主要集中在长波波段,发动机排气系统辐射能量主要集中在中波波段^[1]。随着长波红外探测技术的发展,飞行器蒙皮辐射特性越来越受到关注。现阶段,国内外研究人员对飞行器蒙皮辐射特性开展了大量的数值仿真和试验测试研究。MARTINEZ 等^[2]开发了大型商用飞机红外特性计算代码,使用该代码计算了波音 747-400 客机的红外特性,重点分析了机身蒙皮的辐射特性。为验证该代码的正确性,COIRO 等^[3]测量了波音 737 客机起降阶段的红外辐射特性。相比于测量客机高空巡航状态下的辐射特性,测量起降阶段的辐射特性相对容易,这也是 COIRO 等测量客机起降阶段的红外辐射特性数据用于验模的一个主要原因。然而,地面状态毕竟不同于高空状态,尤其是地面温度显著高于高空温度,直接在地面测得的目标辐射特性必然不同于高空环境中的目标辐射特性,即存在天地一致性问题。

如果通过数值仿真等手段获得了高空飞行状态下的飞行器蒙皮温度分布,再在地面状态下通过冷却手段模拟高空环境蒙皮的低温分布,对低温蒙皮辐射特性进行测量,可以获得高空飞行状态下的蒙皮辐射特性。这一试验方法似乎可行,但实际存在两点不足:一是冷却比加热更难,在地面高温环境中通过冷却手段模拟高空飞行器蒙皮较低的温度分布难度很大;二是地面背景温度高

于目标温度,背景辐射高于目标辐射,在强背景中测量弱目标的辐射特性,存在较大测量误差。为解决上述问题,亟需开展地面静态模拟测量高空低温飞行器蒙皮辐射特性的天地一致性理论研究。

现阶段,鲜有文献涉及黑体辐射的天地一致性理论研究。目前,仅本文作者在早期针对黑体积分辐射强度开展过缩比理论和地面等效模拟测试研究。LIU 等^[4]从控制方程出发,理论推导得到了积分辐射强度与几何缩比的数学关系,并进行了平板试验验证。WANG 等^[5]推导得出了积分辐射强度和几何缩比、温度、波段的数学关系,并用于指导飞行器蒙皮积分辐射试验,但研究结论没有涉及光谱辐射强度。在流体流动和对流换热领域,通过对控制方程组进行无量纲化处理,可以推导得出一系列无量纲系数,构建相似理论用于指导模拟试验测试。但在辐射换热领域,由于控制方程中存在普朗克定律这类超越函数方程,无法通过数学推导得到无量纲系数,因此辐射换热领域不存在相似理论。

针对地面静态模拟测量高空低温飞行器蒙皮辐射特性试验中存在的等效一致性问题,本文从普朗克定律出发,通过引入黑体光谱辐射能量分布函数和黑体积分辐射能量分布函数,理论推导出黑体光谱辐射强度、积分辐射强度与温度、波长的数学关系,并进行理论自洽验证。该数学关系的推导是为了揭示低温、长波波段辐射强度与高温、短波波段辐射强度之间的内在联系,构建黑体在高空和地面不同温度下辐射一致性的理论基础。基于该数学关系,可以通过在地面状态下测量高温短波波段的辐射强度,推算出目标在高空

低温状态下长波波段的辐射强度,以实现地面静态环境下对高空环境下飞行器蒙皮辐射特性的等效模拟测量。

1 光谱辐射强度天地一致性理论推导

高空飞行状态下,飞行器蒙皮大部分区域温度与环境温度相当,由于气动加热和发动机热源等因素影响,整个飞行器表面的蒙皮温度是不均匀的。典型飞行器高空巡航状态下蒙皮温度分布如图1所示。然而,若飞行器表面的蒙皮可以划分成若干个网格,且网格划分得足够小的话,那么每个网格中的温度($T_1 \sim T_6$)可以认为是均匀的。

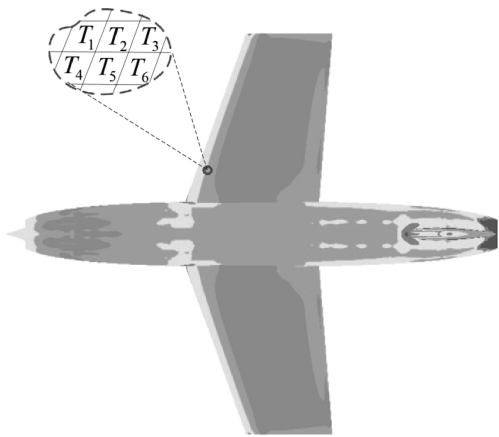


图1 典型飞行器高空巡航状态下蒙皮温度分布示意图

以蒙皮上任意一个网格微元为研究对象,假设该网格微元温度为 T ,发射率为1,面积为 A ,同时其辐射特性满足朗伯余弦定律,则该蒙皮微元的光谱辐射强度可以由普朗克定律计算得到^[6]。其表达式为

$$I_{b,T,\lambda} = \frac{A}{\pi} \left(\frac{1}{\lambda^5} \right) \frac{c_1}{\exp(c_2/(\lambda T)) - 1} \quad (1)$$

式中: $I_{b,T,\lambda}$ 为温度为 T 、面积为 A 的黑体在波长 λ 上的光谱辐射强度; c_1 为第一辐射常数,其值为 $3.7415 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数,其值为 $1.43879 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

将式(1)对波长 λ 求偏导数,并令导数等于零,可得

$$\left(1 - \frac{c_2}{5\lambda_m T} \right) \exp\left(\frac{c_2}{\lambda_m T} \right) = 1 \quad (2)$$

式中: λ_m 为光谱辐射强度峰值对应的波长。

将 $\lambda_m T$ 作为一个变量,可以采用逐次逼近的数值算法求解,得到 $\lambda_m T = 2898.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。将该值带入式(1)中,可以计算得到该蒙皮微元的峰值光谱辐射强度

$$\begin{aligned} I_{b,T,\lambda_m} &= \frac{A}{\pi} \left(\frac{c_1}{\lambda_m^5} \right) \frac{1}{\exp(c_2/(\lambda_m T)) - 1} \\ &= \frac{A}{\pi} \left(\frac{c_2}{\lambda_m T} \right)^5 \frac{c_1 c_2^{-5} T^5}{\exp(c_2/(\lambda_m T)) - 1} \end{aligned} \quad (3)$$

令

$$c_3 = \left(\frac{c_2}{\lambda_m T} \right)^5 \frac{c_1 c_2^{-5}}{\exp(c_2/(\lambda_m T)) - 1} \quad (4)$$

可得

$$I_{b,T,\lambda_m} = \frac{c_3}{\pi} A T^5 \quad (5)$$

式中: c_3 为常数,其值为 $1.2862 \times 10^{-11} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{K}^5)$ 。

定义黑体光谱辐射能量分布函数为温度 T 的黑体在波长 λ 上的光谱辐射强度与峰值辐射强度的比值,即

$$f = I_{b,T,\lambda} / I_{b,T,\lambda_m} \quad (6)$$

将式(1)和式(5)带入式(6),可以将黑体光谱辐射能量分布函数转换为以 λT 为变量的函数,即

$$\begin{aligned} f(\lambda T) &= \left(\frac{1}{\pi \lambda^5} \right) \frac{c_1}{\exp(c_2/(\lambda T)) - 1} \bigg/ \left(\frac{c_3}{\pi} T^5 \right) \\ &= \frac{c_1}{c_3} (\lambda T)^{-5} \frac{1}{\exp(c_2/(\lambda T)) - 1} \end{aligned} \quad (7)$$

分析式(7)可以发现,黑体光谱辐射能量分布函数是关于 λT 的函数,只要保证波长和温度的积不变,即可保证黑体光谱辐射能量分布函数值不变,而不需要保证波长和温度均不变。

基于黑体光谱辐射能量分布函数这一特点,假设有两个面积相同的黑体,黑体1的温度为 T ,黑体2的温度为黑体1的温度的 n 倍,即 nT 。黑体1在波长 λ_1 上的光谱辐射强度 I_{b,T,λ_1} 与黑体2在波长 λ_2 上的光谱辐射强度 I_{b,nT,λ_2} 之比可表示为

$$\begin{aligned} \frac{I_{b,T,\lambda_1}}{I_{b,nT,\lambda_2}} &= \frac{I_{b,T,\lambda_{m1}} f(\lambda_1 T)}{I_{b,nT,\lambda_{m2}} f(\lambda_2 n T)} \\ &= \frac{(1/\pi) c_3 T^5}{(1/\pi) c_3 (nT)^5} \cdot \frac{f(\lambda_1 T)}{f(\lambda_2 n T)} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $I_{b,T,\lambda_{m1}}$ 表示温度为 T 的黑体在波长 λ_{m1} 上

的峰值光谱辐射强度; $I_{b,nT,\lambda_{m2}}$ 表示温度为 nT 的黑体在波长 λ_{m2} 上的峰值光谱辐射强度。

如果保证两个黑体的温度和波长乘积相同, 即 $\lambda_1 T = \lambda_2 nT$, 则有

$$f(\lambda_1 T) = f(\lambda_2 nT) \quad (9)$$

$$\lambda_1 = n\lambda_2 \quad (10)$$

那么, 式(8)可以变换为

$$\frac{I_{b,T,\lambda_1}}{I_{b,nT,\lambda_1/n}} = \frac{T^5}{(nT)^5} = \left(\frac{1}{n}\right)^5 \quad (11)$$

式(11)给出了波长和温度乘积保持不变时, 黑体在不同波长上的光谱辐射强度与波长、温度的关系。该关系表明: 温度为 T 的黑体在波长 λ 上的光谱辐射强度等于温度为 nT 的黑体在波长 λ/n 上的光谱辐射强度的 $(1/n)^5$ 。该数学关系构成了黑体光谱辐射强度天地一致性理论。基于该理论, 可以通过测量地面高温环境下的黑体短波

$$\begin{aligned} I_{b,T,0\sim\infty} &= \int_0^{\infty} \frac{Ac_1}{\pi\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1\right)} d\lambda \\ &= \int_0^{\infty} \frac{Ac_1}{\pi \left(c_2 / \left(\frac{c_2}{\lambda T} T\right)\right)^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1\right)} \frac{-c_2}{T \left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^2} d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \\ &= \frac{Ac_1 T^4}{\pi c_2^4} \int_0^{\infty} \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1\right)} d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \\ &= \frac{A}{\pi} \left(\frac{\pi^4 c_1}{15 c_2}\right) T^4 = \frac{A}{\pi} \sigma T^4 \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\sigma = \pi^4 c_1 / (15 c_2)$ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, 取值为 $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

定义黑体积分辐射能量分布函数 $F(\lambda T)$ 为温度 T 的黑体在波长 $0 \sim \lambda$ 范围内积分辐射强度与全波长范围内积分辐射强度的比值, 即

$$\begin{aligned} F(\lambda T) &= \frac{I_{b,T,0\sim\lambda}}{I_{b,T,0\sim\infty}} \\ &= \frac{A}{\pi} \int_0^{\lambda} \frac{c_1}{\lambda^5 \exp\left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1\right)} d\lambda \left/ \left(\frac{A}{\pi} \sigma T^4\right) \right. \\ &= \frac{15}{\pi} \int_{\frac{c_2}{\lambda T}}^{\infty} \left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^3 \left/ \left(\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1\right) d\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \right. \end{aligned} \quad (14)$$

分析式(14)可以发现, 黑体积分辐射能量分布函数是关于 λT 的函数, 只要保证波长和温度的积不变, 即可保证黑体积分辐射能量分布函数

光谱辐射强度, 推算出高空低温环境下的黑体长波光谱辐射强度。

2 积分辐射强度天地一致性理论推导

仍然以图 1 中飞行器蒙皮上任意一个网格微元为研究对象, 设该网格微元温度为 T , 发射率为 1, 面积为 A 。该网格微元在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的积分辐射强度^[7] $I_{b,T,\lambda_1\sim\lambda_2}$ 可以通过对光谱辐射强度在该波长范围内积分得到, 有

$$I_{b,T,\lambda_1\sim\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{Ac_1}{\pi\lambda^5 \left(\exp(c_2/(\lambda T)) - 1\right)} d\lambda \quad (12)$$

根据斯蒂芬-玻耳兹曼定律, 对光谱辐射强度在波长 $0 \sim \infty$ 范围内积分, 可以得到该微元在全波长范围内的积分辐射强度

值不变, 而不需要保证波长和温度均不变。

基于黑体积分辐射能量分布函数这一特点, 假设有两个面积相同的黑体, 黑体 1 的温度为 T , 黑体 2 的温度为 nT 。黑体 1 在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的积分辐射强度 $I_{b,T,\lambda_1\sim\lambda_2}$ 与黑体 2 在波长 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 范围内的积分辐射强度 $I_{b,nT,\lambda_3\sim\lambda_4}$ 之比可表示为

$$\begin{aligned} \frac{I_{b,T,\lambda_1\sim\lambda_2}}{I_{b,nT,\lambda_3\sim\lambda_4}} &= \frac{I_{b,T,0\sim\lambda_2} - I_{b,T,0\sim\lambda_1}}{I_{b,nT,0\sim\lambda_4} - I_{b,nT,0\sim\lambda_3}} \\ &= \frac{(F(\lambda_2 T) - F(\lambda_1 T))(A/\pi)\sigma T^4}{(F(\lambda_4 nT) - F(\lambda_3 nT))(A/\pi)\sigma(nT)^4} \end{aligned} \quad (15)$$

如果保证两个黑体的温度和对应的波长范围乘积相同, 即 $\lambda_1 T = \lambda_3 nT$ 、 $\lambda_2 T = \lambda_4 nT$, 则有

$$F(\lambda_1 T) = F(\lambda_3 nT) \quad (16)$$

$$F(\lambda_2 T) = F(\lambda_4 nT) \quad (17)$$

$$\lambda_1 = n\lambda_3 \quad (18)$$

$$\lambda_2 = n\lambda_4 \quad (19)$$

那么,式(15)可以变换为

$$\frac{I_{b,T,\lambda_1 \sim \lambda_2}}{I_{b,nT,\lambda_3 \sim \lambda_4}} = \frac{(F(\lambda_2 T) - F(\lambda_1 T))T^4}{(F(\lambda_4 nT) - F(\lambda_3 nT))(nT)^4} = \left(\frac{1}{n}\right)^4 \quad (20)$$

式(20)给出了波长和温度乘积保持不变时,黑体在不同波长范围内的积分辐射强度与波长、温度的关系。该关系表明,温度为 T 的黑体在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的积分辐射强度等于温度为 nT 的黑体在波长 $\lambda_1/n \sim \lambda_2/n$ 范围内的积分辐射强度的 $(1/n)^4$ 。该数学关系构成了黑体积分辐射强度天地一致性理论。基于该理论,可以通过测量地面高温环境下的黑体短波波段的积分辐射强度,推算出高空低温环境下的黑体长波波段的积分辐射强度。

3 理论自洽验证

积分辐射强度是在一定波长范围内对光谱辐

$$\begin{aligned} I_{b,T,\lambda_1 \sim \lambda_2} &= \left(\frac{1}{n}\right)^5 L_{b,nT,(\lambda_1+(1/2)\Delta\lambda)/n} \frac{\lambda_2/n - \lambda_1/n}{m} n + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)^5 L_{b,nT,(\lambda_1+((2m-1)/2)\Delta\lambda)/n} \frac{\lambda_2/n - \lambda_1/n}{m} n \\ &= \left(\frac{1}{n}\right)^4 L_{b,nT,\lambda_1/n+\Delta\lambda/(2n)} \frac{\lambda_2/n - \lambda_1/n}{m} + \dots + \left(\frac{1}{n}\right)^4 L_{b,nT,\lambda_1/n+((2m-1)/(2n))\Delta\lambda} \frac{\lambda_2/n - \lambda_1/n}{m} \\ &= \left(\frac{1}{n}\right)^4 I_{b,nT,\lambda_1/n \sim \lambda_2/n} \end{aligned} \quad (23)$$

上述理论自洽验证过程从积分辐射强度和光谱辐射强度的物理定义出发,通过引入黑体光谱辐射强度与温度、波长的数学关系,即式(11),数学推导出黑体积分辐射强度与温度、波长的数学关系,即式(20),从理论自洽角度验证了黑体辐射天地一致性理论的正确性。

4 结论

本文在数学上构建了黑体光谱辐射能量分布函数和黑体积分辐射能量分布函数,并将其引入黑体辐射天地一致性问题研究中,推导得出了黑体辐射强度与温度、波长的数学关系。在理论上,基于黑体辐射强度与温度、波长的数学关系,构建

射强度进行波长积分计算得到的。基于该定义,积分辐射强度和光谱辐射强度间的关系可以表示为

$$I_{b,T,\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{b,T,\lambda} d\lambda \quad (21)$$

对式(21)等号右边项进行离散,将波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围均匀离散为 m 个窄波段,分别计算每个窄波段内的积分辐射强度,并对 m 个窄波段内的积分辐射强度求和,式(21)可改写为

$$\begin{aligned} I_{b,T,\lambda_1 \sim \lambda_2} &= L_{b,T,\lambda_1+(1/2)\Delta\lambda} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{m} + \\ &L_{b,T,\lambda_1+(3/2)\Delta\lambda} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{m} + \dots + \\ &L_{b,T,\lambda_1+((2m-1)/2)\Delta\lambda} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{m} \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $\Delta\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1)/m$ 为离散的窄波段波长宽度。

式(11)给出了在波长和温度乘积保持不变时,黑体光谱辐射强度与波长、温度的关系。将式(11)带入式(22),将式(22)等号右边项中温度为 T 、波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的光谱辐射强度 $I_{b,T,\lambda_1 \sim \lambda_2}$,转换为温度为 nT 、波长 $\lambda_1/n \sim \lambda_2/n$ 范围内的光谱辐射强度 $I_{b,nT,\lambda_1/n \sim \lambda_2/n}$,可以得到

了黑体在高空和地面不同温度下的辐射强度一致性理论。在方法上,基于黑体辐射天地一致性理论,提出了地面静态模拟测量高空低温飞行器蒙皮辐射特性的试验方法。

本文通过引入光谱辐射能量分布函数和积分辐射能量分布函数,理论推导得出了黑体辐射能量与温度、波长的关系,并进行理论自洽验证。提出了在地面状态下测量高空飞行器低温蒙皮辐射特性的天地一致性理论,得到如下研究结论:

a) 温度为 T 的黑体在波长 λ 上的光谱辐射强度等于温度为 nT 的黑体在波长 λ/n 上的光谱辐射强度的 $(1/n)^5$;

b) 温度为 T 的黑体在波长 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的积分辐射强度等于温度为 nT 的黑体在波长

$\lambda_1/n \sim \lambda_2/n$ 范围内积分辐射强度的 $(1/n)^4$;

c) 基于黑体辐射天地一致性理论, 可以通过测量地面高温环境下黑体的短波辐射特性, 根据数学关系推算出高空低温环境下黑体的长波辐射特性。

参考文献

- [1] MAHULIKAR S P, SONAWANE H R, ARVIND RAO G. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2007, 43(7/8): 218-245.
- [2] MARTINEZ R. Modeling the infrared intensity of a large commercial aircraft[D]. Dayton: Air Force Institute of Technology, 2005.
- [3] COIRO E, CHATELARD C, DURAND G, et al. Experimental validation of an aircraft infrared
- [8] 刘芳, 王勇. 联合星座扩展的预留子载波 OFDM 信号峰均比抑制算法[J]. 通信学报, 2016, 37(3): 175-181.
- [9] LI H B, JIANG T, ZHOU Y. An improved tone reservation scheme with fast convergence for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(4): 902-906.
- [10] YU P Y, JIN S B. A low complexity tone reservation scheme based on time-domain kernel matrix for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(4): 710-716.
- [11] GUEL D, PALICOT J. FFT/IFFT pair based digital filtering for the transformation of adding signal PAPR reduction techniques in tone reservation techniques[C]// 2009 Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press,

signature code for commercial airliners[C]// 43rd AIAA Thermophysics Conference. Reston, USA: AIAA Press, 2012: 2012-3190.

- [4] LIU J, YUE H, LIN J X, et al. A simulation method of aircraft infrared signature measurement with subscale models[J]. Procedia Computer Science, 2019, 153: 2-16.
- [5] WANG H, LIU J, JI H H. Ground experimental simulation method of infrared radiation of high altitude aircraft's surface[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019, 233(8): 2980-2991.
- [6] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算-计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 11-12.
- [7] 张建奇. 红外物理[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013: 72-74.
- [12] JIANG T, NI C X, XU C, et al. Curve fitting based tone reservation method with low complexity for PAPR reduction in OFDM systems[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(5): 805-808.
- [13] 曾浩, 吉利霞, 李凤, 等. 16QAM-LFM 雷达通信一体化信号设计[J]. 通信学报, 2020, 41(3): 182-189.
- [14] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. OFDM 雷达通信一体化波形相参积累研究[J]. 信号处理, 2017, 33(3): 253-259.
- [15] SHI C G, WANG F, SALOUS S, et al. Joint subcarrier assignment and power allocation strategy for integrated radar and communications system based on power minimization[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11167-11179.
- [16] LIM D W, NOH H S, NO J S, et al. Near optimal PRT set selection algorithm for tone reservation in OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(3): 454-460.

(上接第 44 页)

(上接第 49 页)

- [13] ZHANG K, ZUO W M, ZHANG L. Deep plug-and-play super-resolution for arbitrary blur kernels [C]// 2019 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 2808-2817.
- [14] ZHANG K, ZUO W M, CHEN Y J, et al. Beyond a Gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(7): 3142-3155.

- [15] ZHANG K, GOOL L V, TIMOFTE R. Deep unfolding network for image super-resolution [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2020: 3217-3226.
- [16] CHENG K H, DU J, ZHOU H X, et al. Image super-resolution based on half quadratic splitting [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 105: 103193.
- [17] 苏颖. 基于卷积神经网络的光学遥感图像目标识别设计与实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.