

空间激光雷达最小接收光功率的计算

黄波, 邱琪

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

【摘要】采用信号检测的统计思想,在详细分析雷达接收机各种噪声大小与概率分布、计算空间背景光大小和光谱特性的前提下,基于信号检测理论中的虚警概率和发现概率提出了一种能直接计算非相干检测方式下所需最小光功率的方法。仿真结果表明,由该方法计算的最小光功率能够更好地优化激光雷达系统的性能。

关键词 激光雷达; 最小接收功率; 探测概率; 虚警概率

中图分类号 TN364+.2 文献标识码 A

A Calculation of Minimal Detectable Power of Laser Radar in Space

Huang Bo, Qiu Qi

(School of Communication and Information Engineering, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, the noise of receiver and its probability distribution are analysed, and the spectrum of outer space is calculated. Then, a new way to calculate minimal detectable power of laser radar is given, which is deduced on the base of signal detection and two statistic concepts: false alarm rates and detection probabilities. System simulation proves the minimal detectable power calculated by this method can optimize the laser radar system.

Key words laser radar; minimal detectable power; detection probabilities; false alarm rates

激光雷达接收机的最小可探测功率是光电系统总体设计的一个参数。对于不同的光电系统,要精确计算出最小可探测光功率较困难,通常是根据设计者的经验来确定它的数量级,或参考其他光电系统的探测功率,还没有文献对空间激光雷达的最小接收光功率进行详细的理论分析。为了得到准确的理论计算,本文对空间激光雷达的最小探测功率进行了深入地讨论。

1 原理

设接收机接收的信号为

$$\begin{cases} r_s(t) = s(t) + n_s(t) \\ r_o(t) = n_o(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $s(t)$ 为目标反射信号, $n_s(t)$ 和 $n_o(t)$ 分别为有目标和没目标时的随机噪声。设 $r_s(t)$ 的概率密度是 $f_s(r)$, $n_o(t)$ 的概率密度是 $j_o(r)$ 。如果接收信号 $r_s(t)$ 大于判决阈值 I_t , 则做出发现目标判断, 反之没有发现目标。根据信号检测理论, 雷达发现概率定义为接收到目标反射信号时^[1], 正确判断发现目标的概率

$$P_d = \int_{I_t}^{\infty} f_s(r) dr \quad (2)$$

雷达虚警概率定义为没有接收到目标回波时, 将噪声判断为目标的概率

收稿日期: 2002-09-20

基金项目: 信息产业部“十五”预研基金资助项目

作者简介: 黄波(1977-), 男, 硕士生, 主要从事激光雷达的研制方面的研究。

$$P_f = \int_{I_t}^{\infty} j_o(r) dr \quad (3)$$

在实际计算时,依据给定的 P_f 、 P_d 及信号和噪声的统计分布,能计算出最小可探测光功率。所以确定概率密度 $j_o(n)$ 、 $f_s(r)$ 以及噪声大小是计算最小可探测光功率的关键。

在外空间直接检测系统中,光接收机所接收到的光能包含两部分:信号光功率 W_s 和各种背景光 W_b 。探测器输出的总电流为

$$L_o = (W_s + W_b)RG + I_d \quad \text{有目标回波} \quad (4a)$$

$$I_n = W_bRG + I_d \quad \text{无目标回波} \quad (4b)$$

式中 R 为探测器电流响应度, \bar{G} 为探测器增益, I_d 为暗电流(暗电流中的漏电流是不被探测器放大的,而其余部分会被探测器放大。为了简单,将暗电流单纯地看成不被探测器放大的电流)。探测模块输出的噪声有:散粒噪声、热噪声、产生复合噪声、温度噪声和闪烁噪声(低频噪声)五种^[2],但占主导的是散粒噪声和热噪声。

散粒噪声和热噪声分别为

$$\overline{s_s^2} = 2e[(W_s + W_b)R + I_d]\Delta f \bar{G}^2 \quad (5)$$

$$\overline{s_r^2} = \frac{4KT\Delta f}{R_L} \quad (6)$$

式中 W_s 和 W_b 为回波信号功率和背景光功率; Δf 是等效噪声带宽; K 为玻尔兹曼常数; e 为单位电荷。从式(5)、(6)中可以看出这些噪声是与频率无关的白噪声,可以证明它是平稳的随机噪声。

“对应原理”指出^[3]:一个由大量子数描述的物理系统可以按经典理论处理,将其推广到激光雷达即接收大量光子的系统可以用微波雷达的统计方法来描述。工程上,“大量”是光子数必须大于 20 ^[3],所以在直接检测中,成量子状态的光子系统可以用经典的统计分布来描述。探测器某一时刻接收到的光子数服从泊松分布,但当光能很强,光子数较多时,根据中心极限定理,探测器输出电流噪声成高斯分布,得到下面结论:

1) 当存在目标信号时,输出光电流概率密度

$$f_s(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s_1}} \exp\left(-\frac{(I - I_0)^2}{2s_1^2}\right) \quad (7)$$

2) 没有目标回波信号时,输出噪声的概率密度

$$j_o(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s_2}} \exp\left(-\frac{I^2}{2s_2^2}\right) \quad (8)$$

式中 $\overline{s_1^2}$ 和 $\overline{s_2^2}$ 分别为有目标回波和没有目标回波信号时的噪声和噪声方差。

$$\overline{s_1^2} = \overline{s_s^2} + \overline{s_r^2} \quad (9)$$

$$\overline{s_2^2} = 2e[W_bR + I_d]\Delta f \bar{G}^2 + \overline{s_r^2} = \overline{s_1^2} - 2eW_sR\Delta f \bar{G}^2 \quad (10)$$

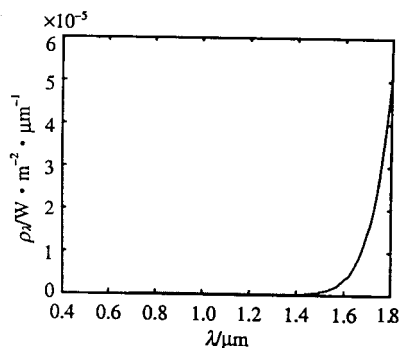


图1 地球 300 K 热辐射

2 大气外层的光谱特性

对于探测器接收到的背景光有五部分:太阳光、地球大气外层和月亮反射光、地球热辐射、目标反射光以及各种星体发射的光能。各种星体和地球外层空间3.5 K深空背景辐射,根据黑体辐射公式,其辐射波长为 $827.9 \mu\text{m}$,在所有光探测器响应之外,不予考虑。地球可以看成是300 K的黑体辐射,它的峰值辐射在 $10 \mu\text{m}$ 处,其在工作波长范围内的辐射如图1所示。图中当波长小于 $2 \mu\text{m}$ 时,地球辐射相对于太阳背景较小,可以不考虑^[3]。

激光雷达和光通信接收机很小的发射角都会限制背景光直接进入接

收机, 所以接收机上的接收天线会抑制掉天线处的背景光, 收到目标反射的背景光。来自太阳的光能有30%被大气外层直接反射回太空^[3-5], 其光谱特性与入射光谱特性近似, 剩余部分进入大气层后, 部分被大气散射、吸收和内部反射, 其余到达地面被地球吸收, 由于热平衡, 地球又将吸收的部分能量以长波长(10 μm左右)的方式辐射出去, 所以要考虑太阳的直接辐射和大气的反射^[6]。太阳近似为温度6 000 K的黑体, 其辐射遵从黑体辐射公式, 计算出的太阳辐射光谱如图2所示。若把太阳当成一个理想朗伯体, 根据太阳常数(日地平均距离处、垂至于太阳光线的单位面积上、单位时间内获得的太阳辐射能量。根据1981年世界气象组织推荐, 太阳常数取为1 370 W/m²)计算出日地平均距离处太阳辐射如图3所示。图中实线是测量值^[7], 长虚线是根据6 000 K黑体辐射的计算值, 短虚线是被大气反射的辐射(按照太阳辐射的30%倍计算所得), 可见测量值和计算值相差较小。所以雷达目标接收到的背景光是轨道处太阳辐射的1.3倍, 这些能量被目标反射进入雷达望远镜。

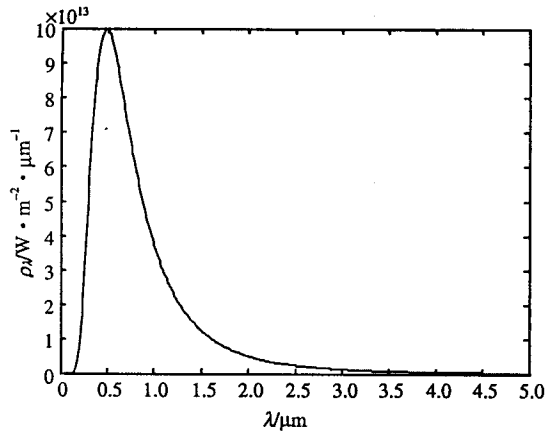


图2 太阳为6 000 K黑体辐射光谱

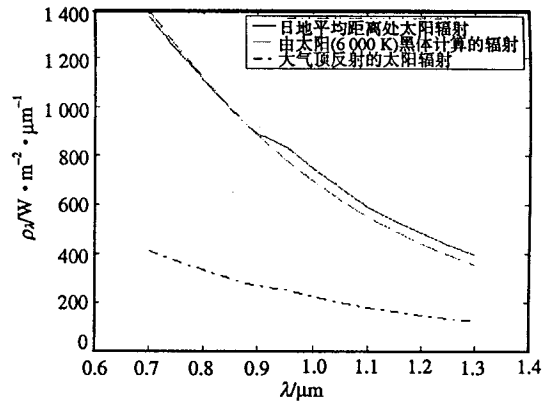


图3 日地平均距离处太阳光谱

有了背景光谱, 根据滤光片的带宽和接收望远镜有效面积可算出接收到的背景光大小, 再根据式(10)就可计算出背景光引起的噪声。在实际中空间激光雷达作用距离(10 km以上)较长, 接收机天线接收角较小及接收滤光片的作用, 接收到的目标背景光同距离平方成反比, 这部分可以忽略。

3 最小接收光功率的计算

对于激光雷达, 根据式(2)和式(7)有

$$P_d = \frac{1}{s_1 \sqrt{2\pi}} \int_{I_t}^{\infty} \exp\left(-\frac{(I - I_0)^2}{2s_1^2}\right) dI = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{I_t - I_0}{\sqrt{2}s_1}\right) \quad (11)$$

式中 根据 P_d 的值查表或用数学工具得到 $(I_t - I_0)/\sqrt{2}s_1$ 的值为 a , I_t 是判决阈值。

$$\frac{I_t - I_0}{\sqrt{2}s_1} = a, \text{ 使 } \operatorname{erfc}(a) = 2P_d \quad (12)$$

同理可以得到

$$(I_t - I_n)/\sqrt{2}s_2 = b, \text{ 使得 } \operatorname{erfc}(b) = 2P_f \quad (13)$$

由式(12)

$$I_t = \sqrt{2}as_1 + I_0 \quad (14)$$

由式(13)

$$I_t = \sqrt{2}bs_2 + I_n \quad (15)$$

因为 P_d 是所要求的最小值, P_f 是所要求的最大值, 所以有

$$\sqrt{2}bs_2 + I_n \leq I_t \leq \sqrt{2}as_1 + I_0 \quad (16)$$

即

$$\sqrt{2bs_2} + I_n \quad \sqrt{2as_1} + I_0 \quad (17)$$

根据式(4)~(6)、(9)、(10)，整理式(17)，得到

$$I_s^2 - (2\sqrt{2bs_2} + 4a^2e\Delta f\bar{G})I_s + 2(b^2 - a^2)s_2^2 = 0 \quad (18)$$

式中 $I_s = W_s R \bar{G}$ ，所以最小可探测光功率

$$W_s = \frac{2\sqrt{2bs_2} + 4a^2e\Delta f\bar{G} + \sqrt{(2\sqrt{2bs_2} + 4a^2e\Delta f\bar{G})^2 - 8(b^2 - a^2)s_2^2}}{2R\bar{G}} \quad (19)$$

式中 根号下的 $4a^2e\Delta f\bar{G}$ 和噪声相比很小，可以忽略，式(19)可以简化为

$$W_s = \frac{2\sqrt{2(a+b)s_2} + 4a^2e\Delta f\bar{G}}{2R\bar{G}} \quad (20)$$

4 结论分析

雷达的性能确定后， P_d 和 P_f 均可确定，根据式(12)、(13)可以计算出 a 和 b 的值。如果接收机 Δf 和 \bar{G} 一定，由式(10)可知 s_2 仅和暗电流、背景大小和热噪声有关，最小可探测光功率由雷达性能和系统噪声决定。最小发射功率和噪声标准偏差关系如图4所示，图中 P_d 和 P_f 分别为99.9%和0.000 1， Δf 和 \bar{G} 分别取10 kHz和50，噪声和最小可探测功率成正比关系。利用式(20)求出最小可探测光功率，从而算出发射功率，最后根据实际需要来决定采用LD、DPL光源或别的激光器，这对系统的光束准直、调制、工作方式和接收数据的处理起决定作用。

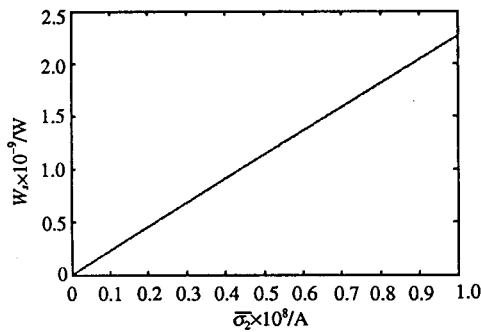


图4 最小发射功率和噪声标准偏差关系

参 考 文 献

- [1] 向敬成, 王意青, 毛自灿. 信号检测与估计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990
- [2] 吴 杰. 光电信号检测[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1992
- [3] Jelalian A V. Laser radar system[M]. USA: Artech House, 1992
- [4] J.M.华莱士著. 大气科学概观[M]. 王鹏飞译. 上海: 上海科学技术出版社, 1977
- [5] 钱 骥. 空间技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 1986
- [6] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [7] 焦世举. 航天光学遥感辐射度学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1994

编辑 漆 蓉