

激光雷达系统的数值仿真

易翔 王蔚然*

(电子科技大学电子工程学院, 成都 610054)

摘要 为了对成像激光雷达系统进行性能分析,建立了成像激光雷达系统的数值仿真模型. 模型以激光雷达原理为基础,考虑了激光雷达距离方程、噪声模型、接收信噪比、成像模型等模块,寻找不同环境与各模型参数的对应关系,以此预测环境对激光雷达系统性能的影响. 根据模型,编制计算机仿真软件进行雷达系统模拟,结果表明,数值仿真有助于实验系统的方案设计和性能改进.

关键词 激光雷达; 系统仿真; 成像雷达

中图分类号 TN958.98; TN249

文献标识码 A

0 引言

近年来,国外对激光雷达不同应用背景下的计算机模拟进行了研究. 德国开发了大气激光雷达端到端的仿真工具^[1],该工具包括信号在大气中的传输和散射,低信噪比方式下的前端外差模型及信号处理和频率估计单元. 1999年美国海军研究实验室和 Planning Systems 公司共同开发了用以比较不同激光雷达系统的模型^[2],该模型主要研究海表面变化对激光雷达成像的影响.

然而,国内对激光雷达系统仿真研究起步较晚. 因此,本文针对激光雷达系统的性能分析,研究了激光雷达系统的数学模型,在此基础上寻求各种环境、系统条件与激光雷达系统性能的关系. 此外,还对激光雷达成像系统进行模拟,用调制传递函数描述和评价激光雷达成像质量.

1 激光雷达数学模型

1.1 激光雷达基本原理

激光雷达的基本原理是:发射机发射一束一定功率的激光束,经过大气传输辐射到目标面上,目标面反射回来的回波由接收机接收,再由信号处理提取回波中的有用信息. 激光雷达系统性能分析的基本问题是:在一定的发射功率下,受环境因素、系统参数的影响,确定接收端的接收功率、信噪比.

制约激光雷达性能的约束条件主要有:1)激光器的输出功率;2)工作波长和带宽;3)目标特性;4)大气传输条件;5)接收机灵敏度;6)探测器指标;7)距离;8)噪声等.

1.2 经典的激光雷达距离方程

经典的激光雷达距离方程通用形式^[3]为

$$P_r = \frac{4P_s T_{A1} \eta_t \Gamma}{\pi \theta_T^2 R_1^2} \frac{T_{A2}}{4\pi R_2^2} \frac{\pi D^2 \eta_r}{4} \quad (1)$$

式中 P_r 为回波信号功率, P_s 为激光器发射功率, T_{A1} 是源到目标的大气传输系数, η_t 为发射光学设备效率, θ_T 为束散角, R_1 是发射机到目标的距离, Γ 为目标激光截面, T_{A2} 为目标到接收机的大气传输系数, R_2 是目标到接收机的距离, D 为接收孔径, η_r 为接收光学设备效率.

1.3 噪声模型

在激光雷达仿真模型中主要考虑了两类噪声: 1)探测器噪声; 2)背景噪声. 噪声模型的构成框架见图1.

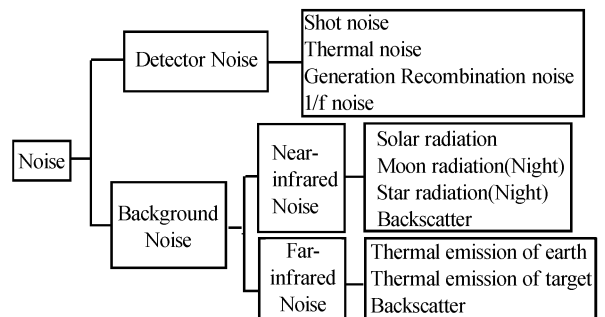


图1 噪声模型构成框架图

Fig. 1 Sketch of noise model

1.4 激光雷达信噪比分析

激光雷达经探测器输出后的信噪比定义为:信号的峰值功率与噪声功率的均方根之比^[3,4]. 相干探测方式的激光雷达系统,信噪比为

$$SNR = P_{sig} \eta_{HQ} \lambda / hc B_w \quad (2)$$

式中 η_{HQ} 为相干量子效率, B_w 为有效接收器带宽, h 为普朗克常数, c 为光速. 对于直接探测激光雷达系统的噪声等效功率 NEP (Noise Equivalent Power) 可以由下式计算

$$NEP = \frac{[(I_{BK}^2 + I_{DN}^2) M^2 F + I_{PN}^2]^{1/2}}{R_D M T_0 \eta_e} \quad (3)$$

式中 I_{BK}^2 为背景噪声电流均方值, I_{DN}^2 为探测器噪声电流均方值, I_{PN}^2 为前放噪声电流均方值, M 为探测器

*通信联系人 Tel: 028-83203717

Email: easyyx@163.com

收稿日期: 2003-01-27

的增益, F 是过剩噪声系数, R_D 是探测器的电流响应率, T_0 接收光学效率, η_e 信号处理效率因子. 由 NEP 可得到直接探测系统的信噪比为

$$\text{SNR} = P_{\text{sig}} / \text{NEP} \quad (4)$$

2 激光雷达成像模型

激光成像系统的物象空间分布用频率描述, 使激光成像系统能够与通信系统一样, 看成是一种信息传递系统. 我们用调制传递函数 MTF (Modulation Transfer Function) 描述和评价激光雷达成像质量.

从整体考虑, 调制传递函数 MTF 可以表达为

$$\text{MTF}_{\text{Total}} = \text{MTF}_{\text{Environment}} \times \text{MTF}_{\text{System}} \quad (5)$$

由于大气的抖动, 使线象无规则的抖动, 用高斯函数描述线扩散函数^[5], 即

$$h(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (6)$$

式中 σ 为抖动幅度的均方根. 对 $h(x)$ 作付氏变换得到大气抖动的传递函数为

$$\text{MTF}(f) = \exp(-2\pi^2\sigma^2f^2) \quad (7)$$

式中 f 为实际空间线频.

大气气溶胶分子的散射和吸收限制激光雷达成像质量^[6,7], 用 MTF 描述大气对成像的影响

$$\text{MTF}(V_r) = \begin{cases} \exp[-\sigma_{\text{sca}}R(V_r/V_c)^2] \cdot \exp[k(V_r)(-\sigma_{\text{abs}})] & V_r < V_c \\ \exp(-\sigma_{\text{sca}}R) \cdot \exp[k(V_r)(-\sigma_{\text{abs}})] & V_r > V_c \end{cases} \quad (8)$$

系数 $k(V_r)$ 由下式给出

$$k(V_r) = \begin{cases} \exp\{-\sigma_{\text{sca}}R[1-(V/V_r)^2]\} & V_r < V_c \\ 1 & V_r > V_c \end{cases} \quad (9)$$

式中 V_r 为空间角频率, R 是路径长度, V_c 为截止空间角频率, $V_c = a/\lambda$, a 为气溶胶半径. σ_{sca} 是散射系数, σ_{abs} 为吸收系数.

湍流会使图像变模糊, 湍流的调制传递函数为

$$\text{MTF}(V_r) = \exp(-5.47V_r^{5/3}C_n^2\lambda^{-1/3}R) \quad (10)$$

式中折射率结构常数 C_n^2 表征湍流强度.

3 数值仿真结果

根据激光雷达系统模型建立的仿真软件, 采用模块化构架, 分为: 大气传输模型、成像模型、噪声模型、发射与接收模型和目标反射数据库.

所用参数: Nd: YAG 激光器, 波长为 $1.543 \mu\text{m}$, 发射能量 15 mJ , 脉宽 6.5 ns ; 探测器型号为 EG&G C30662, 响应率为 9.3 A/W , NEP 是 $1.3 \times 10^{-13} \text{ W}/\sqrt{\text{HZ}}$, 带宽为 $0.06 \mu\text{m}$; 发射和接收天线的透过率为 0.9 , 接收光学效率为 0.5 , 接收方式为直接探测; 目标为

绿褐色涂层, 目标涂层反射率为 0.1 ; 激光雷达工作在多云天气状况下. 图 2 反映了不同距离下, 激光雷达系统的性能与天气的关系. 模拟结果显示天气情况直接影响激光雷达的大气传输透射率, 从而制约系统最大作用距离.

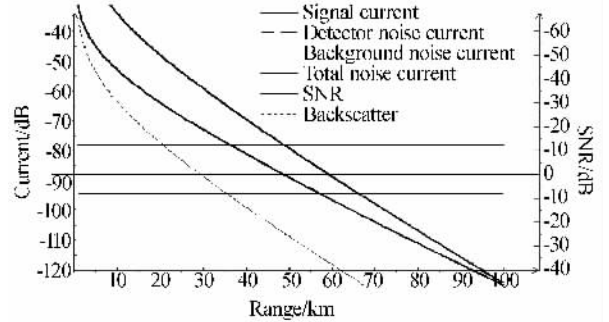


图 2 $1.543 \mu\text{m}$ 直接探测系统在多云天气下性能图
Fig. 2 Performance of $1.543 \mu\text{m}$ direct detection system under cloudy weather

考虑 $10.6 \mu\text{m}$ 成像激光雷达在这样的大气传输情况下成像: $\sigma_{\text{sca}} = 0.65 \text{ km}^{-1}$, $\sigma_{\text{abs}} = 0.7 \text{ km}^{-1}$, 多数气溶胶分子半径为 $51 \mu\text{m}$, 作用距离为 $R = 2 \text{ km}$. 图 3 为二维归一化大气调制传递函数 MTF 的模拟结果, 它反映了大气对成像的影响. 图中可得到截止空间角频率为 5 cycles/radian , 激光雷达成像质量受大气调制传递函数及截止空间角频率限制.

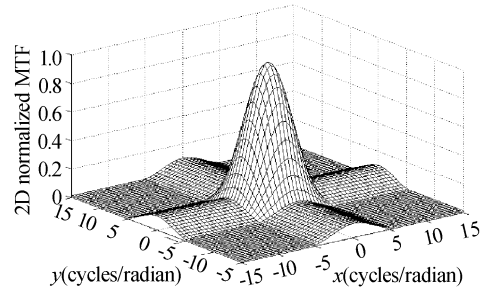


图 3 $10.6 \mu\text{m}$ 激光雷达成像的气溶胶 MTF

假设如下成像条件: $10.6 \mu\text{m}$ 波长的 CO_2 激光雷达作用距离 2 km , 中等湍流强度 $5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, 对图

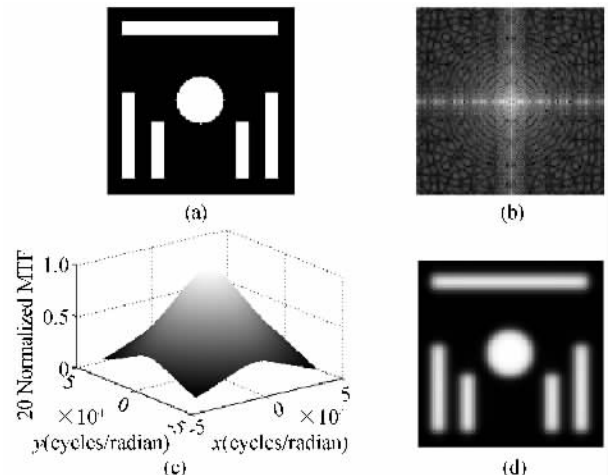


图 4 湍流对 $10.6 \mu\text{m}$ 激光雷达成像的影响
Fig. 4 Effects of turbulence on image quality of $10.6 \mu\text{m}$ imaging Lidar

4(a)的平面漫散射目标成像,目标上的光斑尺寸为0.3 m,不考虑系统的调制传递函数.图4(b)为目标图像的傅里叶频谱图,湍流的MTF见图4(c),图4(d)是激光雷达在该条件下成像的模拟结果.

从结果可以看出,湍流的截止空间角频率较气溶胶的截止频率高(见图4(c)、图3),湍流对成像的模糊主要在图像的高频部分,湍流对低于截止空间角频率的频率成分的影响可以忽略.湍流的折射率结构常数 C_n^2 越大,其MTF截止频率就越低,对激光雷达成像的模糊影响就越大.

4 结束语

运用计算机仿真技术对激光雷达系统进行研究,是一种经济有效的方法,是未来激光雷达系统设计的新手段.本文针对不同波长、不同环境状况、不同应用背景,研究了环境和系统参数对激光雷达系统性能和成像质量的影响,通过系统的数值仿真,能够准确评价和预测激光雷达在各种天气及系统条件下的性能,可以方便地估计和模拟出激光雷达的关键特征数据(如回波功率、接收信噪比等),有助于实验系统的方案设计和性能改进.下一步还应进一步完善激光雷达系统模型;针对激光雷达不同应用

背景,研究新的信息处理方法等.

参考文献

- 1 Streicher J, Leike I, Werner C. ALIENS: Atmospheric Lidar end-to-end simulator. *SPIE*, 1998, **3585**: 380 ~ 386
- 2 McBride W E, Weidemann A D, Shoemaker J D. Meeting navy needs with the generic lidar model. *Proc of SPIE*, 1999, **3761**: 71 ~ 81
- 3 Kamerman G W. Laser Radar. Chapter 1 of Active Electro-Optical System, Vol. 6, The Infrared and Electro-Optical System Handbook, SPIE Press, 1993. 10 ~ 99
- 4 Cassady P, Murata R. Laser Radar Technology for Airborne Theater Missile Defense. *Proc of SPIE*, 1995, **2472**: 50 ~ 61
- 5 庄松林,钱振邦.光学传递函数.北京:机械工业出版社,1981. 309 ~ 349
- 6 Zhuang S L, Qian Z B. Optical transfer function. Beijing: China Machine Press, 1981. 309 ~ 349
- 6 Sadot D, Kopeika N S. Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of aerosol modulation transfer function. *J Opt Soc Am*, 1993, **10** (1): 172 ~ 179
- 7 Sadot D, Kopeika N S. Effects of absorption on image quality through a particulate medium. *Applied Optical*, 1994, **33**(30): 7107 ~ 7111

Numerical Simulation for Lidar System

Yi Xiang, Wang Weiran

College of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054

Received date: 2003-01-27

Abstract In order to analyze the performance of the imaging lidar system, the numerical simulation model for imaging laser radar is presented. This model is based on the laser radar principles, and it concerns lidar range equation, noise model, SNR (Signal-to-Noise Ratio), imaging model, etc. It aims to find out the correlation between the various outside conditions and the model parameters, and thus to predicate how the outside conditions affect the performance of the Lidar system. With this model, a simulation software is built to operate the simulation of lidar system. Results show that numerical simulation can help scheme designing and performance improving of the lidar system.

Keywords Lidar; System simulation; Imaging radar



Yi Xiang was born in 1975, in Sichuan Province, China. He received B. E. degree in electronic engineering from Tianjin University in 1998. Now, he is pursuing the Ph. D. degree in University of Electronic Science and Technology of China. His research interests include lidar simulation, information processing, digital image processing, digital watermarking and other related areas.