

## 基于匹配滤波技术的特征信号提取的仿真和实现\*

李洋,刘元廷,任萍,张建秋,汤永新  
(安徽理工大学 理学院,安徽 淮南 232001)

摘要:激光测高仪的回波信号中包含目标物的粗糙度、倾斜度、反射率等信息,对于复杂地物特征的回波信号,采用多通道匹配滤波技术不仅可以获得高的信噪比,还可以保证信号的保真度。

关键词:激光测高仪;匹配滤波;SIMULINK;仿真

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1674-7720(2012)02-0056-04

### Simulation and realization of the fidelity of the signal of laser altimeter based on matched filter

Li Yang, Liu Yuanting, Ren Ping, Zhang Jianqiu, Tang Yongxin  
(College of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The laser altimeter contains the information of target such as harshness, gradient, reflectivity and etc. The multichannel matching filter technique is used to automatically acquire best signal-to-noise ratio from different targets and to ensure the exactitude of the signal.

Key words: laser altimeter; matched filter; SIMULINK; simulation

对于激光测高系统中的回波信号,我们关心它出现的时刻与波形。因此需要设计一种“最佳检测器”来协助增强信号抗噪声的能力,保证在判别信号出现时具有最低的错误概率。为此需要寻求这样一种滤波器,它使有用信号  $s(t)$  增强,同时对噪声  $n(t)$  具有抑制作用。当信号与噪声同时进入滤波器时,它使信号成分在某一瞬时出现峰值,而噪声成分受到抑制。这种装置能以最低的错误概率判断脉冲  $s(t)$  的有无,能完成此功能的滤波器称为“匹配滤波器”,所谓匹配是指滤波器的性能与信号  $s(t)$  的特性取得某种一致,使滤波器输出端的信号瞬时功率与噪声平均功率之比最大。

#### 1 激光测高仪回波信号的接收原理

激光测高仪的工作原理是安装在飞行平台上的激光器以固定频率向探测空间发射激光脉冲,激光光束穿越大气或真空后经目标散射产生后向散射回波被测高仪所接收,通过分析该脉冲回波的时间间隔,可以计算出测高仪与探测目标之间的距离<sup>[1]</sup>。激光测高仪的回波信号接收原理图如图1所示<sup>[2-3]</sup>。

对于激光测高仪系统,准确地测出被测物体的距离

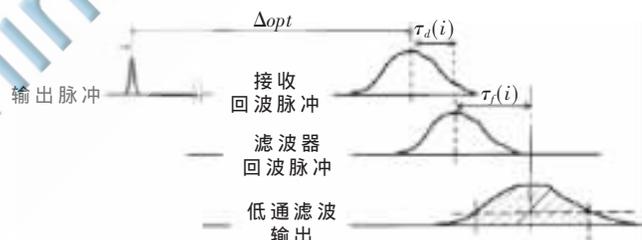


图1 激光测高仪的回波信号接收原理图

仅仅是前提,远不能满足要求。期望获得的是回波信号所包含的被测物体的更多特征信息,如被测表面的粗糙度、表面倾斜度和反射率等,并通过处理和分析这些数据获得更多、更有用的信息。采用匹配滤波器不仅可以准确测出回波时间,还可以在滤除噪声的前提下对信号有高质量的保真。

#### 2 匹配滤波器的设计理论<sup>[4-5]</sup>

设匹配滤波器的输入信号为  $s(t)+n(t)$ , 其中  $s(t)$  是有用信号脉冲,  $n(t)$  是噪声; 滤波器的输出信号为  $s_o(t)+n_o(t)$ , 其中  $s_o(t)$  是有用信号分量,  $n_o(t)$  是噪声分量。如图2所示。

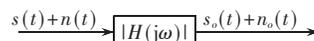


图2 信号与噪声通过滤波器

\* 基金项目:2010年安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2010B320)

# 技术与方法 Technique and Method

设滤波器的转移函数为  $H(j\omega)$ , 希望在某一时刻  $t = t_m$  (进行判决) 使信噪比最大, 取  $s_o^2(t_m)$  与  $n_o^2(t_m)$  之比以  $\rho$  表示:

$$\rho = \frac{s_o^2(t_m)}{n_o^2(t_m)} \quad (1)$$

若  $s(t)$  的傅里叶变换  $S(j\omega) = F[s(t)]$ , 则  $s_o(t)$  可由下式给出:

$$s_o(t) = F^{-1}[S(j\omega)H(j\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega)S(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

在  $t = t_m$  时刻:

$$s_o(t_m) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega)S(j\omega)e^{j\omega t_m} d\omega \quad (3)$$

若  $n(t)$  为白噪声, 其功率谱为常数  $N$ , 输出噪声  $n_o(t)$  的功率谱为  $|H(j\omega)|^2 \times N$ , 由此求出  $n_o^2(t)$ :

$$\overline{n_o^2(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} N|H(j\omega)|^2 d\omega \quad (4)$$

联立式(1)、式(2)、式(3)可求出:

$$\rho = \frac{s_o^2(t_m)}{n_o^2(t_m)} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega)S(j\omega)e^{j\omega t_m} d\omega \right|^2}{2\pi N \int_{-\infty}^{+\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega} \quad (5)$$

由柯西-施瓦茨不等式可以给出:

$$\left| \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega)S(j\omega)e^{j\omega t_m} d\omega \right|^2 \leq \int_{-\infty}^{+\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega \int_{-\infty}^{+\infty} |S(j\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

式(6)中等号仅在满足以下条件时成立:

$$H(j\omega) = k[S(j\omega)e^{j\omega t_m}]^* \quad (7)$$

式中  $k$  为任意常数。将式(5)代入式(4)得:

$$\rho = \frac{s_o^2(t_m)}{n_o^2(t_m)} \leq \frac{1}{2N\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(j\omega)|^2 d\omega \quad (8)$$

滤波器输出端信噪比的最大值为:

$$\rho = \frac{s_o^2(t_m)}{n_o^2(t_m)} \Big|_{\max} = \frac{1}{2N\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |S(j\omega)|^2 d\omega \quad (9)$$

可得滤波器的冲击响应  $h(t)$  为:

$$h(t) = F^{-1}[H(j\omega)] = F^{-1}[kS(-j\omega)e^{-j\omega t_m}] \quad (10)$$

注意到  $S(-j\omega)$  的傅里叶变换是  $s(-t)$ , 而  $e^{-j\omega t_m}$  表示  $t_m$

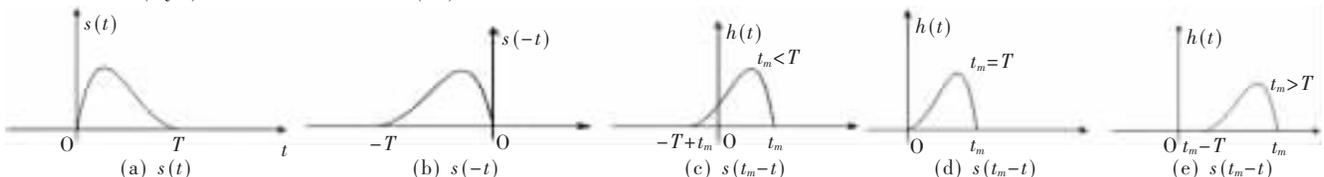


图3 匹配滤波器信号波形

的时移, 因此:

$$h(t) = ks(t_m - t) \quad (11)$$

匹配滤波器的波形基本是已知的, 且有用信号  $s(t)$  的持续时间是有限的。设  $s(t)$  在区间  $(0, T)$  之外为零, 如图3(a)所示。  $s(t_m - t)$  可由  $s(t)$  沿垂直轴反褶并向右平移  $t_m$  得到, 图3(b)~图3(e)分别示出了  $s(-t)$  以及  $s(t_m - t)$  的三种情况, 即  $t_m < T$ ,  $t_m = T$  和  $t_m > T$ 。注意到图3(c)的波形具有非因果特性, 为使匹配滤波器可以物理实现, 应舍弃, 取图3(d)或图3(e)的波形。希望观察时间  $t_m$  尽可能小, 因而取  $t_m = T$  比  $t_m > T$  更合适, 按要求改写式(11), 并使系数  $k=1$ , 有:

$$h(t) = s(T - t) \quad (12)$$

至此得出结论: 匹配滤波器的冲击响应是所需信号  $s(t)$  对垂直镜像并向右平移  $T$ 。这样的线性系统称为匹配滤波器或匹配接受器。从改善系统输出端信噪比的角度考虑, 匹配滤波器是线性系统的最佳滤波器。

### 3 SIMULINK 仿真

当发射脉冲信号为高斯信号时, 匹配滤波器采用具有恒定的群延时优点的贝塞尔滤波器, 它给出了匹配滤波器的理论和设计方法<sup>[6-8]</sup>。匹配滤波器的截止频率是由滤波信号的半高宽度确定的, 但是由于目标地面的特征以及大气传输等因素的影响, 激光测高系统的回波信号半高宽度  $\tau$  是一个变量。对于固定结构的匹配滤波器,  $\tau$  的变化会使信号与滤波器不匹配, 则输出信噪比会减小, 影响回波探测。为解决这一问题, 系统采用多通道接收, 在一定程度上提高了滤波器的信噪比。图4所示为四通道匹配滤波器。



图4 四通道匹配滤波器

在大量观测回波信号的基础上, 可由回波信号的统计特性确定各通道滤波器的指标。由于系统的发射脉冲特性与美国航天飞机激光测高仪(Shuttle Laser Altimeter-02)的发射信号特性相同, 参考该激光测高仪各通道滤波器的指标, 给出系统中各通道滤波器的指标如表1所示<sup>[2,6]</sup>。

SIMULINK 为用户提供了方框图建模的图形接口, 并提供了功能丰富的模型(Block)库, 使用时只需从各

# 技术与方法 Technique and Method

表 1 各通道滤波器指标

通道	半高宽度/ns	均值宽度/ns	截止频率/MHz	噪声带宽/MHz
1	20	8.49	15.6	16.6
2	60	25.5	5.22	5.54
3	180	76.4	1.75	1.85
4	540	229	0.580	0.615

子库中取出模型,定义好模型参数,将各模型连接起来,然后设置系统参数(如仿真时间、仿真步长、计算方法等),之后运行即可。在 MATLAB SIMULINK 中贝塞尔匹配滤波器仿真的结构图如图 5 所示。

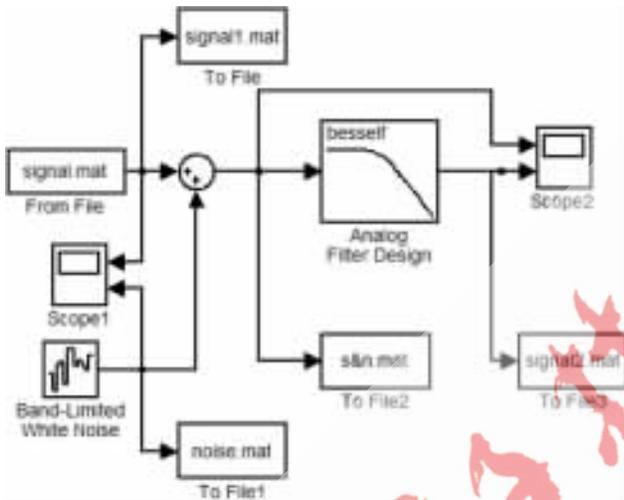


图 5 贝塞尔匹配滤波器的结构图

图 5 中:

(1) signal.mat 为要输入的有用信号,其具体数值在

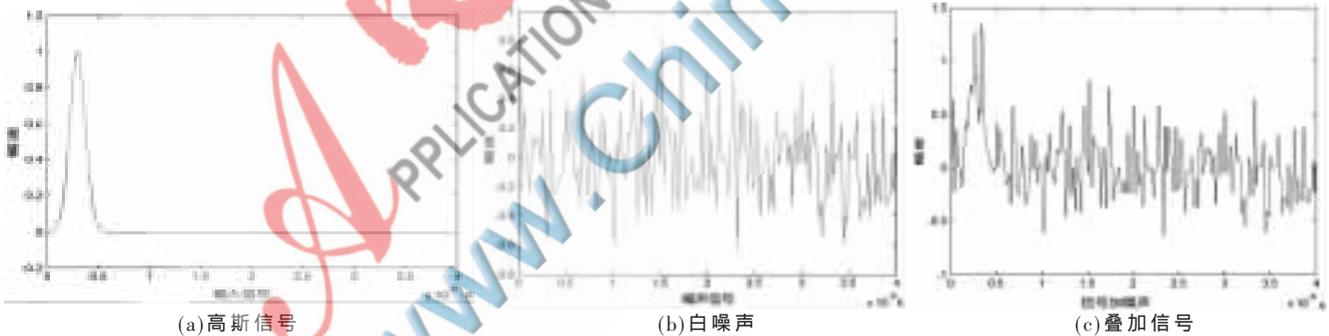


图 6 叠加白噪声的高斯输入信号

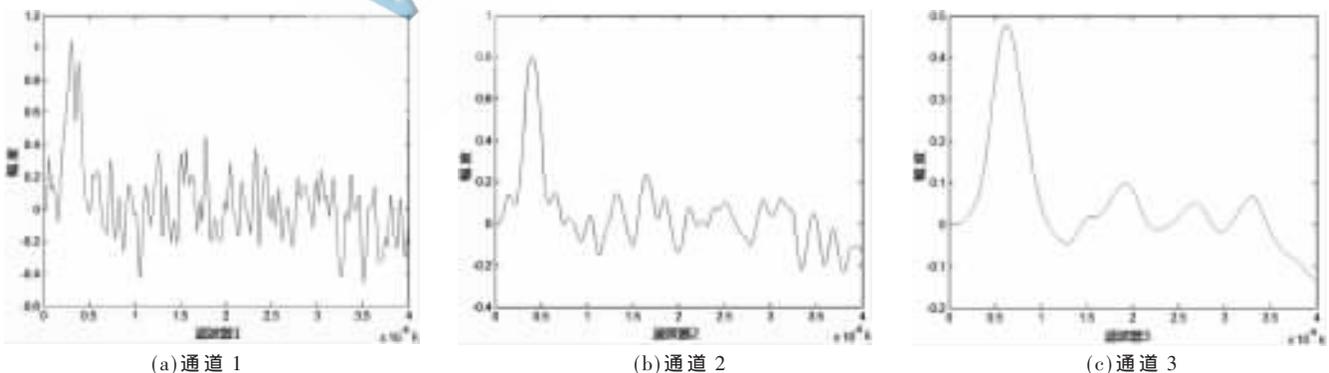


图 7 三通道匹配滤波器仿真结果

workspace 中编辑,在本例中,信号为高斯信号,其半高宽度为 76.4 ns,数学表达式为:  $f(x) = e^{-\frac{(x-1 \times 10^{-7})^2}{2 \times (76.4 \times 10^{-9})^2}}$ 。

(2) Band-Limited White Noise 为白噪声,由 SIMULINK 工具箱提供。

(3) 由 MATLAB 工具箱 Signal Processing Blockset 提供的 Analog Filter Design 为贝塞尔低通滤波器,它有两个参数,阶数  $n$  和截止频率  $\omega$ 。

(4) Scope1 和 Scope2 为示波器,设置其分别可同时显示两个波形,Scope1 分别显示的是有用信号 signal 和白噪声 noise 的波形。Scope2 分别显示的是信号与噪声的叠加 s&n 和信号与噪声叠加后通过滤波器滤波后 signal2 的波形。

(5) 4 个 To File 是将波形按一定间隔离散取值,取值的最大个数可以设置,最后将取得的数据以 M 文件的形式保存在 MATLAB 中,以便以后使用。其中 signal1 存放的是有用信号,noise 存放的是噪声,s&n 存放的是有用信号和噪声的叠加信号,signal2 存放的是滤波后的信号。

选择输入的有用信号:  $f(x) = e^{-\frac{(x-1 \times 10^{-7})^2}{2 \times (76.4 \times 10^{-9})^2}}$ ,其半高宽度与通道 3 的滤波器相同。波形如图 6(a) 所示,在信号中添加的噪声信号为白噪声,由 SIMULINK 库中 sources 提供,图 6(b) 所示为噪声信号的波形,将有效信号与白噪声叠加,得到的波形如图 6(c) 所示。

将上述叠加的信号分别通过表 1 中的 4 个通道得到滤波后的波形图,分别如图 7(a)~图 7(c) 所示(此处给出其中三个通道的波形)。

## 技术与方法 Technique and Method

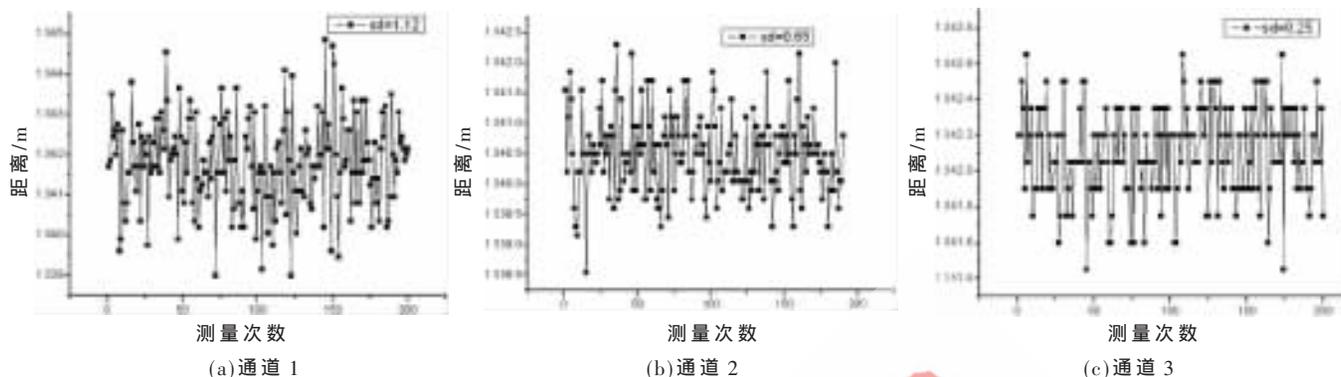


图8 不同滤波通道的测高仪回波信号

由图7可以看出:滤波通道1和通道2滤波器滤出的波形幅度虽然比较大,但信噪比很小,分别为5.8和7.3;而通道3滤波器滤出的波形信噪比为25且波形展宽小,波形保真好。

## 4 实验与结论

根据需求,激光测高仪要求在500 km的卫星轨道高度进行对地测量时,测距精度达到 $\pm 1$  m。因为实验条件的限制,采用消光法模拟500 km的测程,目标物为1.3 km外的靶场,在靶场室内放置一块 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的漫反射板,漫反射板距离墙壁3.9 m。图8(a)~图8(c)给出了测高信号分别通过通道1、道2、通道3的回波的信号值。

从实验结果可以看出,信号通过第三通道时信号的标准偏差最小( $sd=0.25$ ),仿真的结果可以看出对于回波信号的半高宽度为76.4 ns时,匹配滤波通道3输出的信号满足较高的信噪比,并且保证了信号波形的保真度,实现了最佳检测。对于不同的地物特征的回波信号的半高宽度是不一样的,因此,对于激光测高仪来说,采用多通道匹配滤波器可以提取复杂地物特征的回波波形。

## 参考文献

- [1] BUFTON J L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(3): 463-

477.

- [2] ABSHIRE J B, Sun Xiaoli, Afzal R S. Mars orbiter laser altimeter: receiver model and performance analysis[J]. Applied Optics, 2000, 39(15): 2449-2460.
- [3] PASI P. Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time-of-flight laser ranging[M]. Oulu University Press, 2003: 1-56.
- [4] 郑君礼, 杨为理, 应启珩. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
- [5] 韩利竹, 王华. MATLAB 电子仿真与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 187-266.
- [6] 李洋, 汤永新, 任萍. 基于匹配滤波技术的激光测高仪电子学系统的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2010, 36(6): 91-94.
- [7] 李洋, 戚俊, 赵欣, 等. 激光测高仪中匹配滤波器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(4): 29-33.
- [8] 孙翠娟, 杨卫平, 沈振康, 等. 一种基于匹配滤波的红外小目标检测系统[J]. 激光与红外, 2006(2): 33-37.

(收稿日期: 2011-05-16)

## 作者简介:

李洋, 男, 1980年生, 讲师, 硕士研究生, 主要研究方向: 光电子技术。