

基于远程脉冲激光外差探测的匹配滤波过程研究

吴世松^{1,2}, 张合勇¹, 王挺峰^{1,2}, 郭劲^{1,2}, 晏春回^{1,2}, 吕韬^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 以远程脉冲激光外差探测系统为模型, 推导了系统的信号与噪声的表达式, 给出了脉冲激光外差探测系统匹配滤波算法流程, 对匹配滤波技术在中程导弹与国际空间站目标探测中的详细应用过程进行了仿真, 分析了目标距离、散射截面面积、数字采样率对探测能力的影响。仿真结果表明: 在 100 MHz 采样率的数字处理能力下, 分别用蒙特卡罗法仿真了 500 次匹配滤波过程, 对于散射截面面积为 5 m²、距离为 100 km 的中程导弹, 回波信号载噪比为 3.29 dB, 匹配滤波后信号载噪比为 25.13 dB, 信号强度增强了 152 倍, 距离精度为 27 m, 速度精度为 0.17 m/s; 对于散射截面面积为 100 m²、距离为 500 km 的国际空间站, 回波信号载噪比为 -6.12 dB, 匹配滤波后信号载噪比为 18.49 dB, 信号强度增强了 289 倍, 距离精度为 117 m, 速度精度为 2.1 m/s。目标距离越小, 散射截面面积越大, 数字采样率越高, 匹配滤波提取增强信号的能力越强。

关键词 遥感; 脉冲激光; 外差探测; 匹配滤波; 蒙特卡罗; 载噪比

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0128003

Study on Matched Filtering Process Based on Long-Range Pulsed Laser Heterodyne Detection

Wu Shisong^{1,2}, Zhang Heyong¹, Wang Tingfeng^{1,2}, Guo Jin^{1,2},
Yan Chunhui^{1,2}, Lü Tao^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the long-range pulsed laser heterodyne detection system, the expression of signal and noise of the system is deduced. The matched filtering algorithm processing of the pulsed laser heterodyne detection system is given. The detailed application process of matched filtering technique in target detection of medium-range missiles and international space station is simulated. The influence of the target range, the scattering cross section area and the digital sampling rate on the detection capability is analyzed. The simulation results show that, under the digital processing capability of 100 MHz sampling rate, the Monte Carlo simulation of 500 matching filtering process is carried out. For the medium-range missile with the scattering cross section area of 5 m² and the distance of 100 km, the carrier-to-noise ratio of echo signal is 3.29 dB, the carrier-to-noise ratio of echo signal after matched filtering is 25.13 dB, the signal strength increases 152 times, the range accuracy is 27 m and the range rate accuracy is 0.17 m/s. For the international space station with the scattering cross section area of 100 m² and the distance of 500 km, the carrier-to-noise ratio of the echo signal is -6.12 dB, the carrier-to-noise ratio of the echo signal after matched filtering is 18.49 dB, the signal strength increases 289 times, the range accuracy is 117 m and the range rate accuracy is 2.1 m/s. The smaller the target range is, the larger the radar cross section area is, and the higher the digital sampling rate is, the stronger the ability of the matched filtering to extract and enhance the signal is.

Key words remote sensing; pulsed laser; heterodyne detection; matched filtering; Monte Carlo; carrier-to-noise ratio

OCIS codes 280.3340; 280.3400; 280.5600

收稿日期: 2017-07-21; 收到修改稿日期: 2017-09-02

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDB-SSW-SLH014)

作者简介: 吴世松(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事远程激光外差探测方面的研究。E-mail: wss768625265@126.com

导师简介: 王挺峰(1977—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光应用与光电系统总体设计方面的研究。

E-mail: wtfeng@sina.com(通信联系人)

1 引 言

相对于直接探测,激光外差探测技术具有强降噪能力和高光谱分辨率的优点,使其在微振动测量^[1]、远距离弱信号探测^[2]、自由空间光通信^[3]、主动激光雷达^[4]等领域得到了广泛的应用。在外差探测中,载噪比(CNR)与信噪比^[5-7]作为探测系统的探测能力的表征,受到广泛的关注。匹配滤波技术作为一种最佳滤波方法,在脉冲激光外差探测系统中能够明显地增强系统的载噪比与信噪比,将淹没于噪声之中的时域信号提取出来,其中以美国 HI-CLASS(high performance CO₂ ladar surveillance sensor)系统的应用最具代表^[8-10],对于匹配滤波的研究主要来自微波雷达信号处理的迁移,一直以来,对激光雷达匹配滤波技术的特性与影响因素的研究报道较少,而对其深度理解有助于增强远距离探测能力。本文就匹配滤波技术在远程脉冲外差探测系统中的作用进行了详细的阐述,仿真了两类典型探测目标在外差探测中匹配滤波的全过程,并分析了影响匹配滤波过程有用信号提取能力的相关因素。

2 基本原理

2.1 外差探测系统

远程脉冲外差探测系统的结构如图 1 所示,主要由 4 部分组成:发射系统、信号监视系统、外差信号接收系统、数字处理与控制系统。发射系统采用种子注入锁定的单模(横模、纵模)横向激励大气压(TEA)¹³CO₂激光器,其工作波长为 11.15 μm,大气衰减效应小。图 1 中黄色表示种子光,红色表示

脉冲光,橙色表示两束光混频。发射系统种子光分束衰减后用作本振光(LO),本振光经过声光移频器(AOM)频率移动 f_{AOM} 后与衰减的 TEA¹³CO₂ 激光器输出的脉冲光在探测器 A 上做光学混频,此过程中的探测器噪声由本振光诱导的散粒噪声占主导,平均噪声功率符合探测过程的泊松统计分布^[11]:

$$\langle i_n^2 \rangle = \frac{2G^2 e^2 B}{h\nu} P_{LO}, \quad (1)$$

式中 i_n 表示噪声电流, G 为无量纲的放大因子, e 为电子电荷量, h 为普朗克常量, ν 为出射激光频率, B 为探测器带宽, P_{LO} 为本振光功率。经滤波处理取中频信号用作输出脉冲监视(OPM):

$$i_{OPM}(t) = \frac{2Ge}{h\nu} \int_{\text{surfaceA}} \eta_Q(\rho) \mathbf{E}_s(\rho, L, t) \mathbf{E}_{LO}^*(\rho, L, t) \cdot \exp[i(\Delta\omega t + \varphi_r)] d\rho + i_n, \quad (2)$$

式中 $\eta_Q(\rho)$ 为探测器量子效率, \mathbf{E} 为光场电矢量, \mathbf{E}_s 表示出射脉冲电场矢量, \mathbf{E}_{LO} 表示本振光电场矢量, $\Delta\omega = 2\pi f_{AOM}$, φ_r 代表随机相位, * 表示取共轭, t 表示时间, ρ 表示极坐标半径, L 表示传输距离。脉冲光信号经 1/2 波片、偏振反光片(PBS)、1/4 波片后,由快反镜导入扩束系统射向硬目标,硬目标散射光由扩束系统收集经 1/4 波片、PBS、普通分光片(BS)与本振光混频于探测器 B,经滤波去除直流得到载有目标信息的回波(REC)信号:

$$i_{rec}(t) = \frac{2Ge}{h\nu} \int_{\text{surfaceB}} \eta_Q(\rho) \mathbf{E}'_s(\rho, L, t) \mathbf{E}_{LO}^*(\rho, L, t) \cdot \exp[i(\Delta\omega + \omega_d) + \varphi_r] d\rho + i_n, \quad (3)$$

式中 ω_d 表示多普勒频移, \mathbf{E}'_s 表示回波脉冲电场矢量。外差探测系统具体参数如表 1 所示。

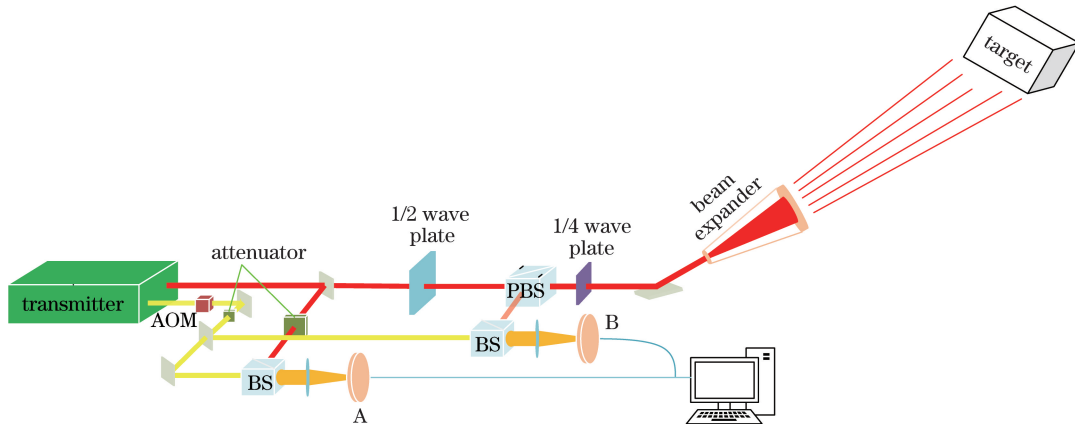


图 1 外差探测系统结构图

Fig. 1 Schematic of the heterodyne detection system

表 1 外差探测系统参数

Table 1 Heterodyne detection system parameters

Item	Parameter	Value
Transmitter	Energy /pulse	10 J@10R(18) ⁻¹³ CO ₂
	Pulse recurrence frequency	10 Hz
	Pulse width	2.5 μs
	Wavelength λ	11.15 μm
	Aperture diameter	60 cm
	Optical transmission	55%
	Heterodyne efficiency	60%
	Quantum efficiency	35%
	Frequency fidelity	Single transverse and longitudinal mode
	Resonator	Unstable, 4 cm×4 cm, M=1.25, L=2.5 m
LO power	~0.5 mW @ shot noise limited operation	
Receiver	Detector	HgCdTe (77 K)
	Bandwidth	>100 MHz
	Pre-amplifier gain	>40 dB

回波的单脉冲峰值功率由激光雷达距离方程^[12]推导得出：

$$P'_s = \frac{E_t T^2 K_t K_r D^2 \rho \delta}{\Delta t 8\pi R^4 \theta_t^2}, \quad (4)$$

其参数取值如表 2 所示。

表 2 外差探测系统参数

Table 2 Heterodyne detection system parameters

Parameter	Value
Energy /pulse E_t	10 J@ 10R(20) ⁻¹³ CO ₂
Atmosphere transmission T	0.8
Transmission system efficiency K_t	0.75
Receiving system efficiency K_r	0.7
Aperture D	0.6 m
Target reflectivity ρ	0.2
Target Area δ	10-100 m ²
Pulse duration Δt	2.5 μs
Target range R	10-1000 km
Divergence angle θ_t	0.1 mrad

假设探测器表面量子效率均匀,即 $\eta_Q(\rho) = \eta$, 则(2)、(3)式化简为

$$i_{OPM}(t) = \frac{2Ge\eta}{h\nu} \sqrt{P_s} \cdot \sqrt{P_{LO}} \cos(2\pi f_{AOM}t + \varphi_r) + i_n, \quad (5)$$

$$i_{rec}(t) = \frac{2Ge\eta}{h\nu} \sqrt{P'_s} \cdot \sqrt{P_{LO}} \cos[2\pi(f_{AOM} + f_d)t + \varphi_r] + i_n, \quad (6)$$

式中 f_d 为多普勒频移。OPM 信号与回波信号经过模数(A/D)转换器传入电脑进行匹配滤波处理,提取目标的距离、速度信息。

2.2 匹配滤波过程

匹配滤波前端过程为：

1) 生成一个载频为 1 GHz 的 0~2.5 μs 的脉冲光场(光场频率过高,以低频代替光频)；

2) 脉冲传输至硬目标,将多普勒频移加至回波信号；

3) 外差探测系统接收回波,其信号形式如(6)式所示；

4) 噪声带宽取探测器与前置放大器的组合带宽(100 MHz 时 5 阶的巴斯特沃滤波器)；

5) 微波雷达系统与可见光系统预估目标多普勒频移,将回波信号载频降到基带,将同相 & 正交(I&Q)两个通道送入 A/D 转换器,其中 I&Q 探测过程如图 2 所示,其中 $f_{estimate}$ 为预估的多普勒频移, $a(t)$ 为回波信号振幅, $I(t)$ 为同相信号输出, $Q(t)$ 为正交信号输出；

6) A/D 转换器以 100 Ms/s(可变)采样速率采集信号。

匹配滤波算法如图 3 所示,图中 f_r 为解调信号频移的中心值, t_{delay} 为匹配滤波导致的时间延迟。首先对 I&Q 两通道求和得到基带的回波信号,对基带的回波信号做 Welch 法功率谱估计,确定中心频率 $f_d - f_{estimate}$, 利用(7)式确定其载噪比 R_{CN} ：

$$R_{CN} = \frac{\int_{peak} f(v) dv}{\int_{background} f(v) dv}, \quad (7)$$

式中,分子表示对功率谱密度(PSD)曲线在中心值附近积分,分母表示在功率谱密度曲线远离中心值区间

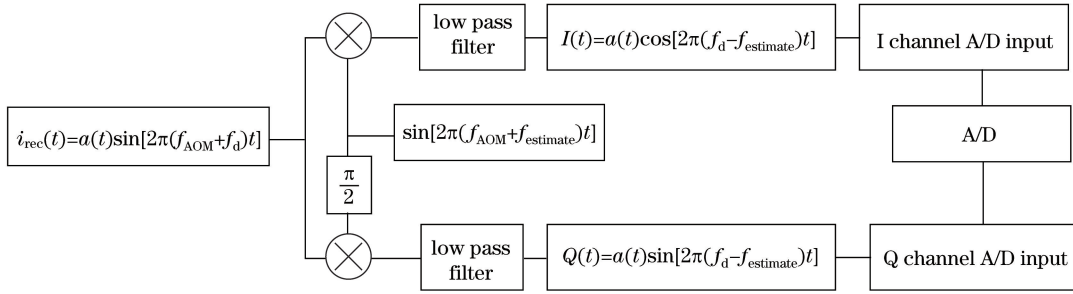


图 2 I&Q 探测器示意图

Fig. 2 Schematic of the I&Q detector

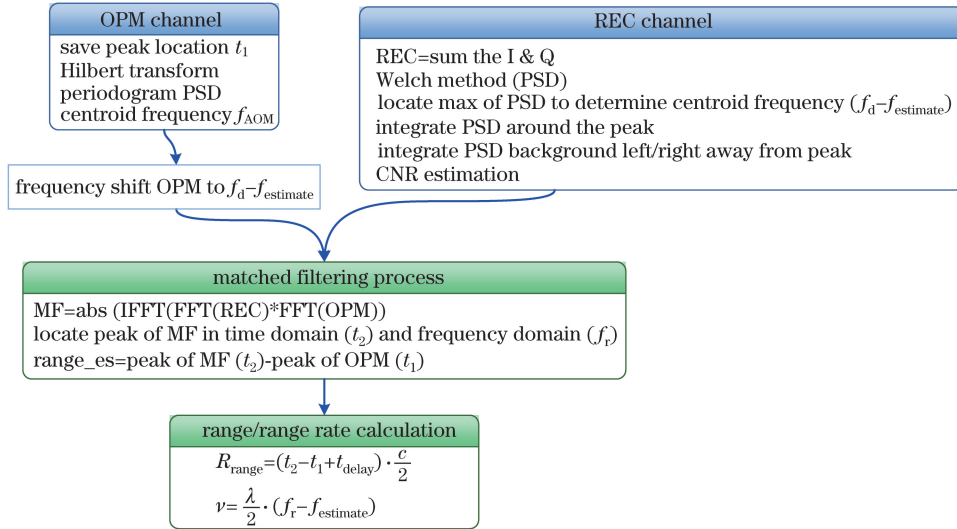


图 3 匹配滤波算法处理流程图

Fig. 3 Processing flow chart of the matched filtering algorithm

积分。然后记录 OPM 信号的峰值时间 t_1 ，对其做快速傅里叶变换(FFT)、周期图法功率谱估计，找出其中心载频 f_{AOM} ，对 OPM 做希尔伯特变换生成解析信号，接着将 OPM 信号的频率搬移至 $f_d - f_{estimate}$ ，在频域对 OPM 信号与基带回波信号做匹配滤波处理：

$$MF = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}(OPM) \times \mathcal{F}(REC)], \quad (8)$$

式中 \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别表示快速傅里叶变换和快速傅里叶逆变换。取滤波信号的包络并记录其峰值时间 t_2 ，其频谱的中心频率为 f_r ，则目标的距离由飞行时间法求得：

$$R_{range} = (t_2 - t_1 + t_{delay}) \cdot \frac{c}{2}, \quad (9)$$

式中， c 为光速。速度为

$$v = \frac{\lambda}{2} \cdot (f_r - f_{estimate}). \quad (10)$$

3 仿真分析

3.1 两类典型目标的仿真

远距离的外差探测主要应用于弹道导弹防御、

空间对接、空间碎片探测等方面，研究以中程导弹和国际空间站(ISS)两类目标为代表讨论匹配滤波在远程单脉冲外差探测系统中的表现。两类目标的参数取值如表 3 所示，其中 $1 \text{ Ma} = 0.34 \text{ km/s}$ 。

表 3 两类目标的参数

Table 3 Parameters of two types of target

Target	Target area δ / m^2	Target range R / km	Velocity /Ma
Medium-range missile	5	10-300	10
ISS	100	380-1500	22-23

导弹目标在下降过程中径直向目标运动，其距离变化率即为 3.4 km/s ，而国际空间站的距离变化率大约在 $0 \sim 7.2 \text{ km/s}$ 之间。假设中程导弹的距离为 100 km ，距离变化率为 3.4 km/s ，速度预估值为 3.3 km/s ，国际空间站的距离为 500 km ，距离变化率为 5 km/s ，速度预估值为 4.9 km/s 。由于匹配滤波过程本质上是一种卷积操作，这会造成信号时域的变形，从而影响测距的精度。匹配滤波造成的波

形畸变如图 4 所示,图 4(a)为 OPM 信号的包络,其峰值的时间取值为 $0.18 \mu\text{s}$,图 4(b)为 OPM 信号的

自卷积包络,其峰值的时间取值为 $1.73 \mu\text{s}$,对于仿真设计的波形,系统的时间延迟为 $t_{\text{delay}} = 1.55 \mu\text{s}$ 。

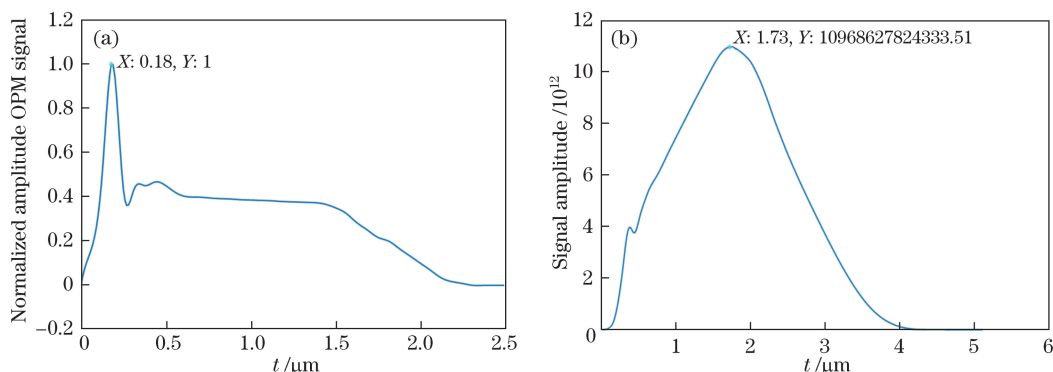


图 4 匹配滤波导致的波形畸变。(a) OPM 信号的包络;(b) OPM 信号的自卷积包络

Fig. 4 Waveform distortion induced by the matched filtering process. (a) Envelope of the OPM signal;
(b) envelope of self-convolution of the OPM signal

中程导弹与国际空间站的外差探测匹配滤波仿真结果分别如图 5 与图 6 所示。对比图 5(b)与图 5(f)、图 6(b)与图 6(f)发现,经匹配滤波处理后,中程导弹的回波信号的载噪比由 3.29 dB 增加到 25.13 dB ,时

域信号增强了 152 倍;国际空间站回波信号的载噪比由 6.12 dB 增加到 18.49 dB ,时域信号增强了 289 倍。同时对比图 5(a)与图 5(e)、图 6(a)与图 6(e),可以明显看出匹配滤波对增强时域信号的作用。

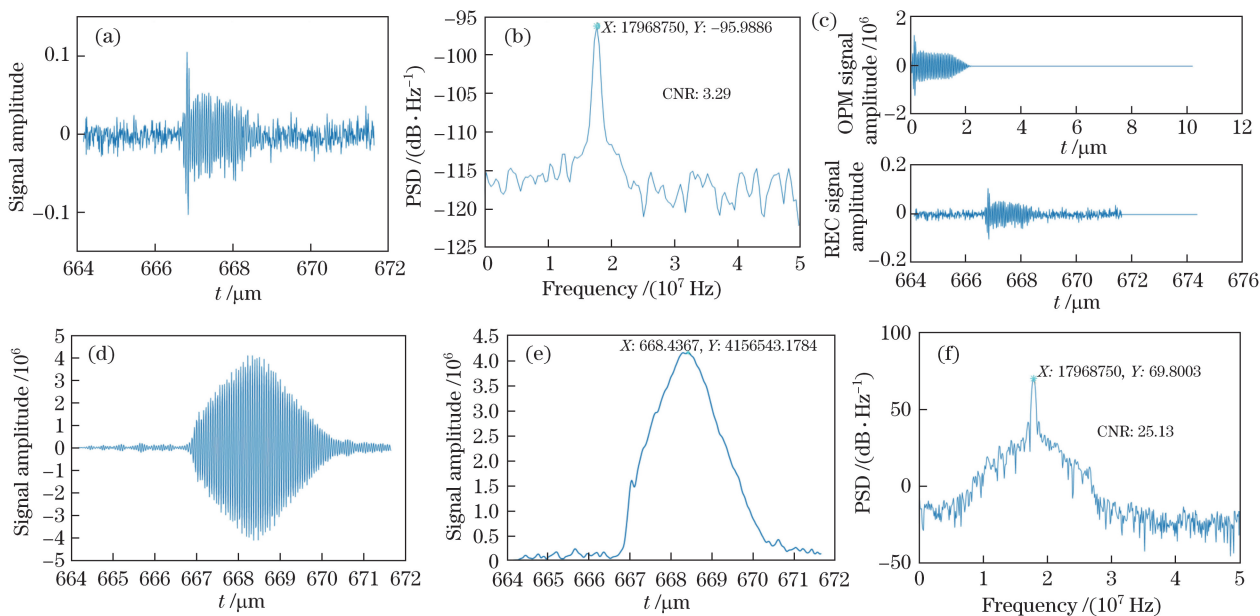


图 5 中程导弹的匹配滤波过程。(a)回波信号;(b)回波信号的功率谱密度;(c) OPM 信号与回波信号;
(d)带载频的匹配滤波器输出信号;(e)匹配滤波器输出信号的包络;(f)匹配滤波器输出信号的功率谱密度

Fig. 5 Matched filtering process of medium-range missile. (a) REC signal; (b) power spectrum density of REC signal;
(c) OPM signal and REC signal; (d) matched filtered output signal with carrier frequency;
(e) envelope of the matched filtered output signal; (f) power spectrum density of the matched filtered output signal

为了排除单次解算距离与速度具有的偶然随机性,采用蒙特卡罗法对中程导弹与国际空间站分别模拟了 500 次匹配滤波过程,其距离与速度的解算值统计分布结果如图 7 所示。图 7(a)与(b)分别表示中程导弹的 500 次仿真的距离误差与速度误差,其中距离误差均值 μ 估计为 3.195 m ,距离误差的

均方根 δ 估计为 8.657 m ,95%置信度的距离误差区间估计为 $[2.434, 3.956]$,距离误差的均方根区间估计为 $[8.152, 9.23]$,由统计理论中正态分布的“ 3δ ”原理,距离精度在 27 m 左右,速度精度为 0.17 m/s 。图 7(c)与(d)分别表示国际空间站的 500 次仿真的距离误差与速度误差,其中距离误差均值估计为

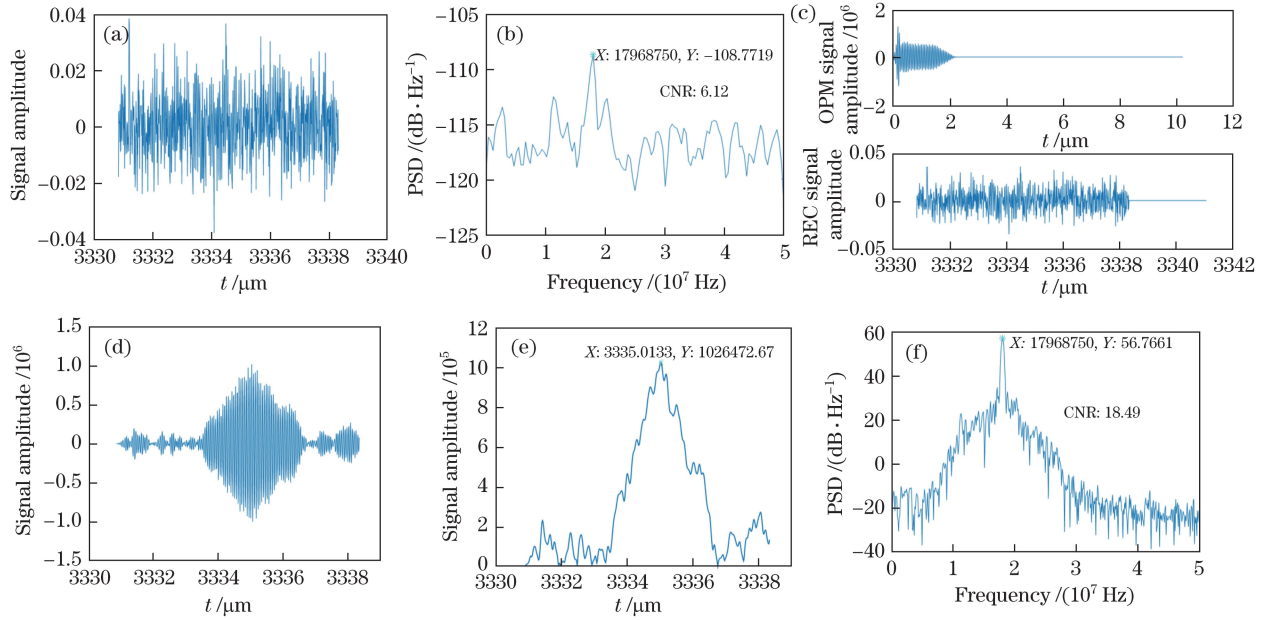


图 6 国际空间站的匹配滤波过程。(a)回波信号;(b)回波信号的功率谱密度;(c)OPM 信号与回波信号;
(d)带载频的匹配滤波器输出信号;(e)匹配滤波器输出信号的包络;
(f)匹配滤波器输出信号的功率谱密度

Fig. 6 Matched filtering process of ISS. (a) REC signal; (b) power spectrum density of REC signal;
(c) OPM signal and REC signal; (d) matched filtered output signal with carrier frequency;
(e) envelope of the matched filtered output signal; (f) power spectrum density of the matched filtered output signal

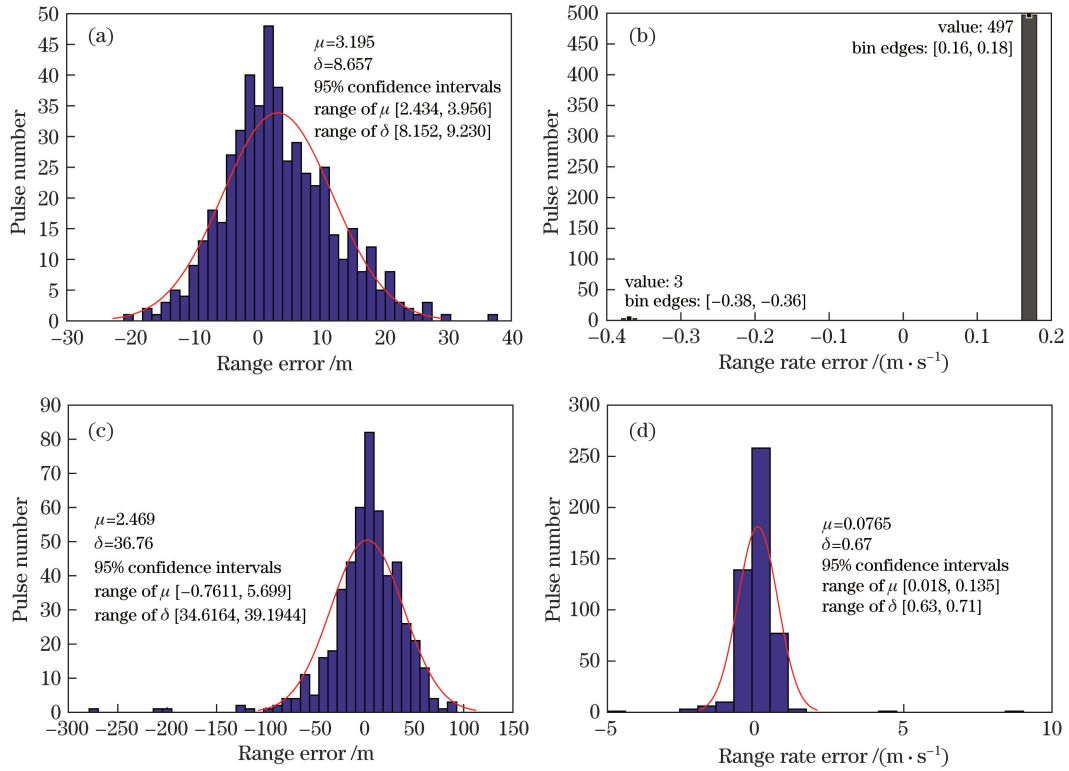


图 7 蒙特卡罗仿真。(a)中程导弹的距离误差;(b)中程导弹的距离变化率误差;(c)国际空间站的距离误差;
(d)国际空间站的距离变化率误差

Fig. 7 Monte Carlo simulation. (a) Range error of medium-range missile; (b) range rate error of medium-range missile;
(c) range error of ISS; (d) range rate error of ISS

2.469 m, 距离误差的均方根估计为36.76 m, 95%置信度的距离误差区间估计为 $[-0.7611, 5.699]$, 距离误差的均方根区间估计为 $[34.616, 39.194]$, 由统计理论中正态分布的“ 3σ ”原理, 距离精度在117 m左右, 速度精度为2 m/s。

3.2 探测能力影响因素分析

匹配滤波的本质就是通过一个相关信号与微弱的回波信号的卷积将其从噪声背景中提取出来, 由(6)式可以直接看出, 微弱回波信号与散粒噪声振幅的相对大小直接影响真实信号的提取, 对于特定的远程脉冲相干激光雷达探测系统, 由雷达距离方程表征的系统探测能力的参数可调范围极小, 则目标距离与目标的散射截面是影响回波信号振幅的主要因素, 可影响匹配滤波的信号提取能力。由于信号噪声是一个随机过程, 在有限的时间内, 对信号的描述越详尽, 随机过程的特点越容易表征, 所以, 对固定长度的时域信号, 采样率同样会影响匹配滤波的信号提取能力。

3.2.1 目标距离

假设目标的散射截面面积为 5 m^2 , 对距离为1~300 km处的目标进行探测, 数字处理系统分别以100 Ms/s和2 Gs/s的采样率进行采样, 对匹配滤波前后信号的载噪比进行了分析。放大倍数定义为匹配滤波后载噪比与匹配滤波前载噪比的比值, 并对其取对数以方便坐标显示。图8为载噪比与放大倍数随目标距离的变化曲线。图8中采用蒙特卡罗法目标距离每隔1 km模拟一次匹配滤波过程。匹配滤波前的信噪比随目标距离的增加而减小, 且随目标距离的增加, 载噪比的起伏变大。相比于2 GHz采样率的载噪比, 100 MHz采样率的载噪比在整个曲线上抖动剧烈, 在1~100 km范围载噪比

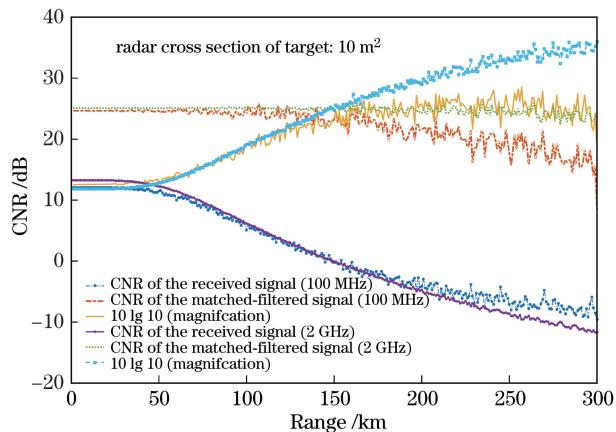


图8 载噪比随目标距离的变化
Fig. 8 CNR versus target range

较小, 在200~300 km范围载噪比较大。100 MHz采样率处理的匹配滤波后的载噪比, 随目标距离增加均值变小, 且起伏变剧烈, 而2 GHz采样率处理的匹配滤波后的载噪比, 随目标距离的增加, 均值大小几乎不变, 相对于前者来说起伏较小。在1~150 km内, 两种采样率的放大倍率差别不大; 在150~300 km内, 高采样率的放大倍率明显大于低采样率的放大倍率, 且高采样率的放大倍率的起伏较小。

3.2.2 散射截面面积

假设目标距离为300 km, 对散射截面面积为10~200 m^2 的目标进行探测, 同样采用100 Ms/s和2 Gs/s的采样率进行采样, 图9为载噪比与放大倍数随目标散射截面面积的变化曲线。匹配滤波前的载噪比随散射截面的增加非线性增加, 匹配滤波后的载噪比不随散射截面的变化而变化, 放大倍数随散射截面的增加非线性减小。高采样率对应的载噪比起伏相对较小。

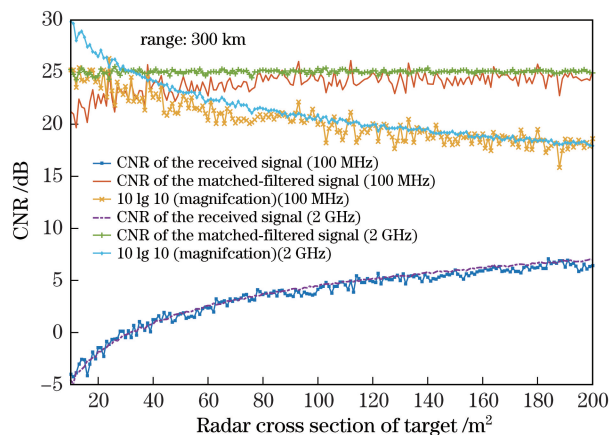


图9 载噪比随目标雷达截面的变化

Fig. 9 CNR versus radar cross section of target

3.2.3 采样率

以国际空间站为目标, 散射截面面积固定为 100 m^2 , 目标距离设为1000 km, 速度7.2 km/s, 速度预估为7.1 km/s, 在此背景下, 分别采用100 MHz、400 MHz、700 MHz、1 GHz、10 GHz、20 GHz的采样率进行处理, 得到不同采样率下回波信号功率谱密度如图10所示。图11为各采样率下匹配滤波信号的包络。从图10可以看出, 随着采样率的增加, 回波信号的载频信号越明显, 由于采样率过低, 图10(a)与(b)中回波信号的载频信息完全淹没于噪声之中, 从而无法提取回波信号载频, 这对于匹配滤波而言是致命的, 所以100 MHz与400 MHz的采样率无法满足此探测要求。图11中

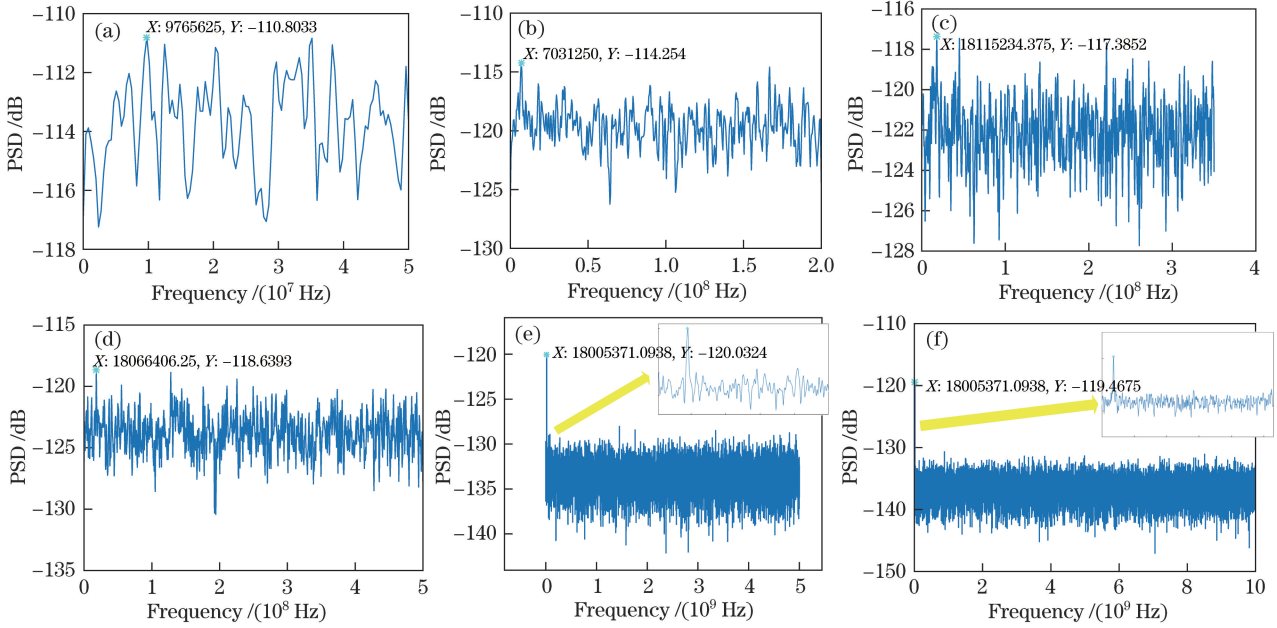


图 10 不同采样率下的回波信号功率谱密度。(a) 100 MHz; (b) 400 MHz; (c) 700 MHz;
(d) 1 GHz; (e) 10 GHz; (f) 20 GHz

Fig. 10 Power spectral density of echo signal with different sampling rates. (a) 100 MHz;
(b) 400 MHz; (c) 700 MHz; (d) 1 GHz; (e) 10 GHz; (f) 20 GHz

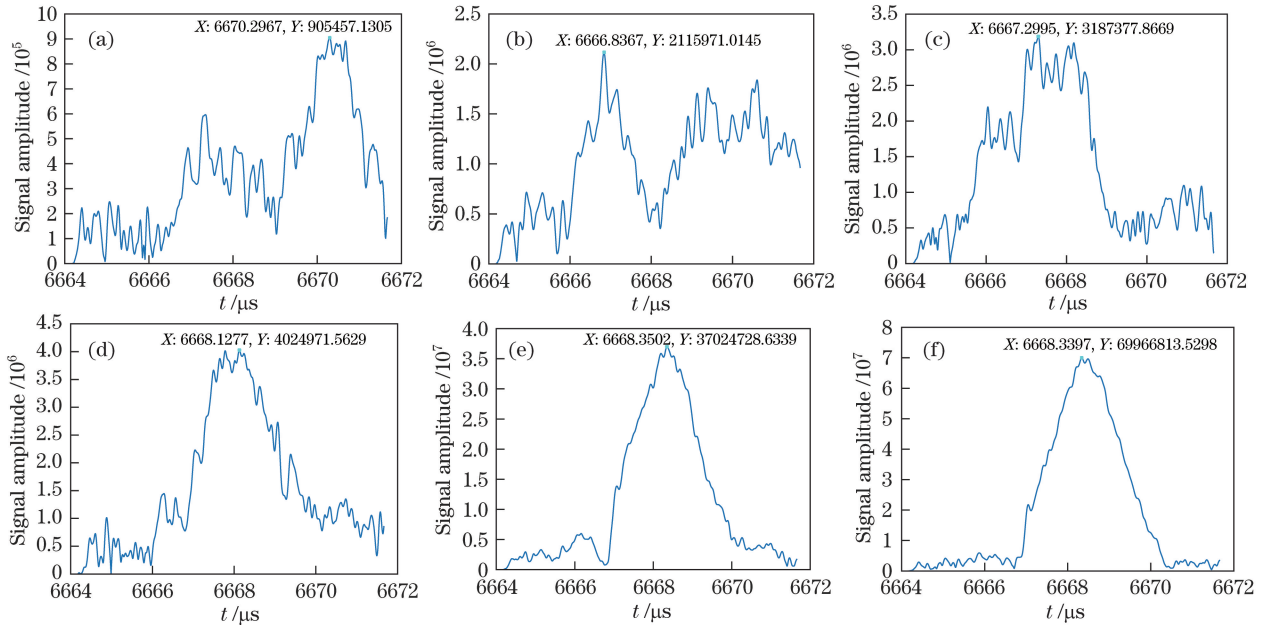


图 11 不同采样率下滤波信号的包络。(a) 100 MHz; (b) 400 MHz; (c) 700 MHz;
(d) 1 GHz; (e) 10 GHz; (f) 20 GHz

Fig. 11 Envelope of the matched-filtered signal with different sampling rates. (a) 100 MHz;
(b) 400 MHz; (c) 700 MHz; (d) 1 GHz; (e) 10 GHz; (f) 20 GHz

随着采样率的增加,匹配滤波信号的包络中有用信号越明显,噪声抑制越有效。

4 结 论

针对基于匹配滤波算法的远程脉冲外差探测系

统,分析了探测系统中有用信号与噪声的形式,给出了匹配滤波算法流程。针对两类典型的远程目标(中程导弹与国际空间站),仿真模拟了外差探测系统的探测过程,并给出了一般情景下探测系统的表现,同时分析了目标距离、散射截面面积和数字采样

率等因素对探测能力的影响,仿真结果表明:

1) 在 100 MHz 采样率的数字处理能力下,分别用蒙特卡罗法仿真了 500 次匹配滤波过程,对于散射截面面积为 5 m^2 、距离为 100 km 的中程导弹,回波信号载噪比均值为 3.29 dB,匹配滤波后信号载噪比均值为 25.13 dB,信号强度增强了 152 倍,距离精度为 27 m,速度精度为 0.17 m/s;对于散射截面面积为 100 m^2 、距离为 500 km 的国际空间站,回波信号载噪比均值为 -6.12 dB ,匹配滤波后信号载噪比均值为 18.49 dB,信号强度增强了 289 倍,距离精度为 117 m,速度精度为 2.1 m/s。

2) 目标距离越小,散射截面面积越大,数字采样率越高,匹配滤波提取信号的能力越强。

参 考 文 献

- [1] Liu L S, Zhang H Y, Wang T F, *et al.* Doppler spectrum imaging of vibrating target using laser heterodyne detection[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1508-1515.
刘立生, 张合勇, 王挺峰, 等. 激光外差探测对振动目标多普勒频谱成像[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1508-1515.
- [2] Hasson V H, Corbett F J, Kovacs M A, *et al.* Acquisition, tracking, and sizing of small space objects[C]. *SPIE*, 2000, 4065: 274-285.
- [3] Ren Y X, Dang A H, Liu L, *et al.* Heterodyne efficiency of a coherent free-space optical communication model through atmospheric turbulence[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30): 7246-7254.
- [4] Matson C L, Holland D E, Czyzak S R, *et al.* Heterodyne laser radar for space-object imaging: results from recent field experiments[C]. *SPIE*, 1995, 2580: 288-295.
- [5] Zhang H Y, Liu L S, Zhao S, *et al.* Analysis of signal to noise ratio for laser heterodyne with weak local oscillator based on multi-pixel photon counter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0308008.
张合勇, 刘立生, 赵帅, 等. 基于多像素光子计数器的弱本振激光外差信噪比分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308008.
- [6] Luo H Y, Xiong W, Shi H L, *et al.* Study for signal-to-noise ratio of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0612001.
罗海燕, 熊伟, 施海亮, 等. 空间外差干涉光谱仪信噪比研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0612001.
- [7] Pang Y J, Gao L, Wang C H. Analysis of IQ demodulation and signal noise ratio for $2 \mu\text{m}$ dual-balanced heterodyne detection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0114001.
庞亚军, 高龙, 王春晖. $2 \mu\text{m}$ 双平衡式外差探测 IQ 解调与信噪比研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0114001.
- [8] Mosley D E, Matson C L, Czyzak S R. Active imaging of space objects using the HI-CLASS (high performance CO_2 ladar surveillance sensor) laser system[C]. *SPIE*, 1997, 3065: 52-60.
- [9] Konkola P, Crandall C, Lercari R, *et al.* Pushing the envelope: HI-CLASS range and range-rate[C]. *The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2006: E29.
- [10] Kovacs M A, Dryden G L, Pohle R H, *et al.* HI-CLASS on AEOS: a large-aperture laser radar for space surveillance/situational awareness investigations[C]. *SPIE*, 2001, 4490: 298-306.
- [11] Tanaka K, Saga N. Maximum heterodyne efficiency of optical heterodyne detection in the presence of background radiation[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(21): 3901-3904.
- [12] Li Y Q, Li Z L, Fu H L, *et al.* Experimentation of diffuse reflection laser ranging of space debris[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0908001.
李语强, 李祝莲, 伏红林, 等. 空间碎片漫反射激光测距试验[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0908001.