调频连续波激光雷达距离-多普勒解耦新方法

王 俏 杜小平 赵继广

(装备学院 科研部, 北京 101416)

摘 要: 调频连续波激光雷达探测运动目标时,通常采用二维傅里叶变换解耦合方法. 当探测高速运动目标时,由于目标移动导致不同调频周期的中频信号频谱峰值不在同一距离单元,用二维傅里叶变换法进行解耦将产生速度模糊. 新的解耦方法通过对多个周期的中频信号频谱峰值位置进行直线拟合,获得目标径向速度估计值. 利用速度估计值构建多普勒补偿信号,并与原中频信号相乘. 补偿后的中频信号频谱峰值在同一距离单元内. 将补偿后的中频信号用二维傅里叶变换法获得的径向速度与之前的速度估计值相加,得到最终的目标径向速度. 仿真结果说明新方法在获得较高测距、测速精度的同时,可以有效提高调频连续波激光雷达的无模糊速度.

关 键 词: 调频连续波; 激光雷达; 距离-多普勒解耦合

中图分类号: TN 95

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)05-0697-05

New range-Doppler decoupling method for FMCW ladar

Wang Qiao Du Xiaoping Zhao Jiguang

(Department of Science Research, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: FMCW(frequency modulation continues wave) ladar could detect moving target. It often uses 2-dimension FFT method to decouple range and doppler frequency. When detecting high speed target, different chirp period spectrum peaks are not in the same range bin, and using 2-dimension FFT method would acquire a fuzzy speed. In the new decoupling method, one fitting line was acquired from serial period's spectrum peaks at first, and an estimated speed was achieved. Then a Doppler compensation signal based on the estimated speed was given and plus with the original IF signal. It makes the spectrum peaks of serial periods compensated IF signal are in the same range bin. By using 2-dimension FFT method on compensated IF signal, a compensated speed was achieved. And the target speed could be the sum of compensated speed and estimated speed. Simulation results indicate that the new range-Doppler decoupling method could effectively extend no fuzzy velocity of FMCW ladar, and achieve high precision of target range and velocity at the same time.

Key words: frequency modulation continues wave(FMCW); ladar; range-Doppler decoupling

调频连续波(FMCW, Frequency Modulation Continues Wave)激光雷达是一种新型激光雷达,最先由美国陆军实验室(ARL, Army Research Laboratory)提出[1]. 它采用强度受副载波调制的激光照射被测目标,利用接收端的光电探测器解调反射激光中的调制信号,避免了相干激光探测中所使用的光频调制器件和光混频器件等复杂光学器件,发射光学系统和接收光学系统相对简单,系统可靠性得以增强[1-4]. 调频连续波激光雷达采用大带宽的调频信号作为副载波,并利用发射信号和回波信号的差频来解算目标距离,具有距离分辨率高,无模糊距离大,可实现多目标分辨等特点[1]. 当探测相对运动目标时,调频连续波激光雷达存在距离-多普勒耦合,通常比较三角型扫频

收稿日期: 2011-09-20; **网络出版时间**: 2012-03-09 10:38

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120309.1038.022.html

作者简介: 王 俏(1983 -),男,湖北潜江人,博士生,w200q@163.com.

上下扫频段的回波信号频率差可以实现距离-多普勒解耦[5-6],或采用二维傅里叶变换法处理多个调频周期的回波信号实现距离-多普勒解耦[7-9].但前一种方法的精度受限于中频信号频域分析的精度,不适用与低速目标探测;后一种方法的无模糊速度与速度分辨率成反比,无法同时获取较高的速度分辨率较高时和较大的无模糊速度[9].

本文在研究调频连续波激光雷达回波信号特性的基础上,提出了改进的距离-多普勒解耦合方法.仿真结果表明:改进的距离-多普勒解耦合方法在获得较高速度分辨率的同时,可以有效提高调频连续波激光雷达的无模糊速度.

1 调频连续波激光雷达探测原理

调频连续波激光雷达系统原理如图 1 所示.调频连续波激光雷达的发射端由调制信号发生器、激光器调制与驱动模块、连续波激光器和发射光学系统组成.其中,调制信号发生器产生锯齿波调频信号;调频信号与激光器偏置电流在激光器调制与驱动模块中叠加,形成激光器驱动电流;连续波激光器发射激光强度受调频信号调制;发射激光经发射光学系统准直和扩束后照射被测目标区域.接收端由接收光学系统、焦平面阵列(FPA, Focal Plane Array)、信号调理模块和信号处理模块组成.其中,接收光学系统将目标反射光汇聚到焦平面阵列上;目标反射光与原调频信号在焦平面阵列上进行光电混频,输出差频信号;信号调理模块对差频信号进行放大滤波后,输出至信号处理模块;最后由信号处理模块处理获得包括目标方位、距离和速度的图像.

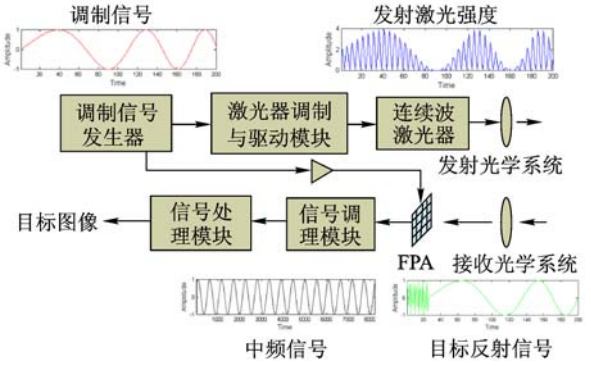


图 1 调频连续波激光雷达探测原理

调制信号发生器产生的调频信号在一个调频周期内的表达式为

$$s_t = A_0\cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \theta_0) \tag{1}$$

其中,f_0 为调频信号的中心频率;$k = \Delta F/T$ 为调频斜率;ΔF 为调频信号带宽;T 为调频信号周期;θ_0 为发射信号的初始相位.

系统发射激光功率 $P_t(t)$ 为

$$P_t(t) = P_t[1 + \alpha_1\cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \theta_0)] \tag{2}$$

式中,P_t 为直流光功率;α_1 为激光调制深度.

初始距离为 R_0,径向速度为 v(以接近探测器的方向为正)的目标的反射激光功率 $P_r(t)$ 为

$$P_t(t) = P_r[1 + \alpha_2\cos(2\pi f_0(t-\tau) + \pi k(t-\tau)^2 + \theta_0 + \phi_0)] \tag{3}$$

式中,P_r 为反射激光直流光功率;α_2 为信号调制深度;ϕ_0 为目标反射引起的附加相移;$\tau = 2(R_0 - vt)/c$ 为目标回波信号延迟,c 为光速.

反射光经光电转换后与发射信号混频得到中频信号 $s_{IF}(t)$,其解析信号表达式为

$$s_{IF}(t) = M\exp[\mathrm{j}(2\pi k\tau t + 2\pi f_0\tau - \pi k\tau^2) - \mathrm{j}\phi_0] \tag{4}$$

式中,M 为衰减系数,与目标反射强度、传输衰减和光电转换效率有关.将 $\tau = 2(R_0 - vt)/c$ 代入式(5),忽略系数为 $1/c^2$ 的项,得中频信号表达式近似为

$$s_{IF}(t) \approx M\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\left[\left(\frac{2kR_0}{c} - \frac{2f_0 v}{c}\right)t - \frac{2kv}{c}t^2 + \frac{2f_0 R_0}{c}\right] - \mathrm{j}\phi_0\right\} \tag{5}$$

第 n 个调频周期 t_n 时刻的中频信号可表示为

$$s_{IF}(n,t_n) = M\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\left[\left(\frac{2kR_n}{c} - \frac{2f_0 v}{c}\right)t_n - \frac{2kv}{c}t_n^2 + \frac{2f_0 R_n}{c}\right] - \mathrm{j}\phi_0\right\} = M\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\left[\left(\frac{2kR_0}{c} - \frac{2kvTn}{c} - \frac{2f_0 v}{c}\right)t_n - \frac{2kv}{c}t_n^2 + \frac{2f_0 R_0}{c} - \frac{2f_0 vTn}{c}\right] - \mathrm{j}\phi_0\right\} \tag{6}$$

式中,$t_n = t - nT$,$R_n = R_0 - vTn$ 为第 n 个调频周期的目标初始距离.由式(6)可知,在第 n 个调频周期内,运动目标中频信号仍为线性调频信号,其频率为

$$f_{IF}(t_n) = \frac{2kR_0}{c} - \frac{2f_0 v}{c} - \frac{2kvT}{c}n - \frac{4kv}{c}t_n = f_R + f_D + f_m + \mu t_n \tag{7}$$

式中,$f_R = 2kR_0/c$ 目标距离引起的频率分量;$f_D = -2f_0 v/c$ 为多普勒频移;$R_m = vTn$ 为 n 个调频周期内目标移动距离;$f_m = -2kvTn/c$ 目标移动对应的频率分量;$\mu = -4kv/c$ 为中频信号调频斜率.

中频信号调频带宽:

$$\Delta F_{\mathrm{IF}} = \frac{4kvT}{c} = \frac{4v}{c}\Delta F \tag{8}$$

由于 $4v/c < <1$,因此中频信号的时宽带积很小,第 n 个调频周期的中频信号可近似为一个单频信号:

$$s_{\mathrm{IF}}(n,t_n) \approx M\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\left[(f_{\mathrm{R}}+f_{\mathrm{D}}+f_{\mathrm{m}})t_n + \frac{2f_0R_0}{c}+f_{\mathrm{D}}Tn\right]-\mathrm{j}\phi_0\right\} \tag{9}$$

其频率为

$$f_{\mathrm{IF}}(n) = f_{\mathrm{R}}+f_{\mathrm{D}}+f_{\mathrm{m}} \tag{10}$$

由于多普勒频移的存在,使信号谱峰值较目标距离发生了偏移,要准确测量目标距离,需要对中频信号进行距离-多普勒解耦合.

对 $s_{\mathrm{IF}}(n,t_n)$ 做傅里叶变换可得中频信号频谱为

$$s_{\mathrm{IF}}(n,f) = M\exp\left(\mathrm{j}\frac{4\pi f_0R_0}{c}-\mathrm{j}\theta_0\right)\exp(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{D}}Tn)\cdot TSa[\pi T(f-f_{\mathrm{R}}-f_{\mathrm{D}}-f_{\mathrm{m}})] \tag{11}$$

由式(11)可以看出,中频信号频谱峰值受 $\exp(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{D}}Tn)$ 项调制,频谱峰值的实部随着调制周期序列 n 变化呈余弦包络. 因此,对信号频谱沿调频周期序列 n 做傅里叶变换可以获得目标的速度信息.

2　二维傅里叶变换解耦合

距离-多普勒解耦方法通常采用二维傅里叶变换法,其具体方法为:

首先,以采样率 f_{s} 采集连续 N 个调频周期的中频信号,并对每个调频周期内的中频信号序列作 FFT,得到每个调频周期的距离谱,每根谱线对应一个距离分辨单元. 然后,将每个调频周期的距离谱按顺序排入矩阵的每一行,则矩阵的每一列为同一距离单元上连续 N 个频周期的谱值. 对矩阵的每一列做 FFT,得到一个距离-多普勒二维幅度谱,该谱的每列对应一个距离单元,每行对应一个多普勒频率单元. 距离-多普勒二维幅谱的表达式为[4]

$$S_{\mathrm{RD}}(f_x,f_y) = \left|\sum_{n=0}^{N}\frac{[1-\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi(f_x-f_{\mathrm{R}}-f_{\mathrm{D}})\cdot T}]\cdot\mathrm{e}^{[\mathrm{j}2\pi(f_x-f_{\mathrm{R}}-f_{\mathrm{D}}+f_y-f_{\mathrm{R}}-f_{\mathrm{D}})\cdot n\cdot T]}}{\mathrm{j}\cdot 2\pi\cdot(f_x-f_{\mathrm{R}}-f_{\mathrm{D}})}\right| \tag{12}$$

式中,f_x 为距离维的频率变量;f_y 为多普勒维的频率变量.

改进的距离-多普勒解耦方法的距离分辨率为 $\Delta R = c/2\Delta F$;无模糊距离为 $R_{\max} = Tf_{\mathrm{s}}\Delta R/2$;多普勒维的频率分辨率 $\Delta f_{\mathrm{D}} = 1/NT$;速度分辨率为 $\Delta v = c/2NTf_0$;无模糊速度为 $v_{\max} = c/4Tf_0$.

由于该方法在多普勒维上是采用离散傅里叶变换获得目标多普勒信息,因此可以通过 ZFFT、Chirp-Z、时域补零等方法提高多普勒维的计算分辨率.

二维傅里叶变换解耦方法存在以下不足:

1)该方法的速度分辨率 Δv 和无模糊速度 $v_{\max}$ 之间相互制约,无法同时实现高速度分辨率和大的无模糊速度.

2)目标相对运动速度与测量值仅在 $[-v_{\max}, v_{\max}]$ 范围内满足一一对应关系,而当目标相对运动速度超出 $v_{\max}$ 时,将形成速度模糊,该方法无法获得目标的真实速度. 高速运动形成的速度模糊和距离-多普勒二维谱展宽如图 2 所示,图中目标距离为 300 m,相对速度为 100 m/s.

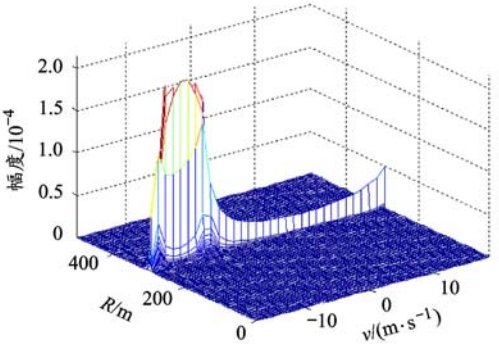


图 2　目标高速运动引起的距离-多普勒谱偏移与展宽

3)对于高速运动目标,当目标在 N 个调频周期内的运动距离 R_{m} 大于一个距离分辨率 ΔR 时,该方法除了在多普勒维产生速度模糊外,在距离维和多普勒维上均会产生偏移和展宽,导致测距误差随着目标相对运动速度的增大而增大. 目标相对运动速度对测距误差 δR 的影响如图 3 所示,图中目标距离为 300 m. 从图 3 中可以看出,测距误差随运动速度增加呈上升趋势,在目标相对速度为 1 000 m/s 时,测距误差达 34.5 m.

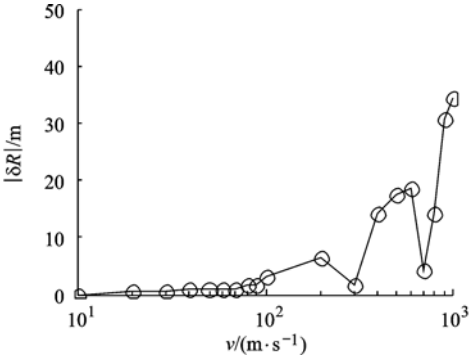


图 3　目标相对运动速度对测距误差的影响

3 基于速度补偿的解耦合方法

本文对原距离-多普勒解耦方法进行了改进，利用变换过程中的各调频周期的频谱峰值位置关系，构造速度补偿信号，用于补偿高速运动目标的多普勒频移，将补偿后的信号作为低速目标信号进行距离多普勒分析，从而提高测距、测速精度. 该方法的具体过程如下：

首先，对每个调频周期的中频信号做 FFT，并将结果依次排入矩阵的每一列，可获得一个二维谱，其纵坐标为距离值，横坐标为调频周期的顺序. 根据每个调频周期的距离谱峰值位置，可拟合一条速度为 $\tilde{v}$ 的直线. 由于速度拟合直线在距离谱上的误差不大于距离分辨率 ΔR，因此，速度估计值 $\tilde{v}$ 的误差将不大于 $\Delta R/T$，即 $|v-\tilde{v}|\leqslant\Delta R/T$.

多个调频周期的距离谱峰值位置及其拟合直线如图 4 所示.

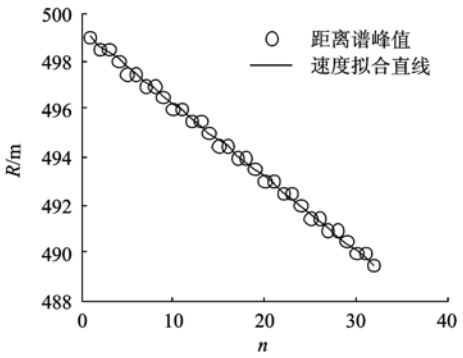


图 4 距离谱峰值位置及速度拟合直线

根据式(6)构建补偿信号如下：

$$s_{\mathrm{com}}(n,t_n)=\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\left[\left(\frac{2k\tilde{v}Tn}{c}+\frac{2f_0\tilde{v}}{c}\right)t_n+\frac{2k\tilde{v}}{c}t_n^2+\frac{2f_0\tilde{v}Tn}{c}\right]\right\} \tag{13}$$

用式(13)中的补偿信号与原中频信号进行混频滤波处理，获得补偿后的信号为

$$s_{\mathrm{com_ed}}(n,t_n)=\exp\left\{\mathrm{j}2\pi\left[\left(\frac{2kR_0-2k\hat{v}Tn}{c}-\frac{2f_0\hat{v}}{c}\right)t_n-\frac{2k\hat{v}}{c}t_n^2+\frac{2f_0R_0-2f_0\hat{v}Tn}{c}\right]-\mathrm{j}\phi_0\right\} \tag{14}$$

式中，速度值 $\hat{v}=v-\tilde{v}$，由以上分析可知 $\hat{v}\leqslant\Delta R/T$.

最后，采用二维傅里叶变换对 $s_{\mathrm{com_ed}}(n,t_n)$ 进行距离-多普勒处理，获得距离 R 和速度值 $\hat{v}$，则目标的径向速度为 $v=\tilde{v}+\hat{v}$.

通过对 $\hat{v}$ 的测量，进一步降低了系统的测速误差. 由于 $\hat{v}$ 的测量误差 $\delta\hat{v}\leqslant\Delta v$，因此该方法最终的测速误差 $\delta v=\delta\hat{v}\leqslant\Delta v$.

4 算法仿真与结果分析

对改进的距离-多普勒解耦方法进行仿真，系统仿真参数为：$f_0=1$ GHz，$\Delta F=300$ MHz，$T=1$ ms，$k=3\times10^{11}$ Hz/s，$N=32$，$f_s=4$ MHz. 在以上参数下系统的理论性能参数为：无模糊距离 $R_{\max}=1\,000$ m，距离分辨率 $\Delta R=0.5$ m，无模糊速度 $v_{\max}=75$ m/s，速度分辨率 $\Delta v=4.6875$ m/s. 仿真中采用 8 倍补零的 FFT 计算多普勒维，因此速度计算分辨率 $\Delta v_{\mathrm{cal}}=\Delta v/8=0.5859$ m/s.

间隔 1 m 对相对距离在 100 ~ 1 000 m 区间内的目标信号进行仿真分析，分别计算 50 m/s，300 m/s和 900 m/s 三种速度下的测距误差和测速误差. 不同目标距离下的测距误差结果如图 5 所示，不同目标距离下的测速误差结果如图 6 所示. 从图 5 和图 6 中可以看出，改进的距离-多普勒解耦方法在不同目标距离下的测速误差和测距误差只与目标速度有关，并且在较大的作用距离内具有较高的测距、测速精度.

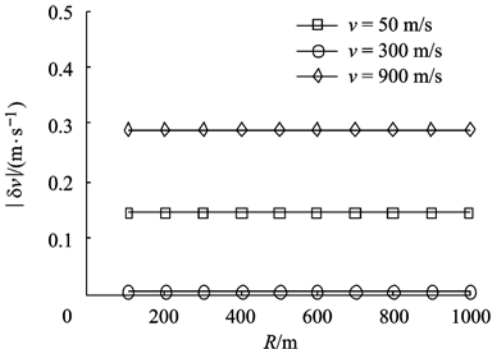


图 5 不同目标距离下的测速误差

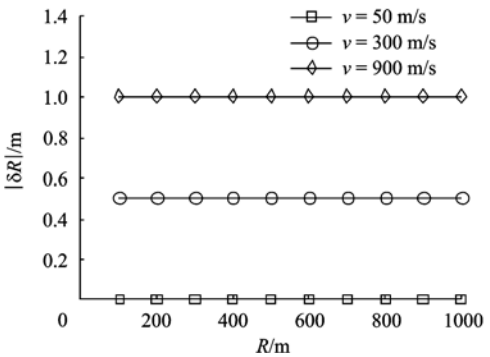


图 6 不同目标距离下的测距误差

假设目标距离 500 m，对相对速度在 10 ~

1 000 m/s区间内的目标信号进行仿真分析,不同目标相对速度下的测距误差和测速误差分别如图 7 和图 8 所示.

对比图 7 和图 3 可以看出,改进的距离-多普勒解耦方法的测距误差随目标相对速度的增加仍呈上升趋势,在 1 000 m/s 处获得值为 1 m 的最大测距误差,明显小于原方法的测距误差.

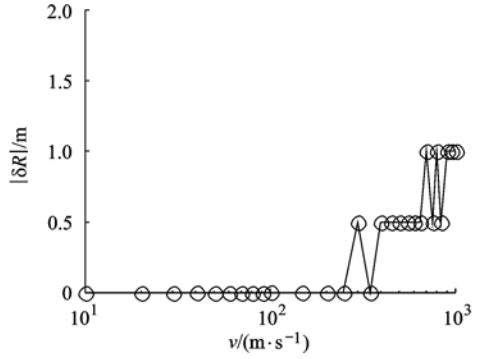


图 7　不同目标相对速度下的测距误差

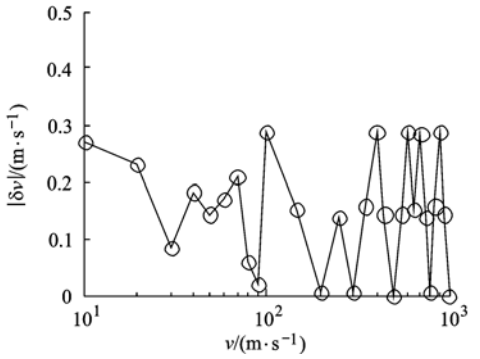


图 8　不同目标相对速度下测速误差

图 8 中改进的多普勒解耦方法能够在较大动态范围内获得较低的测量误差,最大测速误差为 $\delta v = 0.2898$ m/s,小于速度计算分辨率 $\Delta v_{\mathrm{cal}} = 0.5859$.

5　结　论

改进的多普勒解耦方法能在较大范围内获得较低的测量误差,有效解决了速度分辨率无模糊速度之间的矛盾,系统测量精度相对原方法有明显提高,可以在较大范围内实现目标相对距离和速度的精确测量,最大测速误差小于单位速度分辨率.

参考文献（References）

[1] Stann B L, Ruff W C, Sztankay Z G. Intensity-modulated diode laser radar using frequency-modulation/continuous-wave ranging techniques[J]. Optical Engineering, 1996, 35(11): 3270 – 3278

[2] Liu J J, Von Der Lippe C M. Advanced high-bandwidth optical fuzing technology[J]. Nanophotonics for Communication: Materials and Devices II, 2005, 6017(1): 60170F

[3] Von Der Lippe C M, Liu J J. Optical fuzing technology[J]. Laser Radar Technology and Applications XI, 2006, 6214(1): 62140D

[4] Stan B L, Abou-Auf A, Aliberti K, et al. Research progress on focal plane array ladar system using chirped amplitude modulation [J]. Laser Radar Technology and Applications VII, 2003, 5086(1): 47 – 57

[5] 杨勇,谭渊,张晓发,等. LFMCW 雷达运动目标距离与速度超分辨估计[J]. 信号处理,2010,26(4):626 – 630
Yang Yong, Tan Yuan, Zhang Xiaofa, et al. Super-resolution range and velocity estimation of moving target in LFMCW radar [J]. Signal Processing, 2010, 26(4): 626 – 630(in Chinese)

[6] 毕欣,杜劲松. 车载 LFMCW 雷达多运动目标探测算法研究[J]. 传感器与微系统,2011,30(6):26 – 29
Bi Xin, Du Jinsong. Study of LFMCW radar multi moving target detection algorithm for automotive application[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2011, 30(6): 26 – 29(in Chinese)

[7] 侯志,缪晨,张金栋,等. 复杂探测背景下的 LFMCW 雷达动目标二维检测方法[J]. 西安电子科技大学学报,2011,38(4):167 – 172
Hou Zhi, Miao Chen, Zhang Jindong, et al. Moving target detection and processing method of LFMCW radar under complex background[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(4): 167 – 172(in Chinese)

[8] Brian C Redman, William C Ruff, Keith Aliberti. Direct detection laser vibrometry with an amplitude modulated ladar[C]//Proc SPIE. Orlando, FL, USA: [s. n.], 2004, 5412: 218 – 228

[9] Wei Yufei, Fei Jindong, Mi Qiang, et al. High resolution ladar for multi-dimension detection: design, modeling and simulation [C]//Proc SPIE. Beijing: [s. n.], 2009, 7382: 73825D

(编　辑:娄　嘉)