

# 激光测速仪平衡探测系统研究

李玉 周健 聂晓明 金世龙

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

**摘要** 为了提高激光测速系统的探测灵敏度,设计了马赫-曾德尔环形结构的平衡探测系统。基于光学多普勒效应,阐述了激光测速系统的工作原理,系统地阐述了平衡探测的实现方法,详细推导了平衡探测系统光电流的表达式,并分析得出其相对于相干探测的优势。利用光电流推导了平衡探测系统信噪比的表达式,并分析影响信噪比的主要因素。仿真实验结果表明:在相同输入光信号条件下,无损耗分束镜的反射率在(0.2908,0.7092)区间内,或两个探测器的光电转换系数的比值在(0.4632,1)之间时平衡探测信噪比高于相干探测的信噪比。将平衡探测应用于多普勒测速,大大增强了测速系统的灵敏度。

**关键词** 信号处理; 差频信号; 双平衡式探测; 光束分束比

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.020401

## Research of Laser Velocimeter Balanced Detection System

Li Yu Zhou Jian Nie Xiaoming Jin Shilong

College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense  
Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** The balanced detection system based on Mach-Zehnder type interferometer is applied to increase the detection sensitivity in laser Doppler velocimeter experimental system. Based on the Doppler effect, the principle of laser velocimeter system and the balanced detection realization method are described, the formula of light current is derived, and its advantages compared with the conventional coherent detection technique are analyzed. The formula of the signal-to-noise, which is derived by light current, is used to attain the influence factors. The simulation results demonstrate that when the reflection coefficient is set in (0.2908,0.7092) or the conversion coefficient ratio of two detectors is set in (0.4632,1), the dual balanced detection technique offers higher signal-to-noise ratio than the conventional detection technique. The sensitivity of the Doppler velocimeter system is strengthened with balanced detection technique.

**Key words** signal processing; beat signal; dual-balanced detection; beam splitter coefficient

**OCIS codes** 040.2840; 040.2840; 060.2630

## 1 引言

近年来随着探测技术的不断发展,高精度、高灵敏度的探测方式变得尤为重要。光学外差现象自1955年首次被Forrester等发现以后,一直备受研究人员的青睐。它在探测接收信号方面的应用,与直接探测各分秋色。随着探测要求的提高和光纤技术的发展,光平衡探测接收的概念被提出<sup>[1-2]</sup>,并获得了一定的发展。平衡探测技术利用光学元件将一束光分成满足干涉条件的两束光,一束为参考光,一束为携带待测信息的信号光。信号光经过分束镜的作用,与参考光有 $180^\circ$ 的相位差。两束光在发生干涉后,干涉信号进入两个参数几乎相同的探测器中,再将探测器的输出信号输入到差分放大器,输出差分信号。在光外差探测中,由于使用单个探测器,需要较高的本振光功率才能获得较高的信噪比,使得本振光功率使用率较低。而平衡探测除了可以抑制部分噪声,其探测功率与信号光和本振光的功率成正比,因此在微弱信号检测等领域占有较大优势。自从平衡探测被提出以来<sup>[3]</sup>,各种基于平衡探测技术的器件不断出现<sup>[4]</sup>,被广泛应用于微

收稿日期: 2015-06-10; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(61308060)

作者简介: 李玉(1990—),女,硕士研究生,主要从事平衡探测方面的研究。E-mail: liyuli0902@126.com

导师简介: 金世龙(1965—),男,博士,教授,主要从事激光陀螺方面的研究。E-mail: s\_l\_jin@hotmail.com(通信联系人)

弱信号检测、精密测量、数字光纤通信等领域<sup>[5-6]</sup>,并应用于激光测风雷达系统、相干差分吸收激光雷达系统和近红外激光相干干涉系统<sup>[7-8]</sup>中。

平衡探测接收方式相对于普通相干探测接收,有很多优势:动态响应范围大,是单源探测的两倍;消除了直流分量,量子散粒噪声也得到抑制;充分利用本振光功率,提高微弱信号的探测精度;探测器中的热噪声和散粒噪声部分被抑制,信噪比提高<sup>[9]</sup>;提高了探测灵敏度;基本消除了环境温度对探测精度的影响。目前国内对平衡探测中探测器参数不同造成差频信号不同的现象,还鲜有研究,本文提出利用一组参数不同的探测器,得到两者的差频信号,通过数据处理结果,验证平衡探测得到的信号是两路探测器接收信号的和。

## 2 原理和数学模型的建立

### 2.1 激光多普勒测速原理

光波在传播的过程中由于发射器、接收器、介质或中间反射器的运动,光波的频率会发生变化,这种现象称为“光的多普勒效应”。激光多普勒效应可以分为两个过程。

1) 光源S发出的频率为 $f_0$ 的激光照射到运动的物体P上,P的速度方向如图1所示,待测物体表面相对于光源以 $\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_i$ 的速度运动, $\mathbf{v}$ 为物体运动速度, $\mathbf{e}_i$ 为光源S到物体P方向上的单位位移矢量。待测目标接收到的光波频率为

$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left( 1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_i}{c} \right), \quad (1)$$

式中 $c$ 为真空中的光速。

2) 待测物体表面散射出频率为 $f_1$ 的光波,探测器Q相对于待测物体以 $-\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_s$ 的速度运动, $\mathbf{e}_s$ 为物体P到接收器Q方向上的单位位移矢量。探测器接收到的光波频率为

$$f_2 = \frac{f_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \left( 1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_s}{c} \right). \quad (2)$$

将(2)式与(1)式联立,可以得出探测器探测到的光波频率:

$$f = f_0 \left( 1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_i}{c} \right) \left( 1 + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_s}{c} \right) \approx f_0 \left[ 1 - \frac{\mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_i)}{c} \right]. \quad (3)$$

探测器接收到的光波频率与光源频率的差为

$$f_D = f - f_0 = f_0 \frac{\mathbf{v} \cdot (\mathbf{e}_s - \mathbf{e}_i)}{c}, \quad (4)$$

此为激光多普勒频移。由(4)式可以看出,激光多普勒频移的大小与物体运动速度、入射角和散射角有关。多普勒测速在实际中有很大的用途,其测速系统不断革新,探测精度和探测灵敏度也不断提高。为了实现更好的探测效果,将平衡探测接收方式应用到多普勒测速系统中,大大提高了探测距离,甚至将探测范围增大了一个数量级。

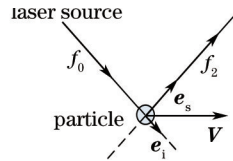


图1 激光多普勒测速原理图

Fig.1 Schematic of laser Doppler velocimeter

### 2.2 平衡探测原理

在实验中,通过马赫-曾德尔环形结构,激光器发出的光经分速镜(BS)后,分成两束互相垂直的光束。其中,一束透射光照射到物体上,经物体散射变成信号光S,另一束经反射镜反射后变为参考光L。平衡探测实验原理图如图2所示,信号光经BS后的透射光和参考光经BS后的反射光在探测器1的光敏面上进行混频,得到光电流 $i_1$ ;信号光经BS后的反射光和参考光经BS后的透射光在探测器2的光敏面上发生干涉;得到光电流 $i_2$ 。 $i_1$ 、 $i_2$ 分别连接到一个差分放大器的正负输入端,则放大器输出的光电流就为信号光和参考光对应的差分电流信号 $i$ 。这种接收方式中应用到的马赫-曾德尔环形结构可以直接适用于单色光源,不必局

限于偏振光束,大大提高了实用性。

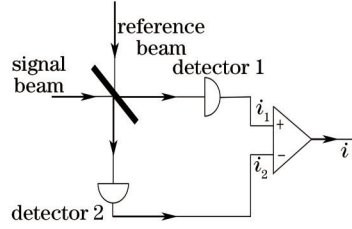


图2 双平衡式探测原理图

Fig.2 Schematic of dual-balanced detection

为了简化问题,假设参考光和信号光都为平面波,两者的电场分量可以表达为

$$\begin{cases} E_s = E_{s0} \cos(2\pi f_s t + \varphi_s) \\ E_r = E_{r0} \cos(2\pi f_r t + \varphi_r) \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $E_{r0}$ 、 $E_{s0}$  分别为参考光和信号光的振幅,  $f_r$ 、 $f_s$  分别为参考光和信号光的波动频率;  $\varphi_r$ 、 $\varphi_s$  分别为参考光和信号光的初相位。

光经过 BS 后,透射光和反射光之间存在一定的关系。在图 3 中,  $E_1$ 、 $E_2$  为输入光,  $E_3$ 、 $E_4$  是经过分束镜后的输出光。

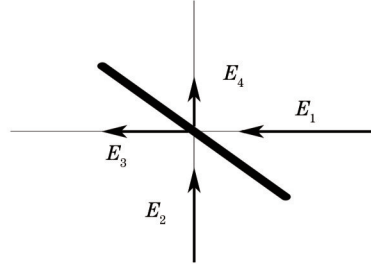


图3 无损耗分束镜示意图

Fig.3 Schematic of lossless beam splitter

设分束镜的反射率、透射率分别为

$$\begin{cases} R = |R| \exp(j\varphi_R) \\ T = |T| \exp(j\varphi_T) \end{cases}, \quad (6)$$

经过分束镜后,输出光可以表示为

$$\begin{cases} E_3 = E_1 T + E_2 R \\ E_4 = E_1 R + E_2 T \end{cases}, \quad (7)$$

由于分束镜是无损耗的,遵守能量守恒定律,由(7)式可以得出

$$|E_1|^2 + |E_2|^2 = (|T|^2 + |R|^2)(|E_1|^2 + |E_2|^2) + (TR^* + T^*R)(E_1 E_2^* + E_1^* E_2). \quad (8)$$

由于(8)式对任意的输入光都成立,因此可以得出无损耗分束镜的特性关系

$$\begin{cases} |T|^2 + |R|^2 = 1 \\ |\varphi_R - \varphi_T| = \frac{\pi}{2} \end{cases}. \quad (9)$$

由此可以知道,从分束镜出射的两束光的相位差为  $90^\circ$ ,反射率和透射率的平方和为 1。

通过对实验原理图的推导,在假设两个探测器的参数相等的基础上,可以得出从探测器输出的光电流为

$$\begin{cases} i_1 = B(E_r T + E_s R)^2 = B\left\{\frac{E_{r0}^2 |T|^2}{2} + \frac{E_{s0}^2 |R|^2}{2} + E_{s0} E_{r0} |R| |T| \cos[2\pi(f_s - f_r)t + (\varphi_r - \varphi_s) + (\varphi_T - \varphi_R)]\right\} \\ i_2 = B(E_r R + E_s T)^2 = B\left\{\frac{E_{r0}^2 |R|^2}{2} + \frac{E_{s0}^2 |T|^2}{2} + E_{s0} E_{r0} |R| |T| \cos[2\pi(f_s - f_r)t + (\varphi_r - \varphi_s) - (\varphi_T - \varphi_R)]\right\} \end{cases}, \quad (10)$$

式中  $B$  为光电探测器的转换系数,它在数值上等于  $\frac{\eta e}{h\nu}$ ,  $\eta$  是探测器的量子效率,  $e$  是电子电荷量,  $h\nu$  是单个光子能量。从(10)式可以得知,两探测器输出的光电流的交流部分在相位上相差  $180^\circ$ 。

经过差分放大器后,输出的光电流为

$$i = i_1 - i_2 = \frac{B}{2} \left\{ (E_{r0}^2 - E_{s0}^2) (|T|^2 - |R|^2) + 4E_{s0}E_{r0}|R||T| \sin[2\pi(f_s - f_r)t + (\varphi_r - \varphi_s)] \sin(\varphi_r - \varphi_s) \right\}. \quad (11)$$

若分束镜的分束比为 50:50,则  $|R|=|T|$ ,经过计算,放大器的输出电流为

$$i = BE_{r0}E_{s0} \sin[2\pi(f_s - f_r)t + (\varphi_r - \varphi_s)]. \quad (12)$$

与单个探测器的输出光电流相比,平衡探测接收技术一方面可以直接消除直流分量,使探测器只能探测到差频交流信号;另一方面,可以使探测器接收到的交流信号幅值增加一倍。此外,若在实验中使用的光电探测器参数一致,则经过差分放大器处理以后,两探测器的共模噪声得到极大抑制,提高了信号的信噪比。

### 2.3 平衡探测的信噪比

假设分束镜的分束比为  $\varepsilon$ ,探测器的光电转换系数不同,探测面积  $S$  相等,根据已经推导出的中频光电流,得知其对应的中频功率

$$P_s = \left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 SE_{s0}^2 E_{r0}^2 \varepsilon (1 - \varepsilon) R. \quad (13)$$

平衡探测器的主要噪声可以分为散粒噪声、过量强度噪声和热噪声。探测器的散粒噪声是由光子的量子特性决定的,是不可消除的,是主要的噪声来源;过量强度噪声在平衡探测系统中,当分束比为 50:50 时,可以完全被抑制<sup>[10]</sup>,这是平衡探测系统的一大优势;热噪声普遍存在于导体半导体中,是系统中噪声的主要组成部分。因此

$$P_{\text{noise}} = 2 \frac{\eta e^2 S}{h\nu} (1 - 2\varepsilon) E_r^2 \Delta f R + V(n_{\text{ex1}} - n_{\text{ex2}}) + 4k_b T \Delta f / R, \quad (14)$$

式中的第一项是散粒噪声功率,第二项为通过方差  $V$  来描述的过量强度噪声的功率,第三项为热噪声功率,  $R$  为探测器的等效电阻,  $k_b$  是玻尔兹曼常数,等于  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。  $R$  是负载电阻,  $\Delta f$  是带宽。由于平衡探测器的参数一致,故不考虑强度过剩噪声。由于信号光的功率远小于参考光的功率,因此只保留本振光功率。

最后综合考虑(13)式、(14)式和信噪比的定义,得到平衡式外差探测的信噪比公式:

$$f_{\text{SNR}} = \frac{\left( \frac{\eta e}{h\nu} \right)^2 SE_{r0}^2 E_{s0}^2 \varepsilon (1 - \varepsilon) R}{2 \frac{\eta e^2 S}{h\nu} (1 - 2\varepsilon) E_{r0}^2 \Delta f R + V(n_{\text{ex1}} - n_{\text{ex2}}) - 4k_b T \Delta f / R}. \quad (15)$$

为了进一步展现平衡探测器的优势,如果只考虑散粒噪声,单源探测器的信噪比就可以表示为<sup>[10]</sup>

$$f_{\text{SNR}} = \frac{\eta E_s^2}{h\nu \Delta f}. \quad (16)$$

在推导普通相干探测信噪比和平衡探测信噪比时,假设所用的光电接收器件的参数不完全相同。因此分束比和光电转换系数都是平衡探测系统信噪比的影响因素。

## 3 Matlab 模拟仿真

为了直观地表示出平衡探测和普通相干探测的优缺点,用 Matlab 进行仿真。假设实验中所用的探测器器件完全相同,即  $\eta$  相等,散粒噪声远大于热噪声和过量噪声,那么信噪比可以简化为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{2\eta E_s^2 \varepsilon (1 - \varepsilon)}{h\nu \Delta f (1 - 2\varepsilon)}. \quad (17)$$

仿真结果如图 4 所示,红线和蓝线分别表示平衡探测和普通相干探测的信噪比随着分束比的变化。通过仿真结果得出,  $A$ 、 $B$  点是平衡探测与普通相干探测信噪比曲线的交点,横坐标分别对应 0.2908、0.7092。当分束比在 (0.2908, 0.7092) 时,平衡探测的信噪比要高于普通相干探测信噪比,在 (0, 0.2908) 和 (0.7092, 1) 时,普通相干探测的信噪比高于平衡探测;当透射率为 0.5 时,信噪比达到最大值<sup>[11]</sup>。

从图 4 的结果看出, 50:50 是最合适的分束比。假设两个探测器的转换系数可以表示为  $\eta_1 = k\eta_2$ , 其中

$k \in [0, 1]$ , 当  $\varepsilon=0.5$  时, 平衡探测的信噪比可以表示为

$$f_{\text{SNR}} = \frac{\eta E_s^2 (1+k)^2}{4h\nu\Delta f(k-1)}. \quad (18)$$

仿真结果如图5所示, 通过仿真结果可知,  $C$  点是平衡探测和普通相干探测信噪比曲线的交点, 对应的坐标为  $(0.4632, 1)$ 。这表示, 在  $(0.4632, 1)$  区间内, 平衡探测的信噪比高于相干探测。从图5也可以看出, 在  $k=1$  时, 即探测器的转换系数相等时, 平衡探测的信噪比最大。

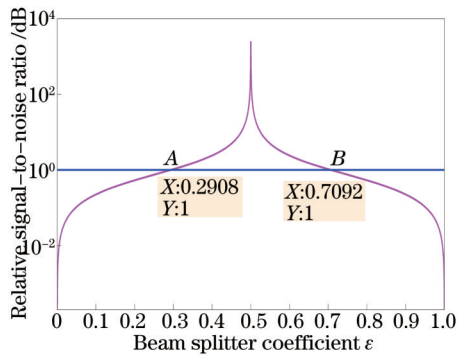


图4 分束比对信噪比的影响对比图

Fig.4 Comparison chart of signal-to-noise ratio change with splitter coefficient

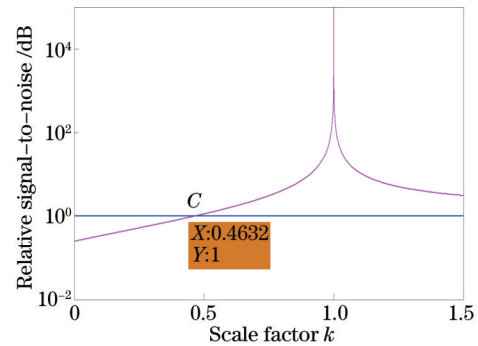


图5 比例系数对信噪比的影响对比图

Fig.5 Comparison chart of signal-to-noise ratio change with scale factor

## 4 实验验证

Matlab 仿真结果显示, 当分束比为 50:50 时, 探测信号的信噪比达到最大。为了实现最好的探测效果, 实验中用到的分束镜的分束比都是 50:50。在探测器的转换系数不同的情况下, 探测到的信号幅值有一定的区别, 两路光信号相差  $180^\circ$ , 可以很清楚地示波器上看到(为了使显示结果对比明显, 在探测器 1 的实际结果上加 8 V), 如图 6 所示。

两路探测信号通过傅里叶变换后, 可得到频域信号。将两路信号经过差分处理后, 探测信号的幅值增大。在图 7 中, 红线表示探测器 1 的输出信号, 绿线表示探测器 2 的输出信号, 蓝线表示经过差分放大器处理后的差频信号。

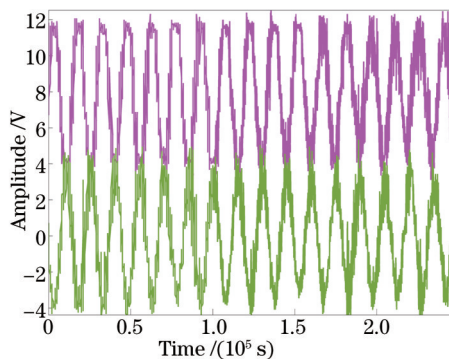


图6 两个探测器信号的相位关系

Fig.6 Relationship of phase between signals of two detectors

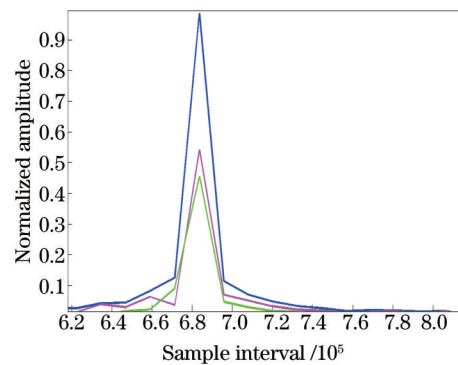


图7 差分信号与探测器信号的关系

Fig.7 Relationship between differential signal and signals of two detectors

从(11)式可知, 经过差分处理后, 差频信号的幅值应该是两个探测器的幅值之和。从图7可以看出, 两个探测器探测幅值相加后与差分处理后的结果大体相等。存在误差的原因可能是两个探测器放置的位置、接收到的信号对应的斩波器的位置稍有不同, 信号携带的幅值和相位不同, 导致在差分处理时得到的幅值不完全等于两个探测器幅值之和。

## 5 结论

叙述了激光多普勒测速和光外差平衡探测的原理, 并分析了无损耗分束镜下透射率和反射率的关系,

从数学模型上说明了平衡探测接收方式的优越性。推导了信噪比表达式,并通过 Matlab 仿真验证了:在同等输入条件下,当分束比为(0.2908,0.7092)或探测器的转换效率之间的比值为(0.4632, 1]时,平衡探测的信噪比高于相干探测信噪比;同时也论证了当分束比为 0.5,两个探测器参数一致时,平衡探测的信噪比最高。通过实验发现,在探测器接收同一级次混频信号时,平衡探测接收能将两个探测器的接收信号差分处理,实现信号相加。

### 参考文献

- 1 Hannon S M, Henderson S W. Performance of a 2- $\mu\text{m}$  coherent Doppler lidar for wind measurement[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(6): 1517-1528.
- 2 Kimio A, Takayuki Y, Yoshihito H. 1.5- $\mu\text{m}$  eye safe coherent lidar system for wind velocity measurement[C]. SPIE, 2001, 4153: 321-328.
- 3 Sung C K, Dan A, Byeong O L, *et al.*. High-performance 94 GHz single balanced mixer using 70 nm MHEMTs and surface micromachined technology[J]. Electron Device Letters, 2006, 27(1): 28-30.
- 4 Shpantzer I. Fieldable digital coherent interferometric communication and sensing application domains[C]. Coherent Optical Technologies and Applications, 2006: CWC1.
- 5 Chen Y, Bruin D M D, Kerbage C, *et al.*. Spectrally balanced detection for OFDI[C]. SPIE, 2008, 6847: 1-10.
- 6 Abhay J, Becker D, Shubhashish D. Low-noise InGaAs balanced pin photoreceiver for space based remote sensing applications at 2 micron wavelength[C]. SPIE, 2008, 7095: 1-8.
- 7 Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu, *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(2): 347-351.  
许楠, 刘立人, 万玲玉, 等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 347-351.
- 8 Wu Jizhou, Han Qiang, Ma Jie, *et al.*. Research on the adjustable balance probe for laser polarization spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2601-2606.  
武寄洲, 韩强, 马杰, 等. 可调平衡探测激光偏振光谱研究[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2601-2606.
- 9 Gao Long, Wang Chunhui, Li Yanchao. Theory analysis of polarization mixing error in dual-balanced heterodyne detection [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3): 422-426.  
高龙, 王春晖, 李彦超. 双平衡式外差探测中的偏振混合误差理论分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 422-426.
- 10 Yuen H P, Chan V W S. Noise in homodyne and heterodyne detection[J]. Opt Lett, 1983, 8(3): 177-179.
- 11 Pang Yajun, Gao Long, Wang Chunhui. Analysis of IQ demodulation and signal noise ratio for 2  $\mu\text{m}$  dual-balanced heterodyne detection[J]. Chinese J 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.

栏目编辑: 刘丰瑞