

基于水下激光探测的高速瞬态光信号获取技术

梁善勇, 王江安, 石晟玮, 马治国

(海军工程大学电子工程学院光电研究所, 湖北 武汉 430033)

摘要:基于水下激光后向散射光信号检测技术, 针对微弱高速瞬态光信号接收系统中所要求的宽频带、低噪声等关键技术指标, 将 MMIC 技术和电磁兼容性理论应用于高速瞬态光信号接收系统的设计过程中。测试与仿真比较的结果表明, 利用本文技术搭建的微弱高速瞬态光信号检测平台得到的实验信号失真小质量高, 完全可满足实验的需要。

关键词:气泡; 后向散射; 高速瞬态光信号; MMIC

中图分类号: TN249

文献标识码: A

Study of the High-speed Transient Light Signal Acquisition Technique in Underwater Laser Detection

LIANG Shan-yong, WANG Jiang-an, SHI Sheng-wei, MA Zhi-guo

(Academy of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The microwave MMIC technique and EMC theory are introduced in the design process of the transient light signal receiver system which is based on underwater laser backward scatter detecting technique to improve some key technology such as the broadband and low noise etc. The compared result of experiment and simulation shows that experiment signals gotten from the transient light signal receiver platform have lower distortion and better quality.

Key words: bubble; backward scattering; transient light signal; MMIC

1 引言

舰船在航行过程中, 尾部会形成一条含有大量气泡的气幕带^[1], 这就是尾流。由于气泡的存在, 海水的光学特性与无气泡时会有显著的区别。从而为实现鱼雷激光尾流制导提供了可能。目前, 国内多家单位进行了水下激光探尾流实验^[2-3]。

实验中由于接收器性能的原因, 得到的信号可能会产生失真, 使得后续研究受到限制。问题在于, 接收器在放大微弱高速瞬态光信号时, 性能表现不佳。光信号接收器带宽不够、干扰、噪声大与光速快、探测

总路径短、精度要求高的矛盾未能得到合理解决。

针对这个问题, 本文基于以下技术, 完成了对接收器的设计利优化: 将微波 MMIC 技术和电磁兼容性理论应用于高速瞬态光信号接收器的设计过程中; 从原理上充分考虑接收器的带宽和噪声等关键性能, 从而搭建了高速微弱瞬态光信号的检测平台, 测试结果与仿真结果作比对, 表明得到的信号失真小质量高。

作者简介: 梁善勇 (1983 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光水下目标探测。E-mail: liangshanyong12@sina.com

收稿日期: 2007-12-11

2 基于后向散射的气泡探测实验的原理

2.1 实验系统

实验系统如图1所示,由脉冲激光器、气泡产生装置、光信号接收器以及数据采集装置组成。其中,激光器选用532nm 同体脉冲激光器,输出功率为20mJ、脉宽10ns、发散角小于2mrad。气泡幕产生装置由气压可变式空气压缩机配合微孔陶瓷管阵列产生,气泡大小和密度可调。信号接收装置主要完成对微弱高速瞬态光信号的接收和放大功能,得到的信号直接由示波器观察并保存于计算机中,供后续研究。

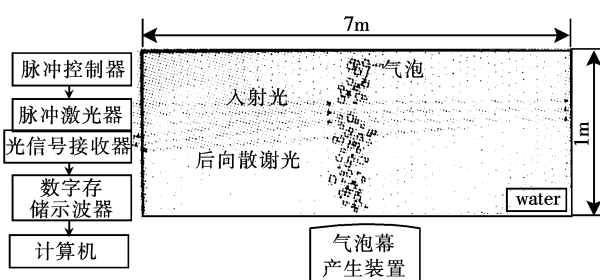


图1 气泡探测实验装置示意图

Fig.1 sketch map of the experiment for detecting bubble

2.2 实验系统仿真

设 c 为光速, τ 为发射激光脉宽, A 为接收器面积, $\beta(\pi)$ 为散射角为 π 时的散射相位函数, r 为散射点处到接收机的距离, σ 为衰减系数, σ_s 为散射系数,则水下目标的后向散射信号接收功率可由如下激光雷达方程表示为^[4]:

$$P_1(r) = P_0(c\tau/2)A[\beta(\pi)/r^2]\sigma_s \exp(-2\sigma r) \quad (1)$$

根据实际的实验设备与条件,设置模拟参数。仿真得到气泡幕位于3.5m处的实验结果,如图2所示。

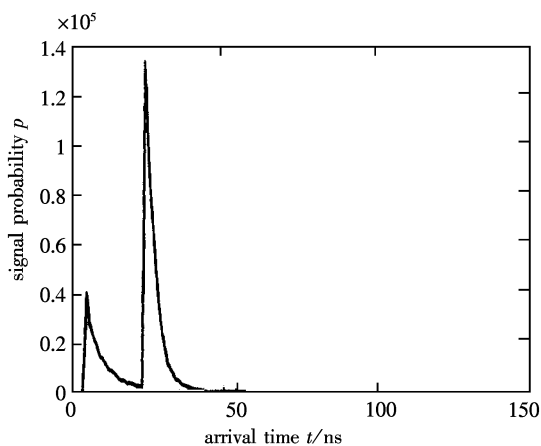


图2 气泡位于3.5m处的仿真结果

Fig.2 the simulation of signal(3.5m)

可以看到图2中出现两个峰。第一个峰是由激光短脉冲发射后近场水体的后向散射光形成的;第二个峰是由气泡幕的后向散射光形成的。仿真中未考虑激光脉冲宽度对接收信号的展宽问题。

3 高速瞬态光信号接收器设计中的关键技术

光信号接收器的结构框图如图3所示。入射光通过接收光学系统聚焦在APD的光电面上,数控APD偏压电源通过安装在APD附近的测温芯片得到温度值,进而自动调节APD的偏置电压,低噪声宽带放大器将APD输出的高速电信号放大,最终通过50Ω端接后,通过SMA由同轴电缆馈至示波器50Ω输入端。

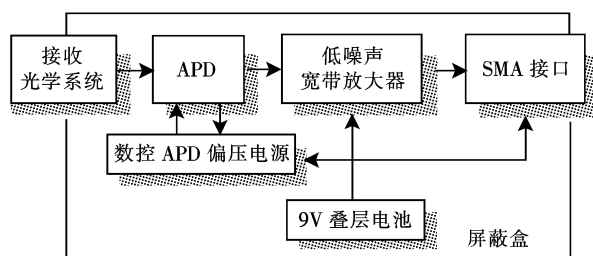


图3 高速瞬态光信号接收器的结构框图

Fig.3 the fabric scheme of high-speed light signal receiver

3.1 电磁兼容性的考虑

对脉冲方式工作的大功率激光器来说,出光速度快、持续时间短、功率大的特点通常会导致激光器电源瞬时吸入电流非常大,这种瞬变的大电流会在激光器、激光器电源箱以及电源线周围产生强电磁辐射。若处理不当,会导致接收器不正常工作以及示波器干扰。使用AT5011频谱分析仪的E和M场嗅觉探头寻找干扰源,发现各处辐射都很强,1.5GHz以下几乎全频干扰。由于屏蔽辐射源(激光器)难度较大,因此主要通过处理接收器敏感电路的方法来降低干扰,方法如下:

(1)将APD偏置电路和宽带放大器放入带光学系统的铝制屏蔽盒内^[5],示意图如图3所示;

(2)PCB背面大面积铺地,并与外壳大面积接触,信号BNC安装在铝盒上,以减少感性因素;

(3)示波器电源线不要扎成一团,以免形成环路电压;

(4)屏蔽盒内部使用9V叠层电池供电。

APD输出端处理前干扰的最大峰值790mV,经过处理后,被压制到1.5mV以下,使得15mV左右

的 APD 输出信号清晰地展示在示波器屏幕上。处理前后效果对比如图 4 和图 5 所示。

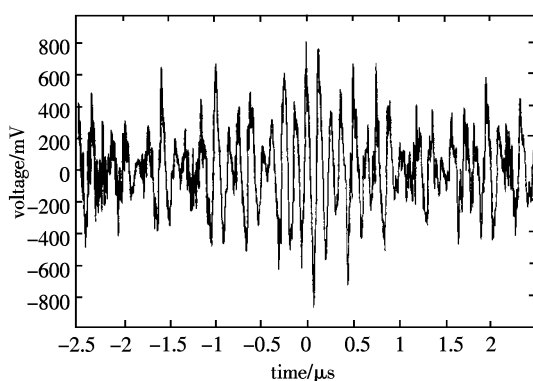


图 4 处理前 APD 输出信号

Fig. 4 the former output of APD

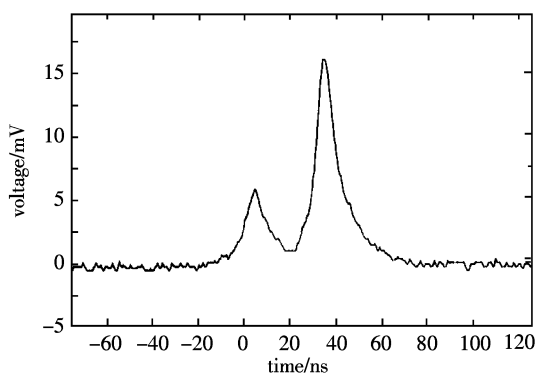


图 5 处理后 APD 输出信号

Fig. 5 the later output of APD

3.2 宽带放大器的设计考虑

对于本实验探测总路径短、精度要求高、光速快的特点,必然对电路带宽提出了更高的要求。若带宽不能达到,其输出信号会有一积分效应,两个峰将分不开瓣,图 6 是我们使用 15MHz 放大器的实验结果,可以看出,由于带宽不够,两个峰分辨不清,且瞬态脉冲被展宽,出现较长的拖尾。

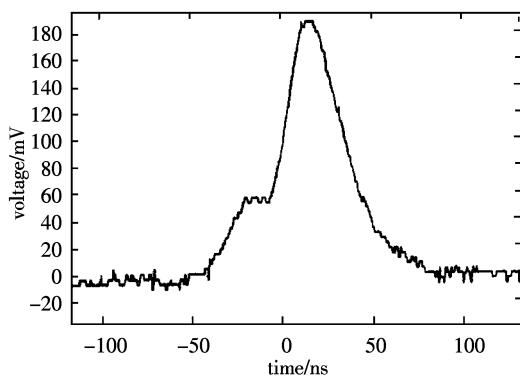


图 6 发生拖尾的输出信号

Fig. 6 the signal with drawn tail

选用微波射频集成电路 MMIC 作为 APD 的放大器核心部件,可较好地解决带宽问题。另外,相比于运算放大器,MMIC 的优势还体现在噪声较低,群延迟稳定。将现代微波技术应用于高速瞬态光信号的检测上,进行相应改进,经实验证明,可取得较好效果,示意图如图 7 所示。

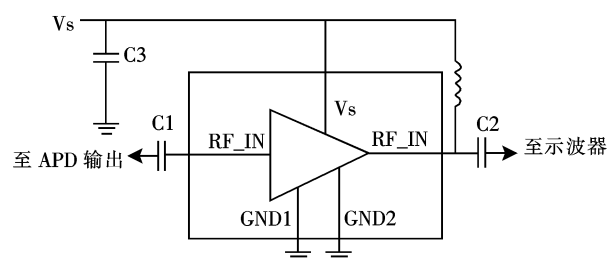


图 7 宽带放大器示意图

Fig. 7 the sketch map of wide-band amplifier

若 MMIC 外围使用推荐值,可能会出现下冲现象,如图 8 所示。原因是低频响应不好,这时,隔直电容 C1、C2 分别和输入、输出的 50Ω 端接组成了两个微分器,通过加大输入输出电容来降低截止频率,可解决这一问题,处理后信号如图 9 所示。

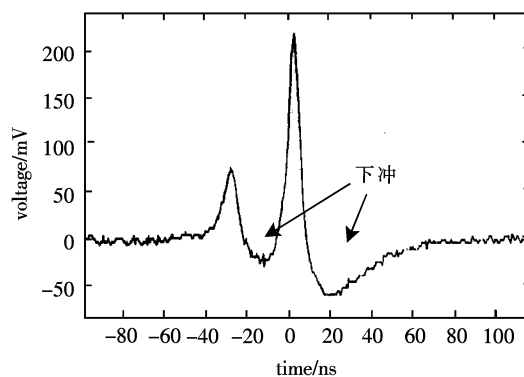


图 8 出现了下冲现象的输出信号

Fig. 8 the signal with undershoot

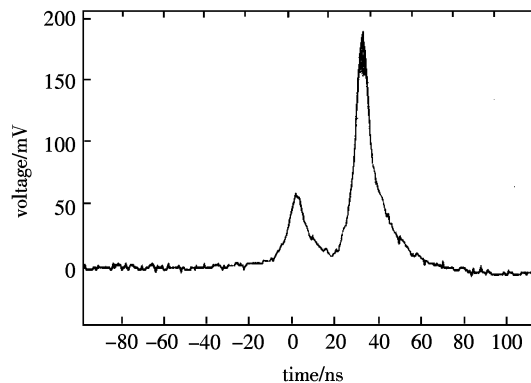


图 9 接收系统的最终输出信号

Fig. 9 the final output of receiver system

另外,要注意芯片的去耦问题,防止明显的地弹导致的输出信号失真。

3.3 系统噪声的考虑^[6]

N 级联整体噪声系数可以表示为:

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{K_{p1}} + \frac{NF_3 - 1}{K_{p1} \cdot K_{p2}} + \cdots + \frac{NF_n - 1}{K_{p1} \cdot K_{p2} \cdots K_{p(n-1)}} \quad (2)$$

对于雪崩光电二极管这种光电转换器件来说,内增益通常较高。式(2)中的 K_{p1} 就能用 M^2 代替。显然地,当 $M^2 \gg NF^2 - 1$, $M^2 K_{p2} \gg NF_3 - 1$, $\cdots$, 式(2)能很好的近似为:

$$NF = NF_1 \quad (3)$$

这说明高速瞬态光信号接收系统的噪声系数近似等于 APD 的噪声系数。因此,可以考虑选用低噪声高增益 APD 来降低探测系统总噪声,提高系统探测能力。

另外,工程上常用对数关系表示放大器的噪声系数,定义为:

$$NF = 10 \lg \left(1 + \frac{\bar{u}_{na}^2 + \bar{i}_{na}^2 R_s^2}{\bar{u}_{ns}^2} \right) \quad (4)$$

其中, u_{na} 表示放大器内部的等效噪声电压; i_{na} 表示输入端并联电阻为无穷大时的噪声电流; u_{ns} 表示信号源的噪声电压; R_s 是源电阻。

如果 $\bar{u}_{na}^2 = \bar{u}_{na}^2 + \bar{i}_{na}^2 R_s^2$, 即一半噪声是信号源(APD)产生的,那么这时 $NF = 3\text{dB}$ 。因此,当 $NF < 3\text{dB}$ 时,再减小放大器的噪声意义不大,这时不应再对放大器提高要求,而应在减小 APD 的噪声方面做工作。

3.4 示波器上升时间考虑

在观察纳秒级的高速瞬态信号时,有必要考虑示波器的带宽局限性^[7]。为了更好地说明这一效应,我们把示波器分成输入信号、探头和垂直放大器等部分。设它们的上升时间分别为 $T_1, T_2, T_3, \cdots$, 则:

$$T_{\text{总上升时间}} = (T_1^2 + T_2^2 + \cdots + T_N^2)^{1/2} \quad (5)$$

式(5)的结果并不精确,而只是一个趋势,告诉我们实际的上升时间会比示波器上看到的上升时间要短,在获取信号的时候要考虑这一点。其实,为了得到更精确的上升时间,可使用速度更快的示波器。

4 实验结果分析

基于上述设计中关键技术的解决,制作出高速光信号接收系统硬件电路,并按照图 1 所示搭建实验平台。

首先,在不连接放大器的情况下,使用示波器观察雪崩光电二极管的输出信号,如图 5 所示。之后,加入宽带放大器,搭建光信号接收器系统,观察回波信号如图 9 所示。

图 2、图 5、图 9 分别是目标位于距离激光器 3.5m 处时,仿真、APD 输出、接收器系统所探测到的回波信号。回波信号在波形上出现了两个峰。第一个峰是由近场水体的后向散射光形成的;第二个峰是由气泡幕的后向散射光形成的。两个峰的时间差约 28ns,正好对应 3.5m 距离。上升时间小于 7ns,几乎不出现下冲现象,总噪声较小,信号质量较高。

可以看出,接收器系统几乎是将 APD 输出信号无失真的放大,且和仿真结果也非常逼近。

5 结 论

实验证明,运用以上技术,对 3.5m 处气泡进行探测。回波信号的仿真结果、APD 结果和接收器系统的结果非常接近,时间分辨好、噪声小、波形质量较高。解决了近距离高精度水下瞬态光信号探测中的一项关键技术。

参考文献:

- [1] Pereira F, Gharib M, Dabiri D, et al. Instantaneous whole field measurement of velocity and size of air microbubbles [C]// Tenth International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Portugal, 2000, 38 (4): 1-11.
- [2] 饶炯辉, 杨克成, 张晓晖, 等. 采用脉冲激光探测模拟的舰船气泡尾流[J]. 光学与光电技术, 2007, 5(7): 40-42.
- [3] 易媛媛, 杨克成, 张晓晖, 等. 激光在水中气泡微粒的后向散射特性[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 38-41.
- [4] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. Appl. Opt. 1981, 20(2): 211-220.
- [5] Eric Bogatin. 信号完整性分析[M]. 李玉山, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 9-10.
- [6] 安毓英, 曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 137-142.
- [7] Howard Johnson, Martin Graham. 高速数字设计[M]. 沈立, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 65-105.