

·光电系统·

近地层紫外自由空间通信微弱信号放大器设计

成中涛^{1,3}, 吴晗平^{1,2}, 吴晶^{1,2}, 黄俊斌², 王华泽¹

(1. 武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205; 2. 海军工程大学, 湖北 武汉 430033;
3. 浙江大学光电信息工程学系, 江苏 杭州 310027)

摘要: 针对近地层自由空间紫外通信信号微弱的特点, 在阐述紫外信号调制方式的基础上, 提出了放大器的选频特性及其指标。围绕预定的指标要求设计了选频电路和三级放大电路, 通过增益调整电路进行增益的补偿和微调, 使总体特性曲线可以满足实际使用的需求。用 Multisim 进行放大器仿真, 结果表明: 该放大器在 30 kHz 和 50 kHz 两个中心频率具有 10 000 ~ 100 000 之间连续可调的放大倍数, 中心频率附近的带宽约 2 kHz, 等效输入噪声电压 $\leq 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @30 kHz、50 kHz。设计中采用了低噪声器件, 使放大器更适合用于近地层微弱紫外信号的放大, 这对实际工作有一定的参考意义。

关键词: 紫外光通信; 自由空间; 微弱信号; 放大器; 技术设计

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-1255(2012)04-0001-06

Design of Weak Signal Amplifier of UV Free Space Communication near Surface Layer

CHENG Zhong-tao^{1,3}, WU Han-ping^{1,2}, WU Jing^{1,2}, HUANG Jun-bin², WANG Hua-ze¹

(1. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan University of Engineering, Wuhan 430205, China;
2. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 3. Department of Electro-optical Information Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: According to the characteristics of the UV communication signals in free space near surface layer, based on the modulation methods of UV signals, the frequency-choosing characteristics and specifications of amplifiers are proposed. Based on the predetermined specifications, frequency-choosing circuits and three-level amplification circuits are designed. The overall characteristic curves can meet the requirements of actual application for gains modulation circuits, which can perform gain compensation and gain trimming. The simulation results by Multisim shows that: the amplifier has continuously adjustable gains magnification between 10 000 ~ 100 000 at the center frequency of 30 kHz and 50 kHz. And the bandwidth near center frequency is about 2 kHz, the equivalent input noise voltage is $\leq 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @30 kHz、50 kHz. The amplifier is more suitable for magnifying weak UV signals near surface layer for using low-noise apparatus, which provides certain reference value for actual application.

Key words: UV optical communication; free space; weak signal; amplifier; technical design

紫外光在近地层大气中的传输特性使得其在通信方面具有低窃听率、抗干扰能力强、非视距通信等众多优势, 因而得到了越来越多的重视^[1-3]。然而, 紫外信号在自由空间中散射传播的特点使得光信号

到达接收机时衰减很严重, 经过光电转换之后的电信号将十分微弱, 而且器件本身的噪声可能比信号强得多。所以设计一个合适的放大器是保证接收系统能正常检测并解调出原始信息的关键。

收稿日期: 2012-06-16

基金项目: 技术基础项目子课题(YJMG-2012GH-001)

作者简介: 成中涛(1990-), 男, 湖北汉川人, 硕士研究生, 主要研究方向为紫外通信系统电路设计; 吴晗平(1964-), 男, 湖南澧县人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。

1 放大器技术要求与结构组成

对于紫外光通信,常用的调制方法是二进制频移键控(2FSK),这种调制方式可以通过电子镇流器驱动紫外气体放电灯来实现^[4]。文中设计了对应的频移键控载波为:发送“1”时对应50 kHz的正弦波,发送“0”时对应30 kHz的正弦波。因此放大器需要兼有滤波的特性,即选频放大。提出放大器的选频特性如图1所示。

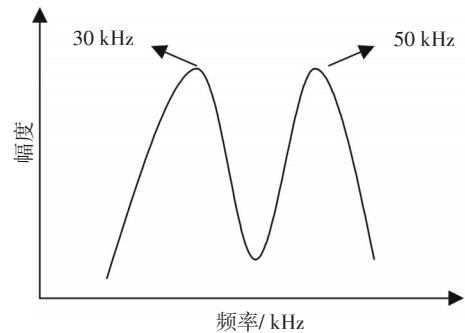


图1 放大器的选频特性示意图

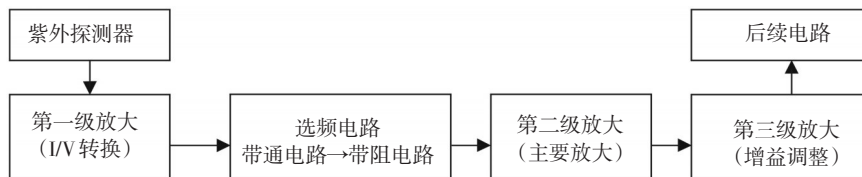


图2 放大器整体结构图

放大器主要技术指标如下:(1)总放大倍数:要求在10 000~100 000之间连续可调;(2)通带中心频率:30 kHz,50 kHz;(3)通带中心频率附近带宽:2 kHz;(4)放大器输入等效噪声电压: $\leq 5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 30 kHz、50 kHz。放大器整体结构图如图2所示。

2 选频电路设计

2.1 选频电路结构与指标

要得到如图1所示的选频特性,可以采用带通电路与带阻电路串联的结构形式,而带通电路又可以

表1 各部分单元电路的指标

		截止频率/kHz	衰减速度/(dB/10倍频)	带通宽度/ 阻带宽度/kHz	通带增益/dB
带通	低通	$f_L = 51$	80	22	0
	高通	$f_H = 29$	80		0
带阻		$f_{p1} = 31, f_{p2} = 49$	40	18	0

用低通电路和高通电路串联。为了达到总体指标要求,对这些单元电路提出更细化的指标如表1所示。表1中,对低通,高通以及带阻电路的截止频率均留有1 kHz的余量,这是因为考虑到信号在传播过程中可能有微小的频移。

2.2 选频电路设计

图3a给出了带通滤波器的电路图。该带通滤波器由低通和高通电路组成。低通部分由2个二阶巴特沃斯低通滤波器串联成一个4阶的巴特沃斯低通滤波器。高通部分也是类似构成。

以图3a中低通电路为例,取 $R_2 = R_5 = R_6 = R$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C$ 。设计中先选定 C 的大小,由 $f_L = \frac{1}{2\pi RC}$ 确定 R 的值。对于由2个二阶巴特沃斯低通滤波器串联成的4阶电路,前一个2阶电路的增益必须为1.152,即满足 $1 + \frac{R_3}{R_4} = 1.152$;后一个2阶电路增益必须为2.235,即满足 $1 + \frac{R_7}{R_8} = 2.235$ 。只有同时达到这2个增益要求才能保证幅频特性曲线在截止频率处的平坦性,而这也是巴特沃斯滤波器滤波特性的基本特点^[5]。在确定 R_3 、 R_4 、 R_7 、 R_8 的值时还要尽量保证运放同相输入端和反向输入端的

直流等效电阻相等。根据这些要求可以确定低通电路各元件的取值如图3a所标示。采用类似的方法可以确定高通电路的元件参数取值。

在前面的分析中看到,一个4阶低通滤波器和一个4阶高通滤波器的通带放大倍数相同,均应该是 $1.152 \times 2.235 = 2.575$,那么整个带通滤波器的增益为 2.575^2 。为了能使带通电路的通带增益为0 dB,这里采用了电阻分压来调整了增益,具体见图3a中的电阻 R_1 和 R_{22} 。利用戴维南定理可知,当这两个电阻造成的增益衰减满足 $\frac{R_{22}}{R_{22} + R_1} = \frac{1}{2.575^2}$ 时就能达到要求。此外,这2个电阻的等效阻值必须等于前面已经确定了的 R 才不致改变电路的滤波特性,从而可以得到关系式 $\frac{R_1 R_{22}}{R_1 + R_{22}} = R$ 。由这两个约束条件就可以确定电阻 R_1 、 R_{22} 的大小。

带阻滤波器电路图见图3b。其中的电阻取值之间满足关系 $R_1 = R_2 = R$, $R_5 = \frac{R}{2}$,电容取值满足关系 $C_1 = C_2 = C$, $C_3 = 2C$ 。

通带截止频率为

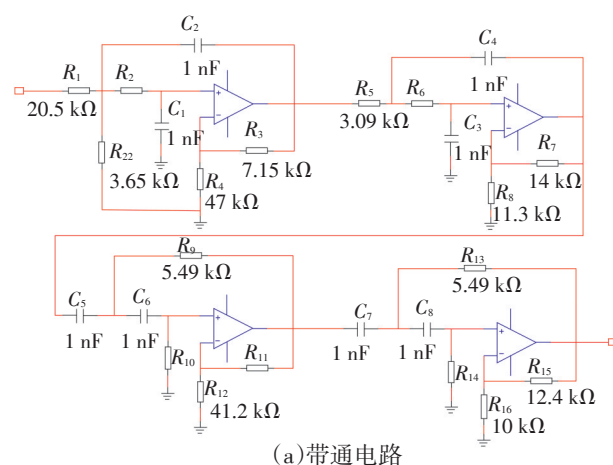
$$f_{p1} = \left[\sqrt{(2 - A_{up})^2 + 1} - (2 - A_{up}) \right] f_0 \quad (1)$$

$$f_{p2} = \left[\sqrt{(2 - A_{up})^2 + 1} + (2 - A_{up}) \right] f_0 \quad (2)$$

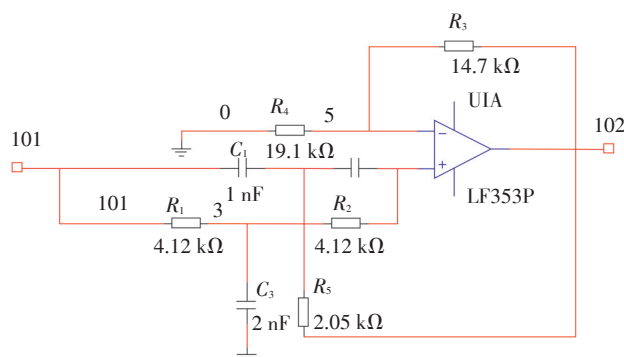
式中, f_0 是中心频率,且 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$;通带增益 $A_{up} = 1 + \frac{R_3}{R_4}$ 。

通过式(1)、式(2)联立方程,并代入设计指标所要求的 f_{p1} 、 f_{p2} ,可以解出 A_{up} 和 f_0 。再取定 C 的值,则可以算出 R 的大小。和之前的讨论类似, R_3 和 R_4 的取值除了考虑增益 A_{up} 外,还要尽量保证运放同向输入端和反向输入端的直流电阻相等。计算结果已标示在图3b中。

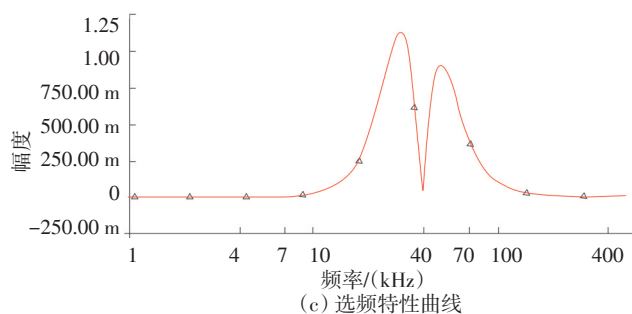
选频环节的幅频特性曲线如图3c所示。由图3c可以看到,在中心频率30 kHz和50 kHz处的增益并不严格相等,这主要是由于计算过程中用了较多的近似和器件的损耗引起的。如果经过后续放大电路的放大,其增益差别会更大。为了进行增益补偿,需要设计对应的增益调整电路。将增益调整电路放在整个放大器的最后一级可以达到很好的调整效果。这将放在下一小节中讨论。



(a)带通电路



(b)带阻电路



(c)选频特性曲线

图3 选频电路图及其选频特性曲线

3 三级放大电路设计

级联放大器中各级的噪声系数对总噪声系数的影响是不同的,越是前级影响越大,第一级影响最大。在设计用于微弱信号检测的低噪声系统时,必须保证第一级的噪声系数足够小^[6]。因此,前置放大器(第一级放大电路)的器件选择和电路设计是至关重要的。通常放大器设计中的运放尽量选择低噪声运算放大器。所设计的三级放大电路如图4所示。其中第一级放大电路和第二级放大电路的放大倍数均为100,第三级放大电路的放大倍数在1~10之间连续可调。

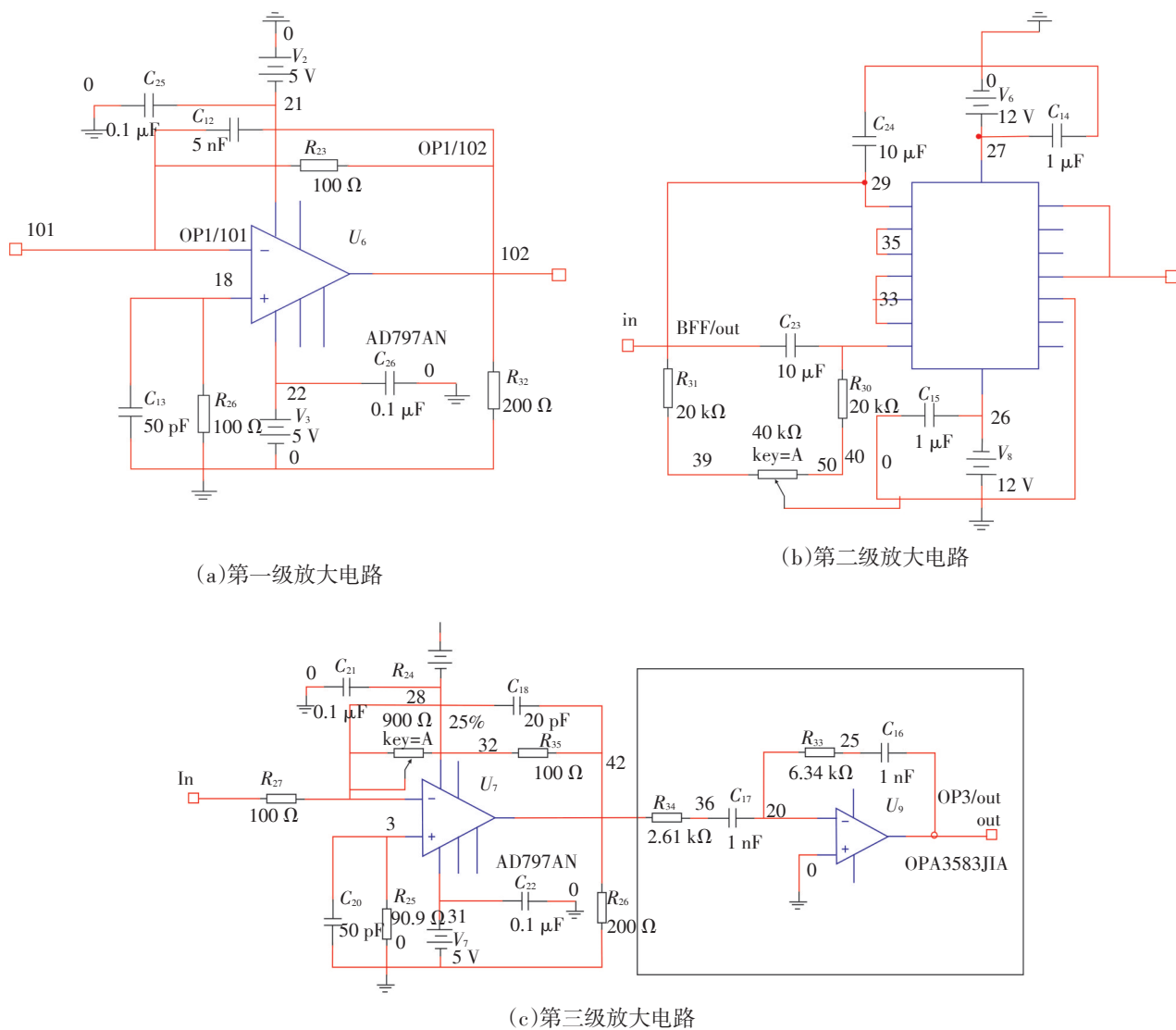


图4 三级放大电路设计

3.1 第一级放大电路

图4a是第一级放大电路,它应该具有 I/V 转换和阻抗匹配的功能,这里设计其放大倍数为100。为了能达到规定的总体指标,即等效噪声谱密度不大于 $5\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,这里选用运放AD797来构成。AD797的主要特点是低噪声(等效噪声电压为 $0.9\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)、低失真度(在 20 kHz 的情况下为 -120 dB)、转换速度快(可以达到 $20\text{ V}/\mu\text{s}$)、其满功率带宽为 280 kHz ,最大输入失调电压为 $80\text{ }\mu\text{V}$ 。利用这些特点对于构成 I/V 转换电路是有益的。

图4a中,电容 C_{25} 、 C_{13} 、 C_{26} 均属于旁路电容,其目的是滤除噪声的影响。通常,紫外探测器存在结电容和结电阻,电阻通常也有寄生电容,这样会使

放大器的频率特性变坏。电容 C_{12} 的目的就是进行相位补偿以防止自激振荡^[7]。此外,为了达到和下一级放大电路的噪声匹配,根据后续器件噪声匹配的需求增加了电阻 R_{32} 作为匹配电阻,其取值为 $200\text{ }\Omega$ 。电阻 R_{23} 作为 I/V 转换电阻,该电路的输入输出关系为 $V_o = -I_i \cdot R_{23}$,其中 I_i 为输入电流信号, V_o 为经过转换的输出电压信号。这里电阻 R_{23} 取值为 $100\text{ }\Omega$,保证了该级电路有100倍的放大能力。

3.2 第二级放大电路

图4b是第二级放大电路,其放大倍数设计为100倍。作为主要放大环节,对其基本要求有以下几点:噪声系数要低;共模抑制能力强;输入阻抗大,输出

阻抗小;输出失真要小。这里选择INA103来构建电路。INA103是一种低噪声、低失真度的精密仪表放大器芯片。其主要技术指标是:等效噪声电压为 $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$;在 1 kHz ,增益100的情况下失真为 0.0009% ;在增益1 000时的带宽也能达到 100 MHz ;共模抑制比大于 100 dB 。

图4b中使用了INA103内部 60.6Ω 的电阻使放大倍数为100。芯片INA103存在着补偿电压失调,必须为其设置偏置电流。当输入电压源有内阻时,偏置电流会在内阻上形成压降,导致同向输入端和反向输入端偏置电压出现差异,成为了差模信号,该信号经放大成很大的直流漂移信号输出。解决办法就是加电阻 R_{30} 、 R_{31} ,滑动变阻器和输入端的耦合电容。通过调节滑动变阻器,可以改变同向和反向输入端的偏置电阻,这样可以改变偏置电压,从而保证两输入端的偏置电流大约相等以抑制直流输出。

3.3 第三级放大电路

图4c是第三级放大电路,要求它具有连续可调的放大倍数。前2级放大电路已经有10 000倍的放大能力,故只需要让第三级电路的放大能力在1~10倍之间连续可调即可。由于在 I/V 转换电路中引入了负的放大倍数,所以此处用反向接入的连接方式以使放大倍数为正。当滑动变阻器阻值为0时,放大倍数为1,滑动变阻器阻值为最大时,放大倍数为10。

图4c矩形框中的电路主要起增益调整作用,即用图1所示的放大器整体幅频特性曲线两个峰值高度尽量相等。该部分电路频率特性曲线如图5所示。

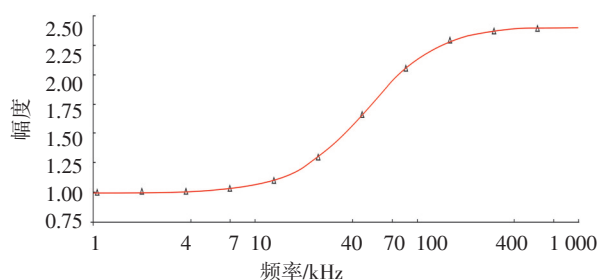


图5 增益调整电路的频率特性曲线

该增益调整电路的系统函数可以表示为

$$F(j2\pi f) = \frac{C_{17}}{C_{16}} \cdot \frac{1 + j\frac{f}{f_2}}{1 + j\frac{f}{f_1}} \quad (3)$$

其中, $f_1 = \frac{1}{2\pi R_{34} C_{17}}$, $f_2 = \frac{1}{2\pi R_{33} C_{16}}$ 。当 $f \rightarrow 0$ 时, $|F| \rightarrow \frac{C_{17}}{C_{16}}$; 当 $f \rightarrow \infty$ 时, $|F| \rightarrow \frac{R_{33}}{R_{34}}$ 。可按如下步骤确定其中电阻电容的取值:首先定义 $\frac{1}{\sqrt{2}}|F|_{f \rightarrow \infty}$ 处对应的频率为 f_H ,则可以得到

$$f_H = \sqrt{f_1^2 - 2f_2^2} \quad (4)$$

再设 $x|F|_{f \rightarrow 0}$ 处对应的频率为 f_L (x 待定),则

$$f_L = f_1 f_2 \sqrt{\frac{x^2 - 1}{f_1^2 - x^2 f_2^2}} \quad (5)$$

设在没有加增益调整电路前两个中心频率的增益比值为 $\frac{A_{f=50 \text{ kHz}}}{A_{f=30 \text{ kHz}}} = K$,为了达到使两个中心频率增益相等的效果,需要满足

$$\frac{\frac{1}{\sqrt{2}}|F|_{f \rightarrow \infty}}{x|F|_{f \rightarrow 0}} = \frac{1}{\sqrt{2}x} \cdot \frac{f_1}{f_2} = \frac{1}{K} \quad (6)$$

增益调整电路不能改变选频特性曲线的中心频率,所以应该让 $f_H = 50 \text{ kHz}$, $f_L = 30 \text{ kHz}$, K 值则可以在仿真图上测出来。联立式(4)~式(6),可以解出 f_1 、 f_2 、 x 的值,再取定电容值后就可以算出电阻的取值了。

4 放大器仿真

放大器的总体频率响应特性曲线如图6所示。由图6可以看到,整个曲线的要求符合预期指标,而且在两个中心频率处的峰值基本一致,这样就体现了增益调整电路的重要作用。

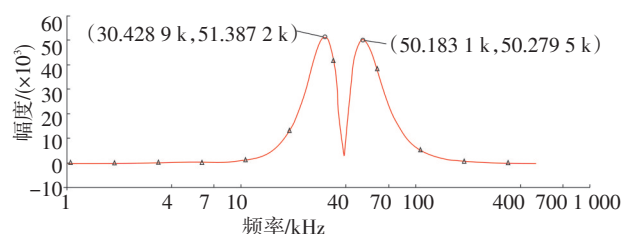


图6 放大器频率特性

对于滤波效果的测试见图7。图7中上面的曲线是混有噪声的 50 kHz 微弱信号,下面的曲线是经过放大器后的输出信号。可见,经过放大器后噪声得到了极大衰减,信号本身的特征得以显现出来。放大器整体噪声特性如图8所示。其中,在低频段起作

用的是 $1/f$ 噪声,中频段起主导的是高斯白噪声,高频段主要是晶体管的分配噪声或场效应管的感应噪声。通过仿真测试,该电路等效输入噪声电压为 $1.042\ 4\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} @30\ \text{kHz}$, $1.486\ 9\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}} @50\ \text{kHz}$,符合指标要求。

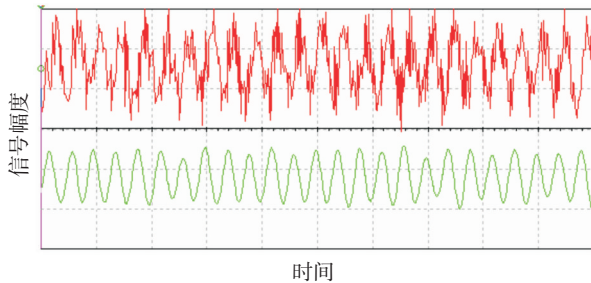


图7 带噪声的信号通过该放大器后的波形

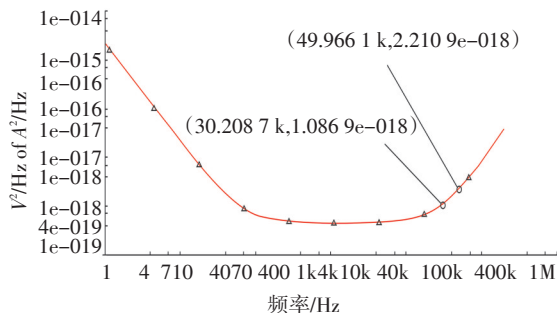


图8 放大器整体噪声功率谱密度曲线

5 结束语

针对紫外信号采用2FSK调制的特点,设计了用于近地层紫外自由空间通信的微弱信号放大器。通过仿真测试表明,整个放大器的设计结果满足技术指标要求。设计中采用了多种低噪声器件,使得该放大器适合用于紫外光通信的微弱信号检测中。另外放大器采用了增益调整电路,可以弥补由于器件损耗和近似计算所带来的中心频率增益不相等的情况,而且放大器的增益还可以根据信号强弱进行调

整,这给使用带来了一定的灵活性。

参考文献

- [1] 吕照顺,吴晗平,周伟,等.近地面红外与紫外自由空间光通信特点及其比较研究[J]. 红外技术,2011,33(4):207-213.
- [2] GRAY A S,MELISSA N,MRINAL I.NLOS UV communication for distributed sensor system[J]. SPIE,2000,4126: 83-96.
- [3] David M.Reilly, Daniel T Moriarty, John A. Maynard. Unique properties of solar blind Ultraviolet Communication systems for unattended ground sensor networks[J]. SPIE, 2004,5611: 244-254.
- [4] 贾红辉,常胜利,杨建坤,等.非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 955-960.
- [5] 蓝天,倪国强.紫外通信的大气传输特性模拟研究[J].北京理工大学学报,2003,23(4):419-423.
- [6] 雷小明,肖沙里,蓝玉侦.日盲紫外光通信系统中调制系统的研制[J]. 光电子技术,2007,27(3):161-165.
- [7] 王平,高俊,王红霞.BFSK的紫外光调制电路设计与实现[J].舰船电子工程,2009,29(9):75-78.
- [8] 熊健,王福明.基于开关电容技术的巴特沃斯滤波器设计及PSpice仿真研究[J]. 现代电子技术,2007,23:174-179.
- [9] ALAN V OPPENHEIM, A LAN S WILLISKY, WITH S HAMID NAWAB.信号与系统[M].刘树棠.西安:西安交通大学出版社,1998.
- [10] 何瑾,刘铁根,孟卓,等.弱光强信号检测系统前级放大电路的设计[J]. 科学技术与工程, 2007, 9(7): 1904-0906.
- [11] 高晋占.微弱信号检测[M]. 2版.北京:清华大学出版社, 2011.
- [12] 杨茂,胡立群,段艳敏,等.微弱光电流信号放大器的设计[J]. 核电子学与探测技术,2011,31(7):734-738.
- [13] 霍戊文,李伟,李进,等.光电探测信号放大器设计[J].浙江理工大学学报,2005,22(3):259-362.

本刊声明

凡向本刊投稿的作者,请按照本刊刊登论文的格式要求写稿,详情见本刊网站 www.gdjsyy.com。本刊拒绝一稿多投,敬请作者自觉遵守!