

业余卫星通信系统

无 28 尹希玲

无 29 陈璋美

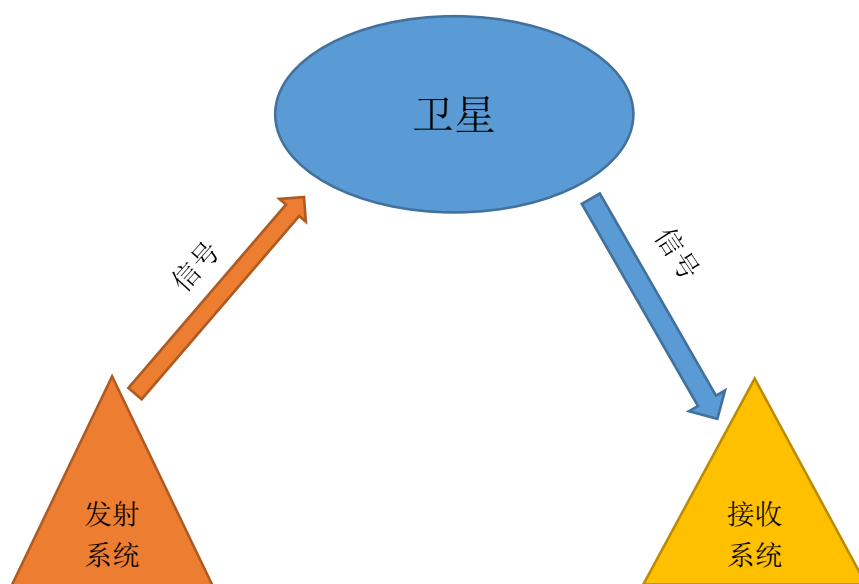
无 29 余金城

无 29 胡亚威

无 25 李昭奇

一 简介

业余卫星通讯简称 OSCAR (Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio)，是利用绕行于地球轨道上的人造卫星，当作无线电通讯的中继器 (repeater)、转频器 (transponder) 或数字中继器 (digipeater)，以达到远程通讯的目的。



如上图所示，发射系统通过发射天线发射出电磁信号后被卫星接收，卫星接收信号后实时发射出接收到的信号，此信号被接收系统接收，以此达到通信的目的。

二 系统设计

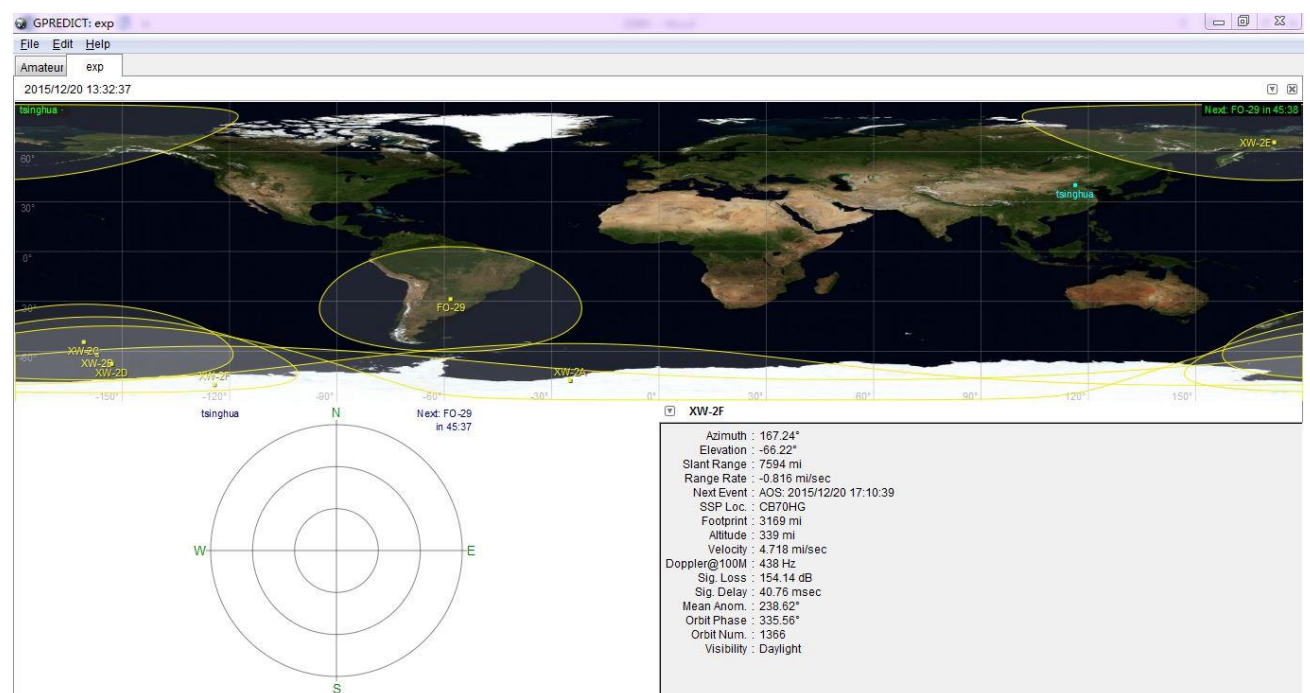
1. 发射系统

1) G-predict

首先，使用软件 **G-PREDICT** 确定卫星的轨迹和到来的时间。**Gpredict** 是一个实时卫星跟踪和轨道预报软件。它可以跟踪无限数量的卫星，并以列表，表格，地图，雷达等方式显示他们的位置和其他数据。它还可以通过一个卫星预测未来的时间，并提供详细资料。

将需要的卫星加入模型后，卫星图像会在软件上显示，同时将我们所在的坐标设定，会通知卫星通过我们头顶上方的时间。同时，可以知道卫星的移动时候的方向以及仰角，配合苹果手机自带的测方位角以及仰角的 **app**，人工使天线指向卫星的方向，可以达到要求（其实关于天线的指向有专门的手机 **APP**，不过因为需要翻墙才能使用，所以放弃）。

需要注意的是软件的初始时间是格林威治时间，需要将其设定为当地时间。



2) 收发信机（车载电台）

通过收发信机，在发射信号时，将低频的数据流转换成射频信号，通过天线将射频信号发送出去，电磁波才可以传播。在接收信号时，通过收发信机，将接收到的射频信号转换成低频信号，最后变成音频信号输出。



3) 发射天线

发射天线为自己制作，频率为 435MHz，会在后文中有详细介绍。

4) CP16

利用 CP16 技术，生成发射音频，利用手机播放，通过发信机的麦克口进入，将其转换成射频信号后通过天线发射。具体 CP16 技术将会在后文中有详细介绍。

2. 使用卫星

本次实验使用的卫星为希望 2 号系列，包括 A、B、C、D、E、F 六颗卫星。其中，XW-2E 在实验中坏掉，不予考虑，微信 ABCD 没有转发功能，我们只能接收卫星自己发

出的信号，所以最后实现使用的还是 XW-2F 卫星。
卫星的收发频率如下（最后使用的是线性转发的频段）：

4. 希望二号系列卫星上行频率：

卫星	频率范围 (MHz)	带宽 (kHz)	应用
希望二 A XW-2A	435.030 - 435.050	20	线性转发 (频谱倒置)
希望二 B XW-2B	435.090 - 435.110		
希望二 C XW-2C	435.150 - 435.170		
希望二 D XW-2D	435.210 - 435.230		
希望二 E XW-2E	435.270 - 435.290		
希望二 F XW-2F	435.330 - 435.350		

卫星	呼号	应用	频率范围 (MHz)	带宽 (kHz)	发射功率 (dBm)	调制体制
希望二 A XW-2A	BJ1SB	数字遥测	145.640	30	20	9.6/19.2kbps, GMSK
		CW 信标	145.660	0.1	17	22wpm, CW
		线性转发	145.665 - 145.685	20	20	
希望二 B XW-2B	BJ1SC	数字遥测	145.705	30	20	9.6/19.2kbps, GMSK
		CW 信标	145.725	0.1	17	22wpm, CW
		线性转发	145.730 - 145.750	20	20	
希望二 C XW-2C	BJ1SD	数字遥测	145.770	30	20	9.6/19.2kbps, GMSK
		CW 信标	145.790	0.1	17	22wpm, CW
		线性转发	145.795 - 145.815	20	20	
希望二 D XW-2D	BJ1SE	数字遥测	145.835	30	20	9.6/19.2kbps, GMSK
		CW 信标	145.855	0.1	17	22wpm, CW
		线性转发	145.860 - 145.880	20	20	
希望二 E XW-2E	BJ1SF	数字遥测	145.890	16	20	9.6kbps, GMSK
		CW 信标	145.910	0.1	17	22wpm, CW
		线性转发	145.915 - 145.935	20	20	
希望二 F XW-2F	BJ1SG	数字遥测	145.955	16	20	9.6kbps, GMSK
		CW 信标	145.975	0.1	17	22wpm, CW
		线性转发	145.980 - 146.000	20	20	

3. 接收系统

1) 接收天线

接收天线使用的是老师现有的天线，频率为 145MHz。

2) 低噪声放大器（LNA）

将接收到的信号通过低噪声放大器进行放大后再由信机转换成音频信号，在后文中进行详细介绍。

3) 收信机



背面有音频口，音频可以直接输出到电脑。

4) SDR-Sharp

SDR-Sharp 是一个对音频进行频谱分析的软件，可通过声卡输入信号，配合 CP16 使用，将收信机接收到的音频直接输入电脑，利用 SDR-sharp 可以看到其频谱。

三 系统实现

1. 发射天线制作

在实现卫星通信过程中，向卫星发送信号及接收卫星信号尤为重要，为了能够向卫星发送高质量的信号，尽可能减小信号的损失，针对 XW2F 的上行频率，我们选择自己制作带宽一定且中心频率为 435MHz 的天线。

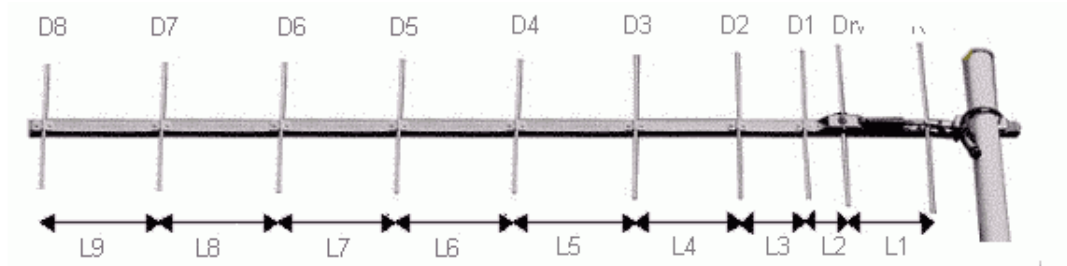
通过对常见天线的学习，综合天线效果及制作的难易程度，我们一致认为八木天线是最佳选择。

八木天线是由一个有源振子（一般用折合振子）、一个无源反射器和若干个无源引向器平行排列而成的端射式天线。它有很好的方向性，较偶极天线有高的增益。在测向或远距离通信上深受无线电爱好者的青睐。

相较于直立天线，八木天线更加灵活，如果知道仰角和方位，持有者就可以通过八木天线随心所欲与包括空间飞行器在内的各个方向上的电台联络，这一点恰恰满足了我们在与卫星通信过程中遇到的卫星位置不固定的问题。

八木天线的工作原理（以三单元天线接收为例）：引向器略短于二分之一波长，主振子等于二分之一波长，反射器略长于二分之一波长，两振子间距四分之一波长。此时，引向器对感应信号呈“容性”，电流超前电压 90° ；引向器感应的电磁波会向主振子辐射，辐射信号经过四分之一波长的路程使其滞后 90° 恰好抵消了前面引起的“超前”，两者相位相同，于是信号迭加，得到加强。反射器略长于二分之一波长，呈感性，电流滞后 90° ，再加上辐射到主振子过程中又滞后 90° ，两者加起来刚好差 180° ，起到了抵消作用。一个方向加强，一个方向削弱，便有了强方向性。发射状态作用过程亦然。

十单元八木天线效果图：



具体参数如下：

Length of the elements

R = 348 mm
Drv = 328 mm
D1 = 302 mm
D2 = 298 mm
D3 = 292 mm
D4 = 287 mm
D5 = 285 mm
D6 = 282 mm
D7 = 280 mm
D8 = 276 mm

Spacing

L1 = 145 mm
L2 = 50 mm
L3 = 124 mm
L4 = 149 mm
L5 = 173 mm
L6 = 194 mm
L7 = 208 mm
L8 = 217 mm
L9 = 225 mm

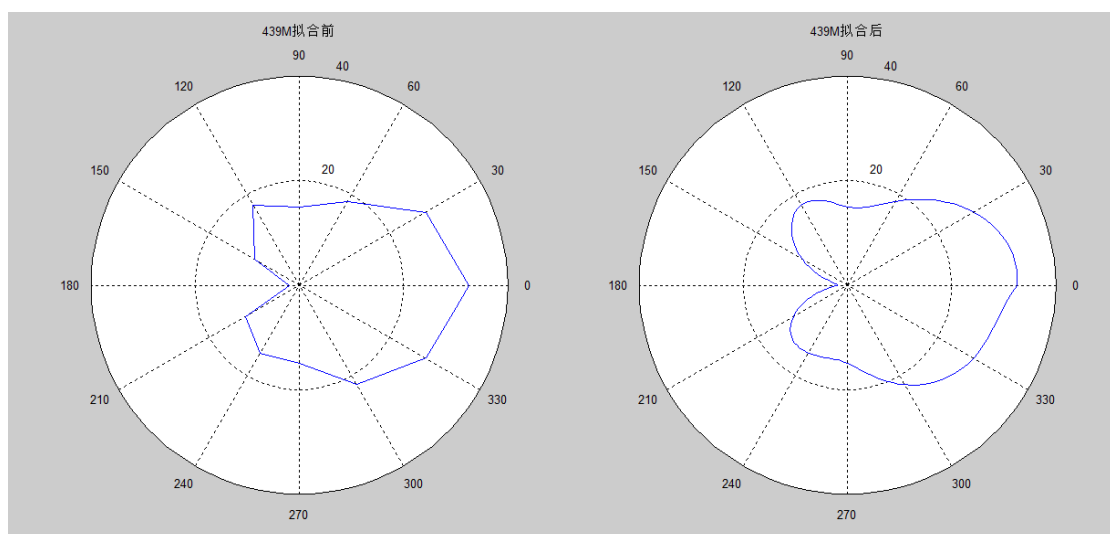
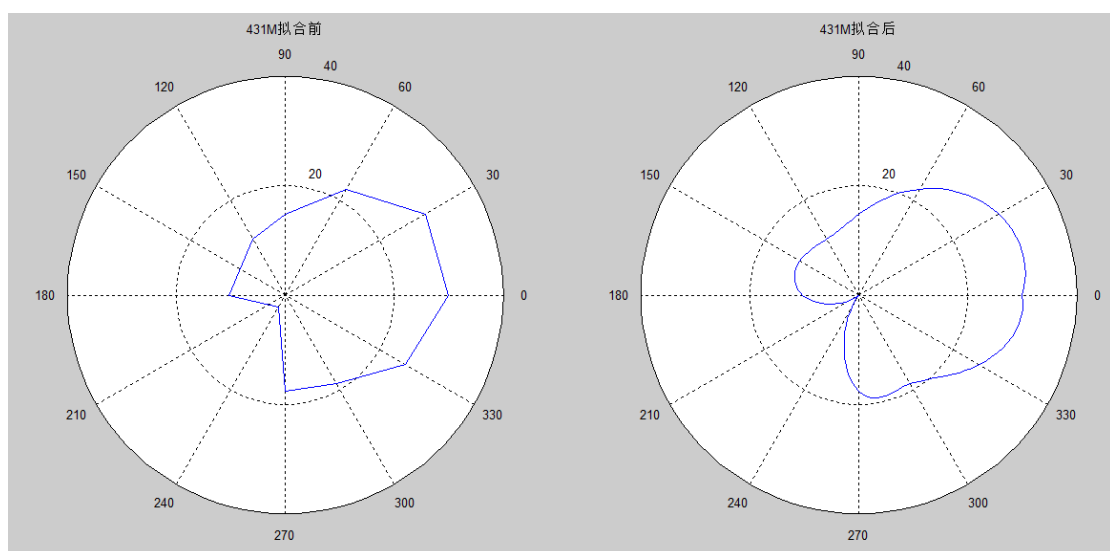
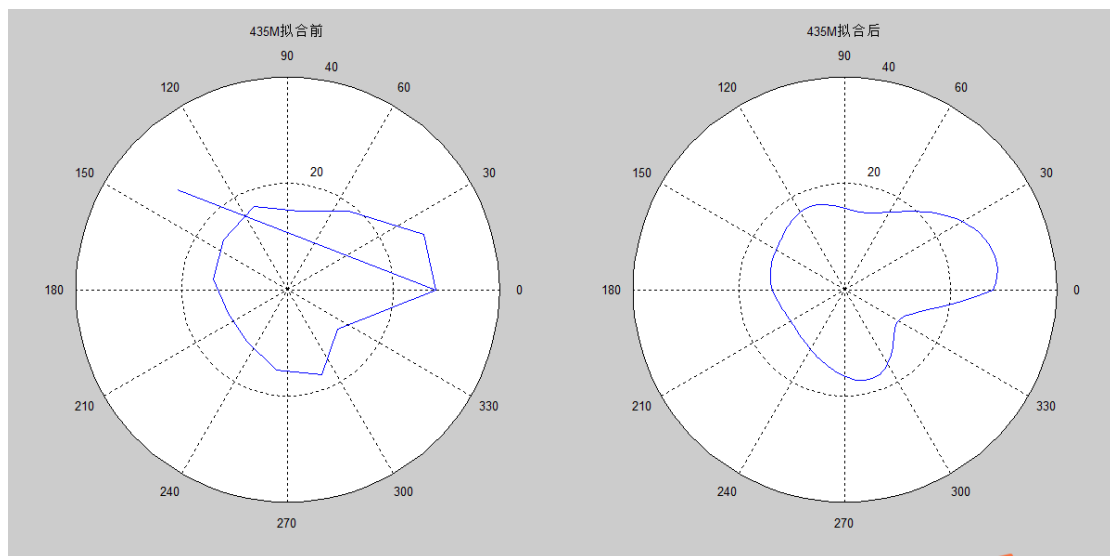
手工制作天线成品如下：



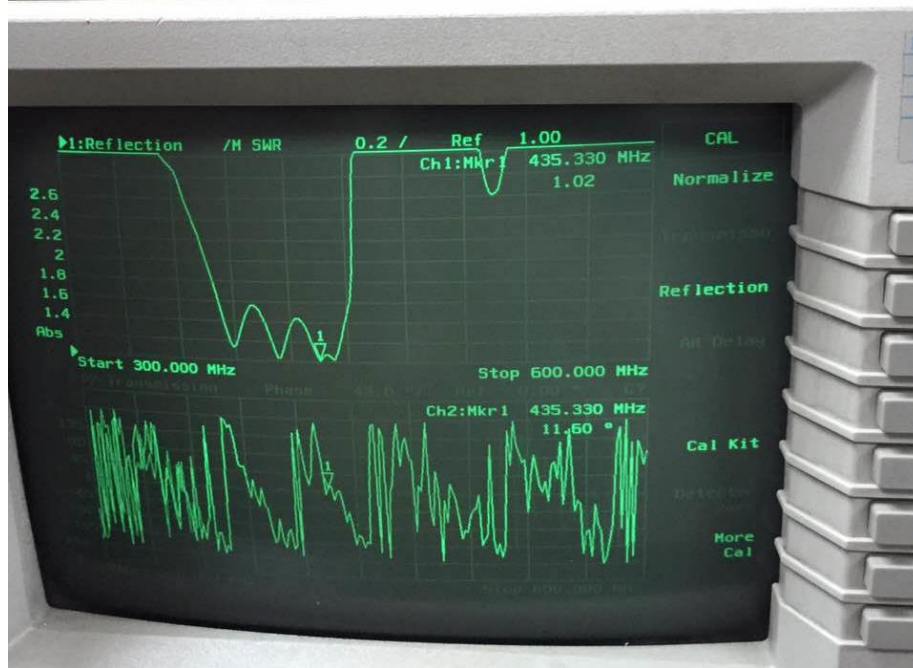
天线制作完成后，我们采用短波波段八木常用的“发夹式”匹配方法对天线进行匹配，具体操作为在馈电处并接一段 U 型导体，该 U 型导体和天线本身的电容形成并联谐振从而提高了天线阻抗。

然后，利用对讲机持续发射相同信号，便携式频谱分析仪和天线连接在不同角度接收信号，测得在 435、431、439MHz 时候的方向图。

匹配后天线方向图：



然后，连接矢量分析仪测量驻波比：



从上述实验结果可以看出我们制作的天线性能优良，不仅有很明显的方向性，而且在 435MHz 频点上驻波比小于 1.5，完全满足卫星通信系统对天线的要求。



2. 低噪声放大器（LNA）

➤ 什么是 LNA

LNA 就是低噪声放大器，噪声系数很低的放大器。一般用作各类无线电接收机的高频或中频前置放大器，以及高灵敏度电子探测设备的放大电路。在放大微弱信号的场合，放大器自身的噪声对信号的干扰可能很严重，因此希望减小这种噪声，以提高输出的信噪比。

LNA 典型应用图：

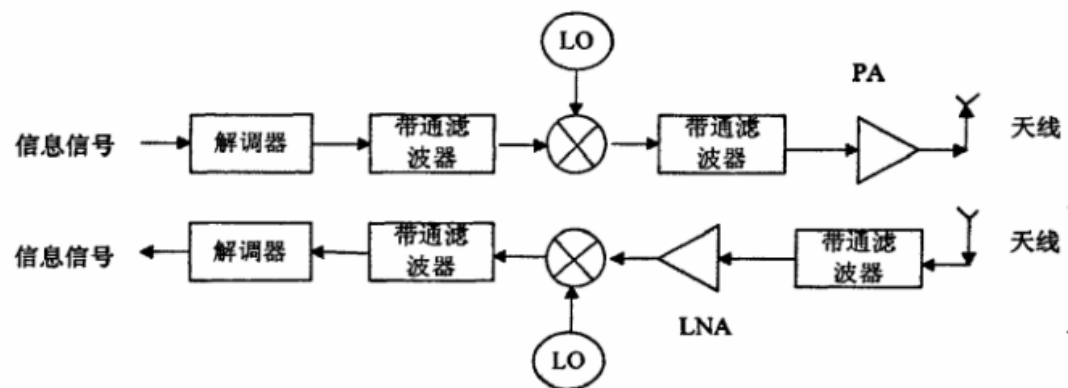


图 1.1 射频发射和接收链路(TX/RX)示意图

主要用来信号放大

➤ 为什么要使用 LNA

在卫星通信中，有一个很关键的特点就是通信距离远。在信号传输过程中，会遭遇各种各样的衰减，当然，通过制造方向性更好的天线可以完成，但是散射，干扰之类在所难免，这样对发射功率的要求很高。我们希望用尽可能高的功率无失真地发射出载波信号。

在实际过程中有几个很重要的指标：

1. 工作频率，很显然一个放大器很难在所有频率都能工作，所以，我们设计的 LNA 针对一种载波频率，我们的发射天线使用 435M 的频率，所以我们的 LNA 设计工作频率是 435M
2. 噪声系数，公式表示为：噪声系数 $NF = \text{输入端信噪比} / \text{输出端信噪比}$ ，单位常用“dB”。该系数表征放大器的噪声性能恶化程度的一个参量，并不是越大越好，它的值越大，说明在传输过程中掺入的噪声也就越大，反映了器件或者信道特性的不理想。放大电路不仅把输入端的噪声放大，而且放大电路本身也存在噪声。所以，其输出端的信噪比必小于输入端信噪比。在放大器中，内部噪声与外部噪声愈小愈好。放大电路本身噪声越大，它的输出端信噪比越小于输入端信噪比，NF 就越大。

当 NF 用分贝表示时 $NF(dB) = 10 \lg(P_o / A_p P_i) / P_o$ 表示输出端的总噪声功率， P_i 表示信号源输入端噪声功率， A_p 表示功率增益。目的 LNA 的噪声系数小于 1db

➤ 实验方案

我们采用的设计主要是利用晶体管作为放大电路，采用的核心晶体管是安捷伦公司制造的 ATF54143 型号对的晶体管。

[illegible]

由于时间紧迫，我们最后做出来了 LNA，但仅仅是焊好了，并没有测试。主要原因在于我们用不着 LNA 了发现，收发信机的自身性能就已经很好了。

3. CP16 抗干扰应急通讯

➤ 什么是 CP16

为了直接传输汉字点阵图形，CP16 采用 16 路射频载波，依次用 16×16 点阵汉字每一列的 16 个像素分别对 16 路载频进行开关调制，因此属于幅度调制方式（16ASK）。不同时间、不同频率上射频载频信号的有无反应了汉字字模的形状。这样的射频信号被接受下来后，用时间-频率瀑布显示出来的二维亮点分布就是汉字的形状，而不需要其他的解调处理。

CP16 发射接收配置图：

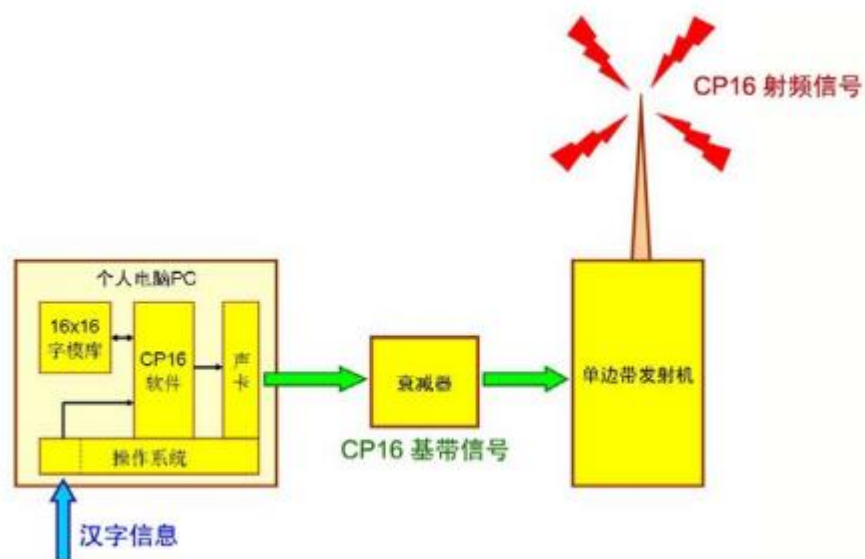


图 1 试验系统配置（发射端）

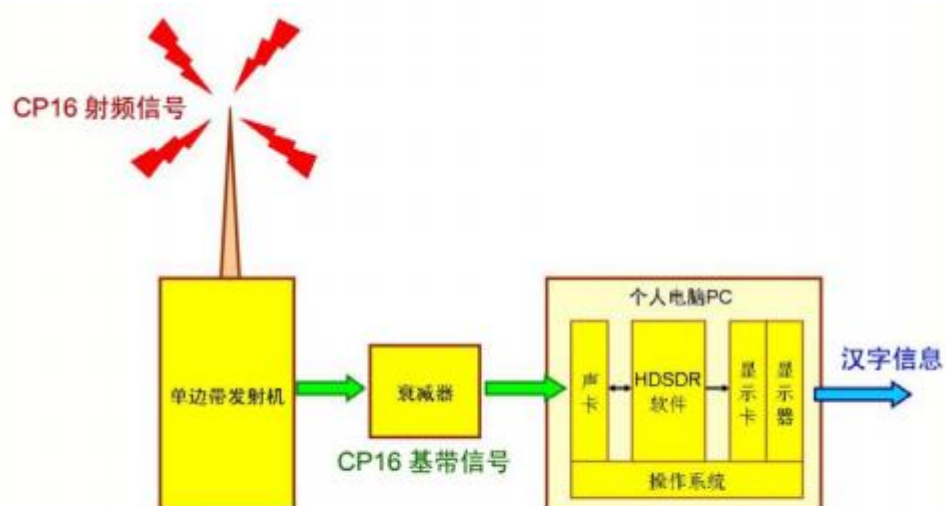


图 2 试验系统配置（接收端）

➤ CP16 的优点

1、高抗噪能力与任何其他依靠数字编码和严格的解码来传送文字的通信方法或者话音通信相比，CP16 应该具有显著的抗干扰优势。这是因为：

a) 由于发送端的汉字没有经过编码,接收端不需要进行解码, 所以传送系统没有正确还原初始信息的误码率门槛;

b) 汉字信息的还原过程充分发挥了人类大脑的智慧。当接收端得到的 CP16 信号的信噪比较高时, 应该可以从瀑布图得很清晰的汉字 图形。当接收端信噪比降低时, 得到带有噪点背景的汉字图形。当信 噪比进一步恶化时, 只要还能勉强从噪点背景中看出亮点, 所传送的 汉字还是可以有相当的可读性。即使字形中的某些像素缺损, 但使用者还是有可能根据经验准确还原出原来的信息, 这种智能判断能力是 机器难以达到的;

c) 一般人的视觉对瀑布图响应比听觉语音响应灵敏, 因此在同 样微弱的信号条件下, CP16 的信息更容易被捕捉到;

d) 瀑布图的信息比话音暂留更长的时间, 允许操作者由更多的 时间进行信息匹配和检查, 与话音通信相比, 提高了信息传输的可靠度。

2、 信号占用带宽仅 400Hz,CP16 的信号带宽设计为窄于 400Hz, 相当于 CW 人工莫尔斯电报的带宽。

3、 允许普通接收机同时读取多路信号的汉字 由于 CP16 信号带宽比较窄, 带宽为 2.7kHz 的单边带话音信道可 以同时容纳 6 路 CP16 信号, 而且汉字的显示不需要特别的解调。任 何普通单边带接收机都可以把相邻的 6 路 CP16 射频信号搬移为音频范围的基带信号, 送入使用普通声卡将音频信号转换为频率-时间瀑布图显示的电脑, 就可以同时显示出 6 路汉字报文信息, 而不需要变 换接收机的调谐。这一功能对于应急通信具有积极的意义, 不但简化了操作, 而且 可以使操作者同时监视多路通信, 了解全局。即使由于某种原因相邻 信道的频带发生重叠干扰, 接收者也还是有可能较好地地区分出各自的报文。这些特点是其他汉字传输方式难以实现的。

➤ 实验方案

我们使用网络上现成的字模库, 用 matlab 将想要发送的文字转化为相应的音频信号, 然后通过收发机发送到卫星, 在通过另一台机器接收, 从频谱上可以看出所发送的信息。使用的载频间隔为 20Hz, 每 2 秒一个文字, 核心代码如下:

```
close all;clear all; clc;

DataName='hzk16s';
FileId=fopen(DataName,'rb');

Str='电子系统设计么么哒';
[~,len]=size(Str);
CSOUND=[];
for k=1:len

Character=Str(k);
Offset=GetOffset(Character);%计算偏移量, 以便在字模库中提取字模;
fseek(FileId, Offset,'bof');
[CHex,~]=fread(FileId,32,'uchar');

CMatrix=Hex2Matrix(CHex);%将读入的字模转化为矩阵;
Csound=SoundOut(CMatrix);%生成对应的声音信号;
```



```

CSOUND=[CSOUND,Csound];
end
CSOUND = rot90(CSOUND,2);
CSst=[CSOUND;CSOUND];
CSst = CSst./max(max(abs(CSst)));

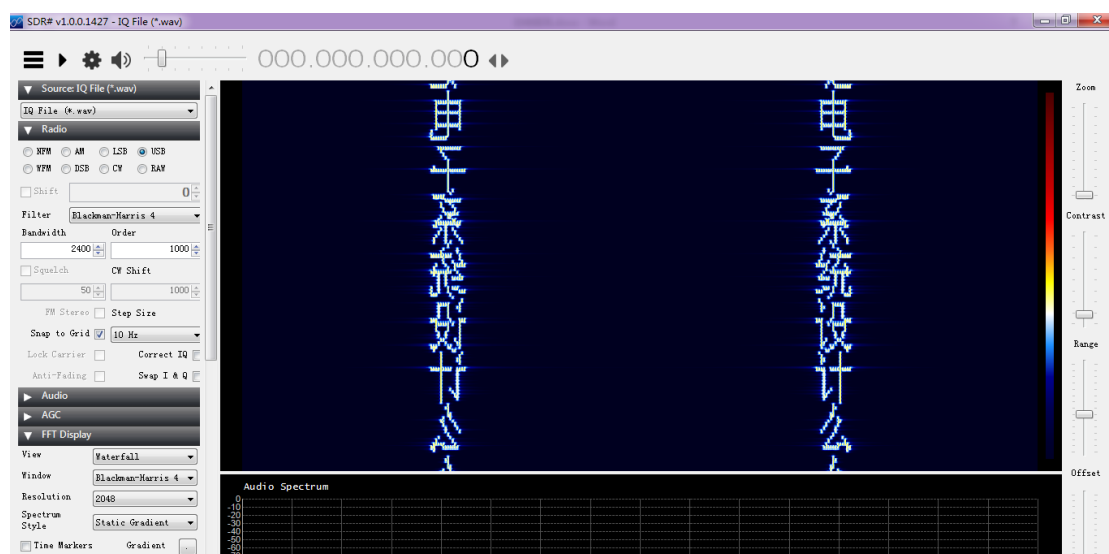
sound(CSOUND);

audiowrite('sound9.wav',CSst',8000);

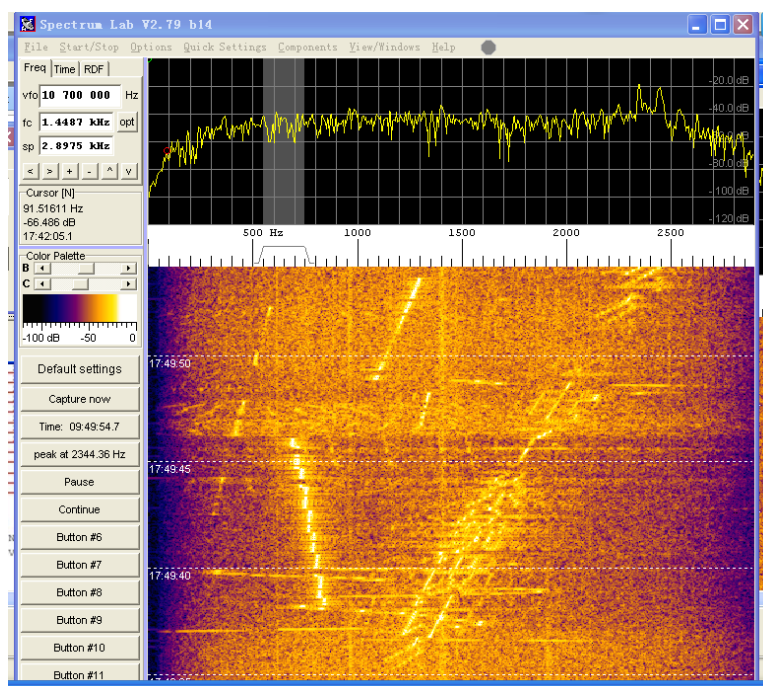
```

➤ 结果测试

我们对做好的信号文件做了测试，频谱上出现的文字可以很清晰的看到。



通过卫星的信道后接收端接收的信号频谱瀑布图也可以清晰的看到所发文字，效果很好，这种应急通讯方式的确能够很好的抵抗噪声，图中也能明显看到多普勒效应。



四 人员分工及实验进程

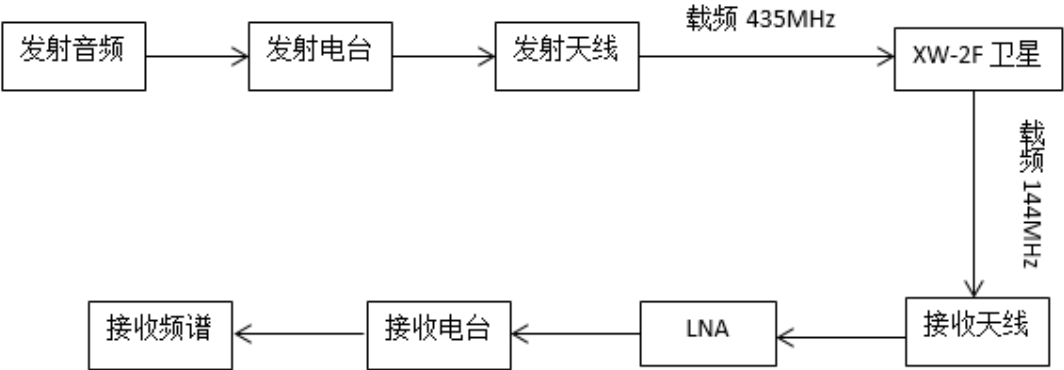
发射天线——全体小组人员

LNA——尹希玲、陈璋美、胡亚威

CP16 代码——李昭奇

第七周：确定选题以及系统构成

经过小组成员之间的讨论以及与老师的商讨，我们组的实验选题确定为卫星通信。利用今年 9 月 20 日在太原卫星发射中心发射升空的希望二号系列卫星来实现卫星通信。希望二



号（XW-2）系列业余无线电卫星包括六颗卫星，命名为希望二 A 至希望二 F。由一颗 25kg（XW-2A）、三颗 9kg（XW-2B、C、D）和两颗 1.5kg（XW-2E、F）的卫星组成。对于业余无线电爱好者来说，其中 E、F 两颗卫星上装载有一个 U/V 模式线性转发器和一个 CW 遥测信标。然而目前卫星 E 已经失效，因此我们需要利用 XW-2F 卫星实现卫星通信。卫星通信系统的框图如下：

这个实验困难在于每天卫星经过我们头顶的时间相当短，在这期间我们需要完成对卫星所在频率的寻找以及信息的传输。这个实验需要我们组成员之间彼此协作，在短时间之内完成这些工作。另外，前期的准备工作也需要认真完成，为最终的通信提供方便。

第八周：接收天线和电台的测试

为了完成此次实验，我们要充分利用实验室所能提供的条件。目前实验室当中有两个可以作为发射端和接收端的无线电台，以及一个和卫星下行频率符合的天线可以使用，因此我们组考虑将这些东西利用起来，首先希望对这些器件进行测试，检验其是否能够作为我们的卫星通信系统的一部分。我们需要解决的问题是仪器之间的连接问题。首先，天线要实现阻抗的匹配，天线与馈线的连接需要阻抗匹配，否则会影响天线的接收效果。我们采用了半波折合振子的匹配方式。另外，音频如何传入发射电台以及如何将接收到的频谱导到电脑当中也是我们必须要考虑的问题。经过思考和讨论，并且考虑到两个电台的实际情况，我们

决定在发射端采用录音公放导入发射电台的方式，而在接收端由于接收电台功能更加强大，可以直接将音频通过连接线导入电脑，通过专门的软件来观察频谱。本周将阻抗匹配好的接收天线和接收电台相连接，测试是否能够进行接收。我们选择对希望 2 号系列卫星的信标进行接收，测试结果十分成功，我们清楚的接收到了 2F 的信标莫尔斯电码。这次测试说明了接收端的仪器是可靠的，这让我们对完成此次实验的自信心增长了不少。

第九周：发射天线的制作

本周的重中之重是发射天线的制作。通过查询资料和与老师的讨论，我们决定制作一个八木天线。八木天线是由一个有源振子（一般用折合振子）、一个无源反射器和若干个无源引向器平行排列而成的端射式天线。根据我们所需要的上行频率以及查来的八木天线尺寸公式计算出我们的天线尺寸。我们组用来制作天线的材料也是相当简陋，一根 PVC 管作为整个天线的主干，用铜管制作天线所需的有源振子、反射器以及引向器。整个天线完成之后当然和接收天线一样利用半波折合振子进行阻抗匹配。对于我们制作的天线能否真正派上用场我们是十分忐忑的，毕竟从我们的制作结果来看，至少从外观上来说，我们的天线实在是不太好看，尤其是有源振子的部分。由于我们没有特别好的弯曲铜管的方法，有源振子变形比较严重。这个天线制作花费了我们不少的心血，希望下周的测试能够有一个不错的结果。

第十周：发射天线的测试

本周的主要任务是对上周制作的天线进行测试，包括反射系数以及方向图等。考虑到天线的互易性，天线方向图的测试方法采用在远处放一个信号源，然后利用制作好的天线进行接收，分别测量不同角度下的接收强度。测试中出现了一些困难，例如信号源的强度由于电量不足导致没办法保持恒定，致使测试的速度需要加快，没办法做到很准确。不过经数据处理后，方向图说明制作的天线的方向性能够满足发射天线的需求。另外，对天线的反射系数的测量表明在上行频率附近的反射系数是完全符合要求的。这个可喜的结果让我们对完成此次实验又增添了几分信心。

第十一周：CP16 的调试

同硬件同步进行的还有 CP16 的编写。利用 MATLAB 产生一段音频，其频谱上为我们所要传递的信息。我们所产生的测试音频从频谱上看为一串汉字“电子系统设计么么哒”。本周的任务是将这段音频通过系统进行传输，观察频谱上能否清晰的显现出汉字。测试结果表明频谱中混杂了不少高频分量让汉字变得不那么清晰了。主要原因是产生音频时出现了比较多的跳变，致使高频分量增多。解决方法是保证两个音在时域上至少是零阶连续的，这样可以减少一部分的高频分量。另外，我们组还产生了一段单频的音频，以便在将来卫星接收时用来寻找卫星的频率。

第十二周：低噪声放大器的制作

本周我们的 LNA 的 PCB 板终于送到了，不过我们仍然面临相当多的困难。首先是元件封装型号和设计不同，造成了焊接的困难；其次，是设计中的几个关键元件例如高 Q 值的电容没有能够找到，只能用其他类似的元件来进行替代，但是这种替代所带来的影响是我们现在无法预料的。由于以上的困难以及我们焊接技术的不过关，导致本周没有能够完成 LNA 的制作。由于实验时间的紧迫，我们如果不能尽快完成 LNA 的话，这一部分就要从系统中剔除了。不过也不用太过担心，缺少 LNA 不会对整个系统造成致命的影响。

第十三周：卫星通信系统的整体调试

LNA 果然没有能够按期完成，因此我们决定剔除 LNA 对系统进行尝试性的整体测试。由于希望 2 号系列卫星是依次先后通过我们头顶的，我们可以利用其它几颗卫星的信标先进行接收测试。结果我们可以清晰的从频谱上看到信标。不过之后的利用 2F 卫星进行通信测试就没有那么顺利了。想要找到卫星的频率十分困难，我们低估了多普勒效应对于接收的影响，当我们在使用单频信号来寻找频率时，都无法准确找到下行的信号，遑论我们想要传输的信号了。这一次测试没有能够成功，不过我们收获了不少经验。第一，要挑选一个良辰吉日，这次卫星经过我们头顶时角度偏小，对信号接收发射效果都有影响；第二，要更加重视多普勒效应的影响，不能够光靠接收端去追信号，在发射时就要考虑多普勒效应的影响将发射频率适当调低一些；第三，验证了 LNA 对整个实验的影响并不大，因此我们心安理得的去掉了 LNA 那一部分；第四，我们组成员之间的配合还不够默契，调整天线角度以及追寻信号频率时都显得有点手忙脚乱，我们还需要对整个实验流程更加熟悉。经过此次失败的教训，相信我们下周实验能够成功。

第十四周：卫星通信系统最终测试

吸取了上周实验失败的经验，我们对于本周实验验收充满了信心。最终的实验结果也是相当的不错。我们考虑了多普勒效应，将发射频率降低了一些，这样我们很快就找到了卫星下行所在频率，信息传输也很顺利的完成了，我们可以很清晰的在频谱上分辨出我们所要传输的汉字。实验的成功让我们相当开心，回顾整个实验过程，实验的成功离不开每一个成员的努力还有孙博的悉心教导。能够最终完成这个实验，也让我们感到成就感十足。

五 作品展示操作说明

因为卫星的特性，难以现场展示。但简单文字表示的话，即是将电台与发射天线连接，在卫星通过头顶时将天线指向卫星方向，利用电台麦克接收音频信号，并通过发射天线将信号发出。卫星在接收到信号后，将信号转发，将接收天线指向卫星方向并与另一电台相连，电台将接收信号转化成声音，将次音频连入电脑进行处理即可。

六 经验总结

这次实验不仅仅是学到了很多新的知识，更是对之前学习的一个总结。通过这样的一个实验，很好地将之前的学习内容“串”了起来。

从天线说起，最开始要做这个天线的时候，大家都觉得很简单，但最后事实证明仅仅是这个天线我们就做了两周，后面测试性能又用了一周的时间。当初在学微波的时候，大家都学的不是很懂，这一点在做天线的也展现出来。最开始要计算长度的时候都不是很理解，而且匹配也不是很懂，但在老师的讲解下，大家慢慢弄懂了原理，对这个有了更深刻的认识。

而写软件的过程也是一个很有趣的过程。CP-16 最开始是老师提出了让我们看看的，从网上可以找到它的说明文档，大家觉得非常有意思，所以才开始做。途中因为双声道等问题也遇到过困难，但最后一一解决的时候心里满是成就感。

追卫星应该算是我们这个实验里做的最多的事情了。在每周五的下午，看好卫星来的时间，我们五个人加上老师，抱着两个天线，两个电台，几台笔记本就下楼了。瑟瑟寒风中，有人举着天线，有人抱着电脑指方向，还有人调着电台。我们的据点一般是在主楼下的旗杆附件，行人众多，时不时有人路过，好奇地打量着我们这群“奇怪的人”，也有人直接问。每次到这个时候，还是有点小尴尬的。

从追卫星来说，在只接收卫星信号的时候还是比较容易的。但要完成发射和接收的这两个过程其实是很艰难的。毕竟只有 XW-2F 卫星可以用，每次卫星经过头顶上方可用的时间也就只有十分钟左右，在这样短的时间内成功完成发射信号和接收并不是一件容易的事情。第一次试验发射的时候，因为那天卫星的角度也不是很好，整个实验比较失败，一直没有接收到信号。虽然当时老师说这样也能过关，但在一周后，我们还是又进行了一次实验。这一非常成功，很好地观测到了实验现象，那一瞬间的成就是无与伦比的。