

Luo F S, Chen MJ, Zhuang H C, et al. A portable sharing upper atmospheric sounding system composed of balloon and micro-rocket. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2): 212 ~ 215

轻便式气球、火箭高空大气探测共用系统

罗福山 陈敏捷 庄洪春 何渝晖 田国璋 张 健

中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080

摘 要 鉴于对高空大气探测日益增多的需求,而常用的接收、跟踪定位设备却比较笨重而且灵活性差,不能适应既需要机动灵活又能适合于多种场合使用的要求。本文介绍通过提高接收系统的信噪比同时采用宽波束接收天线,研制了一套低成本、轻便式高空大气探测简便系统。该系统调频发射机和高空大气探测有关仪器和地面抛物面接收天线、低噪声接收机及数据处理设备组成。主要用于探空气球和微型火箭对高空大气探测数据的接收和处理。

关键词 高空大气探测 双球式电场仪 微火箭电场仪

文章编号 0001 - 5733(2004)02 - 212 - 04 中图分类号 P412 收稿日期 2002 - 12 - 13, 2003 - 12 - 10 收修定稿

A PORTABLE SHARING UPPER ATMOSPHERIC SOUNDING SYSTEM USED BY BOTH BALLOON AND MICRO-ROCKET

LUO Fu-Shan CHEN Min-Jie ZHUANG Hong-Chun HE Yu-Hui TIAN Guo-Zhang ZHANG Jian

Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract The requirements of upper atmospheric exploration systems are increasing, but usual receiving and tracking equipment are ponderous and with bad agility, and more and more unsuitable for multi-purpose situation which need more flexibility. A low cost portable upper atmospheric sounding system used by both balloon and micro-rocket is presented, which has much lower ratio of signal to noise and wider bandwidth. The system is composed of a frequency modulated transmitter, upper atmospheric sounding instruments, a wide beam parabolic receiving antenna on the ground, a receiver with low noise and data processing equipment. It is mainly used to receive and process the data from balloons and micro-rockets.

Key words Atmospheric sounding in upper air, Two sphere electric field instrument, Micro-rocket electric field instrument.

1 引 言

高空大气环境探测对保障航天活动的安全十分重要,气象环境是造成航天意外事故的重要因素之一。在航天器升空过程中,较全面地、确切地了解 and 掌握发射场地及其周围地区上空的气象环境情况,尤其是雷电,对保证航天器发射成功是十分必要的。

我国目前的高空大气探测系统,无论是气球探测还是火箭探测,绝大多数是采用高空气象雷达,不但成本高,而且笨重,灵活性差,操作人员需要较强的专业技术性,不利于新型探测仪器研制中的高频次试验和非专用场地试验。无线电经纬仪灵活性虽然比雷达好,但只能接收和处理同一厂家生产的探测仪器,无疑对需要量大和发展国产气象探测仪器是不利的,尤其用于火箭探测上,无线电经纬仪要在俯仰

基金项目 中国人民解放军总装备部项目(205210)和第二炮兵司令部项目(9706)。

作者简介 罗福山,1941年生,1965年毕业于成都电子工程学院电子工程系,研究员,主要从事空间探测技术研究。

角大于 12 的情况下,才能获得好的跟踪结果,而火箭的起飞点往往都处在无线电经纬仪很低的俯仰角下,所以至今还没有用无线电经纬仪成功跟踪火箭的先例. 由于本文系统采用了宽波束接收天线和低噪声接收机(噪声系数为 0.6dB, 远比高空气象雷达低¹⁾),可用于火箭探测和气球探测两种体制. 对于火箭探测,采用静态接收方式,将接收天线的主波束轴与火箭飞行轨迹处在同一平面内,并使天线的主波束复盖火箭飞行轨迹的绝大部分,即使是对飞行轨迹尚未复盖的近地部分,由于所采用的天线方向图波束的谷点为 -20dB,只要在接收机的接收距离范围内,仍可收到很清晰的信号. 对于气球探测,采用动态接收方式,使天线的主波束跟随气球的飞行. 经过在微火箭电场仪和电场探空仪探测系统^[1,2]中的运用,达到了良好的效果. 其重量和成本远比雷达和无线电经纬仪低,既适合于固定发射基地使用,又适合于流动性发射场地使用.

2 系统组成和工作流程

该系统由调频发射机及高空探测有关仪器和地面宽波束抛物面接收天线、低噪声接收机及数据处理设备组成. 高空大气电场、温、压、湿等探测信号被调制在 1680 MHz 载波频率上传输到地面后,由天线接收、经低噪声放大在下变频器中与 1542.5 MHz 第一本振相混频得到 137.5 MHz 的第一中频信号,再放大后又在第二混频器中与第二本振(126.8 MHz)相混频得到 10.7 MHz 的第二中频信号,由通频带为 300 kHz 的陶瓷滤波器滤波后进一步放大、限幅,在鉴频器中进行调频解调,得到的低频信号经分路器分路后,电场、温度、压力、湿度等探测信号通过整形输出到单片机进行预处理,然后送入中心计算机进行分析处理,获得电场、温度、压力、湿度等大气环境数据(图 1).

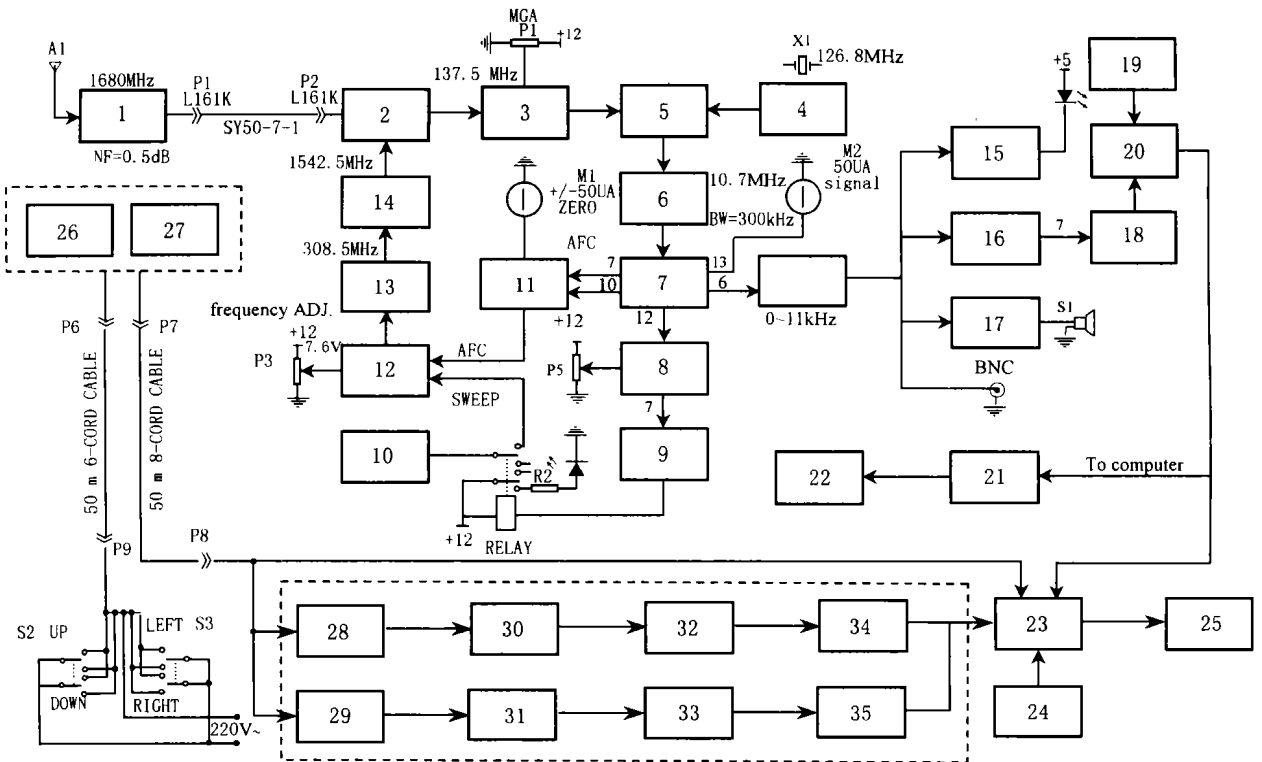


图 1 1680MHz 球载、箭载高空大气探测共用接收系统方框图

- 1 低噪声放大器;2 下变频器;3 第一中频放大器;4 第一本地振荡器;5 第二混频;6 带通滤波器;7 鉴频器;8 鉴别器;9 延迟电路;10 扫描电路;
- 11 差分放大器;12 相加器;13 压控振荡器;14 倍频器;15 高频锁定电路;16 整形;17 监听电路;18 可变变频器;19 10ns 脉冲发生器;20 单片机;
- 21 主计算机;22 打印机;23 单片机;24 复位与模式选择;25 面板显示器;26 旋转编码器;27 角度限定;28,29 光电隔离;30,31 整形电路;
- 32,33 译码电路;34,35 加、减计数电路.

Fig. 1 The block diagram of 1680MHz upper atmospheric sounding receiving system commonly used by balloon-rocket

1) 南京大桥机器厂. 702 高空气象雷达站技术说明书, 1971.

3 系统的探测距离

根据系统设计参数:发射机功率 $P_t = 24\text{dB}$,发射天线增益 $G_t = -4\text{dB}$,接收天线增益 $G_r = 18\text{dB}$,馈线损耗 $L(1.05) = 0.6\text{dB}$,LNA 噪声系数 $N_F(1.15) = 0.6\text{dB}$,天线噪声温度 T (仰角 45°) = 45K ,载波频率 $f = 1680\text{MHz}$,中频通频带 $B = 300\text{kHz}$.

C/N 为根据接收系统的信噪比

$$C/N = P_t + G_t - L_s - N_s + G_r - N, \quad (1)$$

其中 C, N 分别代表接收系统的信号电平和噪声电平, N_s 为未考虑到的各种因素损耗,约为 3dB ,路径损耗 $L_s = 32.44 + 20\lg 1680(\text{MHz}) + 20\lg D(\text{km}) = 97 + 20\lg D(\text{km})$,

接收系统的噪声电平

$$N = KT_s B, \quad (3)$$

式中 $K = 1.38 \times 10^{-23}$ 为玻尔兹曼常数, T_s 为系统噪声温度,

$$\begin{aligned} T_s &= T + T_0 \times (L - 1) + L \times T_r \\ &= 45 + 290 \times (1.047 - 1) + 1.047 \times 43.5 \\ &= 103.7 \text{K} \end{aligned} \quad (4)$$

将(3)式噪声功率以分贝为单位表示

$$N\text{dBw} = 10\lg K + 10\lg T_s + 10\lg B,$$

$$\begin{aligned} \text{或 } N\text{dBm} &= 10\lg K + 10\lg T_s + 10\lg B + 30 \\ &= 10\lg 1.38 \times 10^{-23} + 10\lg 103.7 + 10\lg 350 \\ &\quad \times 10^3 + 30 \\ &= -123(\text{dBm}), (\text{相当于 } 50 \Omega \text{ 电阻上有} \\ &\quad 0.158\mu\text{V 的噪声电压}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $N\text{dBw}$ 、 $N\text{dBm}$ 分别以瓦量级或毫瓦量级表示的噪声功率.

将上述各参量和(2)~(5)式代入(1)式

$$\begin{aligned} C/N &= P_t + G_t - L_s - N_s + G_r - N \\ &= 24 - 2 - 97 - 20\lg D - 3 + 18 - (-123) \\ &= 61 - 20\lg D, \end{aligned}$$

调频接收机解调门限一般 C/N 为 $9 \sim 12\text{dB}$,若系统接收的信号为 $1\mu\text{V}$ 时,系统的信噪比

$$C/N = 20\lg(1/0.158) \text{dB} = 16,$$

在解调门限以上,能获得满意接收. 此时可接收距离为

$$D = 10^{(61-16)/20} = 178(\text{km}),$$

这就是说,在距离 178km 时,仍能获得满意的接收. 在实际放飞中,该系统与无线电经纬仪同时使用,当测距达 205km 时,接收到的信号还相当清晰.

4 探测火箭中接收角度的选择

由于探测火箭飞行速度相当快,一般需用高空气象雷达一类的大型设备接收其发至地面的信号,设备庞大,机动性差,成本高. 无线电经纬仪虽重量较轻,跟踪精度高,对高空球载探空仪有很好的跟踪接收效果,但由于其波束窄,经多次试验,对探测火箭的跟踪难以胜任. 为此,采用宽波束接收天线、低噪声接收机组成的接收系统,将天线安装在火箭发射点的后方,并使天线的主波束轴与火箭飞行轨迹处在同一平面. 在这种情况下,要达到良好的接收效果,选择合适的接收角度至关重要. 如天线安装在火箭破坏半径之外离火箭发射点 0.5km 处,火箭发射高度 H 假定为 80km ,火箭发射角为 80° ,由于火箭飞行的实际抛物线轨迹是未知的,为方便起见,将飞行轨迹近似地用直线来表示,并假定上升段和下降段是对称的(图2),此时接收的最大仰角是

$$\begin{aligned} \alpha_{\max} &= \arctan H/(A+B) \\ &= \arctan H/(A+H/\tan 80^\circ) \\ &= 79.65^\circ, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 A 为接收点至发射点的距离, B 为发射点至飞行轨迹最高点在地面投影点的距离. 由图2可知

$$\begin{aligned} A/\sin(\alpha - 80^\circ) &= D/\sin(180^\circ - \alpha), \\ (2B+A)/\sin[180^\circ - (\alpha + 80^\circ)] &= D/\sin \alpha, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 α 为天线接收角,则到上升段和下降段的接收斜距 D_1, D_2 分别为

$$\begin{aligned} D_1 &= A \times \cot 10^\circ \sin(180^\circ - \alpha), \\ D_2 &= (2B+A) \times \sin 80^\circ \sin[180^\circ - (\alpha + 80^\circ)], \end{aligned} \quad (8)$$

天线主波束宽度为 22° ,为确保火箭上升段都在天线主波束 3dB 内,将主波束 3dB 点分别指向 81.65° 和 59.65° ,则天线的仰角应为 70.65° . 此时天线的接收斜距 D_1, D_2 分别是

$$D_1 = 0.5 \times 0.985/0.162 = 3.03\text{km},$$

$$D_2 = 28.72 \times 0.985/0.490 = 57.73\text{km},$$

主波束 3dB 点,到上升段和下降段的接收斜距分别为 1.42km 和 43.69km ,系统的天线增益为 18dB ,即天线在 81.65° 和 59.65° 方向上的增益为 15dB . 前已提到,调频接收机解调信噪比的门限为 $9 \sim 12\text{dB}$,为保险起见,本文取 $C/N = 16\text{dB}$,要确保在各个仰角方向上都应满足 $C/N \geq 16\text{dB}$,则增益 G_r 的范围为

$$\begin{aligned} G_r &= 16 - 43 + 20\lg 0.5 \times \cot 10^\circ \sin(80^\circ - \alpha) \\ &= -27 + 20\lg 0.5 \times \cot 10^\circ \sin(80^\circ - \alpha), \end{aligned} \quad (9)$$

当在 $0^\circ \sim 58.65^\circ$ 范围内变化时, G_r 低至 $-33.02 \sim -23.98\text{dB}$ 时, 仍可保证 $C/N = 16\text{dB}$. 实际上, 该系统采用的直径为 0.6m 的天线, 从提供 2.4GHz 的频率方向图可以看出: 在 0° (轴向) $\sim \pm 60^\circ$ 左右的角度上的最低处, $G_r = -20\text{dB}$, 足以保证上述要求. 若火箭的飞行轨迹的上升段和下降段对顶点垂直线基本对称, 能复盖火箭的整个上升段和绝大部分下降段, 那么只有 11.3km 以下不在主波瓣 3dB 点内, 此处的斜距为 21.8km . 何况因空气对飞行的阻力, 往往下降段比上升段更陡. 但是大多数探空火箭下降段采用降落伞, 在这种情况下, 可根据跟踪电场探空仪的方式, 调节天线的方位角和俯、仰角, 以使接收信号始终处在最佳状态.

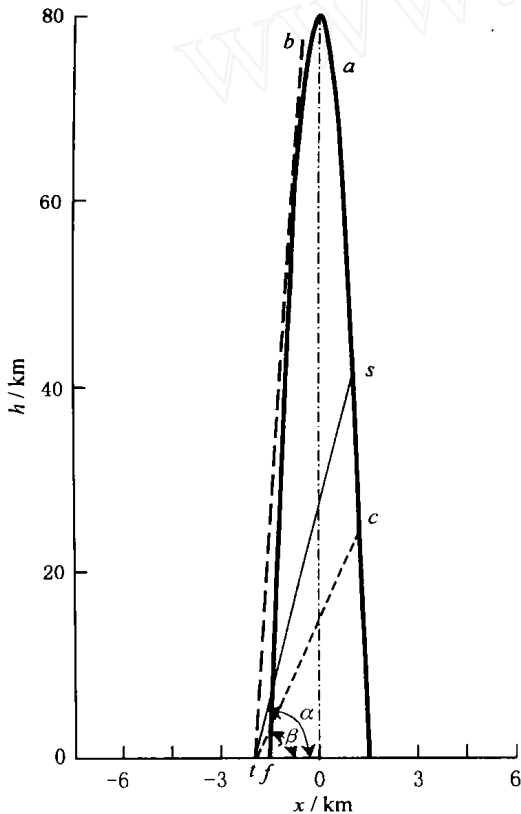


图2 系统在火箭探测中天线接收角度选择示意图

a 火箭飞行轨迹; t 天线安装点; f 火箭发射位置; s 为天线主波束轴向; tb 和 tc 为天线主波束 3dB 面指向.

Fig. 2 Scheme of selecting concept angle of antenna of the system in rocket sounding

在微火箭电场仪^[1]和双球式电场探空仪^[2]探测中使用, 尽管无线电经纬仪有很好的跟踪精度和较高的跟踪速度, 主波束也较宽, 但由于无线电经纬仪在低仰角 (12°)^[3] 时, 受地面反射波影响很大, 火箭的起飞点恰处在低仰角情况下, 且飞行速度又很快, 无线电经纬仪很难实现对火箭的跟踪. 而该系统从火箭起飞到下落, 只要在视线范围内, 均能接收到信号. 在对双球式电场探空仪放飞过程中, 无线电经纬仪往往在俯仰角低于 8° (距离为 $144 \sim 160\text{km}$, 视探空仪飞行的高度而定) 时目标丢失. 而该系统仍在视线范围内, 直到 205km (俯仰角为 $5^\circ \sim 6^\circ$), 还能接收到很清晰的信号.

不难看出, 这种能同时用于火箭探测和气球探测信号的接收系统, 较明显的特点是体积小, 不到无线电经纬仪的六分之一; 重量轻 (34kg), 只为高空气象雷达的二十分之一左右, 噪声系数 (0.6dB) 比雷达将近低 1 个量级. 成本低, 均不到无线电经纬仪和高空气象雷达的十分之一^{[3], [4]}, 同时使用机动灵活, 操作非常简便, 功耗也低. 其缺点是对一般探空仪不能定位, 用于不需要了解探空仪确切位置的高空大气探测中和用于在探测火箭研制期间高频次、非专用场地试验或在火箭实际飞行轨迹与理论计算轨迹偏差不大的探测中. 现正在将全球定位系统 (GPS) 用于电场探空系统, 由于 GPS 能获得较高的定位精度, 使该系统不能定位的缺点得以克服, 从而在高空探测中将更具有广泛的应用前景.

参考文献

- [1] 罗福山, 庄洪春, 何渝晖等. 微火箭电场仪原理及其应用. 地球物理学报, 2000, 43(5): 616 ~ 620
LUO F S, ZHUANG H C, HE Y H, et al. The principle of micro-rocket electric field instrument and its application. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2000, 43(5): 616 ~ 620
- [2] 罗福山, 庄洪春, 何渝晖等. 球载双球式电场仪及其应用, 地球物理学报, 1999, 42(6): 772 ~ 777
LUO F S, ZHUANG H C, HE Y H, et al. Balloon-Borne Two Spheres Electric Field Instrument and Application. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 1999, 42(6): 772 ~ 777
- [3] VAISALA. Vaisala Radiotheodolite for Accurate, Passive and Independent Upper Air Windfinding. VAISALA of FINLAND, 1996. 06

5 结 语

本系统先后和维萨拉公司的无线电经纬仪同时