

甚高频多普勒多气球跟踪系统

向 明 任阵海* 邹孝恒 雷孝恩

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

一个多路径传输误差小、造价低、重量轻的甚高频多普勒多气球跟踪系统已研制完成。本文对其原理、设计和性能作了概述。该系统在珠江三角洲观测实验中取得了 40km 双气球平飘轨迹和 30km 内水平扩散参数, 为中距离低空大气污染物输送、扩散的拉氏轨迹和人气污染模式研究提供了一个新的探测手段。

关键词: 多气球跟踪; 甚高频多普勒效应; 中距离扩散探测。

一、引 言

当前, 大气污染已从局地变成大范围的环境问题, 如何探测中距离低空大气污染物输送和扩散过程, 是研究区域环境的重要问题之一。用光学经纬仪跟踪气球以测定大气流场的距离小于 10km; 六氟化硫示踪剂能测中长距离大气污染物浓度, 但不能确定其轨迹, 而且费用较高; 无线电经纬仪和雷达跟踪气球, 测角精度可达 0.05° ; 但仰角不能小于 3° 和 6° , 跟踪多个目标也有困难; 在精密跟踪系统中, 如 $3 \times 10^9\text{m}$ 误差仅 2m 的 Goddard 测距系统^[1] 和精度达 $1 \times 10^{-5}\text{rad}$ 的 Azuas 测角系统^[2] 都是用多个频率或多组天线解决 2π 模糊为代价以获得高精度, 不仅设备复杂昂贵, 低空跟踪同样受多路径传输效应的影响^[3]; 用球载转发器接收罗兰 C 导航台 100kHz 低频信号再转发给地面站进行定位, 覆盖半径可达 2000km, 精度为 15—200m^[4]; 新近的多普勒测风雷达^[5] 则是无球测风, 探测范围大而快; 有体积仅 0.1m^3 的小型干涉仪终端^[6], 与卫星载发射机配合用于大地测量, 精度达 mm 至 cm 水平。

调查表明, 许多跟踪设备既昂贵笨重, 也不适合低空多目标跟踪, 因此认为中距离 (10—50km) 低空 (500m 以下) 多气球 (显示大气扩散特征) 跟踪问题, 可将侦察电波辐射源位置的甚高频多普勒测角定位技术移用于大气探测是一个可行方案, 其低空性能好, 造价低、重量轻, 便于野外使用, 系统误差约为 1° ^[7,8]。

二、基本原理及设计

1. 原理

假设在自由空间, 即无任何反射波, 而且信标机相距甚远, 即平面波已形成, 如图 1

1991 年 3 月 9 日收到, 12 月 31 日收到修改稿。

* 现在中国环境科学研究院

的信标机 T 发射频率为 f_i , 根据多普勒效应, 在静止点 S 天线和以 S 为圆心, 角速度为 $2\pi f_\Omega$ 旋转的 M 天线所收到的瞬时频率分别为

$$f_s(t) = f_i \left(1 + \frac{v_r}{C} \right), \quad (1)$$

$$f_m(t) = f_i \left(1 + \frac{v_r}{C} + \frac{v_m}{C} \right), \quad (2)$$

$$v_m = v \cos \beta = \pi D f_\Omega \cos [90^\circ - (\psi - \theta)] \quad (3)$$

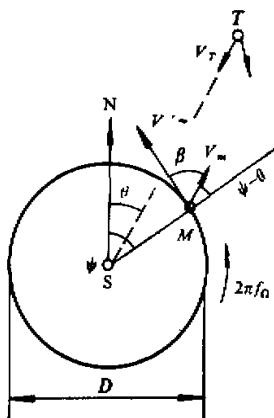


图1 多普勒效应测信标机 T 方位角原理图

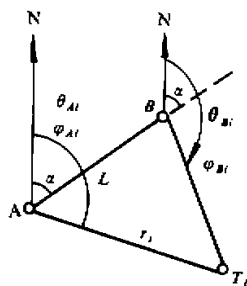


图2 信标机 T 的轨迹坐标

$f_i \lambda = C$ 为电波传播速度, v_r 和 v_m 分别是信标机和旋转天线在波传播方向的速度分量, D 为天线孔径, θ 是以正北为零度按顺时针方向的信标机方位角, $\psi = 2\pi f_\Omega t$.

可使用双信道消去 v_r , f_i 和非测角调制的影响. 两信号与本振频率 f_{Lm} , f_{Ls} 分别混频和放大后, 再取其混频之差 $f_{m-s}(t)$ 及其电压 $e_{m-s}(t)$, 经过限幅放大和鉴频器解调, 得出不含 v_r 和 f_i 的只按旋转天线多普勒瞬时频偏 $f_d(t)$ 变化的输出电压 $e_d(t)$, 由 $e_d(t)$ 测出方位角 θ .

$$\begin{aligned} f_{m-s}(t) &= [f_m(t) - f_{Lm}] - [f_s(t) - f_{Ls}] \\ &= (f_{Ls} - f_{Lm}) + (\pi D f_\Omega / \lambda) \sin(2\pi f_\Omega t - \theta) \end{aligned}$$

$$e_{m-s}(t) = A_{m-s} \cos[2\pi(f_{Ls} - f_{Lm})t + (\pi D / \lambda) \sin(2\pi f_\Omega t - \theta)], \quad (4)$$

$$f_d(t) = (\pi D f_\Omega / \lambda) \sin(2\pi f_\Omega t - \theta), \quad (5)$$

$$e_d(t) = A_d \sin(2\pi f_\Omega t - \theta). \quad (6)$$

采用单信道, 可用标准调频接收机从 $e_m(t)$ 中提取多普勒信号. 高速旋转天线一般满足

$$v_m \gg v_r, \quad (7)$$

由(2)、(3)和(7)得

$$f_m(t) = f_i \left(1 + \frac{v_m}{C} \right), \quad (8)$$

$$e_m(t) = A_m \cos [2\pi f_i t + (\pi D/\lambda) \sin (2\pi f_\Omega t - \theta)], \quad (9)$$

$$e_d(t) = A_d \sin (2\pi f_\Omega t - \theta). \quad (10)$$

调频信号 $e_m(t)$ 是贝塞尔函数, 其频谱带宽 B_m 可由 Carson 定则算出,

$$B_m = 2(1 + f_d(t)_{\max}/f_\Omega) f_\Omega = 2(1 + \pi D/\lambda) f_\Omega. \quad (11)$$

设 S_i, S_L 分别为信标机和接收机本振的频率稳定度, 则中频放大器的带宽应满足(12)式的要求. 显然, 单信道所需频带

$$B_{IF} = 2[(1 + \pi D/\lambda) f_\Omega + S_i f_i + S_L f_L], \quad (12)$$

普通鉴频器的解调门限是 +12dB, 因此信标机的发射功率应满足中频放大器输出端信噪功率比

$$\left(\frac{S}{N} \right)_{oIF} \geq +12\text{dB}. \quad (13)$$

用中心频率为 f_Ω 的窄带通滤波器使 $e_d(t)$ 的信噪比显著改善后送入数字相位计作为被测信号, 旋转频率 f_Ω 信号源经移相器后的 $e_i(t)$ 作为相位测量的参考相位, 调节移相器补偿设备相位移以实现正北校准, 则相位计显示值 φ 便是信标机方位角 θ . 测出方位角所需时间的理论值为 $1/f_\Omega$, 即旋转一周的时间约 10ms.

噪声引起相位计显示值的最大相位抖动为

$$\varphi_n = \arcsin (n/s). \quad (14)$$

n, s 分别为窄带通滤波器输出端的噪声幅度有效值和信号幅度. 因此测量精度受控于 φ_n .

实际上, 用若干根天线在圆周上等距排列, 由电子开关顺序接通来模拟天线旋转.

2. 最大探测距离

跟踪系统的信噪功率比 S/N 可用通信方程来表示^[9]

$$\frac{S}{N} = P_t G_t \left(\frac{C}{4\pi df} \right)^2 L_\theta L_r G_r \frac{1}{KTB}. \quad (15)$$

计算结果如表 1, 当信标机发射功率为 100 mW 时, 满足(13)式的最大探测距离 d 为 50km.

甚高频电波按直线传播, 考虑到地球曲率和气象要素影响后, 这时最大探测距离为^[4]

$$d_{\max} = 4.0 (\sqrt{K-G} + \sqrt{H-G}) \quad (\text{km}). \quad (16)$$

G 是地平面海拔高度(m), K 和 H 分别是发射和接收天线海拔高度(m). 设球载信标机天线和地面接收天线高度分别为 100m 及 10m, 则 $d_{\max}$ 为 53km.

3. 轨迹方程

如图 2 所示, 假设基线长度 L (跟踪站 A 和 B 间的距离), 基线方位角 α , 信标机起始点方位角 θ_{A0}, θ_{B0} 和起始点相位角 $\varphi_{A0}, \varphi_{B0}$ 均为已知, 由图 2 可得出信标机 T_i 的轨迹方程为

表 1 跟踪系统信噪比分析

信标机发射功率 P_t (100mW)	+20dBmW	每赫噪声功率 $K T$ ($K = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$, $T = 293\text{K}$)	-174dBmW/Hz
信标机天线增益 G_t	+2dB	电子开关及传输损失 L_s	+3dB
空间传播损失 $\left(\frac{C}{4\pi df}\right)^2$ $f = 150 \times 10^6 \text{Hz}$ $d = 50 \times 10^3 \text{m}$ $C = 3 \times 10^8 \text{m/s}$	-110dB	长电缆传输损失 L_c (SYV-50-7-1 电缆 20m)	+3dB
		接收机噪声系数 N_F	+6dB
指向和极化损失 $L_\theta L_p$ (估计)	-6dB	中频带宽噪声功率(用 $B = 150 \times 10^3 \text{Hz}$ 档)	+52dB
接收天线增益 G_r (半波天线)	-2dB	中频输出噪声功率 N (合计)	-110dB
天线输出信号功率 S (合计)	-92dB	中频输出信噪比 S/N (满足(13)式要求)	-18dB

$$r_i = L \frac{\sin[(180^\circ + \alpha) - \varphi_{Bi}]}{\sin(\varphi_{Bi} - \varphi_{Ai})} \quad (17)$$

跟踪多个气球,可不调节正北校准移相器,这时相位计读数记为 φ_{Ai} , φ_{Bi} , 则正北校准可由下式计算来完成。

$$\varphi_{Ai} = \varphi_{Ai} + (\theta_{A0} - \varphi_{A0}) \quad (18)$$

$$\varphi_{Bi} = \varphi_{Bi} + (\theta_{B0} - \varphi_{B0}) \quad (19)$$

L , α , θ_{A0} , θ_{B0} 可从五万分之一地图上直接量得。为保证定位精度较好,两跟踪站到信标机的交汇角应在 $30^\circ - 150^\circ$ 之间。

若要测量高度,可用球载气压传感器,借助于信标机将气压信号发回地面,算出高度。

4. 多普勒测角定位系统的一些特点

采用大孔径圆天线阵($D/\lambda > 1$),可使多路径传输误差明显减小^[8],特别在低空,这是最主要的特点。测角时圆天线阵上有 n 根天线,但每根只贡献 $1/n$,所以局部波阵面畸变对全局影响较小。多普勒效应只与波传播方向有关,而与极化和仰角无关,因此极化误差小。圆天线阵实际上没有转动部分,结构简单。此外,可采用标准调频接收机和数字相位计,多目标跟踪和数字显示方位角都容易实现自动化。球载信标机是一个轻便发射机,因此费用低廉。若需单站多目标实时定位,可采用球载转发器,组成测角测距系统,但转发器造价较高。

三、甚高频多普勒多气球跟踪系统

1. 跟踪系统

跟踪系统框图如图 3 所示。球载信标机是一个重 100g 的甚高频发射机,它由定时

器、晶体振荡器(25—50MHz)、四倍频器、功率放大器和全向天线所组成。信标机每发射 27s 休止 3s 以便识别。电源由 7 节高容量二号电池提供, 重 280g, 可工作约 4 小时。信标机由平移气球^[10]携带升空。

圆天线阵是由间距相等的八个半波天线按环状排列而成。组成半波天线的两根各长 $\lambda/4$ 的鞭状天线螺装在变换器上下两端, 使对称输入变换成非对称输出, 经横杆内电缆与开关盘上高频插座对接。开关盘内有二极管开关电路和扫描控制电路, 使八路天线信号顺序接通以模拟天线旋转。开关的导通与漏讯比大于 64dB。信号经前置滤波和放大后, 用 20m 高频电缆送给室内的接收机。旋转频率源和电源则经多芯音频电缆送往室外的圆天线阵。

旋转频率源的组成如图 3 所示。频率稳定可减小相位漂移, 滤除谐波分量以保证相位测量精度, 移相用于正北校准。

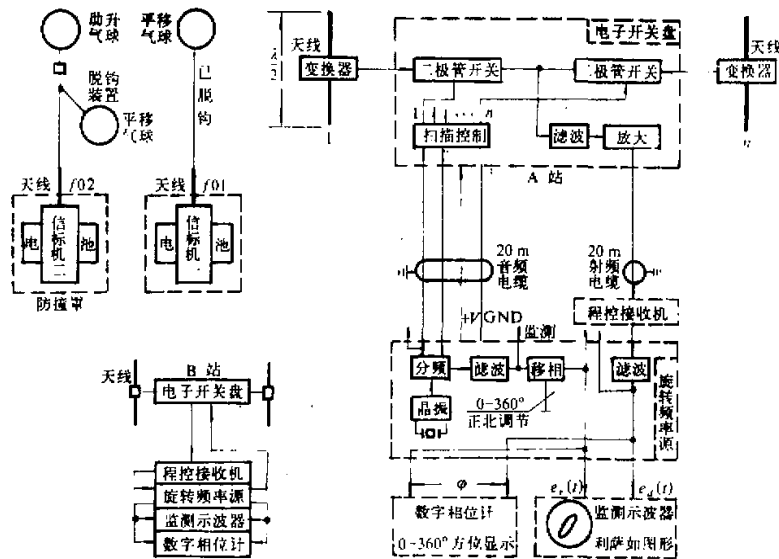


图3 甚高频多普勒多气球跟踪系统框图

室外设备圆天线阵如图 4(a) 所示。室内设备旋转频率源、配套仪器数字程控接收机、数字相位计和监测示波器, 如图 4(b) 所示。程控接收机的功能是将要搜索的若干个频率(最多 99 个)及其调制模式预先存储, 用程序实现自动巡回检测, 其频率范围为 VHF—UHF, 步进频率为 100Hz—25kHz, 选择性为 ± 1.4 — ± 75 kHz, 灵敏度为 0.3—2 μ V。利用示波器上对相位敏感的利萨如图形, 根据发射休止时间, 识别信号确实来自信标机并测出信噪比作为数据可信度标志。

2. 性能测试

地物反射电波, 地面导电率不均匀都可使波阵面畸变而造成所谓场地误差, 并成为

误差的主要来源，较理想的场地是：距离圆天线阵约 100λ 内，地面平坦开阔并且没有接近或大于 $\lambda/4$ 的反射体；远处影响较小，但反射体仰角应小于 $3-6^\circ$ 。

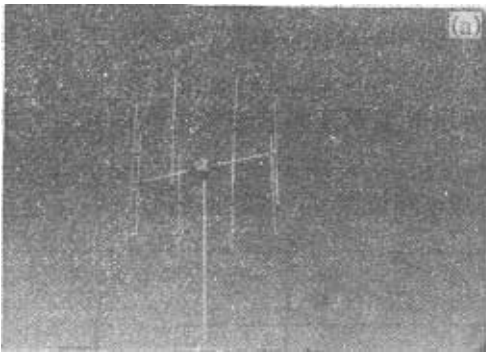


图 4(a) 跟踪系统的圆天线阵

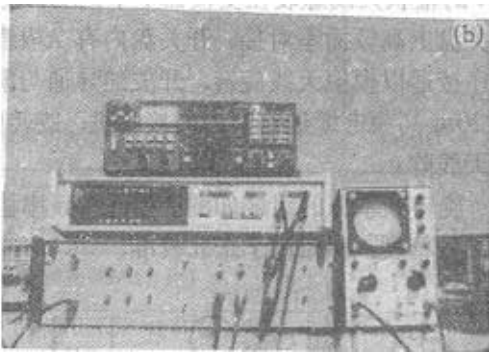


图 4(b) 跟踪系统的仪器设备

由于条件限制，测试场地设在北京市立水桥中国环境科学研究院内六层平顶上，10m 远处有公共电视天线，150m 远处有十层高楼，北 22km 是燕山山脉。信标机固定在远处，圆天线阵装在有刻度的转盘上转动，其方位角为 θ ，相位计显示值为 φ ，测量结果如表 2 及图 5 所示，实测表明，距离为 150—30000m 内， $0-360^\circ$ 的均方根误差为 $4-5.4^\circ$ 。误差分布与频率、距离和方位角有关，因为这些因素变化可引起反射波程差改变。若场地较好，误差应有所改善。当信噪比很高时，如图 5(b) 所示，每约 45° 误差由小到大呈现周期性变化，这与 8 根天线间距 45° 相对应。若增加天线杆数和孔径，此取样误差应能减小。

表 2 性能测试 (信标机发射功率150mW)

图 号	频 率	信标机高度	信标机距离	$0-360^\circ(\varphi-\theta)$ 均方根误差
5a	160MHz	1.5m (室 内)	3m (室 内)	6.3°
5b	135MHz	10m	150m	4.4°
5c	132MHz	10m	150m	$4.0^\circ(\times)$, $4.1^\circ(^\circ)$
5d	132MHz	400m	21000m	5.1°
5e	132MHz	400m	30000m	5.4°
5f	97.087MHz		调频广播电台	5.1°

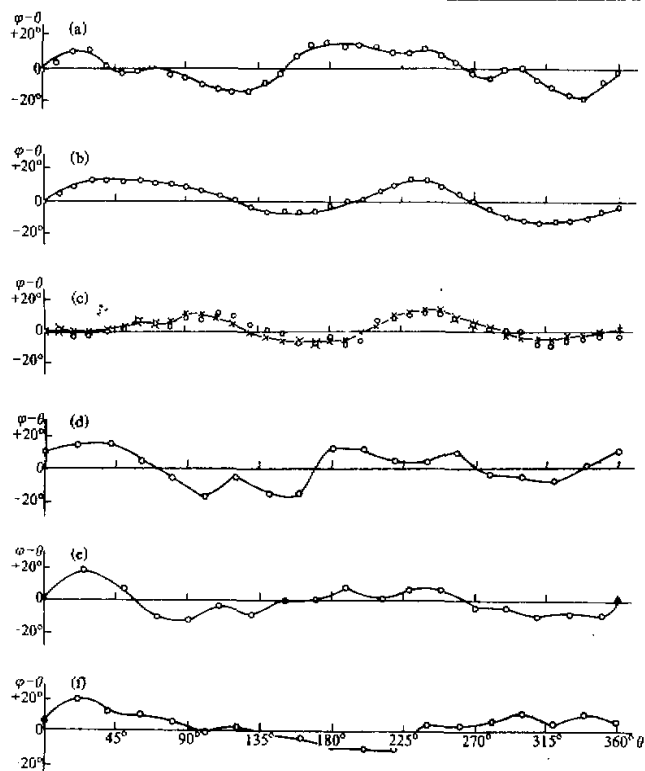


图 5 0—360°方位角测量误差

四、中尺度大气流场轨迹探测

1990年7月在珠江三角洲应用研制的两套跟踪设备探测了中尺度流场轨迹。平移气球释放点设在番禺县围海造田而成的珠江农场, 距离灵山镇和鱼窝头镇跟踪站分别为16.7km和17.3km, 两跟踪站相距6.8km。放球分单球释放和双球同时释放, 气球平飘高度为400—500m。放球点设有双经纬仪观测气球运行中的风向、风速以便比较。观测期间共放球16个, 其中得到完整记录的球数为13个。

1. 水平轨迹探测结果

应用(17)、(18)、(19)式, 对观测资料用计算机进行处理, 得到气球运行中在地面投影的一系列位置坐标, 即水平轨迹。已获得9条平移气球轨迹, 其中部分轨迹如图6(a)所示。

1990年7月23日11时37分, 同时释放两个平移气球, 两跟踪站同时分别跟踪103min和169min。其轨迹如图6(b)所示(其中交汇角太小的数据未用)。双经纬仪跟踪了一个气球16min, 测得平均风向为125°, 平均风速为7m/s。用经纬仪测得的平均风速和跟踪系统的跟踪时间, 可估算出气球运行距离, 此距离与跟踪系统实测距离作了

比较, 结果如表 3, 由表可见与经纬仪观测结果具有较好的一致性.

表 3 跟踪系统与双经纬仪观测的比较

信 标 机 频 率	计算的轨 迹点时间	跟踪系统 实测距离	双经纬仪测风 估算的距离	跟踪系统实测 轨迹平均方位	经纬仪测轨 迹平均方位
126MHz	96min	49km	40km	320 °	325 °
135MHz	69min	35km	29km	322 °	325 °

2. 中距离水平扩散参数

平移气球轨迹反映了污染物输送路径, 同一时段多条轨迹线的包络则反映污染物的扩散特征, 应用轨迹包络线可求得扩散参数.

9 条平移气球轨迹都是白天观测的, 经纬仪测得气球飘移过程中风速在 6—10m/s 之间变化, 属中性稳定层结, 将 9 条轨迹运行轴线重叠在同一条线上, 并把它们的轨迹绘在同一张纸上, 便可绘出轨迹的包络线, 再沿其轴线逐段量出不同下风向距离上包络线宽度 L_i , 烟云宽度与扩散参数 σ_y 有以下关系

$$\sigma_{yi} = \frac{L_i}{4.3} \quad (i=1, 2, 3 \cdots n) . \tag{20}$$

将 σ_y 随距离变化绘在双对数坐标纸上, 如图 7(a) 所示, 其回归方程为

$$\sigma_y = 0.1887x^{1.007} . \tag{21}$$

1990 年 7 月 23 日观测到一对平移气球轨迹, 逐段读出不同下风距离上两轨迹间的宽度 D_i , 应用以下关系可得两球间的相对扩散参数^[11]

$$\sigma_{y,i} = \frac{D_i}{\sqrt{2}} , \tag{22}$$

其回归方程为

$$\sigma_y = 0.1377x^{0.953} . \tag{23}$$

σ_y 随下风距离 x 变化如图 7(b) 所示, 其值比上述用包络线计算的要小.

文献 [12] 综合了国外大量中距离扩散烟云宽度随距离的变化, 根据其回归线算得几个距离上的扩散参数与本实验结果的比较列于表 4, 可见测量方法虽然不同, 但两者相差不大.

表 4 实测扩散资料与国外资料的比较

下风 距离 σ_y 值	5km	10km	20km	30km
实测扩散资料	1000m	2100m	4100m	6100m
实测相对扩散资料	455m	890m	1700m	2500m
国 外 资 料	651m	1160m	1860m	3020m

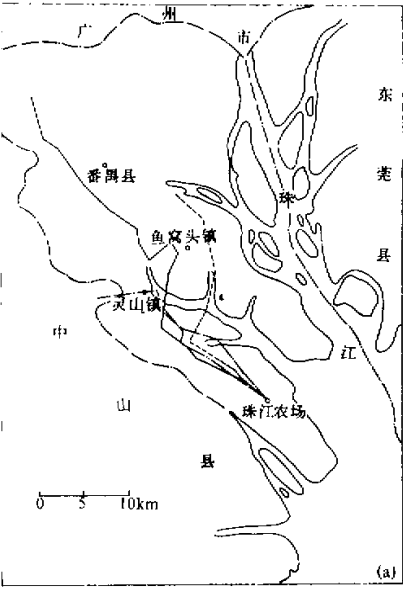


图6(a) 平移气球轨迹

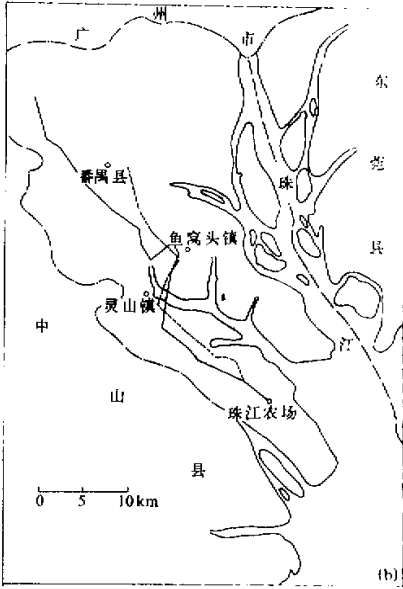


图6(b) 双平移气球轨迹

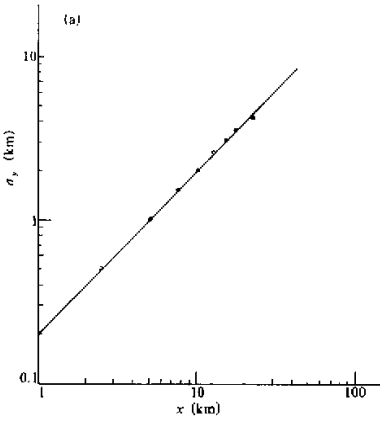


图7(a) 横向扩散参数

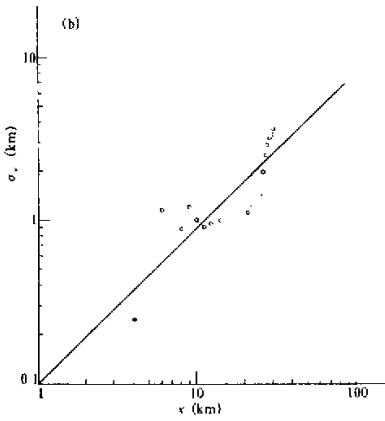


图7(b) 双平移气球相对扩散参数

五、结 语

- 1. 本系统的圆天线阵可明显削弱多路径传输效应的影响, 适合低空中距离多气球跟踪, 系统的造价低、重量轻, 便于野外观测。
- 2. 目前本系统测量精度为 5.4° , 基本上满足了一般观测的要求。若适当加大天线

阵孔径、增加半波天线数目和补偿电路, 将能进一步降低系统误差。

3. 本系统取得了 40km 中距离双平移气球轨迹资料, 其近距离段与双经纬仪观测结果具有较好的一致性, 为中距离大气污染物输送过程提供了一个重要的探测手段。

4. 取得了 30km 内中距离水平扩散参数, 为珠江三角洲火电能源建设的大气环境质量与规划模型提供了重要的计算参数。

致谢: 本工作得到中国环境科学研究院、北京大学地球物理系、广州市环境监测站、番禺县环保办公室等部门的热情支持; 张 越、张春林、吴志跃、郭炳清、王永生、景荣林、王建华等参加了野外观测, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Kronmiller, G. C. and Baghdady, E. J., 1966, The Goddard Range and Range Rate Tracking System: Concept, Design and Performance, *Space Science Reviews*, 5, 265 — 307.
- [2] Ehling, E. H., 1967, *Range Instrumentation*, Prentice Hall, 291 — 348.
- [3] Johnson, P. N. and Fink, J. L., 1982, Multiple Aircraft Tracking System for Coordinated Research Mission, *Bull. Amer. Meteor.*, 63, 487 — 491.
- [4] Laurila, S. H., 1976, *Electronic Surveying and Navigation*, John Wiley & Sons, 165 — 171; 422 — 435.
- [5] Doviak, R. J. and Zrinc, D. S., 1984, *Doppler Radar and Weather Observation*, Academic.
- [6] Counselman III, C. C. and Shapiro, J. I., 1979, Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying, *Bull. Geod.*, 53, 139 — 163.
- [7] 平良子, 1986, 无线电测向综述, 电信技术研究, 第 5 期, 22 — 33.
- [8] Ernst, B. F., 1980, VHF and UHF Doppler Direction Finder for Position Finding in Built-Up Area, *News from Rohde and Schwarz*, 4(91), 28 — 30.
- [9] Lindsay, W. C., 1973, *Telecommunication System Engineering*, Prentice Hall, 8 — 14.
- [10] 赵柏林、张鹤渠, 1987, 大气探测原理, 气象出版社, 205 — 257.
- [11] Slade, D. H., 1968, *Meteorology and Atomic Energy*, AMS, 300.
- [12] 帕斯奈尔, F., 史密斯, F. B., 1989, 大气扩散, 科学出版社.

VHF Doppler Multiple Balloons Tracking System

Xiang Ming, Ren Zhenhai, Zhou Xiaohen and Lei Xiaoen

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

Using the principle of VHF Doppler effect, the Multiple Balloons Tracking System (MBTS) cooperated with balloon-borne transmitter has been developed. Multipath transmission error is largely reduced by a circularly disposed antenna array. The principle of design, operation and performance of the system are described. Trajectories of 40 kilometers coverage of dual constant level balloons and horizontal diffusion coefficient of 30km coverage are obtained in the field observation program at the ZhuJiang (Pearl River) Delta in July 1990. Due to the good performance of tracking multiple targets at low level, low cost and lightweight, the system would be a new tool for meso-range atmospheric pollution and diffusion monitoring.

Key words: Multiple balloons tracking; VHF Doppler effect; Meososcale diffusion probing.