0254-6124/2011/31(5)-666–04 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Shi Dongbo, Wei Feng, Zhang Yu, Wang Lianzhong. Applications of GPS on meteorological rocket telemetry and tracking. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 666-669

GPS 在气象火箭遥测跟踪上的应用

史东波[1,2] 韦 峰[1] 张 宇[1] 王连忠[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 利用 GPS 全球定位系统、天线云台和宽波瓣天线组成的跟踪系统, 研究了接收位置信息与跟踪之间的时间差, 气象火箭理论弹道误差导致的中断跟踪, 气象火箭探空仪分离后至初次定位前的跟踪, 天线云台转到 359° 位置后反转 359° 及跟踪过程中跟踪中断后的继续跟踪等关键问题, 成功实现了气象火箭探空仪的遥测跟踪. 该跟踪系统在子午工程气象火箭试验中得到较好的应用, 此种跟踪方式相比传统雷达跟踪方式具有体积小、重量轻、操作简单、成本低、机动性强、跟踪可靠性强等诸多优点.

关键词 子午工程, 气象火箭探空仪, 遥测跟踪

中图法分类号 P 412

Applications of GPS on Meteorological Rocket Telemetry and Tracking

SHI Dongbo[1,2] WEI Feng[1] ZHANG Yu[1] WANG Lianzhong[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract A new tracking system composed of GPS global positioning system, antenna cloud platform and wide lobe antenna has been introduced. In traditional tracking systems, there is a time difference between the tracked position information and received position information, and the antenna cloud platform needs an inversion of 359° when it rotates to the phrase point. Besides these problems, traditional tracking systems may lose the target because of the theoretical trajectory error, and after the separation of meteorological rocket sonde, how to track it before the first positioning is also a problem that needs to be figured out. This new tracking system has solved all problems stated above as well as how to keep tracking the target after losing it, and has successfully performed the telemetry tracking of meteorological rocket sonde in the Meridian Project. Attributing to its small size, portability, easy operation, low cost, and favorable maneuverability and reliability, the new system has many advantages comparing with the traditional radar tracking mode.

Key words Meridian project, Meteorological rocket sonde, Telemetry and tracking

2010-08-21 收到原稿, 2010-11-01 收到修定稿

E-mail:shidongbo@cssar.ac.cn

1 引言

气象火箭用来直接探测高空中气温、气压、空气密度和风速风向等气象要素的垂直分布 [1]. 以往气象火箭多采用雷达跟踪, 这种跟踪方式的设备体积大, 成本高, 不适于运输和多点布站. 子午工程中, 气象火箭跟踪采用的是由 GPS 导航卫星、宽波瓣天线、天线云台及 GPS OEM 接收 [2] 机组成的系统. 该系统虽然采用了增益较低的宽波瓣天线, 但由于气象火箭探空仪探测高度只有 20~60 km, 距离较近, 完全可以满足跟踪需求.

跟踪系统采用的是通用型 GPS OEM 接收机, 其技术成熟、质量稳定可靠、使用简便、价格较为低廉, 性能能够满足接收探空仪信号的要求, 且可以每秒提供一组定位数据与三维速度数据. 该系统可以有效避免雷达跟踪系统带来的不便, 跟踪可靠. 虽然天线增益低于雷达, 但已完全能够满足子午工程对气象火箭及探空仪跟踪的使用需求.

2 工作原理

气象火箭跟踪系统主要由以下几部分组成: 气象火箭探空仪 GPS、遥测天线、天线云台、天线本地 GPS 接收机、遥测接收机、工业控制计算机. 其工作原理如图 1 所示.

由于天鹰 4 气象火箭 [3] 中没有安装 GPS 接收机, 而气象火箭探空仪采用的是商用 GPS 接收处理芯片, 在火箭上升段不能由 GPS 卫星定位并下传位置数据, 所以在火箭上升过程中采用生产单位提供的理论弹道作为跟踪依据. 在气象火箭下落阶段则根据天线本地 GPS 接收机提供的位置信息和气象火箭探空仪 GPS 提供的位置数据, 计算出天线应当指向的仰角和方位角. 火箭上升和下降段都可以通过遥测跟踪软件控制天线云台转动, 使天线调整到最佳接收方向.

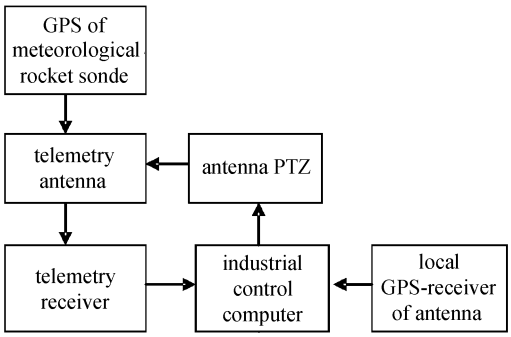

图 1 气象火箭跟踪系统的组成及工作原理

Fig. 1 Block diagram of meteorological rocket tracking system

由于接收天线采用的是八木天线, 其波瓣宽度为水平 20°、垂直 40°, 无论在上升阶段还是下降阶段 (有降落伞), 在几秒甚至几分钟内 (依据气象火箭探空仪下落速度决定), 气象火箭探空仪都不会逃出天线的接收范围, 从而能够获取下一组位置数据以便调整接收天线的仰角和方位角.

3 坐标转换及角度计算

3.1 下降段仰角和方位角的计算

气象火箭探空仪下降阶段是通过气象火箭探空仪上的 GPS 定位数据进行跟踪的. GPS 卫星导航系统采用的是 WGS-84 坐标系, 提供的位置数据是经度、纬度和高度坐标 (B, L, H). 已知天线经度、纬度和高度坐标 (B_0, L_0, H_0) 及气象火箭探空仪的经度、纬度和高度坐标 (B_1, L_1, H_1), 可以得到以天线为原点的极坐标系下的仰角、方位角和斜距坐标 (α, β, ρ).

可以将 WGS-84 坐标系下的经度、纬度、高度坐标 (B, L, H) 转换为空间直角坐标系下的东, 北, 天坐标 (X, Y, Z)[4], 有

$$\begin{cases} X = (N+H)\cos B\cos L, \\ Y = (N+H)\cos B\sin L, \\ Z = [N(1-e^2)+H]\sin B. \end{cases} \tag{1}$$

式中, N 为椭球的曲率半径, $N = a/\sqrt{1-e^2\sin B^2}$; e 为椭球的偏心率, $e^2 = (a^2-b^2)/a^2$, WGS-84 采用参数 $e = 1/298.257223563$, $a = 6378137$.

经过转换即可得到天线空间直角坐标系下的东、北、天坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 和气象火箭探空仪的空间直角坐标系下的东、北、天坐标 (X_1, Y_1, Z_1), 进而将气象火箭探空仪的空间直角坐标系下的东、北、天坐标 (X_1, Y_1, Z_1) 转换为以天线为原点的空间直角坐标系下的东、北、天坐标 (X', Y', Z'), 即将 (X_1, Y_1, Z_1) 转换成以 (X_0, Y_0, Z_0) 为原点的 (X', Y', Z'), 转换公

式为

$$\begin{cases} X' = -(X_1 - X_0)\sin B_0 \cos L_0 - \\ \quad (Y_1 - Y_0)\sin B_0 \sin L_0 + (Z_1 - Z_0)\cos B_0, \\ Y' = -(X_1 - X_0)\sin L_0 + (Y_1 - Y_0)\cos L_0, \\ Z' = (X_1 - X_0)\cos B_0 \cos L_0 + \\ \quad (Y_1 - Y_0)\cos B_0 \sin L_0 + (Z_1 - Z_0)\sin B_0. \end{cases} \tag{2}$$

得到气象火箭探空仪以天线为原点的空间直角坐标系下的东、北、天坐标 (X', Y', Z') 后, 将其转换为极坐标系下的仰角、方位角和斜距坐标 (α, β, ρ), 可以得到气象火箭探空仪在以天线为原点的极坐标系下的仰角、方位角和斜距坐标 (α, β, ρ), 转换公式为

$$\alpha = \frac{\arctan Z'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}};$$

$$\beta = \begin{cases} \dfrac{\pi}{2} - \arctan\dfrac{X'}{Y'}, & Y' > 0, \\ 0, & Y' = 0, \quad X' > 0, \\ \pi, & Y' = 0, \quad X' < 0, \\ \dfrac{3\pi}{2} - \arctan\dfrac{X'}{Y'}, & Y' < 0; \end{cases}$$

$$\rho = \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2}. \tag{3}$$

3.2 上升段仰角和方位角的计算

在气象火箭上升阶段, 由于气象火箭探空仪的 GPS 不能定位, 要采用理论弹道进行跟踪. 如果气象火箭上升阶段的理论弹道数据是以 WGS-84 坐标系下的经度、纬度、高度 (B, L, H) 方式提供的气象火箭位置数据, 则仰角、方位角和斜距的计算方法同 3.1 节.

然而, 气象火箭上升阶段的理论弹道数据是以发射点为原点的空间直角坐标系下的东、北、天坐标 (X_1, Y_1, Z_1), 则需要首先通过发射点的经度、纬度和高度坐标 $(B_\mathrm{f}, L_\mathrm{f}, H_\mathrm{f})$ 及天线的经度、纬度和高度坐标 (B_0, L_0, H_0), 利用式 (1) 和式 (2) 计算出以天线为原点的空间直角坐标系下发射点的空间直角坐标东、北、天坐标 $(X'_\mathrm{f}, Y'_\mathrm{f}, Z'_\mathrm{f})$. 然后, 再利用气象火箭上升段理论弹道数据提供的以发射点为原点的空间直角坐标系下的东、北、天坐标 (X_1, Y_1, Z_1), 计算出以天线为原点的空间直角坐标系下的气象火箭理论弹道的东、北、天坐标 (X', Y', Z'), 计算公式为

$$\begin{cases} X' = X'_\mathrm{f} + X_1, \\ Y' = Y'_\mathrm{f} + Y_1, \\ Z' = Z'_\mathrm{f} + Z_1. \end{cases} \tag{4}$$

获得以天线为原点的空间直角坐标系下的气象火箭理论弹道的东、北、天坐标 (X', Y', Z) 后, 再利用式 (3) 即可求出气象火箭理论上升阶段以天线为原点极坐标系下的仰角、方位角和斜距坐标 (α, β, ρ).

4 关键技术及解决方案

4.1 接收位置信息与跟踪之间的时间差

因为遥测软件接收到气象火箭探空仪位置数据后要经过计算, 再发指令给天线云台单片机, 控制天线云台, 天线云台按照指令转动到指定的仰角和方位角, 这些过程需要时间, 当天线云台带动天线指向气象火箭发出位置数据的位置时气象火箭探空仪已经下落到另一个位置, 因此接收位置的信息与实际跟踪之间会产生时间差.

通过选取具有一定波瓣宽度的接收天线可以解决这一问题. 在子午工程海燕 A 型气象火箭探空仪的跟踪过程中, 分别采取波瓣宽度具有 50° 的螺旋天线和波瓣宽度具有水平 20°、垂直 40° 的八木天线作为接收天线. 因为海燕 A 型气象火箭探空仪发出位置数据的频率为 1 Hz, 所以具有这两种波瓣宽度的天线可以解决上述因为时间差产生的跟踪问题.

4.2 理论坐标不准确及 GPS 定位长导致中断跟踪

由于气象火箭探空仪的理论弹道与实际飞行轨迹会有一定差别, 且气象火箭探空仪从分离至初次定位需要少则几秒多则几分钟的时间, 因此, 在没有获取精确位置数据时可能会产生跟踪中断问题.

采用宽波瓣天线和设定多个遥测站是解决此问题的有效途径. 在子午工程海燕 A 型气象火箭的跟踪过程中, 共设定 3 个主遥测站, 分别采用 1 个波瓣宽度为 50° 的螺旋天线和 2 个波瓣宽度为水平 20°、垂直 40° 的八木天线, 以及 1 个用全向天线接收的辅助跟踪设备. 由于海燕 A 型气象火箭的理论分离斜距约为 70 km, 如果采用螺旋天线, 在分离处可以接收到半径 32 km 范围内的信号, 如果采用八木天线, 在分离处也可以接收水平 24 km、垂直 50 km 范围内的信号. 以上方式可以解决由于气象火箭理论弹道存

在误差以及气象火箭探空仪在分离至初次定位前缺少精确位置数据所产生的中断跟踪问题. 即使气象火箭探空仪分离后几分钟 GPS 不定位, 在其定位后也能实现继续跟踪.

4.3 天线云台转到 359° 位置后反转 359°

由于所采用的天线云台只能同方向转动 1 圈, 当天线云台转动到 359° 位置后, 天线云台会从 359° 反方向转回到 0° 位置, 这样, 当跟踪过程中天线云台方位角超过 360° 时, 就会使天线云台带动天线反方向转动 359°, 在反方向转动的这段时间内会丢失数据甚至中断跟踪.

在架设天线云台时, 令天线云台 0° 位置相对气象火箭发射方向相反, 使天线云台大部分时间在 90°~270° 之间转动, 这样就可以有效避免天线云台转到 0° 位置后反向转动 359° 的问题. 但因为架设时选择了方向, 所以必须在遥测跟踪软件中输入架设方位角, 将计算出的天线云台转动方位角减去输入架设方位角即为实际要求天线云台转动的方位角.

4.4 跟踪过程中断后的继续跟踪

由于气象火箭探空仪在分离一段时间后才能定位, 这段时间可能有某个遥测站跟踪中断, 或者在跟踪过程中由于气象火箭探空仪等原因, 在探测过程中可能会造成某个遥测站跟踪中断. 在设计遥测跟踪软件时, 允许随时输入位置数据让天线云台带动天线直接指向输入位置. 只要有一个遥测站获取了位置信息就可以通知其他遥测站输入此位置信息来达到继续跟踪的目的.

5 试验结果与结论

北京时间 2010 年 6 月 3 日 04:00:00 LT 发射的子午工程海燕 A 型气象火箭探空仪遥测跟踪采用了上述遥测跟踪方案. 共架设 3 个主遥测跟踪站, 分别为主控大厅站、总装厂房站和海尾站.

主控大厅站距离发射点 1.5 km, 采用的是八木天线. 总装厂房站距离发射点 0.5 km, 采用的是螺旋天线. 在气象火箭上升阶段, 以发射点坐标、气象火箭理论弹道作为跟踪依据, 跟踪过程正常, 未丢失数据. 气象火箭探空仪分离后, 以气象火箭探空仪提供的位置数据作为跟踪依据, 跟踪过程正常, 但在气象火箭探空仪分离后和开伞前丢失少部分数据, 这可能是由于开伞过程不稳定, 气象火箭探空仪发射机发射信号的方向无法使地面接收到而造成的. 开伞后, 从气象火箭探空仪平稳下落至探空结束未丢失数据. 在整个跟踪过程中基本无手动控制干预.

海尾站距离发射点 34 km, 采用的是八木天线. 在开伞过程中, 跟踪中断, 数据丢失, 之后根据总装厂房站提供的气象火箭探空仪位置数据继续跟踪直到探空结束, 跟踪过程正常, 未丢失数据. 在整个跟踪过程中手动输入探空仪位置数据 1 次.

根据子午工程海燕 A 型气象火箭探空仪的遥测跟踪试验结果可以得出, 此种以 GPS 为基础的遥测跟踪方案在气象火箭的遥测跟踪中是可行的, 而且相比传统的雷达跟踪具有实现方式简单、体积小、运输安装简便、成本低等诸多优势. 在未来气象火箭及探空火箭中具有很好的应用前景.

参考文献

[1] China Meteorological Administration Climate Monitoring Applications Management Division. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (5 ed.) [M]. Beijing: Meteorological Press, 1992. In Chinese (国家气象局气候监测应用管理司. 气象仪器和观测方法指南 (第五版) [M]. 北京: 气象出版社, 1992)

[2] GARMIN International Inc. GPS 15H & 15L Technical Specifications [R]. Olathe: GARMIN International Inc., 2002

[3] Anonymous. TY-4 Meteorological rocket system [J]. *Chin. J. Solid Rocket Tech.*, 2003, **26**(3):2-2. In Chinese (佚名. 天鹰四号气象火箭系统 [J]. 固态火箭技术. 2003, **26**(3):2-2)

[4] Fang Zhi. Transform coordinate systems and their coordinate conversions in surveying of global positioning system [J]. *Chin. J. Sci.*, 2009(21):38-39. In Chinese (方智. 全球定位系统 (GPS) 测量中坐标系转换及其坐标换算 [J]. 科技信息, 2009(21):38-39)