

气球卫星 1990-81B 和 1990-81C 的 轨道变化和高层大气密度的测定

刘 亚 英

(紫金山天文台, 南京 210008)

摘 要

本文测定给出我国首次发射的专用于高层大气探测的两颗气球卫星 DQ-1A(1990-81B) 和 DQ-1B(1990-81C) 整个寿命期间的轨道变化,以及利用轨道衰变率,采用适合气球卫星近圆轨道反测密度的一种方法,获得 500—900 km 高度范围内太阳峰年期间的高层大气密度及其变化。结果表明,同时发射的两颗面积质量比不同的气球卫星所测定的高层大气密度及其变化非常一致,且明显地显示密度随太阳活动逐日的和 27 天周期性的变化。本文将密度测定结果与高层大气模型进行了比较和分析。

关键词 气球卫星,轨道变化,大气密度

一、引 言

《大气一号》气球卫星于 1990 年 9 月 3 日由《长征四号》运载火箭,在发射《风云一号》气象卫星的同时,送入约 900 km 高度上的太阳同步轨道。这是我国第一次发射的专用于探测地球高层大气的卫星,它由两颗具有不同面质比 ($2.67\text{m}^2/\text{kg}$ 和 $1.46\text{m}^2/\text{kg}$) 的气球卫星 1990-81B 和 1990-81C 组成。初始轨道偏心率为 0.0004,轨道倾角 98.95° ,轨道周期 102.8 min。1990-81B 于 1991 年 3 月 11 日陨落,存在寿命 190 天,1990-81C 于 1991 年 7 月 24 日陨落,存在寿命 325 天。由于两颗卫星同时发射,结果可相互验证,面质比大且能精确计算,轨道变化快且寿命适中。轨道运行又正值太阳活动峰年,运行高度从 900 km 下降到 500 km 左右,这是其它探测仪器较难达到的高度区域。因此,除了轨道偏心率偏小的不利因素外,该两颗气球卫星是较理想的用于探测地球高层大气密度的卫星。本文采用适用于任意偏心率轨道的反测密度方法^[1],计算给出 500—900 km 高度的大气密度及其变化,为高层大气密度模型的比较和验证,为航天飞行器的设计和运行,提供具有科学价值的实测环境数据。

二、观测资料及精度

本文使用的全部观测资料是由中国科学院人造卫星光学跟踪观测网的七个观测台站

本文于 1993 年 4 月 15 日收到。

提供。观测网的经度跨度约 38° , 纬度跨度约 21° 。观测仪器为改装后的 GDJ 跟踪打印经纬仪, 其静态定位精度为 $30''$, 动态定位精度小于 $2'$, 记时精度为 $0.01''$ 。1990-81B 卫星, 共跟踪观测 160 天, 取得 6631 组资料, 1990-81C 卫星共观测 288 天, 取得 13987 组资料。各观测台站取得资料情况在表 1 列出。

表 1 观测资料数

站 号	01	02	03	04	05	06	07
站 名	北京天文台	乌鲁木齐天文台	云南天文台	广州人卫站	陕西天文台	紫金山天文台	长春人卫站
1990-81B		1902	723	430	594	206	2776
1990-81C	293	3103	2826	1531	1176	521	4537

三、卫星轨道

1. 测定方法

气球卫星入轨初期采用初轨计算方法^[2], 以从众多的空间目标中鉴别气球卫星的轨道。取得多圈资料后采用以地球形状摄动、大气阻力摄动、光压摄动和日月摄动的一阶理论精度分析方法^[3]为基础的微分轨道改进计算方法^[4,5]。轨道根数采用去掉短周期项摄动的平根数系统, 根数形式采用消除小偏心率无奇点变量的根数, 即半长径 a 、倾角 i 、升交点赤经 Ω 、 $\xi = e \cos \omega$ 、 $\eta = -e \sin \omega$ 、 $L = M + \omega$, 其中 e 为偏心率、 ω 为近地点纬度角、 M 为平近点角。由大气阻力引起的轨道衰变率 $\dot{n}$, 在轨道改进中, 作为改正量参加改进, 即平近点角 M 采用

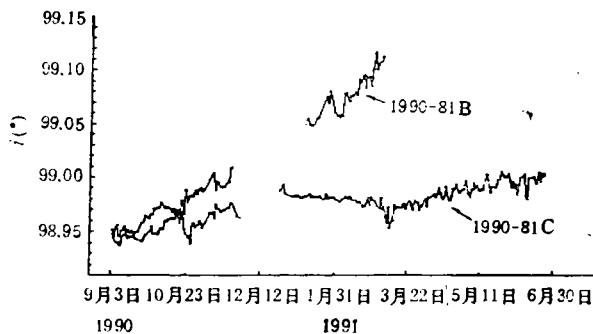
$$M = M_0 + n_0(t - t_0) + \frac{1}{2} \dot{n}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6} \ddot{n}_0(t - t_0)^3. \quad (1)$$

2. 轨道根数

用历元前后 1—3 天观测资料进行轨道改进, 得到两颗气球卫星所有资料日为历元

的轨道平根数和 $\dot{n}$, 其中定轨精度小于公里量级的分别为 124 组和 253 组, 时间分布在 1990 年 9 月 4 日至 1991 年 3 月 9 日和 7 月 20 日。改进根数与资料的拟合精度一般均小于 $2'$, 当太阳活动激烈或磁暴期间可达 $5'—6'$ 。改进根数的标准偏差, 当资料弧长在 $30^\circ—50^\circ$ 时, 根数 i 或 Ω 的标准偏差约 $0.00007—0.0002$, e 的标准偏差约 $0.00004—0.00006$, 对

应距离小于 400 m, L 的标准偏差约 $0.00028—0.00058$, n 的标准偏差为 $8 \times 10^{-7}—33 \times 10^{-7}$ (rev/day), $\dot{n}$ 的标准偏差为 $4 \times 10^{-7}—25 \times 10^{-7}$ (rev/day²)。

图 1 轨道倾角 i 的变化Fig. 1 Variations of orbital inclination i

3. 轨道变化

两颗气球卫星同时由《长征四号》火箭送入 900 km 高空后, 根据地面跟踪观测资料和轨道测定数据分析, 确证气球卫星入轨后不久均膨胀成球形。入轨初期, 1990-81C 运行在前, 约 10 天后, 1990-81B 追上 1990-81C。由于 1990-81B 的面质比大, 因此两球间的距离随着时间而增大, 最后, 面质比大的气球卫星比面质比小的卫星提前 135 天陨落。而两球寿命的比值(0.586)恰好与两球面质比的比值(1.822)成反比, 误差仅 7%, 进一步证明了两球入轨膨胀成功, 运行正常, 估算的面质比值正确可靠。

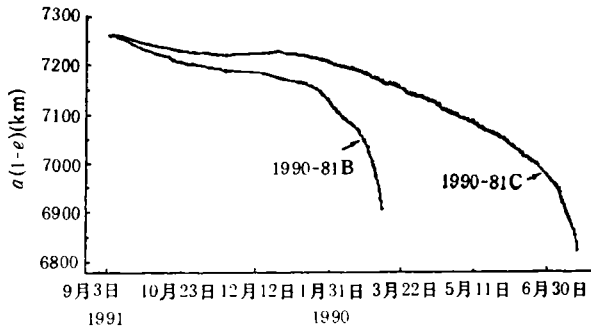


图 2 轨道近地距 $a(1-e)$ 的变化

Fig. 2 Variations of perigee distance $a(1-e)$

卫星轨道近地点高度从初始 900 km 左右逐渐下降直至进入稠密的大气层中烧毁陨落。实测轨道近地距 $a(1-e)$ 的变化在图 2 显示。显然, 1990-81B 卫星的面质比大, 受大气阻力也大, 其 $a(1-e)$ 的减小速度比 1990-81C 的快, 其寿命也就比 1990-81C 的短。

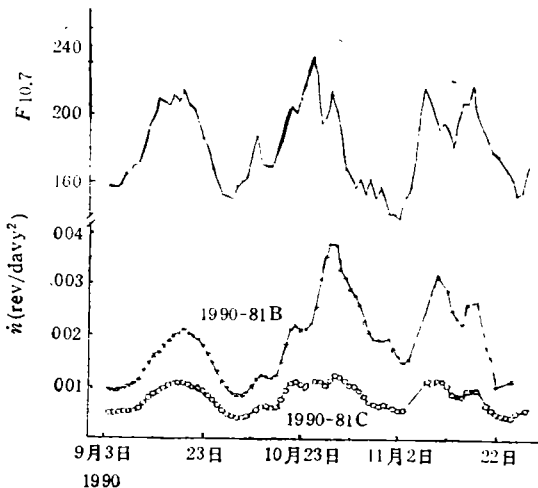


图 3 轨道衰变率和 $F_{10.7}$ 的变化

Fig. 3 Orbital decay rates $\dot{n}$ and variations of $F_{10.7}$

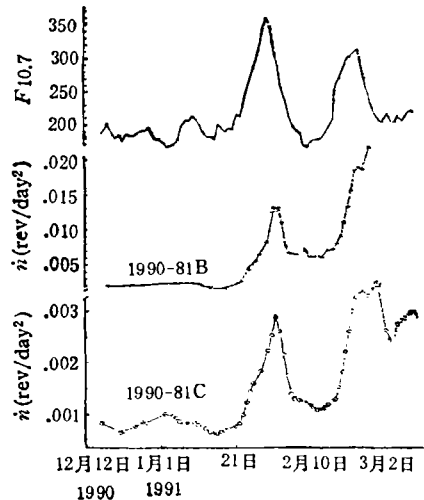


图 4 轨道衰变率和 $F_{10.7}$ 的变化

Fig. 4 Orbital decay rates $\dot{n}$ and variations of $F_{10.7}$

卫星轨道平运动 n 的变化, 主要是由于大气阻力和太阳光压摄动引起的。由于两颗

气球卫星轨道根数 Q, ω, M 的变化主要是由地球非球形摄动引起的; 根数 a (或 n) 和 e 的变化主要是由大气阻力引起的; 倾角 i 的变化则主要是由太阳光压摄动、大气旋转和日月摄动引起的。地球形状摄动影响很小, 太阳光压摄动引起气球卫星轨道倾角增大较明显。图 1 显示两颗气球卫星轨道倾角实测值的变化。

由于大气阻力, 两颗气球卫

气球卫星的初始轨道为太阳同步轨道, 所以摄动计算结果表明, 光压摄动对平运动变化率 $\dot{n}$ 的影响很小, 它比大气阻力摄动要小 10^{-3} 量级左右。因此实测轨道衰变率 $\dot{n}$ 主要是由大气阻力引起的, $\dot{n}$ 的变化直接反映了高层大气密度的变化。图 3—5 显示两颗气球卫星实测 $\dot{n}$ 的变化, 图中的上方曲线为对应日期的太阳流量 $F_{10.7}$ 的变化。

四、大气密度

1. 测定方法

利用卫星阻力资料反测轨道近地点附近密度的计算方法^[6], 通常仅适用于偏心率稍大的卫星轨道, 而并不适用于《大气一号》气球卫星的近圆轨道。为此, 本文根据卫星阻力资料的测定方法^[4]和反测高层大气密度的原理^[6], 吸取了数值方法的优点, 寻求了一种适用于任意偏心率轨道的反测高层大气密度计算方法^[1]。基本原理如下。

轨道平运动变化率 $\dot{n}$ 的大气阻力摄动方程可表示为:

$$\dot{n} = \frac{3b}{4\pi} n^2 a \int_0^{2\pi} \rho \frac{(1 + e \cos E)^{3/2}}{(1 - e \cos E)^{1/2}} \left(1 - d \frac{1 - e \cos E}{1 + e \cos E}\right)^2 dE, \quad (2)$$

$$b = C_D A / m,$$

$$d = \frac{\Lambda \dot{S}}{\sqrt{a}} \sqrt{1 - e^2} \cos i.$$

其中, C_D 、 A 、 m 、 Λ 和 $\dot{S}$ 分别表示阻力系数、卫星有效截面积、卫星质量、大气相对地球的旋转速度和地球自转角速度, a 、 i 、 e 和 E 分别表示轨道半长径、倾角、偏心率和偏近点角, ρ 为大气密度。

假设 $\dot{n}$ 分辨率范围内(通常为一天)实际密度 ρ 与模型密度 ρ_c 之比值近似为常量 K , 即

$$\rho = K \cdot \rho_c, \quad (3)$$

则由(2)式得

$$\dot{n} = K \cdot \dot{n}_c. \quad (4)$$

其中 $\dot{n}_c$ 为方程(2)中 ρ 用 ρ_c 代替后用数值积分求得。因此, 由实测 $\dot{n}$ 可得比值 K 。由于大气阻力对卫星轨道的影响主要集中在卫星经过密度最大的小区域内, 所以方程(3)对 $\dot{n}$ 分辨率范围内卫星运行轨道上大气密度最稠密的空间位置(经度 λ , 纬度 φ 和高度 z)最适用。由此可得

$$\rho(\lambda, \varphi, z) = K \cdot \rho_c(\lambda, \varphi, z). \quad (5)$$

显然, 利用不同大气密度模型和不同分辨率范围内的 $\dot{n}$, 由(4)式求得的 K 值是不同的, 但如果在 $\dot{n}$ 分辨率范围内, 不同大气密度模型存在比例关系, 则由上方法测定的密度值

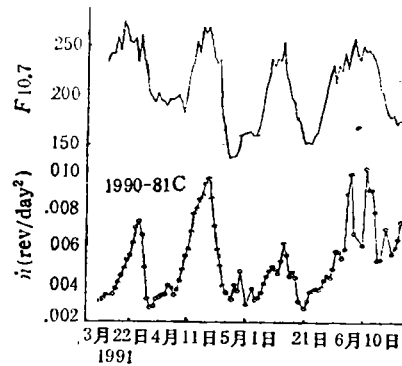


图 5 轨道衰变率和 $F_{10.7}$ 的变化

Fig. 5 Orbital decay rates $\dot{n}$ and variations of $F_{10.7}$

是近似一致的。

本方法的计算误差与轨道根数的测定误差, 实测衰变率 $\dot{n}$ 和 $F_{10.7}$ 及 K_p 的分辨率, 以及大气密度模型的相对误差基本一致。从上述观测资料的精度和改进根数的误差, 估算用本方法测定的密度, 其相对误差小于 10%。

2. 密度归算

利用上述方法和由卫星阻力资料建立的 CIRA-72 大气模型, 从两颗气球卫星轨道存在期间的实测衰变率 $\dot{n}$ 测定了 500~900 km 高度上共 377 个大气密度值。为了分析比较实测密度及其主要变化, 必须将测定的密度统一归算到某种标准时间和空间上的密度, 最常用且简便的归算方法是用大气模型密度修正式对密度进行各种修正。本文采用的归算方法是在常用归算方法基础上用比例因子 K 对模型密度作修正, 以提高归算后的密度与实际的符合程度。归算方法为:

$$\rho(S) = \rho - K \cdot [\rho_c - \rho_c(S)]. \quad (6)$$

其中, S 表示给定的标准时间和空间, ρ 为实测密度, ρ_c 为对应的模型密度, $\rho_c(S)$ 为 S 时的模型密度, $\rho(S)$ 为归算到 S 时的实测密度, K 为实测 $\dot{n}$ 与由 ρ_c 计算的 $\dot{n}_c$ 的比值。以下密度变化和分析比较中, 假设的归算标准情况为: (a) 时间: 1991 年 1 月 1 日零时, (b) 高度: 800 km, (c) 纬度: 45° , (d) 地方太阳时: 12^h , (e) $F_{10.7}$: 190, (f) K_p : 2.

3. 密度变化

两颗气球卫星面质比大, 高度高且变化幅度大, 轨道运行正好在太阳活动峰年期间, 因此测得的密度明显显示了高层大气密度的主要变化。

(1) 密度随高度的变化: 实测密度的高度范围约 500—900 km, 跨度达 400 km, 因此密度随高度变化非常明显。取标准情况 (a) 和 (c)—(f), 则归算后的密度, 除了有些变化(例如随 $F_{10.7}$ 的变化)未能完全消除外, 主要反映随高度的变化。实测密度归算结果以及由 CIRA-72^[7] 和 CIRA-86^[8] 大气模型给出的同样标准情况下的密度结果均在图 6 中显示。

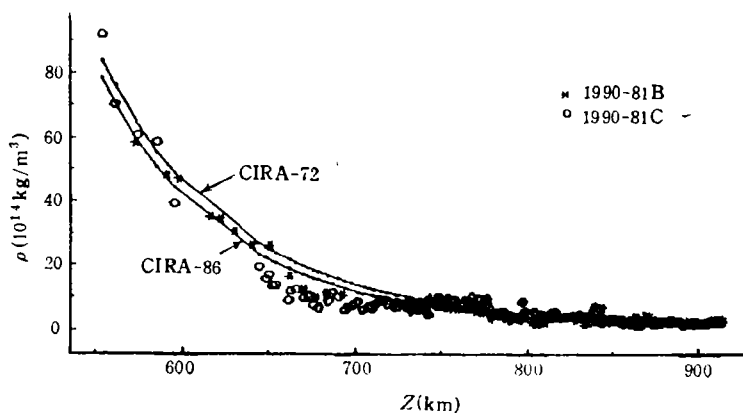


图 6 密度随高度的变化

Fig. 6 Variations of density with height

(2) 密度随太阳活动的变化: 气球卫星轨道运行期间太阳活动正处在高峰, $F_{10.7}$ 最高达 359, 最低超过 138, 平均大于 190, 因此实测密度随 $F_{10.7}$ 的变化起伏最为明显。当密度归算到标准情况 (a)–(d) 和 (f) 后, 则更清楚表现出密度随太阳活动逐日的和 27 天周期性的变化。图 7 显示实测密度随 $F_{10.7}$ 的变化以及相同情况下 CIRA-72 和 CIRA-86 模型密度变化曲线。图上方为对应日期的 $F_{10.7}$ 。

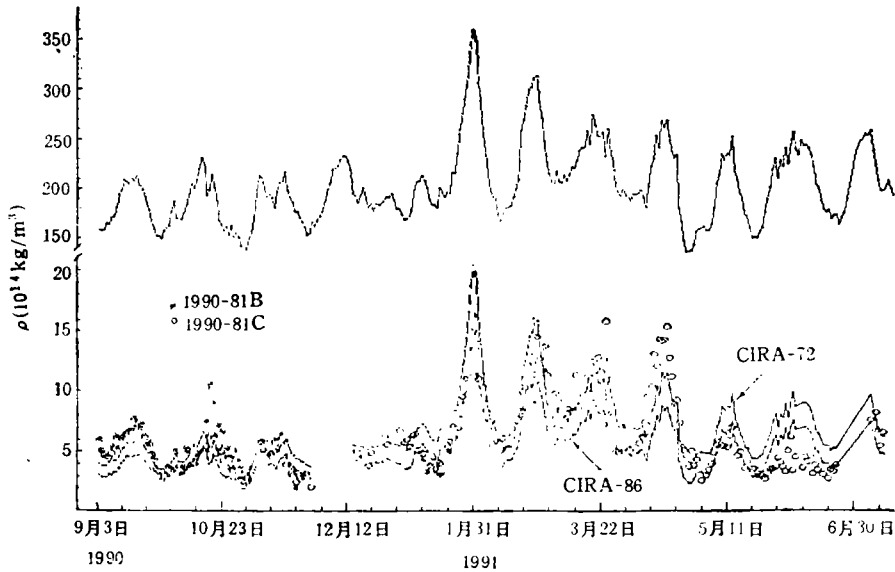


图 7 密度随太阳活动 $F_{10.7}$ 的变化
Fig. 7 Variations of density with $F_{10.7}$

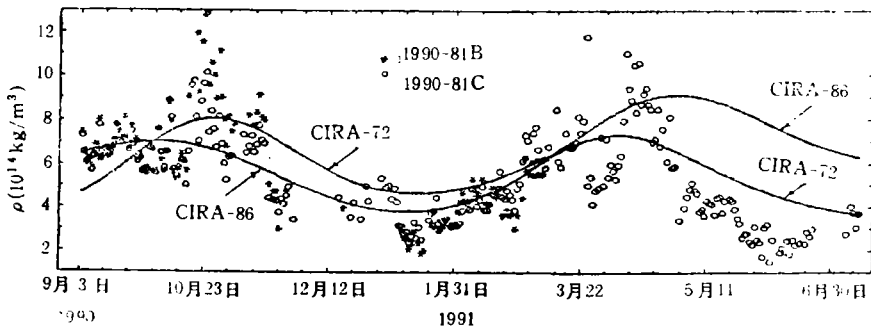


图 8 密度的半年变化
Fig. 8 Semi-annual variations of density

(3) 密度的半年变化: 实测密度除了明显显示短期变化外, 还轻微表现出一种长周期性的起伏, 即极大在 4 月和 10 月, 极小在 1 月和 7 月的半年变化。图 8 显示实测密度归算到标准情况 (b)–(f) 后的半年变化以及由 CIRA-72 和 CIRA-86 给出的半年变化曲线。

(4) 密度随地磁活动的变化: 大气密度的地磁活动效应, 除了与地方太阳时和纬度

有关外还与高度有关,高度愈低反映愈明显。气球卫星由于高度高,太阳活动效应最为明显而地磁活动效应在实测密度中反映不十分明显。

五、分析结果

1. 轨道衰变率 $\dot{n}$

两颗气球卫星实测轨道衰变率 $\dot{n}$ 的起伏变化,相互之间以及与太阳活动 $F_{10.7}$ 的逐日变化和 27 天周期性的变化之间,非常一致。当两球高度相差不大时,两者 $\dot{n}$ 的比值恰好是两者面质比的比值。例如 1990 年 9 月 10 日至 19 日,两球 $\dot{n}$ 的平均值的比值 1.854 与面质比的比值 1.822 仅差 2%。

2. 密度随高度变化

实测密度随高度变化与 CIRA 模型给出的变化曲线基本一致。实测密度平均比 CIRA-72 模型的平均低 14%,比 CIRA-86 高 1%。在 650—700 km 高度附近,实测密度稍低于模型密度,平均比 CIRA-72 低 40%,比 CIRA-86 低 30%。

3. 密度随太阳活动变化

由两颗气球卫星分别测定的密度随太阳活动变化起伏,相互之间非常一致,且与 $F_{10.7}$ 的逐日变化和 27 天周期性的变化密切相关。两组密度平均值仅差 2%。1990 年 9 月 4 日至 1991 年 3 月 7 日,实测密度平均值比 CIRA-72 低 10% 左右,比 CIRA-86 高 20% 左右。1991 年 3 月 8 日至 7 月 11 日,由 1990—81 C 测定的密度平均比 CIRA-72 低 14%,比 CIRA-86 高 14% 左右。

4. 密度的半年变化

实测密度半年变化起伏与 CIRA 大气模型的密度半年变化基本一致。实测密度半年变化的 10 月极大出现的时间比 CIRA-72 早,比 CIRA-86 迟; 4 月极大出现的时间接近 CIRA-72,早于 CIRA-86; 1 月极小出现的时间与 CIRA 模型一致,但下降幅度大于模型; 7 月极小出现的时间,实测早于模型,下降幅度也大于模型。

致谢: 感谢“大气一号”气球卫星工作组和中国科学院人造卫星系统应用研究中心观测台站为本工作提供了条件和观测资料。

参 考 文 献

- [1] 刘亚英,紫金山天文台台刊,第 12 卷,第 45 页,1993.
- [2] 刘亚英,紫金山天文台台刊,第 8 卷,第 165 页,1989.
- [3] 刘林等,人造地球卫星运动理论,科学出版社,1974.
- [4] 紫金山天文台人造卫星轨道计算组,卫星大气资料汇编(二),1979.
- [5] 刘亚英,紫金山天文台台刊,第 5 卷,第 208 页,1986.
- [6] King-Hele, D. G., Theory of Satellite Orbits in an Atmosphere, Butterworths, London, 1964.
- [7] CIRA 1972, COSPAR International Reference Atmosphere 1972, Akademie-Verlag, Berlin, 1972.
- [8] CIRA 1986, *Advances in Space Research*, Vol. 8, No. 5/6, 1987.

THE ORBITAL VARIATIONS OF BALLOON SATELLITES 1990-81B AND 1990-81C AND DETERMINATION OF AIR DENSITY

Liu Ya-ying

(Purple Mountain Observatory, Nanjing 210008)

Abstract

The orbital variations of two balloon satellites, DQ-1A (1990-81B) and DQ-1C (1990-81C), are determined and presented in this paper. A practical method for determining air density from the decay rate of nearly circular orbit is used and the upper atmospheric densities and variations at heights of 500—900km during the period when solar activity was just at a high level have been obtained from two balloon satellites. The results show that two sets of the density and variations determined respectively from two balloon satellites with different area/mass ratios are good agreement with each other and the variations of density with daily and 27 days periodically time scales of solar activity are very obvious. A comparison between observed density and the COSPAR International Reference Atmosphere 1972 and 1986 is made in this paper. The analytic results are valuable for the study of space environments and the application of upper atmosphere model.

Key words Balloon satellite, Orbital variation, Atmospheric density