

临近空间星载测风干涉仪覆盖性分析

文镇清^{1,2}, 冯玉涛^{1*}, 傅 颀^{1,2}, 朱 军³, 王 超³

1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 星载测风干涉仪采用临边观测模式测量大气气辉谱线的多普勒频移来实现大气风场探测, 干涉仪有效覆盖性会受到探测目标源及卫星平台模式的限制, 在卫星任务规划前端对观测数据进行分析, 判断其是否满足科学目标, 对风场数据应用具有重要意义。首先, 建立了临边观测几何模型, 对卫星运行期间仪器的临边切点分布情况进行仿真; 其次, 探讨了影响仪器有效观测的主要因素, 并以昼气辉探测为例, 分析在不同时段下, 太阳入射角与干涉仪有效时空覆盖性之间的关系; 最后使用分离变量法研究卫星轨道参数对测风干涉仪有效覆盖性的影响, 并评估不同轨道参数下的干涉仪对欧亚大陆的覆盖百分比。结果表明: 1) 影响仪器有效观测的因素主要为太阳天顶角和太阳散射角, 太阳入射角影响切点纬度覆盖范围和切点地方时; 2) 卫星轨道倾角和轨道高度共同决定仪器有效覆盖效率, 且轨道倾角为欧亚大陆覆盖百分比的主要影响因素, 当轨道倾角在 60° ~ 80° 之间时, 覆盖百分比可达到百分百。文中为星载干涉仪的后续设计及性能评估提供了观测几何框架, 实现了载荷观测覆盖效能的定量分析, 且该模型具备泛用于其他各类大气光学遥感载荷观测模式分析的能力。

关键词: 星载测风干涉仪; 临边观测; 数据有效性; 覆盖性; 覆盖百分比

中图分类号: TP721.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230106

0 引言

临近空间大气状态影响着人类活动和气候变化, 风场是临近空间大气参量的重要组成部分, 了解临近空间大气风场的扰动状态, 对于建立数值天气预报模型、分析气候变化、指导飞行器精确入轨等具有重大的意义^[1-2]。星载大气风场探测技术可分为主动探测技术和被动探测技术。激光雷达基于主动光学遥感测风技术, 通过主动发射激光脉冲, 探测其回波信号的多普勒频移来反演大气风速, 该技术测量精度高, 但覆盖范围较低。测风干涉仪基于被动光学遥感测风技术, 通过探测自然界中客观存在的示踪物或辐射源信号变化反演大气风场, 该技术可覆盖 30~300 km 的高度范围, 目前已成为重要的大气风场探测手段。

气辉是地球大气成分间光化学反应或吸收太阳电磁辐射释放出的微弱光辐射。气辉不受纬度的限制, 均匀分布在一定高度范围内的整个大气层中。气辉对环境变化敏感, 是当前临近空间星载风场探测系统的主要示踪源。

星载测风干涉仪主要基于三种技术体制, 分别为法布里—珀罗干涉仪、迈克尔逊干涉仪、多普勒差分干涉仪。目前, 国际上已经发展出一系列代表性卫星载荷, 如 1991 年搭载于高层大气研究卫星 (Upper Atmosphere Research Satellite, URAS) 上的风场成像干涉仪 (Wind Imaging Interferometer, WINDII)^[3-4]。2001 年, 搭载于电离层中层能量学和动力学 (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere Energetics and Dynamics, TIMED) 卫星上的多普勒干涉仪 (TIMED Doppler Inter-

收稿日期: 2023-01-25; 修订日期: 2023-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41005019); 中国科学院西部青年学者项目 (XAB2016A07); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2019JQ-931)

作者简介: 文镇清, 女, 博士生, 主要从事光谱成像技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 冯玉涛, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光谱成像及精细光谱探测方面的研究。

ferometer, TIDI)^[5]。2017 年,搭载于 NASA 电离层连接探测项目卫星 (Ionospheric Connection, ICON) 的全球高分辨率热层成像迈克尔逊干涉仪 (Michelson Interferometer for Global High-resolution Thermospheric Imaging, MIGHTI)^[6]。已有星载测风干涉仪基于临边观测模式,该模式同时具备天底观测的高空间覆盖范围优势和掩星观测的高垂直分辨率优势^[7-8]。在该模式下,干涉仪不受环境和空间的限制,沿大气气辉层的切线方向进行全球尺度、实时、精确、高分辨率的大气风场探测,并可以获得长周期的、随高度分布的风场廓线。

仪器的覆盖性是指仪器在某一时段内所能观测到的地表区域,覆盖性分析是卫星任务规划的前端。一方面,卫星轨道参数直接影响观测数据的时空覆盖特性,如极轨卫星可提供全球覆盖范围,但地方时覆盖性较差,无法提供任一纬度地区风场的日变化信息;倾斜轨道卫星可以在不同的当地时间进行风场探测,但纬度覆盖范围较小。另一方面,探测源的目标特性和观测条件决定了数据有效覆盖率和采样密度,如探测源气辉辐射较弱,当太阳光进入仪器视场时会严重影响成像质量;此外,WINDII 和 TIDI 的研究经验表明,当仪器观测视线穿过昼夜分界线时,风速反演会出现较大的误差,导致该位置处的数据无效^[4,9]。因此,有必要讨论轨道参数和可观测条件对临边测风干涉有效覆盖性的影响,为星载风场探测任务的卫星方案设计和科学数据有效性预评估提供借鉴。

文中基于卫星轨道参数及干涉仪视场指向参数建立了星载干涉仪临边观测几何模型。以 60 km 处的大气风场探测为例,对卫星运行期间临边切点数据进行模拟仿真,分析影响昼夜气辉有效观测的因素,且以昼气辉观测为例,分析有效切点时空覆盖性与太阳入射角之间的关系。接下来分析了不同卫星轨道倾角和卫星轨道高度对仪器有效数据的影响,并基于网格点法评估了卫星运行期间对欧亚大陆的覆盖百分比。

1 双视场临边观测几何模型与评估方法

星载干涉仪以临边模式观测地球大气层,观测视线离地球表面最近的点即为临边切点,通过改变视场的俯仰角可以对不同临边高度的大气辐射信号进行

切片式探测。如图 1 所示,干涉仪一次成像可同时获得不同临边高度的干涉信号,且每一临边高度的信号是不同高度的气辉辐射沿着观测路径的积分,基于反演算法可分解视线风速以获得切点处风速,从而实现风廓线的测量^[10-12]。随着卫星的运行,干涉仪的切点覆盖轨迹平行于卫星轨道分布,可进行全球范围的风场探测。由于单一视场只能得到沿视线方向的标量风速,因此测风干涉仪多使用两个分别与飞行方向成 45°和 135°的视场,先后对同一地区进行延时观测,两个沿不同视线方向上的大气风速可合成二维水平风速矢量。

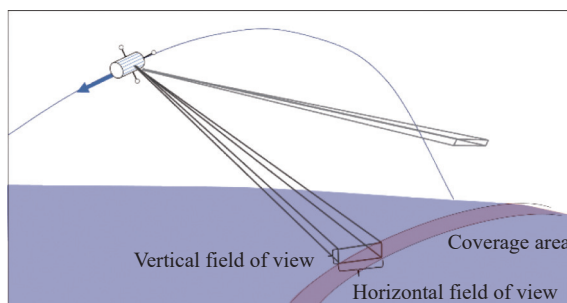


图 1 临边观测模式

Fig.1 Limb-view observation geometry

在卫星载荷任务规划的前端,需要对卫星的时空覆盖性进行全面准确的评估,为后续数据反演提供参考依据。影响空间覆盖的因素主要有:由卫星轨道和观测模式决定的切点轨迹及每次数据采集所对应的空间分辨率范围。

为分析卫星运行期间干涉仪的临边切点分布情况,需根据卫星轨道参数及仪器视场指向参数搭建临边观测几何模型,计算任意探测时间的卫星坐标、观测路径临边切点位置,切点位置太阳天顶角等。卫星轨道运动一般由开普勒轨道六参数来描述(包括轨道半长轴、轨道偏心率、轨道倾角、升交点赤经、平近地点角、近地点幅角),根据 SGP4 模型可计算卫星在任意时刻的位置和速度^[13]。临边切点位置由卫星参数和仪器参数确定,首先根据仪器视场指向参数得到卫星本体坐标系下的观测视线矢量,然后由卫星平台参数建立转换矩阵,将观测视线矢量转换到地心固定坐标系下,最后根据观测视线矢量和大气层的切点即可计算出临边切点高度参数^[14]。

卫星本体 (BODY) 坐标系原点在卫星的质心,如

图 2 所示, X 、 Y 、 Z 轴分别取卫星的三个主惯量轴, X 轴沿着卫星的纵轴, 一般是卫星的飞行方向, Z 轴在卫星的纵对称平面, Y 垂直于卫星纵对称平面。观测视线的高度角 EL 为视线与卫星本体坐标系 XY 平面的夹角, 方位角 AZ 为视线与卫星本体坐标系 XZ 平面的夹角, 卫星本体坐标系下的单位观测矢量可表示为:

$$\vec{v}_{\text{body}} = \begin{bmatrix} \cos EL \cos AZ \\ \cos EL \sin AZ \\ \sin EL \end{bmatrix} \quad (1)$$

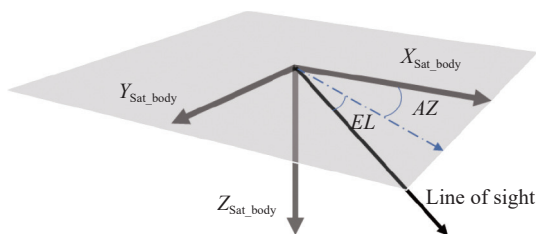


图 2 观测视线及卫星本体坐标系

Fig.2 Line of sight and body coordinate system

卫星轨道坐标系 (VVLH) 以卫星质心为原点, 如图 3 所示, Z 轴指向地心方向, Y 轴指向轨道负法线方向, X 轴是 Y 轴和 Z 轴的叉乘积。设 φ 、 α 、 ψ 分别为卫星平台的滚动角、俯仰角和偏航角。卫星本体坐标系到轨道坐标系的转换矩阵 $T_{\text{body}}^{\text{VVLH}}$ 由三轴旋转矩阵 T_x 、 T_y 、 T_z 决定^[14]:

$$T_{\text{body}}^{\text{VVLH}} = T_x \cdot T_y \cdot T_z$$

$$T_z = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}$$

$$T_y = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2)$$

地心固定坐标系 (ECEF) 以地心为原点, 如图 3 所示, Z 轴从坐标原点指向平均北极点, X 轴从原点指向本初子午线和赤道的交点, Y 轴由右手定则确定, 从轨道坐标系转换到地心固定坐标系的转换矩阵为:

$$T_{\text{VVLH}}^{\text{ECEF}} = [b_1, b_2, b_3] \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{-\vec{R}}{\|\vec{R}\|} \quad (4)$$

$$b_2 = \frac{b_3 \times \vec{V}}{\|b_3 \times \vec{V}\|} \quad (5)$$

$$b_1 = b_2 \times b_3 \quad (6)$$

式中: \vec{R} 和 \vec{V} 分别为地心固定坐标系下的卫星平台位置矢量和卫星速度矢量。

结合上述坐标转换矩阵与公式 (1) 可得观测视线在地心固定坐标系中的单位矢量 \vec{v}_{ECEF} , 此外, 切点在地心固定坐标系中的位置 \vec{r} 可以由卫星的位置矢量 \vec{R} 和视线矢量 \vec{v}_{ECEF} 得到:

$$\vec{v}_{\text{ECEF}} = T_{\text{VVLH}}^{\text{ECEF}} \cdot T_{\text{body}}^{\text{VVLH}} \cdot \vec{v}_{\text{body}} \quad (7)$$

$$S = -\vec{R} \cdot \vec{v}_{\text{ECEF}} \quad (8)$$

$$\vec{r} = \vec{R} + S \cdot \vec{v}_{\text{ECEF}} = (X_P, Y_P, Z_P) \quad (9)$$

式中: S 为卫星到切点的距离, 即卫星位置矢量在观测视线方向的投影; (X_P, Y_P, Z_P) 为 ECEF 坐标系中切点的三维坐标。

几何上, 临边观测视线是从探测器到球形大气的不同高度壳层的切线。但是, 大气的折射效应导致了视线的非直线特性, 致使切点位置发生偏移, 因此需对光线在地球大气中的折射传播路径进行追迹。如图 4 所示, 假设地球和大气层均为球形, 在估计切点高度时, 由斯涅尔定律可知, 对于所有视线上的点, 均满足以下关系式:

$$n(r) \cdot r \cdot \sin\theta_r = n(r_i) \cdot r_i = n(r_0) \cdot r_0 \quad (10)$$

式中: r 为视线上某点所在大气层的半径; r_i 为折射光束临边切点所在大气层的半径; r_0 为无折射时光束临边切点所在大气层的半径; θ 为视线与大气层交点的天顶角; $n(r)$ 为视线点所在大气层的折射率, 折射率是压强、温度和水汽含量的函数, 无折射时 $n(r_0) = 1$ 。

由公式 (10) 可知, 当保持相同的飞行高度和相同的观测视线时, 折射光束的切点高度 (相对于地球中心) r_i 和无折射时的切点高度 (相对于地球中心) r_0 的关系如下:

$$r_i = r_0/n(r_i) \quad (11)$$

在可见光和近红外波段, 国际大地测量协会组织专家 Rieger 提出的大气折射率模型被广泛应用^[15], 若目标源波长为 1286.7 nm, 高度为 30~90 km 的大气折射率处于 1.0003~1.000000011 之间, 由此造成的切点高度偏移为 0.01~1.7 km, 误差随着切点高度的增加

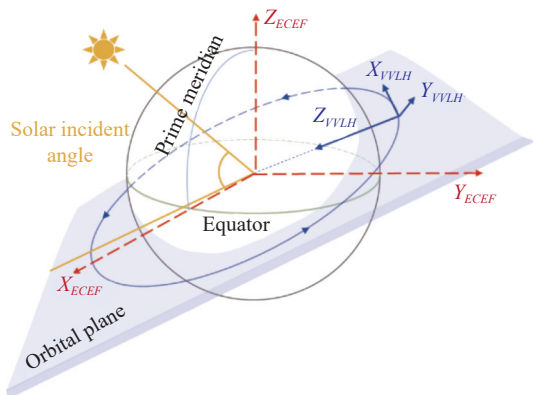


图 3 轨道坐标系及地心固定坐标系

Fig.3 Orbit coordinate system and earth centered earth fixed coordinate system

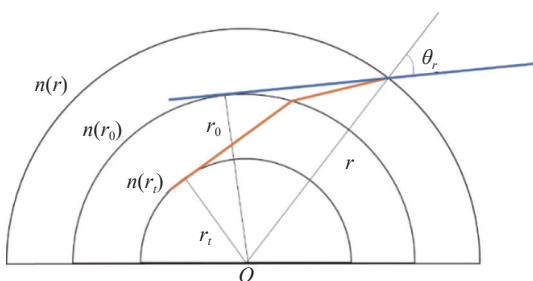


图 4 大气折射效应

Fig.4 Atmospheric refraction effect

而降低。测风干涉仪的垂直分辨率由科学需求和风场特性决定,一般为 3~5 km,因此在实际计算过程中可忽略大气折射效应。

仪器的水平空间分辨率受水平视场和图像曝光时间的影响,其中水平视场不是无限小,一般为 2°~3°,图像曝光时间由图像信噪比决定,一般为 20~30 s,二者导致仪器水平空间分辨率为几百公里×几百公里,因此仪器每次采集图像所对应的观测区域不仅仅是切点位置,而是以切点位置为中心的平行于轨道的条带(如图 1 所示)。基于观测模型对视场边缘的视线进行仿真,即可得到条带外沿轨迹的经纬度。

为了准确获取卫星运行期间星载仪器对特定区域的覆盖性能,使用网格分析法进行分析^[16],将地球表面按等面积法划分为一系列空间网格点(lat_i, lon_i),每个网格点均代表相同的覆盖面积 A_i 。如仿真时间内第 i 个网格点被切点轨迹覆盖,记 $f_i = 1$,反之 $f_i = 0$,遍历所有的网格点的覆盖情况,即可得到该时间段内的覆盖总面积。引入面积覆盖百分比定量评估仪器

覆盖性能,覆盖面积可用网格点面积代替,面积覆盖百分比为仿真时间内被覆盖的面积与总面积之比:

$$P = \frac{A_{COV}}{A_E} = \frac{\sum_1^k f_i A_i}{A_E} \times 100\% \quad (12)$$

式中: A_{COV} 表示被覆盖网格单元的累积面积; A_E 表示特定区域的面积,若分析全球覆盖百分比,则 A_E 为地球表面积; k 表示覆盖目标范围内的总网格点数,若分析仪器对欧亚大陆区域的覆盖情况,则 k 为欧亚大陆境内的网格点总数。

2 有效时空覆盖性

卫星运行期间,星载干涉仪会受到卫星运行模式的限制,导致探测效率不能达到百分之百,因此需要根据目标探测源特性对仪器的可观测条件进行分析。影响卫星有效观测的因素主要为太阳天顶角(Solar zenith angle, SZA)和太阳散射角(Solar scattering angle, SSA)。太阳散射角为仪器观测视线与太阳之间的角度,太阳天顶角包括卫星处的太阳天顶角和切点处的太阳天顶角。太阳天顶角影响观测位置的气辉辐射强度,太阳散射角影响观测视场内的有效信号。

当卫星处的 SZA 小于 90°时,卫星位于光照区域,仪器进入白天观测模式,可对昼气辉进行探测,反之,仪器切换到夜间观测模式。当卫星在昼夜分界线附近时,临边切点位置有可能处于黄昏状态(定义黄昏为太阳天顶角为 80°~100°之间的区域),此时观测视线横跨昼夜分界线,仪器接收到的信号同时包括昼气辉和夜气辉,造成风速反演误差大,因此有效切点采样位置需处于黄昏线外,也就是白天观测模式下切点处的 SZA 小于 80°,夜间观测模式下切点处的 SZA 大于 100°,此时可保证仪器视场内只接受昼气辉或者夜气辉。此外,由于传感器的探测目标为大气谱线,信号比较微弱,当太阳散射角较小时,太阳光源将会直接进入视场内,导致成像质量下降,如降低图像对比度,减小图像信噪比等。因此,要根据实际观测状态确定太阳散射角。

太阳入射角(β 角)是描述卫星覆盖性最有效的参数,该角度是太阳矢量与卫星轨道平面之间的夹角(图 3),由于地球是扁平状的,赤道附近额外的质量使在倾斜轨道平面运动的人造卫星产生进动,轨道平面

绕着地轴慢慢旋转,太阳入射角也随之变化。一年中任意时刻太阳入射角的取值与季节变换相关,其取值范围关于太阳赤纬角对称,且最大值和最小值与赤纬角之间的差值为轨道倾角。假定卫星轨道高度 $H=345\text{ km}$, 轨道倾角 $I=41.5^\circ$, 轨道偏心率 $e=0$ 。不同时间段的轨道平面的太阳入射角与升交点赤经之间的关系如图 5 所示,在春分、秋分时,由于地日线与赤道面夹角为 0, 太阳 β 角关于 0° 对称分布,极值的绝对值为轨道倾角,取值区间为 $-41.5^\circ\sim 41.5^\circ$ 。在夏至期间,太阳 β 角范围为 $-18.15^\circ\sim 65.03^\circ$; 冬至期间,太阳 β 角范围为 $-65.03^\circ\sim 18.15^\circ$ 。

为分析仪器有效切点纬度覆盖范围与太阳入射角之间的关系,以 60 km 高度的昼气辉探测为例,选取仪器视场方位角 $AZ=45^\circ$, 高度角 $EL=16.7425^\circ$, 并结合上述卫星轨道参数,计算春分(秋分)、夏至、冬至期间,卫星在不同升交点赤经下运行一周的切点覆

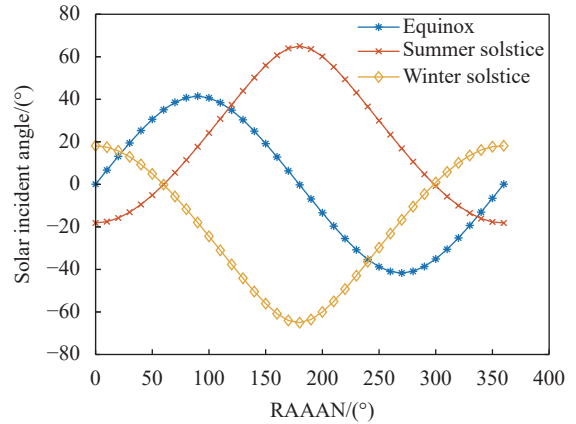


图 5 春分(秋分)、夏至、冬至期间太阳入射角分布情况

Fig.5 Solar incident angles at the spring equinox (autumn equinox), summer solstice, winter solstice

盖数据,假定太阳散射角最小为 15° , 依据三个昼气辉有效探测条件筛选数据,分析测风仪最佳观测时机。

图 6~图 8 分别为春分(秋分)、夏至和冬至期间不

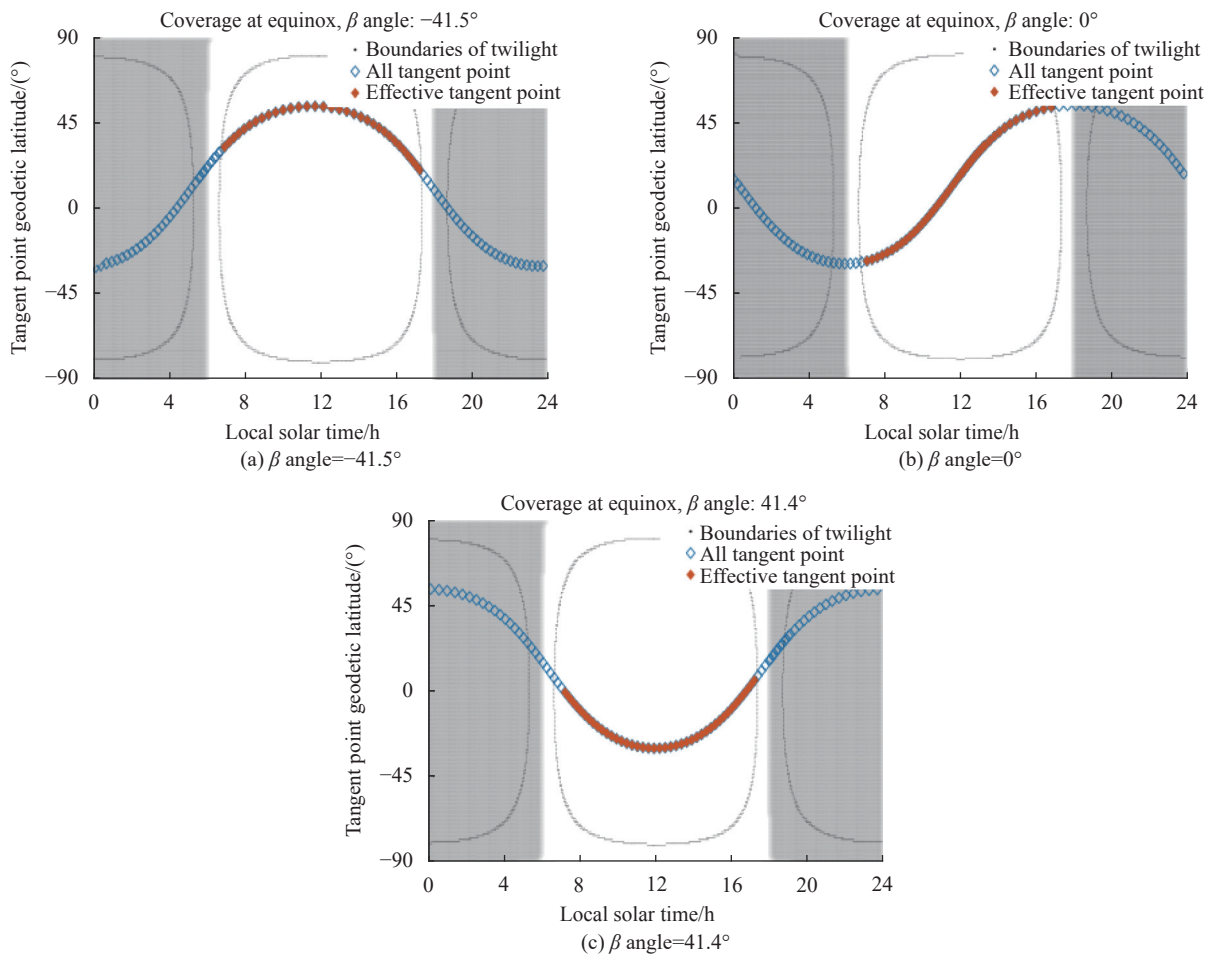


图 6 春分(秋分)不同太阳入射角下的覆盖情况

Fig.6 Coverage at the spring equinox (autumn equinox), equinox under different solar incident angles

同太阳 β 角下卫星运行一周的临边切点纬度和地方时覆盖情况, 红色为有效切点数据, 蓝色为无效切点数据。阴影区域代表夜晚, 明亮区域代表白天, 虚线为黄昏边界线, 即太阳天顶角为 90° 和 110° 的分界线。一年中昼夜分界线形状和太阳 β 角的变化使得有效切点数据的纬度覆盖产生相当复杂的演变, 其中太阳 β 角限制仪器的有效观测纬度范围, 昼夜分界线的变化影响观测位置的有效性。

首先, 太阳 β 角影响地方时-纬度覆盖轨迹的分布, 由于仪器观测视线指向北方, 因此切点覆盖轨迹相对于卫星星下点轨迹向北偏移, 覆盖范围为南纬 30° 到北纬 53° 。从图中可以看出, 随着季节的变化, 地方时-纬度覆盖轨迹的形状在太阳 β 角为极值的情况下保持一致, 即相同覆盖纬度的当地太阳时相同, 太阳 β 角为极大值和极小值这两种情况下覆盖轨迹关于中心纬度对称。在其他情况下, 同一纬度观测地

区的当地时间完全取决于太阳 β 角的值, 当太阳 β 角变化时, 切点的当地太阳时随之变化。图 6~图 8 的图 (a)~(c) 显示, 当太阳 β 角从极小值增大到极大值时, 相同纬度观测点的当地太阳时偏移了 12 个小时。

太阳 β 角除了影响地方时覆盖, 还影响有效切点纬度覆盖范围, 当太阳 β 角从极小值变化到极大值时, 有效纬度范围从北半球转移到南半球, 从图 6 春分(秋分)时刻可以看出, 当太阳 β 角为 -41.5° 时, 卫星在北半球处于白天, 在南半球处于夜晚, 因此仪器的有效观测区域仅限于北半球, 覆盖范围从赤道到北纬 53° ; 当太阳 β 角为 0° 时, 有效观测区域从南纬 27° 一直延伸到北纬 53° , 当太阳 β 角为 $+41.4^\circ$ 时, 仪器的有效观测区域仅限于南半球, 覆盖范围从赤道到南纬 30° 。夏至和冬至也是相同的情况, 但冬至北半球缺少太阳照明, 当太阳 β 角为极小值时(图 8(a)), 切点轨迹接近于昼夜分界线, 受切点太阳天顶角的限制, 导

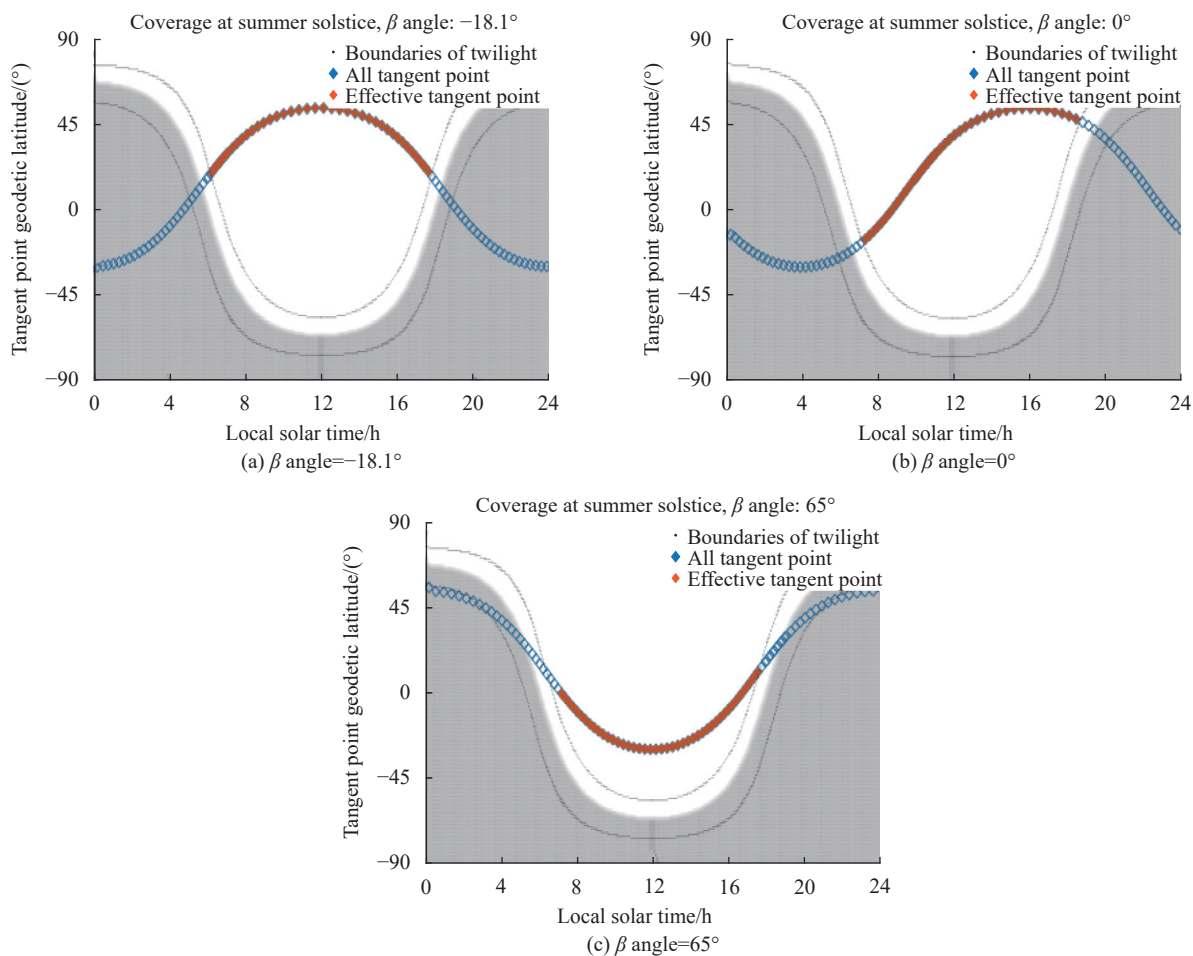


图 7 夏至不同太阳入射角下的覆盖情况

Fig.7 Coverage at summer solstice under different solar incident angles

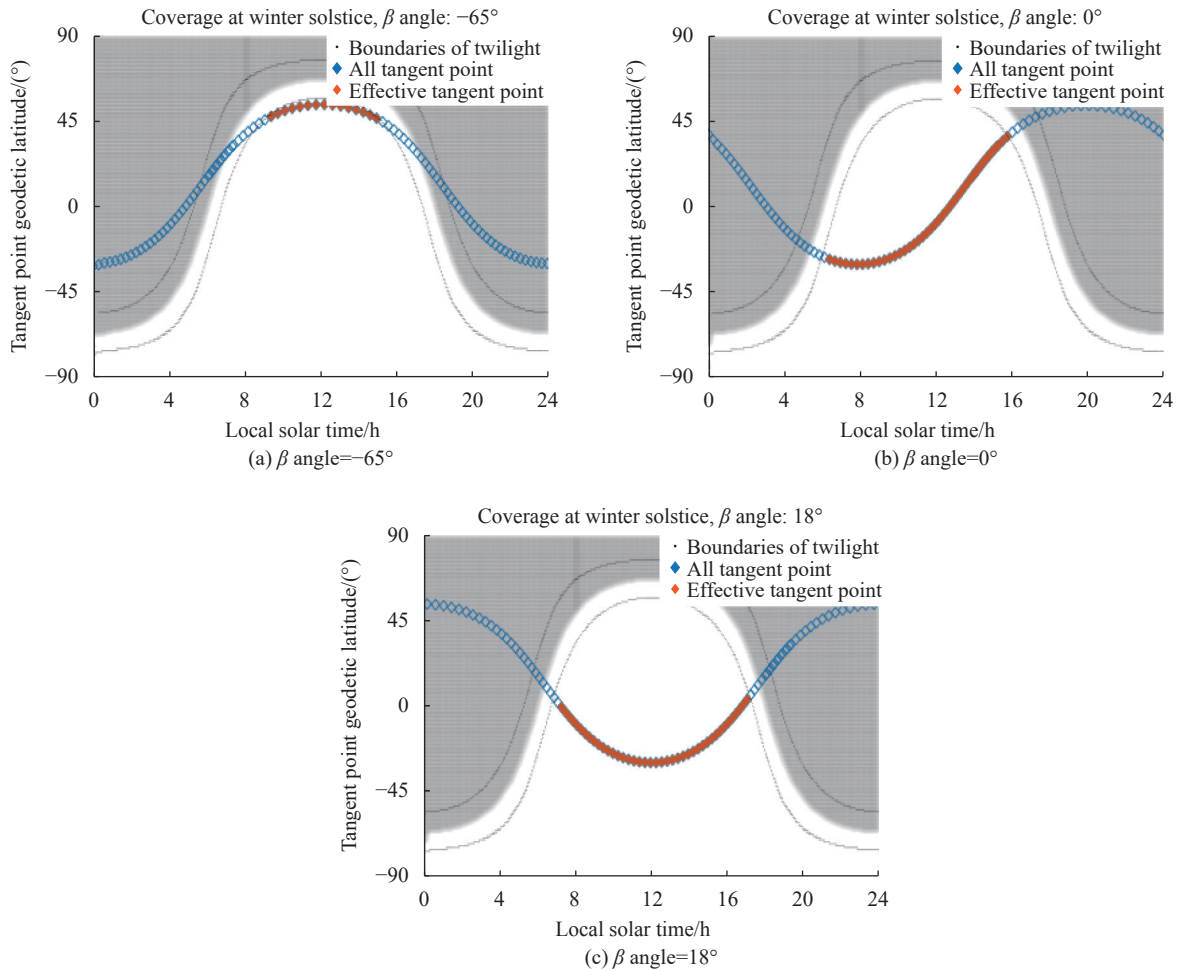


图 8 冬至不同太阳入射角下的覆盖情况

Fig.8 Coverage at winter solstice under different solar incident angles

致仪器的探测区域大大减少, 仅能覆盖北纬局部区域。

根据表 1 的轨道参数和仪器参数构建昼气辉临边观测模型, 仿真时间设置为 1 Jan 2020 00:00:00.000 UTCG—1 Jan 2021 00:00:00.000 UTCG, 计算中心视线的临边切点数据, 将太阳散射角、切点和卫星位置处的太阳天顶角考虑在内, 对切点采样数据的纬度覆盖范围、时间覆盖范围以及地球覆盖百分比进行模拟分析。

图 9 为一年内日间观测模式数据的纬度范围和太阳入射角变化情况, 随着卫星的运行, 太阳入射角发生显著变化, 长周期的振荡是由于太阳赤经赤纬变化导致的, 在夏至附近, β 角达到极大值, 冬至附近, β 角达到极小值, 振荡周期为一年。短周期振荡主要由卫星轨道进动导致, 根据卫星轨道参数计算, 卫星轨道每天进动 6.2° , 因此振荡周期约为 50 天。由图 9 可知, 切点纬度随着 β 角的变化而变化, 切点纬

表 1 轨道参数和视场方向参数

Tab.1 Orbit elements and boresight parameters

Parameter index	Value
Semimajor axis/km	6723.14
Eccentricity/($^\circ$)	8.898e-16
Inclination/($^\circ$)	41.5913
Right ascension of the ascending node/($^\circ$)	89.6792
Argument of perigee/($^\circ$)	0
Mean anomaly/($^\circ$)	0.0108628
Orientation of boresight (azimuth/elevation)/($^\circ$)	-45/16.7425

度覆盖范围从南纬 30° 到北纬 53° , 且在南纬 30° 和北纬 53° 处采集密度最大, 随着季节的不同, β 角的变化限制了仪器在白天观测到的纬度范围, 当 $\beta > 0$ 时, 主要覆盖范围为南纬; 当 $\beta < 0$ 时, 主要覆盖范围为北纬, 由于 $\beta < 0$ 时, 仪器视轴指向背阳的一侧, 导致切点纬度覆盖率变低, 且角度越小, 数据覆盖率越低。

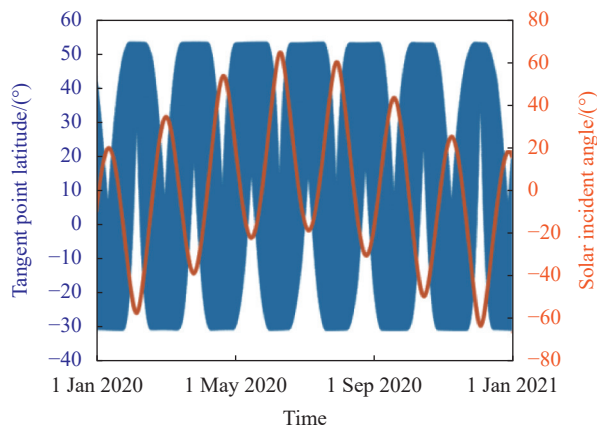


图 9 一年内的切点纬度覆盖和太阳入射角变化图

Fig.9 Tangent point latitude variation and solar incident angle variation for the one years

3 轨道参数对覆盖性的影响

卫星轨道进动速率由卫星轨道倾角和轨道高度共同决定, 太阳入射角的变化趋势与轨道进动速率相关, 且太阳入射角影响干涉仪的气辉观测效率及仪器的覆盖性, 文中使用分离变量法分析轨道参数对测风干涉仪覆盖性的影响, 由于昼气辉和夜气辉分析方法一致, 因此文中只针对昼气辉进行分析。将卫星轨道高度和轨道倾角设置为变量, 其他参数设置为定量。轨道选取圆轨道, 近地点幅角和真近地点角无实际意义, 设置为 0。升交点赤经只影响轨道平面的初始位置, 当仿真时间较长时, 该参数对卫星覆盖性影响较小, 因此未作进一步分析。

轨道参数设置如表 2 所示, 文中分析了高度为 60 km 处的切点覆盖情况, 视场的高度角根据探测目标的高度和卫星轨道高度计算, 其中 R_E 为地球半径。基于上述轨道参数和传感器参数建立临边观测几何模型, 时间设置为 1 Jan 2020 00:00:00.000 UTCG—1 Jan 2022 00:00:00.000 UTCG。通过改变轨道参数值, 基于网格点法分析仪器覆盖能力变化情况, 评价指标为有效覆盖率和覆盖百分比, 有效覆盖率为有效覆盖数据与总覆盖数据的比值。图 10 为一年内数据有效覆盖率随轨道高度和轨道倾角的变化, 当轨道倾角一定时, 数据有效率随着轨道高度的增大而减小; 当轨道高度一定时, 轨道越接近于赤道轨道, 仪器受太阳的影响较小, 数据有效率最大, 可达 40% 以上。当轨道倾角为 100° , 有效数据率随着轨道高度的增高

先减小再增大, 针对该现象进行分析, 图 11 为轨道倾角为 100° , 卫星轨道高度分别为 300、600、800、1 100 km 时临边切点纬度覆盖数据和太阳入射角变化情况。由于轨道接近于太阳同步卫星轨道, 因此太阳入射角变化缓慢, 当高度为 800 km 时, β 角大部分情况下小于零, 此时仪器的视场指向背阳区域, 可观测数据大量减少, 且 β 角越小, 数据有效率越低。当轨道高度为 1 200 km 时, β 角大于零, 此时仪器视场指向向阳的区域, 仪器的可观测情况大大增加。

表 2 轨道参数和视轴参数

Tab.2 Orbit elements and boresight parameters

Parameter index	Value	Value
Orbit altitude/km	400	300 : 50 : 1 300
Inclination/(°)	0 : 10 : 180	40
Eccentricity/(°)	0	0
Right ascension of the ascending node/(°)	0	0
Argument of perigee/(°)	0	0
Mean anomaly/(°)	0	0
Azimuth angle/(°)	-45	-45
Elevation angle/(°)	16.742	$90 - \text{asin}\left(\frac{60 \text{ km} + R_E}{\text{Orbit altitude} + R_E}\right)$

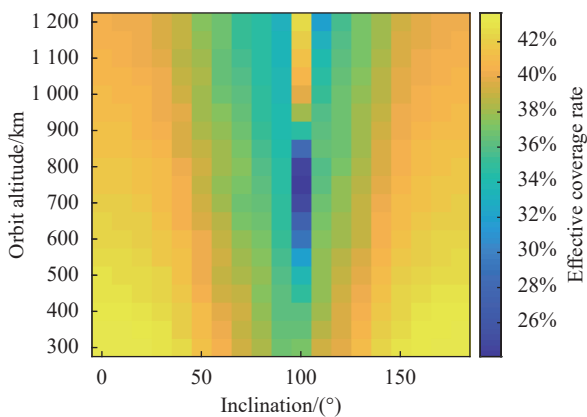


图 10 数据有效率

Fig.10 Effective data rate

文中选取欧亚大陆为分析对象, 分析仪器对该区域的覆盖情况, 图 12 为欧亚大陆覆盖面积百分比随轨道高度和轨道倾角的变化, 从图中可看出, 轨道倾角对欧亚大陆覆盖百分比的影响较大, 当轨道倾角为 $60^\circ \sim 80^\circ$ 时, 仪器可百分百覆盖欧亚大陆, 当轨道接近

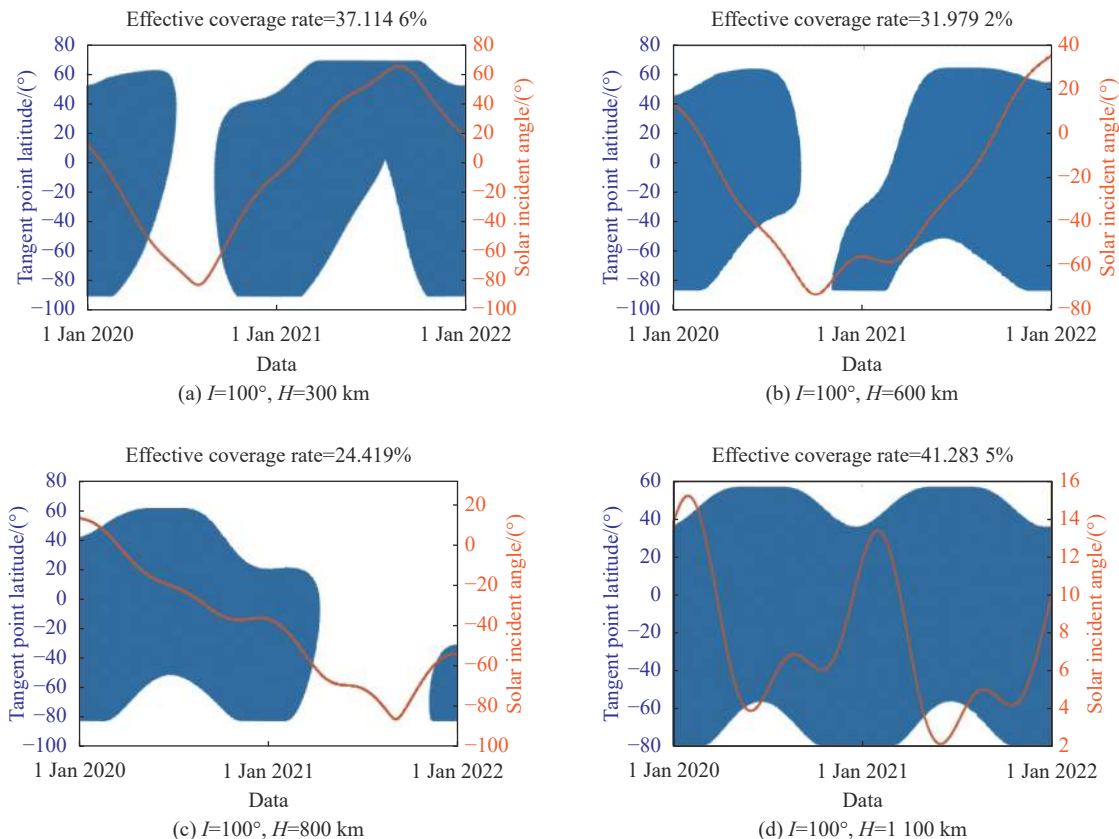


图 11 切点纬度覆盖数据和太阳入射角

Fig.11 Tangent latitude coverage and the solar incidence angle

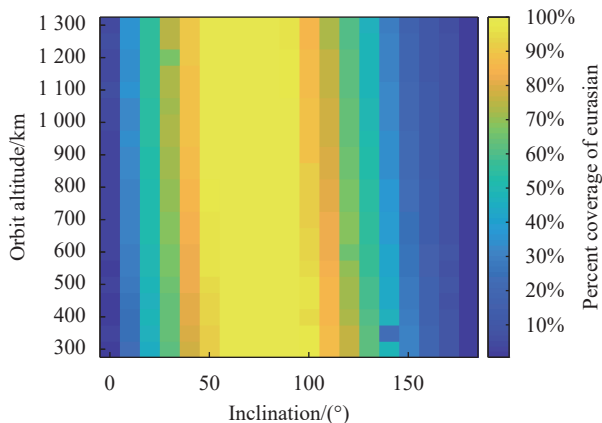


图 12 欧亚大陆面积覆盖百分比

Fig.12 Percentage coverage of Eurasia

赤道轨道时, 仪器不能探测到欧亚地区。轨道倾角一定时, 轨道高度对覆盖率影响较小, 随着轨道高度的增加, 覆盖百分比略微下降。

4 结 论

星载测风干涉仪基于临边观测模式, 可实现全球

范围的风场探测, 仪器时空覆盖性对数据应用具有重大意义, 文中搭建了星载测风干涉仪的临边观测几何模型, 并对仿真期间内仪器的覆盖性进行了分析。根据目标探测源的特性, 提出仪器有效探测的三个约束条件, 分别为太阳天顶角、卫星天顶角、太阳散射角, 并以昼气辉为例, 对春分(秋分)、夏至和冬至期间昼气辉的时空覆盖性进行了深入讨论, 结果表明有效纬度覆盖范围和地方时覆盖范围受太阳入射角的限制, 而太阳入射角与轨道进动紧密相关。接下来以圆轨道为例, 研究了卫星轨道参数对仪器昼气辉覆盖效率及欧亚大陆覆盖百分比的影响, 可以得出以下结论: 1) 轨道倾角和轨道高度共同影响着仪器的覆盖效率, 在轨道接近于太阳同步轨道时, 数据有效率随着轨道高度剧烈变化; 2) 轨道倾角是影响欧亚大陆覆盖百分比的主要轨道参数, 当轨道倾角在 $60^\circ\sim 80^\circ$ 之间时, 覆盖百分比可达到百分百。

参考文献:

[1] Englert C R, Brown C M, Drob D P. Wind at the top of the

- atmosphere [C]//NRL Review, 2012: 132-140.
- [2] Shepherd G G. Development of wind measurement systems for future space missions [J]. *Acta Astronautica*, 2015, 115: 206-217.
- [3] Skinner W R, Hays P B, Grassl H J, et al. High-resolution Doppler imager on the upper atmosphere research satellite[C]//Proceedings of SPIE, 1994, 2266: 281-293.
- [4] Shepherd G G, Thuillier G, Gault W, et al. WINDII, the wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(6): 10725-10750.
- [5] Killeen T L, Skinner W R, Johnson R M, et al. TIMED Doppler interferometer (TIDI)[C]//Proceedings of SPIE, 1999, 3756: 289-301.
- [6] Eenlert C R, Harlander J M, Brown C M, et al. Michelson interferometer for global high-resolution thermospheric imaging (MIGHTI): Instrument design and calibration [J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1): 553-584.
- [7] Meriwether J W. Studies of thermospheric dynamics with a Fabry-Perot interferometer network: A review [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, 68(13): 1576-1589.
- [8] Yuan Wei, Xu Jiyao, Ma Ruiping, et al. First observation of mesospheric and thermospheric winds by a Fabry-Perot interferometer in China [J]. *Chinese Sci Bull*, 2011, 55(35): 3378-3383. (in Chinese)
- [9] Killeen T L, Wu Q, Solomon S C, et al. TIMED Doppler Interferometer: Overview and recent results [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, 111(1): 184.
- [10] Harding B J, Makela J J, Englert C R, et al. The MIGHTI wind retrieval algorithm: Description and verification [J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1): 585-600.
- [11] Wang Li, Zhou Yi, Hua Dengxin, et al. Theoretical research and simulation of atmospheric wind and temperature detection based on Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1001001. (in Chinese)
- [12] Vallado D, Crawford P, Huisak R, et al. Revisiting spacetrack report #3[C]//Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference & Exhibit, 2006: 6753.
- [13] Liu Zhiwen, Li Shengyang. High precision limb height calculation of ultraviolet forward spectrometer of TianGong-2 [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(6): 1517-1523. (in Chinese)
- [14] 金群锋. 大气折射率影响因素的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] Han Chao, Deng Li, Xu Jia. Constellation covers improved grid points for performance evaluation [J]. *Computer Simulation*, 2006, 22(12): 21-23. (in Chinese)
- [16] Wang Yongqian. Method for calculating the angle of incidence of the Sun relative to the orbital plane in a sun-synchronous orbit [J]. *Spacecraft Engineering*, 1995, 4(4): 65-73. (in Chinese)

Analysis of coverage of the near space spaceborne wind interferometer

Wen Zhenqing^{1,2}, Feng Yutao^{1*}, Fu Di^{1,2}, Zhu Jun³, Wang Chao³

(1. Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. DFH Satellite Co., Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract:

Objective Spaceborne wind interferometer uses the limb observation mode to measure the Doppler shift of atmospheric airglow lines to realize atmospheric wind field detection. The effective coverage of interferometer will be limited by the source and satellite mode. It is of great significance for the application of wind field data to analyze the observation data at the front end of satellite mission planning to determine whether it meets the scientific objectives.

Methods According to the satellite orbit parameters and the instrument boresight parameters, the geometric model of limb observation is established (Fig.1), and the distribution of limb tangent points of instruments during

satellite operation is simulated. Then, the main factors affecting the effective observation of the instrument are discussed, and the relationship between the solar incidence angle and the effective spatio-temporal coverage of the interferometer at different time periods is analyzed by taking the detection of dayglow as an example (Fig.5). Finally, the method of variable separation is applied to study the influence of satellite orbit parameters on the effective coverage of the wind interferometer, and the coverage percentage of the interferometer under different orbit parameters on the Eurasian is evaluated.

Results and Discussions 1) The main factors affecting the effective observation of the instrument are the zenith angle and the scattering angle of the sun. The solar incidence angle affects both the latitude coverage and the local time of the tangent point. (Fig.6-8). 2) The coverage efficiency of the instrument is affected by both orbital inclination and orbital altitude. Moreover, orbital inclination is the main orbital parameter affecting the coverage percentage of Eurasia continent. When the orbital inclination is between 60° and 80° , the coverage percentage can reach 100% (Fig.12).

Conclusions This paper provides an observational geometric framework for the subsequent design and performance evaluation of the spaceborne interferometer, and realizes the quantitative analysis of the coverage efficiency of payload observation. The model has the ability to be widely used in the analysis of observation models of other types of atmospheric optical remote sensing payloads.

Key words: spaceborne wind interferometer; limb observation; data validity; coverage; coverage percentage

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (41005019); West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences (XAB2016A07); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (2019JQ-931)