文章编号:1671-8860(2010)06-0639-05　　**文献标志码**:A

不同季节 GPS 掩星廓线精度的比较研究

徐晓华[1]　Zhang Kefei[2]　汪海洪[1]

(1　武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2　澳大利亚墨尔本理工大学数学与地球空间科学学院,澳大利亚墨尔本,3001)

摘　要:以 1 a 的探空资料为参照,对南半球 4 个不同季节 COSMIC 掩星观测的折射指数、温度及气压廓线在 0～30 km 高度区间的精度进行了分析。结果表明,虽然就整个高度区间平均而言,春季掩星廓线的精度最差,但不同高度区间掩星廓线的精度差别较大。无论折射指数、气压还是温度,掩星廓线在 5～25 km 区间的精度都优于 0～5 km 与 25～30 km 区间。在 0～5 km 的低对流层,由于水汽的影响,夏季的折射指数廓线精度最低;冬季则最高。在 5 km 以上,夏季气压廓线的精度比其他季节高。不同季节各高度层掩星温度廓线的精度则无显著差异。

关键词:COSMIC;GPS 掩星;精度
中图法分类号:P228.42

利用星载 GPS 无线电掩星技术探测地球中性大气状态的基本原理及中性大气参数的反演方法在相关文献中已进行了详细介绍[1,2]。掩星观测是以掩星事件为基本单元进行的。每一次掩星事件对应着掩星地点上空的一组弯曲角、折射指数、气温、气压与湿度等大气参数廓线。以 24 颗 GPS 工作卫星为例,一颗 LEO 卫星理论上每天可以观测约 250 次下降掩星事件,如果同时具备观测上升掩星事件的天线,则掩星事件增加一倍。6 颗 COSMIC 卫星每天理论上可观测到约 3 000 次掩星事件,实际获得量为约每天 2 000 次左右[3]。

GPS 掩星廓线的精度通常采用数值天气预报(numeric weather prediction,NWP)模式输出资料或探空资料进行验证。基于已有的工作基础[4,5],本文以探空廓线为比较标准,对 1 a 内不同季节中 GPS 掩星折射指数、气压及温度廓线的精度进行了比较。

1　数据资料

由于其可靠性已经得到验证,本文的研究仍然采用澳大利亚气象局提供的 38 个站的探空资料。掩星资料采用了由 CDAAC 提供的 COSMIC 任务的 Level2 数据产品。数据的时间范围为 2008-03-01～2009-02-28 共 365 d。图 1 是参与验证的探空站的地理位置分布。这些探空站以 6 h 为间隔,每天最多提供 4 次观测资料,最少提供 1 次观测资料。图 2 是这 365 d 内,每一天所获得的 COSMIC 掩星廓线的数量,这些掩星廓线全球分布。

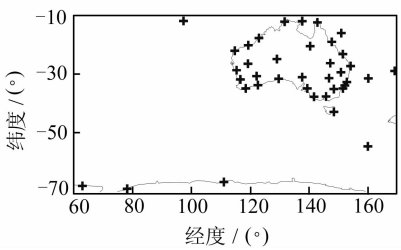

图 1　澳大利亚无线电探空站的地理位置分布
Fig. 1　Geographic Distribution of Radiosonde Stations Supported by Bureau of Meteorology, Australia

由图 2 可见,在 2008-03-01～2009-02-28 这 1 a 时间内,实际每天获取的 COSMIC 掩星廓线的数量绝大部分在 1 500～2 500 次之间变化,但也

收稿日期:2010-04-21。
项目来源:国家自然科学基金资助项目(40904002);国家自然科学基金国际合作中澳特别基金资助项目(40911120024);国家 863 计划资助项目(2007AA12Z339)。

有几天的掩星廓线数量低于1 000次。例如，2008-03-20(第20 d)，廓线数量为707次；9月3日(第187 d)，廓线数量为739次；11月5日(第250 d)，廓线数量只有528次。导致这些时间廓线数量较少的原因主要是LEO卫星运行状态的问题。

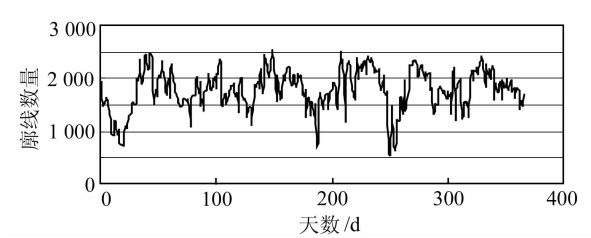

图2 2008-03-01～2009-02-28期间每天的COSMIC掩星廓线数量

Fig. 2 Number of COSMIC RO Profiles Observed During 365 d from Mar. 1, 2008 to Feb. 28, 2009

2 比较方案

本文在分析折射指数精度的基础上，也对CDAAC提供的气压与温度廓线的精度进行了分析，以便对掩星产品的精度有更全面的了解。

利用探空资料对掩星廓线的精度进行验证的方法在文献[5]中有详细介绍，基本思路为：首先，明确由距离差限值和时间差限值给出的配对标准及进行验证的高度区间；然后，由此配对标准出发，得到两种不同技术观测的廓线对；进一步对所关心的高度区间进行等间隔分层，内插出各层上每对廓线的参数值；最后，对所有廓线对进行统计比较。对于折射指数(或气压)廓线，求出各高度层折射指数(或气压)的平均相对偏差$\overline{\Delta N}(j)$(或$\overline{\Delta P}(j)$)与相对标准偏差$S_{N(j)}$(或$S_{P(j)}$)(参数j对应高度层的编号)；对于温度廓线，则求出各高度层温度的平均偏差$\overline{\Delta T}(j)$及标准偏差$S_{T(j)}$。对所有高度层各大气参数平均(相对)偏差的绝对值求平均值，分别得到总平均(相对)偏差$\overline{\Delta N}$、$\overline{\Delta P}$及$\overline{\Delta T}$；对所有高度层各大气参数(相对)标准偏差求平均值，分别得到总平均(相对)标准偏差$\overline{S}_N$、$\overline{S}_P$及$\overline{S}_T$。

本研究基于文献[5]的成果，选取距离差限值300 km，时间差限值3 h为掩星廓线与探空廓线的配对标准，以确保尽可能多的廓线对参与对比。鉴于探空观测主要在30 km高度以下进行，因此，验证的高度区间为0～30 km，在该高度区间内以200 m为间隔进行分层，计算各高度层大气参数的相应统计参量。为了进行不同季节的对比，将一年的时间分为4个季节，分别在每个季节内对掩星廓线和探空廓线进行对比，绘制相应的统计参量随高度变化的曲线图，进一步对不同季节的统计参量曲线图进行比较。

3 结果与分析

表1列出了1 a中，澳大利亚所在南半球4个不同季节内，掩星及探空观测到的折射指数、温度及气压廓线对数及相应的$\overline{\Delta N}$、$\overline{\Delta P}$、$\overline{\Delta T}$、$\overline{S}_N$、$\overline{S}_P$及$\overline{S}_T$。由表1可见，同一时期内的气压廓线对数远大于温度与折射指数廓线对数。这主要是由于部分探空数据文件中只给出了气压，而缺少温度与大气湿度的信息。

由4个不同季节的折射指数总平均相对偏差$\overline{\Delta N}$、气压总平均相对偏差$\overline{\Delta P}$及温度总平均偏差$\overline{\Delta T}$的比较可见，在0～30 km高度区间内，平均而言，冬季掩星廓线的准确度最高，而夏季最低。春季的折射指数总平均相对标准偏差$\overline{S}_N$、气压总平均相对标准偏差$\overline{S}_P$及温度总平均标准偏差$\overline{S}_T$均是4个季节中的最大值，则反映在该高度区间内，平均而言，春季掩星廓线的精度最差。不同高度层掩星廓线的准确度与精度则需要进一步由各大气参数的平均(相对)偏差与(相对)标准偏差随高度变化的曲线判定。

表1 不同季节GPS掩星与探空廓线对数及统计参数

Tab. 1 Number of Observation Pairs of GPS Radio Occultation vs. Radiosonde and Statistical Parameters in Four Different Seasons

南半球季节	折射指数			气压			温度		
	廓线对数	$\overline{\Delta N}$/%	$\overline{S}_N$/%	廓线对数	$\overline{\Delta P}$/%	$\overline{S}_P$/%	廓线对数	$\overline{\Delta T}$/%	$\overline{S}_T$/%
秋季(2008-03-01～2008-05-31)	662	0.12	1.67	1 420	0.1	0.98	677	0.23	2.04
冬季(2008-06-01～2008-08-31)	810	0.08	1.67	1 520	0.08	1.09	819	0.17	2.23
春季(2008-09-01～2008-11-30)	773	0.10	1.83	1 458	0.1	1.13	784	0.26	2.26
夏季(2008-12-01～2009-02-28)	789	0.15	1.81	1 377	0.1	0.86	818	0.28	2.07

图 3～6 分别给出了表 1 列出的 4 个季节中，　　折射指数、气压以及大气温度在不同高度层的统

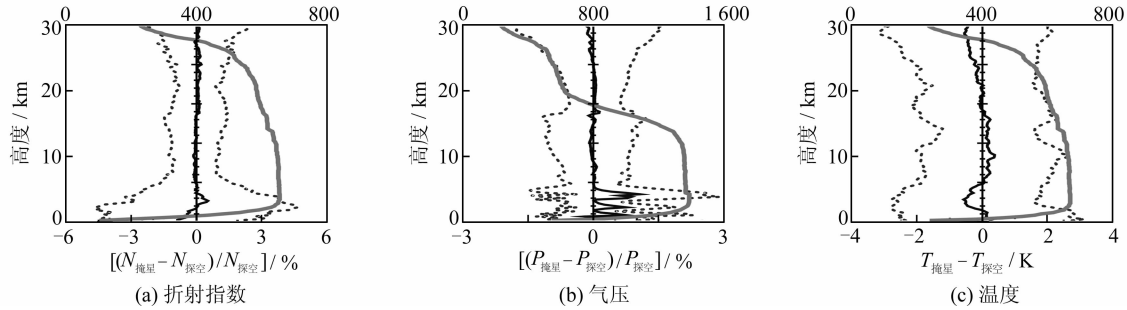

图 3　南半球秋季折射指数、气压及温度廓线统计比较结果

Fig. 3　Statistical Comparisons of Refractivity Profiles, Pressure Profiles and Temperature Profiles Between Collocated COSMIC RO and Radiosonde Soundings During Austral Autumn

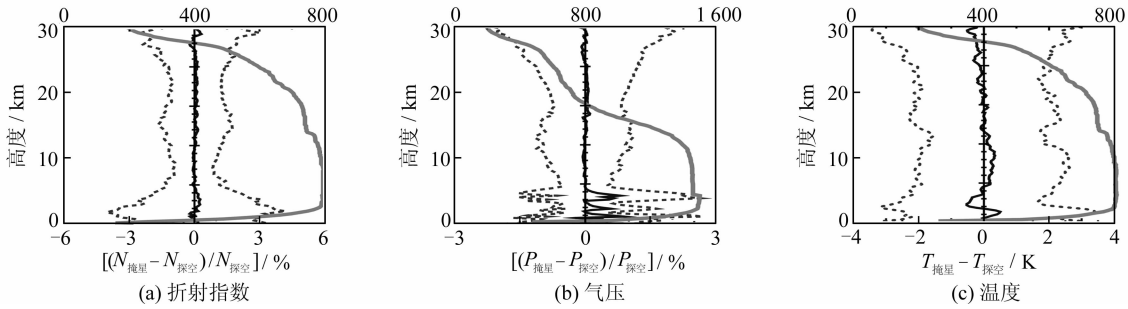

图 4　南半球冬季折射指数、气压及温度廓线统计比较结果

Fig. 4　Statistical Comparisons of Refractivity Profiles, Pressure Profiles and Temperature Profiles Between Collocated COSMIC RO and Radiosonde Soundings During Austral Winter

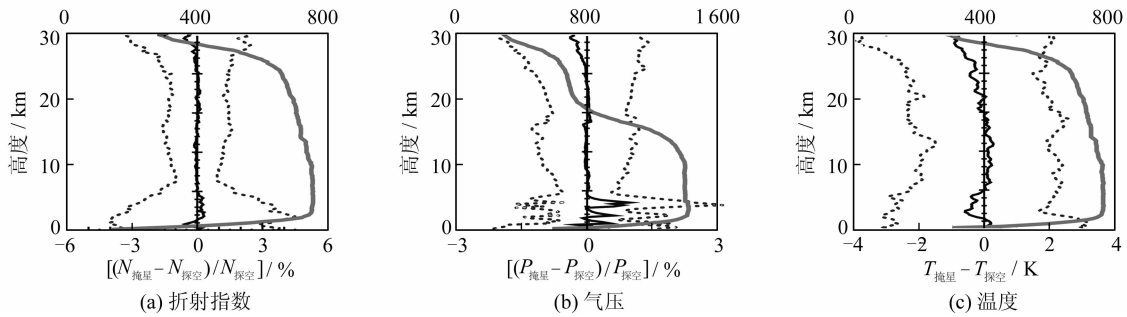

图 5　南半球春季折射指数、气压及温度廓线统计比较结果

Fig. 5　Statistical Comparisons of Refractivity Profiles, Pressure Profiles and Temperature Profiles Between Collocated COSMIC RO and Radiosonde Soundings During Austral Spring

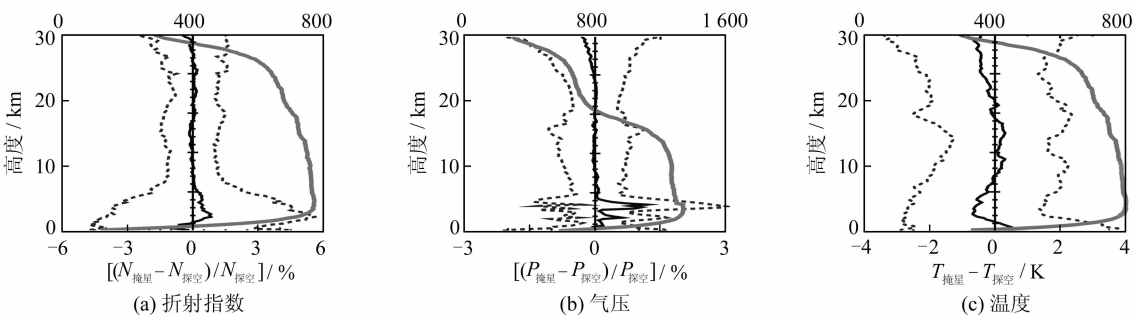

图 6　南半球夏季折射指数、气压及温度廓线统计比较结果

Fig. 6　Statistical Comparisons of Refractivity Profiles, Pressure Profiles and Temperature Profiles Between Collocated COSMIC RO and Radiosonde Soundings During Austral Summer

计比较结果。每幅图中的黑实线是相应大气参数的平均(相对)偏差曲线,两条黑虚线是平均(相对)偏差±(相对)标准偏差曲线,这3条曲线对应的横坐标轴在图形底部。灰实线是廓线对的数量,对应的横坐标轴在图形顶部。

由图3～6各子图(a)折射指数廓线的统计比较结果可见,除了5 km以下的低对流层,各季节掩星相对于探空均无系统性偏差。在低对流层,图4(a)中的平均相对偏差及相对标准偏差的绝对值明显小于其他3个季节,而图6(a)中的平均相对偏差及相对标准偏差的绝对值则明显大于其他3个季节,反映了低对流层夏季水汽含量较高,对掩星观测精度的影响较大;而冬季水汽含量较低,对掩星观测精度的影响较小。在每个季节内,掩星折射指数的精度在5～25 km之间均较高。图4(a)显示在冬季,折射指数相对标准偏差在5 km高度处为1.8%,在25 km高度处为1.6%;图6(a)则显示在夏季,折射指数相对标准偏差在5 km高度处为3.3%,在25 km高度处为1.5%。图3(a)及图5(a)反映了在其他两个季节,5～25 km高度区间内,折射指数相对标准偏差均在2.5%内。5 km以下,由于大气中水汽含量的影响,折射指数平均相对偏差增大。图6(a)显示由于夏季水汽含量比较大,折射指数平均相对偏差在2.2 km处达到了4.8%。在25 km以上,由于电离层改正残余影响等因素,掩星折射指数廓线的精度逐渐降低。以图4(a)为例,折射指数相对标准偏差在25 km以上逐渐增大,在30 km处达到2.2%。

由图3～6各子图(b)气压廓线的统计比较结果可见,各季节的气压平均相对偏差及相对标准偏差在低对流层都比较大。以图6(b)夏季为例,虽然表1中列出的0～30 km高度区间内气压总平均相对偏差为0.1%,但在5～25 km区间内,气压总平均相对偏差只有0.02%;25～30 km区间,为0.16%;而0～5 km区间内,气压总平均相对偏差却达到0.35%,在4.2 km处达到最大值1.2%。同样的,表1中列出夏季0～30 km高度区间内气压总平均相对标准偏差为0.86%。但在5～25 km区间内,气压总平均相对标准偏差只有0.7%;25～30 km区间内和0～5 km区间内的气压总平均相对标准偏差均为1.2%。不同季节的结果比较显示在5 km以上,夏季气压廓线的精度比其他季节高。

由图3～6各子图(c)温度廓线的统计比较结果可见,各季节5 km以下,温度平均偏差均呈现负值。图3(c)所示的秋季温度平均偏差在3.4 km高度左右达到−0.6 K;图6(c)所示的夏季温度平均偏差则在2.6 km左右达到−0.7 K。与折射指数和气压相似,温度精度在5～25 km之间比较高。以图6(c)为例,在0～30 km整个区间内,温度标准偏差在1.4～2.8 K间变化,均值为2.1 K;0～5 km区间内的温度总平均标准偏差为2.4 K;5～25 km区间内的温度总平均标准偏差为1.9 K;25～30 km区间内为2.4 K。不同季节的结果比较显示在各高度层掩星温度廓线的精度均无显著差异。

4 结 语

本文将2008-03-01～2009-02-28 1 a的时间分为南半球的秋、冬、春、夏4个季节。在各季节内,以3 h、300 km为配对标准,利用澳大利亚气象局提供的无线电探空资料对0～30 km高度区间内COSMIC掩星折射指数、气压及温度廓线的精度进行了研究,并对不同季节掩星廓线的精度进行了比较。结果表明,虽然就整个高度区间平均而言,春季掩星廓线的精度最差,但不同高度区间掩星廓线的精度差别较大。无论折射指数、气压还是温度,掩星廓线在5～25 km区间的精度都优于0～5 km与25～30 km区间。在0～5 km的低对流层,由于水汽的影响,夏季的折射指数廓线精度最低;冬季则最高。在5 km以上,夏季气压廓线的精度比其他季节高。不同季节各高度层掩星温度廓线的精度则无显著差异。

参 考 文 献

[1] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, et al. Observing Earth's Atmosphere with Radio Occultation Measurements Using the Global Positioning System [J]. J Geophys Res, 1997, 102(D19): 23 429-23 465

[2] Rocken C, Anthes R, Exner M, et al. Analysis and Validation of GPS/MET Data in the Neutral Atmosphere[J]. J Geophys Res, 1997, 102(D25): 29 849-29 866

[3] Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early Results [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(3): 313-333

[4] 徐晓华,罗佳. COSMIC掩星折射指数廓线的统计验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(2): 214-217

[5] 徐晓华，Zhang Kefei，罗佳，等. GPS 掩星与探空观测统计比较中配对标准的比较研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版，2009，34 (11)：1 332-1 335

第一作者简介：徐晓华，博士，副教授，现主要从事 GPS 气象学方面的研究。
E-mail：xhxu@sgg. whu. edu. cn

Comparison of Precision of GPS Radio Occultation Profiles in Different Seasons

XU Xiaohua[1]　*ZHANG Kefei*[2]　*WANG Haihong*[2]
(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)
(2 School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, VIC 3001, Australia)

Abstract: With one year of radiosonde observations as reference, the precision of GPS radio occultation (RO) atmospheric parameter profiles, including refractivity profiles, temperature profiles and pressure profiles, in four different austral seasons are compared and analyzed at 0～30 km altitude. We found that in average, the precision of RO profiles is worse in the austral spring than in the other three seasons. But in different altitude regions, the precision of RO profiles varies greatly. Generally, RO profiles are more precise at 5～25 km than at 0～5 km and at 25～30 km. In the lower troposphere of 0～5 km, the precision of RO refractivity profiles is the worst in the austral Summer and best in the austral winter. This is that the water vapor content in the atmosphere is the highest in summer and is the lowest in the winter. Above 5 km, the precision of RO pressure profiles is the highest in the Austral summer. The precision of RO temperature profiles doesn't vary much in different seasons and in different altitude regions.

Key words: COSMIC; GPS radio occultation; precision

About the first author: XU Xiaohua, Ph. D, associate professor. She is concentrated on the research of GPS meteorology.
E-mail: xhxu@sgg. whu. edu. cn

(上接第 638 页)

or *k*-band ranging system (KBR) measurements. This approach can reduce the non-gravitational force effects on LEO, obviously. We analyzed the 20 d data coverage and the orbit radial error effects on this approach. With 20 d precise orbital data, the crossover points have well global coverage. On the other hand, the radial orbit accuracy of COSMIC data is about 15 cm at 800 km orbital altitude. It is not sufficient for the time-variable gravity field recovery with crossover point approach. If the orbital radial component error is reduced to about 1 cm, the time-variable gravity field can be recovery with acceptable accuracy.

Key words: LEO cluster; satellite-to-satellite tracking; Earth gravity field; crossover point approach

About the first author: LUO Jia, Ph. D. associate professor, majors in geodesy.
E-mail: jluo@sgg. whu. edu. cn