

北斗卫星信号实时单站电离层估计算法及性能分析

唐卫明¹ 金 蕾¹ 徐 坤¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘 要:在研究已有实时电离层估计方法的基础上,提出了顾及硬件延迟偏差的实时单站电离层总电子含量估计方法。利用该方法对位于湖北省内的 8 个测站 GPS 和北斗实测数据进行模拟实时的处理,将估计结果与全球电离层格网模型进行对比分析, GPS 和北斗的估计结果其量值及变化趋势与全球电离层格网模型插值结果都较为一致,其中 GPS 的误差保持在 4 TECU($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$)之内,北斗的误差保持在 5 TECU 之内。实验表明,该方法可以很好地实现实时单站电离层估计,独立利用北斗卫星导航系统信号可以实现电离层活动监测。

关键词:北斗卫星导航系统;实时电离层;电离层总电子含量;全球电离层格网模型

中图分类号:P231.5

文献标志码:A

电离层是地球大气层中被太阳射线电离的部分,其中所含的自由电子的数量足以影响电波的传播。在太阳活动高峰期或太阳耀斑发生期,由于电离层电子含量变化剧烈,会出现极端的空间天气状况,严重时可能中断无线电通信系统和损害地球轨道卫星^[1]。因此,对电离层活动进行监测具有一定的意义。近年来,以 GPS 为代表的全球导航卫星系统观测技术不断发展,使得利用 GNSS(global navigation satellite system)观测数据实时精确提取和测定电离层总电子含量(total electron content, TEC),进而实时监测电离层 TEC 变化活动成为可能^[2]。目前,国内外学者已利用 GPS 观测数据对电离层开展了广泛的研究,而利用北斗导航系统观测数据进行电离层监测的研究工作相对较少。北斗卫星导航系统与其他卫星导航系统一样,载波信号在穿过电离层时会受到带电粒子的影响,成为其导航与定位的主要误差源之一^[3]。基于电离层的色散特性,通过无电离层组合可消去占电离层误差 99% 的一阶项影响^[4],同时还可利用该特性对不同频率信号所产生的时延量来进行电离层 TEC 的研究^[5-6]。

本文首先对已有的电离层 TEC 估计方法进行分析,进而提出了一种顾及接收机硬件延迟偏差的实时单站双频电离层 TEC 估计方法,利用该方法处理位于湖北省内 8 个测站的实测 GPS 和北斗观

测数据。并将估计结果与 IGS 组织通过全球约 200 多个测站数据得到的全球电离层格网(global ionosphere maps, GIM)插值计算结果进行比对^[7]。同时,将实时估计的电离层 TEC 值应用于伪距单点定位,并将结果与无电离层影响组合进行比较。

1 已有模型分析

已有的电离层延迟修正方法分为模型法和双频修正法。其中模型法又可分为以下两类:① 依据长期观测资料建立的经验公式;② 依据某一时段、某一区域内实际测定的电离层延迟,采用数学方法拟合得到^[8]。由于经验模型对电离层延迟的修正精度和可靠性均不高,故本文仅介绍区域电离层模型和双频修正法。

1.1 区域电离层模型

该方法利用载波平滑伪距观测值建立区域模型,根据观测时段内的区域电离层实测值,通过数学拟合方法得到区域电离层模型。常用的模型有 VTEC 模型^[9]、三次曲面模型^[10]、球谐函数模型^[11]及格网模型等。其中电离层格网模型根据硬件延迟值相对稳定的特点,对实时硬件延迟量进行预报,进而实时分离信号传播路径上的垂直总电子含量^[2](vertical total electron content, VTEC)。王虎等利用该方法实时监测上海区域电离层变化,实时

收稿日期:2013-06-18

项目来源:国家 863 计划资助项目(2014AA123101, 2012AA12A202);国家自然科学基金资助项目(41004014)。

第一作者:唐卫明,教授,博士,主要从事 GNSS 网络 RTK 和动态定位算法等研究。E-mail: wmtang@whu.edu.cn

拟合求解的结果能够较全面地反映当前电离层延迟量的变化,内符合精度优于 3 TECU^[2]。

但该方法模型参数和硬件延迟在一定时段后需重新估计。电离层 TEC 的变化非常复杂,它在几分钟内就可以变化 0.3 TECU,而一般电离层现象也只会引起几个 TECU 的变化,因此,只有高精度的 TEC 监测结果才可能用来建立精确的电离层模型^[1]。

1.2 实时单站双频电离层修正方法

由于伪距测量精度较低,利用该种观测值计算得到的 TEC 随机起伏很大,精度较低。而利用载波相位观测值计算 TEC 其信噪比大,多路径效应较小,但因为整周模糊度未知,故所得结果为 TEC 的相对值^[12]。基于以上考虑,王先毅等提出了一种实时双频电离层修正法^[13],同时利用双频载波和码共 4 个观测量进行实时电离层延迟的计算。此方法避免了整周模糊度解算、计算量小、具有实时性。

但该方法未考虑硬件延迟偏差(differential code bias, DCB),而该值不是一个随机变量或白噪声,即使采用加权平均也不能减少它的影响。该值的忽略对有些接收机可引起 16 TECU 的误差^[1]。

2 顾及硬件延迟偏差的实时电离层估计方法

硬件延迟偏差是不同频率的 GNSS 信号在卫星或者接收机内部时延的偏差,将卫星的硬件延迟偏差记为 TGD(timing group delay),测站接收机的硬件延迟偏差为 IFB(inter frequency bias)。在利用 GNSS 测量电离层延迟量时最大误差为系统的硬件延迟偏差^[2],因此在进行单站实时电离层估计时,必须顾及 DCB 的影响。双频载波和码伪距观测方程表示如下:

$$\rho_1 = \rho_0 + c(t^s - t_r) + I_1 + V_{\text{trop}} + \epsilon_1 + q_1 \quad (1)$$

$$\lambda_1 \varphi_1 = \rho_0 + c(t^s - t_r) - I_1 + V_{\text{trop}} + \epsilon'_1 - \lambda_1 N_1 + q_1 \quad (2)$$

$$\rho_2 = \rho_0 + c(t^s - t_r) + I_2 + V_{\text{trop}} + \epsilon_2 + q_2 \quad (3)$$

$$\lambda_2 \varphi_2 = \rho_0 + c(t^s - t_r) - I_2 + V_{\text{trop}} + \epsilon'_2 - \lambda_2 N_2 + q_2 \quad (4)$$

式中, ρ_1 、 ρ_2 、 φ_1 、 φ_2 为 B_1 和 B_2 载波上的伪距和载波相位观测值; ρ_0 代表卫星与接收机间的几何距离; t^s 、 t_r 分别表示卫星和接收机的钟差; I_1 、 I_2 为不同频率下的电离层改正量; V_{trop} 为对流层改正; ϵ_1 、 ϵ'_1 、 ϵ_2 、 ϵ'_2 为测量噪声; N_1 、 N_2 分别为 B_1 和 B_2 载波相位观测值的整周模糊度; q_1 和 q_2 分别为两

个频率的卫星和接收机硬件延迟总和。

2.1 顾及硬件延迟的模糊度组合计算

将式(1)~式(4)进行线性组合后可分别得到如下联合观测值:

$$\frac{\rho_1 + \lambda_1 \varphi_1}{2} = \rho_0 + c(t^s - t_r) + V_{\text{trop}} + \frac{\epsilon_1 + \epsilon'_1}{2} - \frac{\lambda_1 N_1}{2} + q_1 \quad (5)$$

$$\frac{\rho_2 + \lambda_2 \varphi_2}{2} = \rho_0 + c(t^s - t_r) + V_{\text{trop}} + \frac{\epsilon_2 + \epsilon'_2}{2} - \frac{\lambda_2 N_2}{2} + q_2 \quad (6)$$

将式(5)~式(6)得以下线性组合观测值:

$$\frac{\rho_1 + \lambda_1 \varphi_1 - \rho_2 - \lambda_2 \varphi_2}{2} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon'_1 - \epsilon_2 - \epsilon'_2}{2} - \frac{\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2}{2} + (q_1 - q_2)$$

认为观测值的误差均值为零,则经过一段时间的统计平均可得模糊度与硬件延迟的组合 A:

$$A = (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - 2(q_1 - q_2) = \sum_{i=1}^n \frac{[\rho_2 + \lambda_2 \varphi_2 - \rho_1 - \lambda_1 \varphi_1]_i}{n} \quad (7)$$

2.2 斜向总电子含量 STEC 求解

利用双频载波观测量式(2)~式(4)可以得到如下观测值组合:

$$(\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2) = (I_2 - I_1) + (\epsilon'_1 - \epsilon'_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + (q_1 - q_2) \quad (8)$$

由于载波相位观测误差很小,一般都小于 2 mm,对于电离层误差修正可以忽略不计^[13]。故整理式(7)、式(8)可得:

$$I_2 - I_1 = (\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2) + A + (q_1 - q_2) \quad (9)$$

为了求得每颗可视卫星的斜向总电子含量值(slant total electron content, STEC),必须对 $(q_1 - q_2)$ 项进行估计。由式(9)可得:

$$(\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2) + A + (q_1 - q_2) = \frac{40.28(f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2 f_2^2} \times \text{STEC}_i \quad (10)$$

为表述简洁,记 $(\lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2) + A = \text{OBS}_i$, 下标 i 为卫星号; $\frac{40.28(f_1^2 - f_2^2)}{f_1^2 f_2^2} = K$ 。则将式(10)移项并简化可得:

$$q_1 - q_2 = k \times \text{STEC}_i - \text{OBS}_i = \frac{K \times \text{VTEC}}{F(z)} - \text{OBS}_i \quad (11)$$

式中, z 为卫星在测站处的天顶距; $F(z)$ 为单层投影函数 SLM(single-layer model)^[11];VTEC 为前一历元可视卫星的天顶方向总电离层含量估计结果平均值,初始 VTEC 值设为该测站前期日平均

VTEC 值。由此可估计得到 $q_1 - q_2$ 的平均值,将该值带入式(10),即可得到每颗卫星的 STEC 值:

$$\text{STEC}_i = \frac{[\text{OBS}_i + (q_1 - q_2)]}{K} \quad (12)$$

3 实测数据分析

3.1 数据选择

本文采取上述 TEC 估计算法,利用湖北省内 8 个测站的双模四频观测数据,验证算法的可靠性以及研究北斗卫星导航系统在电离层监测方面的性能。所用数据为 2013-02-02,02-15 以及 02-28,采样间隔为 30 s,截止高度角定为 15° ,单层电离层高度定为 450 km。

3.2 计算结果对比

基于以上计算公式,分别计算了 8 个测站的 GPS 观测数据、北斗观测数据所得到的 TEC 值,并与 GIM 插值所得到的结果进行比较。限于篇幅,本文仅按顺序给出 CENT、SY02 和 XN06 等 3 个测站在 2013-02-02 的计算结果图,如图 1 所示,其他测站及日期结果以统计数据形式给出。

每个测站的单日电离层变化时序图的 1(a)、1(b)、1(c)为由 GPS、北斗和 GIM 分别计算得到的 TEC 值图;图 1(d)、1(e)、1(f)为 GPS 和北斗的计算结果与 GIM 的插值结果的差值,单位为 TECU;图 1(g)、1(h)、1(i)为对应的北斗系统电离层 TEC 天空图,给出了每颗卫星 TEC 数值大小以及对应的方位角和高度角信息,绿色部分表示 TEC 值较小,黄色部分为 TEC 值较大。

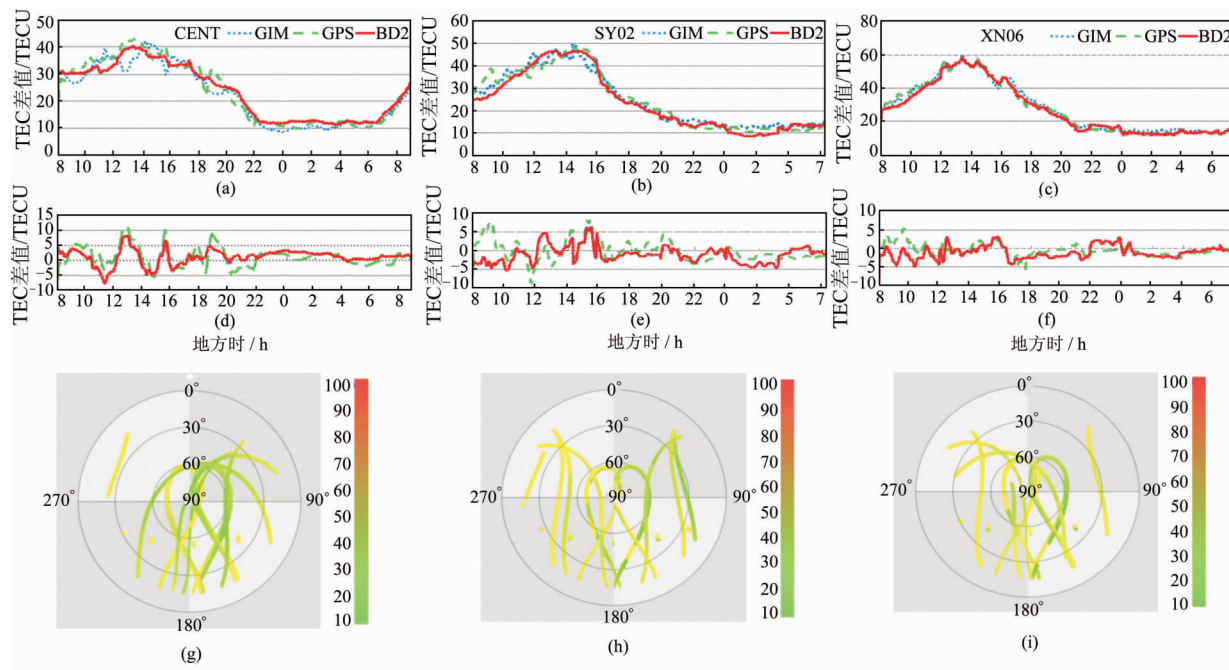


图 1 各测站 TEC 值图及 TEC 差值图

Fig. 1 TEC Values and Differences of Each Station

由图 1 可知,利用本文提出的实时电离层 TEC 估计方法,能够反映出单站上空的 TEC 日变化情况。GPS 和北斗系统进行电离层实时 TEC 估计结果其量值及变化趋势与 GIM 插值结果较为一致。由天空图可得,由于北斗卫星导航系统在轨卫星数目的增加,测站可视卫星分布较为均匀;卫星高度角较大时 TEC 值较小,随着高度角的变小其值增大,符合 TEC 变化的规律。为更直观地反映电离层 TEC 估计情况,本文分别将北斗数据和 GPS 数据计算的 TEC 结果与 GIM

插值结果做差比较,并将差值进行 1 d 的统计平均,其 RMS 结果如表 1 所示。由表 1 中数据可知,基于本文提出的实时电离层估计方法,分别采用 GPS 和北斗观测数据对电离层 TEC 进行估计,其 RMS 均保持在 5TECU 之内。

由于北斗卫星导航系统部分卫星为地球同步静止轨道卫星(geostationary satellite, GEO),故其刺穿点(ionosphere piercing point, IPP)分布不均匀,因此,不能全面反映测站上空电离层变化情况,导致其监测电离层 TEC 精度较 GPS 低。

表 1 各测站 TEC 差值统计/TECU
Tab.1 TEC values of Each Station /TECU

测站名	2013-02-02		2013-02-15		2013-02-28	
	GPS 差值	北斗差值	GPS 差值	北斗差值	GPS 差值	北斗差值
CENT	2.10	1.70	1.74	2.12	2.23	2.04
HG01	2.22	2.30	2.76	3.27	2.45	2.66
SY02	1.54	2.10	2.12	2.80	2.17	2.35
XN06	2.33	2.50	2.79	3.23	2.54	3.03
HG07	2.21	4.08	3.07	3.23	3.44	3.12
SZ21	3.21	3.45	3.38	4.01	2.12	2.89
TM01	2.15	3.60	2.56	3.41	3.23	4.74
XT01	2.88	4.13	2.74	3.63	2.45	2.96
单天平均	2.33	2.98	2.65	3.21	2.58	2.97

已有的资料表明,最终的电离层 GIM 格网值的精度为 2~8 TECU^[6]。为了更好地说明北斗导航系统监测电离层的能力,本文计算了上述测站的伪距单点定位(single point positioning)结果。将采用无电离层影响组合的定位结果,与通

过本文所提出的实时电离层估计方法进行电离层延迟改正的结果相比较。限于篇幅,仅给出 CENT、XN06 及 SY02 测站的定位结果各方向的差值,如图 2 所示。

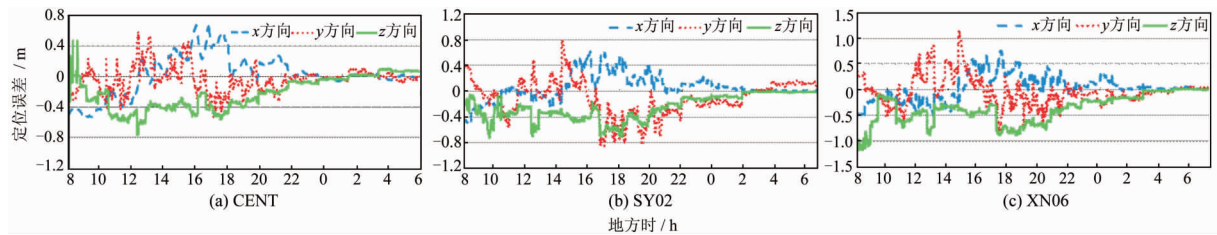


图 2 各测站单点定位误差图
Fig. 2 Positioning Error of Each Station

由图 2 可知,在估计的初始,由于弧段较短,所以本文式(7)中的估计结果存在偏差,导致定位结果较差。随着观测时间的增加,TEC 估值接近真实值,故定位精度有所提高。而由于在中午至下午时段内电离层较为活跃,两者差值较大,但各测站 3 个方向的定位差值在 1.5 m 之内。在电离层较为平稳的夜间时段,两者差值逐渐减小。

计结果应用于伪距单点定位,并与无电离层组合定位结果进行对比,两者各方向定位差值均保持在 1.5 m 之内。由此表明该方法可以很好地实现实时单站电离层估计,也表明了独立利用北斗卫星导航系统信号可以实现电离层活动监测。

参 考 文 献

4 结 语

本文在研究已有实时电离层 TEC 估计方法的基础上,提出了顾及 DCB 影响的实时单站电离层 TEC 估计算法。基于此方法处理湖北省内的 8 个测站的模拟实时实测 GPS 和北斗数据,并将估计结果与 GIM 插值结果进行对比。利用 GPS 数据说明了所提算法的有效性,实时估计 TEC 在量级和变化趋势与 GIM 插值结果较为一致。在此基础上,对北斗卫星导航系统实时监测电离层活动情况进行性能评估。其中 GPS 系统的 RMS 保持在 4 TECU 之内,北斗系统的 RMS 则保持在 5 TECU 之内,这是由北斗卫星导航系统 IPP 点分布不均匀造成的。将实时电离层 TEC 值估

[1] Wang Xiaoya, Zhu Wen Yao. Methods and Progress on Monitoring Ionosphere Activity by GPS [J]. *Progress in Astronomy*, 2003, 21(1): 33-40(王小亚,朱文耀. GPS 监测电离层活动的方法和最新进展[J]. *天文学进展*, 2003, 21(1): 33-40)

[2] Wang Hu, Wang Jiexian, Bai Guixia, et al. Real-time Monitoring of Ionosphere Changes in the Shanghai Region by GPS Technology [J]. *Chin J Space Sci*, 2011, 31(5): 602-606(王虎,王解先,白贵霞,等. 利用 GPS 技术实时监测上海区域电离层变化[J]. *空间科学学报*, 2011, 31(5): 602-606)

[3] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010(李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2010)

[4] Xie Shijie, Han Mingfeng. On Effects of Ionosphere

- on GPS Positioning[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2000, 9(1): 10-12(谢世杰, 韩明锋. 论电离层对 GPS 定位的影响[J]. 测绘通报, 2000, 9(1): 10-12)
- [5] Zhang Donghe, Xiao Zuo. A Method of Calculating TEC with GPS Data and Its Application to the Ionosphere Disturbances[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000(4): 451-458(张东和, 萧佐. 利用 GPS 计算 TEC 的方法及其对电离层扰动的观测[J]. 地球物理学报, 2000(4): 451-458)
- [6] Xiao Zuo, Zhang Donghe. An Approach to Study The Day-to-day Variations of Ionospheric TEC Directly by GPS Time-delay Signals[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2000(2): 97-102(萧佐, 张东和. 通过 GPS 测量数据研究电离层电子总含量的逐日变化[J]. 空间科学学报, 2000(2): 97-102)
- [7] Stefan S. How to Use CODE's Global Ionosphere Maps[R]. Astronomical Institute, University of Berne, 1997
- [8] Liu Jingnan, Chen Junyong, Zhang Yanping, et al. Wide Area Differential GPS Principles and Methods[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1999(刘经南, 陈俊勇, 张燕平, 等. 广域差分 GPS 原理和方法[M]. 北京: 测绘出版社, 1999)
- [9] Zhang Xiaohong, Li Zhenghang, Cai Changsheng. Study on Regional Ionospheric Model Using Dual-frequency GPS Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(2): 140-143(张小红, 李征航, 蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(2): 140-143)
- [10] Chang Qing, Zhang Donghe, Xiao Zuo, et al. GPS Hardware Delay Correction Methods[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000(15): 1 676-1 680(常青, 张东和, 肖佐, 等. GPS 系统硬件延迟修正方法[J]. 科学通报, 2000(15): 1 676-1 680)
- [11] Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. Berne, Switzerland: Dissertation, Astronomical Institute, University of Berne, 1999
- [12] Zhao Xiaofeng. Research on the Methods of Establishing Grid Ionosphere Model over a Regional Area GPS Network[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003(赵晓峰. 区域性电离层格网模型建立方法的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003)
- [13] Wang Xianyi, Sun Yueqiang, Du Qifei, et al. A Real-time Dual-frequency Ionospheric Correction Method[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012(5): 992-995(王先毅, 孙越强, 杜起飞, 等. 一种实时双频电离层修正方法[J]. 科学技术与工程, 2012(5): 992-995)

A Real-time Dual-frequency Ionospheric Estimation Algorithm Performance Analysis Based on BeiDou Observational Data

TANG Weiming¹ JIN Lei¹ XU Kun¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Based on the study of the existing real-time ionospheric estimation methods, the calculation formula for TEC using a combination of pseudo-range and carrier phase observations is proposed in this paper. Hardware delay deviation is also considered. Using simulated real-time observations from eight stations in Hubei province, estimated TEC results for the GPS and BeiDou systems were obtained for each station and compared with the GIM model. Numerical results showed that: the estimated TEC results from both systems are consistent with GIM in its magnitude and trend. In addition, the RMS of GPS was maintained within 4 TECU while the BeiDou was 5 TECU. The results show that the method can achieve real-time TEC for the BeiDou satellite navigation system and can monitor the ionospheric activity independently.

Key words: BeiDou; real-time ionospheric estimation; TEC; GIM

First author: TANG Weiming, PhD, professor, specializes in the GNSS network RTK, kinematic positioning algorithm research and software development. E-mail: wmtang@whu.edu.cn

Foundation support: The National High-tech R&D Program of China(863 Program), Nos. 2014AA123101, 2012AA12A202; the Natural Science Foundation of China, No. 41004014.