

# 不同约束条件对电离层电子含量和硬件延迟的影响

谢益炳<sup>1,2</sup> 陈俊平<sup>2</sup> 伍吉仓<sup>1,3</sup> 胡丛玮<sup>1</sup>

1 同济大学测绘与地理信息学院,上海,200092

2 中国科学院上海天文台,上海,200030

3 现代工程测量国家测绘局重点实验室,上海,200092

**摘要:**在不同约束条件下,分别利用中国区域附近 11 个 GPS 基准站,和全球 230 个 GPS 基准站一个月的双频实测数据,通过建立球谐函数模型同时解算电离层电子含量、GPS 卫星和接收机的 DCB。将其结果与 CODE 提供的结果进行比较,表明电子含量、GPS 卫星与接收机的 DCB 组合不受约束条件的影响,且精度能达到 2 ns,垂直电子含量相对于 CODE 能改正 90%。同时本文利用 AR 模型对球谐系数进行预报,根据预报系数得到的垂直电子含量相对准确率能达到 80% 以上,采用卫星 DCB 和时得到的垂直电子含量准确率略高于采用某颗卫星 DCB 固定。

**关键词:**GPS;硬件延迟;球谐函数;垂直电子含量;预报  
**中图分类号:**P228.41 **文献标志码:**A

电离层作为地球大气层的一部分,对无线电波的传播有着显著影响,其引起的电离层时延是影响 GPS 测量、导航、定位与定轨精度的主要误差源之一,也是导致一般差分 GPS 定位精度随用户和基准站间距离的增加而迅速降低的主要原因之一<sup>[1]</sup>。而利用 GPS 技术监测 TEC 不可避免地要考虑到系统硬件延迟(DCB)。利用 GPS 测量 TEC 的主要误差源是 GPS 系统硬件延迟,其最大误差可达 7 ns 或 9~30 TECU<sup>[2-3]</sup>。因此,DCB 的确定对于电离层 TEC 精确获取有着重要影响<sup>[4-5]</sup>;同时,硬件延迟的确定对卫星总数不足时,可以作为已知值来参与定位,减少必要观测数,增加多余观测值,从而提高卫星导航的可靠性、完好性和连续性<sup>[6]</sup>。

硬件延迟的确定分卫星与接收机组合确定和两者各自独立确定<sup>[7-8]</sup>。在分离卫星与接收机硬件延迟过程中,CODE 将所观测到的卫星硬件延迟和为零作为约束条件。国内外学者在独立解算卫星和接收机硬件延迟时,同样是基于这个条件。本文分别利用中国区域附件 11 个 IGS 站以及全球 230 个站的 GPS 双频观测资料,基于 6 种不同的约束条件,利用球谐函数模型进行解算卫星和接收机的硬件延迟,并对其组合值与 CODE 的组合值进行对比分析,同时对电子含量解算结果进

行对比。

对于电离层电子含量预报,赵传华等<sup>[9]</sup>利用组合方法进行预报,巩岩等<sup>[10]</sup>则用改进的方差分析来进行预报,而一般认为可以采取时间序列分析模型进行预报<sup>[11-13]</sup>。根据所采用的球谐函数模型系数的特点和物理背景,时间序列不需进行差分处理<sup>[14]</sup>。本文采用 AR 模型来估计电离层电子含量球谐函数模型系数,并根据 AR 模型,对不同约束条件下电离层电子含量进行预报分析。

## 1 利用 GPS 数据建立电离层模型

利用载波相位平滑伪距观测测量形成电离层残差组合(GF):

$$\tilde{P}_4 = -\frac{40.28}{f_1^2} \cdot \left( \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(Z) \cdot$$

$$VTEC + c \cdot \Delta b^S + c \cdot \Delta b_R \quad (1)$$

式中, $\tilde{P}_4$  为平滑后组合值,其平滑具体算法可参见文献<sup>[15]</sup>;  $\Delta b^S$  为卫星的硬件延迟;  $\Delta b_R$  为接收机的硬件延迟; VTEC 为接收机垂直方向的电子含量;  $F(Z)$  为电离层投影函数,  $Z$  为卫星天顶距。本文采用球谐函数模型对电离层垂直电子含量 VTEC 进行建模。

收稿日期:2013-06-17

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41174024,11273046,40974018);中国科学院百人计划资助项目;国家 863 计划资助项目(2013AA122402);上海市科学技术委员会资助项目(12DZ2273300)。

第一作者:谢益炳,硕士生,主要研究方向为 GNSS 数据处理和 GNSS 电离层模型。E-mail:xiyibinggaige@163.com

在对式(1)的解算中,如果将测站和卫星的硬件延迟分别设置成独立的参数进行最小二乘估计,法方程系数矩阵是秩亏的,不能直接解算,且秩亏数为1,为此需引入一个约束条件。

首先对式(1)进行变形,可得:

$$c \cdot (\Delta b^S + \Delta b_R) = \tilde{P}_4 + \frac{40.28}{f_1^2} \cdot \left( \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(Z) \cdot \text{VTEC} \quad (2)$$

当单站观测到  $n$  颗卫星时,进行观测方程累加,可得:

$$c \cdot \left( \sum_{i=1}^n \Delta b_i^S + \sum_{i=1}^n \Delta b_R^i \right) = \sum_{i=1}^n \tilde{P}_i + \sum_{i=1}^n \frac{40.28}{f_1^2} \cdot \left( \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) F(Z) \cdot \text{VTEC}^i \quad (3)$$

可见对于卫星和接收机的组合硬件延迟,只取决于上式右端的值。因此,卫星硬件延迟的和必然会影响接收机硬件延迟,但对于组合值无影响。

目前对于普遍采取的约束条件为<sup>[16]</sup>:

$$\sum_{i=1}^n q^i = 0 \quad (4)$$

式中, $n$ 为观测到的卫星个数; $q^i$ 为第 $i$ 颗卫星的硬件延迟。在解算北斗卫星和接收机硬件延迟时,同样可以用式(4)作为约束条件来解算<sup>[17]</sup>。

本文基于以上约束条件,并采用固定1号卫星DCB为某值的约束条件来解算电离层系数和卫星与接收机DCB值,具体设置了以下不同的约束值进行解算和分析。

- 1) 所有卫星硬件延迟和为 $\pm 100$  m和0;
- 2) 固定1号卫星硬件延迟为 $\pm 100$  m和0。

## 2 计算步骤及结果分析

利用式(1)形成观测方程组,根据最小二乘法

解算观测法方程,由于分离卫星和接收机DCB会导致法方程秩亏,因此,在计算过程中,选择上文所述的其中任一种约束条件加入法方程,最终解算得到电离层球谐函数模型系数、卫星DCB和接收机DCB值。

本文分别采用2012-06全球分布的230个IGS测站观测数据和中国区域附近11个IGS站数据,对各种约束条件进行解算,对得到电子含量和硬件延迟组合值以及分离值与CODE的结果进行比较分析。

当采用全球稠密站数据时,上述球谐函数模型取至15阶,解算得到的卫星硬件延迟值和接收机硬件延迟与CODE进行比较。图1为不同约束条件下稠密站解算得到的卫星硬件延迟与CODE提供的卫星硬件延迟月均值的差值。图2为接收机硬件延迟的差值。从图1和图2中可看出,不同约束条件下,其差值整体趋势一致,只是存在一个整体偏移;同时在同一约束条件下,卫星偏移为正时,接收机则为负方向近似等值偏移。当固定1号星DCB为某值时,其余卫星DCB都是基于1号星来解算,因此,其偏差是基于1号星DCB的偏差。参考当月CODE提供的1号星的卫星硬件延迟为 $-10.936$  ns,因而当固定为1号星DCB为0,100 m, $-100$  m时,其偏差值为分别为 $10.936$  ns, $344.5$  ns, $322.628$  ns;当把卫星DCB和约束为某值时,卫星硬件延迟设置为等权观测,因此,和会平均分配到所有观测到卫星,即每颗卫星加上平均值,在100 m和 $-100$  m时其偏差值为 $10.76$  ns和 $-10.76$  ns,接收机则刚好相反。当扣除掉这些偏差值后,则与CODE相比精度都在 $0.1$  ns以内。而接收机则刚好与卫星的偏差值符号相反,同样扣除掉偏差后,其与CODE相比的RMS在1 ns以内。

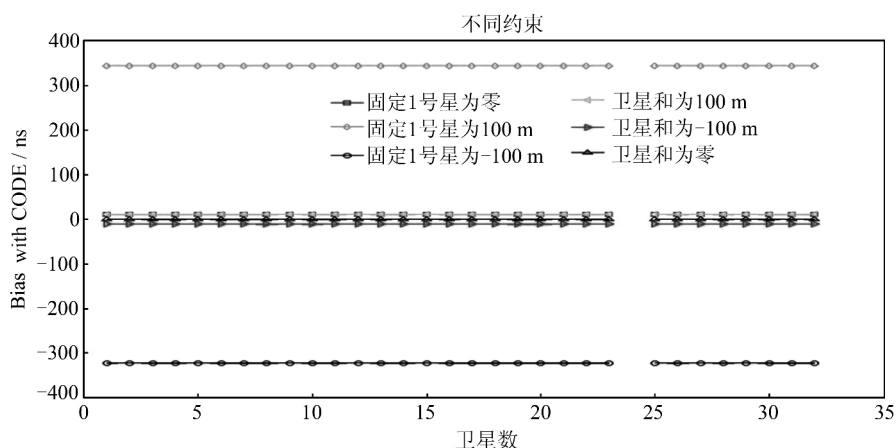


图1 稠密站不同约束条件下卫星DCB差值

Fig. 1 Satellite DCB Bias Based on Different Constraints when Using Multistation

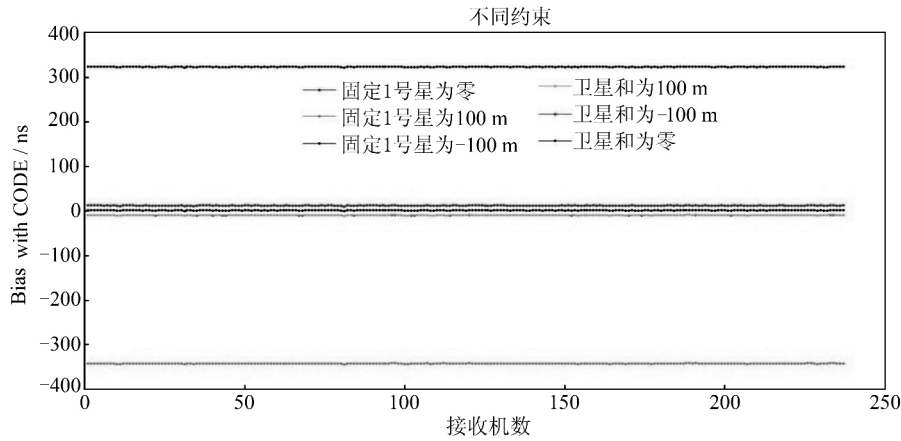


图 2 稠密站不同约束条件下接收机 DCB 差值

Fig. 2 Receiver DCB Bias Based on Different Constraints when Using Multistation

为验证硬件延迟在不同组合下得到的值不变,鉴于篇幅,图 3 给出基于两种不同约束条件下,卫星与接收机组合的硬件延迟。图 3(a)为固定 1 号卫星 DCB 为 100 m;图 3(b)为卫星 DCB

和为 -100 m,从图 3 中可看出,在不同的约束条件下,硬件延迟组合值一致。而硬件组合与 CODE 提供硬件组合差值的均值和标准偏差能达到  $1 \pm 0.2$  ns 内,可见解算得到的值较稳定可靠。

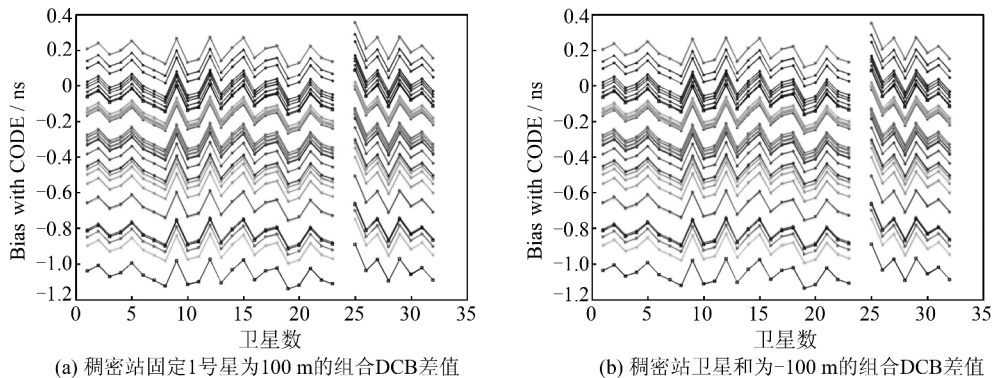


图 3 稠密站不同约束的组合 DCB 差值

Fig. 3 Combination of DCB Based on Different Constraints when Using Multistation

当采用中国区域附近少站数据时,上述球谐函数模型取至 4 阶,解算得到的卫星硬件延迟值和接收机硬件延迟与 CODE 进行比较。同样地,在不同约束条件下,其差值整体趋势一致,只是存在一个整体偏移,同时在同一约束条件下,卫星 DCB 偏移为正时,接收机 DCB 则为负方向近似等值偏移。卫星 DCB 在扣除系统偏差后的 RMS 能优于 0.3 ns,而接收机优于 1 ns,其组合后的 STD 能优于 0.3 ns。

束条件下也可得到相同的结果。

在此基础上,根据 AR 模型对电离层模型系数进行预报,基于预报系数解算垂直电子含量。图 5 为稠密站预报电子含量的正确率图。从图 5 可以看出,预报正确率在不同的约束条件下,平均正确率达 80% 以上,采用卫星和为某值比固定某颗卫星的正确率稍高。

由图 3 中可知,在采用不同卫星 DCB 约束时,得到的卫星和接收机 DCB 组合值不变;组合值不变时,方程右端的 VTEC 保持不变。因此,在不同约束条件下,电子含量改正率应相同。图 4 为稠密站时,采用两种不同约束条件下得到的电子含量正确率图,固定 1 号星 DCB 为 100 m,卫星 DCB 和为 -100 m,其结果是相同的,稠密站时平均正确率可到 92.64%;当采用其余约

### 3 结 语

本文基于球谐函数展开模型,采用不同约束条件计算 GPS-TEC 和卫星与接收机硬件延迟,将解算值与 CODE 分析中心的结果相比,表明在不同约束条件下,其卫星硬件延迟只存在整体偏移,当采用多站数据时,扣除系统偏差后,其精度小于 0.1 ns;当采用稀疏站数据时,扣除系统偏差

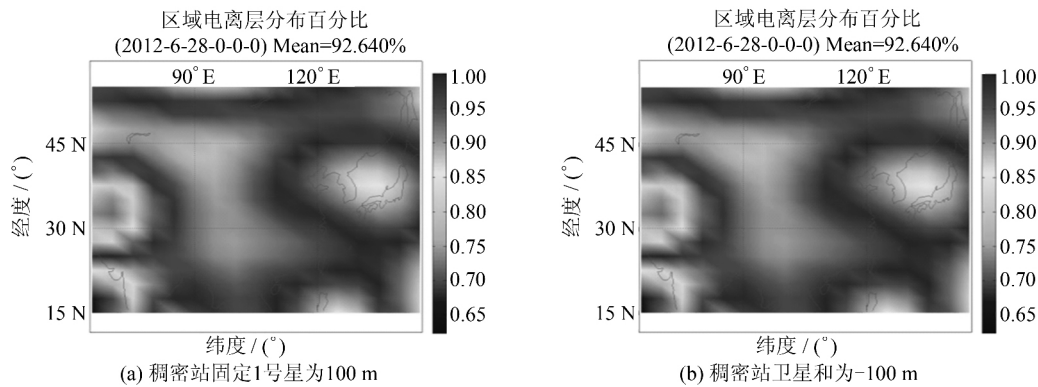


图4 稠密站不同约束条件下电子含量解答正确率

Fig. 4 Electronic Content Correct Rate Based on Different Constraints When Using Multistation

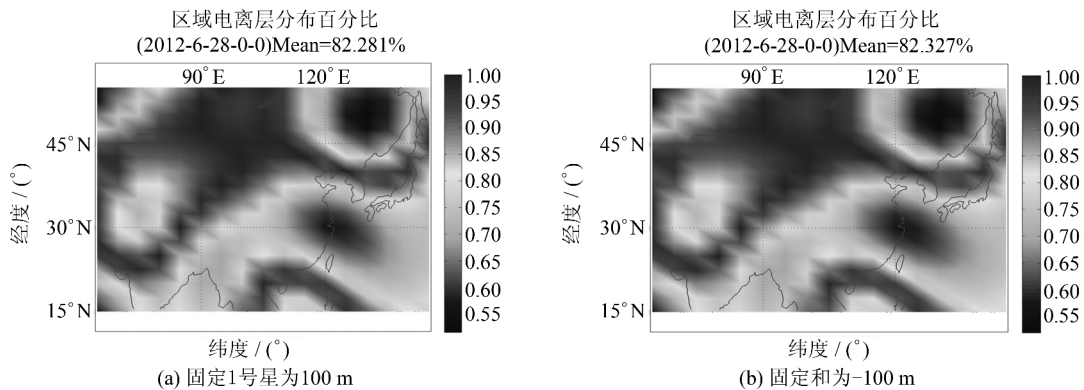


图5 稠密站不同约束条件下的预报电子含量解答正确率

Fig. 5 Prediction Electronic Content Correct Rate Based on Different Constraints When Using Multistations

后能达到 0.2 ns 的精度。同样接收机的硬件延迟扣除整体偏移后,其精度在能优于 1 ns。当卫星与接收机硬件延迟组合时,在不同约束条件下其值一致,表明其组合值不受约束条件的影响。同时,本文还给出在不同约束条件下,电子含量相对于 CODE 结果的正确率图,同样表明其不受约束条件的影响;对于预报电子含量,固定卫星 DCB 和为某值时较固定某颗卫星 DCB 值时好;同时本文给出的月偏差均值和 STD 表明,在不同约束条件下,其得到的组合硬件延迟组合值较稳定,在伪距定位时,将有利于提高导航的连续性和完好性。

### 参 考 文 献

- [1] Li Zhenghang, Zhang Xiaohong. New Technology of Satellite Navigation and Positioning and High Precision Data Processing Method [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [2] Chang Qing, Zhang Donghe, Xiao Zuo, et al. GPS Hardware Delay Correction Method [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 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, 45: 1 676-1 680)
- [3] Chang Qing, Zhang Donghe, Xiao Zuo, et al. GPS Hardware Delay Estimation Method and Its Application in TEC Calculation [J]. *Journal of Geophysics*, 2001, 44: 596-601 (常青, 张东和, 肖佐, 等. GPS 系统硬件延迟估计方法及其在 TEC 计算中的应用[J]. *地球物理学报*, 2001, 44: 596-601)
- [4] Heise S C, Stolle S, Schlter N. Differential Code Bias of GPS Receivers in Low Earth Orbit: An assessment for CHAMP and SAC-C [C]. CHAMP Mission Results for Gravity and Magnetic Field Mapping, and GPS Atmosphere Sounding, New York, 2004
- [5] Conte J F, Azpilicueta F, Brunini C. Accuracy Assessment of the GPS-TEC Calibration Constants by Means of a Simulation Technique [J]. *Geod*, 2011, 85: 707-714
- [6] Pei X, Chen J, Wang J, et al. Application of Inter-system Hardware Delay Bias in GPS/GLONASS PPP [J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, 160(2): 381-387
- [7] Mannucci A J, Wilson B D, Yuan D N, et al. A Global Mapping Technique for GPS-derived Ionospheric

- spheric Total Electron Content Measurements[J]. *Radio Science*, 1998,33:565-582
- [8] Meza A, Brunini C, Bosch W, et al. Comparing Vertical Total Electron Content From GPS, Bent and IRI Models with TOPEX-Poseidon[J]. *Advances in Space Research*, 2002,30:401-406
- [9] Zhang Chuanhua, Dang Yaming, Bei Jinzhong. Combination Method in the Application of the Ionosphere TEC Short-term Prediction[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012,32(3):76-79(赵传华,党亚民,秘金钟. 组合方法在电离层 TEC 短期预报中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(3):76-79)
- [10] Gong Yan, Dang Yaming. The Improved Variance Analysis in the Application of the Ionosphere TEC Short-term Prediction[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2012,37(3):129-131(巩岩,党亚民. 改进的方差分析在电离层 TEC 短期预报中的应用[J]. *测绘科学*, 2012,37(3):129-131)
- [11] Liu Jun, Cai Hongzhou, Liu Xiandong, et al. Based on the ARIMA( $p, 1, 1$ ) of the Ionosphere Prediction Model[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010,30(3):79-82(刘军,柴洪洲,刘先冬,等. 基于 ARIMA( $p, 1, 1$ )的电离层预报模型[J]. *大地测量与地球动力学*, 2010,30(3):79-82)
- [12] Chen Jun, Li Jianwen, Li Zuohu. ARIMA Model Application in the Ionosphere TEC Prediction[J]. *Journal of Surveying and Mapping Engineering*, 2010,19(1):39-41(陈军,李建文,李作虎. ARIMA 模型在电离层 TEC 预报中的应用[J]. *测绘工程*, 2010,19(1):39-41)
- [13] Zhang Lu. Based on Time Series and Neural Network, Grey and Combination Forecast for the Forecast of the Ionosphere TEC Research[D]. Nanjing: Nanjing Information Engineering University, 2012(张禄. 基于时间序列、神经网络、灰色和组合预测对电离层 TEC 的预测研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2012)
- [14] Zhou Weili, Li Suhua, Jiang Meixia. Based on Spheric Harmonic Function Model of the Ionosphere Prediction[J]. *Journal of Surveying and Mapping Information and Engineering*, 2012, 5(3): 3-5(周伟莉,李素华,蒋美霞. 基于球谐函数模型的电离层预报[J]. *测绘信息与工程*, 2012,37(3):3-5)
- [15] Dach R. Bernese GPS Softwareversion 5.0[R]. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, 2007
- [16] Unibe. Aiuws[OL]. <http://aiuws.unibe.ch/ionosphere/>, 2013
- [17] Jiao Wenhai, Chang Jianggeng, Ma Yinhu, et al. A Method to Estimate DCB of COMPASS Satellite Based on Global Ionosphere Map[J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012(159):347-353

## Ionospheric Electron Content and Hardware Delay Analysis Based on Different Constraints

XIE Yibing<sup>1,2</sup> CHEN Junping<sup>2</sup> WU Jicang<sup>1,3</sup> HU Congwei<sup>1</sup>

1 College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

3 Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, SBSM, Shanghai 200092, China

**Abstract:** Based on different constraints, double-frequency measurement data from 11 GPS stations in the vicinity of China and 230 global GPS stations were used to calculate vertical ionosphere electron content(VTEC), the DCB of GPS satellites, and corresponding receivers based on the spherical harmonic function model. The results show that the VTEC and the combination DCB of GPS satellite and receiver were not affected by constraints. The DCB precision of the combination obtained is less than 2 ns comparing with CODE, and the correction rate of VTEC relative to CODE can reach up to 90 percent. We also predict spherical harmonic coefficients using the AR model; the correction rate of VTEC based on the prediction coefficients can reach to 80 percent; thus fixing the sum of the satellite DCBs is better than fixing a single satellite DCB.

**Key words:** GPS; DCB; spherical harmonic function; VTEC; prediction

**First author:** XIE Yibing, postgraduate, specializes in GNSS data processing and ionospheric model. E-mail: xieyibingaige@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174024, 11273046, 40974018; the Chinese Academy of Sciences one Hundred Plans to Sponsor; the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China, No. 2013 AA122402; the Shanghai Committee of Science and Technology Fund, No. 12DZ2273300.