

电离层色散特性对导航信号接收的影响*

肖志斌, 刘瀛翔, 唐小妹, 王飞雪

(国防科技大学 卫星导航定位技术工程研究中心, 湖南 长沙 410073)

摘要: 电离层是一种典型的色散介质, 会对导航信号产生延迟, 且不同频点处的电离层延迟互不相同。实际应用中通常只考虑接收信号中心频点处的电离层延迟, 而忽略信号带宽范围内的电离层色散特性。建立了电离层色散特性的对导航信号接收的影响分析模型, 并定量地分析了电离层色散效应对 BPSK(10)、BOC(14,2)以及 AltBOC(15,10)等宽带导航信号的影响。分析表明电离层色散效应对 BPSK(10)信号的影响可忽略不计, 对高阶 BOC 信号会产生一定程度的与电离层特性相关的相关损耗及载波跟踪偏差, 其中 AltBOC(15,10)产生的相关损耗最高约 1.4dB, 载波相位跟踪偏差最高约 0.374π。

关键词: 电离层色散效应; 相关损耗; 载波相位跟踪偏差

中图分类号: TN967.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2014)03-0146-04

Effect of ionosphere dispersion on the navigation signal receiving

XIAO Zhibin, LIU Yingxiang, TANG Xiaomei, WANG Feixue

(Satellite Navigation Engineering Research Center, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Ionosphere is a typical dispersive medium, which may cause frequency depended delay to navigation signal. In the practical applications, the ionosphere delay between signals at different frequencies is considered only, while the effect of ionosphere dispersion on the receiving for a single navigation signal is usually ignored. A module was established to analyze the effect of ionosphere dispersion. Base on this module, the effect of ionosphere dispersion on some typical wide-band navigation signals was analyzed, such as BPSK(10), BOC(14,2), AltBOC(15,10) signals. The analysis results indicate that the effect on BPSK(10) signal can be ignored, but some correlation loss and carrier phase tracking error will be introduced into the track of high order BOC signals, such as BOC(14,2) signal and AltBOC(15,10) signal, and the correlation loss and carrier phase tracking error of AltBOC(15,10) can be 1.4dB and 0.185 cycles separately.

Key words: Ionosphere dispersion; correlation loss; carrier phase tracking error

电离层是一种典型的色散介质^[1], 对导航信号的影响主要表现为码相位的延迟与载波相位超前, 且产生的电离层延迟具有频率选择特性, 即不同频点处的电离层延迟互不相同, 电离层延迟是影响导航信号接收及其用户高精度定位的主要误差源之一^[2-5]。在通常情况下, 对于单个频点而言, 由于信号带宽相对较小, 一般不会考虑其色散效应^[6], 如采用 BPSK(1) 调制方式的 L1CA 信号或者 BOC 信号的单个边带。而对于高阶 BOC 信号等宽带导航信号, 当采用匹配接收算法或者双环路跟踪算法^[7-8]时, 电离层的色散效应将对信号接收产生不可忽略的影响。下一代导航信号将采用高阶 BOC 信号, 如 Galileo 系统 E5 采用的 AltBOC(15,10)^[9]信号, E1 PRS 采用的 BOC(15,2.5)^[10]信号, 以及 BEIDOU 系统可能采用的 BOC(14,2)信号, 这些信号带宽很宽, 双边带带宽分

别高达 50MHz、35MHz、32MHz。对于这些信号, 电离层色散效应将对信号的接收产生较大的影响。但目前的大部分研究均未考虑电离层色散效应的影响, 认为单一频点信号带宽内的电离层色散效应可忽略不计, 不会对信号接收产生影响。

1 电离层色散效应高精度建模

电离层就是典型的色散介质, 高频电磁波穿过电离层时会发生折射现象。对于频率为 f 的电磁波, 电离层的相位折射率^[11]为

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (1)$$

上式中的系数 c_2 、 c_3 、 c_4 是与频率无关的, 它们是沿卫星到用户的信号传播路径上电子数的函数。因此电离层会在不同的频率分量处引入不同

* 收稿日期: 2013-10-31

作者简介: 肖志斌(1986—), 男, 湖南衡阳人, 博士研究生, E-mail: xiaozb1986@163.com;

王飞雪(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: wangfeixue_nnc@163.com

的群延迟:

$$\tau(f) = \frac{c'_2}{f^2} + \frac{c'_3}{f^3} + \frac{c'_4}{f^4} + \dots \quad (2)$$

一般电离层的二阶、三阶项对测距的影响可以忽略不计^[12],因此只取一阶项。当电离层只取一阶项时,电离层延迟和频率的关系如下述两式所示(单位为s):

$$\tau(f) = \frac{40.3TEC}{cf^2} \quad (3)$$

$$\theta(f) = -\frac{80.6\pi TEC}{cf} \quad (4)$$

其中 $\tau(f)$ 为电离层引入的群延迟, $-\theta(f)$ 为电离层引入的载波相位超前量。电子总数(Total Electron Content, TEC),即沿路径长度的电子密度总数,TEC 以 e/m^2 为单位表示^[13]。TEC 随一天的时间、用户位置、卫星仰角、季节、电离通量、磁活动性、日斑周期和闪烁而变化,其标称值在 $10^{16} \sim 10^{19} e/m^2$ 之间。

电离层的传输特性可以用线性系统表征, $\tau(f)$ 可理解为电离层的群时延响应, $\theta(f)$ 可理解为电离层的相位特性。对于某导航信号,可在该导航信号载波频率 f_0 处对 $\theta(f)$ 进行泰勒级数展开得到

$$\begin{aligned} \theta(f) &= \theta(f_0) + \theta'(f_0)(f-f_0) \\ &+ \frac{1}{2!}\theta''(f_0)(f-f_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!}\theta^{(n)}(f_0)(f-f_0)^n \end{aligned} \quad (5)$$

第 n 阶的系数可写为

$$k_n = \frac{1}{n!}\theta^{(n)}(f_0) = (-1)^{n+1} \frac{80.6TEC}{cf_0^{n+1}} \quad (6)$$

导航信号载波频率 f_0 一般较大,当 $n \geq 3$ 时,该系数足够小,在一定信号带宽范围内的相位变化量一般可忽略不计。下文将对电离层相位特性二阶泰勒级数模拟误差进行分析,分析结果表明该模拟误差可以忽略不计,故可取二阶泰勒级数模拟电离层的相位特性

$$\begin{aligned} \theta'(f) &\approx \theta(f_0) + \theta'(f_0)(f-f_0) + \frac{1}{2!}\theta''(f_0)(f-f_0)^2 \\ &= -\frac{80.6\pi TEC}{c} \left[\frac{1}{f_0} - \frac{1}{f_0^2}(f-f_0) + \frac{1}{f_0^3}(f-f_0)^2 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

相应的低通等效模型为

$$\theta'_0(f) \approx -\frac{80.6\pi TEC}{c} \left[\frac{1}{f_0} - \frac{1}{f_0^2}f + \frac{1}{f_0^3}f^2 \right] \quad (8)$$

根据群时延的定义,可得到电离层近似的群时延特性及其低通等效模型分别如下述两式所示:

$$\tau'(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\theta'(f)}{df} = \frac{40.3TEC}{cf_0^2} \left[1 + \frac{2}{f_0}(f-f_0) \right] \quad (9)$$

$$\tau'_0(f) = \frac{40.3TEC}{cf_0^2} \left[1 + \frac{2}{f_0}f \right] \quad (10)$$

图1为TEC取最大($10^{19} e/m^2$),中心频点取为Galileo系统E5频点 $f_0 = 1191.795\text{MHz}$ 时, $B = 50\text{M}$ 范围内(E5信号主瓣带宽为50M,为目前所有导航信号中带宽最大的信号)电离层相位特性与其二阶泰勒级数的对比图,显然两者非常接近。图2为两者的误差图,相位误差最大仅约为 0.02π 。真实的相位特性波动范围为 $|\theta(f_0 + B/2) - \theta(f_0 - B/2)| = 94.6832\pi$ 。故相对于真实的相位特性,二阶泰勒级数模拟后的相位特性仅变化约0.02%,可以忽略不计。

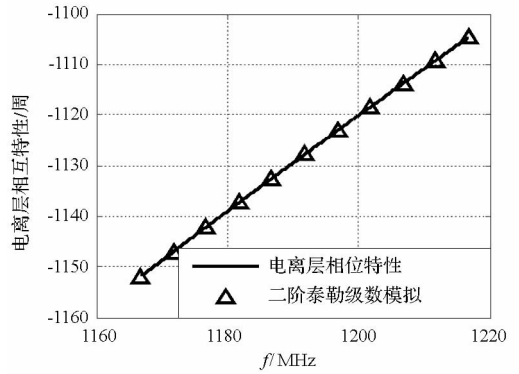


图1 真实电离层相位特性与相应的二阶泰勒级数模拟效果的对比

Fig.1 Contrast of ionosphere phase response and its 2 order Taylor series

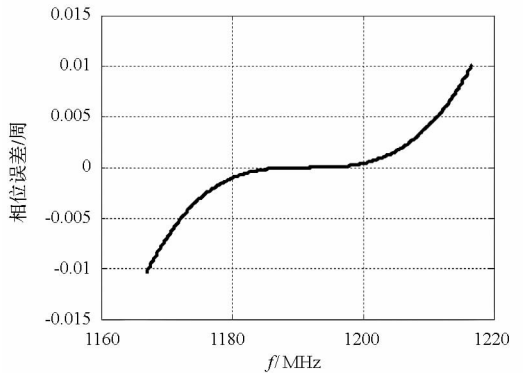


图2 电离层相位特性二阶泰勒级数模拟误差
Fig.2 Approximately error of ionosphere phase response using 2 order Taylor series

2 电离层色散效应对导航信号接收的影响

由上节可知,对于一定带宽的导航信号,电离层可近似建模成线性群时延模型,其相位响应和

群时延响应如式(7)~(10)所示。下面主要从伪码相位跟踪和载波相位跟踪两个方面分析电离层色散效应对导航信号接收的影响。为方便分析采用低通等效模型,即将电离层的传输函数搬移至基带。

2.1 电离层色散效应对伪码跟踪的影响

导航接收机一般采用非相干早迟码跟踪环路进行伪码相位跟踪,非相干早迟码跟踪环路的实现结构如图 3 所示。

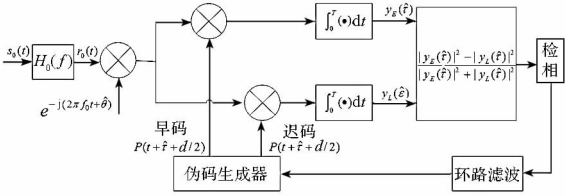


图 3 非相干早迟估计器

Fig. 3 Non-coherent early-late estimator

输入基带信号为

$$s(t) = P(t) \exp[j(2\pi f_d t + \varphi_0)] \quad (11)$$

其中 $P(t)$ 为基带导航信号, f_d 为信号多普勒。 $H_0(f)$ 为电离层传输函数的低通等效模型, 不考虑线性相位部分, 其表达式可写为

$$H_0(f) = \exp\left[-j \frac{80.6\pi TE C f^2}{c f_0^3}\right] \quad (12)$$

跟踪稳定后有式(13), $\hat{\tau}$ 即为 $s_0(t)$ 的时延估计值。

$$|y_E(\hat{\tau})|^2 = |y_L(\hat{\tau})|^2 \quad (13)$$

即

$$\left| \int_{-B}^B G_p(f) \exp\left[-j \frac{80.6\pi TE C f^2}{c f_0^3} + j2\pi f\left(\hat{\tau} - \frac{d}{2}\right)\right] df \right| = \left| \int_{-B}^B G_p(f) \exp\left[-j \frac{80.6\pi TE C f^2}{c f_0^3} + j2\pi f\left(\hat{\tau} + \frac{d}{2}\right)\right] df \right| \quad (14)$$

其中 B 为信号的单边带带宽, $G_p(f)$ 为导航信号的功率谱密度, 一般为偶函数, 满足 $G_c(f) = G_c(-f)$ 。

显然式(14)的解为

$$\hat{\tau} = 0 \quad (15)$$

故电离层色散效应不会产生伪码测距偏差。稳定跟踪后, 准时支路的能量可写为

$$R(0) = \left| \int_{-B}^B G_p(f) \exp\left[-j \frac{80.6\pi TE C f^2}{c f_0^3}\right] df \right| \quad (16)$$

相应的电离层色散效应产生的相关损耗可写为

$$P_L = 20 \lg\left(\left|\frac{R_0(0)}{R(0)}\right|\right) \quad (17)$$

其中 $R_0(\tau)$ 为理想的自相关函数, 表达式如式

$$R_0(\tau) = \int_{-B}^B G(f) \exp[-j2\pi f\tau] df \quad (18)$$

2.2 电离层色散效应对载波相位跟踪的影响

导航接收机一般采用科斯塔斯环路进行载波相位跟踪, 其组成结构如图 4 所示。

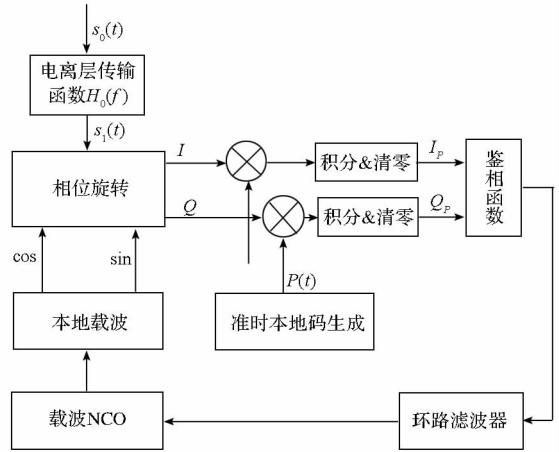


图 4 载波相位跟踪结构

Fig. 4 Carrier phase track structure

不同本地码相位下的积分 & 清零器输出即为输入基带扩频信号与本地信号的相关函数 $R(\tau)$ 。假设本地载波还未进行载波相位跟踪, 载波 NCO 初始频率为 f_d , 初相为 φ_0 , 此时相关函数可写为

$$R(\tau) = R_I(\tau) + jR_Q(\tau) = \int_{-B}^B G_p(f) H_0(f) \exp[-j2\pi f\tau] df \quad (19)$$

由上节可知电离层色散效应不会产生伪码相位跟踪偏差, 则伪码已稳定跟踪后, IQ 支路的相关累加值输出分别为

$$I_p = R_I(0) \quad (20)$$

$$I_q = R_Q(0) \quad (21)$$

由电离层色散效应引入的载波相位跟踪偏差为

$$\theta_e = \arctan \frac{R_Q(0)}{R_I(0)} \quad (22)$$

综上所述, 电离层色散效应不会产生伪码相位跟踪偏差, 但会产生相关损耗及其载波相位跟踪偏差, 如式(18)、(22)所示。下面将通过仿真定量地分析电离层色散效应的影响。

3 仿真分析

本节通过数值仿真的方法分析不同调制方式下电离层引入的载波相位跟踪偏差及其相关损耗, 并验证本文提出的电离层相位特性的二阶泰

勒模型的正确性。仿真框图如图5所示,其中电离层低通等效模型 $H'_0(f)$ 的表达式见式(12)。首先生成基带导航信号,然后将该基带信号通过电离层低通等效模型得到新的信号,然后分别对这两个信号进行跟踪处理,跟踪稳定后,两者载波相位之差即为电离层色散效应引入的载波相位跟踪偏差,相关峰比值即为相关峰损耗。

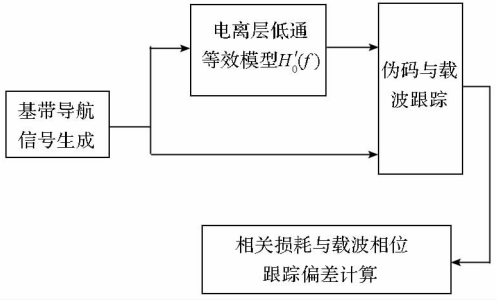


图5 仿真框图

Fig.5 Simulation frame

仿真分别采用 BPSK(10), BOC(14,2) 以及 AltBOC(15,10) 信号,具体的信号参数如表1所示,电离层参数 TEC 取值范围取为 $10^{16} \sim 10^{19} e/m^2$ 。

表1 信号参数

Tab.1 Signal parameter

信号类别	中心频点/MHz	双边带带宽/MHz
BPSK(10)	1227.6	20
BOC(14,2)	1575.42	32
AltBOC(15,10)	1191.795	50

仿真结果如图6、7所示,显然,对于普通 BPSK(10),电离层色散效应引入的相关损耗以及载波相位跟踪偏差可以忽略不计;对于 BOC(14,2) 信号,中心频点取为 1575.42MHz 时,电离层色散效应引入的载波相位跟踪偏差最高约为 0.12π ,其引入的相关损耗可以忽略不计;对于 AltBOC(15,10) 信号,中心频点为 1191.795MHz 时,若采用匹配接收算法,电离层效应引入的相关损耗最高约为 1.4dB,引入的载波相位跟踪偏差最高约为 0.374π 。

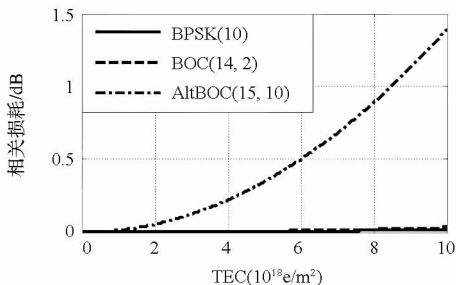


图6 电离层色散效应引起的相关损耗

Fig.6 Correlation loss arouse by ionosphere dispersion

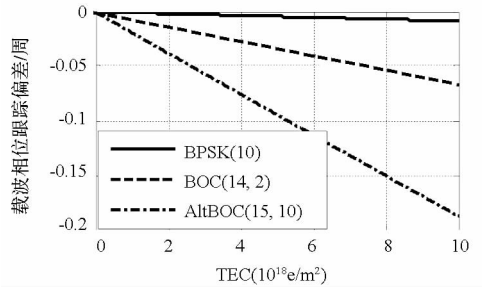


图7 电离层色散效应引入的载波相位跟踪偏差

Fig.7 Carrier phase track error arouse by ionosphere dispersion

4 结论

本文定量地分析了信号带宽内电离层色散效应对导航信号接收的影响。分析结果表明,电离层色散效应不会产生伪码跟踪偏差,但是会产生相关损耗以及载波相位跟踪偏差。其对 BPSK(10) 产生的影响可以忽略不计,而对 BOC(14,2)、AltBOC(15,10) 等高阶 BOC 信号会产生一定程度的与电离层特性相关的相关损耗以及载波相位跟踪偏差,尤其是 AltBOC(15,10) 信号,影响更为明显,其相关损耗最高可达到 1.4dB,载波相位跟踪偏差最高可达 0.374π 。相关损耗将直接导致信号载噪比的下降,进而影响跟踪精度;载波相位跟踪偏差对于普通的伪码测距不会产生影响,而对需要采用载波相位测量值的高精度应用,随电离层特性而变化的载波相位偏差会有一定程度的影响。

另外本文的研究结果可以指导导航信号源电离层特性的模拟。目前导航信号源对电离层特性进行模拟时,一般只模拟伪码延迟和载波相位超前的特性,没有模拟信号带宽内的电离层色散效应。而电离层色散特性对高阶 BOC 等宽带导航信号会产生相关损耗和载波相位跟踪偏差,因此为尽可能模拟真实环境,导航信号源应该模拟信号带宽范围内的电离层色散效应。

参考文献 (References)

- [1] Klobuchar J A. Ionospheric effects on GPS[J]. GPS World, 1991, 2(4):48-51.
- [2] Hoque M M, Jakowski N. Higher order ionospheric effects in precise GNSS positioning [J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(4):259-268.
- [3] Schüller T, Diessongo H, Poku-Gyamfi Y. Precise ionosphere-free single-frequency GNSS positioning [J]. GPS Solution, 2011, 15(2): 139-147.
- [4] Petrie E J, Hernández-Pajares M, Spalla P. A Review of higher order ionospheric refraction effects on dual frequency GPS [J]. Surveys in Geophysics, 2011, 32(3):197-253.

- Chichester; John Wiley & Sons, 2008.
- [2] Wiley R G. ELINT: The interception and analysis of radar signals[M]. Norwood: Artech House, 2006.
- [3] Adamy D L. Introduction to electronic warfare modeling and simulation[M]. Norwood: Artech House, 2003.
- [4] Hmam H. Scan-based emitter passive localization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 36-54.
- [5] Doganay K. Online optimization of receiver trajectories for scan-based emitter localization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(3): 1117-1125.
- [6] Hmam H, Dogancay K. Passive localization of scanning emitters[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2010, 46(2): 944-951.
- [7] 唐斌, 胡光锐. 基于免疫神经网络的雷达天线扫描方式的识别[J]. 应用科学学报, 2003, 21(1): 36-38.
TANG Bin, HU Guangrui. Recognition of the scanning style of the radar antenna using immune neural networks[J]. Journal of Applied Sciences, 2003, 21(1): 36-38. (in Chinese)
- [8] 官新保, 沈文辉, 金兆彰, 等. RBF网络雷达天线扫描方式识别系统[J]. 红外与激光工程. 2004, 33(4): 437-440.
GONG Xinbao, SHEN Wenhui, JIN Zhaozhang, et al. Scanning-style recognition system of radar antennas based on RBF network[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 437-440. (in Chinese)
- [9] Greer T H. Automatic recognition of radar scan type[P]. U. S. Patent 6,697,007, 2004.
- [10] Barshan B, Eravci B. Automatic radar antenna scan type recognition in electronic warfare[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(4): 2908-2931.
- [11] Leiva-Murillo J M, Gomez-Chova L, Camps-Valls G. Multitask remote sensing data classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 151-161.
- [12] Wu S H, Su W J, Zhu L, et al. Algorithm based on PRI transform for estimating the scanning periods of phased array radar[C]//Proceedings of 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009: 1-4.
- [13] Quan W, Li P, Xu F K. An algorithm of signal sorting and recognition of phased array radars[C]//Proceedings of IEEE 10th International Conference on Signal, 2010: 1877-1880.
- [14] Kim Y H, Kim W J, Song K H, et al. Modeling of a radar signal for scan pattern[C]//Proceedings of 2009 IEEE Military Communications Conference, 2009: 1-6.
- [15] Eravci B. Automatic radar antenna scan analysis in electronic warfare[D]. Ankara: Bilkent University, 2010.
- [16] Cheong S, Oh S H, Lee S Y. Support vector machines with binary tree architecture for multi-class classification[J]. Neural Information Processing-Letters and Reviews, 2004, 2(3): 47-51.
- [17] 伍忠东, 高新波. 谢维信. 基于核方法的模糊聚类算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(4): 533-537.
WU Zhongdong, GAO Xinbo, XIE Weixin. A study of a new fuzzy clustering algorithm based on the kernel method[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2004, 31(4): 533-537. (in Chinese)
- [18] Witten I H, Frank E. Data mining: practical machine learning tools and techniques[M]. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005.

(上接第149页)

- [5] Christie J R I, Parkinson B W, Enge P K. The effects of the ionosphere and C/A frequency on GPS signal shape: considerations for GNSS-2[C]//Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 1996.
- [6] 刘瀛翔, 李垣陵, 唐小妹, 等. 电离层对 BOC 调制信号的影响[J]. 宇航学报, 2012, 33(10): 1466-1471.
LIU Yingxiang, LI Yuanling, TANG Xiaomei, et al. Ionosphere effects for BOC modulated signals[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(10): 1466-1471. (in Chinese)
- [7] Hodgart M S, Blunt P D, Unwin M. The optimal dual estimate solution for robust tracking of binary offset carrier (BOC) modulation[C]//Proceedings of the 20th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 2007: 1017-1027.
- [8] Hodgart M S, Blunt P D, Unwin M. Double estimator, a new receiver principle for tracking BOC signals[J]. Inside GNSS, Spring, 2008, 3(3): 26-36.
- [9] Lestarquit L, Artaud G, Issler J L. AltBOC for dummies or everything you always wanted to know about AltBOC[C]//Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 2008: 961-970.
- [10] Pratt A R, Owen J I R. Signal multiplex techniques in satellite channel availability possible applications to galileo[C]. Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, 2005: 2448-2460.
- [11] Kaplan E D, Hegarty C J. GPS原理与应用[M]. 第二版. 寇艳红译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 230-233.
Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS Principles and Applications[M]. 2nd ed. KOU Hongyan Trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 230-233. (in Chinese)
- [12] Morton Y T, van Graas F, Zhou Q H, et al. Assessment of the higher order ionosphere error on position solutions[J]. Journal of The Institute of Navigation, 2009, 56(3): 185-193.
- [13] Misra P, Enge P K. 全球定位系统—信号、测量与性能[M]. 罗鸣, 曹冲, 肖雄兵, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 123-126.
Misra P, Enge P K. Global positioning system: signals, measurements, and performance[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 123-126. (in Chinese)