

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.04.007

引用格式:余金峰,杨文革,陈军,等.混沌扩频测控系统码跟踪性能分析[J].电讯技术,2014,54(4):412-417. [YU Jin-feng, YANG Wen-ge, CHEN Jun, et al. Analysis of DLL Tracking Performance in Chaotic Spread Spectrum TT&C System[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(4):412-417.]

混沌扩频测控系统码跟踪性能分析*

余金峰^{1,2, **}, 杨文革¹, 陈 军², 王大明²

(1. 解放军装备学院, 北京 101416; 2. 洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要:混沌信号的非周期性有助于解决距离测量中的模糊问题,使得它在测控系统中具有巨大应用吸引力。混沌扩频测控系统的码跟踪抖动,除了来源于加性噪声影响之外,还受到数字化混沌序列相关函数旁瓣随机性的影响。根据码跟踪原理与混沌码特性,给出了混沌码相关函数旁瓣随机性影响下码跟踪环路鉴相增益随机性的计算方法,分析了混沌扩频测控系统的码跟踪性能。结果表明,混沌码相关函数随机性的存在,使码鉴相增益产生随机性,它与环路稳态误差的相互作用对跟踪精度产生有限影响。分析结果可以为混沌序列在扩频测控系统中的应用提供支持与参考。

关键词:测控系统;混沌序列;扩频序列;延迟锁定环;跟踪性能分析

中图分类号:TN911 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)04-0412-06

Analysis of DLL Tracking Performance in Chaotic Spread Spectrum TT&C System

YU Jin-feng^{1,2}, YANG Wen-ge¹, CHEN Jun², WANG Da-ming²

(1. The Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
2. Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, China)

Abstract: The aperiodicity of chaotic signal is useful to remove the range ambiguity in Tracking, Telemetry, and Control (TT&C) system. Besides the additive white Gaussian noise (AWGN), the delay locked loop (DLL) in chaotic spread spectrum TT&C system is also disturbed by the randomness of digital chaotic signal autocorrelation function sidelobe. Based on the principle of DLL and the character of chaotic code, a method to calculate the gain of code delay discriminator is presented, and the tracking performance of chaotic spread spectrum TT&C system is discussed. It is concluded that the randomness of chaotic code correlation function gives rise to the randomness of discriminator gain, which degrades the tracking accuracy slightly. The results in this paper are useful for understanding the application of chaotic spread spectrum code in TT&C system.

Key words: TT&C system; chaotic sequence; spread spectrum sequence; delay locked loop; tracking performance analysis

1 引 言

混沌是非线性系统中存在的一种非周期、有界又敏感初始条件的状态,因其具有的特殊性质而受到了广泛关注,在许多领域都得到了大量研究^[1-4]。混沌序列可以由简单的映射得到,易于产生,具有良好的平衡性,序列数量众多,这使得混沌序列已成为

* 收稿日期:2013-10-30;修回日期:2014-03-26 Received date:2013-10-30;Revised date:2014-03-26

** 通讯作者:yujinfeng2008@sohu.com Corresponding author:yujinfeng2008@sohu.com

• 412 •

扩频序列的一种新类型^[5-6]。

混沌序列用于扩频通信系统较早地受到了关注和研究。近年来,测控领域的研究人员提出了把混沌序列应用到测控系统中的思想,并开展了相关的研究工作^[7-10]。在有关文献中,提出了混沌测控的概念,对混沌序列在测控系统中应用的可行性进行了分析,并对混沌扩频测控的实现方法进行了讨论,但没有看到从理论上对混沌扩频测控系统的跟踪性能进行的分析。

与扩频通信系统中对系统误码率的关注不同,扩频测控系统更加关注系统的捕获性能和跟踪性能。由于数字混沌序列自相关函数旁瓣具有随机性,这会给跟踪系统的鉴相增益带来随机性。这种随机性必然会对系统的跟踪性能带来影响,是混沌序列在扩频测控系统中应用时必须考虑的问题。本文以基带码跟踪环为基础,探讨了混沌序列自相关函数旁瓣随机性对码鉴相增益的影响,分析了鉴相增益随机性与稳态误差的相互作用,推导了系统的码跟踪精度与信号动态的关系,为混沌序列在扩频测控系统中的应用提供支持与参考。

2 混沌码延迟锁定环跟踪误差源

扩频测控系统的测距性能与码延迟锁定环的跟踪测量误差有关。码跟踪环中的测量误差源主要是热噪声跟踪抖动和动态应力误差^[11]。热噪声跟踪抖动由系统的热噪声引起,它与环路带宽有关,与环路的阶数及信号动态无关。动态应力误差由目标至接收机视线上的动态引起,与跟踪环路的阶数和带宽有关。

对于混沌扩频测控系统来说,由于混沌序列的自相关函数旁瓣具有随机性^[6],使得码延迟鉴相器增益具有一定的随机性,并最终使输出信号产生抖动。自相关函数旁瓣的随机性不是独立表现的,它依附于环路对暂态输入信号跟踪所产生的稳态误差。

因此,总的来说,混沌扩频测控系统码跟踪环的误差有 3 个来源,一是输入加性噪声引起的跟踪抖动,二是由于输入信号的动态造成的环路跟踪动态应力误差,三是由于稳态误差的存在使得混沌序列自相关函数旁瓣随机性得以体现而产生的跟踪抖动。为方便起见,将第三项误差称为旁瓣噪声跟踪抖动。

测量误差必须是受限的,当测量误差超过一定

界限值时,跟踪环路就会失锁。延迟锁定环(DLL)经验方法的跟踪门限是,由环路所有应力源造成的 3σ 抖动值,不允许超过鉴别器线性范围的一半。因此,跟踪误差应满足如下的门限要求:

$$R_e + 3\sigma_{No} + 3\sigma_{NRo} \leq d/2 \tag{1}$$

其中, R_e 表示 DLL 跟踪的动态应力误差(码元数); σ_{No} 表示热噪声码跟踪抖动的 1σ 值; σ_{NRo} 表示旁瓣噪声跟踪抖动 1σ 值; d 表示超前码与滞后码之间的时间间隔,通常用码元 T_c 为单位来表示。

3 混沌码鉴相器线性模型

基带延迟锁定环由延迟鉴别器、回路滤波器、压控振荡器和码产生器等组成^[12],其结构如图 1 所示。延迟锁定环把接收信号与超前码和滞后码进行相关处理。相关处理的结果相当于在相关函数峰的上升沿和下降沿分别进行采样,两个采样信号的差值是本地码和输入码之间延迟差的非线性函数。对采样信号通常采用称为零搜索的控制方式,也就是说,零搜索方式控制本地码的延迟,使得超前相关器与滞后相关器输出信号差别趋零。超前和滞后相关器之间的固定时间间隔称为相关器间距, dT_c 表示相应的时间间隔。

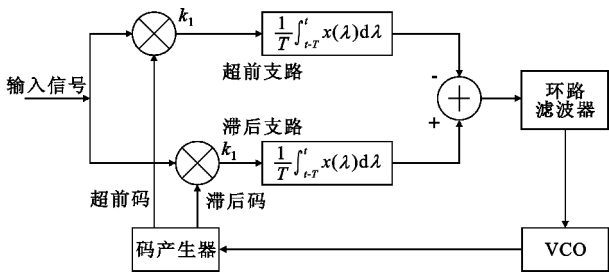


图 1 码延迟锁定环结构图
Fig. 1 The diagram of delay locked loop's structure

设输入信号 $r(t)$ 为输入码和噪声之和:

$$r(t) = \sqrt{C}x(t-\tau) + n(t) \tag{2}$$

其中, $\sqrt{C}x(t-\tau)$ 为输入码信号分量, $n(t)$ 为输入基带噪声分量。记乘法器增益为 k_1 ,超前和滞后支路的输出信号 S_E 和 S_L 为

$$S_E = k_1 \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sqrt{C}x(\lambda - \tau)x(\lambda - (\hat{\tau} - dT_c/2))d\lambda$$
$$S_L = k_1 \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sqrt{C}x(\lambda - \tau)x(\lambda - (\hat{\tau} + dT_c/2))d\lambda \tag{3}$$

记 $\Delta\tau=\tau-\hat{\tau}$, $\varepsilon=\Delta\tau/T_c=(\tau-\hat{\tau})/T_c$, 上式用相关函数表示为

$$\begin{aligned} S_E &= k_1 \sqrt{C} R[(\varepsilon+d/2)T_c] \\ S_L &= k_1 \sqrt{C} R[(\varepsilon-d/2)T_c] \end{aligned} \tag{4}$$

将滞后支路减去超前支路可以得到

$$v_d = S_L - S_E = k_1 \sqrt{C} D(\varepsilon) \tag{5}$$

其中, $D(\varepsilon)$ 称为码延迟鉴别函数, 它是码延迟跟踪误差的函数。如果不考虑混沌序列相关函数的随机性, 也就是用平均相关函数作鉴相时, 由超前和滞后支路得到的鉴相函数为

$$D(\varepsilon) = \bar{R}((\varepsilon-d/2)T_c) - \bar{R}((\varepsilon+d/2)T_c) \tag{6}$$

$D(\varepsilon)$ 如图 2 所示, 图中所示为 $d=1$ 时的情形, 其图形称为 S 曲线。其中间部分呈现线性特性, 靠近原点处的斜率为 $k'_d=2$ 。

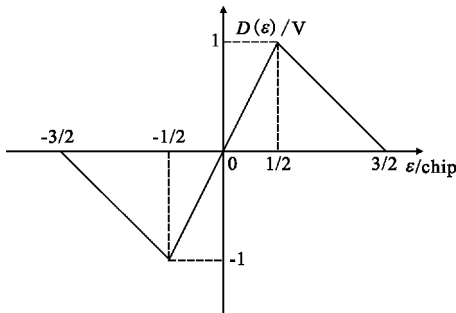


图 2 码延迟锁定环鉴别函数 ($d=1$)

Fig. 2 The function of discriminator in DLL ($d=1$)

通常把 $D(\varepsilon)$ 与 ε 成线性关系的区域作为跟踪回路的正常工作区域。鉴相器的功能用其等效鉴相器增益 k_d 来表示。对于经码元时间 T_c 归一化后的码延迟相对误差 $\varepsilon=\Delta\tau/T_c=(\tau-\hat{\tau})/T_c$ 来说, 等效鉴相器增益 k_d 为 $2k_1\sqrt{C}$ 。相应的鉴相器等效框图如图 3 所示。

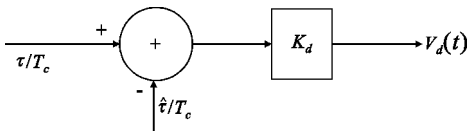


图 3 码延迟锁定环鉴相等效框图

Fig. 3 Equal effects of the discriminator in DLL

4 混沌码鉴相增益的随机性

对于像 m 码这样的伪随机码来说, 自相关函数旁瓣不具有随机性, 码延迟鉴别函数是码延迟的确定性函数。对于混沌序列来说, 其自相关函数的旁

瓣具有随机性, 因而, 使得码延迟鉴别函数也具有随机性。

混沌序列自相关函数的均值为^[10,13]

$$\bar{R}(m) = E\{R(m)\} = E\left\{\frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}a_i a_{i+m}\right\} = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 0, & m\neq 0 \end{cases} \tag{7}$$

自相关函数的方差

$$\sigma_{AC}^2(m) = E\{(R(m))^2\} - (\bar{R}(m))^2 = \begin{cases} 0, & m=0 \\ 1/N, & m\neq 0 \end{cases} \tag{8}$$

考虑自相关函数的随机性时, S 曲线的斜率会随机变化, 靠近原点处的斜率 k'_d 具有与自相关旁瓣类似的随机分布。设自相关函数旁瓣的随机性用 R_n 表示, $R_n \sim N(0, 1/N)$, 则靠近原点处的斜率

$$k'_d = 2(1+R_n) = 2+2R_n \tag{9}$$

它的均值和方差分别为

$$E(k'_d) = E(2+2R_n) = 2 \tag{10}$$

$$\text{var}(k'_d) = D(2+2R_n) = 4/N \tag{11}$$

所以, 鉴相器等效增益的均值是 $k_d = 2k_1\sqrt{C}$, 方差是 $(k_1\sqrt{C})^2 \times 4/N = (2k_1\sqrt{C})^2/N$ 。

5 旁瓣噪声引起的跟踪抖动分析

由于鉴相器等效增益的随机性, 使稳态跟踪误差 $\theta_e(\infty)$ 在鉴相器输出端产生的随机信号为 N_R , 表示依附于稳态跟踪误差而由混沌序列自相关函数旁瓣随机性产生的等效噪声, 其方差为

$$\sigma_{NR}^2 = \theta_e^2(\infty) 4k_1^2 C/N = \theta_e^2(\infty) k_d^2/N \tag{12}$$

设该项噪声在鉴相器输入端的等效输入噪声为 N_{Ri} , 其方差为 $\sigma_{NRi}^2 = \theta_e^2(\infty)/N$ 。它在 $2/T$ 的输入带宽上的功率谱密度为

$$S_{NRi}(f) = \frac{\theta_e^2(\infty)}{N} \cdot \frac{2}{T} = \frac{\theta_e^2(\infty) T_c}{2} \tag{13}$$

可以看出, 旁瓣随机性产生的等效输入噪声功率谱密度, 由稳态误差和码元宽度决定。与码元宽度的关系可解释为, 在积分时间固定时, 码元宽度越大, 参加积分的码元数目越少, 其旁瓣噪声越大。

N_{Ri} 经环路的滤波作用, 在输出端得到 N_{Ro} , 其功率谱密度为

$$S_{NRo}(f) = S_{NRi}(f) |H(j2\pi f)|^2 \tag{14}$$

环路输出端等效旁瓣相位噪声 N_{Ro} 的方差为

$$\sigma_{NRo}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{NRi}(f) |H(j2\pi f)|^2 df \tag{15}$$

根据积分带宽 $1/T$ 和环路带宽 B_L 之间的对比关系, 可以将计算方法进行简化。假设相关积分时

间 T 所产生的带宽远大于环路带宽,则上式中环路带宽对积分结果起决定作用,可认为在 $1/T$ 的频带之外环路的增益为 0,并用 B_n 表示环路噪声带宽:

$$\sigma_{\text{NRo}}^2 = \int_{-1/T}^{1/T} S_{\text{NRi}}(f) |H(j2\pi f)|^2 df = \frac{\theta_e^2(\infty) T}{2N} \int_{-\infty}^{\infty} |H(j2\pi f)|^2 df = \theta_e^2(\infty) B_n T_c \tag{16}$$

以二阶环路为对象,用 R 表示信号动态, ω_n 表示环路无阻尼振荡频率,可以得到^[14]由旁瓣噪声产生的延时跟踪相位抖动为

$$\sigma_{\text{NRo}} = \theta_e(\infty) \sqrt{B_n T_c} = \frac{R}{\omega_n^2 \sqrt{B_n T_c}} \tag{17}$$

6 混沌码延迟锁定环跟踪误差的计算

综合考虑热噪声抖动、动态误差和旁瓣抖动时,经验方法的跟踪门限是:动态应力误差与相位抖动的 3σ 之和要小于相关器间距的一半,也就是

$$3\sigma_{\text{DLL}} = R_e + 3\sigma_{\text{No}} + 3\sigma_{\text{NRo}} < d/2 \tag{18}$$

代入各项的计算公式,可得

$$\left(\frac{1}{3} + \sqrt{B_n T_c}\right) \frac{R}{\omega_n^2} + \sqrt{\frac{d}{2} \frac{1}{C/N_0} B_n} < \frac{d}{6} \tag{19}$$

由上式可以看出,信号动态的存在挤占了信噪比的容许范围;热噪声抖动的存在也缩小了环路动态应力误差的允许范围。热噪声抖动随环路带宽的增加而增大,动态应力误差随环路带宽的减小而减小,在两者的综合作用下,环路带宽应有最优值。

设加速度动态为 $a = 1g$ 、信噪比为 40 dB-Hz、码速率为 1 MHz 时,环路测量误差 σ_{DLL} 随环路带宽的变化趋势如图 4 所示。

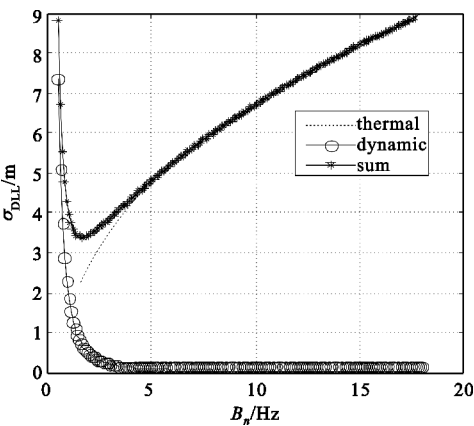


图 4 环路测量误差 σ_{DLL} 随环路带宽的变化
Fig. 4 σ_{DLL} versus loop bandwidth for chaotic TT&C

同样条件下,单独计算旁瓣随机性产生的跟踪抖动时的 $1\sigma_{\text{NRo}}$ 数值如图 5 所示。可以看出,此项误差数值较小,对整体误差的贡献极为有限。

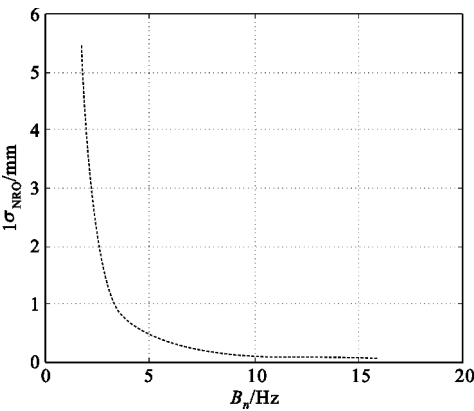


图 5 旁瓣随机性产生的跟踪抖动随环路带宽的变化($a = 1g$)
Fig. 5 $1\sigma_{\text{NRo}}$ versus loop bandwidth for chaotic TT&C when $a = 1g$

加速度动态为 $a = 1g$ 、环路带宽为 1 Hz 时,环路测量误差随信噪比的变化趋势如图 6 所示。

总的来说,热噪声抖动与载噪比和环路带宽有关,而与环路的阶数无关;动态应力误差与环路的阶数、信号动态和环路带宽有关;旁瓣随机性产生的跟踪抖动不是独立存在的,它依附于动态应力误差而存在。可以算出,在环路带宽为 9 Hz 时,旁瓣噪声产生的跟踪抖动不到动态应力误差的百分之一,与动态应力误差相比数值不大,影响有限。

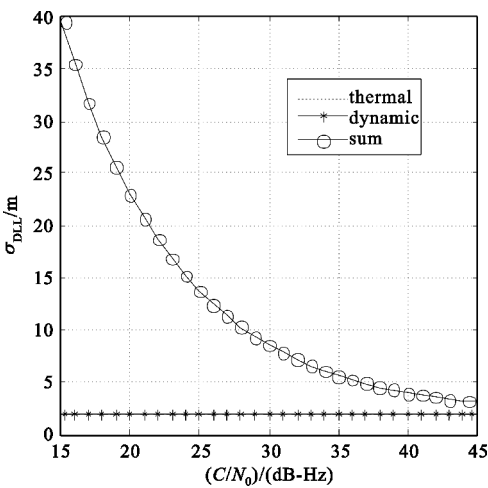


图 6 环路测量误差随信噪比的变化($a = 1g, B_n = 1\text{ Hz}$)
Fig. 6 σ_{DLL} versus signal to noise ratio for chaotic TT&C when $a = 1g, B_n = 1\text{ Hz}$

环路各项误差受信噪比、信号动态和环路带宽的影响是不同的。信噪比的变化,影响热噪声误差,不影响动态应力误差;信号动态的变化,影响动态应

力误差,不影响热噪声误差;环路带宽的变化,则对动态应力误差和热噪声误差都有影响,而影响的趋势不同。所以,在信号动态、载噪比一定时,环路测量误差随环路带宽的变化不是单调的,存在一个最优环路带宽,使得环路测量误差最小。

7 结束语

混沌码的非线性产生机制有利于提高系统的保密性,非周期性有助于解决距离测量中的模糊问题,使得它对扩频测控系统具有应用潜力。数字化混沌码的跟踪原理和方法都与常规扩频测控系统类似,因为混沌序列自相关函数旁瓣具有随机性,使码延迟锁定环中的延迟鉴别器增益具有一定的随机性。文中根据码跟踪原理与混沌码特性,以基带码跟踪环为基础,分析了鉴相增益随机性与稳态误差的相互作用,给出了混沌码相关函数旁瓣随机性影响下码跟踪环路鉴相增益随机性的计算方法,分析了混沌扩频测控系统的码跟踪性能。结果表明,混沌码相关函数随机性的存在使码鉴相增益产生随机性,它与环路稳态误差的相互作用对跟踪精度产生有限影响;在热噪声和动态应力的综合作用下,环路带宽具有最优值。在扩频测控系统中,用混沌码替代现有伪码是可行的,可以提高系统的保密性能,系统的跟踪性能又没有明显劣化。文中结果可以为混沌序列在扩频测控系统中的实际应用提供支持与参考。

实际上,数字化混沌序列就是人们受混沌特性的吸引,为了将其融入现有系统而进行的一种变通或改变。可以说它并不是混沌特性的完全展现,混沌信号在测控系统中的应用也不会局限于这一形式上。对测控系统来说,距离模糊和接收信号的同步是系统必须解决的关键技术难题。连续混沌信号具有的非周期性和自同步特性使得其在解决这两个问题时具有潜在的优势。将连续混沌信号应用于测控系统中,利用其非周期性和自同步特性,解决距离模糊和同步问题,是混沌信号在测控系统中另一种值得研究的应用方式。

参考文献:

- [1] Heidari-Bateni G, McGillem C D. A chaotic direct-sequence spread-spectrum communication system[J]. IEEE Transactions on Communications, 1994, 42(2-4): 1524-1527.
- [2] Ditto W L. Principles and applications of chaotic system[J]. Communications of the ACM, 1995, 38(11): 96.
- [3] Willsey M S, Cuomo K M, Oppenheim A V. Quasi-orthogonal wideband radar waveforms based on chaotic systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1974-1984.
- [4] 方锦清. 混沌控制及其应用前景[J]. 科技导报, 1994(5): 23-28.
FANG Jin-qing. Chaos controll and its prospects for application[J]. Science and Technology Review, 1994(5): 23-28. (in Chinese)
- [5] 王亥, 胡健栋. Logistic-map 混沌扩频序列[J]. 电子学报, 1997, 25(1): 19-23.
WANG Hai, HU Jian-dong. Logistic-map chaotic spread spectrum sequence[J]. ACTA Electronica Sinica, 1997, 25(1): 19-23. (in Chinese)
- [6] 余金峰, 杨文革, 路伟涛, 等. 满映射 Logistic 数字混沌序列的产生与特性分析[J]. 电讯技术, 2013, 53(2): 140-145.
YU Jin-feng, YANG Wen-ge, LU Wei-tao, et al. The generation and performance analysis of digital chaotic sequence from surjective Logistic-Map[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(2): 140-145. (in Chinese)
- [7] 刘嘉兴, 文吉. Ka 频段混沌扩频测控系统的设想[J]. 电讯技术, 2009, 49(5): 33-37.
LIU Jia-xing, WEN Ji. Conception for a Ka-band Chaotic Spread Spectrum TT&C System[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(5): 33-37. (in Chinese)
- [8] 舒卫平, 王万斌. 混沌码用作测控扩频码的可行性研究[J]. 航天器工程, 2008, 17(4): 46-50.
SHU Wei-ping, WANG Wan-bin. Research on the Feasibility of Applying the Chaotic Code to the TT&C System as the Spread-spectrum Code[J]. Spacecraft Engineering, 2008, 17(4): 46-50. (in Chinese)
- [9] 刘嘉兴, 何世彪. 混沌测控的概念、特性与实现[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(1): 1-5.
LIU Jia-xing, HE Shi-biao. Basic concept of chaotic TT&C and main features of chaotic sequence[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(1): 1-5. (in Chinese)
- [10] 余金峰, 杨文革, 李飞, 等. 混沌扩频测控系统同步捕获性能分析[J]. 电讯技术, 2013, 53(12): 1545-1550.
YU Jin-feng, YANG Wen-ge, LI Fei, et al. Acquisition performance analysis of chaotic spread spectrum TT&C system[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(12): 1545-1550. (in Chinese)
- [11] Jwo D J. Optimization and sensitivity analysis of GPS receiver tracking loops in dynamic environments[J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar Navigation, 2001, 148(4): 241-250.
- [12] 田日才. 扩频通信[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 208-214.
TIAN Ri-cai. Spread spectrum communication[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 208-214. (in Chinese)

[13] Misra P, Enge P. 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,2008:277-279.

Misra P, Enge P. Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance [M]. Translated by LUO Ming, CAO Chong, XIAO Xiong-bing, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008:277-279. (in Chinese)

[14] 张厥盛,郑继禹,万心平. 锁相技术 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994:38-39.

ZHANG Jue-sheng, ZHENG Ji-yu, WAN Xin-ping. Phase-lock technique [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994:38-39. (in Chinese)

作者简介:



余金峰(1969—),男,河南唐河人,2001年于国防科技大学获硕士学位,现为高级工程师,博士研究生,主要研究方向为航天器测量与控制;

YU Jin-feng was born in Tanghe, Henan Province, in 1969. He received the M. S. degree from National University of Defense Technology in 2001. He is now a senior engineer and currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns spacecraft TT&C.

Email: yujinfeng2008@sohu.com

杨文革(1966—),男,江西金溪人,2000年于北京理工大学获博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究方向为航天测量与控制、雷达信号处理;

YANG Wen-ge was born in Jinxi, Jiangxi Province, in 1966. He received the Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2000. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research interests include TT&C and radar signal processing.

陈军(1970—),男,吉林通化人,2012年于北京航空航天大学获博士学位,现为高级工程师,主要研究方向为通信与导航;

CHEN Jun was born in Tonghua, Jilin Province, in 1970. He received the Ph. D. degree from Beihang University in 2012. He is now a senior engineer. His research interests include wireless communication and radio navigation.

王大明(1982—),男,辽宁岫岩人,2004年于解放军理工大学获学士学位,现为工程师,主要研究方向为通信与导航。

WANG Da-ming was born in Xiuyan, Liaoning Province, in 1982. He received the B. S. degree from PLA University of Science and Technology in 2004. He is now an engineer. His research interests include wireless communication and radio navigation.