

文章编号: 1672-2892(2011)06-0708-05

高动态条件下伪随机码捕获的旁瓣虚警分析

申光, 李仰志, 谷文飞

(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 采用 Matlab 对扩频码的自相关旁瓣在载波频差条件下的改变情况进行了仿真, 可以看出自相关旁瓣峰值和均值随载波频偏的变化发生了较为明显的改变, 在 0 kHz~1 kHz 范围内变化最为明显, 在 1 kHz~10 kHz 范围内变化幅度较小, 成波浪起伏变化。同时自相关旁瓣的变化, 导致系统捕获时的虚警概率也发生了相应变化, 进而导致虚假捕获。而在采用自适应门限情况下, 虚警概率大大降低, 因此在实际情况中, 基于高斯分布的固定门限不是最佳选择。

关键词: 卫星导航定位系统; 无线电测定业务; 自相关旁瓣; 载波频偏; 虚警概率; 虚假捕获

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

Side-lobes false alarm of acquisition of PN code under high dynamics

SHEN Guang, LI Yang-zhi, GU Wen-fei

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210007, China)

Abstract: This paper emulates the changes of autocorrelation side lobe for spreading code by Matlab under the condition of the carrier frequency offset. It can be found that the peak and averaged values of autocorrelation side lobe change greatly as the carrier frequency offset changes, and the change is most obvious in 0 kHz-1 kHz. At the same time, the change of autocorrelation side lobe results in the change in the false alarm probability of the system correspondingly, and then led to a false acquisition. Nevertheless, the false alarm probability decreases greatly when adopting self-adaptive threshold. Therefore, the regular threshold based on Gauss distribution is not the best option in actual condition.

Key words: satellite navigation system; radio determination satellite service; autocorrelation side lobes; carrier frequency offset; false acquisition; false alarm probability

我国的卫星导航定位系统利用了与 GPS 和 GLONASS 完全不同的定位原理, 即由用户以外的地面控制系统完成用户定位所需要的无线电导航参数的确定和位置计算, 称为无线电测定卫星业务(Radio Determination Satellite Services, RDSS)。RDSS 系统中, 不管是入站信号还是出站信号, 都要进行扩频处理, 特别是对入站信号, 由于数量众多的用户机发射信号占用相同频带, 因此扩频码的多址能力直接关系到同时入站的用户数量, 进而关系到整个系统的容量, 因此扩频码性能的分析对系统整体设计的重要性不言而喻。分析扩频码, 不仅要分析扩频码的自相关主瓣峰值是否尖锐, 而且扩频码的自相关旁瓣特性同样对系统性能有着重要影响, 实际信道中存在的载波频偏会使自相关旁瓣值发生较大变化, 使伪码捕获的旁瓣虚警概率增加, 进而导致虚假捕获。在实际的捕获系统中, 信号的检测采取全数字相关检测, 判决检测器设置 1 个门限, 相关输出超过门限即判定为有用信号, 但是信号的检测除了背景噪声会引起噪声虚警外, 当扩频码序列过大时, 伪码通过数字相关器后的自相关旁瓣在噪声背景下也有可能超过门限引起旁瓣虚警。噪声虚警与旁瓣虚警的区别在于, 前者是在无信号输入时由背景噪声引起的, 而后者是在信号存在条件下由信号旁瓣和背景噪声共同引起的^[1-3]。由于旁瓣虚警会使伪码捕获的虚警概率增加, 即使自相关旁瓣值比较小, 存在多普勒频移的情况下, 也有可能使自相关旁瓣值发生改变, 影响系统的正常工作, 因此研究伪随机序列自相关旁瓣特性有非常重要的意义。

1 多普勒频移

在高动态环境下, 卫星和接收机的高速运动所产生的多普勒频移, 使接收机接收到的信号的中心频率发生偏

收稿日期: 2010-12-15; 修回日期: 2011-01-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2008AA12Z307)

移，而多普勒频移主要是运动多普勒频移和电波传播介质的变化引起的介质多普勒频移，但由于传播介质变化引起的介质多普勒频移量级在 10^{-2} Hz，可以忽略^[4]。

多普勒频移取决于 2 个因素：卫星速度分量引起的多普勒频移和用户指向卫星方向的运动分量引起的多普勒频移^[5]。首先计算引起多普勒频移的卫星速度分量的大小，卫星的角速度和卫星的速度可由卫星轨道的近似半径来计算。

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi}{11 \times 3600 + 58 \times 60 + 2.05} \approx 1.458 \times 10^{-4} \text{ rad/s} \quad (1)$$

$$v_s = \frac{r_s d\theta}{dt} \approx 26560 \text{ km} \times 1.458 \times 10^{-4} \approx 3874 \text{ m/s} \quad (2)$$

图 1 中，卫星的位置为 S ，用户的位置为 A ， $r_s=26560$ km，引起多普勒频移的卫星相对于用户的速度分量为 $v_d = v_s \sin \beta$ ，在三角形 OAS 中，运用正弦和余弦定理可以求得：

$$v_d = \frac{v_s r_e \cos \theta}{\sqrt{r_e^2 + r_s^2 - 2r_e r_s \sin \theta}} \quad (3)$$

通过对 v_d 求 θ 的导数并令其结果为零，可得到多普勒速率的最大值：

$$\sin \theta = r_e / r_s \quad (4)$$

当 $\sin \theta = r_e / r_s$ 时， v_d 取到最大值，此时卫星相对于用户来说，正好处于水平位置方向，卫星的线速度为 $v_s=3874$ m/s， v_d 为卫星面向用户位置 A 的速度分量，正是由于这个速度分量产生了多普勒频移，包括载频上的多普勒频移 f_d 和码速率上的多普勒频移 f_{dc} 。

根据上面分析，可以计算出最大多普勒速率 $v_{d\max} = \frac{v_s r_e}{r_s} \approx 923$ m/s，这个速度和高速军用飞机的速度相当，由于地面上的交通工具所产生的多普勒频移通常非常小。对于 C/A 码，最大载波多普勒频移为

$$f_d = \frac{f_{L1} v_{d\max}}{c} = \frac{1575.42 \times 929}{3 \times 10^8} \approx 4.9 \text{ kHz} \quad (5)$$

式中 c 为光速。因此对于固定的观察者而言，最大的载波多普勒频移大约在 ± 5 kHz 范围内。

如果加载接收机的运输工具高速运动，由此引起的多普勒效应也必须考虑在内，当仅有运输工具运动产生 ± 5 kHz 的多普勒频移时，运输工具必须相对卫星以大约 929 m/s 的速度运行，这个速度接近于大多数高速飞机的速度。因此在设计接收机时，如果接收机装在低速载体上，可以认为多普勒频移为 ± 5 kHz；如果接收机装在高速载体上，假设多普勒频移为 ± 10 kHz 比较合理。

2 载波频偏对伪码相关检测的影响

在扩频接收机中，载波频偏会使接收信号的极性发生翻转，在伪码捕获期间，会大大降低信号的相关峰，使检测概率明显下降^[6]。载波频偏对接收信号的影响情况见图 2，可以看出载波频偏会改变信号的极性，因此在伪码捕获时，载波频偏是影响伪码捕获一个重要因素。

在传统的滑动相关捕获法中，通过计算接收伪码和本地伪码的相关值来判断是否完成了对接收伪码的捕获，判断的依据是观察是否有尖锐的相关峰出现或看其值是否超过预先设定好的门限。

在滑动相关捕获中，相关器的输出为

$$G = \int_0^{MT_c} c(t)c(t-\tau) e^{i(2\pi f_d t + \phi_0)} dt \quad (6)$$

式中： f_d 为多普勒频移； M 为伪码码长； T_c 为伪码单个码片长度； ϕ_0 为初相位。为了分析多普勒频移对相关值的影响，且不失一般性，

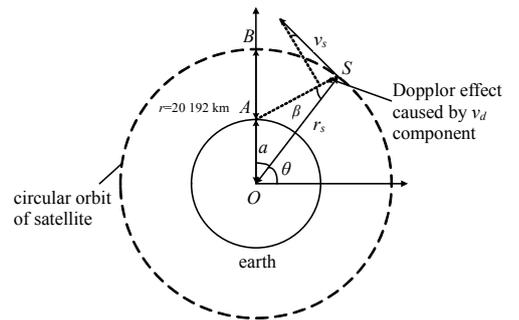


Fig.1 Doppler frequency shift caused by satellite moving
图 1 卫星运动引起的多普勒频移

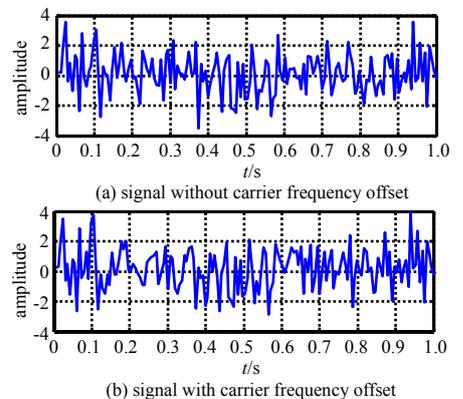


Fig.2 Influence of carrier frequency offset on signal
图 2 载波频偏对收、发信号的影响

先假设两码的相位已经完全对齐, 即 $\tau=0$, 同时令 $\phi_0=0$ 。相关器输出变为^[11]:

$$G = \int_0^{MT_c} e^{i(2\pi f_d t)} dt \quad (7)$$

相关器的归一化幅频响应为:

$$G(f_d) = \frac{1}{M} \left| \frac{\sin(\pi f_d T_c M)}{\sin(\pi f_d T_c)} \right| \quad (8)$$

对于 GPS C/A 码, 码长度为 1 023, 码片速率分别取不同的值时, 积分时间都为 1 个码周期, 归一化相关值随载波频偏的变化情况见图 3, 可以看出即使在接收伪码和本地伪码的相位完全对齐的情况下, 一方面随着码片速率的提高, 幅度值下降速度变慢, 从而看出提高码片速率, 可以提高系统的抗多普勒效应能力; 另一方面随着载波频偏的增大, 相关值会迅速下降, 每当载波频差增大一定值时, 幅度值便会出现一个零值, 造成不能检测到卫星信号。因此, 要实现码的捕获, 不仅要对其码相位进行搜索, 而且还要搜索载波的多普勒频移, 这实质上是一个在时域和频域同步进行的二维搜索过程。

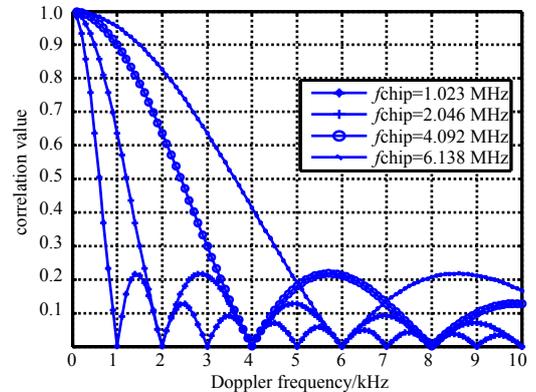


Fig.3 Correlation value change with carrier frequency offset
图 3 码相位对齐时自相关随载波频偏变化规律

2.1 自相关旁瓣随载波频偏变化规律

本文利用 Matlab 进行计算机仿真, 选取不同长度的 m 序列, 码长分别为 255, 511, 1 023, 2 047, 4 095, 载波频差变化范围为 0 kHz~10 kHz, 仿真其各自在给定载波频差的情况下, 自相关旁瓣峰值和均值的变化规律。理想情况下, 即在无载波频差的情况下, m 序列具有良好的二值自相关性, 自相关旁瓣取值只有 -1; 而在有载波频差的情况下, 自相关旁瓣发生了较大变化^[7-9]。

图 4 为不同码长的自相关旁瓣峰值随载波频偏的变化规律, 图 5 为不同码长的自相关旁瓣均值随载波频偏的变化规律。从图 4 和图 5 可以看出, 自相关旁瓣峰值和均值随载波频偏的变化发生了较为明显的变化, 在 0 kHz~1 kHz 范围内变化最为明显, 在 1 kHz~10 kHz 范围内变化幅度较小, 成波浪起伏变化。

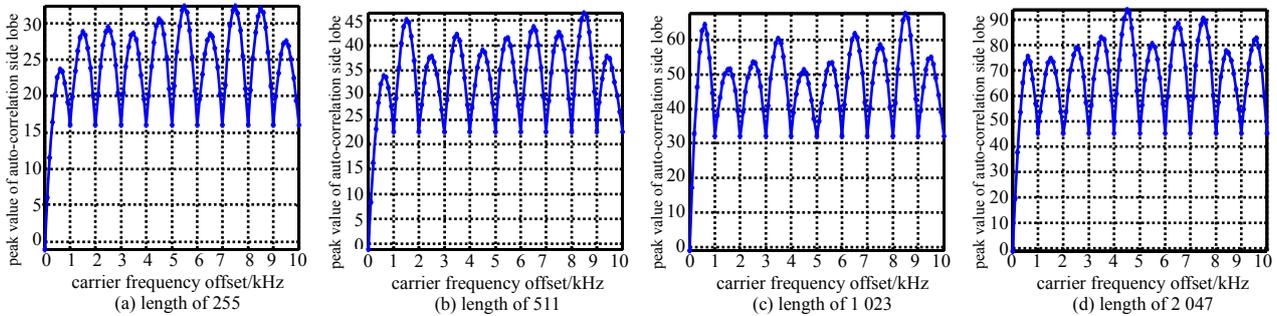


Fig.4 Peak value of auto-correlation side lobe of different length change with carrier frequency offset

图 4 不同码长自相关旁瓣峰值随载波频偏变化规律

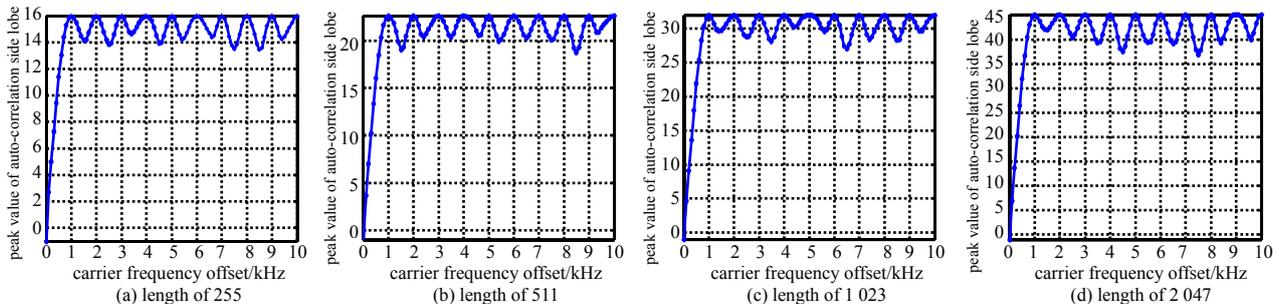


Fig.5 Mean value of auto-correlation side lobe of different length change with carrier frequency offset

图 5 不同码长自相关旁瓣均值随载波频偏变化规律

从表 1 可以看出，一方面，自相关旁瓣电平相对于峰值电平差最大可以相差-18 dB(码长为 255,载波频偏为 7.5 kHz 处)，这在一定的天线增益及其他一些条件(如有用信号较无用信号强度弱得多，仰角低得多及多径效应等)下，将有可能造成虚假捕获；另一方面，随着码字长度的增加，最大电平差同时在逐渐降低，这也是在码字设计中需要增加码长的原因之一。

2.2 旁瓣虚警

在实际的捕获系统中，信号的检测采用的是全数字相关检测，判决检测器设置 1 个门限，相关输出超过门限即判定为有用信号，但是信号的检测除了背景噪声会引起噪声虚警外，当扩频码序列过大时，伪码通过数字相关器后的自相关旁瓣在噪声背景下也有可能超过门限引起旁瓣虚警。在信号到达时刻未知且在一定捕获精度要求下，伪码自相关旁瓣加噪声引起的捕获指示被认为是虚假捕获，即引起了旁瓣虚警。旁瓣加噪声服从正态分布，因此取值为 $S(l)$ 的旁瓣引起的虚警概率为^[9]

$$P_f(l) = Q\left(\frac{v_{th} - AS(l)}{\sigma_T}\right) \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (9)$$

式中： $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ ； v_{th} 为检测门限； A 为信号振幅； $S(l)$ 为自相关旁瓣取值； σ_T 为噪声通过相关器输出的方差。

如果自相关旁瓣共有 M 个不同的取值，则所有旁瓣产生的平均旁瓣虚警概率为：

$$\bar{P}_f = \sum_{l=1}^M P_f(l) \frac{S(l)\text{的个数}}{M} \quad (10)$$

从式(10)可以看出，伪码自相关旁瓣的平均旁瓣虚警概率不仅取决于噪声统计特性和检测门限，而且与输入信噪比、旁瓣取值的大小以及出现个数有关。

本文仿真具体参数设置见表 2，自相关旁瓣的平均旁瓣虚警概率随载波频偏变化情况见图 6，可以看出在实际接收机系统中，由于多普勒效应导致的载波频偏存在，使得自相关旁瓣发生较大变化，进而导致在捕获时旁瓣虚警的不断变化，与旁瓣变化趋势一样，在 0 kHz~1 kHz 范围内变化比较明显，所以系统的参数不可能保持不变。因此采用固定的门限(即给定虚警概率来确定门限)，虚警概率将随着干扰强度的变化而变化，使得捕获系统性能恶化，所以固定门限实用价值不高。

在实际接收机系统中，系统的参数不可能保持不变。动态信道的衰减会使接收信号的功率发生变化，与此同时，系统中的其他干扰也可能发生变化，因此接收信号的信噪比会在一定范围内变化，所以门限的设置十分重要。门限的设置方法很多，文献[10]提出了一种自适应门限的设置方法，即

$$V_{th} = \sqrt{-2L \ln(P_{fa})} \quad (11)$$

式中： L 为扩频码的长度； P_{fa} 为虚警概率。

图 7 为采用自适应门限后，平均旁瓣虚警概率随载波频偏的变化规律。可以看出当采用了自适应门限后，在存在载波频偏的情况下，平均旁瓣虚警概率大大降低，可以得出，在噪声分量较大的情况下，如果采用固定门限，即根据噪声分布来确定捕获门限，虽然计算简单，

表 1 自相关旁瓣峰值和均值随载波频偏变化规律
Table1 Mean value and peak value of auto-correlation side lobe of different length change with carrier frequency offset

length	peak	mean	ratio/dB
255	32.333 9	16.000 0	-17.9
511	46.553 4	22.627 4	-20.8
1 023	67.782 6	32.000 0	-23.6
2 047	94.060 7	45.254 8	-26.8

表 2 仿真参数设置

Table 2 Emulation parameters

polynomial	initial state	probability of false alarm	S/N_0
$X^{10}+X^3+1$	[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]	10^{-3}	-14 dB

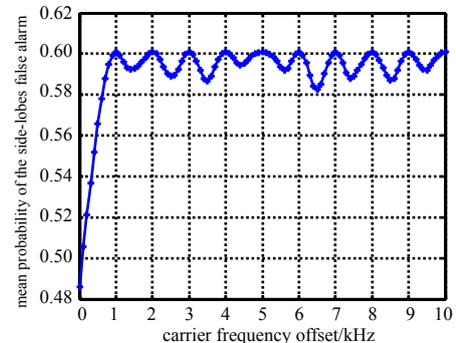


Fig.6 Mean probability of the side-lobes false alarm change with carrier frequency offset when adopting regular threshold
图 6 采用固定门限下平均旁瓣虚警概率随载波频偏变化情况

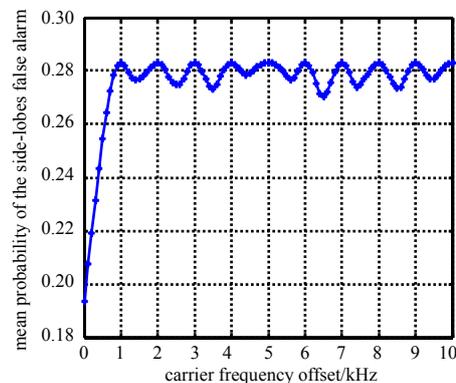


Fig.7 Mean probability of the side-lobes false alarm change with carrier frequency offset when adopting self-adaptive threshold
图 7 采用自适应门限下平均旁瓣虚警概率随载波频偏变化情况

只需对采集到得数据中的噪声计算 1 次,但是带来了较大的虚警概率;而采用自适应门限后,虽然硬件实现程度加大,但是虚警概率大大降低,所以在实际情况中,基于高斯分布的固定门限不是最佳选择。

3 结论

在实际的扩频接收机中,受发射机和接收机之间的相对运动和时钟频率不稳定等动态因素的影响,信号的所有频率分量都发生了改变,包括载波频率和码片速率,进而导致在接收端进行相关接收时,相关函数发生改变:一方面,即使在接收伪码和本地伪码的相位完全对齐的情况下,随着载波频偏的增大,相关值会迅速下降,每当载波频差增大一定值时,幅度值便会出现 1 个零值,造成不能检测到卫星信号;另一方面,自相关旁瓣也随着载波频率的变化发生较大改变,在载波频差为零时, m 序列旁瓣没有变化,而在有载波频差的情况下,自相关旁瓣发生了较大改变,进而导致捕获时的旁瓣虚警概率发生改变。本文将雷达接收机中为保持恒定虚警概率而采用的自适应门限应用到伪随机码捕获中,可以看出采用自适应门限与采用固定门限相比,自相关旁瓣引起的虚警概率大大降低,改善了伪码捕获性能。在 RDSS 系统中,由卫星以直接转发方式提供出站、入站链路的频率转换,若卫星上应答机的本地频率(晶振)稳定性在 1×10^{-6} 量级,在 S 频率上的附加频偏为 ± 3.5 kHz;同样,用户发射的 L 频率信号,经 L/C 转发器后的频偏为 ± 2.4 kHz,这些频偏恰恰位于虚警概率随载波频偏变化最大的范围内,因此,研究自相关旁瓣随载波频偏变化对 RDSS 系统中扩频码的设计有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 戚云军,田红心,毕轶慧. CDMA 通信中多址序列相关性的研究及仿真[J]. 信息技术, 2008(2):73-77. (QI Yunjun,TIAN Hongxin,BI Yihui. Research and system simulation on the correlation of spread spectrum sequence in CDMA communication[J]. Information Technology, 2008(2):73-77.)
- [2] 贾怀义,毕红军,宫剑. 基于 m 序列扩频码的研究[J]. 北方交通大学学报, 2001,25(3):85-88. (JIA Huaiyi,BI Hongjun,GONG jian. Study of Spreading Codes Based on m Sequence[J]. Journal of northern jiaotong university, 2001,25(3):85-88.
- [3] Esmael H Dinan,Bijan Jabbari. Spreading Codes for Direct Sequence CDMA and Wide Band CDMA Cellular Networks[J]. IEEE Communication Magazine, 1998,36(9):48-53.
- [4] Loyd R Welch. Lower bounds on the minimum correlation of signals[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, IT-20(3):397-399.
- [5] Guang Gong. New designs for signal sets with low cross correlation, balance property and large linear span:Gf(p) case[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002,48(11):2847-2867.
- [6] Gong G,Golomb S W. Binary sequences with two-level autocorrelation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(2):692-693.
- [7] Helleseth T,Kumar P V. Sequences with low correlation[C]// Handbook of Coding Theory. Amsterdam,The Netherlands:[s.n.], 1998,II:1765-1853.
- [8] 谢伟,蔡德林. GPS 中伪随机码的捕获技术研究[D]. 合肥:安徽大学, 2007. (XIE Wei,CAI Delin. Research on Technique of Acquiring Pseudo-random Noise Codes in GPS[D]. Hehei:Anhui university, 2007.)
- [9] 张博,杨春,解楠,等. GPS C/A 码平均相关捕获算法的 FPGA 设计[J]. 信息与电子工程, 2009,7(1):1-8. (ZHANG Bo, YANG Chun,XIE Nan,et al. FPGA Design of Averaging Correlation for GPS C/A Code Acquisition[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):1-8.)
- [10] 刘剑锋,霍效新. 一种基于 RS 码序列的软扩频系统及其 Simulink 仿真[J]. 信息与电子工程, 2007,5(6):441-448. (LIU Jianfeng,HUO Xiaoxin. A Novel Tamed Spread Spectrum System Based on RS Code and Its Simulation by Simulink[J]. Information and Electronic Engineering, 2007,5(6):441-448.)

作者简介:

申光(1986-),男,山西省长治市人,在读硕士研究生,主要研究领域为卫星导航.email:shenguang321@126.com.

李仰志(1984-),男,福建省龙岩市人,在读博士研究生,主要研究领域为卫星导航.

谷文飞(1983-),男,安徽省阜阳市人,在读硕士研究生,主要研究领域为卫星导航.