

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.011

引用格式:曾富华.一种应用于深空通信的微弱信号捕获算法[J].电讯技术,2014,54(8):1097-1101.[ZENG Fu-hua. A Weak Signal Acquisition Method for Deep Space Communication[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(8):1097-1101.]

# 一种应用于深空通信的微弱信号捕获算法\*

曾富华\*\*

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

**摘要:**针对低信噪比、高动态条件下深空测控通信信号捕获概率低以及复杂度较高的问题,首先分析了深空测控通信信号捕获的难点以及信号循环平稳特性,然后在此基础上提出了一种基于循环相关的新算法。计算机仿真结果证明新算法捕获门限达24 dBHz,适应频率动态达800 Hz/s;新算法较传统的捕获算法,在相同门限条件下的频率动态适应范围提升了约两个数量级。该方法已被应用于我国第一个深空测控站的建设,工作性能稳定可靠,有效地解决了低信噪比下深空站抑制载波信号的捕获问题。

**关键词:**深空通信;测控;微弱信号捕获;抑制载波信号;循环相关;频率估计

**中图分类号:**TN911 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1097-05

## A Weak Signal Acquisition Method for Deep Space Communication

ZENG Fu-hua

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** The characteristics of low signal-to-noise ratio (SNR) and high dynamic in deep space communications would result in high complexity and low acquisition probability in telemetry tracking and command (TT&C) signals acquisition process. Firstly, the difficulty of signal acquisition and cyclo-stationarity of TT&C signals are analyzed. And then, a new algorithm based on cyclic correlation detection is proposed. The simulation results show that acquisition threshold and dynamic range of the proposed algorithm reach 24 dBHz and 800 Hz/s, respectively. Compared with the traditional squaring method, the new algorithm can increase the frequency dynamic range up to two orders of magnitude at the same acquisition threshold. This method has been used in the development of China's first deep space TT&C station. Engineering practice results verify that the algorithm performance is stable and reliable, and it is a good solution to low SNR suppressed-carrier TT&C signal acquisition problem.

**Key words:** deep space communication; TT&C; weak signal acquisition; suppression carrier signal; cyclic correlation; frequency estimation

### 1 引言

深空测控通信中接收信号的典型特点是低信噪比和大动态,在这种较恶劣的环境下信号捕获是深空测控通信中一个重要的研究课题<sup>[1]</sup>。随着深空探测任务中下行数传速率的不断提高,抑制载波由于有较高的功率利用率而逐渐广泛地流行起来<sup>[2]</sup>。

可是与残留载波信号体制不同之处在于:抑制载波体制信号载波功率被完全分配到调制包络中,因此无法借鉴残留载波信号的捕获方法,这就给微弱信号捕获处理带来了新的挑战。传统的抑制载波信号捕获主要是通过平方或四次方运算来恢复载波,这种方法主要适用于高信噪比,而在低信噪比情况下

\* 收稿日期:2014-03-10;修回日期:2014-07-11 Received date:2014-03-10;Revised date:2014-07-11

\*\* 通讯作者:fh\_zeng@163.com Corresponding author:fh\_zeng@163.com

将面临巨大的信噪比恶化。

循环相关处理技术是利用 BPSK、QPSK 等调制信号所具有的循环相关特性发展起来的处理方法<sup>[3-4]</sup>,近年来被广泛应用于侦察系统中调制符号速率的估计以及时延估计等领域<sup>[5-7]</sup>,本文在循环相关处理技术的基础上详细地分析了深空测控通信信号的循环平稳性,并提出了一种适用于低信噪比条件下抑制载波信号捕获的新方法。计算机仿真实验表明,该方法比起传统方法具有更好的性能。

## 2 深空站微弱信号捕获方法分析

### 2.1 低信噪比下信号的捕获特点

深空测控通信中,信号捕获面临的首要问题是低信噪比下的捕获。如卡西尼任务中,信号符号信噪比( $E_s/N_0$ )低达 $-7.4$  dB<sup>[8]</sup>,这是由于遥远距离(数亿甚至数十亿公里)带来的巨大路径衰落造成的。

传统的抑制载波信号频率捕获算法流程如图 1 所示。

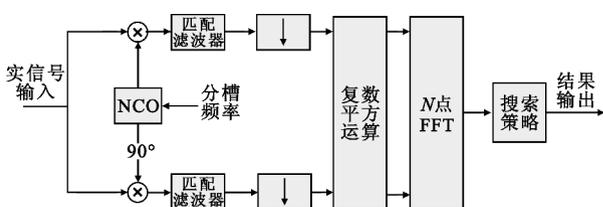


图 1 BPSK 信号基于平方恢复频率估计方法  
Fig. 1 The BPSK frequency estimation method based on square operation

平方处理带来的信噪比损失( $L_{\text{SNR}_L}$ )可表达为输入信噪比表达式:

$$L_{\text{SNR}_L} = \frac{R_{\text{SNR}_o}}{R_{\text{SNR}_i}} = \frac{R_{\text{SNR}_i}}{4R_{\text{SNR}_i} + 2} \quad (1)$$

式中, $L_{\text{SNR}_o}$ 为输出信噪比, $L_{\text{SNR}_i}$ 为输入信噪比。

上述算法对于 QPSK 体制同样适用,但需经过四次方处理,即相当于两次平方运算。为了尽可能提高平方前信噪比,算法的预处理步骤一般采用匹配滤波方式。以卡西尼任务条件为例进行分析:符号信噪比为 $-7.4$  dB时经匹配滤波处理得到最优信噪比输出,在此情况下 BPSK 体制平方损耗为 $12$  dB,QPSK 体制平方损耗达 $27$  dB。为了补偿如此巨大的平方损失,传统的方法一般是采用降低采样率和提高频率分辨率的手段提高处理增益,但是由于克服极低信噪比与多普勒频率变化的相互影响,效果并不理想。以 $20$  kb/s速率 QPSK 信号为例,为

了从负的信噪比提升至能够稳定判决的信噪比和补偿平方处理带来的增益损失,需要几秒的采样时间。但是因为实际应用中频率分辨率必须达到一定的精度,这种情况下即使 $1$  Hz/s的频率变化也仍然会导致信号功率分散,无法有效提高信噪比条件。

深空信号捕获面临的另一难点是大动态条件,包括大的多普勒频移和多普勒变化率<sup>[7]</sup>。主要原因有两方面:一方面是对深空探测中科学探测数据率要求的不断提高,使用频段的提高意味着目标相同运动动态下带来的多普勒频率范围更大;另一方面,深空探测器为摆脱地球引力需达到第二宇宙速度,由此带来很大的多普勒频率动态。假设信号频率为固定频率,为了确保算法处理有效增益,一般要求 $f' \leq \Delta f/T$ ( $f'$ 为频率变化率, $\Delta f$ 为频率分辨率, $T$ 为采样时间),如果采样时间内多普勒频率变化率超过捕获频率分辨率,则估计算法的实际增益将下降。因此,如何克服低信噪比与高多普勒频率变化的相互影响是深空信号捕获需要解决的问题。

### 2.2 抑制载波信号的循环平稳特征

深空测控站采用抛物面天线接收目标飞行器的信号,会受到宇宙背景噪声的干扰。接收信号数学表达式为

$$x(t) = s(t) + n(t) = \frac{1}{2} \sqrt{P} \sin(\omega_i t + \sum_{i=1}^{\infty} g(t - iT_s) d_i \Delta \theta + \varphi_0) + n(t) \quad (2)$$

其中, $P$ 为信号功率, $\omega_i$ 为载波角频率, $T_s$ 为调制符号周期, $d_i$ 为调制数据。当调制方式为 BPSK 时 $d_i \in \{0, 1\}$ ,当调制方式为 QPSK 时 $d_i \in \{0, 1, 2, 3\}$ ;  $\Delta \theta$ 为相移间隔,对于 BPSK 为 $\pi$ ,对于 QPSK 为 $\pi/2$ ;  $\varphi_0$ 为初始相位; $n(t)$ 为接收噪声,测控接收系统采用带通滤波,因此 $n(t)$ 为带限白噪声; $g(t)$ 为脉冲成形函数,深空任务中通常采用矩形窗函数:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T_s \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

经分析,BPSK、QPSK 二阶自相关函数不平稳,但具有周期循环平稳的特性<sup>[9]</sup>。循环平稳是指信号的某统计特性呈周期或者多周期平稳变化,一般而言信号的这种周期平稳特性分布在离散的周期上,功率较为集中,有较强的分辨率度。BPSK、QPSK 信号具有二阶循环平稳特性<sup>[9]</sup>,可以采用循环自相关函数表征这一特性,如下式所示:

$$R_x^{\alpha}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi\alpha t} dt \quad (4)$$

对循环自相关函数求傅里叶变换可得到循环谱密度函数,经推导,BPSK 循环谱密度函数表达式为

$$S_x^\alpha(f) = \begin{cases} \frac{1}{4T_s} [Q(f+f_c+\alpha/2)Q^*(f+f_c-\alpha/2) + Q(f-f_c+\alpha/2)Q^*(f-f_c-\alpha/2)]e^{-2\pi\alpha_0}, & \alpha = \frac{k}{T_s} \\ \frac{1}{4T} Q(f+f_c+\alpha/2)Q^*(f-f_c-\alpha/2)e^{-j[2\pi(\alpha\pm 2f_c)t_0\pm 2\phi_0]}, & \alpha = \mp 2f_c + \frac{k}{T_s} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  为循环频率,  $f_c$  为载波频率,  $Q(f) = \frac{\sin(\pi f T_s)}{\pi f}$ 。QPSK 循环谱密度函数与上式类似。

循环谱密度函数与谱域和循环频域相关,BPSK 与 QPSK 的循环谱功率分散在离散的  $\alpha = k/T_s$  的循环频点,第一循环频点  $\alpha = 1/T_s$  切面具有最大功率分配。带限白噪声不具有循环平稳特性,其循环谱功率分散到整个循环频带内。图 2 为 BPSK 与 QPSK 调制信号在循环频率  $\alpha = 1/T_s$  时的谱域切面,可以看出在该谱域切面功率集中在载波中心频率附近,利用这个特征可以在  $\alpha = 1/T_s$  循环频点对应的谱域内实现载波频率捕获。

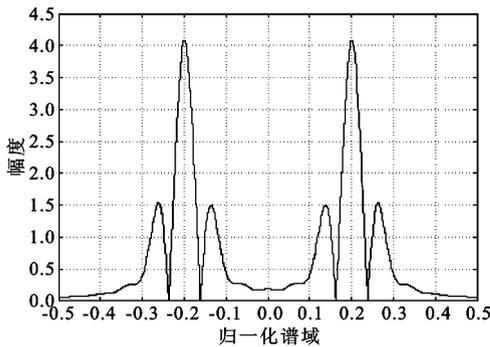


图 2  $\alpha = 1/T_s$  对应的谱域幅度  
Fig. 2 Function of power spectra with  $\alpha = 1/T_s$ .

### 3 基于循环相关的信号捕获算法设计

循环谱密度函数计算分为时域法和频域法,时域法可利用自相关函数统计特性周期重复的特征在时域上取样本点计算自相关函数,避免多次实验取样本点;频域法结构较为复杂,需要使用较大的样本集数据用于计算密度函数,采样周期较长。循环谱可等效为谱相关运算<sup>[9]</sup>,为了简化分析过程,假设采样时钟为符号速率整数倍  $f_s = \lambda R_s$ ,  $\lambda$  为过采样因子,其中  $f_s$  为采样时钟,  $R_s$  为符号速率,  $\lambda$  为整数。首先考察基带信号谱相关情况,实现算法时采用  $N$  点 FFT 计算信号频谱,然后进行谱相关运算,第  $k$  点

FFT 运算结果可表示为

$$f_c(k) = \sum_{n=1}^N C_n \exp(-j(n-1)\frac{2(k-1)\pi}{N}) \quad (6)$$

通信系统中,为了达到较高的信息熵,不同调制符号间统计独立,  $C_n$  与  $C_m$  只在同一个符号采样内具有相关性,因此上式只需要考察同一符号内相关情况,不同符号采样相关可视作不相关噪声在累积运算中滤除。相关谱公式可简化为

$$\text{cor}(k+1, k + \frac{N}{\lambda} + 1) =$$

$$\sum_{\mu=0}^{M-1} \left( \sum_{n=\mu\lambda+1}^{(\mu+1)\lambda} \sum_{m=\mu\lambda+1}^{(\mu+1)\lambda} \exp(-j\frac{2\pi}{N}(k(n-1) - (k + \frac{N}{\lambda})(m-1))) \right) = \sum_{\mu=0}^{M-1} \left( \sum_{n=0}^{\lambda-1} \sum_{m=0}^{\lambda-1} \exp(-j\frac{2\pi}{N}(kn - km - \frac{N}{\lambda}m)) \right) \quad (7)$$

其中,  $M$  为  $N$  点样本点含有的码片数目。相关谱相位为

$$\text{angle}(\text{cor}(k+1, k + \frac{N}{\lambda} + 1)) = -\frac{\pi}{\lambda} \quad (8)$$

因此,可以得出结论,间隔为  $R_s$  的两个频点相关相位为恒定相位,与过采样因子成反比关系,与两个频点绝对位置无关。

考虑到噪声干扰下主包络内频谱相关得到的相位较稳定,且集中了信号主要功率,主包络外频谱相关得到的相位更容易受到噪声影响。

算法处理框图如图 3 所示:首先接收中频信号,通过正交下变频得到基带复信号,然后通过 ID 滤波处理和符号整数倍重采样后得到  $f_s = \lambda R_s$  采样率数据,重采样数据经过 FFT 运算得到信号频谱数据,频谱数据经过谱相关算法转换为  $\alpha = 1/T_s$  域的相关谱数据,谱相关处理过程如图 4 所示,利用公式(8)得到的频谱在相距  $R_s$  的频率距离具有相关性这一特性进行共轭相乘运算,然后对共轭运算结果进行滑窗相干积分。由于 BPSK 与 QPSK 信号 90% 功率集中在主瓣内,选取信号主瓣宽度为滑窗宽度,积分区间滑动进行频率搜索,当积分区间滑动到与信号主瓣完全重合时具有最大功率,根据相关谱平滑结果可以得出信号主瓣位置从而实现载波估计。

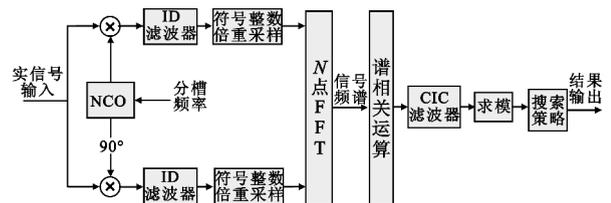


图 3 捕获算法处理框图  
Fig. 3 Scheme of the capture algorithm

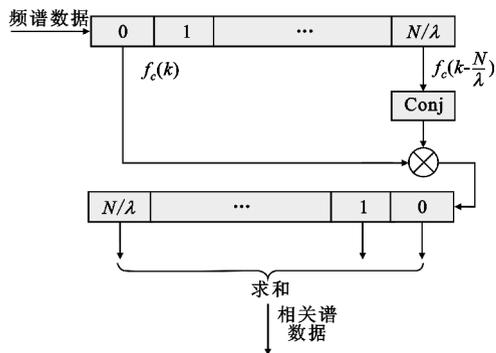


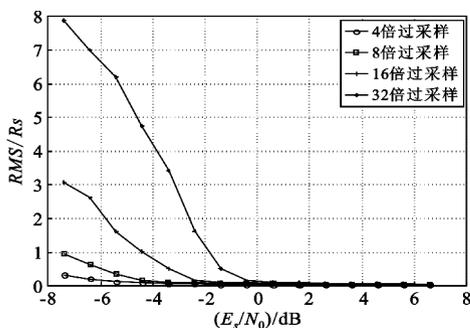
图 4 谱相关算法处理结构

Fig. 4 Structure of spectral correlation algorithm

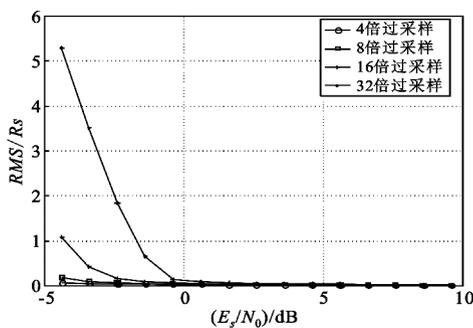
### 4 算法验证和分析

#### 4.1 算法的仿真验证

基于循环相关的捕获算法性能受 FFT 分辨率与符号信噪比的影响,FFT 分辨率由过采样因子与 FFT 点数决定。本次仿真采用 16 384 点 FFT,过采样因子选 4 倍、8 倍、16 倍、32 倍 4 种情况。仿真分 BPSK 和 QPSK 两种信号体制进行,主要研究在不同过采样因子情况下估计频率误差、捕获概率与符号信噪比的关系,频率估计误差按照调制符号速率进行了归一化处理。考虑目前深空任务中采用的最低信道编码码率为 1/6,仿真的最低符号信噪比设为 -7.4 dB,仿真范围覆盖各种常用信道编码的理论门限信噪比。仿真结果如图 5 和图 6 所示。



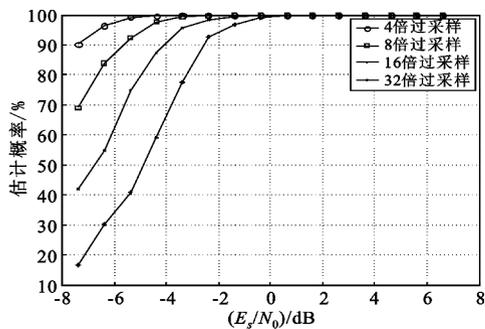
(a) BPSK 信号载波频率估计 RMS



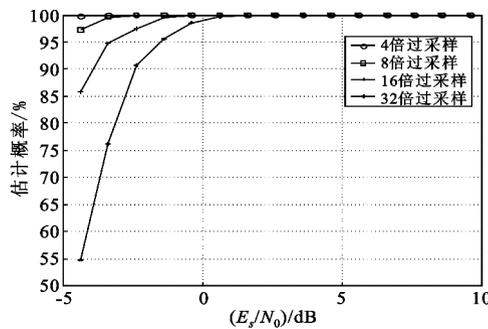
(b) QPSK 信号载波频率估计 RMS

图 5 BPSK 和 QPSK 信号的载波频率估计 RMS

Fig. 5 Estimation RMS of BPSK and QPSK carrier frequency



(a) BPSK 信号频率估计概率



(b) QPSK 信号频率估计概率

图 6 BPSK 和 QPSK 信号的频率估计概率

Fig. 6 Estimation probability of BPSK and QPSK carrier frequency

BPSK 信号捕获时采用 4 倍过采样在  $E_s/N_0$  为 -7.4 dB 时估计概率达 90%, 估计频率 RMS 为  $0.3R_s$ , 只考虑正确估计频率 RMS 则在  $0.1R_s$  以内。QPSK 信号符号信噪比更高,采用 4 倍符号过采样

因子在门限信噪比估计概率达 98%, 估计频率 RMS 为  $0.07R_s$ 。

以 100 ksymbol/s 速率 QPSK 调制为例进行了仿真分析,结论如表 1 所示。

表 1 新方法与传统方法比较

Table 1 The comparison between new method and traditional method

方法	平方损失/dB	重采样频率/ (ksymbol · s <sup>-1</sup> )	FFT 点数	频率分辨率/Hz	适应频率变化率/ (Hz · s <sup>-1</sup> )	一次 FFT 捕获 范围/kHz
循环相关法	无	400	16 384	24.0	576.0	100
平方法	27	36	16 384	2.2	4.8	9

## 4.2 工程应用测试结果

本文提出的算法已经应用于我国建设的第一个深空测控通信站,并在执行“嫦娥 3 号”等任务中成功地发挥了作用,在实际工程应用中的具体测试性能如表 2 所示。

表 2 数字接收机性能

Table 2 The performance of the digital receiver

参数	性能指标
速率范围/(Mb · s <sup>-1</sup> )	10 <sup>-4</sup> ~ 20
捕获门限/dBHz	24
输入信号动态/dB	60
信号体制	BPSK/QPSK/OQPSK
最大频率变化率/(Hz · s <sup>-1</sup> )	800
频率估计范围/MHz	±2.4

新算法可实现高动态目标的快速频率估计,适应多普勒变化率最大可达 800 Hz/s,实现了在飞行器落月等高动态任务段的目标频率捕获。

## 5 结束语

深空探测是 21 世纪空间探测和航天活动的重点领域,深空通信中接收信号极其微弱,信号捕获对于深空通信具有十分重要的意义。本文提出了一种广泛适用于深空通信微弱信号捕获方法,对算法的仿真和工程实践的测试结果都表明:新方法有效避免了平方损耗的影响,在  $E_s/N_0$  为 -7.4 dB 这一门限信噪比下实现了 90% 的捕获概率,能适应更高的目标动态,性能比传统的捕获方法更加优越。该方法今后还将进一步优化,为解决低信噪比下信号捕获的问题提供更有效的手段。

## 参考文献:

- [1] 刘嘉兴. 向技术极限挑战——深空测控通信的目标[J]. 电讯技术, 2008, 48(4): 1-7.  
LIU Jia-xing. Challenging the Technology Limit: the Goal of Deep Space TTC & Data Transmission[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(4): 1-7. (in Chinese)
- [2] 刘嘉兴. 走向深空——测控通信的发展方向[J]. 电讯技术, 2006, 46(2): 1-8.  
LIU Jia-xing. Forward to the Deep Space: Developing Trend of TTC&DT Technology [J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(2): 1-8. (in Chinese)
- [3] Tayaranian A, Hosseini S M, Amindavar H. Estimation

of spectral correlation function based on evolutionary spectral Information[C]//Proceedings of 2011 8th International Conference on Communications and Signal Processing. Beijing:IEEE, 2011: 1-4.

- [4] Liu Ning, Liu Bing. Investigation on Signal Modulation Recognition in the Low SNR[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha:IEEE, 2010: 528-531.
- [5] 崔伟亮,江桦,李剑强,等. 改进的循环谱估计快速算法与性能分析[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1594-1599.  
CUI Wei-liang, JIANG Hua, LI Jian-qiang, et al. Improved Fast Cyclic Spectral Estimation Algorithm and Performance Analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(7): 1594-1599. (in Chinese)
- [6] 谢然,张效义,田鹏武. 一种基于循环谱的 MPSK 信号符号速率估计方法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6): 2294-2296.  
XIE Ran, ZHANG Xiao-yi, TIAN Peng-wu. Symbol Rate Estimation Method of MPSK Signals Based on Cyclic Spectrum [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(6): 2294-2296. (in Chinese)
- [7] 宋青平,刘荣科. 一种用于深空高动态微弱信号的频率估计算法[J]. 宇航学报, 2013, 34(11): 1496-1501.  
SONG Qing-ping, LIU Rong-ke. A Frequency Estimation Algorithm for High Dynamic and Weak Signal in Deep Space[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(11): 1496-1501. (in Chinese)
- [8] Andrews K S, Dolinar S, Jones C R. The Development of Turbo and LDPC Code for Deep-Space Applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(11): 2142-2150.
- [9] 郑鹏,王泽众,刘锋. 循环谱时域平滑循环周期图法估计性能分析[J]. 计算机与数字工程, 2011, 11(9): 30-34.  
ZHENG Peng, WANG Ze-zong, LIU Feng. Performance Analysis for Cyclic Spectrum by Temporally Smoothed Cyclic Periodogram [J]. Computer & Digital Engineering, 2011, 11(9): 30-34. (in Chinese)

## 作者简介:



曾富华(1983—),男,重庆忠县人,2008年获硕士学位,现为工程师,主要从事测控通信、深空通信和抗干扰通信等方面的研究。

ZENG Fu-hua was born in Zhongxian, Chongqing, in 1983. He received the M. S. degree in 2008. He is now an engineer. His research concerns TT&C communication, deep space communication and anti-interference communication.

Email: fh\_zeng@163.com