

BPSK - PM 深空通信信号载波捕获方案

王晓东, 甘 森, 王小锭, 蒋 伟, 罗 武
(北京大学信息科学技术学院, 北京 100871)

摘要 BPSK - PM 是一种以 BPSK 为副载波调制方式, 而主载波使用 PM 调制方式的调制体制。这种体制使调制后的遥测遥控数据频谱与载波频谱分离, 残留载波可用于测角测速和跟踪, 因而常用于深空通信。首先介绍 BPSK - PM 调制体制, 分析了其调制信号的频谱特性, 然后根据应用场景要求提出了中频数字接收和载波捕获方案, 其中载波捕获方案分为基于 FFT 的频率搜索和基于全数字锁频环技术的频率跟踪 2 个部分, 并对这 2 部分做了详细的分析。最后给出了该载波捕获方案的实际应用案例, 该载波捕获方案的有效性已在实际应用中得到初步验证。

关键词 载波捕获; BPSK - PM; 频率搜索; 频率跟踪

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.01.014

中图分类号 TN927+.2 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)01-0064-04

深空探测是人类进行宇宙空间资源开发与利用的重要手段, 具有重要的科学和经济意义。进入 21 世纪, 世界各国纷纷推出新的深空探测发展战略和规划, 深空通信作为深空探测的重要组成部分得到了充分重视和发展。在我国, 随着航天事业的发展, 火星探测计划也已经提上日程。

本文研究深空通信中常用的 BPSK - PM 调制信号的载波捕获方案。首先介绍 BPSK - PM 调制体制, 然后根据应用需求给出 BPSK - PM 中频数字接收机的载波捕获方案, 并对其功能模块做了详细的分析。

1 BPSK - PM 调制信号

BPSK - PM 是常用的深空通信体制, BPSK - PM 信号的副载波采用 BPSK 调制方式, 主载波采用 PM 调制方式。考虑到经深空通信信道传输时收发两端的本振频率差和多普勒效应等因素, 接收机射频前端下变频后输出的中频信号(省略信道加性噪声), 可表示为:

$$S_{PM}(t) = A \cos \left[2\pi \left(f_c + f_{\text{offset}} + \frac{1}{2} \gamma_{\text{ramp}} t \right) t + K_{PM} A_m \cos(2\pi f_m t + \phi_s) + \phi_p \right] \quad (1)$$

式中: A 表示信号幅度; f_c 为主载波中心频率; K_{PM} 表示调相指数; A_m 表示调制在副载波上的 BPSK 信号, 取值为 1 和 -1; f_m 为副载波频率, 取值远小于主载波信号中心频率值 f_c ; f_{offset} 为主载波频偏; γ_{ramp} 为频率斜升, 即单位时间内频率的变化量; ϕ_p 和 ϕ_s 分别为 PM 调制的初相位和副载波的初相位^[1-2]。

BPSK - PM 信号的功率谱见图 1。从功率谱图上看, BPSK - PM 信号由 3 部分组成: 中心频率上的主载波单频信号, 该部分信号占总功率的比重与 K_{PM} 有关; 主载波左右各有一个副载波频率的 BPSK 信号, 一般应用中选择调相系数 K_{PM} , 使得主载波和 BPSK 副载波调制信号可占总功率的绝大部分; 其余各次谐波, 占总功率的比重为小量, 可以忽略。

通过某种方法可以从 $S_{PM}(t)$ 中去除主载波频率 $f_c + f_{\text{offset}} + \frac{1}{2} \gamma_{\text{ramp}} t$ 和相位 ϕ_p 的影响, 使得其中真正包含

* 收稿日期: 2010 - 10 - 12

基金项目: 国防预研基金资助项目(9140A22031010XXXX)

作者简介: 王晓东(1984 -), 男, 黑龙江鹤岗人, 硕士生, 主要从事卫星与无线通信研究。

E-mail: wangxdpku@gmail.com

调制信息的副载波调制信号集中在正交支路上。

结合 BPSK - PM 调制信号时域和频域特点可知, 中频数字接收的主要功能一是实现对中频信号的主载波频率捕获, 完成 PM 解调, 二是实现副载波同步及 BPSK 解调。其中, 主载波捕获作为数字接收机的前级模块, 其捕获性能直接影响后续模块的工作, 是完成后续 PM 解调及副载波同步解调的前提。文中所研究的 BPSK - PM 调制信号的载波捕获实际就是对其主载波进行捕获。

2 主载波捕获

主载波捕获需在相对频偏很大且可能存在较大的频率斜升的条件下进行。因此, 本文设计的主载波捕获方案利用频率搜索和频率跟踪 2 个单元完成。

如图 2 所示, 中频模拟信号经 ADC 采样量化输入到数字接收解调设备。在数字解调设备中, BPSK - PM 数字输入信号首先进行数字下变频操作, 将主载波下变频到零频附近。再经 LPF 滤波器滤除倍频分量, 得到低通信号 $S_{PM}^n(t)$; 此时主载波存在一个频偏 f_{offset} 和频率变化率(频率斜升) γ_{ramp} 。

主载波搜索单元在信号中心频率周围的一定范围内进行搜索, 判断是否存在主载波信号, 如有则进行初始捕获, 得到主载波初始频偏并置入下变频 NCO 予以修正。然后主载波频率跟踪单元对残留频偏和频率斜升予以补偿, 稳定工作后将消除主载波信号的频差和频率斜升, 实现主载波捕获。

主载波捕获后, 就可以根据事先约定的位置找到副载波信号。提取出的副载波信号交由后续副载波模块进行判决解调^[3]。

2.1 频率搜索单元

主载波频率搜索单元采用 FFT 运算进行频率并行搜索。频率搜索结构见图 3。这种算法适用于搜索较大的频率范围, 满足主载波捕获较大频偏的要求^[4-6]。

在数字接收机中, 中频数字信号经过数字下变频后, 将主载波下变频到零频附近。再经 LPF 滤波器滤波后, 滤除倍频分量, 得到低通信号(考虑信道加性噪声), 如下式:

$$S_{PM}^n(nT_s) = \frac{A}{2} \exp \left[j \left(2\pi \left(f_{offset} + \frac{1}{2} f_{ramp} nT_s \right) nT_s + K_{PM} A_m \cos(2\pi f_m nT_s + \phi_s) + \phi_p \right) \right] + (n_c(nT_s) + j n_s(nT_s)) \quad (2)$$

式中: T_s 为采样周期; $n_c(nT_s)$ 、 $n_s(nT_s)$ 是相互独立的高斯随机变量。

输入到 FFT 频率搜索单元, 对其做 N 点离散傅里叶变换为:

$$S(k) = S_I(k) + j S_Q(k) = \sum_{n=0}^{N-1} S_{PM}^n(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (3)$$

DFT 变换后可以从频域值中选取模方值最大的作为同步检测量, 同步检测量可以表示为:

$$Z = S_I^2 + S_Q^2 \quad (4)$$

由于低通信号 $S_{PM}^n(nT_s)$ 中 $n_c(nT_s)$ 、 $n_s(nT_s)$ 为独立高斯随机过程, 满足:

$$E[n_c(nT_s)] = E[n_s(nT_s)] = 0 \quad (5) \quad \text{var}[n_c(nT_s)] = \text{var}[n_s(nT_s)] = N_0/2 \quad (6)$$

因此, FFT 频率搜索得到的 S_I, S_Q 满足 $\text{var}(S_I) = \text{var}(S_Q) = \sigma^2 = N(N_0/2)$, 其中, N 为 FFT 运算后相对采样速率的累加长度。

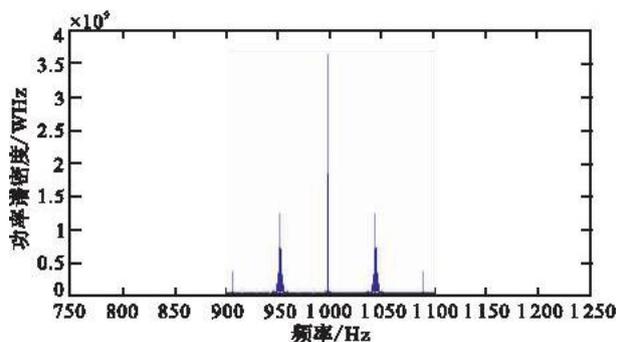


图 1 BPSK - PM 信号功率谱仿真图

Fig. 1 Power spectrum simulation diagram of BPSK - PM signal

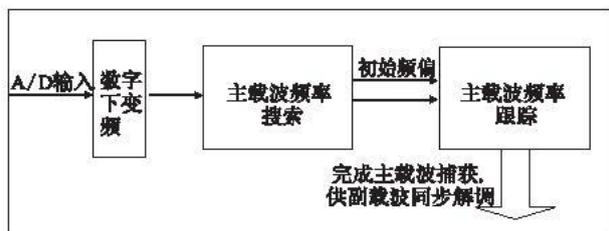


图 2 主载波捕获模块功能图

Fig. 2 Function diagram of main carrier acquisition

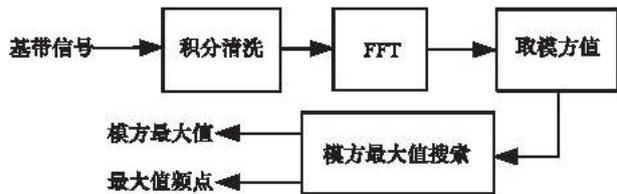


图 3 频率搜索结构图

Fig. 3 Structure diagram of frequency searching

在无信号时,检测量 Z 满足中心卡方分布:

$$p_0(z) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left\{-\frac{z}{2\sigma^2}\right\} \quad (7)$$

在 N 点中取最大值,则最大值满足分布:

$$p'_0(z) = \frac{\partial}{\partial z} [P_0^N(z)] = NP_0(z)^{N-1} p_0(z) \quad (8)$$

式中: $P_0(z)$ 为中心卡方分布的分布函数; $p_0(z)$ 为中心卡方分布的概率密度函数。

而在有信号时,检测量 Z 满足非中心卡方分布:

$$p_1(z) = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left\{-\frac{z + N^2 E'_c}{2\sigma^2}\right\} \cdot I_0\left(\frac{2\sqrt{N^2 E'_c z}}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

式中 $E'_c = A^2/\sigma^2$ 。在 N 点中取最大值,则最大值满足分布:

$$p'_1(z) = \frac{\partial}{\partial z} [P_0^{N-1}(z) P_1(z)] = (N-1) P_0^{N-2}(z) p_0(z) P_1(z) + P_0^{N-1}(z) p_1(z) \quad (10)$$

式中: $P_1(z)$ 为非中心卡方分布的分布函数; $p_1(z)$ 为非中心卡方分布的概率密度函数。

所以,当门限设置合理时,虚警概率和漏检概率均趋近于零,见图4,FFT频率搜索可实现主载波频率搜索的性能要求。

2.2 频率跟踪单元

由于残余频差以及接收信号中频率变化率 f_{ramp} 的存在,实现主载波捕获还需主载波跟踪单元来消除此部分的影响,进而将主载波信号锁定在基带零频率上,实现主载波的捕获。综合考虑性能及复杂度因素,采用全数字频率跟踪环路,以跟踪频率搜索后的频差和频率斜升,结构见图5^[7]。其中, r_k 为零中频基带信号, r'_k 是本地载波信号。鉴频器前的低通滤波器用于提高鉴频器的输入信噪比; FD 为数字鉴频器; $F(z)$ 为环路滤波器,具有低通特性,其输出为当前环路的参考频率; NCO 为数控振荡器,由环路滤波器输出的频率控制字,控制其输出一定频率的载波信号; Conj 代表取复共轭。

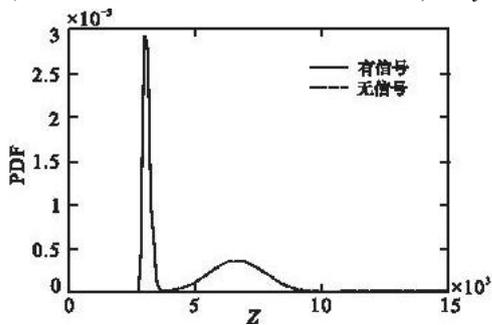


图4 检测量的概率分布图

Fig.4 Probability distribution diagram of detection volume

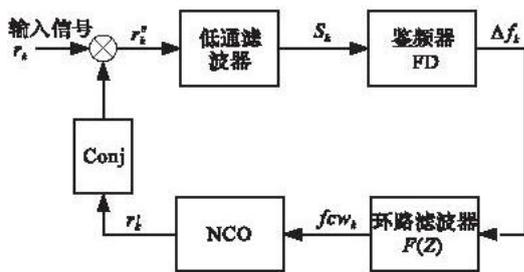


图5 数字频率跟踪单元

Fig.5 Digital frequency tracking unit

在实际应用中,低通滤波器可采用 IIR 滤波器,数字鉴频器使用反正切鉴频器,环路使用 2 阶环路滤波器,进而得到 2 阶环路。该环路能捕获和跟踪残余频差以及频率斜升,具有良好的同步性能^[8]。

环路工作原理为,输入零中频信号与环路输出的本地载波信号进行频差计算,产生一个跟两者频差成比例的数字序列 r''_k ,滤波得到 S_k 。经过鉴频器之后得到频差 Δf_k ,再由数字环路滤波器加以平滑得到频率控制信号 fcw_k 去控制数控振荡器(NCO)输出的本地载波信号 r'_k 的振荡频率。经过反馈调节控制,环路驱使输出的本地载波信号频率逼近输入基带信号的频率,最终使环路锁定,实现主载波的捕获。

主载波捕获后可得到副载波 BPSK 信号,并送入副载波同步解调模块进行同步解调,以实现符号判决,完成 BPSK-PM 信号的解调接收。

3 结论

本文介绍了针对 BPSK-PM 调制体制的一种载波捕获方案,此载波捕获方案已用于联合研制的我国火

星探测器星载中频全数字接收机中。完成了项目的各项指标要求,并顺利地通过了各阶段评测与审核。数字接收接相关指标要求见表1。

星载深空探测器测控数字接收机是保证火星探测,完成测控通信的重要单元,是为卫星平台的遥测遥控及载荷的科学探测提供数据传输的手段。因此,本文所介绍的中频数字接收机载波捕获方案具有重要意义,为今后深空通信的研究和应用打下了基础。

表1 数字接收机指标要求

Tab.1 The index requirements of digital receiver

参数名称	指标要求
中频输入信号动态	≥ 30 dB
调制方式	BPSK - PM, 副载波频率 8 kHz
最大频率变化率	8 Hz/s
载波频率变化范围	± 5 kHz
传输码率	8 bps
载波捕获范围	$\geq \pm 2$ kHz
载波跟踪范围	$\geq \pm 5$ kHz
误码率	优于 $1.0e-5$

参考文献:

- [1] 刘彬. 深空通信星载数字接收解调单元的研究与实现[D]. 北京:北京大学,2007:4-45.
LIU Bin. Research and implementation of satellite digital modem in deep space communications [D]. Beijing:Peking university,2007:4-45. (in Chinese)
- [2] CCSDS 401.0 - B. Recommendations for space data system standards [S]. 2009.
- [3] 蒋立平,付锐. 全数字载波捕获算法[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2002,26(1):15-19.
JIANG Liping, FU Rui. An algorithm of all - digital carrier acquisition[J]. Journal of Nanjing university of science and technology,2002,26(1):15-19. (in Chinese)
- [4] Zhang Jianglin, Lu Shanwei, Dong Shengbo, et al. A fast and accurate frequency acquisition method [C]// IEEE 2007 international symposium on microwave, antenna, propagation and EMC technologies for wireless communications. Hangzhou: [s. n.],2007:1023-1026.
- [5] Holm S. Optimum FFT - based frequency acquisition with application to COSPAS - SARSAT [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 1993,29(2):464-475.
- [6] Shah B, Holmes J K, Hinedi S. Comparison of four FFT - based frequency acquisition techniques for costas loop BPSK signal demodulation [J]. IEEE transactions on communications,1995,43(6):2157-2167.
- [7] Aguirre S, Hurd W J. Design and performance of sampled data loops for subcarrier and carrier tracking[R]. The telecommunications and data acquisition progress report, TDA RP 42 - 79,1984.
- [8] 范莹莹,张文军,管云峰. 一种基于 DFLL 载波捕获新方法的研究[J]. 电视技术,2005,29(11):13-16.
FAN Yingying, ZHANG Wenjun, GUAN Yunfeng. A new carrier acquisition approach based on DFLL[J]. TV engineering, 2005,29(11):13-16. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

The Carrier Acquisition Scheme of BPSK - PM Signal

WANG Xiao - dong, GAN Miao, WANG Xiao - ding, JIANG Wei, LUO Wu
(School of EECS, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: BPSK - PM is a modulation mechanism in which BPSK is used as its sub - carrier modulation mode and PM as its main - carrier modulation mode. This mechanism makes the spectrum of the modulated telemetry signal separate from that of carrier signal, while the residual carrier can be applied in A/V measuring and tracking. This paper firstly introduces the BPSK - PM modulation mechanism and analyzes the spectrum characteristics of its modulation signal, and then proposes a mid - frequency digital reception and carrier acquisition scheme according to the specific application. The carrier acquisition scheme is divided into a frequency searching part based on FFT and a frequency tracking part based on digital frequency - lock loop technology, which are analyzed in details. Finally, this paper shows a practical application of the carrier acquisition scheme, and the effectiveness of the scheme has been preliminarily verified in the Martian deep - space exploration of China.

Key words: carrier acquisition; BPSK - PM; frequency searching; frequency tracing