

## 月球轨道超长波天文观测微卫星在轨数据预处理方法\*

赵飞<sup>1,2,3</sup>, 阎敬业<sup>2</sup>, 蓝爱兰<sup>1,2</sup>, 武林<sup>2</sup>

(1. 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**围绕“嫦娥4号”月球轨道超长波天文观测微卫星展开研究,针对微纳卫星对地数传资源的限制,提出一种在轨信号预处理方法:通过10通道数字下变频链路实现原始数据的变频接收,再利用多级滤波器抽取获得低采样率基带数据,下变频本振频率可调,在对地数传资源约束下保证了不同频带数据的灵活选取。以上方法实现了一种10频点超窄带梳状滤波,仿真验证表明,采样率80 MSPS基带带宽为1 kHz的情况下,此方法可在现场可编程门阵列平台上稳定运行,能保证带内平坦度和线性相位等关键技术指标,数据量与直接下传原始数据相比,降低了3个数量级以上。

**关键词:**微纳卫星;在轨信号预处理;数字下变频;超窄带滤波;梳状滤波

**中图分类号:**V447+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)02-051-06

## On-board data preprocessing method for path finder of discovering the sky at the super-long wavelengths

ZHAO Fei<sup>1,2,3</sup>, YAN Jingye<sup>2</sup>, LAN Ailan<sup>1,2</sup>, WU Lin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** It is focused on CE-4 lunar orbit dual micro satellites mission for super-long wave astronomy. Under the strict resource constraints, the lunar orbit micro-nano satellites have very limited communication bandwidth. In order to maximize valuable scientific data, a method of in-orbit signal preprocessing was presented; the digital down conversion method was used to build the ultra-narrowband filter, which significantly reduces the data rate. The ultra-narrowband filtering scheme can perform comb filtering by increasing the down-conversion filter channels. The ultra-narrowband filter scheme simulations on the field programmable gate array show that the key technical indicators such as flatness and linear phase meet the requirements, and the data rate can be reduced by more than  $10^3$  times compared with original data rate under the circumstances of the sampling rate is 80 MSPS with baseband bandwidth is 1 kHz.

**Keywords:** micro-nano satellites; in-orbit signal preprocessing; digital down conversion; ultra-narrowband filter; comb filter

微纳卫星具有重量轻、体积小、功能密度高及可组网等优点<sup>[1]</sup>,在空间探测中正发挥越来越大的作用,超长波天文观测是近期国内外研究机构关注的前沿之一。美国在早期绕月卫星 RAE-2 的基础上于 2008 年提出月基干涉仪 DALI (dark age lunar interferometer)<sup>[2]</sup>; 欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 在 2007 年和 2009 年先后资助了 FIRST 项目<sup>[3]</sup>和 DARIS (distributed aperture array for radio astronomy in space) 项目<sup>[4]</sup>; 荷兰科学家也在 2010 年前后提出了月球轨道的分布式甚低频射电天文望远镜阵列<sup>[5]</sup>。与此同

时,中国也开展了前期相关攻关工作,“嫦娥4号”月球轨道超长波天文观测微卫星计划于 2018 年发射。微纳卫星虽然有诸多优点,但其严格的资源限制使得对地数传带宽非常有限。

为了解决星地通信能力与低频射电观测大数量之间的矛盾,美国早期的绕月卫星 RAE-2 硬件上选择 32 个带宽为 20 kHz 的子带,实现了对 32 个子带分时扫描观测<sup>[6]</sup>; 荷兰提出的 OLFAR 计划通过多相滤波将探测带宽分为多个子带,分时发送不同子带的探测数据。然而,RAE-2 和 OLFAR 都无法在有效带宽内灵活选取探测频率,

\* 收稿日期:2018-01-31

基金项目:中国科学院前沿科学重点研究资助项目(QYZDY-SSW-JSC014);国家863计划资助项目(2014AA123502)

作者简介:赵飞(1985—),男,山东泰安人,博士研究生,E-mail: zhaofei@mirslab.cn;

阎敬业(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail: yanjingye@nssc.ac.cn

一定程度上损失了有潜在价值的科学数据,影响了仪器特定频带内的探测灵敏度。

由于大数据量与数传带宽有限之间矛盾的存在,射电观测微纳卫星需要在轨数据预处理实现原始数据压缩提取,以便获得若干关键频点的时域数据,从而得到高灵敏度的干涉图像。本文在 RAE-2 和 OLFAR 的基础上,结合“嫦娥 4 号”月球轨道超长波天文观测微卫星任务自身特点,提出如下方案:采用可变参数超窄带滤波方法,获取有效带宽内多个子带目标数据;子带带宽极窄,可以实时传输有效带宽内从低频到高频多个特征子带数据;子带中心频率可任意调节,具备覆盖全关键频点的能力。本文详细阐述了在轨数据预处理的技术方案和实现方法,并进行了仿真及验证分析。

### 1 “嫦娥 4 号”月球轨道超长波天文观测微卫星

月球轨道超长波天文观测微卫星(Path finder of Discovering the Sky at the Longest wavelengths, DSL-P)是由两颗微纳卫星构成的二元射电干涉仪,由哈尔滨工业大学与中国科学院联合研制,于 2018 年搭载 CE-4 中继星发射。DSL-P 工作频率为 1~30 MHz,将在电磁环境优越的月球轨道背面开展超长波射电探测的探索性研究,进行先期宇宙黑暗时代的探测。DSL-P 将是世界首个绕月编队超长波干涉仪,将为后期全面建设空间大规模超长波射电望远镜阵列提供重要的理论与技术支撑,以及必要的先期工程验证<sup>[7]</sup>。

DSL-P 由 A 星和 B 星两颗微纳卫星组成干涉仪,A 星和 B 星都具备对地数传能力,通信带宽分别为 1 Mbit/s,两星之间亦具备通信能力,通信带宽为 1 Mbit/s。A 星和 B 星分别具备 3 个独立的观测通道,每个观测通道采样率为 80 MSPS,ADC 有效位数为 12.5 bit,每个干涉单元原始数据速率可达 3 Gbit/s 以上。因此,DSL-P 急需在最大化提取有效科学数据的前提下,采用合理的在轨数据预处理方法减少数据量。

### 2 天文目标信号特征

天文源射电辐射具有独特特征,其自然辐射信号为宽谱信号,频谱范围可跨越几个数量级,如图 1 所示。通常认为同一点源的辐射信号具有空间和时间的相干性。超长波天文观测通常指 30 MHz 以内的射电辐射观测,是研究宇宙黑暗时代、再电离新纪元、系外星系、高能宇宙射线及太

阳低频活动特性的重要手段<sup>[8]</sup>。

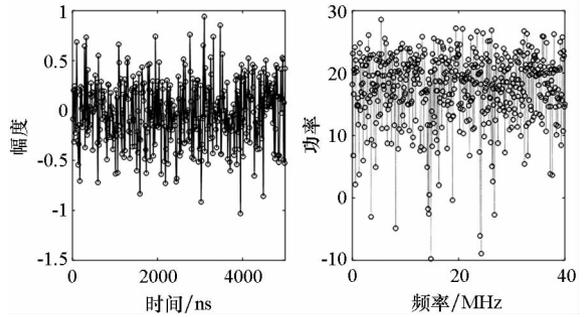


图 1 高斯白噪声及其频谱

Fig. 1 Gaussian white noise and its spectrum

由于射电辐射宽频谱的特点,在无任何物理变频通道的情况下,针对任一子带的欠采样都会造成频谱混叠;而直接高速采集放大器输出,在数字端进行原始数据预处理是比较理想的方案。

### 3 原始数据预处理方案

#### 3.1 方案描述

为了探索未知领域,1~30 MHz 全带宽内都具有潜在的科学价值。一方面,由于工程条件限制,DSL-P 每颗卫星分别下传测量数据和同步标志,相关处理运算地面完成。另一方面,探测带宽内来自电子设备的电磁干扰极其严重,如图 2 所示。基于以上原因,在星地数据传输能力有限,无法获取全部原始数据的情况下,需要设计一种原始数据预处理策略,以便最大化获取有价值的探测数据。

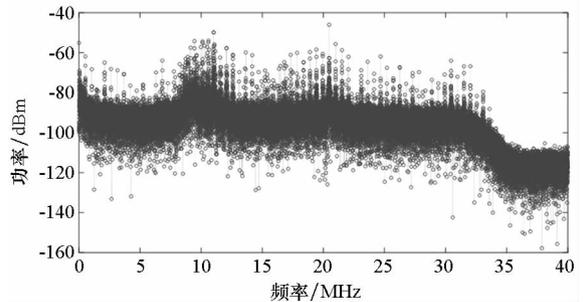


图 2 DSL-P 电磁干扰的实测结果

Fig. 2 Measured result of DSL-P electro-magnetic interference

原始数据预处理的多通道可变参数超窄带滤波实现方案(如图 3 所示)能锁定有价值的观测频点,避开潜在的电磁干扰(Electro-Magnetic Interference, EMI)、射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)等干扰,并可减小数据量,确保有效数据回传地面。

10 个可变参数超窄带滤波通道构成原始数

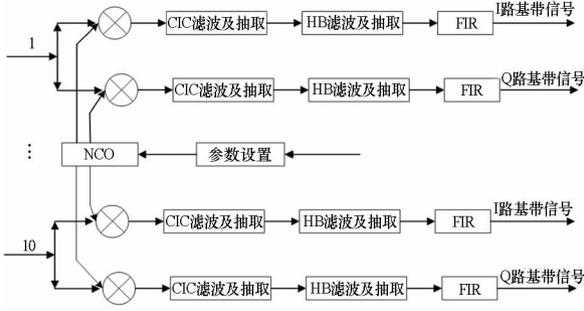


图 3 原始数据预处理方案框图

Fig. 3 Block diagram of the data preprocessing

据预处理的 10 个子带,10 个子带并行运行,子带带宽为 1 kHz,子带中心频率可灵活选取。每个子带经数字下变频至零中频,然后多级滤波与抽取,有效降低了数据速率,通过修改数字下变频本振可实现子带中心频率的选择。

### 3.2 理论推导

假定目标信号带宽为  $B_f$ ,该信号可认为由若干个带宽为  $\Delta f_{sub}$  的子带构成,每个子带的中心频率为  $\omega_x$ 。利用数字下变频的方法将  $\omega_x$  降至 0,子带带宽  $\Delta f_{sub}$  内携带的科学信息得以保留,由于采样率锐减,从而保证数据量大幅降低。通过为每一个子带设置不同的下变频本振  $\omega_0$ ,可任意选择不同中心频率的子带。

数字下变频后需要经过多级滤波和抽取,将信号带宽由  $B_f$  降至  $\Delta f_{sub}$ ,由此将带宽  $\Delta f_{sub}$  的子带信号分离出来。处理过程的数学表述及子带中心频率  $\omega_x$  需要满足的条件分析如下:用 sinc 函数<sup>[9]</sup>表示的带宽  $B_f$  信号为

$$s_1(t) = \cos(\omega_x t) \text{sinc}(B_f t) = \frac{\cos(\omega_x t) \sin(B_f \pi t)}{B_f \pi t} \quad (1)$$

用于下变频的单频本振信号可表示为  $s_2(t) = \cos(\omega_0 t)$ ,采样信号用冲击信号<sup>[9]</sup>表征,则

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (2)$$

全带宽采样后的时域信号的数学表示为

$$s_{p1}(t) = s_1(t)p(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} s_1(B_f n T_s) \delta(t - n T_s) \\ = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{\cos(\omega_x n T_s) \sin(B_f \pi n T_s)}{B_f \pi n T} \delta(t - n T_s) \quad (3)$$

$$s_{p2}(t) = s_2(t)p(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} s_2(n T_s) \delta(t - n T_s) \\ = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \cos(\omega_0 n T_s) \delta(t - n T_s) \quad (4)$$

对应的频率表示方式为

$$F[s_{p1}(t)] = \begin{cases} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \frac{k B_f}{T}, & |\omega - (n \omega_s - \omega_x)| \leq B_f \\ 0, & |\omega - (n \omega_s - \omega_x)| > B_f \end{cases} \quad (5)$$

$$F[s_{p2}(t)] = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \pi [\delta(\omega - n \omega_s + \omega_0) + \delta(\omega - n \omega_s - \omega_0)] \quad (6)$$

其中,  $\omega_s$  为采样角频率。

为了将带宽  $\Delta f_{sub}$  的子带信号分离,子带带宽  $\Delta f_{sub}$  需满足  $|\omega_0 - \omega_x| < \Delta f_{sub}$ ,由式(5)和式(6)可知,信号  $s_{p1}(t)$  和  $s_{p2}(t)$  混频落在第一奈奎斯特域内的频点有:  $\omega_x - \omega_0, -\omega_x - \omega_0, \omega_x + \omega_0$  和  $-\omega_x + \omega_0$ 。FPGA 实现过程中需要多次降采样,以达到节省硬件资源的目的。第一次降采样时,相邻两个频带内信号不能混叠,其充分必要条件( $\omega_0 > \omega_x$ )为

$$(\omega_x + \omega_0) - (\omega_0 - \omega_x) > \frac{\omega_s}{\chi}, \omega_0 > \omega_x \quad (7)$$

$$(\omega_x - \omega_0) - (-\omega_x - \omega_0) > \frac{\omega_s}{\chi}, \omega_0 > \omega_x \quad (8)$$

其中,  $\chi$  为第一次降采样抽取因子。

在实际应用中  $|\omega_0 - \omega_x| < \Delta f_{sub} \ll \omega_0, \omega_x < \omega_s$ ,以上两式(并考虑  $\omega_0 < \omega_x$  的情况)可归纳为

$$\omega_x(\omega_0) > \frac{\omega_s}{2\chi} \quad (9)$$

当  $\omega_s = 80$  MSPS,  $\chi = 32$  时,子带中心频率需满足  $\omega_x(\omega_0) > 1.25$  MHz,此条件对子带的选择有指导意义。

### 3.3 技术实现

实现可变参数的技术手段为基于软件无线电<sup>[10]</sup>的全数字化处理,在超长波射电干涉仪接收机的数字端进行多级变频和滤波等信号处理,实现数字化超窄带滤波。由于中频采样和数字下变频后,采样率依然保持很高,无法直接使用 FIR 进行滤波,需要用 CIC (cascade integrator comb) 和 HB 滤波器进行大抽取因子抽取,从而降低数据速率,再由 FIR 进行滤波整形,如图 4 所示。

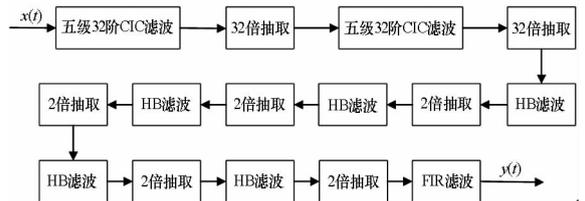


图 4 数据预处理单通道技术方案

Fig. 4 Technical scheme for single channel

在保留 CIC 滤波节约硬件资源、宜于大比例因子抽取<sup>[11]</sup>等优势的前提下,本方案中增加了半

带滤波器和 FIR 滤波器。一方面,半带滤波器除了零点外,其余偶数点全为零,其实时处理只需一半的计算量,具有节约硬件资源且计算效率高的优点,可用于 2 倍抽取前的滤波;另一方面,半带滤波器可用 FIR 结构实现,带内平坦度和矩形系数比较理想,适合用于 CIC 滤波抽取后的信号处理。FIR 滤波器带内平坦度好、带外抑制高,可对 CIC 滤波和抽取后的信号进行整形滤波,进而补偿 CIC 滤波不够平坦的通带。

### 3.4 关键技术指标

在轨数据预处理,通过可变参数超窄带滤波,产生满足星地通信带宽需求的时域信号。两星信号必须满足统一的关键技术指标,以确保相关性。关键技术指标如表 1 所示。

表 1 原始数据预处理关键技术指标

Tab.1 Key specifications of the data preprocessing

信号频率范围/ MHz	采样率/ MSPS	子带数量	子带带宽/ kHz	中心频率/ 调整步进/ kHz	带内平坦度/ dB	带外抑制/ dB
1~30	80	10	1	<20	<0.5	>50

图 4 所示滤波抽取方案可实现超高抽取比滤波,并能保证通带线性相位、带内平坦度及矩形系数等关键技术指标。设计带宽  $\Delta f_{sub} = 1$  kHz,通过传递函数级联仿真获得幅频特性和相频特性曲线,如图 5 所示。

由图 5 可见,超窄带梳状滤波通道的 3 dB 带宽为 1 kHz,通带相位线性度、带内平坦度和矩形

系数良好,可以满足工程需求。

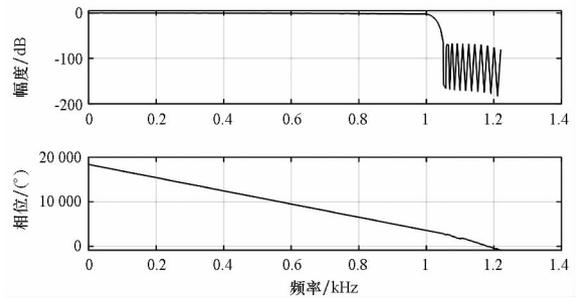


图 5 单通道幅频和相频特性曲线

Fig.5 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic of single channel

## 4 原始数据预处理方案验证

### 4.1 MATLAB 仿真验证

10 个超窄带滤波变频通道构成原始数据预处理系统。对任一子带进行 MATLAB 仿真验证的过程为:输入信号首先进行数字下变频实现子带选择,下变频本振通过数字控制振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)实现;然后依次使用 CIC 滤波、HB 滤波和 FIR 滤波进行多级滤波和抽取,确保超窄子带内技术指标的有效性;预处理后采样率由 80 MSPS 降低至 2.44 KSPS,数据率大幅降低。

单通道仿真模型如图 6 所示,图 1 所示的高斯白噪声经 80 MSPS 数字量化后经 yin 输入, NCO 用于产生数字下变频本振  $f_x$ , 输出信号 yout 子带带宽  $\Delta f_{sub} = 1$  kHz。仿真系统在定点模式下运行,充分考虑了截位量化对系统的影响。

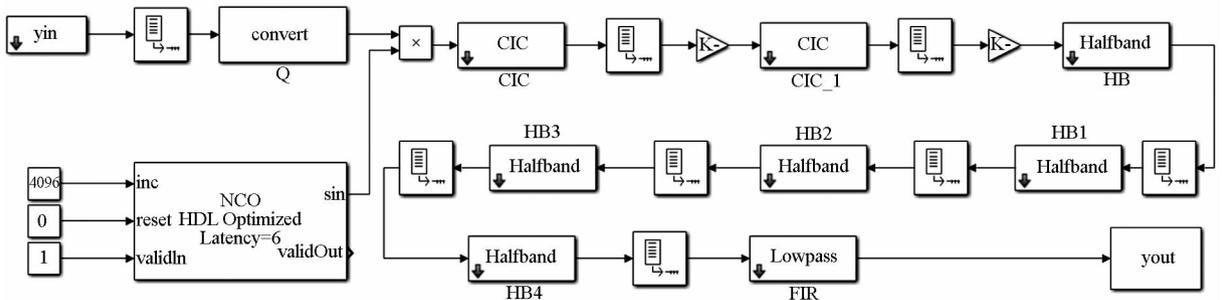


图 6 Simulink 仿真模型

Fig.6 Simulation model based on Simulink

理论上,变频滤波后输出 0~1 kHz 为带内信号的,可以几乎无衰减提取;1 kHz 以上为带外信号的,得到较大幅度抑制。输出信号频谱如图 7 所示,其结果与理论分析完全一致。

### 4.2 FPGA 板载验证

在 Virtex-4 平台上按图 3 和图 6 的结构设计超窄带梳状滤波通道实现数据预处理。在 FPGA 设计中,每一级滤波器都由 FPGA 内部

XtremeDSP™ Slices 实现,除第一级 CIC 滤波器外,其余各级滤波器均可复用 XtremeDSP™ Slices,从而极大地节省 FPGA 内部资源。经过优化设计,10 个子带超窄带梳状滤波的实现总共只需要不超过 50 个 XtremeDSP™ Slices,完全具备工程可实现性。

可变参数超窄带滤波通道运行在 DSL-P 数字接收机上,可通过修改本振时钟  $f_0$  选择输出子

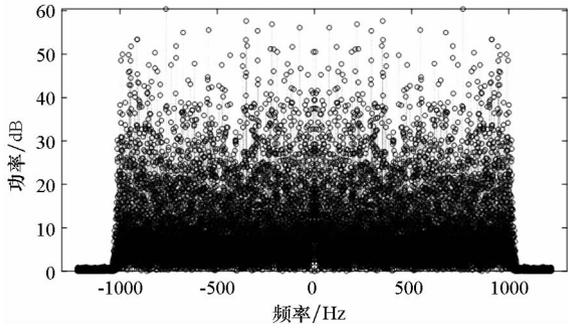


图7 仿真输出

Fig.7 Simulation output

带。下变频本振通过 NCO 方式实现,其查找表为 16 bit,运行主频为 80 MHz,因此本振时钟  $f_0$  频率可调步进  $\Delta f_0 = 19.531\ 25\ \text{kHz}$ <sup>[12]</sup>。共设计 10 个 3 dB 带宽 1 kHz 的超窄带梳状滤波通道。按照式(9)的条件,设置第 1 个超窄带滤波接收通道本振初值  $(f_0)_1 = 1.503\ 906\ 25\ \text{MHz}$ ,设置第 2 个超窄带滤波接收通道的本振初值  $(f_0)_2 = 4.726\ 562\ 5\ \text{MHz}$ ,第 10 个超窄带滤波接收通道本振初值  $(f_0)_{10} = 29.101\ 562\ 5\ \text{MHz}$ ,其他接收通道本振频率初值在  $(f_0)_2$  和  $(f_0)_{10}$  之间等间隔分布。

通过信号源输入频率  $f_x = 4.726\ \text{MHz}$  的正弦信号,图 8 是超窄带滤波输出信号周期为 1.775 1 ms 的正弦波,与理论值 1.777 8 ms 基本一致(2.7‰ 的偏差)。

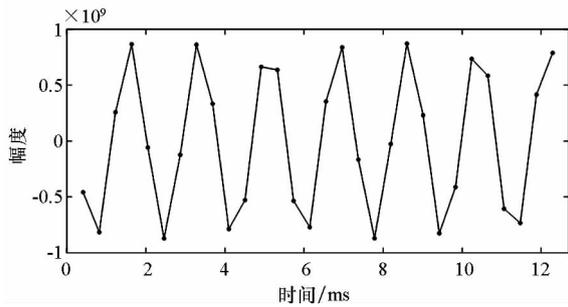


图8 数字接收机单频输出

Fig.8 Sinusoidal signal output from digital receiver

修改信号源输出频率,使信号源扫频输出,  $f_x$  从 26.346 000 MHz 到 26.349 000 MHz 按对数周期规律变化,对超窄带滤波梳状滤波输出端信号做 256 点快速傅里叶变换,如图 9 所示。由于上述设计的变频滤波通道并非正交接收系统,实际接收信号并不区分上下边带,上边带 1 kHz 带宽内和下边带 1 kHz 带宽内信号都被无差别接收,图 9 中的上下边带带宽一致,此种情况符合 DSL-P 的工程需求。信号源扫频输出时,

不同频率输出幅度不尽相同,图 9 也可反映出这一信息。

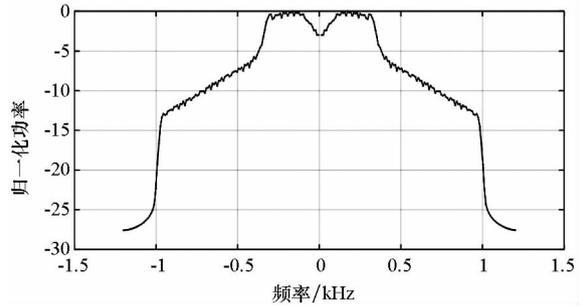


图9 数字接收机扫频输出

Fig.9 Scanning frequency signal output from digital receiver

## 5 结论

在微纳卫星对地数据传输能力有限的情况下,为了获取尽可能多的科学数据,本文设计了一种超窄带梳状滤波方案,以实现原始数据预处理。10 个原始数据预处理子带并行工作,子带带宽 1 kHz,子带中心频率可按 19.531 25 kHz 步进任意调节;数据预处理后每一子带都被下变频到基带,采样率由 80 MSPS 降至 2.44 KSPS,使原始数据星地传输成为可能。使用 MATLAB 对设计方案进行了仿真实验,最后在 DSL-P 数字接收机上运行以上设计,在实际环境中验证了设计的可行性。

## 参考文献 (References)

- [1] Buchen E. Spaceworks' 2014 nano/microsatellite market assessment [C]// Proceeding of 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2014.
- [2] Lazio T J W, Kasper J, Jones D, et al. The dark ages lunar interferometer (DALI) [J]. Bulletin of the American Astronomical Society, 2007, 39: 976.
- [3] Bergman J E S, Blott R J, Forbes A B, et al. FIRST explorer-an innovative low-cost passive formation-flying system [C]// Proceeding of European Air and Space Conference, 2009.
- [4] Boonstra A J, Saks N, Bentum M J, et al. A low-frequency distributed aperture array for radio astronomy in space [C]// Proceeding of 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010.
- [5] Engelen S, Verhoeven C J M, Bentum M J. Olfar, a radio telescope based on nano-satellites in moon orbit [C]// Proceeding of 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2010.
- [6] Alexander J K, Kaiser M L, Novaco J C, et al. Scientific instrumentation of the radio-astronomy-explorer-2 satellite [J]. Astronomy and Astrophysics, 1975, 40(4): 365-371.
- [7] 张锦绣,陈学雷,曹喜滨,等. 月球轨道编队超长波天文

- 观测微卫星任务 [J]. 深空探测学报, 2017, 4(2): 158 - 165.
- ZHANG Jinxiu, CHEN Xuelei, CAO Xibin, et al. Formation flying around lunar for ultra-long wave radio interferometer mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 158 - 165. (in Chinese)
- [8] 陈学雷. 关于开展我国空间低频射电天文学研究的一些设想 [C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第二届学术会议论文集, 2005: 49 - 53.
- CHEN Xuelei. The space low frequency radio astronomy in China [C]// Proceeding of the Second Academic Conference of the Committee of Deep Space Exploration Technology, Chinese Society of Astronautics, 2005: 49 - 53. (in Chinese)
- [9] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统上册 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 101 - 156.
- ZHENG Junli, YING Qiheng, YANG Weili. Signals and systems (Volume 1) [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2000: 101 - 156. (in Chinese)
- [10] Mitola J. The software radio architecture [J]. IEEE Communications Magazine, 1995, 33(5): 26 - 38.
- [11] 杨灵, 吴黎晖, 张蕴玉. 基于高效抽取滤波器的数字下变频设计 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2006, 34(6): 14 - 17.
- YANG Ling, WU Lihui, ZHANG Yunyu. Scheme for digital down converter based on decimation filters with high efficiency [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2006, 34(6): 14 - 17. (in Chinese)
- [12] Ertl R, Baier J. Increasing the frequency resolution of NCO-systems using a circuit based on a digital adder [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 1996, 43(3): 266 - 269.