

一种支持任意码率的 PCM-FM 遥测接收机设计

王仁智[✉], 吴江波, 张春泽
(天津讯联科技有限公司 天津 300308)

摘要: PCM-FM 调制技术是遥测系统中应用最广泛的调制体制, 遥测接收机是遥测系统的重要单机。针对目前遥测接收机系统复杂、体积笨重、操作不便、采购成本高昂的痛点, 设计了一款通用便携遥测接收机, 采用了任意采样率转换技术、坐标旋转数字计算方法 CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) 鉴频、多普勒频移控制技术和位同步控制技术, 具有硬件资源消耗少、支持任意码率可调、易于集成和小型化设计等优点。

关键词: 遥测接收机; PCM-FM; 零中频; CORDIC 鉴频; 自动频率控制

中图分类号: V556.1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)06-0089-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211220001

引用格式: 王仁智, 吴江波, 张春泽. 一种支持任意码率的 PCM-FM 遥测接收机设计[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 89-95.

Design of PCM-FM telemetry receiver supporting arbitrary bit rate

WANG Renzhi, WU Jiangbo, ZHANG Chunze
(Tianjin Xunlian Technology Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: PCM-FM modulation is the most widely used modulation in telemetry system, and telemetry receiver is an important part of telemetry system. Aiming at the pain points of complex telemetry receiver system, bulky volume, inconvenient operation and high procurement cost, a portable general telemetry receiver is designed, which adopts arbitrary sampling rate conversion technology, CORDIC frequency discrimination technology, Doppler frequency shift control technology and bit synchronization control technology have many characteristics, such as less hardware resource consumption, supporting arbitrary bit rate adjustment, easy integration and miniaturization design.

Key words: Telemetry receiver; PCM-FM; Zero-IF; CORDIC frequency discrimination; AFC

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211220001

Citation: WANG Renzhi, WU Jiangbo, ZHANG Chunze. Design of PCM-FM telemetry receiver supporting arbitrary bit rate[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 89-95.

引 言

遥测接收机具有多次重复使用和多项目型号交叉使用的特点, 除了参与飞行器的发射任务外, 还参与飞行器的生产、验收、转场、试验过程的各个任务环节。飞行器的发射过程通常采用靶场提供的大型遥测接收系统, 实现全过程的数据记录, 但遥测接收系统通常无法实现遥测数据的实时解析和显示, 项目组还需要配备具有实时解析功能的遥测接收机, 进行飞行器发射初期的遥测数据的接收和实时解析显示, 第一时间获得实验数据以方便做判断决策。

因此, 研究一款性能稳定、体积便携、操作简单、通用经济的遥测接收机能在提高工作人员的效率、保障各个任务环节的时间节点情况下, 有效降低项目研发成本。本文设计了一款通用便携式遥测接收机, 该接收机采用了先进的零中频 ZIF (Zero Intermediate Frequency) 架构和软件定义无线电 SDR (Software Defined Radio) 思想, 能够实现接收频点 70 MHz~6 GHz 任意可选, 码速率 10 kbps ~ 10 Mbps 任意可调。

[✉]通信作者: 王仁智 (wangrzh@yeah.net)

收稿日期: 2021-12-20 收修改稿日期: 2022-01-01

1 PCM-FM 遥测接收机

遥测系统包括遥测发射系统和遥测接收系统。遥测发射系统通常由采编调制器、功率放大器、遥测天线等构成；遥测接收系统由遥测天线、低噪声放大器、遥测接收机、显示系统、记录系统和时钟系统等构成。其中，遥测接收机作为遥测接收系统的关键单机对遥测接收系统性能影响很大。

PCM-FM 遥测技术具有抗尾焰和相位噪声能力强的特点，是航空航天领域使用最广泛的通信技术，国内外对其研究很多。闫冬等人采用 CORDIC 鉴频算法实现了一款中频调频接收机^[1]。何晓华等人在文献中介绍了一种利用差积和点积来求得信号的近似反正切值的鉴频方法^[2]。杨明极和马琳采用软件无线电的思想对常见的解调算法进行了仿真分析^[3]。郑忠楷等人采用包络检波的方法在 FPGA 中实现 FSK 解调^[4]。赵军等人对 FSK 的差分解调方法进行了分析仿真^[5]。张磊采用 GC4016 芯片设计了一款全数字鉴频器^[6]。传统 PCM-FM 遥测接收机多采用超外差接收架构，超外差架构存在接收频点范围小、通用性差、体积笨重等缺点。零中频架构遥测接收机^[7]随着集成电路工艺的进步，镜像抑制和本振泄露问题得到极大的改善，与超外差架构遥测接收机相比解调性能相当，但在体积、功耗和重量方面有明显优势。

2 关键技术

2.1 采样率转换

固定的过采样倍数对于接收机的解调同步至关重要，本文采用 8 倍过采样实现遥测解调。对于固定 AD 采样率接收机，实现任意码率可调的关键是数据在进入鉴频器之前完成任意采样率转换。例如，当 AD 采样速率为 120 Msps，码率为 10 Mbps 时，需要完成 120 Msps 到 80 Msps 的 1.5 倍降采样。

通过可变时长积分器和小数分频器组合实现任意采样率转换。可变时长积分器的数学表达式为：

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i, n = \text{round}(\frac{f_s}{8R_b}) \tag{1}$$

式中： f_s 为 AD 采样速率即 120 Msps， R_b 为码率， x_i 是可变时长积分器的输入， y 为可变时长积分器的输出。可变时长积分器的算法如图 1 所示。

可变时长积分器的目的是降低噪声、提高信噪比。为了实现精确的采样率转换还需要配合小数分频器，小数分频器的数学表达式如下：

$$f_{\text{out}} = \frac{b}{a} f_{\text{in}} \tag{2}$$

其中， f_{in} 是输入时钟频率， f_{out} 是输出时钟频率， a 和 b 是分频因子，通过 a 和 b 的组合实现任意小数分频。小数分频器的算法如图 2 所示。

图 2 中使用了 2 个 D 触发器、1 个加法器和 1 个比较器完成了任意小数分频，分频系数为 b/a 。

2.2 CORDIC 鉴频

CORDIC 算法由 Volder. J 于 1959 年首先提出。该算法将复杂的三角运算分解成加法和移位运算，方便在 FPGA 等硬件实现。CORDIC 的迭代公式如下所示：

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - d_i y_i 2^{-i} \\ y_{i+1} = y_i + d_i x_i 2^{-i} \\ z_{i+1} = z_i - d_i \theta_i \end{cases} \tag{3}$$

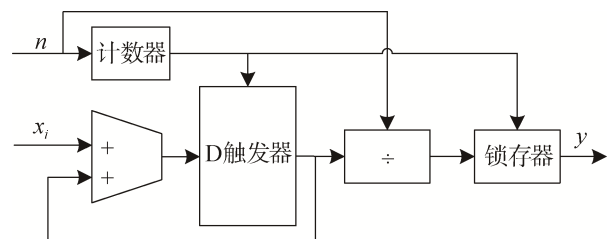


图 1 可变时长积分器算法框图

Fig. 1 Variable time integrator algorithm diagram

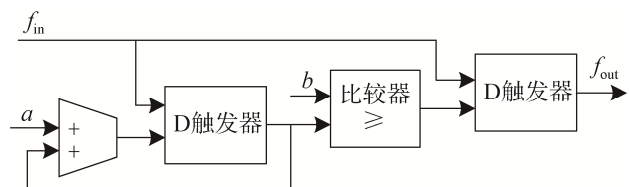


图 2 小数分频器算法框图

Fig. 2 Fractional frequency divider algorithm diagram

CORDIC 的本质是把变换改成了迭代算法。对任意角度 θ 的旋转能够通过一系列连续小角度的旋转迭代 i 来完成, 旋转迭代角度遵循法则 $\tan \theta_i = 2^{-i}$, 从而使与正切项相乘变换成移位操作。其中 d_i 为判决算子, 用于确定旋转的方向。迭代的结果除了跟角度分辨率有关系, 还跟迭代次数有关。计算结果精度与迭代次数的关系见表 1。

表 1 CORDIC 迭代次数与计算精度
Table 1 CORDIC iteration times and calculation accuracy

i /次数	$\tan \theta$	θ	$\cos \theta$
1	1	45.000 000 000	0.894 427 191
2	0.5	26.565 051 177	0.970 142 500
3	0.25	14.036 243 467	0.992 277 877
4	0.125	7.125 016 348 9	0.998 052 578
5	0.062 5	3.576 334 375 0	0.999 512 076
6	0.031 25	1.789 910 608 2	0.999 877 952
7	0.015 625	0.895 173 710 2	0.999 969 484
8	0.007 812 5	0.447 614 170 9	0.999 992 371
9	0.003 906 25	0.223 810 500 4	0.999 998 093
10	0.001 953 125	0.111 905 677 1	0.999 999 523
11	0.000 976 563	0.055 952 891 9	0.999 999 881
12	0.000 488 281	0.027 976 452 6	0.999 999 970
13	0.000 244 141	0.013 988 227 1	0.894 427 191

由表 1 可知, 随着迭代次数的增加, 计算结果的精度也会不断地提高, 选择合适的迭代次数完全能够满足鉴相、鉴频的要求。迭代 10 次以上即能满足解调精度的要求。

结合 CORDIC 算法的迭代特性, 该算法用于硬件实现的算法框图如图 3 所示。一次迭代只需要 2 次移位运算、一次查表运算和 3 次加法运算即可完成。

CORDIC 计算出的是输入信号的相位信息 θ , 对相位信息进行差分运算可以计算出输入信号的频率。通过 CORDIC 算法实时计算输入信号的当前相位 $\theta(t)$, 进而计算出输入信号的当前频率 $f(t)$, 相位 $\theta(t)$ 与频率 $f(t)$ 的关系可以表示为:

$$f(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (4)$$

数字域中微分关系可以由一阶差分代替, 式 (4) 可以转换为:

$$f(n) = \frac{8R_b}{2\pi} (\theta(n) - \theta(n-1)) \quad (5)$$

式中 $f(n)$ 表示鉴频输出的频率, $\theta(n)$ 为 CORDIC 鉴相计算结果, $\frac{8R_b}{2\pi}$ 为鉴频因子。

2.3 多普勒频移控制

多普勒频移是发射频率与接收频率之差^[8,9], 由于发射频率与接收频率固有频差与收发两端相对运动

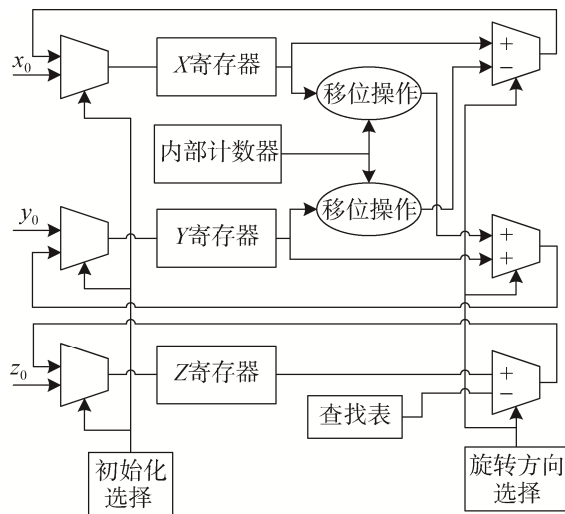


图 3 CORDIC 算法单次迭代算法框图
Fig. 3 Single iteration algorithm diagram of the CORDIC algorithm

引起的频差特性一样，本文统称为多普勒频移。在 PCM-FM 中，数据“0”和数据“1”使用不同的频率表示，多普勒频移会引起解调器误判，产生误码。航空航天领域中飞行器具有运动速度快、加速度大和接收信号信噪比低的特点，从而加剧了多普勒频移的影响。找到一种简单、有效的自动频率控制 AFC (Automatic Frequency Control) 方法是提升调频接收机性能的关键。

文中采用零中频架构，在不存在多普勒频移的理想状态下，中心频点为 0 Hz，采用正极性编码，调制指数为 0.7 时，数据“0”对应的频率 $f_0 = -0.35R_b$ ，数据“1”对应的频率 $f_1 = 0.35R_b$ ，当存在多普勒频移的时候，两个频率的中心频率就是多普勒频移。多普勒频移的数学表达式为：

$$\Delta f = \frac{f_0 + f_1}{2} \tag{6}$$

通过式 (6) 计算出的 Δf 通过 PI 处理算法生成频移控制因子，利用该控制因子实现自动频率控制，从而消除多普勒频移影响。PI 处理算法的数学表达式为：

$$y = k_p \Delta f + k_i \int \Delta f \tag{7}$$

式中， k_p 为比例项系数， k_i 为积分项系数， Δf 为多普勒频移， y 为算法的处理输出，用于频率控制。整体 AFC 的原理如图 4 所示。

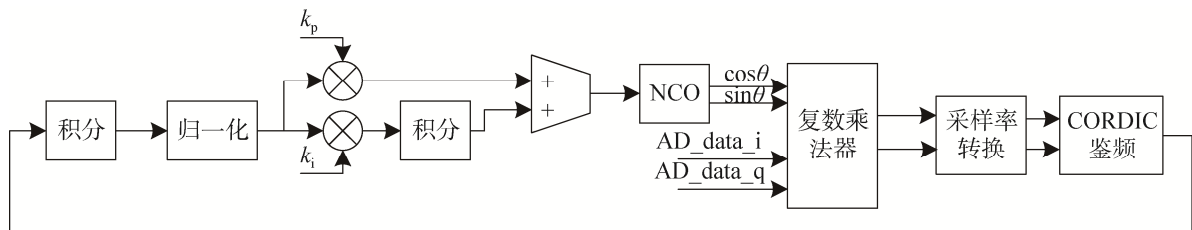


图 4 AFC 算法框图

Fig. 4 AFC algorithm diagram

图 4 中，AFC 算法是一个闭环控制系统，先从 CORDIC 鉴频输出的结果开始，信号经过积分和归一化处理后计算得到多普勒频移 Δf ，再分别经过积分运算和比例运算后相加得到用于控制 NCO 的频移信息，NCO 产生的 $\cos\theta$ 和 $\sin\theta$ 作为复数的实部和虚部，与 AD 采样得到的 i 路信号和 q 路信号组成的复数进行复数乘法运算，完成频率的纠正，之后经过采样率转换和 CORDIC 鉴频再次计算出新的结果，进行下次计算迭代，多次迭代之后即可消除多普勒频移。

2.4 位同步算法

位同步采用 DTTL 环的定时同步方法，鉴频输出结果送入到位同步处理单元，分别经过同相和中相的积分。同相积分完成定时误差信息的符号判断，中相积分确定定时误差信息的数值。定时误差信息经过环路滤波器处理后通过调整采样时刻，从而改变同相和中相积分的积分时刻，直到误差越来越小。同相积分器结果经过符号检测硬判决后，输出位同步数据流。位同步算法如图 5 所示。

图 5 中， x 为算法的输入信号， y 为算法的结果输出。同相积分器在清洗时刻取样输出信号的极性只取决于输入码元的极性，而与是否同步、位同步时钟超前还是滞后没有关系。中相积分器在清洗时刻取样输出信号极性不仅与输入码元在其积分区间内的转换方向有关，而且还与本地估算时钟是超前还是滞后于输入码元方向有关。两者经过乘法器后能抵消符号跳变对鉴相的影响。

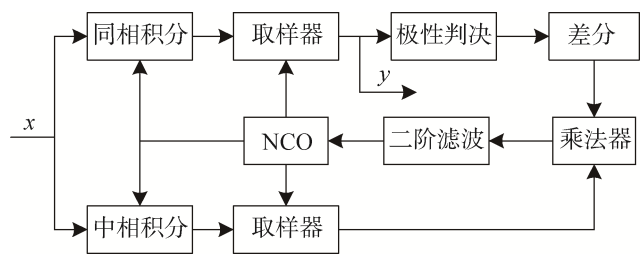


图 5 位同步算法框图

Fig. 5 Bit synchronization algorithm diagram

3 设计仿真

设计采用 Xilinx 公司的 XC7Z035 芯片和 ADI 公司的 AD9361 芯片作为遥测接收机的主要处理芯片。XC7Z035 集成 PS 端双核 ARM Cortex-A9 加上 PL 端 Kintex-7 架构 28 nm 可编程逻辑资源。可通过 PS 端配置及烧写 PL 端程序，且通过 PS 可以拥有丰富的外部端口。AD9361 作为一款高集成度的器件，完成低噪声放大、下混频、AD 正交采样的零中频接收机的通道功能，频率覆盖 70 MHz~6.0 GHz 的频率范围，从而大大简化了遥测接收机的设计。

采用 Agilent E4438C 信号源产生码率为 10 Mbps，射频频点为 2.4 GHz，使用 119 Msps 的采样率代替 120 Msps 的采样率，来模拟产生 1 MHz 码多普勒频移，通过设置频点的方式产生 2 MHz 多普勒频移。AD9361 输出的正交采样数据如图 6 所示。

由于存在噪声，采样信号有许多尖峰毛刺，对信号进行适当的滤波处理和采样率转换，再进行 CORDIC 鉴频运算，鉴频运算结果如图 7 所示。

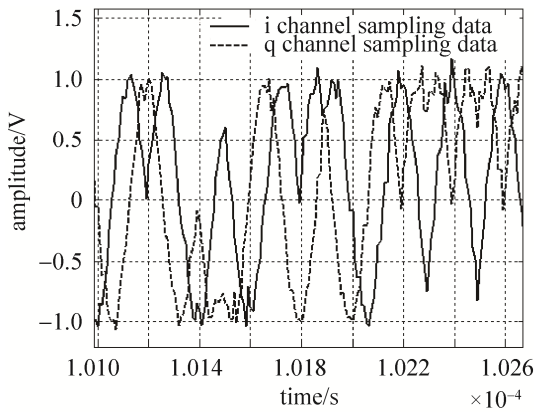


图 6 AD 采样的正交数据

Fig. 6 AD sampled orthogonal data

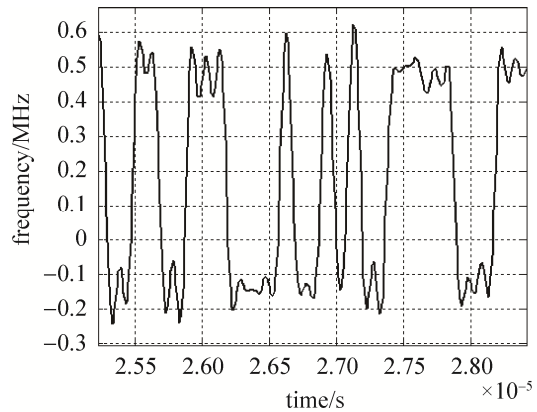


图 7 CORDIC 鉴频输出结果

Fig. 7 The result of CORDIC frequency discrimination

由于存在多普勒频移，波形的中心进行了上移，将带有多普勒频移的鉴频结果，送入 AFC 处理模块，处理结果如图 8 所示。由图中可见，经过 AFC 模块处理之后的鉴频输出，已经不存在偏置，这样再进行后续的位同步和硬判决过程中能有效地降低误码率。

在位同步锁定的情况下，位同步模块产生了稳定的 NCO 控制信号，此控制信号的变化曲线如图 9 所示。

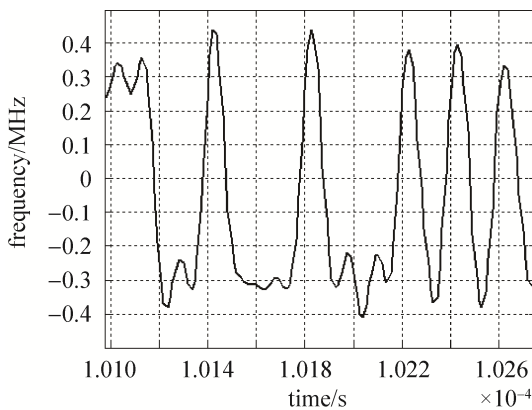


图 8 经过 AFC 处理的鉴频输出

Fig. 8 The results of AFC processed frequency discrimination

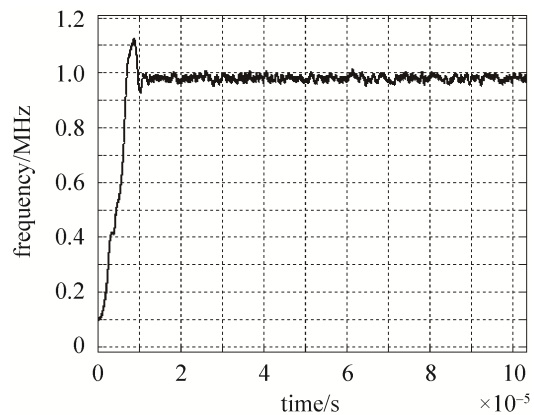


图 9 位同步环路锁定过程

Fig. 9 Bit synchronous loop locking process

在仿真中, NCO 控制信号经过短暂的快速爬升, 迅速达到了一个动态平衡锁定状态, 可见该位同步模块同步精度高、收敛速度快。

遥测接收机的实物外形尺寸如图 10 所示, 实物(包括耳片, 不包括外部连接器)尺寸为 $125\text{ mm} \times 70\text{ mm} \times 12\text{ mm}$, 重量仅为 139 g 。在对遥测接收机进行了 40 min 拷机试验后, 分析接收数据显示无丢帧错帧情况。详细指标测试情况见表 2。



图 10 遥测接收机实物图

Fig. 10 Photos of telemetry receiver

表 2 遥测接收机的指标测试情况

Table 2 Index test of telemetry receiver

指标	测试值	备注
工作频率	70 MHz~6 GHz 可调	工作频率为 2.2 GHz~2.4 GHz, 其他频率可扩展, 需要更改射频器件
接收灵敏度	-100 dBm	码速率 $R_b=1\text{ Mbps}$, 调制指数 $m_f=0.7$, 误码率 $P_e \leq 10^{-4}$
码速率	10 k~10 Mbps	任意可调
分集接收增益	2.5 dB	测试频点为 2.3 GHz, 码速率 $R_b=1\text{ Mbps}$, 且两通道能量相等时
PCM 码型	NRZ-L, NRZ-M, NRZ-S	可扩展
帧同步码组长度	8 bit~64 bit	任意可调
副帧同步	ID 副帧, 反码副帧	可扩展
抗多普勒频率	2 MHz	测试频点为 2.3 GHz, 码速率 $R_b=1\text{ Mbps}$
连续“0”或“1”的个数	256 bit	测试频点为 2.3 GHz, 码速率 $R_b=1\text{ Mbps}$

4 结束语

本文基于软件无线电的思想, 采用了零中频硬件架构平台设计制造了一款 PCM-FM 遥测接收机。该接收机性能稳定、简单灵活、通用性好, 以手机大小的体积和小于 200 g 的重量实现了传统遥测站的全部功能, 并且已经在航天某院某部的遥测项目中获得交付使用, 性能在实验室和靶场经过测试验证, 性能满足用户需求且稳定可靠, 获得用户肯定。

参考文献

- [1] 闫冬, 成亚勇, 孙大元. 基于 FPGA 的调频信号的解调方法[J]. 无线电工程, 2016, 46(6): 34-37, 56.
YAN Dong, CHENG Yayong, SUN Dayuan. Demodulation of PCM-FM signal based on FPGA[J]. Radio Engineering, 2016, 46(6): 34-37, 56.
- [2] 何晓华, 郭洪志, 李式巨. 基于叉积鉴频器的 FM 信号数字化解调实现[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 253-256.
HE Xiaohua, GUO Hongzhi, LI Shiju. Digital realization of FM demodulation base on cross product frequency discriminator[J]. Computer Simulation, 2010, 27(3): 253-256.
- [3] 杨明极, 马琳. 基于软件无线电的 FM 解调算法[J]. 电子设计工程, 2012, 20(16): 116-118, 125.
YANG Mingji, MA Lin. Algorithm of FM demodulation based on the software radio[J]. Electronic Design Engineering,

- 2012, 20(16): 116–118,125.
- [4] 郑忠楷, 蒋学程, 杜翔宇. 利用 FPGA 的数字调制解调系统仿真设计[J]. 信息通信, 2017, (9): 4–9.
ZHENG Zhongkai, JIANG Xuecheng, DU Xiangyu. Simulation design of digital modulation and demodulation system based on FPGA[J]. Information & Communications, 2017, (9): 4–9.
- [5] 赵军, 海川, 杨家玮. 遥测信号差分解调仿真[J]. 空间电子技术, 2009, 6(2): 29–32.
ZHAO Jun, HAI Chuan, YANG Jiawei. The simulation of differential demodulation for telemetry signal[J]. Space Electronic Technology, 2009, 6(2): 29–32.
- [6] 张磊. 一种新型数字鉴频器在调频接收机的应用[J]. 现代电子技术, 2012, 35(15): 87–89.
ZHANG Lei. Application of a novel digital frequency discriminator in FM receiver[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(15): 87–89.
- [7] 张博, 李少阳, 刘宇. 基于 SDR 的 FM 调制与解调器的实现[J]. 电子产品世界, 2019(7): 31–35.
ZHANG Bo, LI Shaoyang, LIU Yu. Implementation of FM modulation and demodulator based on SDR[J]. Electronic Engineering & Product World, 2019(7): 31–35.
- [8] 陈大海, 张健, 吕幼新. 遥测接收机的一种载波频偏抑制方法[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(5): 720–723,781.
CHEN Dahai, ZHANG Jian, LÜ Youxin. A new scheme to suppress carrier frequency deviation for telemetry receiver[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(5): 720–723,781.
- [9] 谢顺钦, 钟声, 范靖, 等. 大动态 PCM/FM 信号的载波频率同步[J]. 电讯技术, 2017, 57(3): 276–281.
XIE Shunqin, ZHONG Sheng, FAN Jing, et al. Carrier frequency synchronization for large dynamic PCM/FM signals[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(3): 276–281.

[作者简介]

- 王仁智 1984年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为遥测遥控、通信数据链、单脉冲跟踪接收。
吴江波 1987年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信数据链、遥测技术、产品可靠性提升。
张春泽 1978年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为信息传输与处理、卫星导航与应用。

(本文编辑: 傅 杰)