

文章编号: 1671-7449(2025)01-0007-06

调制指数对PCM-FM遥测系统性能影响分析

粟登银, 韩勇, 陈秋丰

(解放军63723部队, 山西忻州 036300)

摘要: 在不增加设备体积重量以及提高发射功率的前提下, 为满足高码率遥测数据传输的需求, 现有的脉冲编码调制-频调(Pulse Code Modulation Frequency Modulation, PCM-FM)遥测系统广泛使用多符号检测(Multiple Symbol Detection, MSD)算法和Turbo乘积码(TPC)技术。调制指数是PCM-FM遥测系统中的重要参数之一, 对系统带宽和误码率有重要影响。本文分析了MSD多符号检测算法原理, 通过计算互相关系数及Matlab仿真, 分析了调制指数大小对带宽和误码率的影响, 指出将调制指数设置为0.715较为合适; 分析了调制指数偏差对信噪比损耗的影响, 利用MSD算法的相位网格图分析了调制指数偏差对误码和码同步的影响, 指出随机数据比连“0”或连“1”数据具有更好的容忍能力。

关键词: PCM-FM; 多符号检测; 调制指数; 偏差; 随机数据; 连“0”数据

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025002

引用格式: 粟登银, 韩勇, 陈秋丰. 调制指数对PCM-FM遥测系统性能影响分析[J]. 测试技术学报, 2025, 39(1): 7-12.

SU Dengyin, HAN Yong, CHEN Qiufeng. Effect analysis of modulation index on the performance of PCM-FM telemetry system[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(1): 7-12.

Effect Analysis of Modulation Index on the Performance of PCM-FM Telemetry System

SU Dengyin, HAN Yong, CHEN Qiufeng

(PLA 63723 Unit, Xinzhou 036300, China)

Abstract: To meet the needs of high bit rate telemetry data transmission, existing PCM-FM telemetry systems widely use MSD multi-symbol detection algorithm and TPC encoding and decoding technology, without increasing the volume and weight of the equipment and improving the transmission power. The modulation index is one of the important parameters in PCM-FM telemetry systems, which has a significant impact on system bandwidth and bit error rate. This article analyzes the principle of MSD multi-symbol detection algorithm. By calculating the cross-correlation coefficient and Matlab simulation, the influence of modulation index size on bandwidth and bit error rate is analyzed. It is pointed out that setting the modulation index to 0.715 is more appropriate. The impact of modulation index deviation on signal-to-noise ratio loss was analyzed, and the phase grid diagram of multi symbol detection algorithm was used to analyze the impact of modulation index deviation on error and code synchronization. The fault-tolerant ability of different types of data on modulation index deviation was pointed out.

Key words: pluse code modulation frequency modulation(PCM-FM); multiple symbol detection(MSD); modulation index; deviation; random data; continuous “0” data

收稿日期: 2024-04-16

作者简介: 粟登银(1987-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事遥测数据处理研究。E-mail: sdy082057@163.com。

0 引言

脉冲编码调制-频调(Pulse Code Modulation-Frequency Modulation, PCM-FM)广泛应用于战略武器和运载火箭遥测系统中。在不增加箭上设备体积和发射功率的前提下,为实现提高数据传输速率的目的,现有遥测系统普遍采用Turbo卷积码(TPC)技术和多符号检测(Multiple Symbol Detection, MSD)算法。相关文献指出,采用这两种技术可以提高约9 dB的增益^[1-3]。MSD算法最早由Pelchat提出,其利用PCM-FM信号前后符号之间相位记忆性的特征,克服传统算法解调门限较高的不足。Geoghegan证明了当检测序列长度 $N=5$ 时,MSD算法和传统鉴频解调相比,理论上可使解调增益提高近3 dB。

调制指数又称为带宽效率,为频率偏移量与调制信号带宽的比值。在PCM-FM遥测系统中,频偏是调频波频谱偏移中心频率的量,频偏越大,调频波的频谱带宽越大。其含义就是频率在传播过程中,围绕中心频率震荡的周期变化速率。

本文针对MSD算法的特点,从实际需求出发,分析MSD算法中调制指数的大小和其偏差对PCM-FM信号解调误码性能的影响,为实践中参数选择提供一定依据。

1 多符号检测算法

传统PCM-FM解调方法仅利用单个码元内的信息,解调效果很容易受到解调方法的限制和外界因素的干扰,导致在低信噪比条件下的解调性能下降。PCM-FM体制是连续相位调制的一种,PCM-FM可表示为

$$r(t) = A \cos[2\pi f_c t + \theta(t; a) + \theta_0], \quad (1)$$

式中: A 为载波幅度; f_c 为载波频率; $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]$ 为传输码元序列; θ_0 为初始相位; $\theta(t; a)$ 为载波相位,表达式为

$$\theta(t; a) = 2\pi h \sum_{k=-\infty}^n a_k q(t - kT) = \varphi_n + \varphi(t; a), \quad nT \leq t \leq (n+1)T, \quad (2)$$

式中: h 为调制指数。相位响应函数 $q(t)$ 满足

$$r(t) = \begin{cases} s_1(t) = A \cos[2\pi f_c t + \theta(t; a_i) + \theta_0] = A \cos \omega_1 t, & 1 \leq i \leq n, \\ s_2(t) = A \cos[2\pi f_c t + \theta(t; a_{i+1}) + \theta_0] = A \cos \omega_2 t, & \end{cases} \quad (5)$$

$$q(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ \frac{t}{2T}, & 0 \leq t < T, \\ \frac{1}{2}, & t \geq T. \end{cases} \quad (3)$$

此时,载波相位 $\theta(t; a)$ 为

$$\theta(t; a) = 2\pi h a_n q(t - nT) + \pi h \sum_{t=-\infty}^{n-1} a_t, \quad nT \leq t \leq (n+1)T. \quad (4)$$

从上式可以看出,在PCM-FM遥测系统中,信号当前时刻的相位 $\theta(t; a)$ 与当前符号 a_n 和之前的所有符号 $\sum_{t=-\infty}^{n-1} a_t$ 有关。在解调时,可以利用这种相位记忆性,实现在同样的误码率要求下,更低的解调门限^[3-4]。

MSD算法利用信号码元之间的相位记忆性,特别适合相位连续的恒包络调制体制,如最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)以及PCM-FM。一般采用最大似然序列检测算法,通过相位网格图搜索欧式距离最小的路径对应的码元序列作为最终的解调结果。当接收端收到一个码元时,并不立即判决,而是持续观察后续几个码元,再对该码元进行判决,从而减小判决错误的概率^[5]。其相位网格图如图1所示,其中参数 h 为调制指数,可见调制指数是MSD算法中的重要参数。

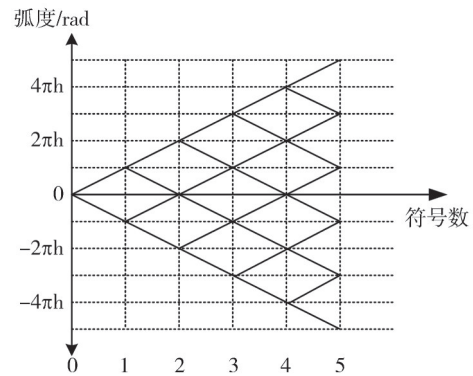


图1 MSD解调方法的相位变化网格图

Fig. 1 Phase change grid diagram of MSD demodulation method

2 调制指数对MSD解调性能的影响分析

2.1 调制指数大小对MSD解调性能的影响

针对PCM-FM信号,在一个码元周期内,可知

式中: A 为载波幅度; f_c 为载波频率; θ_0 为初始相位。这两个波形的互相关系数为

$$\rho = \frac{1}{E_b} \int_0^{T_b} s_1(t)s_2(t)dt, \quad (6)$$

式中: T_b 为码元周期; E_b 为信号能量, $E_b = \int_0^{T_b} s_1^2(t)dt$ 。

将 PCM-FM 波形代入到互相关系数计算公式中, 可以得到

$$\rho = \frac{\sin(\omega_2 - \omega_1)T_b}{(\omega_2 - \omega_1)T_b} + \frac{\sin(\omega_2 + \omega_1)T_b}{(\omega_2 + \omega_1)T_b}. \quad (7)$$

通常情况下, $(\omega_2 + \omega_1)T_b$ 远大于 1, 可以对上面的结果进行简化, 得到

$$\rho = \frac{\sin(\omega_2 - \omega_1)T_b}{(\omega_2 - \omega_1)T_b}. \quad (8)$$

ω_1 和 ω_2 为前后两个码元相对载波的角频偏。调制指数 h 决定信号频率变化的幅度, 即频偏的大小, 在 PCM-FM 中, $2\pi h$ 可以被视为与角频偏相关的参数^[6-7], 即 $2\pi h = (\omega_2 - \omega_1)T_b$ 。

互相关函数的曲线如图 2 所示。

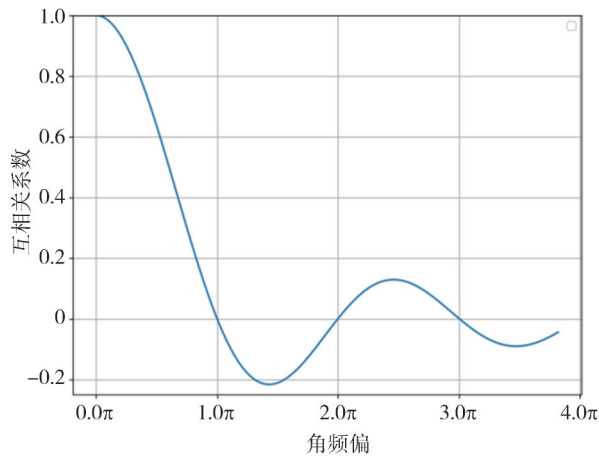


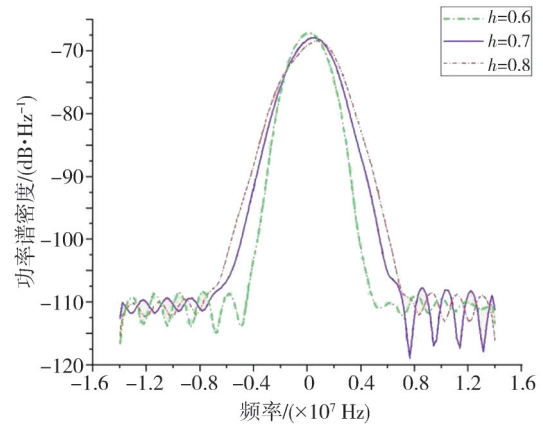
图 2 互相关系数曲线图

Fig. 2 Cross correlation function curve

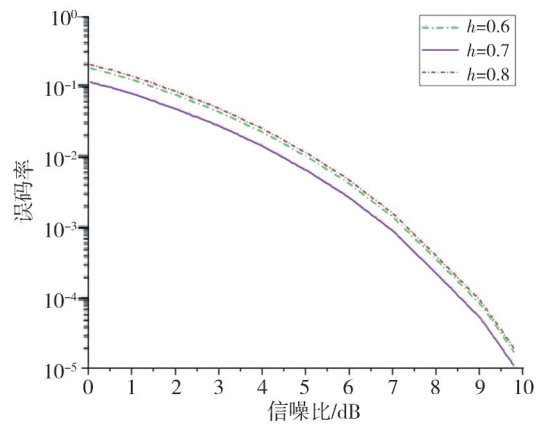
从图 2 中可以看出, 当 $(\omega_2 - \omega_1)T_b$ 为 1.43π 时, 互相关系数 ρ 取得最小值, 此时根据 $2\pi h = 1.43\pi$ 可得 h 为 0.715, 可以理解为此时两个信号具有超正交特性, 误码率一定的情况下, 解调所需能量最小。

在 PCM-FM 遥测系统的设计中, 如果选择调制指数 h 为 0.7, 那么理论上, 应用 MSD 方法能够在 $\frac{E_b}{N_0}$ 为 8.4 dB 时达到 $P_e = 1 \times 10^{-4}$ 的解调性能。图 3 给出了调制指数为 0.6、0.7、0.8 时, 在加性高斯白噪声信道模型中, PCM-FM 体制采用 MSD 方法的带宽和误码率^[8-10]。由图 3 可知, 信

号所需带宽与调制指数成正比, 调制指数越大, 带宽越大, 频带利用率越低。当误码率为 10^{-4} 时, 调制指数为 0.7 所需的信噪比最小。



(a) 带宽



(b) 误码率

图 3 不同调制指数下的带宽及误码率

Fig. 3 Bandwidth and bit error rate under different modulation indices

2.2 调制指数偏差对 MSD 解调性能的影响

调制指数偏差是影响 MSD 解调性能的另一因素, 调制指数偏差 Δh 定义为发射端和接收端的实际调制指数的差值 $h_T - h_R$ 。假设系统设计的调制指数为 0.7, 在加性高斯白噪声信道模型中, 不同偏差对解调性能的影响见表 1。可见调制指数偏差值越小, 信噪比损耗越小, 对 PCM-FM 遥测系统解调性能的影响越小^[11-12]。

下面从相位变化网格图分析调制指数偏差对解调性能影响的原因。假设发射端和接收端的调制指数都设置为 0.7, 此时接收端采用 MSD 解调对应的相位网格图如图 4 所示。

在图 4 的相位网格图中, 调频信号的初始相位为 0.7π , 后续的相位状态随码元序列在 $0 \sim 2\pi$ 之间

变化,当码元为“0”时,信号的相位减少 0.7π ,当码元为“1”时,信号的相位增加 0.7π 。当相位值超出 2π 后,对其进行 2π 整除后取余数作为对应的相位状态。这样,每一组码元序列都在相位网格图上对应一个相位路径。红色虚线为发射端发送信号相位路径,对应的调制码元序列为“0110010”,蓝色实线为接收端搜索到的最优相位路径,对应的码元序列为“0110010”。搜索到的相位路径与发送信号的相位路径重合,因此,接收端可正确解调数据。

表 1 调制指数偏差对解调性能的影响

Tab. 1 Effect of modulation index deviation on demodulation performance

误码率	不同调制指数偏差的信噪比损耗/dB						
	-0.075	-0.05	-0.025	0	0.025	0.05	0.075
10^{-4}	1.4	0.6	0.1	0	0.1	0.6	2.2
10^{-5}	1.5	0.7	0.3	0	0.1	0.7	2.5
10^{-6}	1.7	1.1	0.3	0	0.1	1.1	2.9

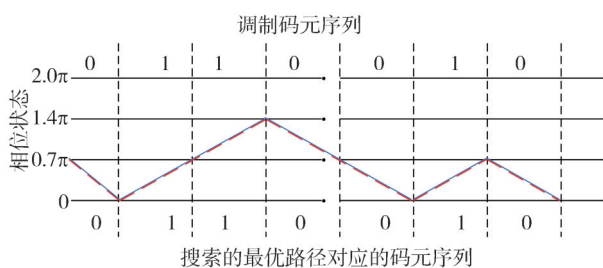


图 4 调制指数无偏差情况下的相位网格图

Fig. 4 Phase grid diagram under unbiased modulation index

如果发射端与接收端的调制指数存在偏差,例如发射端的调制指数为 0.84,接收端的调制指数为 0.7,此时,接收端采用 MSD 方法在相位网格图上搜索最优路径的结果与发送信号的相位路径存在偏差,且偏离程度与具体数据有关^[13-14]。

若发射端发送的数据为随机数,数据中存在较长的连“0”或“1”的可能性小,具有较多的“0”“1”跳变。例如,码元发送码元序列为“1011001”,接收端采用 MSD 解调对应的相位网格图如图 5 所示。

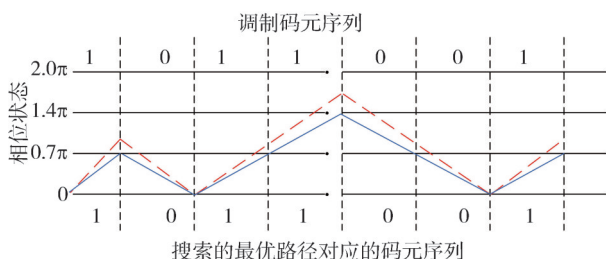


图 5 调制指数存在偏差情况下随机数对应的相位网格图

Fig. 5 Phase grid diagram corresponding to random numbers with modulation index deviation

图 5 中红色虚线为发送端在调制指数为 0.84 时的发送信号相位路径,对应的调制码元序列为“1011001”,蓝色实线为接收端搜索到的最优相位路径,对应的码元序列为“1011001”。可以看出,由于发射端调制指数存在偏差,导致搜索的最优路径与发送端发送信号的相位路径存在相位误差。但是,由于调制的数据为随机数,“0”“1”跳变较多,不存在较长的连“0”或连“1”,相位误差没有累计增大,搜索到的最优相位路径对应的码元序列与发送端调制的码元序列仍然一致。因此,调制数据为随机数的情况下,接收端采用 MSD 方法对调制指数偏差具有一定的容忍能力。

1) 若发送端调制的数据为较长的连“0”或连“1”,例如调制码元序列为“0000000”,发射端发送的信号对应的相位网格图如图 6 所示。

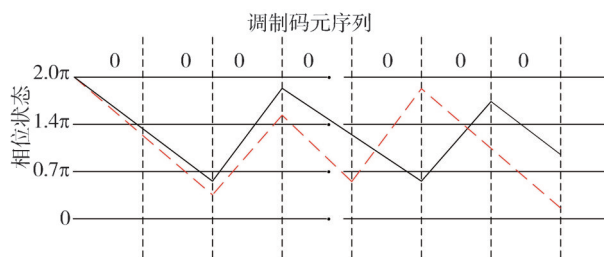


图 6 调制指数存在偏差情况下连“0”数据对应的相位网格图
Fig. 6 Phase grid diagram corresponding to continuous “0” data in the presence of modulation index deviation

图 6 中红色虚线为发送端在调制指数为 0.84 时的相位路径,黑色实线为发送端在调制指数为 0.7 时的相位路径,对应的码元序列为“0000000”。可以看出,由于调制指数存在偏差,发送端发送信号相位路径与正确相位路径存在相位误差。在调制数据为连“0”的情况下,相位误差会累计增大,导致发送端发送信号相位路径与正确路径随着连“0”码元个数的增加产生越来越大的偏离。

在连“0”调制数据的情况下,接收端采用 MSD 方法解调对应的相位网格图如图 7 所示。

图 7 中红色虚线为发送端在调制指数为 0.84 时的发送信号相位路径,对应的调制码元序列为“0000000”,蓝色实线为接收端采用 MSD 方法搜索到的最优相位路径,对应的码元序列为“0010000”。可以看出,由于发送端调制指数存在偏差,导致在调制的数据为较长连“0”的情况下,接收端采用 MSD 方法搜索到的最优路径对应的码元序列与调制码元序列产生偏差。在根据 MSD 方法搜索的最优路径进行码元判决输出时,将会

产生误码,当解调误码率超出 TPC 译码纠错能力时,接收端将无法正确解调数据。

调制指数偏差影响采用 MSD 方法解调性能的同时会对接收端的码同步产生影响。根据以上分析,当发送端调制指数存在偏差时,在调制数据为连“0”或连“1”的情况下,相位的累计误差增大,产生误码错误,该错误将会导致接收端码同步模块处于不稳定的工作状态,最终引起码同步失锁。

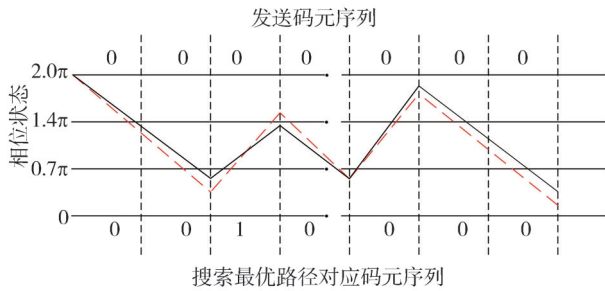


图 7 调制指数存在偏差情况下连“0”数据采用 MSD 解调的相位网格图

Fig. 7 Phase grid diagram of MSD demodulation for continuous “0” data with bias in modulation index

2.3 测试结果

由发射机、中心程序单元、摄像头搭建简易遥测系统。发射端调制指数设置为 0.84 和 0.7 两种状态,接收端调制指数为 0.7,模拟发射端和接收端有无调制指数偏差两种情况。接收端的误码率必须小于 1×10^{-4} 才能正常解调,使得数据满足判读要求。设置摄像头断开和连接两种试验状态,摄像头断开时,遥测帧中填充固定值 0xFF,用以模拟连“1”状态;摄像头连接时,用以模拟随机数据。通过调整接收天线指向,测试不同信噪比下的误码率。

存在调制指数偏差的情况下,当摄像头连接时,接收端能够正常解调,误码率在合格范围内;摄像头断开时,接收端解调失败,误码率超差。若不存在调制指数偏差,在摄像头断开和连接两种状态,接收端都能正常解调,数据满足要求。测试结果见表 2。

表 2 测试结果

Tab. 2 Test results

信噪比/ dB	调制指数存在 偏差的误码率		调制指数不存在 偏差的误差率	
	随机数据	连“1”数据	随机数据	连“1”数据
8.6	2×10^{-4}	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
9.2	4×10^{-5}	2×10^{-3}	1×10^{-5}	1×10^{-5}
9.6	2×10^{-6}	6×10^{-3}	1×10^{-6}	1×10^{-6}

3 结 语

针对采用 MSD 算法和 TPC 编译码技术的 PCM-FM 性能增强遥测系统,采用定性分析与定量分析相结合的方法,通过 MSD 算法的解调原理计算了 PCM-FM 遥测系统中信号的互相关系数,得出理想的调制指数为 0.715。调制指数 h 决定信号频率变化的幅度,即频偏的大小,调制指数增大,信号的带宽也增加。从频带效率考虑,调制指数不宜过大,但过小又会导致码间干扰而不利于信号的检测,故应当设置合适大小的调制指数^[15]。发射端和接收端的调制指数偏差越小,信噪比损耗越小。调制指数偏差对误码和码同步的影响随着调制数据的不同而有所差别,随机数据比连“0”或连“1”数据的容忍能力更强。遥测系统测试过程中,应充分加电考核,确保发射端和接收端调制指数设置一致。同时,在遥测帧格式设计中,合理设计遥测参数在波道中的位置以及填充字,避免出现连“0”或连“1”数据。

参考文献:

[1] 李梓博, 侯孝民, 郑海昕, 等. 基于 MSD 的 PCM/FM 信号解调参数性能研究[J]. 无线电工程, 2014, 44(8): 38-40.
LI Zibo, HOU Xiaomin, ZHENG Haixin, et al. Research on parameters performance of PCM/FM signal demodulation based on multi symbol detection[J]. Radio Engineering, 2014, 44(8): 38-40. (in Chinese)

[2] 王晓波, 吴岭, 徐松艳. MSD 与 TPC 技术在 PCM-FM 遥测系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28(S1): 49-53.
WANG Xiaobo, WU Ling, XU Songyan. Apply MSD and TPC in the PCM-FM telemetry system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(S1): 49-53. (in Chinese)

[3] 郝建民. 两项技术使 PCM/FM 遥测系统信噪比增益提高 9dB[J]. 遥测遥控, 2004, 25(6): 6-8.
HAO Jianmin. Increasing PCM/FM telemetry SNR up 9dB with two techniques[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2004, 25(6): 6-8. (in Chinese)

[4] 孙雪峰, 王志有, 宋锐. 新型航天遥测信号调制解调技术[J]. 测试技术学报, 2016, 30(1): 34-39.
SUN Xuefeng, WANG Zhiyou, SONG Rui. New modulation and demodulation techniques of spacecraft telemetry signal[J]. Journal of Test and Measurement

- Technology, 2016, 30(1): 34-39. (in Chinese)
- [5] 马新革. PCM/FM 遥测接收系统多符号检测技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.
- [6] 王永生, 谢晓方. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的遥测数据建模预测[J]. 测试技术学报, 2014, 28(5): 449-455.
- WANG Yongsheng, XIE Xiaofang. Modeling and forecasting of telemetric data based on the Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2014, 28(5): 449-455. (in Chinese)
- [7] LI Z, YAO Y, ZHOU Q, et al. Low-complexity I/Q imbalance calibration algorithm based on zero-IF receiver[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2023, 32(2): 66-71.
- [8] PELCHAT M G, DAVIS R, LUNTZ M. Coherent demodulation of continuous phase binary FSK signals [C]//International Telemetry Conference, 1971: 181-190.
- [9] OSBORNE W, LUNTZ M. Coherent and noncoherent detection CPFSK[J]. IEEE Transactions on Communications, 1974, 22(8): 1023-1036.
- [10] GEOGHEGAN M. Improving the detection efficiency of conventional PCM/FM telemetry by using a multi-symbol demodulator [C]//Proceedings of the 2000 International Telemetry Conference, 2000: 675-682.
- [11] GEOGHEGAN M. Experimental results for multi-symbol detection of PCM/FM [C]//Proceedings of the 2001 International Telemetry Conference, 2001: 114-118.
- [12] FRANKS L. Carrier and bit synchronization in data communication: a tutorial review [J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(8): 1107-1121.
- [13] OERDER M, MEYER H. Digital filter and square timing recovery [J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36(5): 605-612.
- [14] ERUP L, GARDNER F M, HARRIS R A. Interpolation in digital modems. II. Implementation and performance [J]. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(6): 998-1008.
- [15] 杨仁宝, 祝转民, 孟宪贵. 组件化遥测处理方法的设计与实现 [J]. 测试技术学报, 2010, 24(4): 299-303.
- YANG Renbao, ZHU Zhuanmin, MENG Xiangui. Design and implementation of component method for telemetry processing[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(4): 299-303. (in Chinese)

声 明

本刊已许可中国知网、万方数据知识服务平台、超星网等多家单位以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述各家网络著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。
