

遥测应用 MSD+TPC 技术时中频带宽的选取方法

曾铖璐, 王 威, 尹利博
(中国酒泉卫星发射中心 酒泉 736200)

摘要: 针对码速率的提高, 越来越多的脉冲编码调制-调频 (PCM-FM) 遥测信号应用了多符号检测 (MSD) 与 Turbo 乘积码 (TPC) 技术, 只有合理选取遥测系统的中频带宽, 才能保证遥测系统的通信质量。对 PCM-FM 遥测信号应用 MSD+TPC 技术时的频谱特性进行了分析, 给出了中频带宽在实际应用中的最佳选取方法。

关键词: 码速率; 多符号检测; Turbo 乘积码; PCM-FM; 中频带宽

中图分类号: TN911.2 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)03-0021-04

Selection method of intermediate frequency bandwidth when applied MSD and TPC technology in telemetry system

ZENG Chenglu, WANG Wei, YIN Libo
(Jiu Quan Satellite Launch Center in China, Jiu Quan 736200, China)

Abstract: For improvement of the code rate, Multi-Symbol Detection(MSD) and Turbo Product Code(TPC) technology is applied in PCM-FM telemetry system more and more. Only by reasonably selecting the intermediate frequency bandwidth in the telemetry system can the communication quality be guaranteed. In this paper, the spectrum characteristic of MSD and TPC technology applied to PCM-FM telemetry signal is analyzed, and the best intermediate frequency bandwidth selection method in practical application is provided.

Key words: Code rate; Multi-Symbol Detection; Turbo Product Code; PCM-FM; Intermediate Frequency Bandwidth

引 言

导弹飞行试验任务对遥测系统的需求越来越高, 为了获得更加详细的试验数据, 数据传输速率也越来越高。近年来, 一般任务的最大遥测码速率已经由 2Mbps 增加到 10Mbps。为了提高信道增益且不增加地面天线口径和发射功率, 设计人员使用了一种性能增强技术, 即将多符号检测 MSD (Multi Symbol Detection) 与 Turbo 乘积码 TPC (Turbo Product Code) 技术相结合用于脉冲编码调制-调频 (PCM-FM) 遥测体制, 从而大规模地节约成本, 提升系统性能。但是, 使用 MSD+TPC 技术会引起遥测信号占用的中频带宽增加, 容易被其他信号干扰。因此, 在保证传输质量的前提下, 合理选择遥测系统的中频带宽参数是十分关键的。

1 多符号检测与 Turbo 乘积码技术

1.1 简介

MSD 技术最初是为检测连续相位频移键控体制 (CPM) 信号提出的, 特别适合 MSK 体制和 PCM-FM 体制, 一般采用最大似然序列检测算法。检测过程是通过相位网格图搜索最小欧氏距离所对应的路径, 达到最佳检测。它充分利用信号间记忆的关联信息, 接收端收到一个码元信号时, 并不立即进行判决, 而是要持续观察后续 3~5 个码元后, 再对这一码元判决, 从而减少码元判决错误, 提高接收机解调性能。

TPC 的编码方法是把信息码元排成 $k_1 \times k_2$ 的矩阵。编码时先按行进行编码, 每行编成 $n_2 \times k_2$ 的系统线性分组码 C_2 ; 然后再按列编码, 每列编成 $n_1 \times k_1$ 的系统线性分组码 C_1 , 从而构成 $(n, k) = (n_1, k_1) \times (n_2, k_2)$

的乘积码。为了便于实现, 常采用相同的 C1、C2 的扩展汉明码^[1]。

1.2 在 PCM-FM 遥测系统中应用 MSD+TPC 技术

MSD 技术采用非相干最大似然序列检测算法, 使 PCM-FM 体制获得了与相干 PSK 体制相当的解调性能的同时保留了 PCM-FM 体制的优点, 从根本上克服了门限效应, 为高效信道编译码方式提供了前提条件和技术保障。TPC 技术是一种新型的编译码方法, 不仅能获取显著的信道增益, 且译码延时相对较小。在 PCM-FM 体制中采用这两项技术, 理论上比原系统可获得约 9dB 的信道增益, 其中采用 MSD 技术可以获得约 3dB 的增益, 采用 TPC 编译码技术可获得约 6dB 的增益^[2]。MSD+TPC 技术在遥测接收设备 PCM-FM 体制中的应用如图 1 所示。

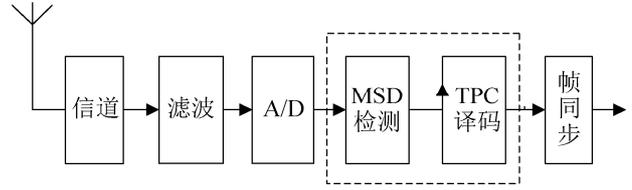


图 1 MSD+TPC 技术的应用

Fig. 1 application of MSD and TPC technology

2 理论分析

2.1 PCM-FM 遥测信号的中频带宽选取方法

PCM-FM 遥测信号的调制指数一般为 0.7, 根据遥测码速率设置基带接收机中频带宽, 经验公式为

$$\text{中频带宽} = (1 + \text{调制指数}) \times \text{码速率} \quad (1)$$

对于 PCM-FM 体制, 经过 $0.7R_b$ 带宽滤波后, 信号能量大多会集中在 $R_b \sim 1.2R_b$ 的带宽内^[3]。实际应用中, 由于会出现目标高速运动引起的多普勒频移、发射机和接收设备的零漂以及滤波器的非线性滤波等情况, 因此, 实际选取的中频带宽要大于理想值。

根据 Carson 法则中频带宽有以下表达方式:

$$B_d = 2(\Delta f + f_m) \quad (2)$$

其中, Δf 为调制频偏。一般情况下, 当 Δf 为 $0.35R_b$, 预调滤波器截止 f_m 为 $0.5R_b$, 则 B_d 为 $1.7R_b$ 。这种方法计算的结果与经验公式一致。

2.2 应用 MSD+TPC 技术时的带宽计算

目前, PCM-FM 遥测体制普遍采用调制指数 h 为 0.7 的二进制连续相位频移键控 (CPFSK) 的调制技术, 其信号波形表示为

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi h \sum_{k=-\infty}^n a_k q(t - kT) \right], \quad nT \leq t \leq (n+1)T \quad (3)$$

式中, E 为符号能量; T 为码元周期; f_c 为载波频率; a_k 为二进制码元序列, $a_k \in \{\pm 1\}$; $q(t)$ 为矩形脉冲响应函数, 可表示为^[4]

$$q(t) = \begin{cases} \frac{t}{2T}, & 0 < t \leq T \\ \frac{1}{2}, & t > T \end{cases} \quad (4)$$

当 CPFSK 信号采用 MSD 解调时, 通过对若干周期内接收信号的路径进行联合计算来实现检测, 假设发射信号为 $s(t)$, 接收信道存在加性高斯噪声信道, $n(t)$ 为加性高斯噪声, 则接收机输入端的接收信号可表示为

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (5)$$

根据最大似然准则, 收到信号 $r(t)$ 的似然概率为

$$p(r(t)|s(t)) = F \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \int_{(n-N+1)T}^{(n+1)T} |r(t) - s(t)|^2 dt \right\} = F \exp \left\{ -\frac{1}{N_0} \sum_{i=n-N+1}^n \left(\int_{iT}^{(i+1)T} |r(t) - s(t)|^2 dt \right) \right\} \quad (6)$$

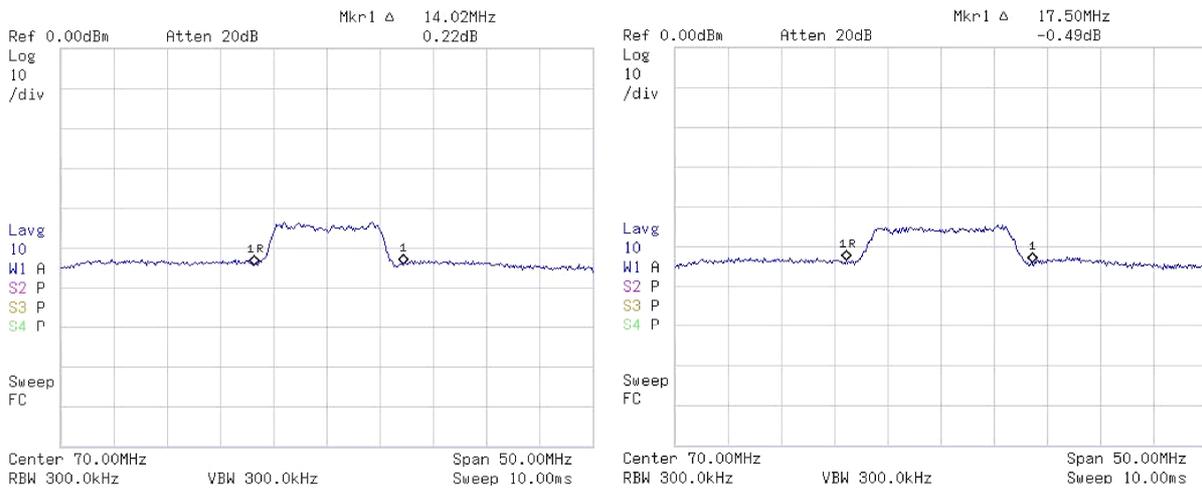
式中, F 为一个与 $s(t)$ 独立的常量; N_0 为噪声功率, N 为观测符号数, $\int_{(n-N+1)T}^{(n+1)T} |r(t) - s(t)|^2 dt$ 为 $[iT, (i+1)T]$

间隔内信号 $r(t)$ 与 $s(t)$ 的欧氏距离度量。因此，最大化似然率 $p(r(t)|s(t))$ 即为最小化 $r(t)$ 与 $s(t)$ 的欧氏距离。MSD 解调就是寻找与 $r(t)$ 具有最小欧氏距离路径的 $s(t)$ ，将其对应的码元序列作为解调结果输出。

TPC 对具有一定帧格式的遥测数据进行编码，形成相互独立的编码块，经过 TPC 译码，剥离校验数据后恢复原始的遥测数据，对遥测数据的帧格式、字长和码型都没有特殊的要求。由于每个译码块是相互独立的，比卷积码具有更好的防止误码扩散能力，这对于数据的保护有重要意义。同其它所有的编译码方式一样，TPC 编译码也会引入额外的带宽。

PCM-FM 体制 10Mbps 码速率下两种方式的实测中频信号频谱如图 2 所示，可以看出，未应用 MSD+TPC 技术时占用带宽约为 14MHz，而应用 MSD+TPC 技术时占用带宽约为 17.5MHz，带宽增加约 25%。另外，在 2Mbps 码速率下也进行了测试，未应用 MSD+TPC 技术时带宽约为 3.3MHz，而应用 MSD+TPC 技术时占用带宽约为 4.1MHz，带宽增加约 25%。通过多个码速率下的带宽测试，可得出两种方式的实测带宽比有以下表达方式：

$$B_{MSD+TPC} \approx B_{original} \times 125\% \tag{7}$$



(a) 未应用 MSD+TPC 技术的频谱 (b) 应用 MSD+TPC 技术的频谱
(a) The spectrum without applied MSD+TPC (b) The spectrum applied MSD+TPC

图 2 PCM-FM 体制 10Mbps 码速率的实测信号频谱

Fig. 2 The spectrum characteristic of PCM-FM 10Mbps code rate telemetry signal

3 测试结果和比较

对 PCM-FM 信号用传统鉴频解调，中频带宽决定的带内信号的信噪比是影响解调误码率性能的重要因素。由于接收到的信号中含有噪声，信号首先通过带通滤波器滤除信号带宽外的噪声信号，然后对调频波进行微分处理，所以，需要根据码速率合理设置中频带宽。根据遥测设备接收中频带宽设置的情况总结得出，目前 2Mbps~10Mbps 码速率一般常用以下几档：3.3MHz、4MHz、6MHz、10MHz、15MHz、20MHz、24MHz。用遥测设备的射频有线闭环链路，在调频遥测基带分别应用和未应用 MSD+TPC 技术，通过 3 种不同的码速率在各自门限附近的载噪比(S/Φ)下，设置不同的中频带宽，解调误码率测试结果示于图 3。

通过测试可以得出：

① 未应用 MSD+TPC 的传统非相干鉴频解调方式的解调性能对中频带宽的设置相当敏感。当中频带宽设置太宽时，引入的噪声较大，使鉴频器输入信噪比恶化，引起解调误码性能下降；当中频带宽设置太窄时，信号能量损失较大，也会导致系统解调性能的急剧损失。

② 应用 MSD+TPC 技术时，解调误码率仅与带内信号能量有关，当中频带宽取到大于一定值后，解调误码性能很接近，略有增大但保持在相同数量级上；中频带宽小于一定值时，信号能量急剧减小，

导致误码率明显恶化。理论上, 在无中频带宽限制时, 应用 MSD+TPC 技术的接收机具有最好的解调误码性能, 但在实际应用中, 由于有对带外干扰信号的抑制要求, 也要设置一定的中频带宽。

③ 通过两图对比可以看出, 误码率相当时, 相对于传统频解调方式, 应用 MSD+TPC 技术后载噪比需求降低 6dB, 说明 MSD+TPC 技术可以在实际应用过程中获得约 6dB 的信道增益。

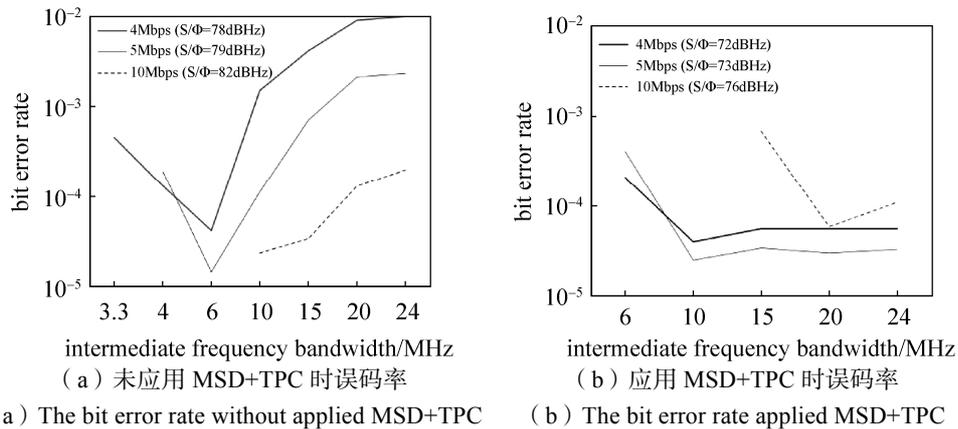


图 3 3 种码速率在各中频带宽下的实测误码率

Fig. 3 The bit error rate of 3 code rates in different intermediate frequency bandwidth

通过测试结果比较, 应用 MSD+TPC 技术时, 可以获取 6dB 的信道增益, 但所需要的中频带宽会变大。通过理论计算, 中频带宽为 $1.7R_b \times 125\% \approx 2$ 倍, 而实际滤波器带宽可选只有固定的几档, 实测中, 中频带宽约为 2 倍码速率时基带具有最佳的解调性能, 与理论推论一致。所以, 在实际应用 MSD+TPC 技术时, 推荐中频带宽为 2 倍码速率。

表 1 应用 MSD+TPC 技术时的最佳中频带宽
Table 1 The optimum intermediate frequency bandwidth when applying MSD+TPC technology

码速率	4Mbps	5Mbps	10Mbps
最佳中频带宽	10MHz	10MHz	20MHz

4 结束语

综上所述, 中频带宽参数的设置对 PCM-FM 遥测信号的解调性能具有重要影响。测试结果表明, 应用 MSD+TPC 技术时, 中频带宽为 2 倍码速率时基带具有最佳的解调误码性能。实际应用中, 推荐中频带宽为 2 倍码速率。

参考文献

[1] 王晓波, 吴岭, 徐松艳. MSD+TPC 技术在 PCM/FM 遥测系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2007, 28: 49-53.
WANG Xiaobo, WU Ling, XU Songyan. Research of apply MSD and TPC in the PCM-FM telemetry system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2007, 28(s1): 49-53.

[2] 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. Two techniques to improve the signal-to-noise ratio gain of PCM/FM telemetry system 9 dB[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2004, 25(6): 6-8.

[3] 付书堂, 朱学勇. 遥测中频带宽选取方法[J]. 科技信息, 2012, 23(1): 44-45.
FU Shutang, ZHU Xueyong. The intermediate frequency bandwidth selected method about telemetry system[J]. Science and Technology Information, 2012, 23(1): 44-45.

[4] 朱宏权, 王俊峰. 中频带宽对调频遥测解调性能的影响分析[J]. 无线电工程, 2013, 43(6): 17-19.
ZHU Hongquan, WANG Junfeng. Influence of intermediate frequency bandwidth setting on demodulation performance of FM telemetry system[J]. Radio Engineering, 2013, 43(6): 17-19.