

## 再入环境中的遥测信号软解调研究

付刚<sup>1</sup>, 吴广志<sup>1</sup>, 李仁龙<sup>1</sup>, 王丽萍<sup>2</sup>

(1. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431; 2. 上海建桥学院, 上海 201319)

**摘要:** PCM/FM 遥测形式是飞行器再入遥测中应用较广泛的一种信号体制; 针对跟踪目标再入过程中信噪比较低, 而传统非相干鉴频法存在门限过高的问题, 结合调频遥测信号的相位连续性, 研究一种基于基带正交复旋转多符号检测 (MSD) 的软件化解调方法; 通过仿真, 验证了该方法可使解调门限有效降低。

**关键词:** 再入遥测; PCM/FM; 软解调

## Research on Soft Demodulation of Telemetry Signal in Reentry Telemetry Environment

Fu Gang<sup>1</sup>, Wu Guangzhi<sup>1</sup>, Li Renlong<sup>1</sup>, Wang Liping<sup>2</sup>

(1. China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China;

2. Shanghai Jianqiao University, Shanghai 201319, China)

**Abstract:** PCM/FM system is one of the most widely used in the missile and rocket telemetry system. For the problem that the breakthrough tradition demodulation method of demodulation threshold led by the telemetry signals low signal noise ratio (SNR) of target spacecraft reentry telemetry environment, a baseband complex rotating orthogonal MSD based soft PCM/FM signal demodulation method is studied combined with the PCM/FM signal phase characteristic. The corresponding synchronization algorithm is applied to ensure the smooth operation of the demodulation. The simulation and test results verify the soft demodulation algorithm can make reduce the demodulation threshold effectively.

**Keywords:** reentry telemetry; PCM/FM; soft demodulation

## 0 引言

再入遥测信道是信号传输信道中比较特殊的一种信道, 当跟踪目标进入该信道时, 主要会受到黑障和多径带来的各种影响<sup>[1]</sup>。其中黑障主要是电离层带来的信号不同程度的中断性传输, 而多径效应则是由于点对点传播的特性导致信号时域失真和频域选择性衰落。但这两种因素都可归类于经过再入遥测信道的信号信噪比偏低问题, 给终端解调门限带来了巨大的挑战。

为此本文研究一种基于基带正交复旋转 MSD 的解调方法对 PCM/FM 遥测信号在再入遥测环境下进行解调。该方法与蹊泳中频 MSD 方法对比, 可以在计算量大大降低的前提下, 保证解调的性能。相比于传统的非相干鉴频解调方法, 可以使信道增益提高 3 dB<sup>[2]</sup>, 如此便有效降低了解调门限。最后, 通过仿真, 验证了该算法的有效性。

## 1 信道模型

每一种解调方法适用的条件都不同, 为此, 在研究解调方法之前, 有必要先对信号传输信道进行细致地研究。当跟踪目标经过再入信道时, 由于平台相对运动和多径效应等影响因素

存在, 会导致信号时域波形严重失真以及频域选择性衰落。经典的信道模型分布有 3 种: 即 Rice 分布、瑞利分布和 Nakagami-m 分布。根据目标信号在再入信道中传播特点, 选择瑞利信道更符合再入遥测信道的特性, 所以, 下面重点针对瑞利衰落信道模型进行分析和仿真研究。

当信号经过离散多径衰落信道事, 可令信道模型<sup>[3]</sup>如下所示:

$$R(t) = \sum_{k=1}^{N(t)} r_k(t) s_{FM}(t - \tau_k) \quad (1)$$

式中,  $s_{FM}(t)$  是信源端送出的遥测信息,  $r_k(t)$  是复数域的某条路径衰落因子, 该衰落因子满足瑞利分布,  $\tau_k$  为某条路径的时间衰落因子。下面, 为了更形象说明这种多径信道对遥测信号

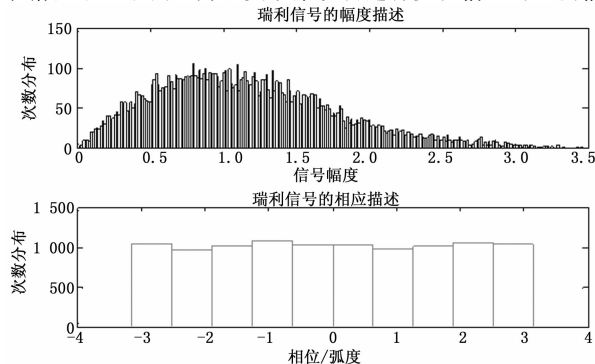


图1 多径衰落信道的幅度和相位分布

收稿日期: 2013-11-29; 修回日期: 2014-01-26。

基金项目: 上海市教委创新项目(AASH1202)。

作者简介: 付刚(1987-), 男, 吉林九台人, 硕士生, 主要从事基带信号处理方向的研究。

造成的影响, 针对这种多径衰落信道进行包络仿真以及对经过该信道的信号影响情况进行展示。

从图 1 中可得出, 经过多径衰落信道的信号包络服从瑞利分布, 全相位服从均匀分布, 即经过该信道的信号符合瑞利分布。

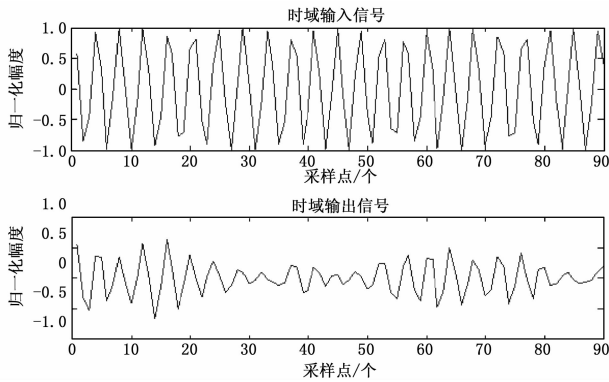


图 2 调频遥测经过多径衰落信道前后的时域对比图

从图 2 可以看出, 信号经过多径衰落信道, 时域影响为波形严重失真, 给解调带来了很大不便, 下面就对本文的解调方法进行详细地研究和推导。

## 2 基带正交复旋转 MSD 算法

假设遥测终端接收到的中频遥测信号为:

$$s(t) = \cos[\omega_c + f(t) + \theta_1] \quad (2)$$

终端在接收到中频信号后, 先对中频信号进行正交下变频, 即用本地的固定频率本振信号对接收中频信号进行混频处理, 处理后得到正交的两路信号, 即 (I/Q):

$$I = \cos[f(t) + \theta_1] \quad (3)$$

$$Q = -\sin[f(t) + \theta_1] \quad (4)$$

为了不失信号中的信息成分, 需对分离出的两路正交信号进行复数域的合并处理, 即:

$$R = I + j \cdot Q = \cos[f(t) + \theta_1] - j \sin[f(t) + \theta_1] \quad (5)$$

此时, 基于最大似然的模式, 对应调制信息的形式, 对应生成本地的复数域信号:

$$L = \cos[f(t) + \theta_2] + j \sin[f(t) + \theta_2] \quad (6)$$

将本地复数信号与接收并变频的复数信号进行复数域的乘法运算, 即:

$$R \cdot L = \cos(\theta_2 - \theta_1) + j \sin(\theta_2 - \theta_1) = I_B + jQ_B \quad (7)$$

公式 (7) 成立的条件是当本地信号调制信息与接收信号调制信息完全一致。此时接收信号与本地信号相乘的结果是固定值, 不受相位等影响。为此, 可以基于最大似然的思想, 用事先生成好的本地信号与接收信号进行复数域的乘法运算, 从而根据乘积结果即可得到解调结果。由于离散域的运算是基于采样点进行的, 为此, 对公式 (7) 得到的乘积结果进行一定时间长度 (设采样点数为  $N_c$ ) 内的积分, 即:

$$M = N_c \cdot I_B + jN_c \cdot Q_B \quad (8)$$

公式 (8) 相当于对两个信号的积分运算, 但结果仍为复数, 为了方便比较大小, 下面对该结果进行取模求平方运算:

$$S = N_c^2 \cdot (I_B^2 + Q_B^2) \quad (9)$$

对于公式 (9) 的结果, 更便于比较两种复数信号的相关程度, MSD 核心即利用本地所有可能的信号, 与接收信号进行相关积分, 最后利用结果进行比较得出解调信号。具体简易实现, 如图 3 所示。

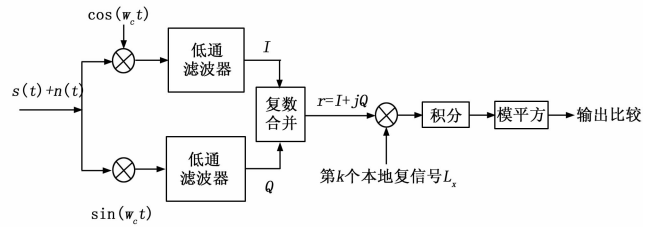


图 3 正交 MSD 简易实现框图

图 3 所示的基带正交 MSD 实现方法是基于基带信号进行的, 即信号要先经过正交下变频处理, 由于基带信号的频率较低, 数据比特率也较低, 数据适合在计算机软件中进行运算, 但由于每做一次多符号相关检测需要将本地的  $2^N$  组信号分别与接收信号做一次相关运算, 大大增加了 CPU 的负荷, 为此, 对算法的运算量进行优化非常有必要, 下面就在该算法中引入复旋转技术来达到降低计算量的目的。

信号在脉冲编码之后, 调频之前要经过预调滤波, 受滤波器特性的影响, 每个调制码元的相位会收到之前一个和之后一个码元的影响, 由于 3 个码元的排列组合范围是可知的, 也就是说对于某个特定的调制码元, 该码元的相位范围是相对固定的。由于本文的解调算法是基于遥测信号的相位连续特性, 因此只要在一个码元上求出相关积分结果, 其余码元在相位可知的基础上, 即可根据相位关系得到各个码元的相关结果, 从而对观测长度内所有码元的相关结果求和即为普通 MSD 的似然值结果。

假设信息采样率  $f_s = 56$  MHz, 码率为 2 Mbps, 调制指数为  $h = 0.7$ , 选用的预调滤波器 3 dB 带宽为  $0.63 f_b$ , 则经过预调滤波器的码元波形与相位情况如表 1 和图 4 所示。由图 4 可以看出, 调制码元经过预调滤波, 共有 8 种可能的码元波形, 中间的码元表示当前调制码元信息, 该码元的相位会受到前后两个码元的影响, 对应表 1 中的 8 种相位值。本地可根据该规律事先产生 8 种相位对应的本地复数信号  $L_1, L_2, \dots, L_8$ , 与接收信号先在一个码元长度上进行相关积分, 得到 8 种复数结果  $M_{10}(1), M_{20}(1), \dots, M_{80}(1)$ 。

表 1 受预调滤波影响的 8 种码元相位情况

序号	(1)	(2)	(3)	(4)
调制码元	-1 -1 -1	-1 -1 +1	+1 -1 -1	+1 -1 +1
相位	$-0.7\pi$	$-0.58\pi$	$-0.58\pi$	$-0.47\pi$
序号	(5)	(6)	(7)	(8)
调制码元	+1 +1 +1	+1 +1 -1	-1 +1 +1	-1 +1 -1
相位	$0.7\pi$	$0.58\pi$	$0.58\pi$	$0.47\pi$

假设观测长度为  $N$ , 由于受预调滤波的影响, 本地信号要有  $2^{N+2}$  种, 即当观测长度为 5 时, 本地要生成 128 种本地复

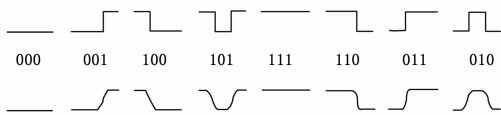


图 4 经过预调滤波的调制码元对应的 8 种码元波形

信号，计算出每种本地信号中每个码元的相位情况，根据相位情况即可对之前得到的一个码元长度上的相关结果进行复数域的转换，即  $M_{11}(1), \dots, M_{1p}(1), M_{21}(1), \dots, M_{2p}(1), M_{s1}(1), \dots, M_{sp}(1)$ 。最后对观测长度内的所有码元的相关结果求和模平方运算，比较结果即可得到解调结果。

综上，基带正交复旋转多符号的核心思想可以表述为：仅仅通过用一个码元对应的 8 种可能的本地信号波形对接收到的正交复信号在当前一个码元时段内进行相关处理，而观测长度内之前其他码元上的相关值都通过对当前码元上的相关值进行某些角度的复旋转得到，同样可以实现 5 个码元的观测长度内进行相关的效果。与此同时，这种基带正交复旋转多符号检测的方法每次相关的长度以及进行相关的次数都明显下降，避免了大规模的相关运算，尤其是避免了随观测长度成指数级增长的普通 MSD 相关运算量，总计算量显著降低，更易于在软件处理中的实现。

### 3 位同步

由以上分析研究可以看出，基带正交复旋转 MSD 算法可在降低计算量的前提下达到 MSD 的降低门限目的，但良好的性能要以完美的同步作为保障，为此，下面研究一种位同步方法，保障解调的顺利进行，如图 5 所示。

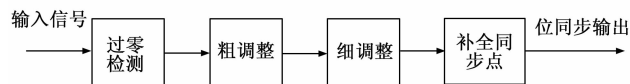


图 5 位同步算法流程图

1) 过零检测。当输入信号后，做过零检测处理，当信号经过再入信道，信号波形严重畸变，所以先检测连续若干个低电平或高电平，对一些突发性的干扰失真先进行消除。

2) 粗调整。经过再入遥测信道的信号，尽管经过了过零检测，还是不能避免有一些错误的电平，为此，要对同步点进行粗略的调整，即令每一个同步点前后若干个同步点之间的间隔是否满足码元长度的整数倍关系，若不满足，则将该同步点舍去。

3) 细调整。为了更准确地得到同步点信息，需要将上一步中的同步信息进一步调整，即将两个同步点之间的同步间隔进一步放大，将不满足整数倍码元长度间隔的同步点舍去。

4) 补全同步点。在上面两个步骤的处理中，不需考虑同步点的个数，只需对同步点进行提纯即可，经过提纯的位同步

点，两两之间的间隔可能不满足一个码元的长度，此时需要对缺少同步点的位置进行补充位同步点，从而得到完整的位同步信息。

### 4 解调性能

经过以上对基带正交复旋转 MSD 解调方法的研究，下面用仿真误码率曲线来展示该方法的效果，在相同信道环境下，用基带正交复旋转 MSD 解调方法进行解调误码率解算，然后与传统非相干鉴频法<sup>[4]</sup>以及短时傅里叶法<sup>[5]</sup>进行解调性能对比，对比结果如图 6 所示。

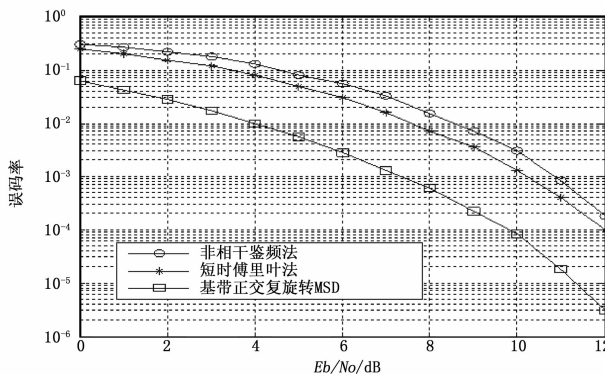


图 6 误码率曲线比较图

由图 6 可以很容易看出，基带正交复旋转 MSD 解调方法的性能远好于非相干鉴频法和短时傅里叶法，在误码率  $10^{-4}$  处约有 3 dB 的信道增益，大大扩展了解调门限，展示了该方法的优越性能，为目标飞行器再入遥测提供了参考借鉴价值。

### 5 结束语

研究了一种基带正交复旋转 MSD 解调算法。整个解调系统通过计算机仿真，在遥测信号经过再入信道情况下，对本文解调方法的性能进行了测试。结果表明，该方法可有效解决再入遥测环境下信噪比偏低以至于突破传统解调方法门限的问题，对再入遥测信号解调具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献：

[1] 黄强, 贺知明, 张健. 等待接收再入遥测信道的近地衰落模型 [J]. 电波科学学报, 2007, 22 (1): 53-58.  
 [2] 徐兴源, 吴有杏. 基于 MSD 技术船载测控设备火箭遥测解调方法研究 [J]. 遥测遥控, 2009, 30 (5): 64-67.  
 [3] 谭立新, 何艳丽. 多径衰落信道的统计特性与仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (7): 96-99.  
 [4] 刘东华, 王元钦, 袁嗣杰, 等. 基于瞬时频谱的 PCM/FM 信号解调方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (10): 2463-2466.  
 [5] 冯春燕. PCM/FM 遥测信号的软件解调 [D]. 北京: 装备指挥技术学院, 2004: 46-53.