

# 一种适用于封闭场景下的遥测信号接收方法

翟万涛, 丁兴文

(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 常规的遥测信号接收多是在开阔场景进行, 被测对象除了起飞或降落时短暂低仰角, 大部分时间其信号是视距传输, 其遥测信道近似于高斯白噪声信道。随着遥测应用场景的逐步扩展, 封闭场景下的遥测需求逐步被提出, 应用模式和信道条件发生了巨大变化。针对某封闭场景, 分析常规遥测接收方法存在的一些问题, 提出一种双天线盲均衡的分集合成和接力接收方案, 有效解决了封闭场景下的遥测信号中断问题。方案成功应用于某测试系统, 实验结果表明, 方案能够极大提升遥测系统的健壮性。

**关键词:** 遥测; 封闭场景; 盲均衡; 分集

中图分类号: TN91

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2020)05-0011-05

## A method of telemetry receiver in enclosed scenarios

ZHAI Wantao, DING Xingwen

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Conventional telemetry are mostly applied in outside scenes. Usually, it is line of sight transmission, except for the scene of low elevation reception for a short time in the process of takeoff or landing, and the property of transmission channel is similar to the Gaussian White Noise channel. With the development of telemetry applications, telemetry in enclosed scenario is required. The application mode and channel conditions have changed greatly. Aimed at enclosed application, the challenges of telemetry receiver are analyzed. A new scheme of diversity and relay reception based on Dual-antenna and blind equalization is proposed. The problem of telemetry link interruption in this scenario is solved effectively. The scheme has successfully put into practice. The experimental results show that the proposed scheme can greatly improve the stability of the telemetry system.

**Key words:** Telemetry; Enclosed scenarios; Blind equalization; Diversity

## 引 言

遥测是获取试验数据、确保试验安全的重要手段, 在航空航天、军工试验领域有着广泛的应用。常规的遥测应用多是在开阔场景使用, 主要采用抛物面自跟踪天线, 全程跟踪目标起飞、航行到降落的全过程。在常规应用中, 天线波束窄, 大部分时间信号是视距传输, 除了起飞和降落时存在短暂的低仰角条件外, 其遥测信道近似于高斯白噪声信道。随着科技的发展和应用需求的推动, 遥测应用场景得以日益扩展, 某些特定的封闭场景下的遥测需求逐步被提出来, 而针对特殊场景下的遥测应用研究很少。本文重点针对封闭场景常规遥测方法存在的问题进行分析, 并提出了一种可行的遥测方案。

## 1 现有方案及问题

常规的 PCM-FM (Pulse Code Modulation-Frequency Modulation) 遥测方案, 简化模型如图 1 所示, 主要采用窄波束自跟踪天线接收遥测信号, 下变频后将左旋和右旋的两路极化信号送给遥测接收机; 接收机首先进行极化分集, 然后对合成后的信号进行 FM 解调, 输出 PCM 码流信号。由于左右两个旋向信号受信衰落情况不同, 通过极化分集解决了单路遥测信号衰落问题, 通过左右旋互补保证数据的连续性。极化分集合成主要由共模环和差模环两大关键部分组成, 其中, 共模环部分用于跟踪输入

信号的公共频率和相位变化，差模环部分用于跟踪两路输入信号之间的频率和相位变化，并对称控制两路输入信号对应的本振频率和相位，保证跟踪的连续性，避免信号深衰落造成的数据丢失。

某封闭场景下的遥测需求如图 2 所示，待测目标可能位于封闭空间的上部、中部或者底部等不同位置，目标可能静止或者处于运动状态；接收天线只能安装在封闭体的某一侧。在这种场景下，常规遥测方案应用受到了很大限制。

首先，由于空间受限，天线安装位置距离被测目标距离过近，无法采用单一天线全过程覆盖；另外，在封闭空间内，信道条件发生了极大变化，除了射频信号直接传输外，还存在多种反射和折射路径，形成典型的多径效应<sup>[1,2]</sup>，导致各分量场到达接收端时间不同，按各自相位叠加而造成干扰，使得原有信号失真或者产生错误。图 3 为在密闭空间内 PCM-FM 信号的实测典型频谱图，可见信号在频谱中心位置发生了很深的衰落。这种多径信道下的左右旋信号之间存在相位突变，采用极化分集接收方法，共模环无法有效收敛，导致分集接收失败。而采用单旋向工作模式，无法针对深衰落进行补偿，也会导致丢帧，在高码率遥测时甚至会导致遥测链路频繁中断。

### 2 遥测接收方案

针对特定封闭场景，本文提出了一种可行的遥测方案。天线布局方面，在封闭体的中下部和中上部分别布置两个宽波束天线，其波束覆盖示意图如图 4 所示。当目标在底部或者顶部极端位置，主要用单侧的天线接收；而目标大部分位置，可以实现双天线同时接收，从而实现空间接力

和空间分集，保证信号的全程覆盖。接收机的选择上，设计了一种多通道空间分集接收机，如图 5 所示。该接收机采用了小型化设计，并将接收通道扩展了一倍，同时可以支持四路单旋信号输入。接收算法方案的选择上，没有采用常规的极化分集方案，采用了“单路盲均衡+多路合成”的方案。

#### 2.1 单路盲均衡

均衡技术是对抗多径信道的有效手段之一，线性调制领域的均衡技术研究得较早，如在 QPSK、16QAM 等调制中该技术的应用已非常成熟，而由于遥测体制的特殊性，在遥测领域的均衡研究近几年才开始。目前，国外对遥测均衡算法的研究<sup>[3]</sup>主要分为两类：盲均衡算法和非盲均衡算法；盲均衡算法主要为 CMA<sup>[4]</sup>算法，非盲均衡算法包括 ZF 算法、MMSE 算法等。

盲均衡技术不需要发送训练序列和同步信息，仅利用接收序列本身的先验信息就能够正确恢复发送序列，均衡器可以完全插入到接收端，不需要对原有接收机做大的改动，是一种理想的解决方案。

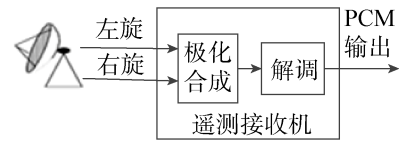


图 1 常规遥测接收方案  
Fig. 1 A conventional telemetry receiver

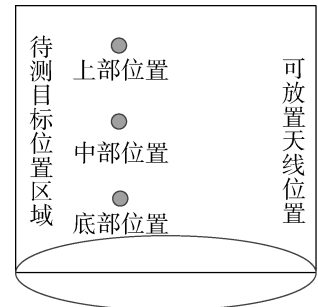


图 2 某封闭场景示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of an enclosed scenario

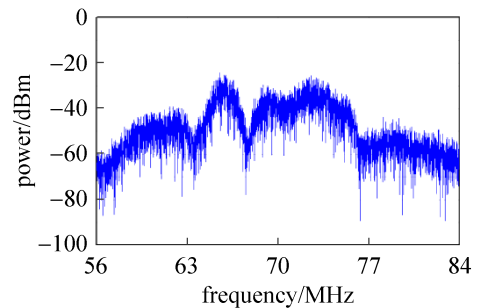


图 3 封闭空间实测典型频谱图  
Fig. 3 Typical spectrum in enclosed scenario

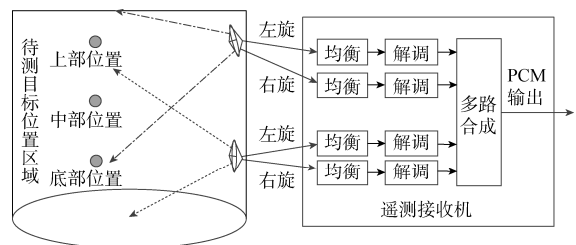


图 4 本文提出的遥测方案  
Fig. 4 The telemetry scheme proposed in this paper

方案采用的 CMA 均衡算法<sup>[5,6]</sup>原理如图 6 所示，主要实现思路如下：用均衡器的滤波器系数向量  $[\omega_0(k), \dots, \omega_{L-1}(k)]^T$  对接收信号  $x(k)$  进行滤波处理，即可得到均衡后的遥测信号  $y(k)$ 。滤波器系数依据代价函数最小化原则进行自适应更新。

该算法寻求最大限度地减小由常模量准则定义的代价函数。常模算法的代价函数为

$$J(k) = E[ (|y(k)|^2 - R_2)^2 ] \quad (1)$$

式中， $R_2$  是一个常数，由输入符号  $x(k)$  决定，可以表示为

$$R_2 = \frac{E[|x(k)|^4]}{E[|x(k)|^2]} \quad (2)$$

均衡器的输出  $y(k)$  表示为

$$y(k) = X^T(k)W(k) \quad (3)$$

式中， $X(k) = [x(k), \dots, x(k-L+1)]^T$  为均衡器输入数据向量， $L$  为均衡器滤波器阶数。

### 2.2 多路合成

多路合成主要对各路解调后的信号进行最优选择，主要由同步模块和信号优选模块组成，如图 7 所示。

各路信号由于传输距离不同，解调后的 PCM 码流无法对齐，另外，盲均衡算法本身也会引入时延，因此，首先要进行同步。同步模块采用基于帧的同步方法，将 PCM 码流进行帧同步，根据同步标识将数据对齐到同样的位置，并统一读取。

当四路信号在码元级进行同步后，进入信号优选模块，这里可采用不同的合成策略，一般可选的有最大比合并、等增益合并和选择合并等。

最大比合并是根据下式计算合并系数：

$$c_p = \frac{H_p}{\sum_{i=1}^p |H_i|^2} \quad (4)$$

其中， $c_p$  表示计算出的第  $p$  个 PCM 码流的合成系数， $H_i$  表示估计得到的第  $i$  个 PCM 码流的信号质量标识。

等增益合并每路系数完全一致，但只对帧锁定的 PCM 进行处理；选择合并，选择质量系数最高的一路进行输出。

## 3 测试验证

构建验证平台，对本方案提出的遥测接收方法进行了实测验证，从被测目标静止和运动两种场景进行测试。测试条件：发射天线为线极化天线，接收天线左右旋独立接收，天线左右旋抑制比大于 14dB，工作点频设置为 2250MHz，工作体制 PCM-FM，码率 10Mbps，校验模拟源设置为伪随机码，校验信号输出电平设置为 0 dBm。

### 3.1 静态场景

在静态场景下，多径条件固定，采用误码率和链路成功率来作为指标对比。链路成功率是指在测



图 5 多通道空间分集接收机

Fig. 5 Multichannel spatial diversity receiver

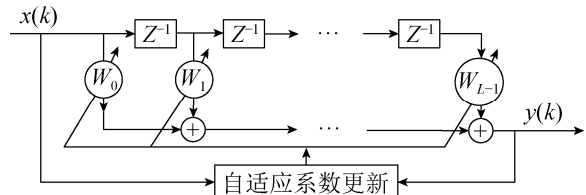


图 6 盲均衡器原理

Fig. 6 Block diagram of blind equalizer

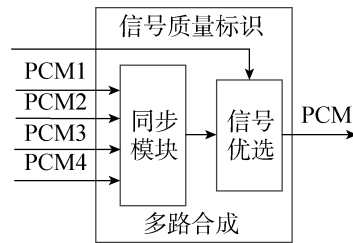


图 7 多路合成框图

Fig. 7 Block diagram of multiplex synthesis

试时间内，锁定帧数除以发送的总帧数，采用帧锁定指示来作为链路通断的判断条件，其中帧同步码 1ACFFC1D，帧同步搜索、校核、锁定容错位数分别设置为 2、2、3。

图 8 左上、右上、下面三组频谱图依次为被测目标位于低部、中部和下部等不同位置的静态测试频谱图，可以看出，接收信号的畸变情况与天线旋向没有明显的对应关系，信号质量主要受多径的影响，而被测目标处于不同位置，总有 1~2 路信号受到多径的影响较小，可以实现接收。

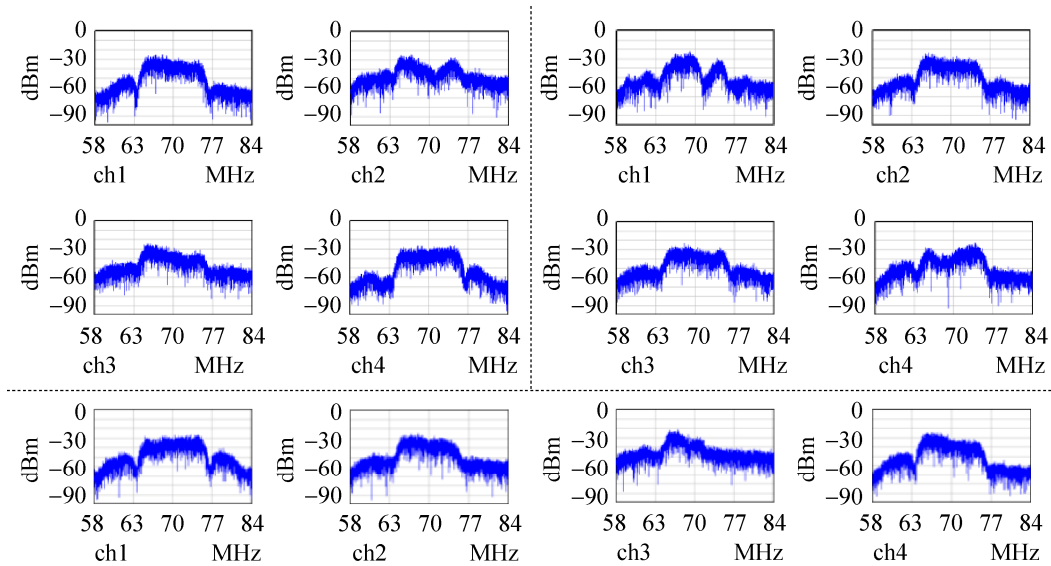


图 8 静止不同位置的频谱图

Fig. 8 Spectrums at different positions

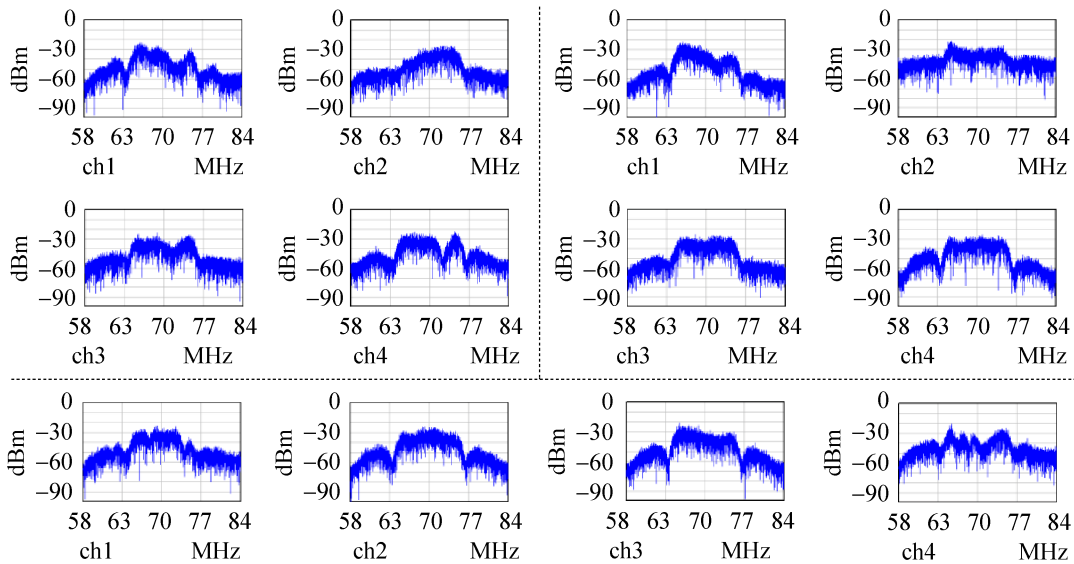


图 9 运行中不同时刻的频谱图

Fig. 9 Spectrums at different times

表 1 为被测目标处于固定位置的接收情况统计，可以看出，盲均衡对单路信号的误码性能得以提升，而通过四分集，可以实现链路百分百连通。

### 3.2 运动场景

图 5 为被测目标运动情况下的频谱图，左上、右上、下面三组频谱图依次为  $T$ ， $T+1s$ ， $T+2s$  时刻。可

以看出运动过程中, 频谱畸变更严重。经过测试, 在动态场景下, 多径信道实时变化, 且存在条件极其恶劣的情况, 此时链路会有闪断, 无法有效地进行误码测试。因此, 这里用链路连通率作为指标对比。

表 1 静态测试结果

Table 1 Test results in static scenarios

接收方式	天线 1 左旋		天线 1 右旋		天线 2 左旋		天线 2 右旋		四分集	
指标	误码率	链路连通率	误码率	链路连通率	误码率	链路连通率	误码率	链路连通率	误码率	链路连通率
均衡关闭	2.8e-7	100%	失锁	0%	1.0e-5	100%	6.8e-2	82.11%	2e-7	100%
均衡开启	0	100%	1.0e-1	13.38%	0	100%	0	100%	0	100%

表 2 为在采用了盲均衡和四分集的链路连通率提升情况。单路情况下, 均衡对动态场景也有提升效果, 结合四分集方式, 高速码率链路成功率也提升到 98% 以上。

表 2 运动情况测试结果

Table 2 Test results in dynamic scenarios

接收方式	天线 1 左旋	天线 1 右旋	天线 2 左旋	天线 2 右旋	四分集
指标	链路连通率	链路连通率	链路连通率	链路连通率	链路连通率
均衡关闭	32.30%	80.04%	77.33%	64.44%	85.25%
均衡开启	49.68%	84.93%	87.73%	77.98%	98.82%

#### 4 结束语

本文提出了一种适用于封闭场景的遥测信号接收方法, 针对封闭空间的波束覆盖问题和强多径问题, 在布局上通过双天线配置, 对空间进行了全覆盖; 通过接收机独特设计, 采用均衡技术和四分集合成技术, 实现了遥测链路的不中断传输, 并在实际测试中得到了验证。

#### 参考文献

- [1] MICHAEL R, DAVID D G, ADAM D, et al. ARTM channel sounding results—an investigation of frequency selective fading on aeronautical telemetry channels[C]. Proceedings of the International Telemetry Conference, 1999.
- [2] RICE M, DAVIS A, BETTWIESER C. A wideband channel model for aeronautical telemetry—part 2: modeling results[C]. Proceedings of the International Telemetry Conference, 2002.
- [3] 翟万涛, 丁兴文, 常洪雨, 等. 抗多径均衡技术在航天航空遥测系统中的应用研究[C]. 航天科技集团第九研究院第十三届学术交流会, 2015.
- [4] 蔡理金. CMA 算法盲均衡性能分析[J]. 通信技术, 2011, 44(12): 19–20, 23.
- [5] 翟万涛, 丁兴文, 谌明. 抗多径盲均衡技术在 PCM-FM 遥测系统中的应用研究[C]. 中国运载火箭技术研究院科学技术委员会信息与电子技术专业组 2015 年科技年会——“航天器先进测控体制与天地信息一体化技术”专题学术研讨会, 2015.
- [6] DING Xingwen, ZHAI Wantao, CHANG Hongyu, et al. CMA blind equalizer for aeronautical telemetry[C]. Proceedings of the International Telemetry Conference, 2016.

#### [作者简介]

翟万涛 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为遥测新体制、新技术的研究与工程实现。  
丁兴文 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为测控与通信总体技术研究。