

文章编号: 2095-4980(2017)06-1020-05

遥测试验数据误码统计分析

史伟娜, 马卫东, 黄列纯

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 遥测数据误码直接影响飞行试验数据结果的分析 and 评估, 建立合适的误码率模型对遥测数据处理的质量起着关键作用。本文在 Rice 衰落模型以及信号强度测距模型基础上对飞行试验多站数据进行分析, 估计出接收端误码分布情况, 得到了误码分布模型。从统计结果看出, 遥测数据帧内误码分布为独立同分布, 与位置无关, 而帧间误码随飞行器与接收天线之间的距离减小而减少。多站数据误码分布的讨论为多站数据融合提供理论支持。

关键词: 遥测; 误码; 数据处理; 多站融合

中图分类号: TN820

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.1020

Statistics analysis of error code for the telemetry experiment

SHI Weina, MA Weidong, HUANG Liechun

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The error code of telemetry directly influences the analysis and evaluation of the test results. Establishing suitable error code model plays a key part in quality of telemetry data processing. The analysis of flight test data is based on Rice fading process and range based model of signal strength, and the error distribution model is obtained by estimating the distribution of the receiver. According to the statistical results, error code distribution of every bit in frame is independent and identical, and error codes of the receiver are becoming less and less with the aircraft approaching the antenna. Discussion on error code distribution of multi-station provides support for data fusion in theory.

Keywords: telemetry; error code; data processing; fusion of multi-station

在各种飞行器的飞行试验中, 大部分航路都能保证有 2 台及以上的遥测站能够同时接收飞行器遥测信号, 由于各遥测站所处的空间位置不同, 出现失锁和误码的时间也不完全相同。如果能够将各个遥测站接收的数据进行融合处理, 就能更大程度地还原原始遥测信息, 提高测量的可靠性。在统计误码率分布情况的基础上进行多站数据融合具有重要意义。国外特别是美国对航空遥测信道研究较多, 典型的是美国国防部报告^[1]将最小均方误差 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 均衡算法应用于研究航空遥测信道。文献[2]建立了 C 频段遥测航空遥测信道的一个宽带信道模型, 并用实测数据对信道模型进行验证。国内有文献[3]针对 Ka 频段移动卫星星地链路特性, 考虑天气和移动终端对周边环境的影响, 建立了基于 Ka 频段移动卫星通信 C.Loo 模型的信道仿真模型。文献[4]对 Rayleigh 衰落信道的几个模型进行了性能分析, 并提出了基于 Clarke 模型的改进模型。文献[5]对 MIMO-DCSK 系统在 Rayleigh 衰落系统下的误码性能进行了分析, 并得出了基于中心极限定理的高斯近似误码率表达式。

本文在 Rice 衰落模型的基础上对飞行试验多站数据进行分析, 估计出接收端误码分布情况, 得到了误码分布模型。从统计结果看, 由于地面接收天线信噪比随飞行器距离的接近而提高, 帧间误码降低, 而帧内误码分布为独立同分布, 与位置无关。

1 Rice 衰落模型

Rice 模型常用来模拟有一个强 Los 分量和许多弱多径分量的信道环境, 可用来模拟城市和郊区蜂窝移动、微

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-06-28

基金项目: 中国工程物理研究院电子工程研究所基金资助项目(S20140402)

蜂窝移动、卫星陆地等无线链路环境。由于发射机和接收机的相对运动,接收信号存在一个频率移动,最大多普勒频率 f_m 为:

$$f_m = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

式中: v 为移动单元速度; λ 为载波波长。当反射波与天线运动方向的角度为 α 时,多普勒频率 f_d 为:

$$f_d = f_m \cos \alpha \quad (2)$$

通常多普勒频率比码速率小得多,因此最大多普勒频率比信号带宽小得多,同样,由于 f_d 比载波频率 f_c 小得多,由多普勒频率引起的相位 $\exp(j\omega_d(t-\tau_k(t)))$ 的变化比随机相位的变化慢得多。Rice 分布的概率密度函数为:

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (3)$$

式中: r 为接收信号的幅度; s^2 为主导分量(包括视距传播分量或镜面分量)的功率; σ^2 为所有散射分量的功率。

通常可以用 2 个参数来刻画 1 个 Rice 过程:最大多普勒频率和 Rice 因子(又叫 k 因子)。Rice 因子定义为:

$$k = \frac{\text{视距传播分量功率}}{\text{散射分量功率}} = \frac{s^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

用 Rice 因子表示 Rice 概率密度函数为:

$$p_R(r) = \frac{2r(k+1)}{\Omega} \exp\left(-k - \frac{r^2(k+1)}{\Omega}\right) I_0\left(2r\sqrt{\frac{k(k+1)}{\Omega}}\right), \quad r \geq 0 \quad (5)$$

在国外航空遥测信道研究中,地面接收站均采用自跟踪接收方式。在自跟踪接收中,天线波束的瞄准线始终对准发射机,它存在一个典型的直射分量。当直射路径和反射路径的相对延时使得 2 个信号的相位差超过 180° 时,衰落就会产生。在许多时候,当反射信号的到达角度使得它不在天线增益图的主瓣之外时,天线增益图对其充分衰减,此时镜面反射的影响可以忽略, Rice 因子为 ∞ , 不存在信号衰减现象。由于天线波束的干涉,在接收天线方向可能产生发射天线辐射图的凹陷,造成直射分量减小,但相对于接收天线方向,凹陷的产生是一缓变的随机过程,因此其幅度的变化是一个慢衰落过程。由于凹陷的宽度有限,而接收天线波束很宽,它造成直射分量幅度的减小有限,在接收一帧数据时间内,可认为直射分量为定值^[6-7]。

2 接收信号强度测距模型

飞行器遥测数据的传输信道为无线传输信道,包括发射、接收天线和传输媒质。本文讨论的遥测其接收方式采用的是等待接收的方式,用多个天线波束覆盖飞行器经历的不同空域,其中每个波束对准不同的位置,最后将各个波束接收的信号合并,得到飞行器经过其飞行空域发射的遥测信号。接收天线在接收有用信号的同时,也接收了来自周围环境的各种噪声干扰。就整个接收系统而言,天线接收的噪声是接收噪声的一大来源。

在理想的自由空间中,如果 F 为接收天线处电场的功率密度, G_r 为接收天线增益,波长 λ 及系统硬件的损耗为 L , 则接收到的信号功率为:

$$P_r = \frac{FG_r\lambda^2}{4\pi L} \quad (6)$$

式(6)中,无线信号在自由空间传播一段距离后,信号功率会衰减。接收端天线附近的信号功率 F 可表示为:

$$F = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (7)$$

式中: P_t 是发射端信号功率; G_t 为发射天线增益; d 为传播距离。将式(7)代入式(6),并忽略系统硬件带来的信号损耗 L , 可得到距离发射端 d 处的接收功率 $P_r(d)$ 服从 Friis 传播公式^[8]:

$$P_r(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 P_t G_t G_r \quad (8)$$

在发射功率和接收功率一定的情况下,从式(8)分析得出,随着天线发射机与地面接收机距离越近,地面接收的信号功率越强,误码率越低。

文献[7]还指出地面站位置距落点越远,多径干扰作用范围越大;波束越窄,对多径干扰的抑制越大。因此

对布站位置和天线的覆盖范围进行合理的调整能够有效地减少多径干扰，提高接收信号状态。

3 遥测数据误码估计

遥测信号在复杂环境传输过程中由于各种干扰而出现误码，造成接收端收到的遥测数据与发射端发送的数据产生差异。这种差异会严重影响遥测信号的处理和分析，较多较大的差异会淹没有效信号，对测量数据结果给出错误估计。因此分析传输误码的分布情况是进行遥测数据分析的前提。

3.1 遥测数据全帧

典型的 PCM 数据流子帧由同步码组(包括子帧同步码、帧计数码等)和 M 个数据字段构成。全帧由 N (最长副帧的字数)个子帧构成，共包括 $M \times N$ 个数据字段，其格式如图 1 所示。

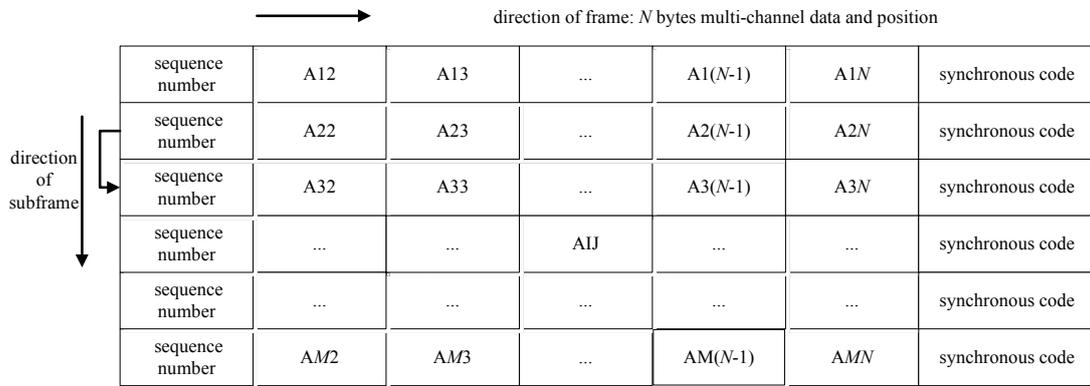


Fig.1 Matrix composition of typical PCM telemetry frame data
图 1 典型 PCM 遥测全帧数据矩阵结构图

图 1 中数据行为遥测数据的一个子帧，列为遥测数据的一个副帧，整个数据构成遥测数据的一个全帧。传输一个遥测数据全帧时间很短，量级为毫秒，在此时间内，飞行器飞行的距离可忽略，地面接收信号强度为定值，误码值为定值。

3.2 遥测信号误码估计

设遥测信号全帧误码率为定值，不随全帧内部时序 t 变化。某 T 时刻发射机端发送的遥测信号全帧为记为 $D(T)$ 。信号 $D(T)$ 经信道传输后，地面站 1 接收到的信号量为 $S_1(T)$ ，地面站 2 接收到的信号量为 $S_2(T)$ ，...，地面站 k 接收到的信号量为 $S_k(T)$ 。则遥测信号的全帧误码 $W(T)$ 是随 T 变化的随机变量，且 $\sum_{i=1}^k S_i(t) / k$ 是 $W(T)$ 的一个无偏估计量。

证明：信号 $D(T)$ ， $S_n(T)(n=1,2,\dots,k)$ 可看作 $F \times H$ 的 0,1 矩阵，其中 $F = M, H = 8 \times N$ 。地面站 n 的误比特数可表示为 $W_n(T) = D(T) + S_n(T)$ 中 1 的个数，这里相加的结果是模 2 后的结果，当 $S_n(T)$ 和 $D(T)$ 相同位置的比特值一致时非误码，否则为误码。

观测值 $W_1(T), W_2(T), \dots, W_k(T)$ 是待估计的随机变量 $W(T)$ 的估计样本值，根据矩估计法的定义， k 个地面站的总误码比特数的平均值 $\sum_{i=1}^k W_i / k$ 是 $W(T)$ 的无偏估计。

k 个地面站的总误码比特数

$$W_{\text{总}}(t) = \sum_{i=1}^k W_i = \sum_{i=1}^k (D(t) + S_i(t)) = k \times D(t) + \sum_{i=1}^k S_i(t) \tag{9}$$

当 k 为偶数时， $k \times D(t) = 0$ 。

考虑偶数个地面接收站的数据，由公式(9)可计算得到 $W(T)$ 的矩估计值为：

$$\sum_{i=1}^k S_i(t) / k \tag{10}$$

4 试验数据分析

采用上述方法分析某次飞行试验多个接收站的数据，得到整个飞行时间段内误比特分布情况如图 2 所示，图 2 中横轴为时间轴，纵轴为误码百分比，从图中可以看出飞行开始后很长一段时间由于飞行器距离天线很远，数据丢帧严重，误比特数一直居高不下。随着飞行器距离地面天线越来越近，误比特数越来越小。如果只考虑多个数据中遥测帧都收到的时间段，即时间连续段，也就是图 2 的后半段，在时间轴上数据误码分布是一个近似的均匀分布，这也侧面验证了由于时间很短，遥测信号全帧误码率可假设为定值。

考虑长度 $M \times N$ 的全帧的帧内误码在整个飞行试验时间段上的情况，统计得到图 3，从图中可以看出，帧内总误码在整个飞行时间内较为稳定，说明在一个时间段内，飞行试验误码与帧内位置无关，帧内比特的误码分布为独立同分布。

进一步分析帧内总误码，统计相同误码位置的个数，得到图 4。

图 4 按正态分布拟合后得到均值为 334.871 4，方差为 72.696 9，对上述分布图归一化后的拟合结果如图 5 所示。

根据现有的遥测数据，尽可能地恢复真实遥测数据是正确处理遥测数据的基础，分析遥测各接收站的数据信息才能获取真实遥测数据，多站数据融合模型的建立是正确融合各站数据的前提。要建立多站数据融合模型，统计帧内和帧间误码情况必不可少。

5 结论

遥测信号在复杂环境传输过程中由于各种干扰而出现误码，造成接收端收到的遥测数据与发射端发送的数据产生差异。本文从现有的地面测量站接收到的遥测数据分析了遥测传输误码分布情况，此分布对恢复真实遥测数据具有重要意义，误码分布模型对建立数据融合基本模型也具有相应的指导意义。后期将在分段 Rice 衰落信道模型基础上对接收端的飞行器遥测数据进行仿真，据此找到符合飞行试验数据误码规律的数据融合模型。

参考文献：

[1] AFRAN M S,RICE M,SAQUIB M. MMSE equalization of aeronautical telemetry channels[Z]. US Department of Defense, 2014.

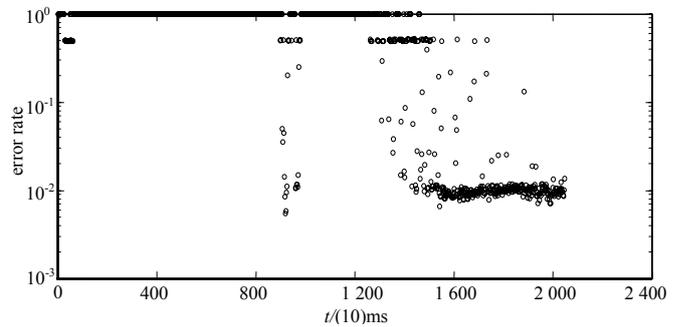


Fig.2 Error between frames
图 2 帧间误码

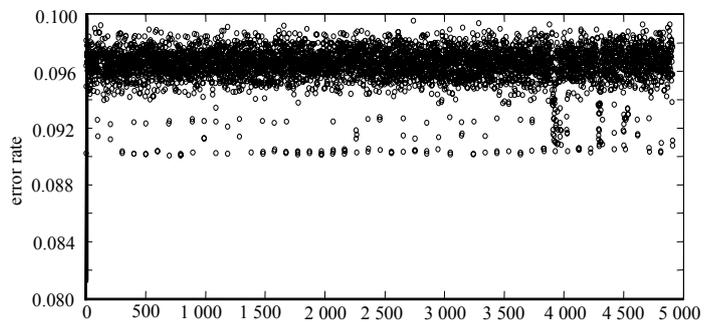


Fig.3 Error in frames
图 3 帧内误码

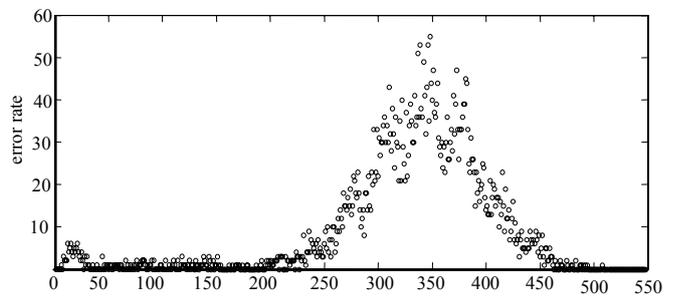


Fig.4 Error distribution in frames
图 4 帧内误码分布

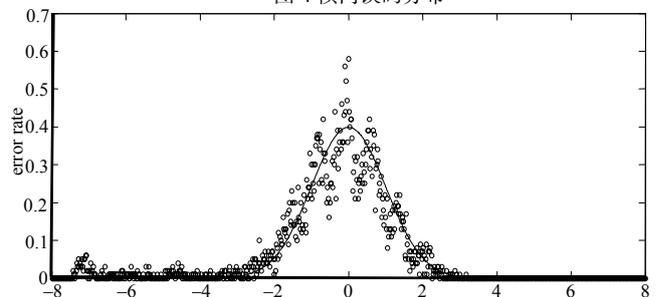


Fig.5 Normalized error distribution in frames
图 5 帧内误码分布归一化

[2] BLUEMM C,HELLER C,FOURESTIE B,et al. Wideband aeronautical channel sounding and modeling for C-band telemetry[C]// Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC). San Diego,USA:[s.n.], 2013:264–269.

[3] 潘成胜,李花芳,刘春玲. Ka 频段移动卫星地链路误码统计分析[J]. 计算机应用, 2012,32(8):2137–2140. (PAN Chengsheng,LI Huafang,LIU Chunling. Statistical analysis of bit error in Ka band mobile satellite channel[J]. Journal of Computer Applications, 2012,32(8):2137–2140.)

[4] 师小琳. 瑞利衰落信道改进模型及性能分析[J]. 计算机应用, 2011,8(31):2058–2061. (SHI Xiaolin. Improved model and performance analysis of simulation models for Rayleigh fading channels[J]. Journal of Computer Applications, 2011,8(31):2058–2061.)

[5] 张智力,王世练. MIMO–DCSK 通信系统在瑞利衰落信道下的误码性能分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,2(13): 52–56. (ZHANG Zhili,WANG Shilian. BER performance of MIMO–DCSK communication systems under Rayleigh fading channels[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,2(13):52–56.)

[6] 黄强,贺志明,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, 2007,2(22):53–58. (HUANG Qiang, HE Zhiming,ZHANG Jian,et al. Near-to-ground fading model for reentry telemetry channel in wait-receiving system[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007,2(22):53–58.)

[7] 黄强,贺志明,张健,等. 待接收遥测系统中接收信号变化规律研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005,9(27):1515–1518. (HUANG Qiang,HE Zhiming,ZHANG Jian,et al. Study on the variety disciplinarian of received in wait-receiving telemetry system. System Engineering and Electronics, 2005,9(27):1515–1518.)

[8] MAZUELAS S,BAHILLO A,LORENZO R M,et al. Robust indoor positioning provided by real-time RSSI values in unmodified WLAN networks[J]. IEE Journal on Selected Topics in Signal Processing, 2009,3(5):821–831.

作者简介:



史伟娜(1985–), 女, 河北省保定市人, 助理研究员, 硕士, 主要从事测控系统软件设计工作。email:swinnaustc@163.com.

马卫东(1968–), 男, 河北省唐山市人, 副研究员, 主要研究方向为装备测试技术、软件工程、计算机网络技术。

黄列纯(1985–), 男, 四川省盐亭县人, 助理研究员, 硕士, 主要从事测控系统软件设计工作。

科技日报 9 月 25 日头版内容

我首台高平均功率太赫兹自由电子激光饱和出光

最新发现与创新

科技日报讯 (记者李大庆) 由我国科学家自主研发的国内首台高平均功率太赫兹自由电子激光装置, 日前在四川成都首次饱和出光。经第三方检测, 实验真实可靠且装置运行稳定。我国太赫兹源从此正式进入自由电子激光时代。

8 月 29 日, 由中国工程物理研究院应用电子学研究所牵头的高平均功率太赫兹自由电子激光装置 (CTFEL) 首次饱和出光, 并实现稳定运行。9 月 20 日, 经过专家组现场测试和中国兵器工业第 205 研究所第三方检测, CTFEL 装置太赫兹频率在 1.99THz、2.41THz 和 2.92THz 三个频率点稳定运行, 平均功率均大于 10W, 最高达到 17.9W; 微脉冲峰值功率均大于 0.5MW, 最高达到 0.84MW。通过调节电子束能量和磁场强度, 可以实现输出激光频率连续可调。

太赫兹 (THz) 辐射通常指频率在 0.1THz—10THz 区间的电磁辐射, 波段位于微波和红外光之间, 是人类尚未完全认识并很好加以利用的最后一个波 (光) 谱区间。物质的太赫兹光谱 (包括发射、反射和透射) 包含有丰富的物理和化学信息, 研究有关物质在这一波段的光谱响应, 探索其结构性质及其所揭示的新的物理内容已成为一个新的研究方向。自由电子激光 (FEL) 由于具有频率连续可调、功率大、线宽窄、方向性好、偏振强等优点, 使得在同一台装置上实现太赫兹波段全覆盖的大功率理想太赫兹源成为了可能, 故自由电子激光是目前该波段最有前途的高功率可调谐相干光源。

CTFEL 装置是依托科技部支持的国家重大科学仪器设备开发专项“相干强太赫兹源科学仪器设备开发”项目, 于 2011 年立项启动。作为一种新型相干强太赫兹光源, CTFEL 装置在材料、生物医学等领域有着重要应用前景。