

基于仿真模型的话音电台故障诊断方法

姚元飞 陈洪瑀 龚玉超 杨志强

(成都天奥信息科技有限公司 成都 611731)

摘要: 针对复现困难且缺乏测试数据和先验知识的电子通信设备故障,提出一种基于仿真模型的故障诊断方法。首先,建立故障系统的仿真模型,并尽可能精简该模型;然后利用该模型,对假设的故障原因逐一模拟,同时观察各个关键节点的输出;最后找出与已有测试数据最符合或最相近的结果,并完善仿真模型。在此基础上分析故障产生机理,完成故障诊断工作。该方法是一种正向逻辑推理法,与故障树分析法相反,可作为故障树分析法的补充手段,并在某话音电台的故障诊断过程中发挥了重要作用。

关键词: 话音电台;故障诊断;故障树分析法;仿真模型

中图分类号: TP206⁺.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Voice radio fault diagnosis method based on simulation model

Yao Yuanfei Chen Hongyu Gong Yuchao Yang Zhiqiang

(Chengdu Spaceon Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: Aiming at the fault of electronic communication equipment, which is difficult to reproduce and lacks test data and prior knowledge, a fault diagnosis method based on simulation model is proposed. First, the simulation model of the fault system is established, and the model is simplified as far as possible. Then the model is used to simulate the hypothetical fault causes one by one, and to observe the output of each key node at the same time. Finally, find the most consistent or similar results with the existing test data, and improve the simulation model. On this basis, the failure mechanism is analyzed, and the fault diagnosis is completed. This method can be used as a supplementary means of fault tree analysis which is a forward logic reasoning method and is opposite to the fault tree analysis method, and plays an important role in the fault diagnosis of a voice radio.

Keywords: voice radio; fault diagnosis; fault tree analysis; simulation module 0

0 引言

随着通信技术的发展,话音电台也是越来越普及,如地空通信电台、对讲机和广播电台等,而话音失真这些电台最常见的一种故障现象^[1-2]。针对电子通信设备故障,常用故障树分析法^[3-5]进行故障诊断,也有采用故障字典法^[6-8]以及将故障树分析法与故障字典法相结合^[9]的故障诊断方法。其中,故障树分析法的适用性广,被广泛应用于各类故障诊断中。但对于某些故障,由于没有先验知识,且难以复现或者测试数据难以获取,使得故障原因难以被验证,从而影响故障诊断工作的持续推进。

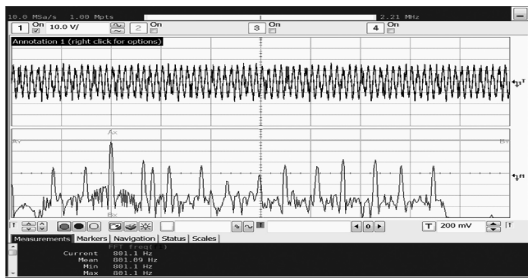
某地空通信电台的话音失真故障,由于受应用场地限制,在故障发生时仅能采集到其音频输出端的测试数据。而后,在实验室中故障复现困难,且故障现象新奇,导致故障诊断工作的推进受到阻碍。针对此种情况,提出了一种

新颖的故障诊断方法,该方法首先通过故障树分析等手段确定故障发生的可能原因,然后构建系统仿真模型,通过仿真手段验证和分析故障原因,并进一步分析了故障产生机理,最终完成故障诊断工作。

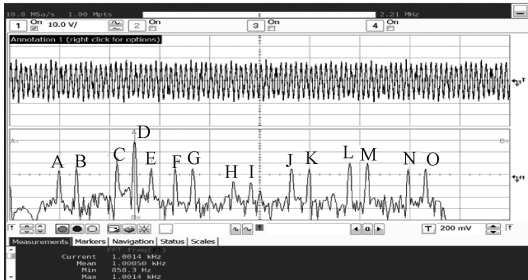
1 故障现象与故障树分析

第一次发现该故障是电台在应用场地工作1个月后,出现了严重的话音失真现象,现象出现后经过很长一段时间会消失,现象消失后,又经过很长一段时间相同现象又会复现,但是重启电台后现象又会消失。在故障出现时,使用单音调制信号对电台进行测试时,发现在某些调制频率上会有严重失真,如0.8和1kHz的调制信号;而在另一些调制频率并无明显失真,如1.86和2.79kHz的调制信号,应用场地实测结果如图1所示。

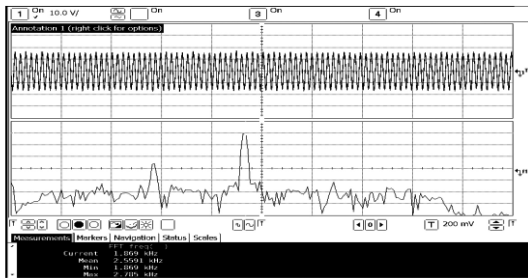
由于应用场地不止一部电台,而发生故障的电台仅一



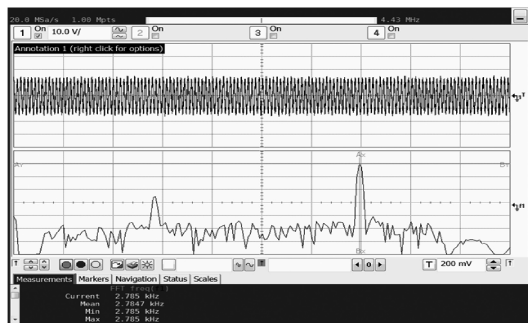
(a)0.8 kHz调制信号应用场地实测结果



(b)1 kHz调制信号应用场地实测结果



(c)1.86 kHz调制信号应用场地实测结果



(d)2.79 kHz调制信号应用场地实测结果

图 1 在应用场地不同调制信号的实测结果

部,这说明故障原因不是由外界干扰引起的^[10-12]而是电台本身故障。在故障出现时,开关电台的静噪功能^[13],故障现象不会消失,但通过前面板将故障电台信号处理软件复位后,故障消失。因此,可以确定故障存在于电台信号处理软件中,但与静噪软件无关。由于受应用场地限制,无法打开电台机箱进行测量,导致无法获得更多的测试数据。

由上述现象与描述,建立地空通信电台语音失真故障树,如图 2 所示。

为了让故障更快复现,在实验室同时打开 30 部电台,让其高负荷状态下长时间工作,但是,这 30 部电台工作

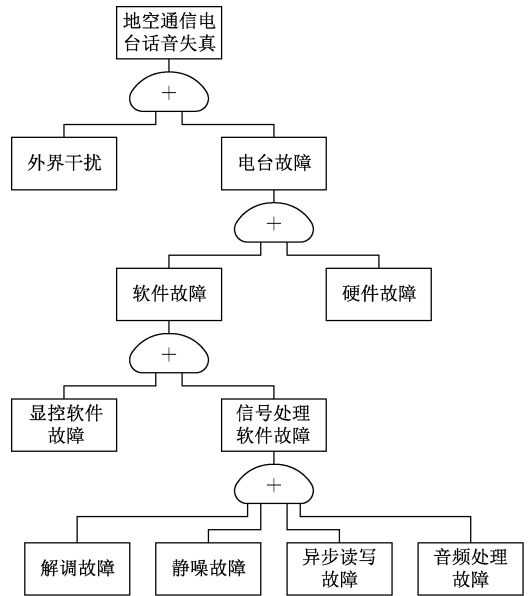


图 2 地空通信电台语音失真故障树

1 个月没有 1 部电台复现故障现象。由于故障难以复现,且推断的故障原因难以通过仪器设备采集数据,为了推进故障诊断工作,提出了一种基于仿真模型的故障诊断方法。

基于仿真模型的故障诊断方法,首先需要建立故障系统的精简模型,将可以被排除的系统组件或模块从模型中删除,即建立一个包含所有关键节点的最小系统;然后利用该模型对可能的故障原因逐一进行模拟,并观测和记录各个关键节点的输出;最后,将仿真结果与已有的测试数据逐一对比,找出与已有的测试数据最符合或最相近的结果,并在此基础上完善仿真模型,使各关键节点的输出与测试结果基本一致,同时分析故障产生机理,完成故障诊断工作。因此,首先需要建立该地空通信电台的仿真模型。

2 仿真模型建立

本电台的信号处理软件集中在 DSP 和 FPGA 中,其中 DSP 负责解调与静噪,FPGA 负责积分梳状滤波器(cascaded integrator-comb filter,CIC)与音频滤波。此外,DSP 中的静噪算法对解调的音频数据不产生直接影响,其计算结果仅提供给 FPGA 的静噪开关。

依据信号处理流程,在 MATLAB 中构建系统的仿真模型如图 3 所示。仿真模型包括信号发生器、带通滤波、直接数字频率合成器(direct digital frequency synthesizer,DDS)^[14-15]、混频器、低通滤波、CIC 和音频滤波 7 个模块。由于开关静噪功能,故障现象不消失,因此仿真模型中并没有加入静噪模块。

仿真模型的信号发生器产生单音调制的 AM 信号,调制率为 30%;DSP 部分的带通滤波为带宽为 25 kHz 的带通滤波器,解调采用包络检波法,本地载波由 DDS 生成,低

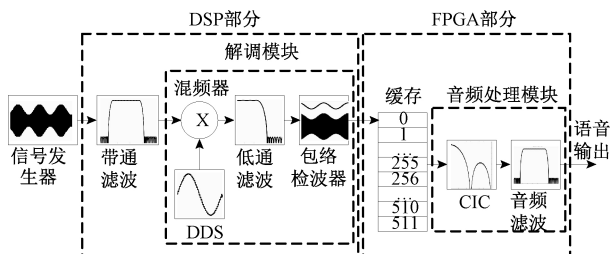


图3 系统仿真模型

通滤波器的带宽为 16 kHz;FPGA 部分的缓存深度为 512, CIC 抽取倍数为 2,音频滤波器是频率响应范围为 300 Hz~3.4 kHz 的带通滤波器。

3 故障原因假设与定位

3.1 解调故障

第 1 个假设的故障原因是解调故障,考虑 DDS 的相位累加器溢出处理异常,导致 DDS 的相位不连续。在仿真模型的 DDS 模块中,当相位累加器溢出时加入一个随机的相位波动,分别采用 1 和 1.86 kHz 的调制信号仿真,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,DDS 故障时,无论是 1 kHz 还是 1.86 kHz 的调制频率,在时域上有明显噪声,但频谱并无明显失真。当该信号通过 CIC 和音频滤波后,噪声基本会被滤除,这与故障现象不符。因此,故障原因与 DDS 无关。

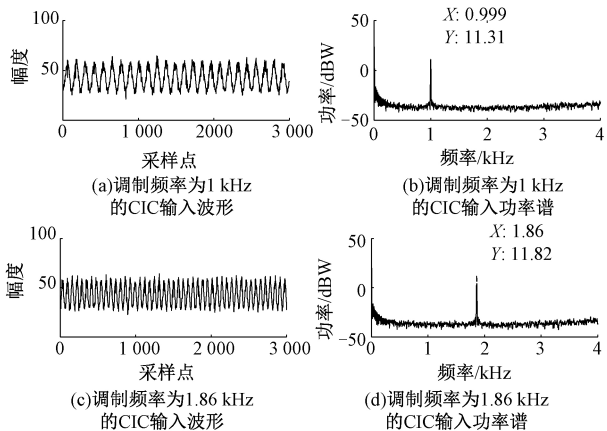


图4 DDS故障仿真结果

此外,观测图 4 还能发现,DDS 故障对所有调制频率的影响是相同的,即不会出现某一测试频点的现象与其他测试频点有明显区别的情况发生。这个结论同样适用于解调模块的其他子模块故障。同理,音频处理部分也是如此,故可以排除解调故障和音频处理故障。

3.2 异步读写导致读写异常故障

第 2 个假设的故障原因是 DSP 与 FPGA 异步读写引起的读写异常。因为 DSP 处理数据是在信号处理中断中分帧(每帧 64 点)进行的,而 FPGA 读取缓存中的数据是固定速率的,异步读写有可能导致读取时突然写入新的数据,

或者旧数据尚未读取就被新数据覆盖的情况。在仿真模型的缓存模块中,让每一帧数据每次读取 10 个点后就被新的一帧数据覆盖,分别采用 1 和 1.86 kHz 的调制信号仿真,结果如图 5 所示。

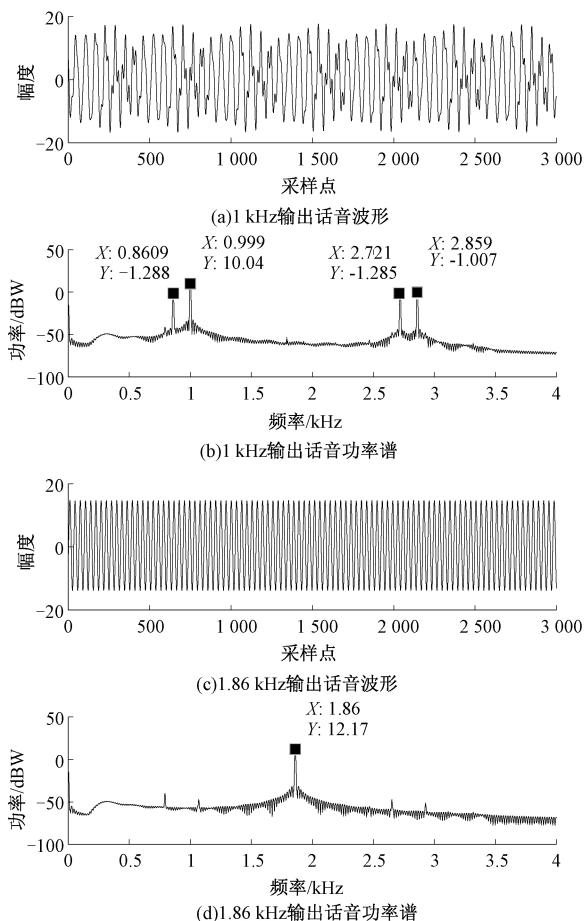


图5 不同调制信号读写异常时的仿真结果

从图 5 可以看出,1 kHz 调制信号的最终输出的功率谱有 4 根谱线,分别为 857 Hz、1 kHz、2.721 kHz 和 2.859 kHz;而 1.86 kHz 的调制信号的解调输出类似单音信号,现象与图 1 十分相似,但是 1 kHz 的调制频率的谱线还不够丰富。由此可以推断,故障可能为异步读写导致的读写异常。图 1 中输出频谱的峰值谱线频率如表 1 所示。

表1 实测 1 kHz 调制信号输出峰值谱线频率

频率编号	频率/kHz	频率编号	频率/kHz
A	0.393	I	2.253
B	0.533	J	3.393
C	0.860	K	2.720
D	1.001	L	2.860
E	1.327	M	3.187
F	1.467	N	3.327
G	1.793	O	3.653
H	1.927	—	—

从图 5 还可以看到,当调制频率为 1 kHz,错误点数 $n=10$ 时,输出可产生表 1 中编号为 C、D、K、L 的频点。进一步仿真发现,当 n 有两个不同取值时,例如取 10 和 20,并以此循环,输出谱线增加至 6 根。当 n 有 4 个不同取值时,输出谱线增加至 15 根,数量与表 1 中的一致,且谱线位置也与表 1 中的一致。图 6 所示为 n 在每一帧中的取值分别为 10、20、30 和 40 并以此为循环的情况下,调制频率分别为 0.8、1、1.86 和 2.79 kHz 的仿真结果。由图 6 可以看出,仿真结果与图 1 基本吻合。综上所述,故障是由于 DSP 与 FPGA 异步读写导致读写异常。

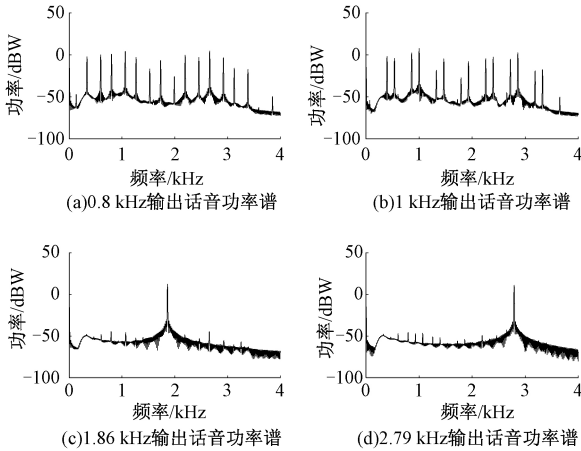


图 6 n 为 4 个不同取值时不同调制频率下的输出功率谱

4 故障机理分析

地空通信电台的 FPGA 中,正常读写情况如图 7(a) 所示,当缓存中的数据数目第一次超过 256 时,FPGA 将缓存中的数据以 119.034 kHz 的恒定速率向外输出,此时,写地址总是超前于读地址。但当 DSP 处理超时,新一帧的数据传输会延迟,又由于 FPGA 的输出速率恒定,这就导致读写地址的间距逐步缩小,最终读地址超前于写地址,如图 7(b) 所示,此时,故障现象出现。

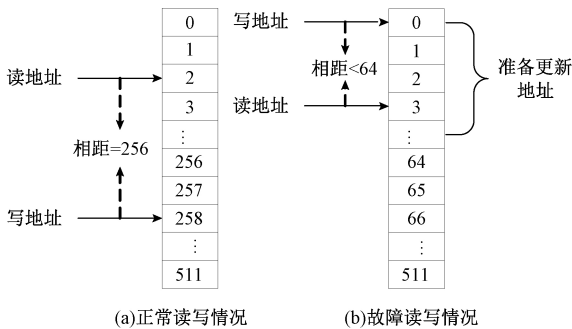


图 7 FPGA 缓存读写示意图

4.1 话音失真机理分析

在 FPGA 中,其缓存深度为 512,解调输出信号的采样

频率为 119.034 kHz,假设调制频率为 f ,那么 512 个采样点包含的解调信号周期 k 的计算公式如下:

$$k = \frac{512}{119.034 \text{ kHz}/f} \quad (1)$$

故障现象出现时,若 k 接近整数,那么 512 个采样点包含整数个调制信号周期,此时由于读写异常而引起失真的点的幅值与相位与真实样点的十分接近,在经过音频后,解调输出的信号频谱看起来与单音信号频谱相似。否则,由于幅度与相位的巨大跳变会使得解调信号产生丰富的频谱分量,并导致严重的失真。利用上述公式,可以计算出调制频率为 0.8 和 1 kHz 时的 k 值分别为 3.441 和 4.301,均不为整数,故解调输出失真严重;而调制频率为 1.86 和 2.79 kHz 时的 k 值分别为 8.000 和 12.001,十分接近整数,因此解调输出的失真不明显,难以察觉。

4.2 故障现象循环出现与消失机理分析

在地空通信电台的运行过程中,由于 DSP 处理的偶然超时,使得 DSP 的写入逐步落后于 FPGA 的读取,导致该电台输出话音失真,故障出现。经过长时间的运行后,读写地址的差距会逐渐增大,直到相距超过 64 点(1 帧),故障现象消失;随着电台的持续运行,又会出现读写地址相距小于 64 点的情况,故障现象再次出现。

电台上电时,读写情况处于图 7(a) 状态;但随着电台的运行,读写地址间距逐渐缩小,然后到达图 7(b) 状态,此时故障现象出现;然后又经过一段时间的运行,读写地址间距又逐步拉大,到达图 7(a) 状态,此时故障现象消失;随着时间的推移 FPGA 缓存的读写状态在图 7(a) 和 (b) 两个状态中反复跳转。假设从图 7(a) 状态跳转到图 7(b) 状态需要经过 m 个月,在故障现象出现时有:

$$|\text{读地址} - \text{写地址}| < 64 \quad (2)$$

则故障持续时间为:

$$\frac{64m}{256-64} - \left(\frac{-64m}{256-64} \right) = \frac{2}{3}m \quad (3)$$

因此,故障现象会持续 $\frac{2}{3}m$ 个月。而故障现象从消失到再次出现需要经过:

$$\frac{512 - [64 - (-64)]}{256 - 64} m = 2m \quad (4)$$

所以,当故障现象消失后,再经过 $2m$ 个月,故障现象会再次出现,如图 8 所示。

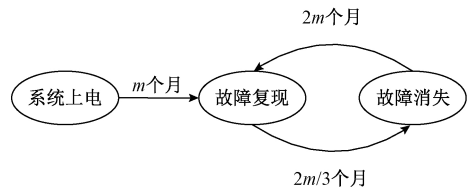


图 8 故障复现规律

通过上述分析,对 DSP 程序反复测试发现,在极个别

情况下,DSP的中断处理会超出规定的处理时间50~100个系统时钟。正是因为这个原因,最终导致该地空通信电台语音失真故障。

5 结 论

综上所述,基于仿真模型的故障诊断方法,在故障现象难以复现或故障部位的测试数据难以采集时,能够有效的排查故障原因,从而推进故障诊断工作的进行。其可作为故障树分析法的一种补充手段,在故障树分析法难以分析定位故障原因时,提供一种直观且快速的故障分析手段。此外,仿真模型还可以作为系统失效分析的一种重要手段,迅速且直观地展示系统某一节点或多个节点同时失效时,系统的故障现象,为故障诊断工作提供先验知识或为系统的完善与改进提供指导。该方法不仅适用于电台故障分析,也可推广到各类电子、通信设备的故障诊断中,为故障诊断开辟一条新的通路。

参考文献

- [1] 周玲. 民航地空甚高频通信系统故障及对策[J]. 军民两用技术与产品, 2016(20):39,50.
- [2] 李成军. 民航地空甚高频通信系统中的常见故障分析[J]. 无线互联科技, 2013(2):46-47.
- [3] 陶勇剑,董德存,任鹏. 采用故障树分析诊断系统故障的改进方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(1):143-147.
- [4] 郭永晋,孙丽萍. 基于矩阵的故障树分析方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(7):896-900.
- [5] 杨昌昊,胡小建,竺长安. 从故障树到故障贝叶斯网映射的故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7):1481-1486.
- [6] 陈琪,曲东才. 基于故障字典和神经网络理论的故障诊断方法[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(1):4-7.
- [7] 曾希雯. 基于故障字典的电路故障诊断研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016.
- [8] 张劼. 基于故障字典与自适应BP网络的航空产品故障定位方法[J]. 国防技术基础, 2017(5):24-30.
- [9] 刘伯鸿. 故障树与故障字典结合的计算机联锁系统故障诊断[J]. 铁道通信信号, 2008, 44(12):14-16.
- [10] 王兰芹. 民航无线电干扰分析及测试研究[J]. 电子技术与软件工程, 2016(16):111.
- [11] 熊冰洁. 民航甚高频地空通信电台干扰及预防策略[J]. 电子测试, 2016(24):135-136.
- [12] 李胤,郑重,刘久文,等. 基于行为级建模的通信电台同址干扰预测分析[J]. 电子测量技术, 2011, 34(11):122-126.
- [13] 姚元飞. 超短波通信电台的低成本信号处理模块设计[J]. 电讯技术, 2010, 50(8):71-75.
- [14] 高兵益,徐磊. CORDIC算法及其展开结构的FPGA实现[J]. 电子测量技术, 2017,40(11):85-88.
- [15] SHI F X, ZENG L, CHEN Y, et al. Direct digital frequency synthesizer based on an improved high speed & high precision CORDIC algorithm [J]. Tien Tzu HsuehPao/acta Electronica Sinica, 2017, 45 (2): 446-451.

作者简介

姚元飞,硕士、高级工程师,主要研究方向为信号处理、通信系统。

E-mail:yyf617488@163.com