

双波段遥测天线设计

霍建华, 刘丹

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 随着航空飞行试验数据量的不断增加, 原有 IRIG106 遥测系统已不能完全适应当前和未来的需求; 同时随着网络技术的不断发展, 遥测系统的网络化成为新的发展趋势; 民用 4G 通信占用 S 波段遥测资源使得航空遥测寻找新的传输频段; 为了充分利用和保护现有资源, 并适应遥测的网络化发展, 提出在现有 S 波段遥测基础上增加 C 波段网络数据传输功能, 开展双波段遥测天线设计技术研究; 在对天线结构进行合理设计的基础上, 提出了一体化馈源设计方案; 通过 S 波段振子与 C 波段振子的集成化设计, 实现了 C 波段无线网络数据与 S 波段串行数据流的共同传输, 极大地提高了遥测数据传输速率, 缓解了遥测频率资源紧张的现状; 通过飞行试验验证, 设计的双波段天线能够满足飞行试验大速率数据的传输需求。

关键词: 双波段; 无线网; 一体化馈源

Design of Dual-band Telemetry Antenna

Huo Jianhua, Liu Dan

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: With the increasing volume of aviation flight test data, the original IRIG106 telemetry system has not been fully adapted to current and future needs. At the same time with the continuous development of network technology, telemetry system network has become a new development trend. The fourth generation mobile communication occupies the S-band telemetry resources so that the aerial telemetry searches for new transmission bands. In order to make full use of and protect existing resources and adapt to the development of telemetry network, this paper proposes to increase the data transmission function of C-band network on the basis of existing S-band telemetry and carry out research on dual-band telemetry antenna design. Based on the properly design of antenna structure, the integrated feed design project is proposed. Through the integrated design of S-band and C-band dipoles, common transmission of C-band wireless network data and S-band telemetry data has been implemented. Telemetry data rate has been improved and the absence of telemetry frequency resource has been alleviated. Verified by flight tests, the design of dual band antenna can meet the transmission requirements of high rate data.

Keywords: dual-band; wireless network; integrated feed

0 引言

随着新型飞机的不断出现、航空飞行试验遥测需求的不断增长、试验数据量成倍增加以及无人机的测试需求, 增加上行链路、实现飞行试验的上行控制能力^[1], 成为遥测的新需求。原有基于 IRIG106 标准的遥测系统已不能完全适应当前和未来航空飞行试验及其他军工试验的需求。在网络技术不断发展的推动下, 遥测系统的网络化、空天地一体化成为新的发展趋势。通过在目标与地面站之间增加了一条无线网络链路, 实现大容量网络数据的传输、飞行目标的远程控制以及频谱资源的动态管理等^[2-3]。

另外, 随着民用 4G 通讯的启动, 与目前使用的遥测频率资源相互冲突^[4], 严重制约了遥测数据的传输能力, 限制了遥测实时监控的能力。2007 年世界无线电大会 (WRC-2007) 已经把 C 波段中部分频段在局部地区或全球范围内, 划分给航空飞行试验遥测使用。因此在现有遥测系统基础上, 增加 C 波段网络数据传输功能, 利用频率分割提高数据的可靠性, 同时也增加了数据传输带宽。既能最大限度保证现有设备继续发

挥作用, 同时又能实现遥测频率资源的扩展, 解决网络数据传输问题。因此开展双波段遥测天线^[5]设计技术研究显得尤为重要。

1 天线结构及原理

为了实现既充分利用已有遥测资源, 又兼顾遥测的网络化发展, S 波段遥测链路和 C 波段无线网络链路共存, 将是一个长期的过程, 双波段遥测天线的共用和集成也是一种发展趋势。目前航空遥测使用最多的是 S 波段抛物面天线, 使用单通道单脉冲体制跟踪, 能够快速捕获目标, 为航空遥测数据传输提供可靠的传输途径。通过合理选择抛物面口径, 容易获得较高的接收增益, 提高系统灵敏度。

目前航空遥测主要使用 S 波段进行遥测数据传输, 配置了大量的 S 波段遥测发射及接收系统, 这些系统在很长时间内还会继续使用。所以计划采用在保持现有 S 波段基功能基础上, 增加 C 波段网络传输功能。保持 PCM 数据仍采用 PCM/FM 调制使用 S 波段进行传输, 将大量的视频数据采用网络形式使用 C 波段进行传输, 能够将实时监控的能力提高一倍。

1.1 天线口径选择

为保证现有数据传输的可靠性, 我们首先按 S 波段数据传输进行功率分配来计算天线口径。S 波段输出传输的简单路径如图 1 所示。

下面对 S 波段数据传输信道进行简单的功率分配计算。

收稿日期: 2017-02-12; 修回日期: 2017-03-11。

基金项目: 国防基础科研项目 (A0520132031)。

作者简介: 霍建华 (1984-), 女, 山西晋中人, 硕士, 工程师, 主要从事航空遥测技术研究。

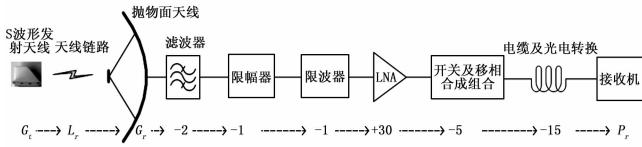


图 1 S 波段信道功率分配

1) 机载发射功率 15 W (41 dBm);

2) 根据电波传播公式 $L_r = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi}{c} \times f \times R\right)^2$ 可

计算^[6]得到 S 波段遥测信号 300 km 的路径损耗为 -149 dB;

表 1 接收机测试记录

接收机编号	1	2	3	4
输入功率 /dBm	-66.6	-66.5	-66.2	-65.8
接收功率 /dBm	-66	-66	-65	-65
误码率	9.83×10^{-6}	9.41×10^{-6}	9.78×10^{-6}	9.46×10^{-6}

3) 根据 S 波段遥测接收机测试记录, 20 Mbps 位速率的遥测信号达到 10^{-5} 误码率, 接收机的输入端的功率为 -65 dBm;

4) 系统安全余量按 6 dB 进行计算, 可知接收天线增益需达到 33 dBi;

5) 根据抛物面天线增益计算公式 $G_r = 10 \lg \eta (\pi D / \lambda)^2$, 可得出^[6]达到 33 dB 增益抛物面天线的口径需要达到 2.4 m。

1.2 天线结构设计

为了满足工程应用和兼容性要求, 简化结构、降低成本, 双波段遥测天线大都为两种结构: 双天线模式和单天线模式。

在现有 S 波段遥测接收天线基础上, 增加一个 C 波段遥测天线, 需要对云台的驱动能力进行核算, 来确定背负天线的大小。通过查阅现有 2.4 米抛物面天线的相关资料, 并通过理论计算, 可知在保证天线安全, 满足天线驱动能力的前提下, 背负的 C 波段天线口径不得超过 1 m。图 2 为 C 波段数据传输的简单路径图。

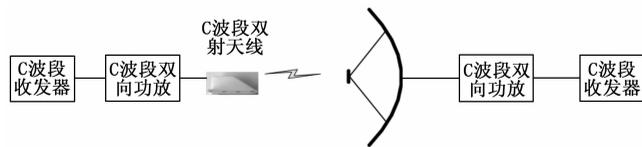


图 2 C 波段信道功率分配

下面对 C 波段数据传输信道进行简单的功率分配计算。

1) 根据抛物面天线增益计算公式, 1 m C 波段抛物面天线的增益为 32 dBi;

2) 根据电波传播公式可得到 C 波段遥测信号 300 km 的路径损耗为 -157 dB;

3) C 波段网络收发器 20 Mbps 无丢包的门限要求是 -80 dBm;

4) 考虑系统余量 6 dB, 机载发射功率 51 dBm (125 W)。

通过计算分析可知, 受天线驱动能力限制, 采用背负模式 C 波段天线口径小, 增益小, 达到相应的传输距离, 会使机载发射功率成倍增大, 不符合工程应用。采用单天线模式, 天线

载重基本不变, 对云台驱动结构的影响可以忽略。同时, 2.4 m 抛物面天线 C 波段增益为 40 dB, 考虑系统余量后, 达到 300 km 的传输距离, 机载发射功率仅为 43 dBm (20 W)。因此, 采用单天线模式是最佳选择。采用单一天线共用一个波束轴来传递两个频率的信号, 既能不增加对云台驱动能力的需求, 同时也能保证拥有较大的抛物面口径, 既满足目前飞行试验的使用需求, 又能适应 C 波段网络化的发展。

2 天线硬件设计

2.1 一体化馈源设计

馈源是遥测天线的关键部分, 是决定天线电特性和频段的重要器件。振子的尺寸决定了其能够适用的频段。目前航空遥测使用最多的是 S 波段抛物面自跟踪天线, 其馈源通常为五单元振子, 中间单元用于产生和信号, 周围四个单元用于产生差信号。方位差信号、俯仰差信号由相互正交的 1 kHz 低频信号进行 $0/\pi$ 调制, 相加后得到差信号。差信号通过定向耦合器与和信号合成一路单通道信号^[6-7]。其和差形成过程如图 3 所示。

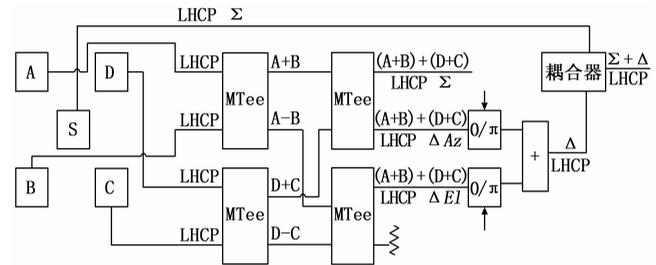


图 3 左旋通道和差网络

通过分析单通道单脉冲信号的生成过程, 我们可以发现, 周围 4 个振子合成差信号的同时也可合成和信号, 因此我们可以得出两种设计方案。S 波段振子保持不变, 增加 4 个 C 波段振子, 另一种是将中间的 S 波段用于产生和信号的振子改为 C 波段振子。两种方式各有优缺点。

对于第一种方案, S 波段和 C 波段都可以进行跟踪, 但振子增加必然导致线路的增多, 增加馈源的设计难度; 第二种方案, 只能采取 S 波段跟踪, 但设计相对简单, 易于实现。另外考虑到当前飞行试验是用 S 波段进行数据传输, 第二种方式既不影响当前的使用, 还能实现 C 波段数据传输, 是最经济也是最佳的设计方案。

2.2 电磁兼容性设计

在日趋恶劣的电磁环境中, 如若不采取恰当的电磁屏蔽措施, 会导致设备之间的电磁干扰, 最终导致设备性能下降并危及信息安全。天线射频部分是微波信号发射和接收的核心终端, 非预期的信号辐射和接收将严重影响本系统或其它设备的正常工作。为了保证其在复杂的电磁环境中既不干扰其他设备, 而又不受其他设备干扰的影响而能正常工作, 设计时需考虑电磁兼容设计, 包括隔离和抗干扰设计。

1) 隔离设计: 该天线设计中, S 波段仅作为接收而 C 波段具有双向收发功能。C 波段较强的发射信号再次进入 C 波段接收通道, 经 LNA 放大后会形成具有很高增益的 RF 信号, 若不进行隔离设计, 会对后端的器件造成不可逆的损坏, 导致设备功能丧失。S 波段使用频率为 2.2~2.4 GHz, C 波段使用 4.4~4.9 GHz, 本身在频段方面形成一定的隔离。为了使 S 波段和 C 波段达到最好的隔离, 在 S 波段和 C 波段各增加带

外抑制的带通滤波器。另外在馈源设计中 S 波段器件与 C 波段器件相互独立, 最大限度地减少了两个信道器件之间的交联, 实现 S 波段与 C 波段的隔离。

2) 抗干扰设计: 为了使双波段天线在复杂电磁环境下能够正常工作, 不受到周围强磁场的干扰和破坏, 我们对天线安装位置周围的电磁环境进行测试, 测试带宽选择为 1~6 GHz, 获得测试结果如图 4 所示。

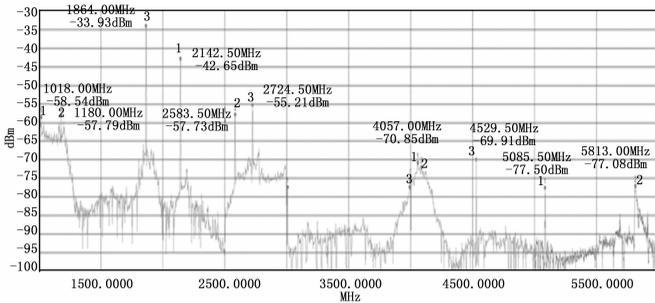


图 4 电磁环境测试结果图

分析测试结果可以看出, 两个最强电磁干扰的频率为 1 864 MHz 和 2 142.5 MHz。而目前航空遥测使用的 S 波段为 2 200~2 400 MHz, 所以 2 142.5 MHz 这一强电磁信号辐射可能引起馈源饱和和导致馈源损坏, 在馈源设计时需对这一强辐射信号加以抑制。因此, 我们需要选择增加滤波器, 对该信号干扰进行抑制, 以保证馈源安全, 如图 5 所示。

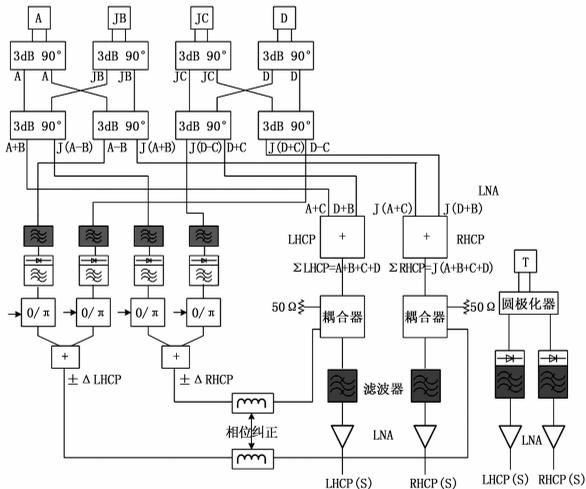


图 5 一体化馈源设计图

3 数据传输及结果分析

3.1 双波段数据传输

在传统 PCM 遥测链路外增加上下行的双向无线网络链路, 使遥测系统既有串行 PCM 下行功能, 也具有遥测网络数据的上下行功能, 实现飞行试验遥测系统的网络化和空地一体化^[8]。在一体化馈源中设计 C 波段振子只是为 C 波段传输提供了一个通道。C 波段网络数据传输的实现, 还需要有 C 波段双向功放及 C 波段网络收发器才能实现。双波段数据传输原理如图 6 所示。机载 C 波段网络收发器从机上数据采集网络系统获取网络数据, 经机载 C 波段双向功放、机载 C 波段天线向外辐射。地面双波段天线接收 C 波段 RF 信号, 经地面 C 波段双向功放

及网络收发器接收解调后, 将网络数据发送至地面数据处理系统进行处理, 最终提供给试飞工程师进行实时监控。地面管理数据经反方向链路向上传输, 实现对机载系统的管控。

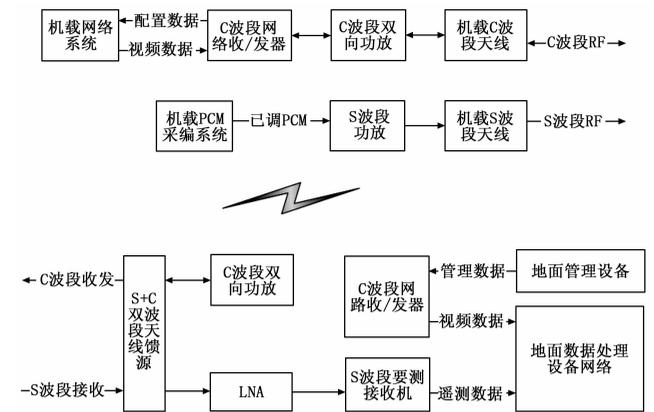


图 6 双波段数据传输原理框图

频率越高, 同样条件下的传输损耗越大。受高速汇流环性能限制, 对 C 波段射频信号直接进行传输损耗大, 无法满足使用需求。所以应当将 C 波段 RF 信号进行下变频解调后, 以网络数据进行发送。高速汇流环有空余滑环信号线能够满足网络传输需求。通过网络数据进行下传, 需对 C 波段功放及收发器与双波段天线进行集成设计。要将设备安装在高速汇流环之前, 既不能影响天线跟踪, 同时又满足数据传输要求。同时尽量减少电缆传输的损耗, 提高宽带双向链路的灵敏度。

3.2 测试结果及分析

利用真实的飞行试验, 对双波段遥测天线的数据传输性能进行测试, 测试结果如表 2 所示。测试过程中, 在无线网络接通的状态下, 地面能够实时接收 C 波段网络数据, 同时能够通过上行链路, 实现对机载网络相机的控制。从测试结果可以看出, 飞行高度为 5 km 时, 最大通信距离为 185 km。与视距通信距离相差较大。当日飞行区域处于北部山区, 由于遮挡原因, 导致飞行距离较近。

测试结果表明 C 波段电平低于 S 波段电平。测试时 S 波段数据速率为 2 Mbps, C 波段数据为 20 Mbps, 位速率越高, 越容易收到干扰。另外, S 波段天线跟踪精度为 0.5°, C 波段天线半功率波束宽度只有 1.7°, 在飞行过程中, C 波段信号无法一直处于增益最强的方向, 也是造成这一结果的原因之一。

4 结束语

通过分析飞行试验当前及未来的需求, 对双波段天线设计技术开展研究。采用共用反射面的天线结构, 并在充分考虑双波段隔离及馈源抗干扰能力的基础上, 实现了一体化馈源的设计。在原有系统上进行技术实施, 实现了双波段数据的实时传输。通过飞行试验验证, 增加的无线网链路能够满足大容量数据的传输。

C 波段宽带遥测是遥测的主流动向, 近年来的遥测年会也有双波段甚至三波段 (L、S、C) 遥测天线、接收机等的相关文章发表。所以开展双波段天线设计研究是适应未来遥测发展动向的。双波段遥测天线设计能够实现 S+C 双波段数据的共同传输, 既能充分利用和保护现有资源, 又能够适应遥测的网

(下转第 182 页)

为 i 和 2^{n-1} 求余等于 0 的数通过这 10 个滤波器。

最后, 利用 RS485 总线传递给上位机进行输出显示。根据纱线行业标准, 波谱图横坐标为波长, 纵坐标为波长对应的幅值, 利用将所得到的频率与幅值的关系转化为波长与幅值的关系。同时由于分组后相邻两个滤波器波长长度是等比关系, 因此选取波长的对数为横坐标。

5 实验结果与分析

根据上述对系统各模块的分析, 最终设计完成了基于 DSP28335 的条干均匀度仪波谱图显示系统。为检测所设计系统的准确性, 用该系统检测一管纱线得到波谱如图 7 所示。

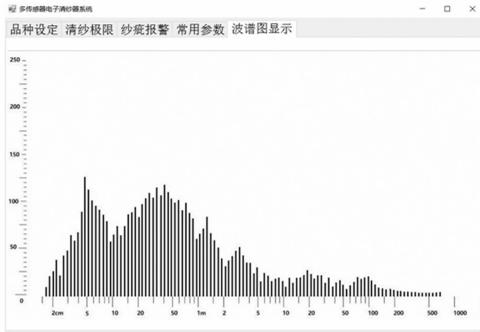


图 7 纱线波谱图

由分析可知, 纱线信号可视为幅值在一定范围内波动的随机信号, 不具有任何周期性特征。波谱图上如果有某一波长的幅值相对比较突出, 则说明该波长相对应的机械设备部位有故障, 需要对该部位进行检查维修。将实验获取到的波谱图与作为棉纺行业标准的乌斯特条干均匀度仪获取到的波谱图进行对比分析, 可以发现在各个波段幅值基本相同, 波形的轮廓也基本相似。相对于国内条干均匀度仪产生的 55 个波段的波谱图, 110 个波段能够更精确、全面地反映出纱线的波谱结构。同时为检测系统的稳定性, 对同一批纱线进行多次测量对比后, 结

(上接第 161 页)

表 2 双波段数据传输测试结果

序号	飞行时间	海拔高度/m	飞行距离/km	无线网络状态	C 波段信号电平/dBm	S 波段信号电平/dBm
1	10:28	地面	接通	-55	-18	
2	10:42	滑行起飞	接通	-53~-57	-16~-20	
3	10:42~10:57	248~5400	15~178	个别跳跃断开	-60~-80	-18~-49
4	11:11~11:17	5448	180~220	断开	-84~-90	-66
5	11:19	5456	213	瞬时接通	-80	-64
6	11:47	5400	185	接通	-79	-56
7	11:48~13:46	5400~2359	185~57	个别跳跃断开	-60~-80	-51~-68
8	13:50	2300~地面	渐近至落地	接通	-55~-75	-31~-18

络化发展, 是技术发展的必经之路。后续, 将通过飞行试验继续对数据传输性能进行测试, 并进一步完善和优化。

参考文献:

[1] 霍建华, 刘丹, 郭世伟. C 波段无线网与 S 波段遥测天线共用技术研究 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (10): 93-95.

[2] 宋政斌, 王伟, 权永刚. 无线网在飞行试验遥测传输中的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 153-154.

[3] 张俊民, 袁炳南, 白效贤. iNET 的技术框架和应用前景 [J]. 测控技术, 2010, 29 (11): 15-17.

果也基本一致。实验结果验证了该算法的可行性。

6 结论

在纱线生产过程中, 条干均匀度仪波谱图通过检测纱疵的周期性特征来确定机械设备的故障位置, 在实际的工业生产中具有重要的意义。采用优化算法后实现的波谱图解决了硬件电路复杂和软件计算量大的问题, 采用 110 个带通滤波器也提高了波谱图显示的精度和显示范围, 更为全面地反映出纱线的特征。系统如果想提高波谱图显示的精度, 可考虑增加滤波器的数目、重新分组或优化滤波器参数等方法。这样都能够更精确快速地找到故障部位, 但同时滤波器的频带范围和 DSP 的运算速度有了更高的要求。该算法也可用于其他工业生产中, 用来检测类似工序中的故障部位。

参考文献:

[1] 李俊美, 谢经明, 陈冰, 等. 基于 DSP 的棉条信号波谱分析及系统实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (3): 761-763, 767.

[2] 蔡成涛, 郑佳, 韩光照. 多段电容式锅炉液位测量系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (7): 35-38.

[3] 招惠玲, 周美娟, 胡远忠. 电容式液位测量系统的设计 [J]. 传感器技术, 2004, 23 (3): 40-41.

[4] Texas Instrument Corporation. TMS320F28335 Digital Signal Controllers Data Manual [Z]. Texas Instrument Corporation, 2007.

[5] Johansson H. On the design of IIR bandpass filters with an adjustable bandwidth and centre frequency [J]. Circuits and Systems, 2004, 16 (1): 1-12.

[6] 宋毅珺, 宋耀良, 李文渊. 分数阶 IIR 和 FIR 滤波器及其逆系统的研究 [J]. 电路与系统学报, 2011 (06): 41-45.

[7] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现 (第三版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[8] 王易炜, 张金鹏, 王龙. 基于 MATLAB 的数字滤波器设计及其在数据处理中的应用 [J]. 航空兵器, 2011 (4): 43-47.

[9] 谢海霞, 孙志雄. IIR 滤波器的 DSP 实现 [J]. 电子器件, 2013 (2): 194-196.

[4] 中华人民共和国国家军用标准 GJB 21.1B-2006. 遥测标准第 1 部分: 无线电信道 [S]. 2007.05.01.

[5] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 无线电遥测遥控 (上册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[6] 高京龙. 单脉冲单通道跟踪体制精度分析方法 [J]. 无线电工程, 2007, 37 (7): 32-34.

[7] 袁炳南, 霍朝晖, 白效贤. 新一代遥测网络系统——TmNS [J]. 测控技术, 2010, 29 (11): 18-21.

[8] Lewis R. High Performance S and C-band Autotracking Antenna [A]. International Telemetry Conference 2011 [C].