

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



载人航天出版工程

总主编：周建平
总策划：邓宁丰



现代航天遥测技术 [下]

李艳华 李凉海 谌明 彭泳卿 编著



 中国宇航出版社

北京遥测
技术研究所

目 录

第1章 绪论	1
1.1 航天遥测系统概念	1
1.2 航天遥测发展历程	2
1.2.1 遥测技术的发展	2
1.2.2 我国遥测系统的发展	4
1.2.3 遥测系统的未来发展	5
1.3 现代航天遥测系统组成	7
1.3.1 数据采集	8
1.3.2 数据传输	9
1.3.3 数据处理、显示及记录	11
1.4 现代航天遥测系统分类	11
1.5 现代航天遥测系统特点	13
1.6 航天遥测系统作用	14
参考文献	17
第2章 航天遥测技术基础	18
2.1 参数测量及数据采集	18
2.1.1 信息与信息量	18
2.1.2 信号的描述及分类	19
2.2 信息论简述	23
2.2.1 参数测量	23
2.2.2 数据采集	24
2.3 信息编码	28

2.3.1	信源编码	28
2.3.2	信源加密	36
2.3.3	信道编码	54
2.4	遥测传输链路基础	67
2.4.1	传输方程	67
2.4.2	噪声分析	69
2.4.3	遥测传输链路设计	75
2.5	信号调制与检测	76
2.5.1	信号调制	76
2.5.2	遥测信号复用	97
2.5.3	遥测信号检测	100
2.5.4	遥测信号同步	108
	参考文献	114
第3章	现代航天遥测系统	116
3.1	概述	116
3.1.1	航天遥测系统的发展演变	116
3.1.2	现代遥测需解决的问题及未来发展趋势	127
3.2	系统工作原理	131
3.2.1	遥测发送端	131
3.2.2	遥测接收端	131
3.2.3	遥测系统信息传输模型	137
3.3	系统总体设计	139
3.3.1	航天器轨道与空间环境	139
3.3.2	测量需求分析	157
3.3.3	遥测数据率论证	158
3.3.4	传输体制选择	160
3.3.5	传输频率选择	162
3.3.6	链路设计	168
3.3.7	六性设计	175

3.4	导弹火箭遥测系统	209
3.4.1	导弹火箭遥测系统的作用	210
3.4.2	导弹火箭遥测的特点	211
3.4.3	测量与传输体制	214
3.4.4	导弹火箭遥测系统组成和工作原理	248
3.4.5	导弹火箭遥测系统设计中的若干问题	249
3.4.6	再入遥测系统	263
3.5	卫星飞船遥测系统	276
3.5.1	卫星飞船遥测系统的作用	277
3.5.2	卫星飞船遥测的特点	277
3.5.3	遥测体制的选择	278
3.5.4	系统组成和工作原理	280
3.5.5	卫星飞船遥测系统设计中的若干问题	286
3.6	临近空间遥测系统	288
3.6.1	临近空间遥测系统的作用	288
3.6.2	临近空间遥测的特点	288
3.6.3	遥测体制的选择	290
3.6.4	系统组成和工作原理	296
3.6.5	临近空间遥测系统设计中的若干问题	297
3.7	深空遥测系统	302
3.7.1	深空遥测系统的作用	302
3.7.2	深空遥测的特点	303
3.7.3	深空遥测体制选择	306
3.7.4	深空遥测系统组成及关键技术	318
3.7.5	深空遥测系统的技术发展趋势	328
3.8	天基遥测系统	340
3.8.1	天基遥测系统的作用	341
3.8.2	天基遥测系统的特点	345
3.8.3	天基遥测体制的选择	348

3.8.4	天基遥测系统组成和工作原理	359
3.8.5	天基遥测系统设计中的若干问题	364
3.9	航天遥测技术在无人机领域的应用	364
3.9.1	无人机遥测系统的作用与特点	364
3.9.2	无人机遥测系统的发展现状与趋势	365
3.9.3	无人机系统设计中的若干问题	366
	参考文献	369
第4章	遥测传感器	373
4.1	概述	373
4.1.1	传感器的地位和作用	373
4.1.2	传感器的分类	376
4.1.3	传感器的静态特性	376
4.1.4	传感器的动态特性	378
4.2	航天遥测传感器和变换器	380
4.2.1	液位传感器	380
4.2.2	温度传感器	398
4.2.3	加速度传感器	419
4.2.4	压力传感器	451
4.2.5	位移传感器	468
4.2.6	热流传感器	479
4.2.7	烧蚀传感器	489
4.2.8	流量传感器	498
4.2.9	噪声传感器	516
4.2.10	信号变换器	529
4.3	传感器在航天型号中的典型应用	530
4.3.1	液位传感器典型应用	530
4.3.2	温度传感器典型应用	536
4.3.3	加速度传感器典型应用	541
4.3.4	热流传感器典型应用	542

4.3.5 烧蚀传感器典型应用	543
4.3.6 相对行程传感器典型应用	544
4.3.7 光学传感器典型应用	545
4.4 遥测传感器的发展趋势分析	546
参考文献	549
第5章 数据采集与调制发射	552
5.1 遥测数字信息的传输	552
5.1.1 常规遥测信息传输	552
5.1.2 图像信息传输	567
5.1.3 内测弹道信息传输	569
5.2 数据综合技术	578
5.2.1 多路信号采集	578
5.2.2 高速总线互联	581
5.2.3 信号存储与处理	604
5.2.4 遥测格式及生成	608
5.3 调制与发射技术	616
5.3.1 调前滤波	616
5.3.2 载波调制	622
5.4 数据压缩	650
5.4.1 数据压缩指标	650
5.4.2 无损压缩	650
5.4.3 图像压缩标准 JPEG2000 工作原理	650
5.4.4 视频压缩标准 H.264 工作原理	652
参考文献	654
第6章 遥测天线	655
6.1 概述	655
6.2 遥测天线基本参量	656
6.2.1 天线方向图	656

6.2.2	方向性系数	660
6.2.3	天线增益	662
6.2.4	天线阻抗	663
6.2.5	天线极化	665
6.2.6	天线效率	667
6.2.7	天线带宽	668
6.3	遥测天线类型	669
6.3.1	地面遥测天线	669
6.3.2	弹载遥测天线	671
6.3.3	箭载遥测天线	673
6.3.4	星载遥测天线	675
6.4	遥测天线设计	680
6.4.1	波导裂缝阵天线设计	680
6.4.2	微带天线设计	699
6.4.3	相控阵天线设计	708
6.4.4	反射面天线设计	733
6.5	新型遥测天线	740
6.5.1	透镜天线	740
6.5.2	可重构天线	748
6.6	遥测天线的结构、热设计	754
6.6.1	遥测天线的结构设计	754
6.6.2	遥测天线的电、机、热一体化设计	756
6.6.3	遥测天线的环境试验	757
6.6.4	可靠性工作	759
6.7	遥测天线的测量	760
6.7.1	天线电参数测量	760
6.7.2	远场测量技术	761
6.7.3	紧缩场测量技术	763
6.7.4	平面近场测量技术	765

6.7.5	球面近场测量技术	767
6.7.6	天线几何量测量技术	767
	参考文献	770
第7章	遥测信道	774
7.1	概述	774
7.2	主要参数	775
7.2.1	增益	775
7.2.2	1 dB 压缩点及饱和输出功率	777
7.2.3	噪声系数	777
7.2.4	幅频特性	779
7.2.5	相频特性	780
7.2.6	频率准确度与稳定度	782
7.2.7	组合频率	785
7.3	遥测信道主要组成部分	788
7.3.1	低噪声放大器	790
7.3.2	变频信道	791
7.3.3	频率基准源及频率合成器	793
7.3.4	功率放大器	796
7.3.5	T/R 组件	798
7.4	遥测信道测试方法	800
7.4.1	噪声系数的测量	801
7.4.2	同频增益的测量	801
7.4.3	互调和交叉点的测试	802
7.4.4	群时延及变频增益的测试	803
7.4.5	相位噪声测试	804
7.4.6	频率准确度测试	805
7.4.7	功率测试	806
7.4.8	自动化测试	807
7.5	遥测信道新技术	809

7.5.1	微波毫米波材料与工艺	809
7.5.2	MIC 工艺	812
7.5.3	CMOS 芯片技术	815
	参考文献	823
第 8 章	遥测跟踪系统	825
8.1	概述	825
8.1.1	遥测天线自跟踪系统的作用及特点	826
8.1.2	系统组成、功能及主要技术指标	827
8.2	跟踪体制	830
8.2.1	圆锥扫描体制	831
8.2.2	比相单脉冲跟踪体制	834
8.2.3	比幅单脉冲跟踪体制	835
8.2.4	高次模检出跟踪体制	837
8.2.5	多波束跟踪体制	838
8.2.6	各种跟踪体制的比较	838
8.3	角跟踪误差解调	839
8.3.1	圆锥扫描体制跟踪误差解调	840
8.3.2	比相单脉冲跟踪体制跟踪误差解调	840
8.3.3	比幅单脉冲跟踪体制跟踪误差解调	842
8.3.4	高次模检出跟踪体制跟踪误差解调	842
8.3.5	角误差标校	843
8.4	天线座	844
8.4.1	天线座的种类和用途	844
8.4.2	风载荷计算	845
8.4.3	驱动功率计算	851
8.4.4	天线座设计中的若干问题	853
8.5	伺服控制	857
8.5.1	概述	857
8.5.2	伺服系统设计	870

8.5.3 数字伺服系统	891
8.6 角跟踪误差分析	907
8.6.1 系统误差分析	907
8.6.2 随机误差分析	914
参考文献	921
第9章 遥测基带	922
9.1 发展历程	922
9.2 数字化处理	924
9.2.1 采样理论	924
9.2.2 中频采样	932
9.2.3 射频采样	933
9.2.4 增益控制	940
9.2.5 数字滤波	942
9.3 信号合成技术	950
9.3.1 分集合成	951
9.3.2 组阵合成	959
9.3.3 数字波束形成	965
9.3.4 MIMO 技术	968
9.4 解调与同步	972
9.4.1 载波、副载波解调	972
9.4.2 均衡器	979
9.4.3 符号同步	983
9.4.4 帧同步	988
9.4.5 信道译码	990
9.4.6 数据时标	1000
9.5 指标测试	1004
9.5.1 解调损失	1005
9.5.2 信道编码增益	1005
9.5.3 工作门限	1006

9.5.4	动态适应能力	1006
9.5.5	捕获时间	1006
9.5.6	遥测解调时延	1007
9.6	几类高效率的遥测体制	1007
9.6.1	恒包络调制体制	1008
9.6.2	准恒包络调制体制	1017
9.6.3	高阶调制体制	1022
9.6.4	正交频分复用调制体制	1026
9.6.5	直扩/跳频混合扩频体制	1033
9.6.6	超宽带体制	1040
9.7	遥测基带的发展趋势	1044
9.7.1	集成化、小型化	1044
9.7.2	软件化	1046
9.7.3	智能化	1050
9.7.4	网络化	1054
	参考文献	1059
第 10 章	遥测数据记录	1063
10.1	概述	1063
10.2	特种存储回收	1064
10.2.1	特种存储技术	1064
10.2.2	回收信标技术	1064
10.3	地面数据记录	1065
10.3.1	地面数字记录的基础知识	1065
10.3.2	地面记录分类	1079
10.3.3	数据获取	1082
10.3.4	数据存储和管理	1086
10.3.5	数据回放	1095
10.3.6	数据的完整性和安全性保证	1099
10.3.7	地面遥测记录设备的技术发展趋势	1100

参考文献	1102
第 11 章 遥测数据处理	1103
11.1 概述	1103
11.1.1 遥测数据的分类	1103
11.1.2 遥测数据处理的作用	1104
11.1.3 遥测数据处理的特点	1104
11.2 遥测数据处理分类	1106
11.2.1 实时处理	1106
11.2.2 准实时及事后处理	1107
11.3 遥测数据处理方法	1108
11.3.1 数据预处理方法	1108
11.3.2 缓变参数处理方法	1114
11.3.3 速变参数处理方法	1130
11.3.4 卫星导航参数处理	1147
11.3.5 图像语音数据处理方法	1149
11.3.6 遥控及安控数据处理方法	1150
11.3.7 有效载荷及其他数据处理方法	1150
11.3.8 商业软件在数据处理中的应用	1150
11.4 遥测数据处理过程	1151
11.5 数据解压缩	1161
11.5.1 JPEG2000 解码工作原理	1161
11.5.2 H.264 解码工作原理	1162
11.6 遥测数据处理的发展趋势	1163
参考文献	1164
第 12 章 遥测系统软件	1165
12.1 概述	1165
12.2 遥测软件架构	1166
12.2.1 软件架构概述	1166

12.2.2	软件复用	1168
12.2.3	经典架构风格	1169
12.2.4	客户/服务器风格	1170
12.2.5	分布式遥测系统软件	1172
12.3	遥测系统监控	1178
12.3.1	监控体系	1178
12.3.2	监控流程	1180
12.3.3	参数管理	1183
12.3.4	状态巡检	1185
12.4	遥测数据管理	1185
12.4.1	数据采集与整理	1186
12.4.2	数据存盘及回放	1190
12.4.3	数据质量检查	1192
12.4.4	遥测数据交互	1192
12.5	自动化管理	1193
12.5.1	计划任务管理的重要概念定义	1194
12.5.2	自动化运行	1196
12.5.3	自动化测试	1198
12.5.4	自动化故障诊断	1200
12.5.5	自动化标校	1201
12.6	用户管理	1202
12.7	日志管理	1204
12.8	软件工程化	1205
12.8.1	遥测系统软件研制各阶段工作	1206
12.8.2	遥测系统软件研制管理工作	1211
12.8.3	遥测系统软件的可靠性、安全性	1214
12.8.4	软件可靠性	1214
12.8.5	软件安全性	1215
12.8.6	全生命周期提高软件可靠性和安全性	1216

12.9 遥测系统软件的发展趋势	1217
参考文献	1219
第 13 章 遥测信息安全	1220
13.1 概述	1220
13.2 遥测信息加密	1221
13.2.1 遥测信息加密要求	1221
13.2.2 遥测信息加密组成	1222
13.2.3 遥测信息加密算法选取	1223
13.3 密码同步	1223
13.4 密钥管理	1224
13.4.1 密钥生成	1225
13.4.2 密钥的分层次管理	1226
13.4.3 密钥分发	1226
13.4.4 密钥使用	1227
13.4.5 密钥更新	1228
13.4.6 密钥备份和恢复	1228
13.4.7 密钥销毁	1229
13.5 遥测系统抗干扰技术	1229
13.6 遥测系统抗干扰分析	1230
参考文献	1235
第 14 章 遥测系统测试	1237
14.1 概述	1237
14.2 系统测试内容	1237
14.2.1 遥测传输设备测试内容	1238
14.2.2 遥测接收系统测试内容	1255
14.3 系统测试方法	1258
14.3.1 品质因数 G/T 测量	1258
14.3.2 系统噪声温度测量	1263

14.3.3	系统幅频特性测量	1264
14.3.4	系统群时延特性测量	1267
14.3.5	饱和电平测量	1268
14.3.6	载噪比测量	1269
14.3.7	系统信号载噪比损失测量	1271
14.3.8	多载波互调比测量	1272
14.3.9	系统相位噪声测量	1273
14.3.10	系统误比特率 BER 测量	1274
14.3.11	跟踪精度测量	1275
14.3.12	跟踪牵引特性测量	1279
14.3.13	指向精度测量	1280
14.3.14	角速度和角加速度测量	1282
	参考文献	1283
第 15 章	遥测标准简介	1285
15.1	IRIG106 遥测标准	1285
15.1.1	概述	1285
15.1.2	IRIG106-17 遥测标准介绍	1285
15.2	GJB 遥测标准	1286
15.3	CCSDS 标准	1288
15.3.1	CCSDS 简介	1288
15.3.2	空间数据网的概念模型	1289
15.3.3	CCSDS 建议书类型	1292
15.3.4	CCSDS 与 ISO 的关系	1293
15.3.5	CCSDS 标准与 IRIG 标准的区别	1293
15.4	ESA 遥测标准	1294
	参考文献	1295

第 6 章 遥测天线

遥测天线的作用是进行自由空间中传播的电磁波与电路中电磁信号之间的转换，是任何一个现代航天遥测系统不可或缺的重要组成部分，遥测天线性能直接影响并制约着整个遥测系统的性能和功能。随着现代航天遥测系统性能的不不断提高和功能的持续改进，遥测天线技术的进步已经成为促进现代航天遥测技术进步和空间应用发展的重要因素。

6.1 概述

遥测天线是现代航天遥测系统的重要组成部分，它的任务就是与地面遥测站一起建立满足预定要求的、稳定可靠的无线电传输通道，保证运载火箭、导弹、卫星的无线遥测、控制，以及跟踪信息的发射、接收与传输。

随着现代航天遥测系统的发展，遥测天线有以下技术特点：1) 遥测天线没有固定的形式，遥测天线可具有不同载荷、不同载体以及不同的任务要求，遥测天线的形式各异、差别很大，而且不断更新和变化是它的一大特点；2) 遥测天线要经历严酷的力学与空间环境，环境因素直接影响其设计和性能，对遥测天线除电性能要求外，必须考虑环境因素带来的电性能、机械结构、材料特性、热特性和寿命的特殊影响及防护；3) 执行各自任务的天线同时安装在一个载体上，形成高密度、宽频谱、强信号发射和弱信号接收同时存在，再加上天线周围物体的散射、反射和绕射影响，使其电磁环境复杂，电磁兼容问题变得非常突出；4) 星载遥测天线的在轨不可维修性和长寿命要求，特殊的环境条件以及单点失效的工作模式均对天线的