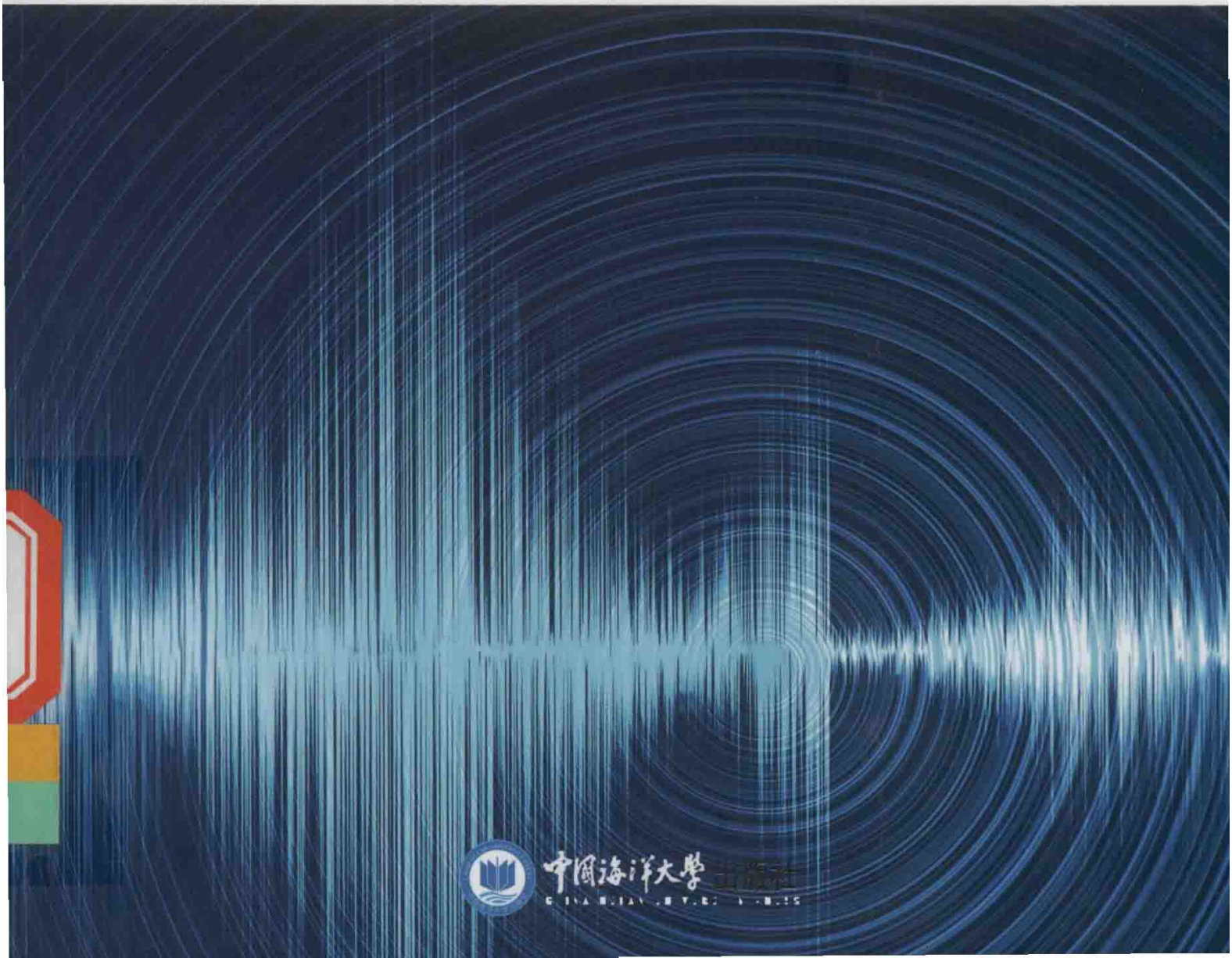
Theory and Practice of Radio Monitoring

无线电监测理论与实践

孙 涛 胡佳庆 王 鑫 编著



中国海洋大学出版社

无线电监测理论与实践

孙 涛 胡佳庆 王 鑫 编著

中国海洋大学出版社
·青岛·

图书在版编目(CIP)数据

无线电监测理论与实践 / 孙涛，胡佳庆，王鑫编著
-- 青岛：中国海洋大学出版社，2022. 8
ISBN 978-7-5670-3271-2

Ⅰ. ①无… Ⅱ. ①孙… ②胡… ③王… Ⅲ. ①无线电信号－监测 Ⅳ. ① TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 166665 号

出版发行	中国海洋大学出版社		
社　　址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码	266071
出 版 人	刘文菁		
网　　址	http://pub.ouc.edu.cn		
电子信箱	zhengxuejiao@ouc-press.com		
订购电话	0532－82032573(传真)		
责任编辑	郑雪姣	电　　话	0532-85901092
印　　制	日照日报印务中心		
版　　次	2022 年 12 月第 1 版		
印　　次	2022 年 12 月第 1 次印刷		
成品尺寸	170 mm ×230 mm		
印　　张	19.75		
字　　数	385 千		
印　　数	1 ～ 1 000		
定　　价	59. 00 元		

前言 FOREWORD

随着社会经济的飞速发展，各行各业对无线电业务提出了越来越广泛和迫切的需求，无线电业务从技术体系到应用领域都呈现出日新月异、如火如荼的发展态势。在无线电技术进步的支撑下，无线电业务在国民经济各行业与各领域迅速普及、广泛渗透，日益发挥着基础平台和关键支撑的作用，成为直接推动经济发展和社会进步的重要生产力要素。

由于无线电新技术、新设备的大量运用和无线电监测工作的大量增加，无线电监测系统和监测任务日趋复杂，无线电监测技术人员有许多新的知识和技能需要去学习和充实，迫切需要系统化、理论与实践相结合的无线电监测培训书籍。为了适应无线电监测工作变化发展，满足无线电相关从业人员的需求，我们从现有无线电监测网的实际出发，以通信相关专业的无线电基础理论为依托，编写了这本以无线电相关从业人员为主要对象，同时也可以扩展到其他相关行业的《无线电监测理论与实践》。

本书在风格上力求文字精练、脉络清晰，阐述了无线电监测及测向理论与实践应用，主要包含了无线电基础概述、信号特征分析、监测及测向原理、主要监测设施及建设施工要求、无线电技术发展应用及未来展望等方面的内容。本书可作为无线电工作人员培训的学习用书，也可供无线电、通信等专业的学生以及从事无线电相关工作的工程人员参考。

在编写过程中，我们参考了很多无线电监测方面相关的著作、学术论文及互联网上的文章，这些都给予了编者很大的启迪，在此表示由衷感谢。由于水平有限，难免存在不足，敬请读者批评指正。

目录 CONTENTS

第一章 无线电概述 …… 1

第一节 无线电基础 …… 1

1. 基本概念 …… 1

2. 国际电信联盟 …… 4

第二节 无线电的应用 …… 7

1. 无线电的用途 …… 7

2. 通信系统分类 …… 13

第二章 无线电信号特征分析 …… 19

第一节 概述 …… 19

1. 信号特征分类 …… 19

2. 一般技术特征 …… 20

3. 细微技术特征 …… 21

4. 输出口的选择 …… 22

第二节 模拟信号分析 …… 23

1. AM 信号特征 …… 23

2. FM 信号特征 …… 24

3. DSB 信号特征 …… 26

4. SSB 信号特征 …… 26

第三节 数字信号特征分析 …… 28

1. 2ASK 信号特征 …… 28

2. 2FSK 信号特征 …… 28

3. 2PSK 信号特征 …… 29
4. 4PSK 信号特征 …… 30
第四节　多路复用和特殊信号分析 …… 31
1. 多路复用信号特征 …… 31
2. 多路并发信号特征 …… 33
3. 扩频信号特征 …… 34
4. 跳频信号特征 …… 37

第三章　无线电监测 …… 40

第一节　无线电波与天线 …… 40
1. 电磁波分类 …… 40
2. 传播规律 …… 41
3. 天线技术 …… 43
第二节　无线电通信系统 …… 48
1. 模拟通信系统 …… 48
2. 数字通信系统 …… 50
3. 调制与解调 …… 55
4. 信号数字化 …… 61
第三节　无线电监测的内容 …… 63
1. 影响因素 …… 63
2. 技术参数 …… 67

第四章　无线电测向 …… 70

第一节　理论基础 …… 70
1. 示向度 …… 70
2. 定位 …… 70
3. 天线的方向性 …… 71
4. 极化 …… 71
5. 天线系数 …… 73
第二节　测向机制 …… 73
1. 垂直旋转环测向机 …… 73
2. 旋转阿德考克测向机 …… 76
3. 双通道相关干涉仪测向机 …… 77
4. 三通道相关干涉仪测向机 …… 80

5. 单通道相关干涉仪测向机 …… 81
6. 数字式相位计测向法 …… 83
7. 沃森-瓦特测向机 …… 86
8. 多普勒测向机 …… 88
第三节 接收机 …… 90
1. 直放式接收机 …… 90
2. 超外差接收机 …… 90
3. 宽带数字接收机 …… 92
第四节 无线电测向技术新发展 …… 95
1. 空间谱定位技术 …… 95
2. 时差定位技术 …… 99
3. 单站定位技术 …… 104
4. 宽带时短信号 …… 107

第五章 无线电监测设施 …… 108

第一节 固定监测系统 …… 108
1. 系统组成 …… 108
2. 功能要求 …… 109
3. 性能要求 …… 115
第二节 移动监测系统 …… 116
1. 总体要求 …… 116
2. 功能要求 …… 117
3. 性能要求 …… 118
4. 车辆改装 …… 121
5. 其他配置 …… 122
第三节 航空监测系统 …… 123
1. 工作原理 …… 123
2. 功能要求 …… 124
3. 性能要求 …… 125
第四节 铁路监测系统 …… 126
1. 建设意义 …… 126
2. 功能要求 …… 127
3. 性能要求 …… 128
第五节 船舶监测系统 …… 129

1. 工作原理 …… 129
2. 安装要求 …… 130
3. 功能要求 …… 131
4. 性能要求 …… 134
第六节 空中监测系统 …… 135
1. 建设意义 …… 135
2. 系统组成 …… 136
3. 功能要求 …… 137
4. 性能要求 …… 140
第七节 传感器监测系统 …… 141
1. 系统组成 …… 142
2. 系统特点 …… 142
3. 功能要求 …… 143
4. 性能要求 …… 147
第八节 众包监测系统 …… 149
1. 实现目标 …… 149
2. 功能要求 …… 150
3. 性能要求 …… 154
第六章 监测设施建设 …… 155
第一节 站址选择 …… 155
1. 选址原则 …… 155
2. 地理环境要求 …… 155
3. 电磁环境要求 …… 156
4. 其他附加要求 …… 157
第二节 机房建设 …… 159
1. 选址要求 …… 159
2. 建设要求 …… 159
3. 环境要求 …… 160
4. 安装要求 …… 163
5. 供配电要求 …… 166
第三节 铁塔建设 …… 168
1. 设计要求 …… 169
2. 天线安装 …… 171

3. 布线要求 …… 171
4. 传感器要求 …… 173
第四节 防雷建设 …… 173
1. 设计要求 …… 174
2. 机房防雷 …… 175
3. 铁塔防雷 …… 177
4. 接地防雷 …… 178
第五节 其他需求 …… 180
1. 消防要求 …… 180
2. 环境安防 …… 181
3. 三防处理 …… 181
第六节 安装施工 …… 183
1. 基本要求 …… 183
2. 安全生产 …… 184
3. 设备安装 …… 186

第七章 电磁环境测试 …… 191

第一节 电磁环境测试基础 …… 191
1. 概述 …… 191
2. 测试要素 …… 192
第二节 机场电磁环境测试 …… 193
1. 测试规范 …… 193
2. 术语及定义 …… 193
3. 测试地点选择 …… 195
4. 测试参数计算 …… 195
5. 测试数据换算 …… 196
第三节 卫星地球站电磁环境测试 …… 198
1. 天线参数计算 …… 198
2. 测试系统及参数 …… 198
3. 测试方法及文档 …… 199
第四节 微波站电磁环境测试 …… 200
1. 测试系统 …… 201
2. 测试灵敏度 …… 201
3. 测试内容和方法 …… 202

4. 干扰允许值 …… 202

第八章 移动通信技术 …… 204

第一节 第一代移动通信技术 …… 204
1. 发展历程 …… 204
2. 技术制式 …… 205
第二节 第二代移动通信技术 …… 205
1. 发展历程 …… 206
2. 技术制式 …… 206
第三节 第三代移动通信技术 …… 207
1. 发展历程 …… 208
2. 行业标准 …… 210
3. 关键技术 …… 211
4. 技术制式 …… 214
第四节 第四代移动通信技术 …… 215
1. 发展历程 …… 215
2. 技术特点 …… 216
3. 接入系统 …… 216
4. 关键技术 …… 217
第五节 第五代移动通信技术 …… 219
1. 发展历程 …… 219
2. 性能指标 …… 221
3. 关键技术 …… 221
4. 应用领域 …… 227
第六节 第六代移动通信技术 …… 230
1. 发展现状 …… 230
2. 性能指标 …… 231
3. 关键技术 …… 231
4. 未来展望 …… 233

第九章 无线电的发展及展望 …… 234

第一节 无线电技术发展 …… 234
1. 广电领域 …… 234
2. 气象领域 …… 237

3. 航空领域 …… 242
4. 航天领域 …… 245
5. 航海领域 …… 254
6. 铁路领域 …… 256
第二节 新时期无线电技术展望 …… 264
1. WLAN …… 264
2. RFID …… 272
3. 卫星导航 …… 278
4. 物联网 …… 281
5. 车联网 …… 287
6. 无线城市 …… 295

参考文献 …… 300

第一章　无线电概述

第一节　无线电基础

1. 基本概念

(1) 无线电的发现。

无线电的通信起源可以追溯到100多年前无线电的发现。1831年，英国法拉第首先发现了电磁感应现象。1865年，英国科学家麦克斯韦在总结前人研究电磁现象的基础上，于1873年总结出了电磁场理论方程组，建立了完整的电磁场理论。1887年赫兹验证了电磁波的存在。1895年意大利的马可尼和俄国的波波夫分别利用电磁波成功地进行了莫尔斯电码的发射和接收的实验，发展了无线电，开创了人类开发利用无线电的新纪元。无线电经过一百多年的发展，逐步被人类所认识，并被广泛运用于国防建设、经济发展、社会生活的各个领域，在人类社会的发展中起到了重要的推动作用。其中，德国物理学家赫兹用实验证实了电磁波的存在，为无线电技术的发展开拓了道路，被誉为无线电通信的先驱。后人为了纪念他，用他的名字命名了频率的单位。

1905年7月，北洋大臣袁世凯在天津开办了无线电训练班，购置马可尼无线电机，在南苑、保定、天津等处行营及部分军舰上装用，用无线电进行相互联系，开办了中国第一所中央政府所属军用无线电报学堂。中国人自己开办的第一个广播电台是由无线电专家刘瀚1926年10月1日在哈尔滨创办的。早期，国际无线电管理机构划分了专门的无线电频率用于海上船舶遇险呼救，呼救信号是SOS。1958年5月1日，新中国的第一家电视台——北京电视台成立，并试验播出，1958年9月2日正式播出，北京电视台是中央电视台的前身。

(2) 无线电波。

无线电波是电磁波的一部分,它通过电场和磁场的交替变化,以 3×10^8 米/秒(光速)在自由空间(包括空气和真空)向各个方向传播。其频率一般为 3 kHz～300 GHz。

(3) 无线电波段。

无线电波根据波长和频率,可分为超长波、长波、中波、短波、超短波、微波等波段(也称频段)。长波,主要用于导航,引导舰船和飞机按预定线路航行;中波作为大众媒介的信息渠道,我们平时就是在这个波段收听本地广播电台的中波节目;短波作为远距离通信频率;超短波作为电视的信使,此外,还有一部分用于高质量的调频广播。

长波,指波长为 1 000～10 000 m 的无线电波。长波传播时,具有传播稳定优点。其传播方式主要是绕地球表面以电离层波的形式传播,作用距离可达几千到上万 km,此外,在近距离(200～300 km)也可以由地面波传播,主要用于对潜艇的通信和远洋航行的舰艇通信等。

中波,指波长为 100～1 000 m 的无线电波,主要用于广播、导航和通信等方面。中波传播兼有长波和短波传播的某些特点,它既可以沿地表面绕射传播,也可以通过电离层反射传播。

短波,是指波长为 10～100 m 范围内的无线电波。短波可以沿地面以地波方式传播,也可通过电离层反射以天波方式传播。短波的主要传播途径是天波,依靠电离层来反射传播的,广泛用于远距离通信和广播。

超短波,指波长为 1～10 m 的无线电波。主要依靠空间波传播,用于导航、电视、调频广播、雷达、电离层散射通信、固定和移动通信业务等。

微波,是使用波长为 0.1 mm 至 1 m 之间的无线电波。微波不需要固体介质,当两点间直线距离内无障碍时就可以使用微波传送。利用微波进行通信具有容量大、质量好并可传至很远的距离,因此是国家通信网的一种重要通信手段,也普遍适用于各种专用通信网。

通常情况下,无线电波的频率越高,损耗越大,反射能力越强,绕射能力越低。无线电波的频率越高,其波长越短;无线电波的频率越低,其波长越长。

(4) 无线电波的传播方式。

无线电波有四种主要传播方式,即地波、天波、空间波和散射波。

地波,沿地面传播的无线电波叫地波,又叫表面波。电波的波长越短,越容易被地面吸收,因此只有长波和中波能在地面传播。

天波,经过空中电离层的反射或折射后返回地面的无线电波叫天波。短波是利用电离层反射传播的最佳波段。利用电离层反射的传播方式称为天波

传输。

空间波，直射波和地面反射波统称为空间波，其传播情形主要取决于对流层和地面。超短波通常是利用空间波来传播的。

散射波，利用对流层或电离层对电波的散射作用而传播的电波，其传播情形主要取决于对流层或电离层。利用散射波可实现超短波中距离和远距离通信及雷达的远程侦察。

在中波、短波和长波传输过程中，长波最为稳定。

(5) 无线电频率资源的特性。

无线电频率既有一般自然资源属性，又有它自身特殊的固有属性。无线电频谱的属性包括两个主要方面：一是无线电频谱是自然资源，属国家所有；从世界范围来讲，无线电频谱又是一项人类共享的自然资源。二是无线电频率还有它的固有特性，主要有 6 个方面：

有限性。由于较高频率上无线电波的传播特性，无线电业务不能无限地使用较高频段的无线电频率，目前人类对于 3 000 GHz 以上的频率还无法开发和利用，尽管使用无线电频谱可以根据时间、空间、频率和编码四种方式进行频率的复用，但就某一频段和频率来讲，在一定的区域、一定的时间和一定的条件下使用频率是有限的。

排他性。无线电频谱资源与其他资源具有共同的属性，即排他性，在一定的时间、地区和频域内，一旦被使用，其他设备是不能再用的。

复用性。虽然无线电频谱具有排他性，但在一定的时间、地区、频域和编码条件下，无线电频率是可以重复使用和利用的，即不同无线电业务和设备可以频率复用和共用。

非耗竭性。无线电频谱资源又不同于矿产、森林等资源，它是可以被人类利用，但不会被消耗掉，不使用它是一种浪费，使用不当更是一种浪费，甚至由于使用不当产生干扰而造成危害。

固有传播特性。无线电波按照一定规律传播，不受行政地域的限制，是无国界的。

易污染性。如果无线电频率使用不当，就会受到其他无线电台、自然噪声和人为噪声的干扰而无法正常工作，或者干扰其他无线电台站，使其不能正常工作，使之无法准确、有效和迅速地传送信息。

(6) 电磁辐射。

电磁辐射是指能量以电磁波形式由源发射到空间的现象。电磁辐射在我们周围的环境中随处存在，所有的电子和电气设备在工作时都会产生电磁辐射，如电视机、电吹风、计算机、日光灯等家用电器，电动机、输电线、变压器、电焊等工

业设备和X光机、CT仪、紫外线器械等医疗设备工作时都会产生电磁辐射。还有大家熟悉的广播电视、无线电通信、无线导航等无线电通信设备也是通过电磁辐射来传输声音、数据和图像。电磁辐射正被人们不断地开发利用，将会渗透到人们生活中更多的领域。

当电磁辐射能量（其大小用场强表示）被控制在一定限度内时，它对人体、有机体及其他生物体是有益的，它可以加速生物体的微循环、防止炎症的发生，还可促进植物的生长和发育。电磁辐射只有达到一定强度（即超过了安全卫生标准的限值）才会对人体健康造成危害。

广播电视、移动通信（含手机或基站）、家用电器、医疗设备、测量与控制设备等，都会产生电磁辐射。如无线上网正常使用，但附近有微波炉工作时，无线上网网络会时断时续，主要是由微波炉产生的电磁干扰生成的。但是并不是所有电磁辐射对人体都能造成伤害，而是达到一定量或者说强度后，才会对人有害。

（7）无线电监测。

无线电监测是采用先进的技术手段和一定的设备对无线电发射的基本参数如频率、频率误差、射频电平、发射带宽等系统地进行测量，对声音信号进行监听，对发射标识识别确定，对频段利用率和频道占用度进行统计，分析信号使用情况，以便合理、有效地指配频率，对非法电台和干扰源测向定位进行查处。

无线电测向，是指利用接收无线电波来确定一个电台或目标的方向的无线电定位。

2. 国际电信联盟

国际电信联盟是联合国的一个重要专门机构，也是联合国机构中历史最长的一个国际组织，简称“国际电联”“电联”或“ITU”。其历史可以追溯到1865年。为了顺利实现国际电报通信，1865年5月17日，法国、德国、俄国、意大利等20个欧洲国家的代表在巴黎签订了《国际电报公约》，国际电报联盟（ITU）也宣告成立。随着电话与无线电的应用与发展，国际电信联盟的职权不断扩大，1906年，德、英、法、美、日等27个国家的代表在柏林签订了《国际无线电报公约》。1932年，70多个国家的代表在西班牙马德里召开会议，将《国际电报公约》与《国际无线电报公约》合并，制定《国际电信公约》，并决定自1934年1月1日起正式改称为“国际电信联盟”，经联合国同意，1947年10月15日国际电信联盟成为联合国的一个专门机构，其总部由瑞士伯尔尼迁至日内瓦。1969年5月17日，是国际电信联盟的成立日，这一天被定为“世界电信日”。中国1920年加入国际电报联盟，1972年被国际电信联盟理事会承认并恢复中国的合法席位，1973年被选为电联理事国。

国际电信联盟是联合国的15个专门机构之一，其成员包括193个成员国和700多个部门成员及部门准成员和学术成员，在法律上不是联合国附属机构，它的决议和活动不需联合国批准，但每年要向联合国提出工作报告。国际电信联盟是主管信息通信技术事务的联合国机构，负责分配和管理全球无线电频谱与卫星轨道资源，制定全球电信标准，向发展中国家提供电信援助，促进全球电信发展。

(1) 宗旨使命。

国际电信联盟的宗旨，可定义如下：

保持和发展国际合作，促进各种电信业务的研发和合理使用；

促使电信设施的更新和最有效的利用，提高电信服务的效率，增加利用率和尽可能达到大众化、普遍化；

协调各国工作，达到共同目的，这些工作可分为电信标准化、无线电通信规范和电信发展3个部分，每个部分的常设职能部门是“局”，其中包括电信标准局(TSB)、无线通信局(RB)和电信发展局(BDT)。

国际电联的使命是使电信和信息网络得以增长和持续发展，并促进普遍接入，以便世界各国人民都能参与全球信息经济和社会并从中受益。

国际电联还针对防灾和减灾努力加强应急通信。尽管发展中国家和发达国家均会受到自然灾害的威胁，但是较贫穷的国家由于其薄弱的经济能力和资源的匮乏往往受到最沉重的打击。

无论是制定全球范围内电信服务的标准，还是通过对无线电频谱和卫星轨道进行公平管理以便将无线业务推广到世界每个角落，抑或向努力制定电信发展战略的国家提供支持，国际电联开展的所有工作均围绕着一个目标，即让所有人均能够方便地获取信息和通信服务，从而为全人类的经济和社会发展做出重大贡献。

(2) 成员情况。

国际电联既吸收各国政府作为成员国加入，也吸收运营商、设备制造商、融资机构、研发机构和国际及区域电信组织等机构作为部门成员加盟。

随着电信在全面推动全球经济活动中的作用与日俱增，加入国际电联使政府和机构能够在这个拥有140多年世界电信网络建设经验的机构中发挥积极作用。通过加入这一世界上规模最大，最受尊重和最有影响的全球电信机构，政府和行业都能确保其意见得到表达，并有力和有效地推进发展我们周围的世界再次旧貌换新颜。私营公司及其他机构可以根据其关注领域，选择加入国际电联三个部门当中的一个或多个。无论通过出席大会、全会及技术会议，还是从事日常工作，成员都可以享受到独特的交流机会和广泛交流环境，讨论问题并结成业

务与合作关系。国际电联部门成员也开展标准制定工作，用以支持未来的电信系统和造就未来的网络与服务。

(3) 主要工作。

管理国际无线电频谱和卫星轨道资源是国际电联无线电通信组(ITU-R)的核心工作。

国际电联《组织法》规定，国际电联有责任对频谱和频率指配，以及卫星轨道位置和其他参数进行分配和登记，避免不同国家间的无线电电台出现有害干扰。因此，频率通知、协调和登记的规则程序是国际频谱管理体系的依据。ITU-R 的主要任务亦包括制定无线电通信系统标准，确保有效使用无线电频谱，并开展有关无线电通信系统发展的研究。此外，ITU-R 从事有关减灾和救灾工作所需无线电通信系统发展的研究，具体内容由无线电通信研究组的工作计划予以涵盖。与灾害相关的无线电通信服务内容包括灾害预测、发现、预警和救灾。在有线通信基础设施遭受严重或彻底破坏的情况下，无线电通信服务是开展救灾工作最为有效的手段。

国际电联《无线电规则》及其“频率划分表”定期进行修订和更新，以满足人们对频谱的巨大需求。这一修订和更新工作对于适应现有系统的迅速发展并满足开发中的先进无线技术对频谱的需求十分重要。每三至四年举行一次的国际电联世界无线电通信大会(WRC)是国际频谱管理进程的核心所在，同时也是各国开展实际工作的起点。世界无线电通信大会审议并修订《无线电规则》，确立国际电联成员国使用无线电频率和卫星轨道框架的国际条约，并按照相关议程，审议属于其职权范围的、任何世界性的问题。

从实施《无线电规则》，到制定有关无线电系统和频谱/轨道资源使用的建议书和导则，ITU-R 通过开展种类繁多的活动在全球无线电频谱和卫星轨道管理方面发挥着关键作用。数量巨大、增长迅速且有赖于无线电通信来保障陆地、海上和空中人身财产的各类业务，如固定、移动、广播、业余、空间研究、气象、全球定位系统和环境监测等，对频谱和轨道这些有限的自然资源的需求与日俱增。

无线电通信部门研究无线通信技术和操作，出版建议书，还行使世界无线电行政大会(WARC)、(CCZR)和频率登记委员会的职能，包括：

无线电频谱在陆地和空间无线电通信中的应用；

无线电通信系统的特性和性能；

无线电台站的操作；

遇险和安全方面的无线电通信。