

第3章 无线通信频率范围及应用

无线通信频率范围非常广泛,涵盖了从极低频到极高频的广大范围。不同频段的应用与技术特点也会有所差异,因此在进行无线通信时,需要选择合适的频段及相应的技术方案以满足特定的通信需求。无线通信频率范围广泛,从极低频到极高频覆盖了不同的频段。无线通信频率的选择取决于应用需求和可用频谱资源。低频范围适用于长波通信和电力线通信等;中频范围主要用于短波广播和导航系统等;高频范围广泛应用于无线电通信、电视广播以及航空航海通信等;微波频段则用于卫星通信、雷达和移动通信等。每个频段都具有特定的传播特性和应用场景,因此了解无线通信频率范围及其应用有助于选择合适的频段并为特定的无线通信应用提供解决方案。本章主要介绍频率和波长的关系,介绍电磁波频率范围和波段。结合电磁波的频段划分,介绍各频段无线电业务。最后介绍无线电频谱管理的内容及其重要性。



视频讲解

3.1 频率和波长

在无线电测量中,频率和波长是电磁波两个重要的物理参数。频率指无线电信号振荡周期的数量,通常以赫兹(Hz)为单位表示。频率越高,每秒钟内信号的周期数就越多。不同频率的无线电信号在传播特性上有所不同,对应着不同的传输距离、穿透能力和干扰情况。波长指无线电信号的一个完整振荡周期所占据的空间距离。波长与频率之间存在一个简单的反比关系,即波长等于光速除以频率。较低的频率对应着较长的波长,而较高的频率对应着较短的波长。电磁波的周期和波长如图 3.1 所示。

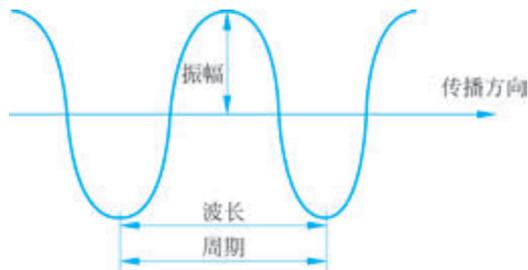


图 3.1 电磁波的周期和波长

在无线电测量中,频率和波长都是关键参数,影响着信号的传输和接收方式。测量中常使用频率或波长来描述无线电信号的特征,并根据需求选择合适的频率范围和波长进行测

量和分析。电磁波频率常用的单位有 Hz、kHz、MHz、GHz 等。

除了频率,电磁波通常也用波长来描述。电磁波波长指电磁波在空间中一个完整周期所占据的距离。不同波长的电磁波具有不同的特性和应用。例如,长波长的电磁波能够穿透物体,适用于地下通信和海底通信等;短波长的电磁波能够携带更高的频率信息,适用于高速数据传输和微波炉等。了解和利用电磁波波长范围,对于无线通信和电磁波应用具有重要意义。电磁波波长常用的单位有 mm、 μm 、nm、pm、fm 等。

波长与波速和频率之间有一个简单的关系,即波长等于波速除以频率。在真空中,电磁波的波速近似等于光速 c ,约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。因此,波长和频率之间满足式(3-1)。

$$\lambda = c/\nu \quad (3-1)$$

其中,频率 ν 越高,波长 λ 越短;频率 ν 越低,波长 λ 越长。电磁波的波长范围非常广泛,从极长波的数千千米到极短波的纳米级。

3.2 电磁波频率范围和波段

电磁波频率范围很广,包括无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和 γ 射线等。下面是电磁波的常见频率范围和对应的波段。

(1) 无线电波:频率范围为 $10^3 \sim 3 \times 10^{10} \text{ Hz}$ 。其包括长波、中波、短波,用于调频广播、无线电通信和雷达等。

(2) 微波:频率范围为 $3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{11} \text{ Hz}$ 。微波广泛用于无线通信、雷达、卫星通信和微波炉等。

(3) 红外线:频率范围为 $3 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。红外线被广泛应用于红外线遥控、红外线通信、红外线热成像和红外线传感器等。

(4) 可见光:频率范围为 $4 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。可见光被人类眼睛所感知,用于照明、摄影、显示技术和光通信等。

(5) 紫外线:频率范围为 $7.5 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{16} \text{ Hz}$ 之间。紫外线主要用于杀菌消毒、紫外线检测和紫外线固化等应用。

(6) X 射线:频率范围为 $3 \times 10^{16} \sim 10^{20} \text{ Hz}$ 之间。X 射线常用于医学成像、材料检测和工业应用等。

(7) γ 射线:频率最高,大于 $3 \times 10^{19} \text{ Hz}$ 。 γ 射线是最高能量的电磁波,常用于核反应、医学治疗和放射学研究等。

无线电指利用无线电波进行通信、广播、远程控制和传输信息的技术。其频率范围广泛,通常在无线电波的范围内工作。无线电波的频率范围为 $10^3 \text{ Hz} \sim 3 \times 10^{10} \text{ Hz}$,包括长波、中波、短波和调频广播等不同波段。无线电通信的原理是在发送端产生无线电信号,通过天线将信号传输到接收端,再将信号转换为原始数据。无线电通信在广播、电视、卫星通信、移动通信、无线局域网等领域都有广泛应用。无线电技术还可以用于雷达系统,用于测距、测速、目标识别等。不同的无线电波段有不同的特点,包括传播距离、穿透能力、抗干扰能力和带宽等。因此,在具体的应用中需要根据需求选择合适的频率和波段。无线电技术在现代通信和电子领域中扮演着重要的角色,推动了信息传递和交流的发展。电磁波频率范围和波段如图 3.2 所示。

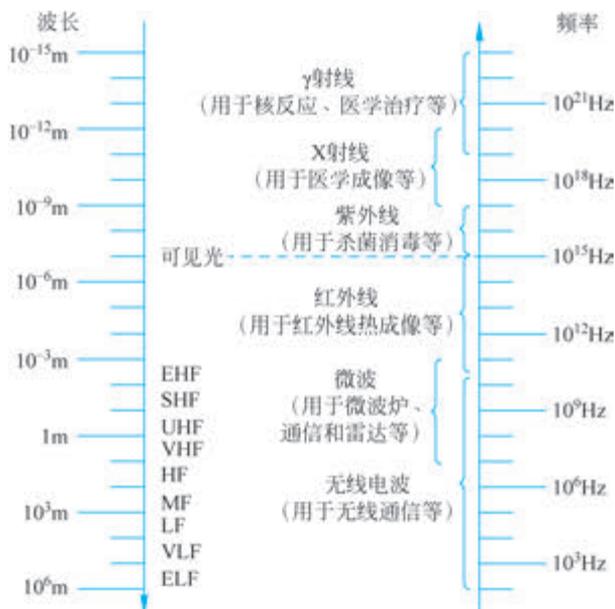


图 3.2 电磁波频率范围和波段

电磁波的波长、频率和能量密切相关。无线电波指无线电通信中使用的电磁波，其波长和频率范围很广。无线电波的具体应用取决于其波长和频率特性，以满足不同的通信、导航、广播和传输需求。将无线电波按照频率来划分，其对应的主要应用如表 3.1 所示。

表 3.1 无线电波的波长、频率及主要应用

波长(波段)	频率(频段)	通用名	主要应用
100km 以上	3kHz	极低频(ELF)	水下通信
10~100km	3~30kHz	甚低频(VLF)	海上通信
1~10km	30~300kHz	低频(LF)或长波(LW)	调幅广播
100~1000m	300~3000kHz	中频(MF)或中波(MW)	调幅广播
10~100m	3~30MHz	高频(HF)或短波(SW)	调幅广播、业余无线电
1~10m	30~300MHz	甚高频(VHF)	调频广播、电视
0.1~1.0m	300~3000MHz	特高频(UHF)	电视、蜂窝电话
10~100mm	3~30GHz	超高频(SHF)	固定无线、卫星通信
1~10mm	30~300GHz	极高频(EHF)	卫星通信、雷达

无线电测量的关键参数接收信号强度，即无线电信号在某个区域某个时间在频率域上的分布情况。接收信号强度直接影响了无线通信的传输速率。传输速率与信道带宽之间有密切的关系。根据香农公式，传输速率与带宽之间的关系可以用奈奎斯特定理和香农定理来描述。信道带宽指信道在频率上可支持的最大数据传输速率。传输速率指在一个信道上单位时间内传输的数据量，通常用每秒传输的比特数(b/s)表示。

信道带宽是信道可以不失真地传输信号的频率范围宽度。信道带宽计算方法为：用信道可以不失真传输的最高频率即上边频，减去可以不失真传输的最低频率即下边频。信道可以传输的数字信号的最高速率 C (b/s) 与信道带宽 B 和信道质量 $S/(n_0 B)$ 之间的关系如式(3-2)所示。

$$C = B \log_2 [1 + S / (n_0 B)] \quad (3-2)$$

奈奎斯特定理指出,在没有噪声干扰的情况下,理论上每秒可以传输的数据量等于信道带宽的两倍。这意味着,最高可达到的传输速率为 $2B$ b/s。在实际应用中,信道通常会受到噪声干扰的影响,因此根据香农定理,最大可达到的传输速率为信噪比乘以带宽的对数。电信道带宽决定了理论上可达到的传输速率的上限,而实际的传输速率受到信噪比、编码技术和其他因素的影响。一般来说,带宽越大,传输速率也越高。

电磁波的频率与其在空间中传播的距离有一定的关系。一般情况下,频率越高,传播距离会相对越短;频率越低,传播距离会相对越远。这主要是因为高频电磁波在传播时会经历更多的衰减和损耗。高频电磁波的传播受空气、物体和大气等因素影响较大,因此往往会有较大的传播损耗,导致传播距离变短。相比之下,低频电磁波的传播损耗相对较小。低频电磁波具有较强的穿透力和衍射能力,能够更好地绕过障碍物传播,因此能够传播更远的距离。需要注意的是,传播距离受到许多因素的影响,包括地形、天气、电磁波功率等。因此,电磁波的频率与传播距离之间的关系并不是绝对的,而是受具体环境和条件的影响。根据波长将电波划分成不同通信用途的波段,如表 3.2 所示。

表 3.2 微波频段

波长/mm	频率/GHz	波 段	主要通信用途
193~769	0.4~1.5	L	广播和 1G 蜂窝通信
57.7~193	1.5~5.2	S	2G 和 3G 蜂窝通信、局域网
48.4~76.9	3.9~6.2	C	卫星通信、局域网
27.5~57.7	5.2~10.9	X	固定无线通信、卫星通信
17.1~27.5	10.9~17.5	Ku	固定无线通信、较早的卫星通信
8.34~17.1	17.5~31	Ka	固定无线通信、较新的卫星通信
6.52~8.34	36~46	Q	固定无线通信
5.36~6.52	46~56	V	未来卫星通信、固定无线通信
3.00~5.36	56~100	W	固定无线通信、局域网、4G 蜂窝通信

在相同功率的情况下,较高频段的信号比较低频段的信号传输距离近一些。这似乎是一个缺点。但在设计一个蜂窝移动通信网络时,这却是一个可以加以利用的优点。根据无线电信号所占用的频率和波长特性,以及信号源的发射功率估计出无线电信号的传播损耗边界,即可以从空间上有效地限制基站的覆盖范围。在缩小无线电信号的覆盖范围的同时,可以提高无线电信号在空间中的电磁频谱资源利用率。

3.3 各频段无线电业务

无线电频谱可分为表 3.3 中的 14 个频段,无线电频率以 Hz(赫兹)为单位,其表达方式如下:3000kHz 以下(包括 3000kHz),以 kHz(千赫兹)表示;3MHz 以上至 3000MHz(包括 3000MHz),以 MHz(兆赫兹)表示;1GHz 以上至 3000GHz(包括 3000GHz),以 GHz(吉赫兹)表示。



视频讲解

表 3.3 我国无线电波划分

带号	频带名称	频率范围	波段名称	波长范围
-1	至低频(TLF)	0.03~0.3Hz	至长波或千米波	10000~1000Mm
0	至低频(TLF)	0.3~3Hz	至长波或百米波	1000~100Mm
1	极低频(ELF)	3~30Hz	极长波	100~10Mm
2	超低频(SLF)	30~300Hz	超长波	10~1Mm
3	特低频(ULF)	300~3000Hz	特长波	1000~100km
4	甚低频(VLF)	3~30kHz	甚长波	100~10km
5	低频(LF)	30~300kHz	长波	10~1km
6	中频(MF)	300~3000kHz	中波	1000~100m
7	高频(HF)	3~30MHz	短波	100~10m
8	甚高频(VHF)	30~300MHz	米波	10~1m
9	特高频(UHF)	300~3000MHz	分米波	10~1dm
10	超高频(SHF)	3~30GHz	厘米波	10~1cm
11	极高频(EHF)	30~300GHz	毫米波	10~1mm
12	至高频(THF)	300~3000GHz	丝米波或亚毫米波	10~1dmm

注：频率范围(波长范围亦类似)均含上限、不含下限；相应名词非正式标准，仅作简化称呼参考之用。

注 1：“频段 N”(N=带号)从 0.3×10^N Hz 至 3×10^N Hz。

注 2：词头：k=千(10^3)，M=兆(10^6)，G=吉(10^9)。

不同频段的无线电波在无线电通信中被用于各种不同的业务。需要注意的是，具体的频段规定和使用情况可能因不同国家和地区而有所不同。在 2023 年 7 月 1 日起施行的《中华人民共和国无线电频率划分规定》中，定义了 43 种无线电业务。大致如下：无线电通信业务、固定业务、卫星固定业务、航空固定业务、卫星间业务、空间操作业务、移动业务、卫星移动业务、陆地移动业务、卫星陆地移动业务、水上移动业务、卫星水上移动业务、港口操作业务、船舶移动业务、航空移动业务、航空移动(R)业务、航空移动(OR)业务、卫星航空移动业务、卫星航空移动(R)业务、卫星航空移动(OR)业务、广播业务、卫星广播业务、无线电测定业务、卫星无线电测定业务、无线电导航业务、卫星无线电导航业务、水上无线电导航业务、卫星水上无线电导航业务、航空无线电导航业务、卫星航空无线电导航业务、无线电定位业务、卫星无线电定位业务、气象辅助业务、卫星地球探测业务、卫星气象业务、标准频率和时间信号业务、卫星标准频率和时间信号业务、空间研究业务、业余业务、卫星业余业务、射电天文业务、安全业务、特别业务。

地面无线电业务管理的目标是确保频谱资源的合理分配和有效利用，同时促进各个业务的协调发展，以提供高质量的无线电通信服务。这需要政府、管理机构、运营者和用户之间的合作，以确保无线电通信的可靠性、安全性和可用性。地面无线电业务的管理一般遵循以下原则。

(1) 权限分配：各国政府或相应的管理机构负责分配和管理无线电频谱资源。制定相关的法规和规范，确保不同频段和业务之间的合理分配和协调使用。

(2) 授权许可：在获得频谱资源后，各个无线电业务运营者需要向相关当局申请授权许可，以便合法地使用特定的频段和频率为特定的业务提供服务。

(3) 频谱管理：频谱管理包括频段规划、频率分配和避免干扰等。相关管理机构负责

确保各个无线电业务在频谱上有足够的空间,并避免它们之间的干扰。

(4) 合规与监管:各个无线电业务运营者需要遵守相应的法规和标准,包括遵守授权条件、频率使用要求以及提供必要的技术规范和质量监管等。

(5) 频谱共享:为了最大限度地利用频谱资源,有时会采用频谱共享的方式,即多个无线电业务在同一频段上进行共享。这要求各个业务在频率和时间上进行合理调度和协调,以避免相互干扰。

陆地无线电移动业务指在地面上进行的无线电通信业务,涉及人与人、人与物、物与物之间的通信。常见的陆地移动业务有手机通信、对讲机、GPS 导航、专业移动通信等无线电业务。总的来说,陆地移动业务主要包括基地电台和陆地移动电台之间,或陆地移动电台之间的移动业务。这些陆地无线电移动业务主要是在甚高频和特高频频段进行的,以实现长距离传输和广域覆盖。其中有覆盖面比较广的公众移动通信业务,也有专业部门的专用频段无线电业务。

在人们日常生活中,最常见、使用率最高的陆地移动业务为由中国移动、中国联通、中国电信三大运营商为主的移动通信技术业务,如图 3.3 所示。移动通信技术业务指通过无线网络进行的移动通信服务。移动通信技术业务和运营商之间有密切的关系。运营商指提供移动通信服务的公司或组织,通过建立、维护和经营无线网络基础设施,向用户提供移动通信服务。



图 3.3 三大运营商

无线电管理局(国家无线电办公室)向运营商发放移动通信技术业务的牌照,分配对应的电磁频谱资源用于移动通信技术的研发与商用。运营商使用先进的移动通信技术来提供高质量的通信服务,负责管理和运营移动通信业务。运营商需要获得无线电频谱资源,以便提供通信服务。运营商与政府或相关管理机构协商,获得频谱使用权并支付相应的费用。频谱是移动通信技术的核心资源,对于运营商来说至关重要。运营商需要遵守相关的法规和标准,确保其业务在合法和合规的框架下运营。政府和相关监管机构会对运营商的业务进行监管,包括频谱管理、网络安全、质量监测和服务质量等方面。运营商需要与监管机构合作,遵守规定并提供必要的监管报告。以下是一些常见的移动通信技术业务。

(1) 第一代移动通信技术:主要有美国的高级移动电话系统(Advanced Mobile Phone System, AMPS)、欧洲的移动式通信系统(Transportable Communication System, TCS),带宽为 25kHz 或 30kHz。

(2) 第二代移动通信技术:主要有 GSM 和 CDMA 公众移动通信系统,带宽分别为 200kHz 和 1.25MHz。它们主要提供了基本的语音通信和短信功能,采用数字调制技术。

(3) 第三代移动通信技术:ITU 共有 6 种标准,即 WCDMA、CDMA2000、TD-SCDMA、IS-41(DECT)、IS-136(D-AMPS)、WIMAX 等体制,其中前 3 种为主流标准。3G 在 2G 的基础上增加了高速数据传输和互联网接入功能,使得用户可以通过移动设备浏览网页、查看电子邮件以及观看流媒体视频等。第三代移动通信技术业务频谱资源分配如图 3.4 所示。

(4) 第四代移动通信技术:4G(如 LTE)提供了更高的数据传输速率和更低的延迟,使得用户可以更快地下载和上传大文件,实时播放高清视频以及使用各种云服务和应用。第

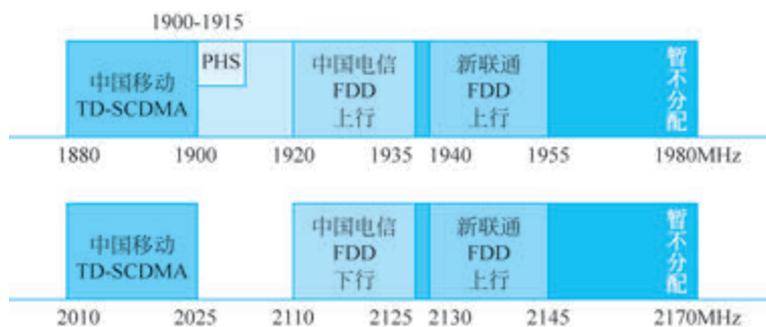


图 3.4 第三代移动通信技术业务频谱资源分配

四代移动通信技术可以在不同的固定、无线平台和跨越不同频带的网络中提供无线服务，可以在任何地方宽带接入互联网(包括卫星通信)，能够提供信息通信之外的定位定时、数据采集、远程控制等综合功能。同时，第四代移动通信技术还应该是多功能集成的宽带移动通信系统，是宽带接入 IP 系统。第四代移动通信技术业务频谱资源分配如表 3.4 所示。

2009 年 11 月，工信部发布《关于中国移动通信集团公司增加 TD-SCDMA 系统使用频率的批复》(工信部无函[2009]572 号)。频段 2320~2370MHz 被分配给中国移动主要用于全国范围内进行室内覆盖。

表 3.4 第四代移动通信技术业务频谱资源分配

运营 商	TD-LTE 频段	LTE FDD 频段
中国移动	2320~2370MHz 2575~2635MHz (130MHz 频谱)	
中国联通	2300~2320MHz 2555~2575MHz (联通几乎不用)	UL: 1955~1980MHz DL: 2145~2170MHz
中国电信	2370~2390MHz 2635~2655MHz (电信几乎不用)	UL: 1755~1785MHz DL: 1850~1880MHz

(5) 第五代移动通信技术。5G 提供了更高的数据传输速率、更低的延迟和更大的连接密度，支持更高级的应用，如智能城市、物联网、虚拟现实和增强现实等。5G 的发展主要有两个驱动力。一方面，以长期演进技术为代表的第四代移动通信技术已全面商用，对下一代技术的讨论提上日程。另一方面，移动数据的需求爆炸式增长，现有移动通信系统难以满足未来需求，亟须研发新一代 5G 系统。

目前定义的 5G 频率范围如下。

① FR1: 450~6000MHz。

FR1 就是通常说的 sub 6GHz，低于 6GHz 的部分，这部分将是 5G 当前的主流应用范围。各国使用状况不同，目前 3.5GHz 频段是 5G 中常用的频段之一。

- 600MHz 频段(470~694/698MHz)：在美洲和亚太一些国家使用。
- 700MHz 频段(694~790MHz)：全球性使用的 5G 频段。
- L 波段(1427~1518MHz)：所有国家和地区确定的新的全球波段。

② FR2: 24250~52600MHz。

FR2(毫米波)范围频率高,穿透能力较弱,但带宽充足,干扰源少,未来的应用也十分广泛。

- 3300~3400MHz: 为许多国家和地区确定的全球波段,欧洲和北美除外。
- C 波段(3400~3600MHz): 为所有国家和地区确定的全球波段,欧洲、韩国已经在使用,在我国也分配给了中国电信和中国联通。
- C 波段(3600~3700MHz): 为许多国家和地区确定的全球波段,但非洲和亚太一些国家除外。
- 2496~2690MHz: 为许多国家和地区确定的全球波段,但许多国家已将这个频段给LTE使用,在我国这一频段分配了160MHz给中国移动。
- 4800~4990MHz: 为亚太地区少数几个国家确定的新频段,在我国分配了100MHz给中国移动。

(6) 第六代移动通信技术: 已经成为通信业和学术界探讨的热点。6G网络将是一个地面无线与卫星通信集成的全连接世界。通过将卫星通信整合到6G移动通信,实现全球无缝覆盖,6G通信技术不再是简单的网络容量和传输速率的突破,它更是为了缩小数字鸿沟,实现万物互联这个“终极目标”。第 n 代移动通信技术频谱资源比较如图3.5所示。

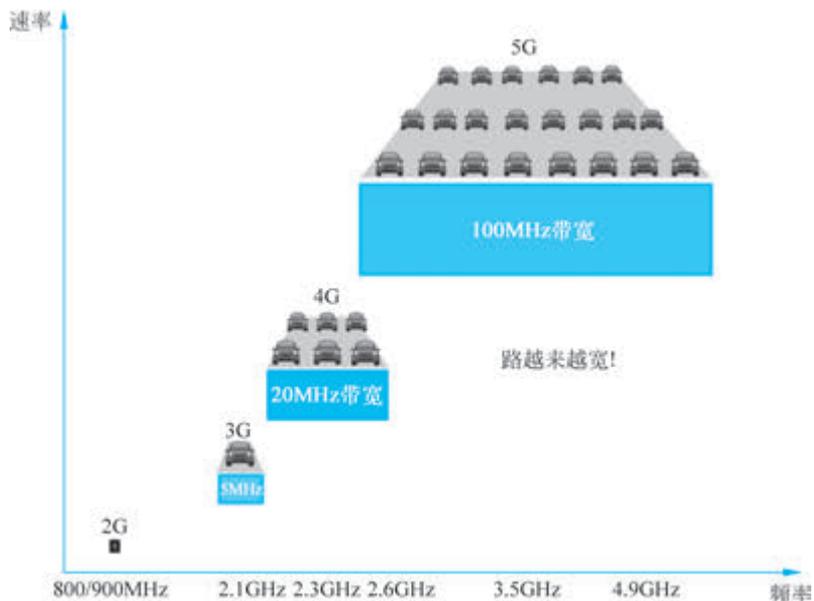


图 3.5 第 n 代移动通信技术频谱资源比较

3.5GHz 频段是 5G 中常用的频段之一,在无线接入系统中扮演重要角色。5G 在 3.5GHz 频段的应用主要涉及无线接入系统。通过在这个频段上部署 5G 基站和天线,运营商可以提供更高的网络容量和更高的数据传输速率。这可以用于支持高清视频流媒体、虚拟增强现实、物联网以及其他需要大量数据传输和低延迟的业务。基础运营商拥有数据、语音等基础业务经营权的优势,利用 3.5GHz 无线接入手段可以作为自身业务的补充,提供包括语音、数据、图像等综合性接入服务;还可以实现互联网骨干网络的落地、基站之间的连接等,在一定程度上解决了基础运营商租用光纤线路无法满足需求的难题。中国移动、中国

联通等通过 3.5GHz 无线接入系统带动其推出一些业务,如中国联通的宝视通业务、中国移动的 WLAN 业务等。以下是它们在 5G 网络中的应用。

- 2.1GHz 频段应用: 2.1GHz 频段通常用于 5G 网络中的长距离无线传输。
- 3.5GHz 频段应用: 3.5GHz 频段通常用于 5G 网络中的中短距离无线传输。

目前 2.1GHz 和 3.5GHz 频段是 5G 网络部署的主流频段。2.1GHz 和 3.5GHz 频段只是 5G 网络中的频段之二,5G 网络还可以使用其他频段,如 700MHz、2.6GHz 和 26GHz 等频段,以满足不同地区、不同场景和不同需求的无线通信需求。接下来分析一下 2.1GHz 和 3.5GHz 频段在 5G 网络中的应用。同站部署 2.1GHz LTE 设备与 3.5GHz NR(New Radio)设备,如图 3.6 所示。测试时通过临时关闭周围基站、调整发射功率等手段使主测小区覆盖范围半径扩大至 500m 以上。

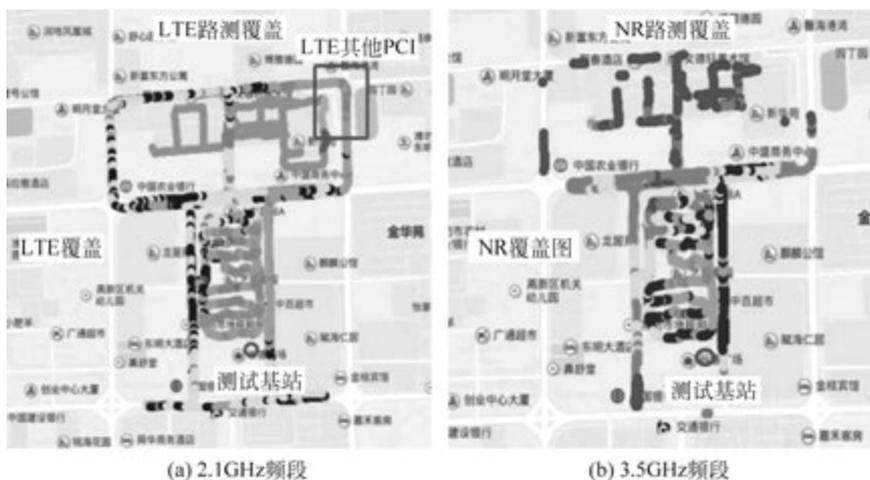
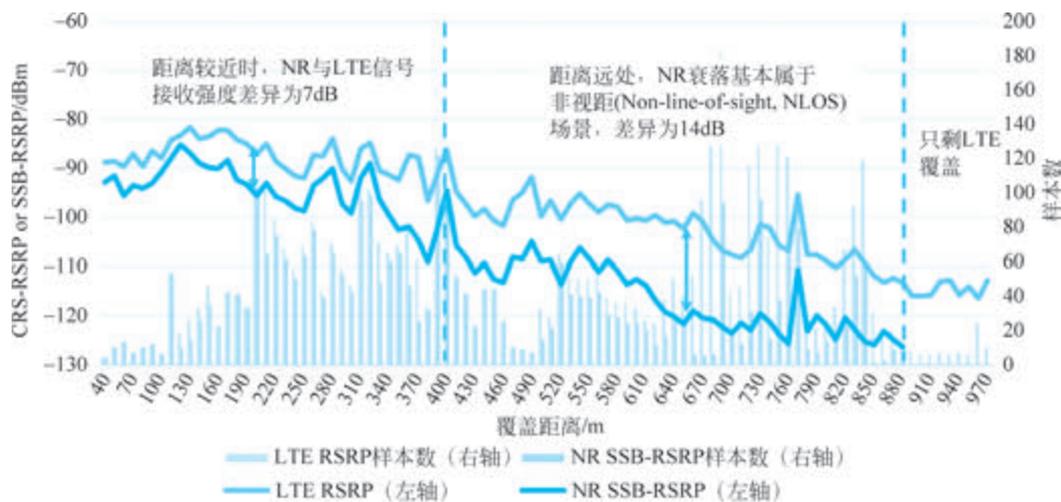


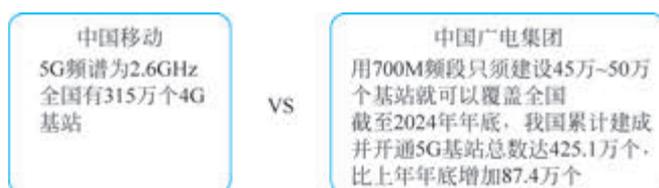
图 3.6 2.1GHz 和 3.5GHz 频段在 5G 空间网络部署中的比较

再继续对 2.1GHz 和 3.5GHz 频段的无线电信号覆盖性能进行对比分析,如图 3.7 所示。相比 2.1GHz 频段,3.5GHz 频段信号衰减较大,在深度覆盖方面 3.5GHz 频段性能较 2.1GHz 频段差。由于 2.1GHz 频段的频率较低,因此它具有较好的穿透力和较远的传输距离。因此,2.1GHz 频段在覆盖面积较大且人口密集的城市地区,以及农村和偏远地区的宽广区域时使用广泛。3.5GHz 频段有相对较高的频率,因此它能够提供更宽的带宽和更高的传输速率,适用于高密度的人口区域和城市中的高容量数据传输需求。3.5GHz 频段在城市核心区域、商业中心、体育馆、机场等高流量区域的覆盖中得到广泛应用。

中国广播电视网络集团有限公司简称中国广电集团,是中国大陆唯一的有线电视网络运营商。中国广电集团主要负责建设和运营全国有线电视网络,提供广播电视节目传输、宽带网络接入、电视购物等业务。此外,中国广电集团还涉足了移动通信业务,推出了中国广电公司 5G 网络,提供 5G 服务。中国广电集团还拥有大量的频谱资源,包括 700MHz 频段和 4GHz 频段等,这为中国广电集团发展 5G 业务提供了有力的保障。700MHz 频段,也称为 700MHz 频段,是一种低频段的无线电频谱资源,被认为是一块非常有价值的黄金频段。中国广电集团是 700MHz 黄金频段的所有者,可以利用这个频段的频谱资源开展广播电视服务、移动视频传输和其他相关的宽带通信业务。同时,这个频段也可以在 5G 网络建设中发挥重要的作用,需要与其他机构进行协作和协调。



700M 频段位于移动通信低频段(小于 1GHz, 也称 Sub1G), 传播损耗小, 覆盖能力非常强大。近年来, 随着 5G 的发展, 700M 频段开始引起了广泛的关注。这个低频段频谱在 5G 网络中具有较强的传播特性和穿透力, 可以提供较广阔的覆盖范围和更好的室内室外覆盖能力。因此, 中国广电集团的 700M 频段可以用于支持 5G 网络的建设和覆盖范围的扩展。对比中国移动所使用的 5G 网络频谱资源, 中国广电集团的 700M 频段具有更大的覆盖范围, 具体如图 3.8 所示。



700M 频段是中国广电集团拥有的重要频段之一, 其使用现状如图 3.9 所示。

中国广电集团在 700M 频段拥有大量的频谱资源, 这些频谱资源可以用于提供广播电视服务、移动视频传输服务和其他相关的宽带通信服务等。但是, 频率低, 波长就相对较大, 导致信号在发送或者接收时, 需要的天线振子的尺寸也必须相应变大。相比其他三大运营商, 中国广电集团的 700M 频段频谱资源的另外一个优势是具有相同的上行和下行带宽。

在我国, 国家对无线电频谱的管理和分配由无线电管理局(国家无线电办公室)负责。中国广电集团与其他运营商和相关机构在频段的利用和分配方面需要进行协调与合作, 以确保频谱资源的有效利用和合理分配。中国电信最早以固定电话为主要业务, 具有较为完善的全国光纤网络。中国移动和中国联通以移动通信业务为主, 拥有主要的无线基站和铁塔等设施。700M 频段频谱资源共建共享已经成为四大运营商的发展趋势。5G 网络建设与频谱资源共建共享如图 3.10 所示, 具有以下特点。

- 共用天线和铁塔, 降低基站建设成本。
- 借用移动网络, 共享无线传输网络。
- 共享 700M 频段频谱资源, 完善网络覆盖。

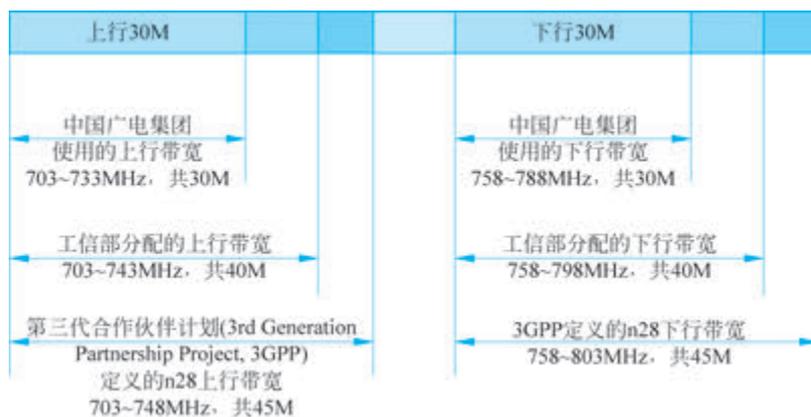


图 3.9 中国广电集团 700M 频段的频谱使用现状

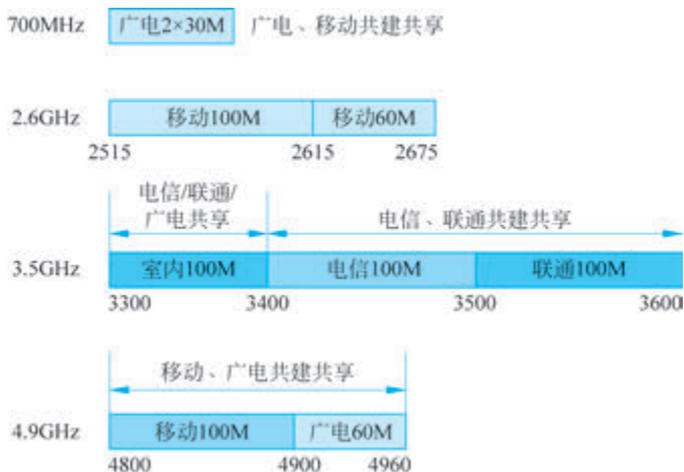


图 3.10 5G 网络建设与频谱资源共建共享

中国广电集团正在积极探索和推进 5G 广播多播服务 (New Radio Multimedia Broadcast and Multicast Service, NRMB) 的发展。5G 广播多播服务指通过 5G 网络提供广播和多媒体内容传输的服务,能够实现更高质量、更具交互性、更个性化的音视频传输体验。中国广电集团在一些城市和地区开展了 5G 广播多播服务的试点建设。通过部署 5G 基站和构建相关网络,在这些试点区域提供 5G 广播多播的实际应用和体验,探索和完善相应的运营模式和商业模式。中国广电集团积极开展优质内容的制作和传输工作,以满足 5G 广播多播服务的需求。这包括基于 5G 网络的高清视频、音乐、新闻和娱乐内容的制作、存储和传输,为用户提供丰富多元的内容选择。三大运营商网络制式及其电磁频谱资源分配情况如表 3.5 所示。

表 3.5 三大运营商网络制式及其电磁频谱资源分配情况

运营商	网络	频段	上行	下行
中国移动	GSM	900	890~909MHz	935~954MHz
中国移动	EGSM	900	885~890MHz	930~935MHz
中国移动	GSM	1800	1710~1735MHz	1805~1830MHz

续表

运营 商	网 络	频 段	上 行	下 行
中国移动	TDS-CDMA	—	1880~1900MHz, 2010~2025MHz	
中国移动	FDD-LTE	900	892~904MHz	937~949MHz
中国移动	TD-LTE	—	1880~1900MHz, 2320~2370MHz, 2575~2675MHz	
中国移动	5G	2.6GHz	2515~2675MHz	
中国移动	5G	4.9GHz	4800~4900MHz	
中国联通	GSM	900	909~915MHz	954~960MHz
中国联通	GSM	1800	1735~1755MHz	1830~1850MHz
中国联通	WCDMA	—	1940~1965MHz	2130~2155MHz
中国联通	FDD-LTE	—	1745~1765MHz	1840~1860MHz
中国联通	TD-LTE	—	2300~2320MHz, 2555~2575MHz	
中国联通	5G	3.5GHz	3500~3600MHz	
中国电信	CDMA	800	825~835MHz	870~880MHz
中国电信	3G	—	1920~1940MHz	2110~2130MHz
中国电信	FDD-LTE	—	1765~1780MHz	1860~1875MHz
中国电信	TD-LTE	—	2370~2390MHz, 2635~2655MHz	
中国电信	5G	3.5GHz	3400~3500MHz	

(7) 专业指挥调度对讲系统：专业指挥调度对讲系统是一种用于管理和协调团队、组织和机构内部通信的系统。它提供了实时的语音传输和指挥调度功能，可以使团队成员在工作中进行即时沟通，实现高效的指挥和协作。专业指挥调度对讲系统通常具有即时通信、组呼功能、调度功能、录音和回放、多通道支持等特点。专业指挥调度对讲系统是一种非常重要的通信工具，可以在多种行业和场景中发挥重要作用，如公共安全、交通运输、物流配送、工厂生产等。它能够提供高效、可靠的通信服务，提升工作效率和安全性。以下是专业指挥调度对讲系统比较常见的一些频谱资源分配。

- 350MHz、800MHz：数字集群移动通信系统，指配频率供国家(地区)专业部门组网使用。
- 400MHz：公众对讲机，不需要申请频率，不需要办理执照，不需要缴纳频率占用费，供老百姓近距离通话使用。已有很多公司在开发生产，供应市场。
- 900MHz：无中心多信道选址通信系统，不需要申请频率，但要申请指配号码，需要办理执照，需要缴纳频率占用费，供集团用户小型组网使用。只有少数公司在开发。
- 150MHz、400MHz：专业调频机，需要申请频率，需要办理电台执照，需要缴纳频率占用费，供单位视距通话使用。已有很多公司开发生产，供应市场。

(8) 调频对讲机：按国家的有关标准，调频对讲机主要工作在超短波频段的 150MHz 和 400MHz 频段，目前以超短波调频无线电话机为主，调频对讲机如图 3.11 所示。工业和信息化部于 2009 年发布了《关于 150MHz 400MHz 频段专用对讲机频率规划和使用管理有关事宜的通知》(工信部无〔2009〕666 号)。目前陆地无线电业务中，各行业对调频对讲机的需求仍



图 3.11 调频对讲机

然较大,但传统的 150MHz 和 400MHz 频段对讲机的应用存在很多问题,基本还是停留在传统技术上,实用但频率利用率比较低。另外,该频段脱离监管的问题也比较严重。

传统的 150MHz 和 400MHz 频段对讲机在覆盖范围、频谱资源、频段冲突和数据传输速率等方面存在一些问题,限制了其应用的拓展和发展。调频对讲机仍然存在以下几个问题。

- ▶ 覆盖范围受限: 由于工作频段较低,150MHz 和 450MHz 对讲机在信号传输方面存在较大的距离限制。这使得在广大区域内实现全面覆盖变得困难,尤其是在城市等复杂环境中。
- ▶ 频谱资源有限: 150MHz 和 400MHz 频段是有限的资源,随着无线通信的普及和增长,频谱资源的供需矛盾越来越突出。频谱资源的有限性限制了对讲机的发展和应用空间。
- ▶ 频段冲突和干扰: 150MHz 和 400MHz 频段是多种无线通信系统和应用共享的频段,存在频段冲突和干扰的风险。当多个无线设备在同一频段上工作时,可能会产生干扰和信号冲突,影响对讲机的正常使用。
- ▶ 数据传输速率较慢: 传统的 150MHz 和 450MHz 对讲机通常只支持语音通信,对数据传输的要求较低。无法满足一些需要传输大量数据的应用场景,如图像传输、文件传输等。

(9) 无中心系统: 无线电业务中的无中心系统指无须中心控制节点,各个终端设备之间通过无线通信直接进行数据传输和协调的系统。与传统的有中心系统相比,无中心系统具有以下特点。

- ▶ 去中心化: 无中心系统不依赖于中心控制节点,各个终端设备具有相同的地位,可以直接进行通信和协作。这种去中心化的架构提高了系统的灵活性和可扩展性。
- ▶ 自组织和自协调: 无中心系统中的终端设备通过自组织和自协调的方式,互相发现、识别和建立通信连接。它们可以根据需要自主地组成网络并进行数据传输,无须中心节点的干预。
- ▶ 高可靠性: 由于无中心系统中的终端设备之间直接通信,系统具有较强的抗单点故障能力。即使某个终端设备发生故障,其他终端设备仍然可以相互通信。
- ▶ 网络扩展性: 无中心系统支持网络中终端设备的动态加入和离开,能够适应网络规模的变化。这意味着系统可以根据需要灵活地扩展或缩小网络规模。

蜂窝移动通信网络需要依托运营商搭建的无线通信基站构建移动终端设备的接入节点,属于集中式系统。无中心系统的灵活性更强,不受中心节点的空间束缚。以下是某个无中心系统的参数数据。

- ▶ 频率范围: 915~917MHz。
- ▶ 控制信道: 915.0125MHz。
- ▶ 通话信道: 915.0375~916.9875MHz。
- ▶ 信道间隔: 12.5kHz 158 个信道; 25kHz 80 个信道。
- ▶ 信道选择方法: 无三阶互调组法。
- ▶ 载波电平检测阈值: 开路电压有效值大于或等于 $1\mu\text{V}$ (持续时长大于或等于 1s, 50Ω 系统对应 -107dBm)。

- ▶ 发射功率：固定终端设备(如基站/车载台)小于或等于 5W；便携移动终端(手机/手持设备)小于或等于 3W。
- ▶ 参考灵敏度：优于 6dB μ V。
- ▶ 数据传输速率：2400b/s。

(10) 集群通信：指将多个通信设备或节点组成一个逻辑上的群组(集群)，通过共享数据、资源和通信能力，实现高效的通信和协作。在集群通信中，各个节点可以通过无线或有线的方式相互连接，形成一个通信网络。这些节点可以是无线对讲机、手机、计算机等终端设备，也可以是服务器、路由器等网络设备。

集群通信目前主要使用的频段为 805~821MHz 和 850~866MHz。集群通信业务种类分为模拟集群通信业务和数字集群通信业务。

模拟集群通信业务指利用模拟集群通信系统向集团用户提供的指挥调度等通信业务。模拟集群通信系统是指在无线接口采用模拟调制方式进行通信的集群通信系统。模拟集群通信业务经营者必须自己组建模拟集群通信业务网络，无国内通信设施服务业务经营权的经营者不得建设国内传输网络设施，必须租用具有相应经营权运营商的传输设施组建业务网络。数字集群通信业务指利用数字集群通信系统向集团用户提供的指挥调度等通信业务。数字集群通信系统指在无线接口采用数字调制方式进行通信的集群通信系统。

数字集群通信业务主要包括调度指挥、数据、电话(含集群网内互通的电话或集群网与公众网间互通的电话)等业务类型。数字集群通信业务经营者必须提供调度指挥业务，也可以提供数据业务、集群网内互通的电话业务及少量的集群网与公众网间互通的电话业务。数字集群通信业务经营者必须自己组建数字集群通信业务网络，无国内通信设施服务业务经营权的经营者不得建设国内传输网络设施，必须租用具有相应经营权运营商的传输设施组建业务网络。

(11) 微波通信：微波是一种电磁波，从广义上讲，频率范围为 300MHz~300GHz，微波通信使用的频率范围通常是 3~30GHz。实际微波设计中的设备频率在 7~38GHz，频率越高，传输距离越短。根据微波传播的特点，可视其为平面波。平面波沿传播方向是没有电场和磁场纵向分量的，电场和磁场分量都是与传播方向垂直的，所以称为横电磁波，记为 TEM 波(Transverse Electromagnetic Wave)。微波通信铁塔如图 3.12 所示。



图 3.12 微波通信铁塔

微波中继通信是一种利用微波信号作为传输媒介的通信方式。它通过设置一系列微波中继站来实现信号的传输和覆盖，如图 3.13 所示。微波中继通信主要应用于需要远距离传输且需要较高带宽的

通信场合，如长途电话通信、电视广播、数据传输等。它具有高传输速率、低信号衰减、较强的抗干扰能力等优点。由于微波要求必须为视距传输，所以把信息从一地传到另一地，只能靠接力，一段段地传下去，故又叫微波接力通信。

不同国家和地区可能在微波频段的频率使用和分配上有一些差异，具体的频率划分可以根据当地的无线电规划和法规来确定。微波通信的频段划分基本如下。

- ▶ 2GHz 频段：1.7~1.9GHz；1.9~2.3GHz；2.4GHz；2.49~2.69GHz。
- ▶ 4/5GHz 频段：3.4~3.8GHz；3.8~4.2GHz；4.4~5.0GHz；5.8GHz。

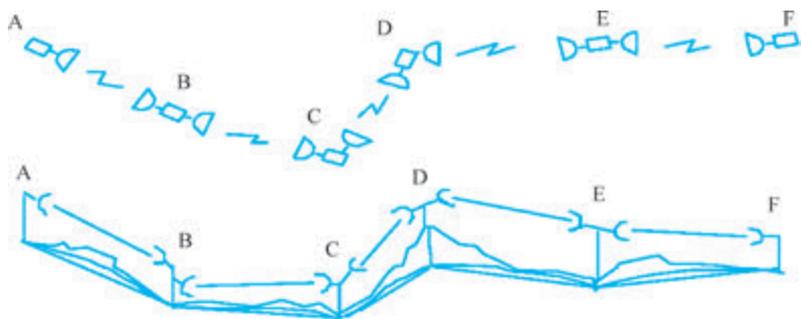


图 3.13 微波中继通信

- ▶ 6GHz 频段：5.925~6.425GHz；6.430~7.110GHz。
- ▶ 7GHz 频段：7.125~7.425GHz；7.425~7.725GHz。
- ▶ 8GHz 频段：7.725~8.275GHz；8.275~8.5GHz；8.50~8.75GHz。
- ▶ 11/13GHz 频段：10.7~11.7GHz；12.75~13.25GHz。
- ▶ 15/18GHz 频段：14.50~15.35GHz；17.7~19.7GHz。
- ▶ 23GHz 频段：21.9555~23.5445GHz。
- ▶ 38GHz 频段：37.0615~39.4345GHz。

在进行微波频段选择和射频波道配置时，需要综合考虑频谱分配规定、频段特性、周围电磁环境、频段利用效率等因素，如图 3.14 所示。通常会进行频段选择和射频波道配置的规划，以满足特定通信系统或应用的需求。在每个频段中定义了多种子频率范围、多种收发间隔和波道间隔。

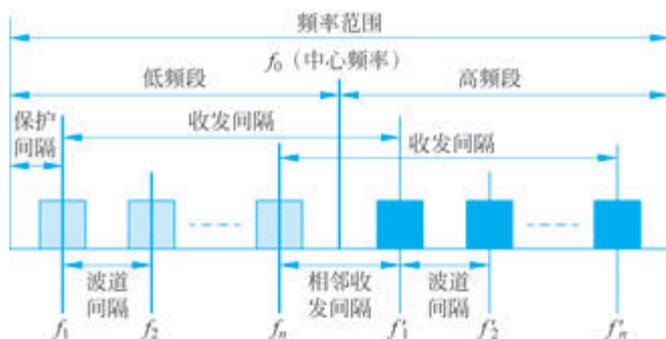


图 3.14 微波频段选择和射频波道配置

(12) 卫星通信：卫星通信是利用人造卫星作为中继站点，实现远距离的通信传输。它具有广覆盖、大容量、高可靠性等优点，常用于广播电视、互联网接入、远程通信等领域。卫星通信可以分为地球站间的通信(Earth Station to Earth Station)和地球站与移动终端之间的通信(Earth Station to Mobile Terminal)。根据通信链路不同，可以将卫星通信分为上行链路和下行链路。上行链路指从地球站向卫星传输信号，下行链路指从卫星向地球站传输信号。卫星通信有许多应用，包括卫星电视广播、卫星互联网接入、卫星移动通信、卫星导航等。在偏远地区、灾难救援、海上航行等场景中，卫星通信发挥着重要的作用，实现与全球各地的通信连接。常见的卫星通信专用频段如表 3.6 所示。

表 3.6 卫星通信专用频段

频段/GHz	业务分配
1.535~1.5425	移动业务(航空)下行(I、II、III区)
1.5435~1.5585	移动业务(海上)下行(I、II、III区)
1.6365~1.644	移动业务(一般)上行(I、II、III区)
1.645~1.66	移动业务(航空)上行(I、II、III区)
7.25~7.3	固定业务下行(I、II、III区)
7.975~8.025	固定业务下行(I、II、III区)
12.5~12.75	移动(一般),固定业务下行(III区)
19.7~21.2	固定业务下行(I、II、III区)
29.5~31.0	固定业务上行(I、II、III区)
40.0~41.0	固定业务下行(I、II、III区)
41~43	广播(II区)
50~51	固定业务上行(I、II、III区)
54.25~58.2,59.0~64.0	星际
84.0~86.0	广播
92.0~95.0	固定业务上行(I、II、III区)
102.0~105.0	固定业务下行(I、II、III区)
105.0~130.0	星际
140.0~142.0	固定业务上行(I、II、III区)
150.0~152.0	固定业务下行(I、II、III区)
170.0~182.0	星际
185.0~190.0	星际
220.0~230.0	固定业务上行/下行(I、II、III区)
250.0~265.0	移动业务(航空/海上)(I、II、III区)
265.0~275.0	固定业务上行/下行(I、II、III区)

(13) 水上移动业务：水上移动业务指在海洋、江河、湖泊等水域中为船舶、航空器、海洋平台等提供通信服务的业务。水上一般很难搭建基站提供无线电信号覆盖，大多数为岸边的无线电台向水上进行方向性的信号覆盖。水上移动业务通常使用卫星通信技术，使用一系列卫星系统覆盖水域，在广大海洋中实现全球范围内的通信覆盖，为海事、水域管理、远洋渔业、航海安全等提供重要支撑。除了水上卫星通信业务之外，船与船、船与岸、船与飞机以及船舶内部等建立的无线电通信也是主要的水上无线通信方式。海岸电台和船舶电台之间，船舶电台之间，或相关的船载通信电台之间的一种移动业务；营救器电台和应急示位无线电信标电台也可参与此种业务。水上移动通信主要包括以下几个方面。

- 船舶通信：船舶通信指在航海过程中，为船舶提供语音通信、数据传输、位置追踪等服务。这些服务包括船舶通信站、船舶卫星电话、自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)、电子海图等。
- 航空器通信：航空器通信指为民航、军航等航空器提供通信服务。这些服务包括航空通信站、机载卫星电话、定位系统等。
- 海洋平台通信：海洋平台通信指为石油或天然气开发平台、港口码头、海洋科考平台等海洋设施提供通信服务。这些服务包括海洋平台通信站、无线数据传输系统、遥测遥控系统等。

目前,全球范围内水上移动业务 VHF 频段的频道划分,主要是依据《无线电规则》,包括用于水上业务的单频和双频语音通信频道,遇险、安全和呼叫频道与自动识别系统频道等。水上移动业务甚高频发射功率功能表规定,共分 59 个频道(156.025~157.425MHz、160.625~160.950MHz、161.500~162.025MHz)。水上移动业务也可以分为港口运营业务(Port Operations Service)和船舶移动业务(Ship Movement Service)。

港口运营业务即海(江)岸电台与船舶电台之间,或船舶电台之间在港口内或港口附近的一种水上移动业务。其通信内容只限于与作业调度、船舶运行和船舶安全以及在紧急情况下的人身安全等有关的信息。这种业务应排除属于公众通信性质的信息。船舶移动业务指在海岸电台与船舶电台之间,或船舶电台之间除港口运营业务以外的水上移动业务中的安全业务。其通信内容只限于与船舶行动有关的信息。这种业务应排除属于公众通信性质的信息。

(14) 雷达业务:雷达是无线电探测和定位(Radio Detection and Ranging)的简称,即用无线电的方法发现目标并测定它们的空间位置,也被称为“无线电定位”,是一种利用电磁波探测目标的电子设备,通过发射电磁波对目标进行照射并接收其回波,由此获得目标至电磁波发射点的距离、距离变化率(径向速度)、方位、高度等信息。因为雷达特殊的工作方式,决定了其在使用过程中需要不停地向目标方向发出较强发射功率的无线电信号,通过对回波信号进行处理实现目标物体各种参数的估计。雷达业务属于有源探测。无线电测量技术主要关注的是对目标区域的无线电分布以及电磁频谱资源状态进行检测与评估,其过程并未向周围环境发射无线电电波。无线电测量技术属于无源检测。

雷达的种类繁多,分类方式也十分多样。按使用群体不同可分为军用雷达和民用雷达;按信号形式不同可分为脉冲雷达、连续波雷达、脉冲压缩雷达、频率捷变雷达等;按天线扫描方式不同可分为机械扫描雷达、相控阵雷达等;按雷达频段不同可分为超视距雷达、微波雷达、毫米波雷达、激光雷达等。雷达行业产业链上游为原材料环节,主要包括结构件、线材、芯片、电子元器件、半导体材料等;中游为雷达生产供应环节;下游主要应用于军事、航空航天、气象监测、地图测绘、机器人、汽车等领域。雷达天线如图 3.15 所示。

工业和信息化部新版《中华人民共和国无线电频率划分规定》(工业和信息化部令第 62 号),于 2023 年 7 月 1 日起正式施行。其中新增了“明确 79~81GHz 频段无线电定位业务将优先用于汽车雷达应用”的修订,这一举措将我国对于毫米波频段的使用划分和国际保持高度一致。而当前市面交通雷达的主流频段包含 80GHz。此次的修订无疑对交通雷达产品的未来发展倾向有着重要的影响,这意味着交通雷达产品的频段将回归 24GHz 或者选择更高频段的 93~95GHz。雷达业务的主要使用领域有气象、民航、交通、中国科学院、盐业等单位。使用频段为《中华人民共和国无线电频率划分规定》中的无线电定位等业务频段。

目前,全球雷达行业发展整体趋于成熟。随着行业技术不断迭代更新趋于成熟稳定,产业链也日益完善,全球雷达行业市场规模也随之不断增长。东方财富网报道,2024 年全球雷达行业市场规模约为 325 亿美元,同比增长 4.6%。虽然我国雷达行业起步较晚,但随着近年来国内雷达技术的不断发展,我国雷达行业市场规模也随之迅速扩张。2024 年我国车载激光雷达市场规模达到 120 亿元,同比增长 65%,预计 2025 年将突破 200 亿元大关。雷达业务使用频段如下。



图 3.15 雷达天线

- ▶ 天气雷达(新一代天气雷达 216 部),约 151 部传统雷达。S 频段: 2700~3100MHz (主要集中在 2700~2900MHz)频带。C 频段: 5250~5650MHz(主要集中在 5300~5500MHz)频带。X 频段: 9300~9500MHz 频带。Ka 频段: 35.5~36GHz 频带。
- ▶ 风廓线雷达(160 部)。L 频段: 1270~1375MHz 频带(用于边界层探测,探测高度在 100m~3km)。P 频段: 420~435MHz,438~440MHz,440~450MHz 频带(用于对流层探测,探测高度在 500m~10km)。VHF 频段: 46~68MHz 频带(用于平流层探测,探测高度在 3~30km)。
- ▶ 电子探空仪系统(122 部)。L 频段: 1668.4~1683MHz 频带。P 频段: 400.15~406MHz 频带。

雷达业务包括空中交通管制、气象预报、军事侦察、海洋测量、航海导航、地质勘探等各种领域。雷达站是用于安装和操作雷达设备的场所。雷达站通常由雷达设备、天线、工作站和通信设备组成。雷达站用于发送雷达波并接收其返回信号,通过对返回信号的处理和分析,可以获取目标的距离、方位、速度等信息。雷达站的布局和部署通常依赖于具体的应用场景和需求,可以是固定的地面站、船上的海洋雷达站、飞机上的机载雷达站等。雷达站的建设和运维需要由专业的工程师和技术人员进行。他们需要对雷达技术和设备有深入的了解,并能熟练操作和维护雷达设备。雷达站的选择和配置也需要考虑目标的距离范围、精度要求、环境条件等因素,以及与其他雷达站和通信系统的协调。不同地区的雷达站如图 3.16 所示。

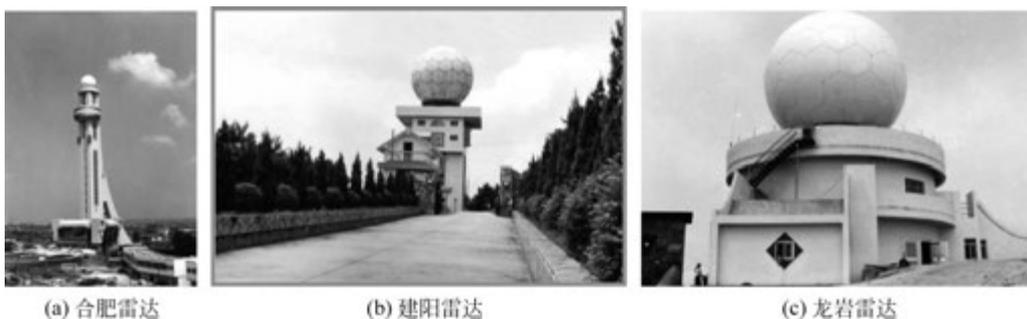


图 3.16 不同地区的雷达站

L 频段探空雷达天线(0.4~1.5GHz)是一种用于探测大气层垂直分布的特定频率段的雷达天线,如图 3.17 所示。L 频段指低于 1GHz 但高于 30MHz 的频段,它属于低频段的一部分。传统的探空雷达通常工作在高频段,如 C 频段、S 频段或者 X 频段,而 L 频段则相对

较低频,具有一些特殊的应用场景和优势。L 频段探空雷达天线主要用于大气科学研究和气象观测。它可以通过向大气发射 L 频段的电磁波,并测量返回信号来获取大气层中的云、降水和其他大气参数的信息。L 频段具有较大的波长,可以穿透大气层的云层和降水,并提供更好的穿透能力和探测能力。因此,在某些特殊的气象现象研究中,L 频段探空雷达可以提供更准确的观测数据。L 频段探空雷达天线通常采用多波束、相控阵等先进技术,以提高目标探测和分辨能力。雷达天线的形式有单极子天线、多极子天线或阵列天线等,具体取决于需求和设计。这些天线通常由金属材料构成,可以在不同角度和方向上发射和接收雷达信号。探空雷达是气象领域中非常重要的观测仪器,能够提供大气层的垂直分布与结构的详细信息。L 频段探空雷达天线的应用可以帮助科学家和气象学家更好地理解 and 预测天气状况,提供更准确的天气预报和气象分析。



图 3.17 L 频段探空雷达天线

对流层风廓线雷达(Tropospheric Wind Profiling Radar)如图 3.18 所示,是一种用于地球科学领域的大气探测仪器,是一种用于测量大气对流层风场垂直分布的雷达系统。它通过向大气发射无线电波,并测量其返回信号来获取大气中的风速和风向信息。对流层风廓线雷达主要用于气象研究和天气预报,对于了解和监测大气运动和 wind 变化具有重要意义。对流层风廓线雷达通常采用多个天线阵列,并通过相控阵技术进行波束扫描,从而获取波束方向上的风速和风向数据。它可以提供多个高度层的风场信息,通常覆盖几百米到几十千米的高度范围。与传统的风场观测方法相比,对流层风廓线雷达具有高时空分辨率、实时性和自动化等优势。对流层风廓线雷达的应用包括天气预报、气象灾害监测与预警、空中交通管制、气候研究、环境监测等。它在天气预报中可以提供风场廓线数据,帮助预测和研究大气边界层中的风暴、台风、对流等天气现象。在航空领域中,对流层风廓线雷达可以提供风场数据,帮助航空器规划飞行路线和进行航空管制。

民航雷达通常集中在空中交通管理局里面,分为一次雷达与二次雷达。一次雷达与蝙蝠类似,是一种用于探测空中物体的反射式主雷达,依靠反射来检测区域内是否有飞机,以及飞机在该区域的何处,但一次雷达只能知晓飞机在这里却不能知道这是什么飞机,因此出现了二次雷达。二次雷达实际上不是单一的雷达,而是包括雷达信标及数据处理在内的一套系统,它的正式名称是空中交通管制雷达信标系统(Air Traffic Control Radar Beacon System, ATCRBS)。民航(166 个机场)雷达一次雷达系统(1250~1350MHz、2700~2900MHz、9000~9500MHz、15.4~15.7GHz)共计 30 余部,可以分成三类。



图 3.18 对流层风廓线雷达

- 机场监视雷达(Airport Surveillance Radar, ASR),它的作用距离为 100 海里(1 海里 = 1.85 千米),主要是塔台管制员或进近管制员使用。
- 航路监视雷达(Air Route Surveillance Radar, ARSR),设置在航管控制中心或相应的航路点上。它的探测范围在 250 海里以上,高度可达 13000m。它的功率比机场监视雷达大,在航路上的各部雷达把整个航路覆盖,这样管制员就可以对航路飞行的飞机实施雷达间隔。
- 机场地面探测设备(ASD),它的功率小,作用距离一般为 1 英里(1 英里 = 1.61 千米),主要用于特别繁忙机场的地面监控,它可以监控在机场地面上运动的飞机和各种车辆,塔台管制员用来控制地面车辆和起降飞机的地面运行,保证安全。它主要的作用是在能见度低的时候提供飞机和车辆的位置信息,由于它的价格较高,机场通常没有这种设备。

二次雷达系统(1030/1090MHz)50 余部,另有 30 部二次与一次合装雷达。国内有 6 部移动二次雷达。最初用于空战作为辨别敌我双方飞机而发展的一种敌我识别系统,后该系统的基本原理及部件经发展,用于交通管制后,也就成为二次雷达。

航空气象雷达全国 72 部。航空气象雷达是用于航空领域的一种气象雷达系统,用于监测和预测大气中的天气现象,特别是与航空飞行安全相关的天气现象。航空气象雷达可以探测和追踪雷暴、积雨云、降水等天气系统,并通过雷达回波数据提供有关降雨量、风速、风向和雷暴强度等信息。

船用航海雷达是船舶上安装的用于导航和航行安全的雷达系统。它通过发送和接收雷达波束,探测和追踪其他船只、陆地、浮标、航标、冰山等物体的位置和距离,以帮助船舶避免碰撞、确定航向和航速,并提供导航信息。船用航海雷达通常具有较长的探测距离、高分辨率和目标分辨能力,并能够显示多个目标。雷达数据可以显示在船舶的雷达监视器上,并提供目标的方向、距离和可能的危险警示。船用航海雷达业务的频段为 2.9~3.1GHz、9.2~9.5GHz、3050±30MHz、9410±30MHz。根据交通运输部航海保障中心 2021 年普查数据和《中国无线电管理年度报告(2022)》显示,截至 2021 年年底,全国在册船舶雷达设备总量达 28000 部,涵盖商用船舶、公务船和科研船等各类船舶。

岸基雷达如图 3.19 所示,该雷达是安装在陆地上的雷达系统,主要用于监测和探测飞机、船舶、车辆、气象现象等。岸基雷达具有更大的探测范围、较高的灵敏度和目标分辨能力,可以用于航空交通管制、海岸警卫和天气预警等领域。与船用航海雷达相比,岸基雷达的设计和可能有所不同。岸基雷达通常需要更高的天线架设和更强大的信号处理能力,以应对更广泛的监测和探测需求。岸基雷达使用 X 频段(9375MHz),根据交通运输部

公布的 2021 年度数据,全国 28 个主要港口船舶交通管理系统(Vessel Traffic Management System,VTMS)中心共部署 96 部高性能固态脉冲压缩雷达。



图 3.19 岸基雷达

(15) 广播业务:无线电广播业务是一种通过无线电信号传播音频内容的业务。它通过无线电台或广播电台将音乐、新闻、娱乐节目等内容发送给广大听众。无线电广播业务可以覆盖广泛的地理范围,使得人们可以在车辆、家庭、工作场所等地方收听广播节目。无线电广播业务通常使用特定的频段和频率进行广播,由广播台负责制作和发送广播节目,广播接收器负责接收和播放广播节目。无线电广播的传输距离取决于发射台的功率和天线的高度等因素。无线电广播业务在社会中起到了连接人们、传播信息和文化的重要作用。它可以提供各种类型的音频内容,如音乐、新闻、体育等,满足不同人群的需求。无线电广播也是一种传统而普遍接受的媒体形式,为人们提供了丰富多样的

的娱乐和信息来源。

近年来,随着互联网和移动技术的发展,无线电广播也逐渐与数字化相结合,出现了网络广播和流媒体广播等新形式。这使得人们可以通过手机、计算机等设备收听广播节目,提供了更多的选择和便利性。无线电广播业务仍然是人们日常生活中重要的媒体和信息来源之一。供公众直接接收而进行发射的无线电通信业务,包括声音的发射、电视的发射或其他方式的发射,应用于中波、短波、调频、电视、直播卫星、数字电视、移动多媒体等。

在我国,广播频段被分别规定为长波(150~285kHz)、中波(526.5~1606.5kHz)、中短波(2.3~5.06MHz)、短波(3.2~26.1MHz)、米波(87~108MHz)。由于射频频率间会产生相互干扰,因而广播频段都是在无线电频段中被专门划分出来的专用的频段。当然,也有极少部分频率是共用的。到 2020 年,全国地面数字电视覆盖网基本建成,地面数字电视综合覆盖率达到现有模拟电视覆盖水平,地面数字电视接收机全面普及,地面电视公共服务水平得到较大提升,地面模拟电视信号停止播出,地面电视实现由模拟技术体制转为数字技术体制的战略转型。

(16) 航空无线电业务:航空无线电业务指飞机电台与地面对空电台之间或者飞机电台之间的无线电通信业务。前者常简称为空地通信或陆空通信,后者简称为空空通信。早期的航空无线电业务中,近距离的利用甚高频进行空地通信,远距离的利用高频进行空地通信;采用了全球性的航空卫星移动业务进行通信。早期的通信业务主要包括话音(用于近距离、终端区及应急通信)和数据通信(以键控电报为主要形式,用于常规通信场景)两种方式。

以走廊形式建立的、装设有无线电导航设施的管制区域或其一部分形成航路。航路的宽度为 20km,其中心线两侧各 10km。受条件限制的,可以减小宽度,但不得小于 8km。空中交通管制航路,根据在该航路执行飞行任务的性质和条件,划分为国内航路和国际航路。空中交通管制航路各段的中心线,从该航路上的一个导航设施或交叉点开始,至另一个导航设施或交叉点为止。各段中心线连接起来称为航路的中心线(简称航线)。

航空无线电业务在航空领域中起着至关重要的作用。航空无线电业务指在航空领域中

使用无线电通信进行的各种业务活动。它包括航空通信、导航和监视,为航空器提供必要的通信和导航支持,以确保航空运输的安全和效率。它确保了飞行员与地面机构、其他飞行员之间的联系,提供了必要的导航信息,以及监视和管理航空器的运行。这些无线电通信和导航系统大大提高了航空交通的安全性和效率,是现代航空运输不可或缺的一部分。航空无线电业务主要包括以下几个方面。

- 航空无线电导航业务:有利于航空器飞行和航空器安全运行的无线电导航业务。
- 航空移动业务:在航空电台和航空器电台之间,或航空器电台之间的一种移动业务。营救器电台可参与此种业务;应急示位无线电信标电台使用指定的遇险与应急频率也可参与此种业务。
- 无线电定位:用于无线电定位的无线电测定业务。
- 卫星航空无线电导航业务:地球站位于航空器上的卫星无线电导航业务。
- 卫星航空移动业务:移动地球站位于航空器上的卫星移动业务;营救器电台与应急示位无线电信标电台也可参与此种业务。

航空无线电业务使用高频 2~30MHz 和甚高频 118~136.975MHz,机场塔台使用频率 118~136.975MHz。航空无线电频率总结如下。

- 中低频:自动方位搜寻器(Automatic Direction Finder, ADF)导航 190~550kHz。
- 甚高频:甚高频全向信标(VHF Omnidirectional Range, VOR)、仪表着陆系统(Instrument Landing System, ILS) 108~117.95MHz,仪表着陆系统航向信标 LOC108~111.95MHz,指点信标 MK75MHz。
- 特高频:下滑信标 329.15~335MHz,测距机 DME1.25~1150MHz,空中交通管制应答机 ATC1090MHz, GPS 导航 1575.42MHz。
- 超高频:卫星通信 L 波段 1.5/1.6GHz,气象雷达 3GHz,无线电高度表 RA4.3GHz。

(17) 业余无线电:近年来,业余无线电业务在国际和国内层面均经历了重要的政策演进与技术革新。根据 2023 年世界无线电通信大会(World Radiocommunication Conference, WRC)最新决议,国际电信联盟对《无线电规则》中业余业务条款进行了系统性修订,包括在 1240~1300MHz 频段新增次要地位(Resolution 774)、强化 3.4~3.6GHz 频段保护要求(No. 5.138B 更新),并通过《全球业余无线电执照互认指南》(ITU-R M.2024-1)。工业和信息化部 2024 年修订的《业余无线电台管理办法》针对未成年人设台、操作能力验证等热点问题细化制度,优化电台呼号管理和设置使用要求,共七章 58 条,自 3 月 1 日起施行。该《办法》在衔接《无线电管理条例》的同时,回应了业余无线电发展中的监管需求与实践关切。

随着近些年业余无线电在我国的迅速发展,业余无线电爱好者的数量迅速增加,尤其是大城市和沿海地区增长速度尤为显著。业余无线电频率指业余(即非商业性质)无线电爱好者在指定的频率范围内进行无线电通信的频率。业余无线电频率被国际电信联盟和各国相关机构在无线电频谱管理方面进行规定。在不同的国家和地区,业余无线电频率可能有所不同,但通常遵循 ITU 的相关规定。在使用这些业余无线电频率时,业余无线电爱好者需要遵守国家和地区的相关规定,并获得相应的无线电操作许可证。此外,也需要遵守 ITU 的国际协定,尊重其他频率使用者的权益,保证无线电通信的安全与效率。

以下列出了一些常见的业余无线电频率范围。

- ▶ 短波频率：主要用于长距离通信。常见的短波业余频率范围包括 3.5~3.9MHz (80m 波段)、7MHz(40m 波段)、14MHz(20m 波段)、21MHz(15m 波段)、28MHz (10m 波段)等。
- ▶ VHF：用于中距离通信。常见的 VHF 业余频率范围包括 144~145.8MHz(2m 波段)和 50~54MHz(6m 波段)等。
- ▶ UHF：用于近距离通信以及数据传输。常见的 UHF 业余频率范围包括 430~440MHz(70cm 波段)等。

(18) 射电天文学业务：射电天文学业务指使用射电望远镜和相关设备进行观测、研究和解读宇宙中的射电信号的科学研究。射电天文学业务为了解宇宙的物理特性和演化过程提供了重要的观测手段,并与其他天文学领域的观测和研究相互补充。射电天文学以无线电接收技术为观测手段,观测的对象遍及所有天体：从近处的太阳系天体到银河系中的各种对象,直到极其遥远的银河系以外的目标。

无线电射电天文学业务的特点：灵敏度高、射电天文观测不能任意选择频率、无源性。我国的射电天文观测站信息如表 3.7 所示。

表 3.7 我国射电天文观测站信息

观测站名称	海拔/m	望远镜名称	望远镜高度/m	天线数量
国家天文台密云观测站	159	密云综合孔径	9	28
		密云 50m 射电望远镜	50	1
国家天文台怀柔太阳观测基地	89	1.1~2.0GHz 太阳射电频谱仪	7.3	1
		2.6~3.8GHz 和 5.2~7.6GHz 太阳射电频谱仪	3.2	1
		太阳射电望远镜	2	1
国家天文台乌鲁木齐南山观测站	2067	南山 25m 射电天文望远镜	25	1
上海天文台佘山观测站	5	佘山 25m 射电天文望远镜	25	1
紫金山天文台青海观测站	3200	德令哈 13.7m 毫米波望远镜	13.7	1
紫金山天文台南京太阳射电观测站	250	4.5~7.5GHz 太阳射电频谱仪	2	1
国家天文台下属云南天文台昆明凤凰山观测站	2000	0.7~1.5GHz 太阳射电频谱仪	10	1
		昆明 40m 射电天文望远镜	40	1
国家天文台新疆和静县 21cm 阵观测站	2700	21cm 阵	16	10160
国家天文台贵州 500m 口径球面射电天文望远镜观测站	841	500m 口径球面射电天文望远镜	140	1
国家天文台明安图观测基地	1356	太阳射电日像仪	4.5	40
			2	60

1931 年首次探测到来自宇宙的射电信号。卡尔·约翰斯基和格托夫·雷贝格在美国贝尔实验室使用一个简单的自制射频放大器首次成功接收到宇宙射电信号。1933 年,卡尔·约翰斯基发现了来自银河系的射电辐射(观测频率 21MHz,波长约 14m),标志着射电天文学的诞生。

500m 口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)如图 3.20 所示,这是我国研发的一种巨型射电望远镜,同时也是目前世界上最大的单口径射电望远镜。FAST 的建设始于 2011 年,于 2016 年竣工,正式投入运行。FAST 位于中国贵州省南部(贵州大洞穴村),是国家“十一五”重大科技基础设施建设项目。



图 3.20 500m 口径球面射电望远镜(FAST)

FAST 的碗状反射面由 4450 个可动的铝板块组成,可通过调节板块的倾斜角度来聚焦不同的射电信号。FAST 拥有极高的旋转自由度和指向精度,使其能够在射电频率范围内进行各种天体的观测。它具有非常高的灵敏度和令人称羨的波束形成性能,能够提供高分辨率的射电成像和精确的谱线测量,从而在射电天文学研究中具有重要的科学和观测价值。FAST 主要用于探索射电脉冲星、中子星、银河系的结构和演化,以及用于宇宙学、太阳射电爆发等领域的研究。它为我国射电天文学研究提供了强大的工具,也为国际射电天文学领域带来了重大的影响。

以下为 FAST 的一些参数。

- 球反射面: R 为 300m, D 为 500m, 球冠张角 θ 为 120° 。
- 工作频率(GHz): 0.13~0.46, 0.46~0.92, 0.92~1.72, 2.15~2.35, 2.8~3.3, 4.5~5.1, 5.7~6.7, 8.0~8.8。
- 天空覆盖: 天顶角 50° (损失接收面积,最终目标为 70°), $St=68\%$, $Si=18\%$ 。
- 多波束,可旋转。
- 有效照明口径: $D_{\text{eff}}=300\text{m}$ 。
- 海拔: 1000m。
- 跟踪精度: $4''$ 。
- 快动速度: $10^\circ/\text{min}$ 。

为了降低电磁频谱的背景噪声,提高对微弱信号的检测能力,射电天文学业务应尽可能选择远离城市和人口密集的地区发展,同时,应提高自身的抗干扰性能。目前来看,设置无线电安静区是对射电天文台(站)保护的比较有效的方式。无线电安静区划分无线电发射限

制区和无线电发射协调区两个保护等级。安静区的设置可为上述两个等级（即限制区+协调区），也可仅设置一个等级（限制区或协调区）。根据不同的使用频段和无线电业务，安静区内各频段要求的保护半径是不同的。



视频讲解

3.4 无线电频谱管理

为了全球无线电频率区域的划分，根据 ITU 的《无线电规则》将全球分为 3 个无线电频率区域。我国属于第 3 区。

随着无线电技术的快速发展，各种各样的无线电业务层出不穷，电磁频谱空间变得越来越复杂，电磁干扰事件频发，直接导致了电磁频谱利用率急速下降。国家和地方必须联合开展对无线电频谱的管理工作，协调无线电台（站）的频率使用和接入时间，调整发射功率大小以减小无线电台（站）之间的干扰，适当开放空白频段给用户动态接入频谱，以提高电磁频谱资源的利用率。

3.4.1 无线电管理的任务

无线电频谱管理指对无线电频谱资源进行规划、分配、监管和保护的一系列管理措施。无线电频谱是有限的自然资源，用于传输无线电信号和通信服务，如移动通信、广播、卫星通信等。合理有效地管理无线电频谱资源，可以确保各种无线电设备之间相互协调，减少干扰，提高频谱利用效率。无线电频谱管理通常由政府部门或专门机构负责，在国际上也有国际电信联盟等组织负责协调全球范围内的频谱管理工作。无线电频谱管理主要目标如下。

(1) 频谱规划和分配：根据不同的无线电通信和应用需求，将频谱资源进行合理规划 and 分配，确保各类通信系统之间频谱使用的协调与共存。

(2) 频谱监管与执法：监督和管理频谱使用，确保各个频段的使用者按照规定或规范使用频谱资源。对不合规的频谱使用行为进行执法追究和处罚。

(3) 干扰管理与解决：及时处理频谱使用中出现的干扰问题，保障通信质量和服务可靠性。

(4) 频谱创新与发展：积极推动频谱技术创新和发展，引导新的无线电技术和应用，提高频谱利用效率。

ITU 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。ITU 包括无线电通信部门 (ITU-R) 及其执行机构无线电通信局，是负责管理全球无线电频谱和卫星轨道资源的机构。2020 年，ITU-R 发布了《无线电规则》，即规范全球 RF 频谱和卫星轨道使用的国际条约。ITU-R 主要相关的工作具体如下。

(1) 确立并更新有关使用无线电频谱和卫星轨道的国际规则：制定《无线电规则》，召开世界无线电通信大会，组织无线电规则委员会。

(2) 实施和应用有关无线电频谱和卫星轨道使用的国际规则。

(3) 制定并更新世界范围内的建议书、报告和手册（包括有关各国频谱管理活动的最佳做法），以最有效地使用无线电频谱和卫星轨道。

(4) 就无线电通信事宜为 ITU-R 成员提供信息和帮助。

无线电频谱管理是各国政府的行政职能,政策性、技术性、社会性都很强,是高科技的管理工作。根据《中华人民共和国无线电管理条例》赋予的职责,我国无线电管理的主要任务具体如下。

- (1) 无线电频率/卫星轨道资源的管理。
- (2) 无线电台(站)的设置审批和管理。
- (3) 无线电波秩序的管理。
- (4) 研制、生产、进口、销售无线电设备有关事项的管理。
- (5) 对工业、科学、医疗等辐射无线电波的非无线电通信设备有关事项的管理。

在世界上,商用无线电频率的分配都是政府行为。政府采取怎样的方式来分配商用无线电频率较合理,从芬兰免费发放全球第一张 3G 牌照开始,就有很多的争论。全球商用无线电频率分配的主要方式有如下几种。

- (1) 政府部门直接支配频率资源。
- (2) 拍卖。政府通过竞拍的方式将频谱资源出售给利益相关者,最终以最高价得标的竞拍者可以获得频率使用权。
- (3) 评审。政府或相关机构进行申请资料的评审和筛选,根据规定的评分标准和评估标准进行评定。
- (4) 招标。政府或相关机构发布频率招标公告,向符合资格的利益相关者公开征求申请。
- (5) 评审与拍卖结合。

3.4.2 无线电管理的必要性

实行无线电频谱管理的必要性如下。

- (1) 避免同频和相邻的无线电波之间产生有害干扰。

由于同频和相邻的无线电波相互之间会产生有害的同频干扰,如果任何人和任何机构都可以随意向天空发射无线电波的话,无线电通信环境将严重恶化,导致谁也无法顺利进行通信。

世界上的所有国家都规定,任何企业、单位、团体和个人需要向开放空间发射无线电波都必须向政府主管部门提出频率使用申请,经过审查后获得使用许可,并且严格按照政府主管部门分配的频率发射无线电波。

- (2) 对无线电频率资源进行合理分配和有效利用。

随着科学技术的发展,无线电新技术、新业务、新设备广泛应用于社会生产、生活的各个方面。对无线电频率需求的快速增长,使有限的频率资源供需矛盾日益突出,可供分配和使用的无线电频率越来越少。

对日益稀缺的无线电频率资源进行合理分配和有效利用方面的严格管理也势在必行,必须避免占而不用、使用不充分等浪费频率资源的现象。

2015年,中国国家发展和改革委员会提出“互联网+”战略概念,推动传统产业与互联网的结合,促进传统产业的转型升级,并推动经济发展和创新。“互联网+”战略的核心思想是通过充分利用互联网技术和平台的优势,推动传统产业与互联网的融合。这包括通过互联网技术改造和创新传统产业,提高效率和竞争力;推动互联网与各个领域的深度融合,促

进产业链条的协同发展；激发创新和创业活力，推动新兴产业的发展；加强互联网基础设施建设，提升数字化能力和普及程度等。“互联网+”战略提出，“宽带中国”深入推进，移动互联网、物联网迅猛发展。

在深刻改变我们行为方式的同时，“互联网+”同时也对无线电管理工作提出了挑战。随着无线电业务相互融合，应用对带宽的需求越来越大，无线电台(站)数量、类型激增，电磁干扰情况增加，复杂频谱需求持续扩大。

《无线电规则》提出各国主管部门应牢记，无线电频谱是有限的自然资源，必须依据规则合理、有效、经济地利用，以公平地使用频谱资源。各方共享同一个电磁空间，电磁频率资源共用将成为常态，协调是无线电频谱管理永远的主题词，维护无线电波秩序是我们共同的责任。

3.5 小结

本章介绍了电磁波传播特性，介绍了电磁波频率范围和电磁波的频率划分方法，介绍了不同划分频段中无线电的应用，以及各频段无线电业务的频率使用情况。

习题

- 波长与频率的关系是_____。
 - 波长等于频率除以光速
 - 波长等于光速乘以频率
 - 波长等于光速除以频率
 - 波长与频率无关
- 以下哪个频段常用于海上通信_____。
 - 极低频 (ELF)
 - 甚低频 (VLF)
 - 超高频 (SHF)
 - 特高频 (UHF)
- 中国广电集团拥有的 700M 频段具有以下哪个优势? _____
 - 频率高,穿透能力强
 - 具有相同的上行和下行带宽
 - 信号衰减小,深度覆盖性能好
 - 带宽充足,干扰源少
- 第一代移动通信技术的带宽为_____。
 - 25kHz 或 30kHz
 - 200kHz
 - 1.25MHz
 - 130MHz
- 调频对讲机主要工作在超短波频段的_____。
 - 150MHz 和 400MHz
 - 350MHz 和 800MHz
 - 915MHz
 - 2.1GHz
- 无中心系统的控制信道是_____。
 - 915.0125MHz
 - 915.0375MHz
 - 916.9875MHz
 - 917MHz
- 集群通信常用的频段为_____。
 - 806~821MHz/851~866MHz
 - 350MHz
 - 400MHz
 - 900MHz

8. 微波通信使用的频率范围通常是_____。
- A. 300MHz~300GHz B. 3~30GHz
C. 7~38GHz D. 2~6GHz
9. 水上移动业务 VHF 频段共有_____个频道。
- A. 58 B. 59 C. 60 D. 61
10. 天气雷达的 S 频段主要集中在_____。
- A. 2700~2900MHz B. 5300~5500MHz
C. 9300~9500MHz D. 35.5~36GHz
11. 我国广播频段中的中波范围是_____。
- A. 150~285kHz B. 526.5~1606.5kHz
C. 2.3~5.06MHz D. 3.2~26.1MHz
12. 常见的业余无线电 UHF 频率范围是_____。
- A. 430~440MHz B. 144~148MHz
C. 50~54MHz D. 28MHz
13. FAST 的工作频率不包括以下哪个范围? _____
- A. 0.13~0.46GHz B. 0.92~1.72GHz
C. 1.72~2.15GHz D. 5.7~6.7GHz
14. ITU 将全球分为_____个无线电频率区域。
- A. 2 B. 3 C. 4 D. 5
15. 以下哪种不是全球商用无线电频率分配的主要方式? _____
- A. 政府部门直接支配频率资源 B. 租赁
C. 拍卖 D. 评审
16. 无线电频谱管理的主要目标不包括以下哪项? _____
- A. 频谱规划和分配 B. 频谱创新与发展
C. 频谱买卖与交易 D. 干扰管理与解决