



第5章微波与卫星通信技术

5.1 数字微波通信的概述

5.2 数字微波通信系统

5.3 SDH微波通信系统

5.4 一点多址微波通信系统

5.5 卫星通信技术

5.6 卫星通信系统的构成



5.1 数字微波通信的概述

5.1.1 数字微波通信的概念

- **微波**：频率在300MHz ~ 300GHz范围内，波长极短(1m ~ 1mm)的电磁波。常用的范围是1 ~ 40GHz。
- **微波通信**：利用微波（射频）作载波携带数字信息，通过无线电波空间进行**再生中继**（接力）的通信方式。

模拟微波：携带的基带信息是模拟信号

数字载波：携带的基带信息是数字信号

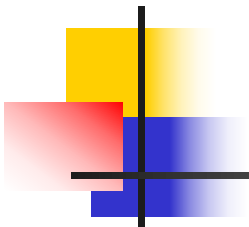
微波通信是无线通信的一种方式。



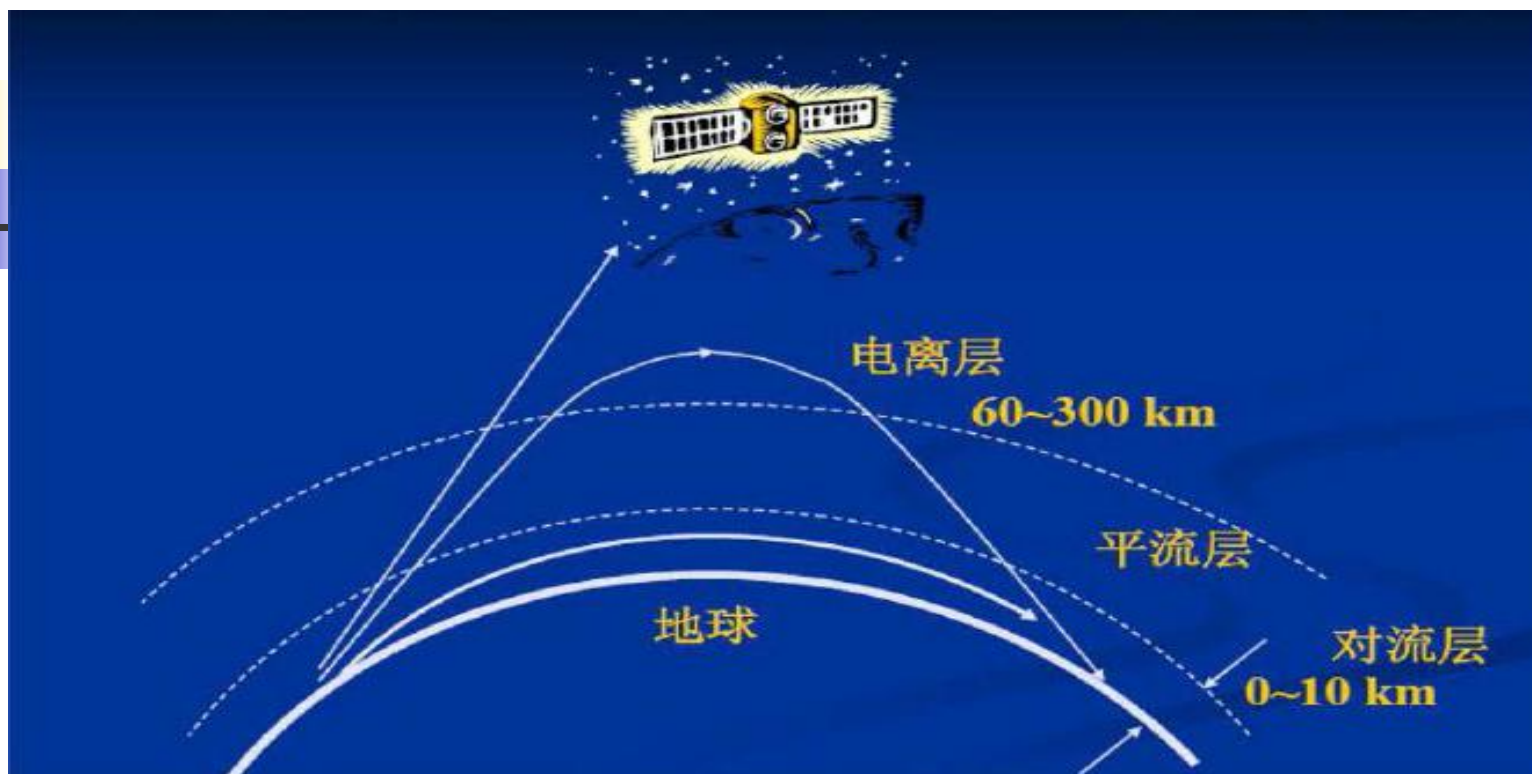
(一) 无线电波和频段划分

无线电波： 是一种频率较低、波长较长的电磁波

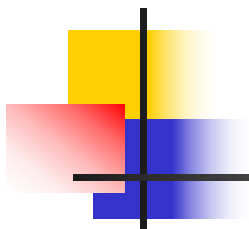
- 中长波沿地面传播，绕射能力较强，沿地面传播（因为地面强烈吸收能量）
- 短波靠电离层反射传播：
- 微波（波长为 $1\text{m} \sim 1\text{mm}$ ），能穿透电离层，在大气对流层中沿视线直线传播，绕射能力很弱。



频段名称		频率范围	波长范围
长波		30 ~ 300kHz	10000 ~ 1000m
中波		300 ~ 3000kHz	1000 ~ 100m
短波		3 ~ 30MHz	100 ~ 10m
超短波 (特高频)		30 ~ 300MHz	10 ~ 1m
微波	分米波 厘米波 毫米波	300MHz ~ 3GHz 3 ~ 30GHz 30 ~ 300GHz	100 ~ 10cm 10 ~ 1cm 1cm ~ 1mm



- **中长波**沿地面传播，绕射能力较强，沿地面传播（因为地面强烈吸收能量）地波：
- **短波**靠电离层反射传播；
- **微波**（波长为 $1\text{m} \sim 1\text{mm}$ ），能穿透电离层，在大气对流层中沿视线直线传播，绕射能力很弱。



(四) 地面远距离微波通信

微波：无线电波，类似光的传播特性。

微波在自由空间只能像光波一样沿直线传播，绕射能力很弱；在传播过程中遇到不均匀介质时，将产生折射和反射现象。

地面上进行远距离微波通信需要采用“**中继**”方式，这是因为：

(1) 微波的似光性

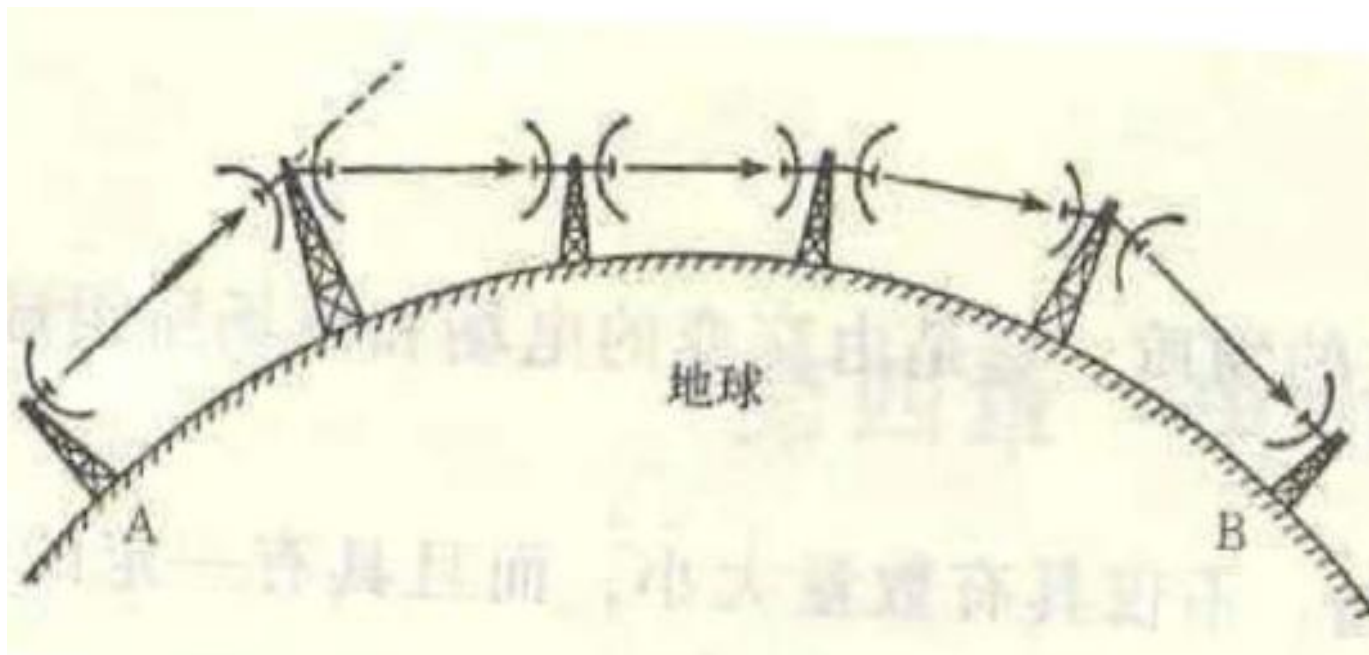


图 5-2 微波通信的中继方式



(2) 微波能量的传播损耗和补充

无线电波在空间传播过程中，能量要受到损耗。频率越高，衰减越大。因此，欲实现地面上A、B两地间的远距离微波通信，也必须采用“接力”方式，逐段收发放大，最终到达远距离收信端。



(二) 微波通信的特点

- (1) **微波频段**，受工业、天电和宇宙等外部干扰的影响很小，使微波通信的传输可靠性提高。**12GHz** 以下，受风雨冰雪等恶劣气象条件的影响较小，可使微波通信的稳定度大大提高。目前使用较多的频段是**2、4、6、7、8和11 GHz**。
- (2) 微波频段占有频带很宽，可以容纳更多的无线电设备工作。全部长、中、短波频段的总频带占有不到**30MHz**，而微波仅厘米波的频带就占有 **$27 \times 10^3 \text{MHz}$** ，几乎是前者的**103**倍。占有频带越宽，可容纳同时工作的无线电设备越多。**信息容量大。**(**$|\Delta f| = |-\Delta \lambda c / \lambda^2|$**)
- (3) 微波射束在**视距范围内直线、定向传播**，天线的两站间的通信，距离不会太远，一般为**50 km**。



5.1.2 微波传播特性

(一) 自由空间的电波传播

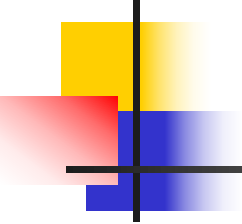
1. 自由空间的概念

自由空间又称为理想介质空间，即相当于真空状态的理想空间。在此空间充满着均匀、理想的介质。

2. 自由空间传播损耗

在自由空间传播的电磁波不产生反射、折射、吸收和散射等现象，即总能量在传播过程没有被损耗掉。

但是，电波在自由空间传播时，其能量会因向空间扩散而衰减。



这是因为电波由天线辐射后，向周围空间传播，到达接收地点的能量仅是一小部分。距离越远，接收点的能量越小，如同一只灯泡所发出的光一样，均匀地向四面八方扩散出去。

这种电波扩散衰耗称为自由空间传播损耗。传播损耗为：

$$L_s = 20 \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \quad (dB) \quad (5-1)$$

式中：d为收发天线的直线距离，m；

f为发信频率，Hz；

c为光速度， $3 \times 10^8 m/s$ ；



自由空间传播损耗:

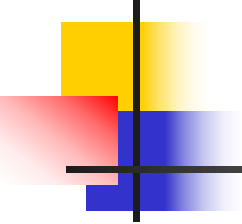
$$L_s = 20 \lg \left(\frac{4\pi df}{c} \right) \quad (dB)$$

当距离以km为单位, 频率以GHz为单位时

$$L_s = 92.4 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (dB)$$

若频率以MHz为单位, 则

$$L_s = 32.4 + 20 \lg d + 20 \lg f \quad (dB)$$



3. 自由空间传播条件下收信电平的计算

实际使用的天线均为有方向性天线

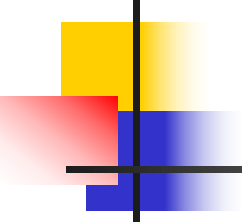
设收发天线增益分别为 $G_r(dB)$ 、 $G_t(dB)$ ；

收发两端馈线系统损耗分别为 $L_{fr}(dB)$ 、 $L_{ft}(dB)$ ；

收发两端分路系统损耗分别为 $L_{br}(dB)$ 、 $L_{bt}(dB)$ 。

则在自由空间传播条件下，接收机的输入电平为

$$P_r = P_t(dB) + (G_t + G_r) - (L_{ft} + L_{fr}) - (L_{bt} + L_{br}) - L_s \quad (dB)$$



例 已知发信功率为 $P_t = 5W$, 工作频率 $f = 3800MHz$, 两站间距离 $d = 45km$

$$G_t = G_r = 39dB, L_{ft} = L_{fr} = 2dB, L_{bt} = L_{br} = 1dB$$

求在自由空间传播条件下, 接收机的输入电平和输入功率。

解: 由式 (5-2) 式得 $L_s = 92.4 + 20\lg d + 20\lg f$ (dB)

$$L_s = 92.4 + 20\lg 45 + 20\lg 3.8 = 137 \quad (dB)$$

$$P_r = P_t + (G_t + G_r) - (L_{ft} + L_{fr}) - (L_{bt} + L_{br}) - L_s \quad P_t = 5W = 37dBm$$

$$= 37 + (39 + 39) - (2 + 2) - (1 + 1) - 137 = -28dB$$

$$P_r = 10^{-28/10} (mW) = 1.58 \times 10^{-3} (mW) = 1.58(uW)$$



(二) 地形地物对微波传播的影响

地形地物对微波电磁波会产生的现象:

反射(reflection)

折射(Refraction)

绕射或衍射(diffraction)

吸收(absorption)

1. 平坦地表对微波的反射

水面或平坦地面等地表对微波的反射，造成接收点的场强是**直射波和反射波的矢量和**。当收发天线足够高时，可以认为直射波是自由空间波。

2. 地表障碍物对微波视距传播的影响

地表障碍物是诸如丘陵、山头、树林和高大建筑物等会阻挡电磁波视距传播的地物。与自由空间传播相比，地表障碍物对微波视距传播的影响表现为引入了**阻挡损耗**。





(三) 大气对微波传播的影响

主要讨论对流层(0~10km)对微波传播的影响。表现在3个方面:

- 1 氧气分子和水蒸汽分子对电磁波的吸收;
- 2 雨、雾、雪等气象微粒对电磁波的吸收和散射;
- 3 对流层结构的不均匀对电磁波的折射。

当微波中继通信系统的工作频段在10GHz以下时, 前两个方面的影响不显著, 只需考虑对流层折射的影响;

当工作频段在10GHz以上时, 3个方面的影响都需考虑。



(四) 地面远距离微波通信

微波是一种波长很短的无线电波，它除了具有无线电波的一般特性外，还具有其本身的特性，其中最主要的是具有**类似光的传播特性**。微波在自由空间只能像光波一样沿直线传播，绕射能力很弱；在传播过程中遇到不均匀介质时，将产生折射和反射现象。



(五) 数字微波信道的干扰和噪声

微波线路的**干扰**主要来自天馈系统和空间传播引入，一般有回波干扰、交叉极化干扰、收发干扰、邻近波道干扰、天线系统同频干扰等。

噪声主要来自**设备**，如收、发信机热噪声以及本振源的热噪声等。



5.1.3 数字微波的使用与发展简况

- **起步**：20世纪50年代，小容量、低频段的数字微波通信系统。
- **实用化**：70年代末得到了迅速发展，并形成了一个完整的技术系统。

调制方式：(2PSK) \rightarrow (1024QAM)

频谱利用率大大提高：

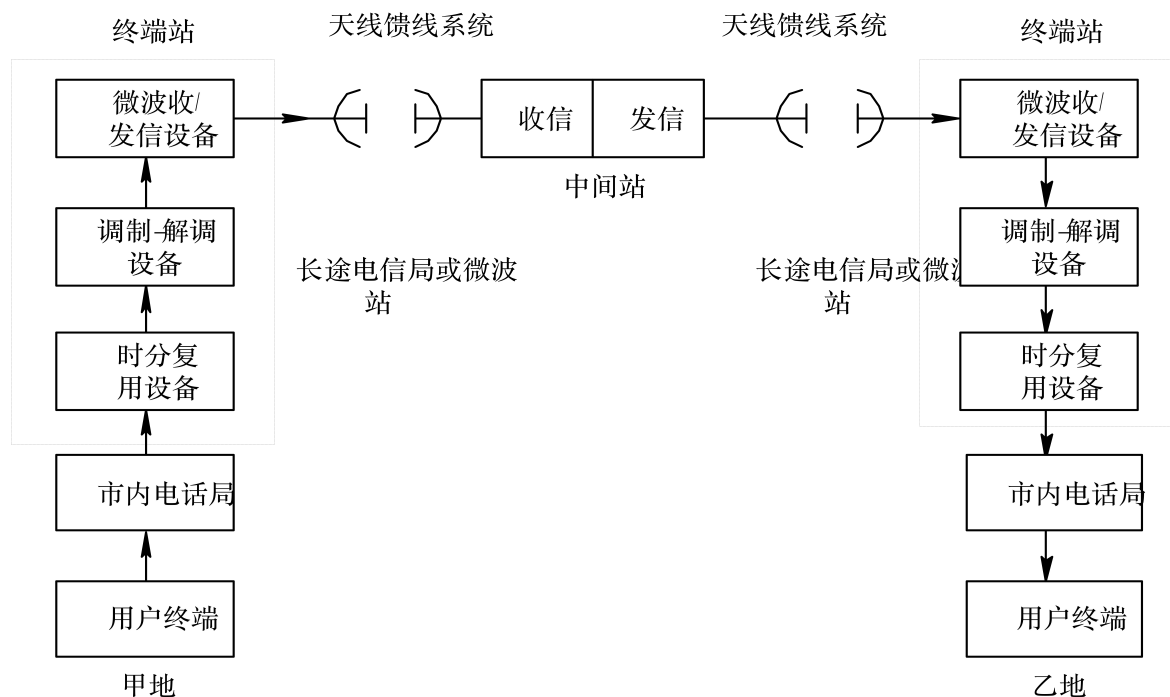
传输一路码流为64kb/s的数字电话，己能被压缩到与一路模拟电话（带宽4KHz）所占用的信道频谱利用率相当。

- **基于SDH 的数字微波通信系统**：进入90年代后，数字微波具有建站快、成本低、不须铺设线路的特点，尤其适合于紧急通信、临时通信、无线接入等用途。

5.2 数字微波通信系统

5.2.1 数字微波通信系统的组成

一条数字微波通信线路：两端终端站，中间站。





5.2.2 数字微波通信系统的主要技术

为了提高数字微波信道的传输质量和进一步提高频谱利用率，对新技术的研制和使用可概括为如下几个方面：

（一）多载频多电平调制技术

1 多电平： 4PSK -> 8PSK、16QAM -> 64QAM

2 单载频： 一个波道的发信机（或收信机）只使用一个载频（即射频）。

为了减小数字微波通信的多径衰落，把传输频谱变窄是一种有效的方法。

多载频： 在256QAM系统传输方式。

例： 单载频： 100Mb/s 4个载频： 400Mb/s

而其占用波道的频谱却与只用一个载频传输100Mb/s 占用的频谱相当。



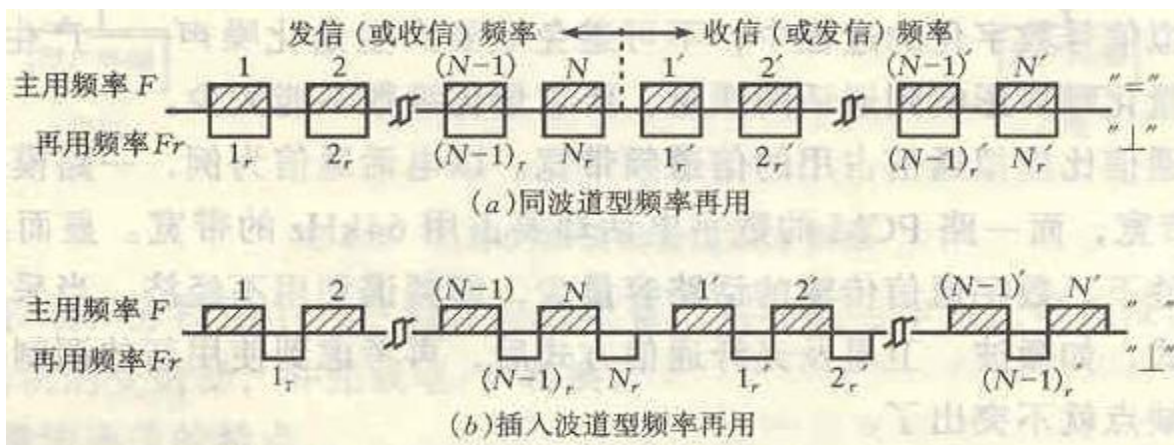
(二) 干扰信号抵消技术

20世纪80年代中期，国外在数字微波通信系统中使用了这种技术。

因干扰噪声是数字微波通信系统中一种主要噪声，所以当信道中存在干扰信号时，可设法把干扰信号提取出来。或用另外的方法由其它地方获得干扰信号，然后，加入到原信道去抵消存在的干扰。只要使提取的干扰信号与存在的干扰电平相等、相位相反，就可使原信道中的干扰成分大大减小，提高了信道的传输质量。

(三) 微波射频频率再用技术

多波道工作时，在两个微波站之间，往同一方向的多个发信频率(对应多个波道)间要有一定的频率间隔。





(四) 收、发微波射频单频制技术

两频制： 一个波道的收、发使用两个不同的微波频率。若收、发共用同一天线、馈线的系统，要求收发间去精度不小于30dB。在我国4GHz、960设备中，收、发频率相差213MHZ。若采用收、发频率分开的两个天线、馈线系统，收发间去藕度可达到70~80dB。这就使从两频制进展到单频制成为可能，

单频制： 一个波道的收、发使用同一个微波频率，不同极化方式。（可使系统的频谱利用率提高一倍）

主要问题：站内本系统收、发之间的同频干扰其它站的越站干扰问题

解决方案： 使用高性能的两个天线、馈线系统对收、发信设备加强屏蔽和去耦，采用干扰信号抵消技术等措施。



(五) 多径分集技术

多径传输：电磁波传输经过反射、折射和直射等多个不同的路径，以不同的方向和时延到达收信点，而进行矢量相加的结果。

后果：微波通信中的频率选择性衰落。

设想：多径传输的电波却载有相同的有用信息，所以人们想用数字分析的方法和信号处理技术，把有用信号分离出来，并加以利用，这就是多径分集技术的设想。由于实现的难度较大，所以其进展程度不快。



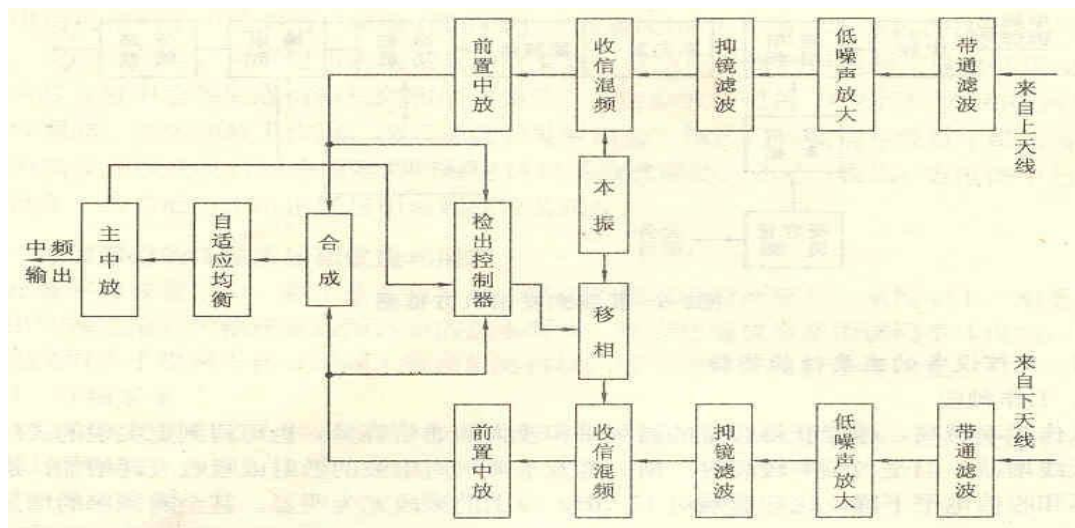
5.2.3 收信和发信设备

(一) 发信设备的组成

从目前使用的数字微波通信设备来看，分为**直接调制式**发信机(使用微波调相器)和**变频式**发信机。中小容量的数字微波(**480**路以下)设备可用前一种方案。而中大容量的数字微波设备大多采用变频式发信机，这是因为这种发信机的数字基带信号调制是在中频上实现的，可得到较好的调制特性和较好的设备兼容性。

(二) 收信设备的组成

数字微波的收信设备和解调设备组成了收信系统，这里所讲的收信设备只包括射频和中频两个部分。目前收信设备都采用外差式收信方案。





5.2.4 微波通信系统的监控系统

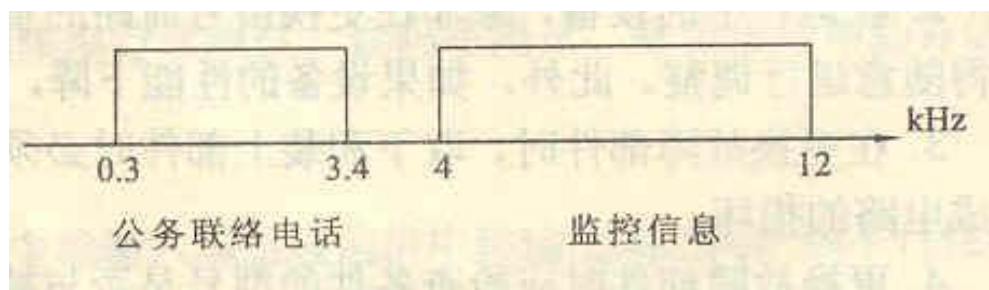
(一) 监控的意义

对一条微波通信传输信道及主备设备运行情况自动监视与控制，简称为“监控”。

CCIR在建议557中，对无线电接力通信系统规定了2500km的假想参考电路在测量时间至少为一年的周期内，有效利用率应不小于99.7%。即不可用时间(即线路中断时间)不应超过一年的0.3%。一般认为设备故障、电源故障、电波传播条件恶化所造成的中断时间各占0.1%。

(二) 公务电话和监控信息的传输信道

在中小容量的数字微波通信系统中，常把监控信息和公务联络电话信号一起处理，称为**公务信号**，用专门的公务信道传输。公务信号的频带为(0.3 ~ 12)kHz，其中(0.3 ~ 3.4)kHz 为公务联络电话占用，(4 ~ 12)kHz为监控信息占用，如图所示。





5.2.5 天线、馈线系统

发信设备->微波信号->馈线系统->发射天线->无线定向发射 ->接收天线->馈线系统->微波信号->收信设备

天线、馈线系统包括:

天线和馈线、阻抗变换器、极化分离器、波道滤波器等

天线、馈线系统最基本的要求有:

足够的天线增益, 良好的方向性, 低损耗的馈线系统, 极小的电压驻波比, 较高的极化去耦度, 足够的机械强度等

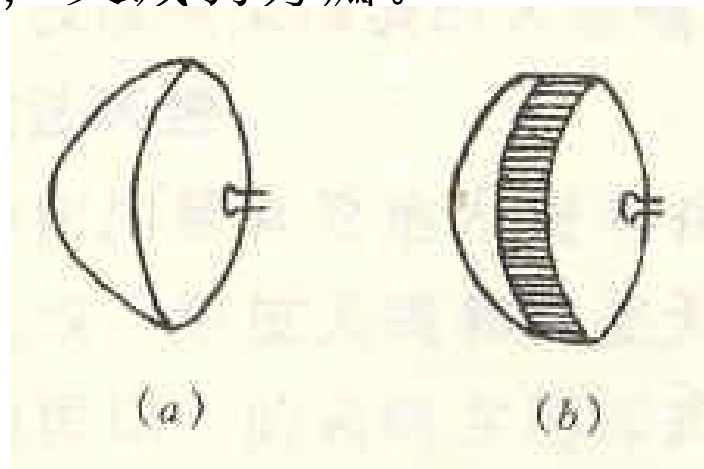
数字微波或者模拟微波的天馈线系统形式及技术要求基本相同。

2. 卡塞格林天线

卡塞格林天线是一种具有双反射器的抛物面天线，其外形简图如图所示

(a)一般较常见

(b)近年来出现，圆柱屏蔽罩式。可以降低向后方辐射的功率(降低后瓣)，又减弱旁瓣。





5.4 一点多址微波通信系统

5.4.1 概述

今年来发展起来的一种分布式无线通信方式,

应用：在一些幅员辽阔、用户分散、人口密度相对较低、话务量较小的地区。如用有限方式难以到达的山区和海岛。

组成：一个中心站(又称基站)和不同方向的多个外围站(或称用户站、远端站)

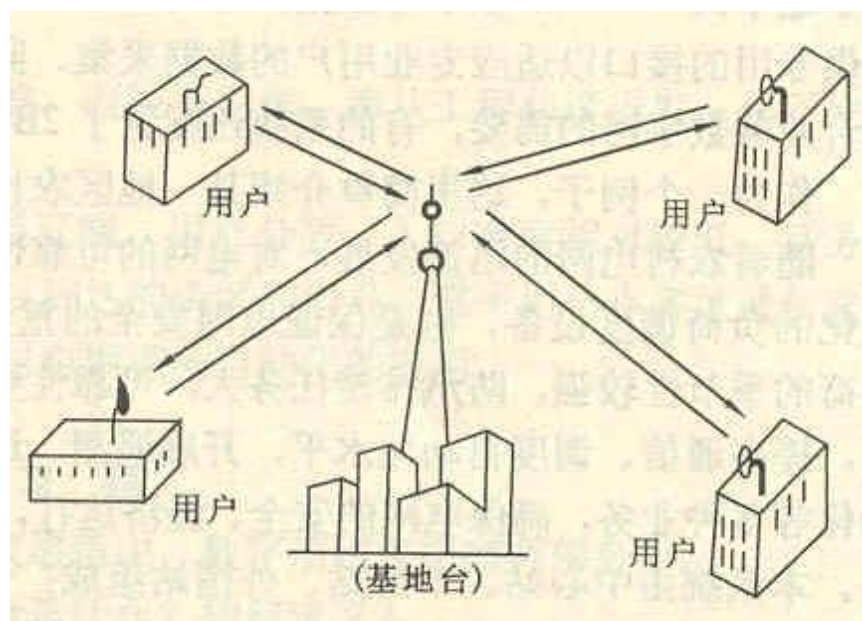
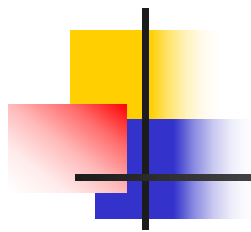


图5-18 一点对多点微波通信系统示意图



1 由于微波的视距传播特性(似光性), 因此外围站只能设在中心站的方圆**50km**范围之内。

2中心站: 全方向性天线, 足够高。

外围站: 简易定向天线(对准中心站)相对低
各外围站之间通信必须通过中心站来建立。

为了延伸系统的传输距离，也可以采用中继接力的方式增设中继站。根据需要，中继站也可上、下话路。

组网类型可以使辐射型、分支型和直线型

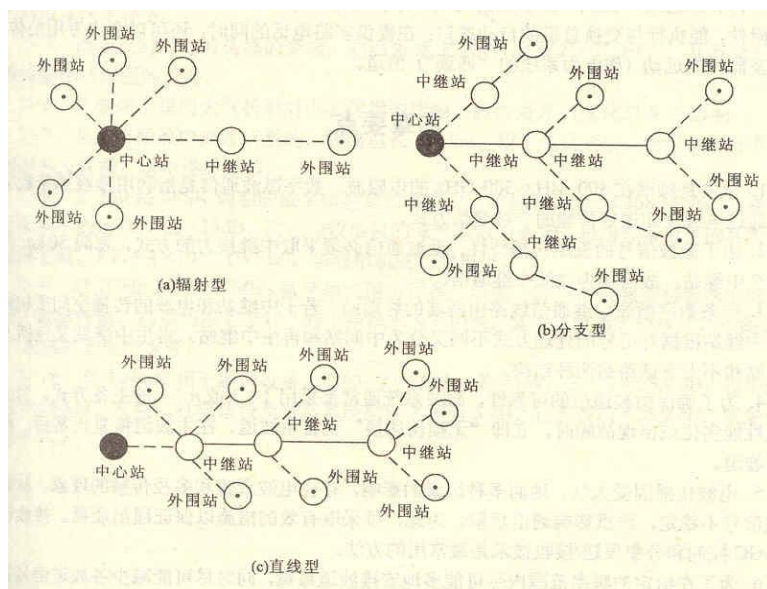


图5-19 一点多址微波网络拓扑



5.4.2 一点多址微波通信系统的特点

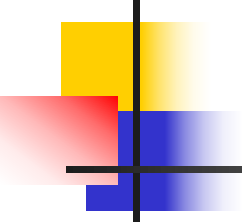
- (1) 用于农村电话网的组成部分和城市公用电话网的延伸。
- (2) 它不适合作为话务量大的中继线使用。当某一外围站的用户数超过一套设备的最大容量时，可以利用增加设备的套数来解决。
- (3) 除传输电话外，还可提供数据传输，如传真、电传、电报等。其中对于速率为**4.8kb/s**以下的数字信号，可以不外接调制、解调器而直接在系统中传送。



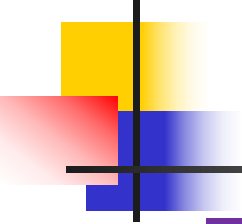
例子：“农村电网建设与改造”的通信部分

定位：农村通信系统处于电力系统通信网的边缘，属于支线通信网。其网络布局多成“面”状分布，比较分散。

主要问题：根据当地的实际情况，合理地选择适当的通信方式和设备，实现通信网的覆盖范围、传输容量、信息路由、可靠性及经济指标在满足电力系统通信要求基础上的统一。



因此，建立一个合理的农村通信系统，我们需要首先理解农网通信系统的发展现状、一些适用于农网的通信方式以及组建一个农网通信系统时需要考虑的问题。



■移动应急和容灾

根据网络特点分析，有选择地建设部分固定的和部分移动的应急容灾微波电路，对于光纤传输系统在遇到自然灾害以及紧急修复时发挥重要作用。如：点对点的SDH微波、PDH微波等，设备可做到集成度高、体积小、重量轻，建立连接迅速，并具备光纤接口，在OPGW、ADSS光缆断缆情况下，**便携式微波设备**可立即运至现场，连接中断处的纤芯，迅速恢复通信，满足电力生产业务的通信需要，从而给光缆恢复提供充足的时间。

例如：成都曙光公司的SunetL INK600E1数字微波通信系统（如下图所示），有固定型和便携移动型，可工作于2.4~26GHz微波频段，可提供4~32Mbit/s的数据传输速率，应用十分广泛。

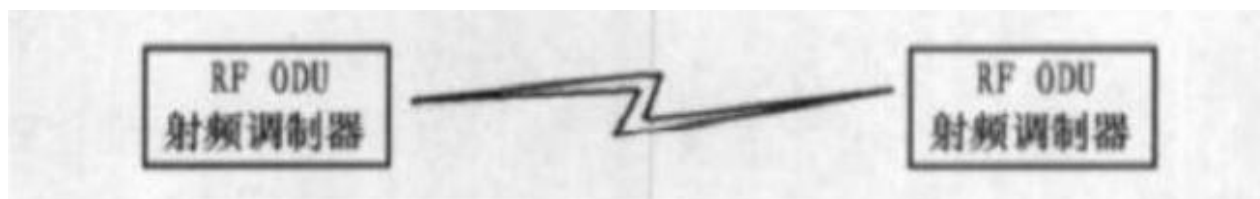


图 1 点对点微波

Fig 1 Point to point microwave

注：传输距离为 2~40 km；系统容量为 2E1/4E1/8E1/16E1；运行
频段为 2.4 GHz/5.8 GHz/7 GHz/8 GHz/13 GHz/15 GHz/18 GHz/
23 GHz/26 GHz。



5.5 卫星通信技术

微波是指频率为300MHZ至300GHZ的电磁波。

微波通信是指用微波频率作载波携带信息，通过无线电波空间进行中继（接力）

卫星通信是指利用人造地球卫星作为中继站，转发或反射无线点播，在两个或多个地球站之间进行通信。



5.5 卫星通信技术

——利用人造地球卫星作为中继站来转发无线微波，从而进行两个或多个地面之间的通信。

卫星通信具有传输距离远、覆盖面积大、通信容量大、用途广、通信质量好、抗破坏能力强等优点。

一颗通信卫星总通信容量可实现上万路双向电话和十几路彩色电视的传输。

卫星通信工作在**微波波段**，与地面的微波接力通信类似，微信通信则利用高空卫星进行接力通信。



高轨道通信卫星：（本节介绍）

- 运行在赤道上空约**3600km**的同步卫星。位于印度洋、大西洋、太平洋上空的三颗同步卫星，基本可覆盖全球。
- 因卫星的高度太高，故要求地面站发射机有强大的发射功率，接收灵敏度要高，天线增益要高。

低轨道通信卫星：（移动通信中介绍）

- 是运行在**500~1500km**上空的非同步卫星，一般采用多颗小型卫星组成一个星型网。通过星际通信可覆盖全球。
- 主要用于移动通信和全球定位系统（GPS）。



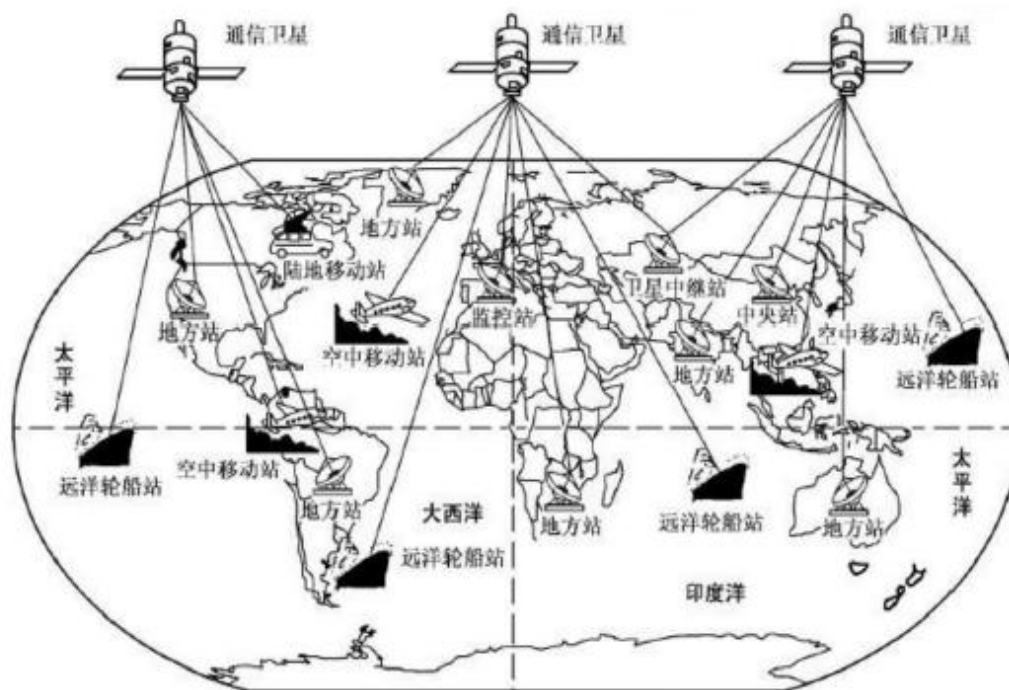
5.5.1 卫星通信的概述

(一) 卫星通信的发展

微信通信是现代通信技术、航空航天技术、计算机技术结合的重要成果。

近30年来，卫星通信在国际通信、国内通信、国防、移动通信以及广播电视等领域，得到了广泛应用。

卫星通信之所以成为强有力的通信手段之一，是因为它具有频带宽、容量大、适于多种业务、覆盖能力强、信用稳定、不受地理条件限制、成本与通信距离无关等特点。



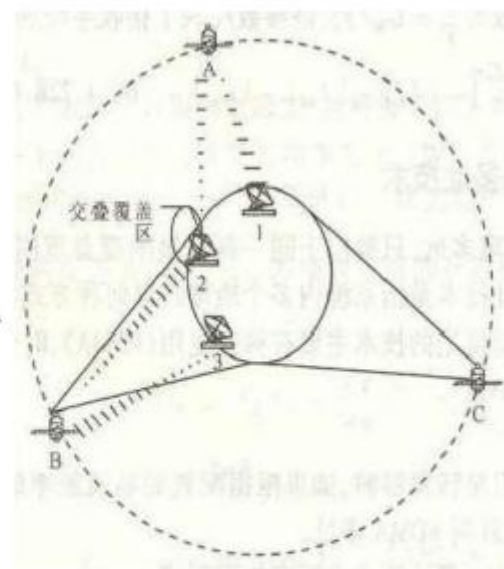
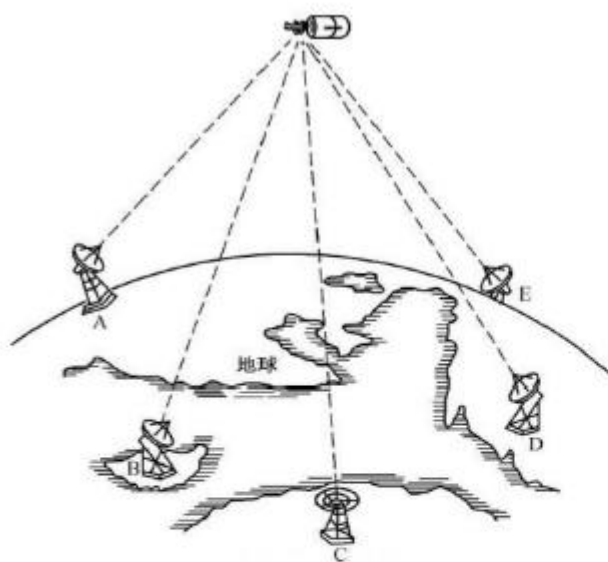
第一代“国际通信卫星”(INTERLSAT-I) IS-I, 原名“晨鸟”



5.5.2 卫星通信的特点

(一) 卫星通信的特点

- (1) 通信距离远，通信成本与距离无关。
- (2) 覆盖面积大，可进行多址通信。
- (3) 通信容量大，传送的业务种类多。
- (4) 信号传输质量高，通信线路稳定可靠。
- (5) 建立通信电路灵活，机动性好。



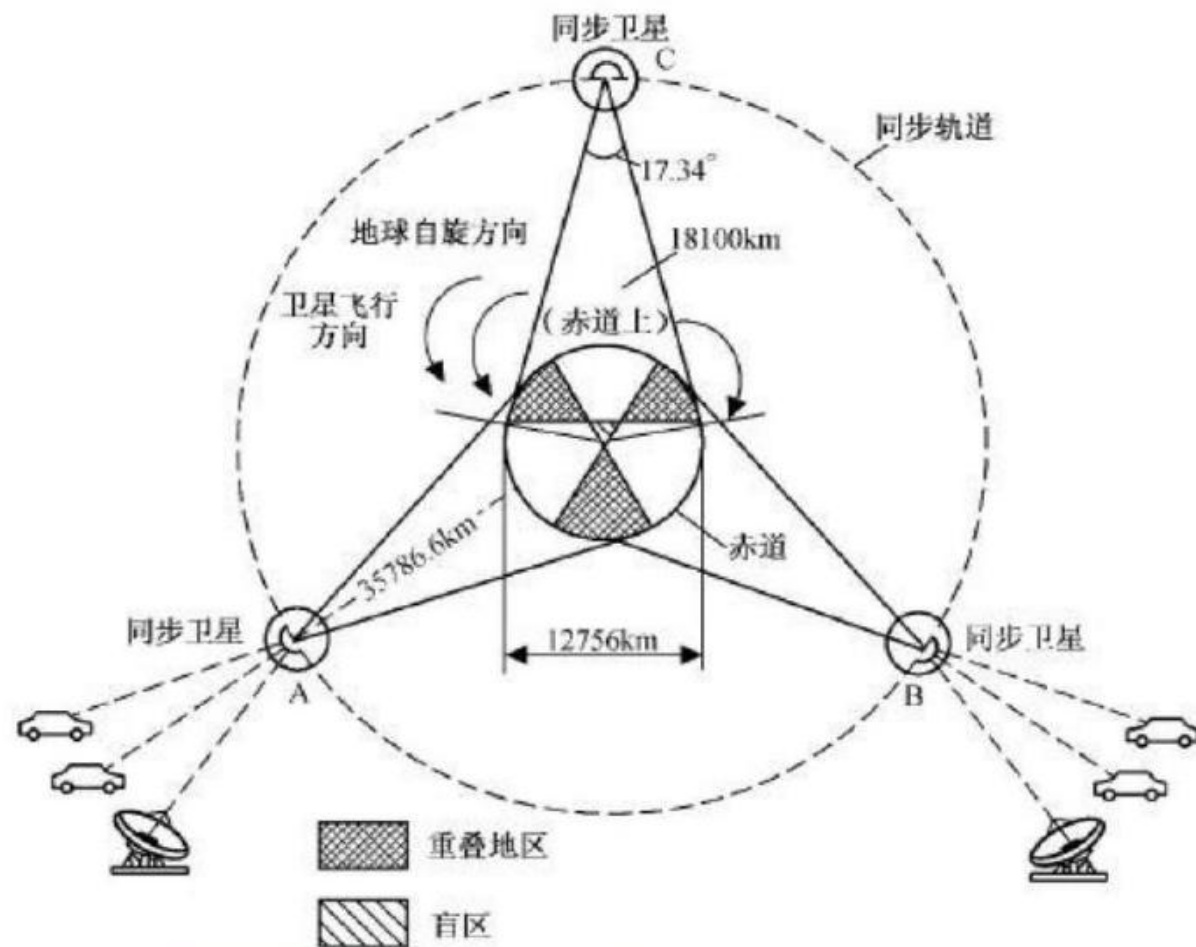
同步卫星覆盖



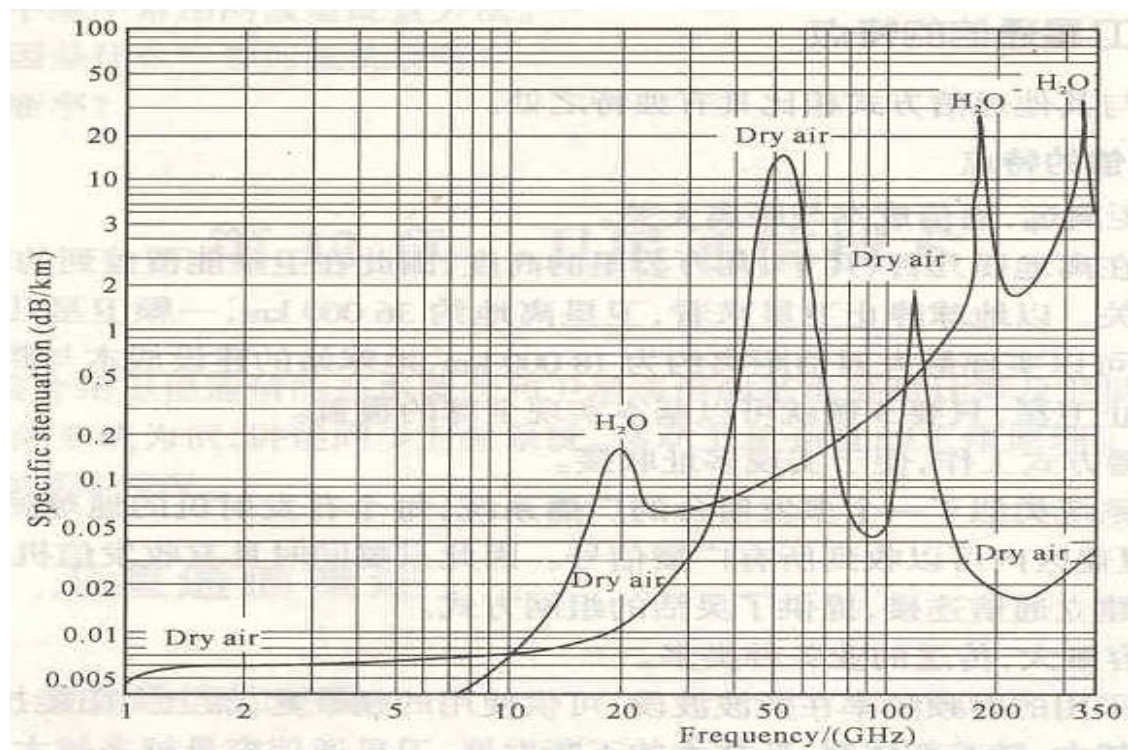
5.5.2 卫星通信的特点

(二) 卫星通信技术上的特殊性

- (1) 静止卫星的发射与控制技术比较复杂。
- (2) 地球的两极地区为通信盲区，而且地球的高纬度地区通信效果不好。
- (3) 存在星蚀和日凌中段现象。
- (4) 有较大的信号传输时延和回波干扰。



5.5.3 卫星通信使用的频率

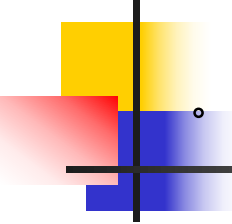




5.5.3 卫星通信使用的频率

卫星通信频率一般工作在微波频段，其主要原因是卫星通信是电磁波穿越大气层的通信，大气中的水分子、氧分子、离子对电磁波的衰减随频率而变化。

可见，0.3-10GHz大气损耗最小，比较适合于电波穿出大气层的传播，可以把电波看作是自由空间传播，因此称此频率为“无线电窗口”。



5.5.3 卫星通信使用的频率

目前大部分通信卫星：

民用、商用卫星通信： 使用**4/6GHz**频段

政府、军事卫星通信： 使用**7/8GHz**频段

与民用卫星通信系统在频率上分开，避免相互干扰。

由于4/6GHz通信卫星的拥挤，以及与地面微波网的干扰问题，目前已开发使用11/14GHz频段，并用于民用卫星和广播卫星业务。20/30GHz频段也已经开始使用，(损耗谷、半透明无线电窗口)

5.6 卫星通信系统的构成

5.6.1 卫星通信系统的基本组成

以地球同步卫星通信系统为例，说明卫星通信系统的基本构成。如图5-21 示意了通过卫星进行电话通信的系统框图。

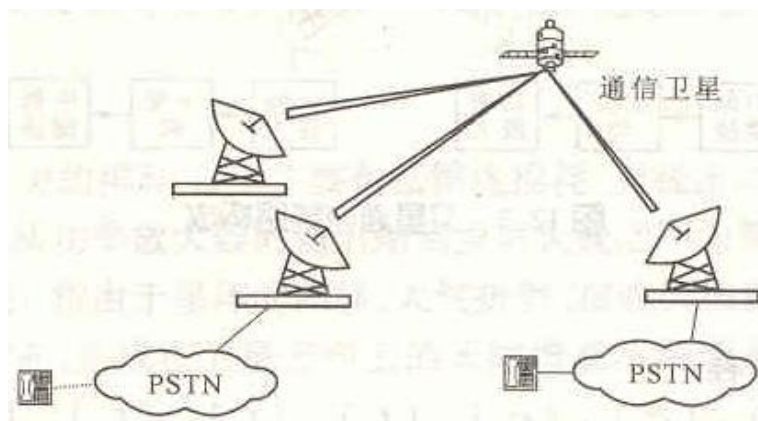
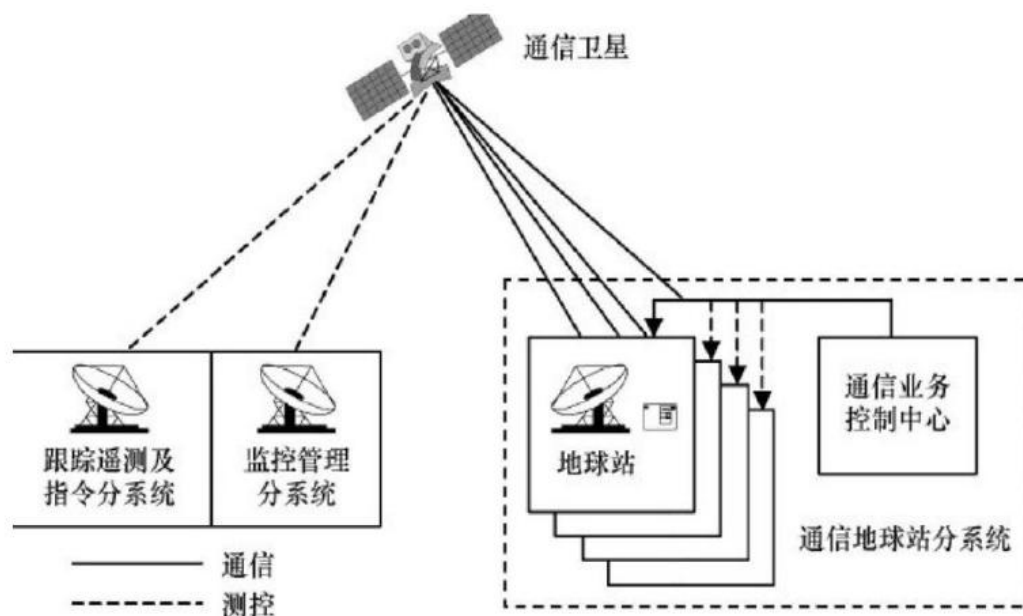
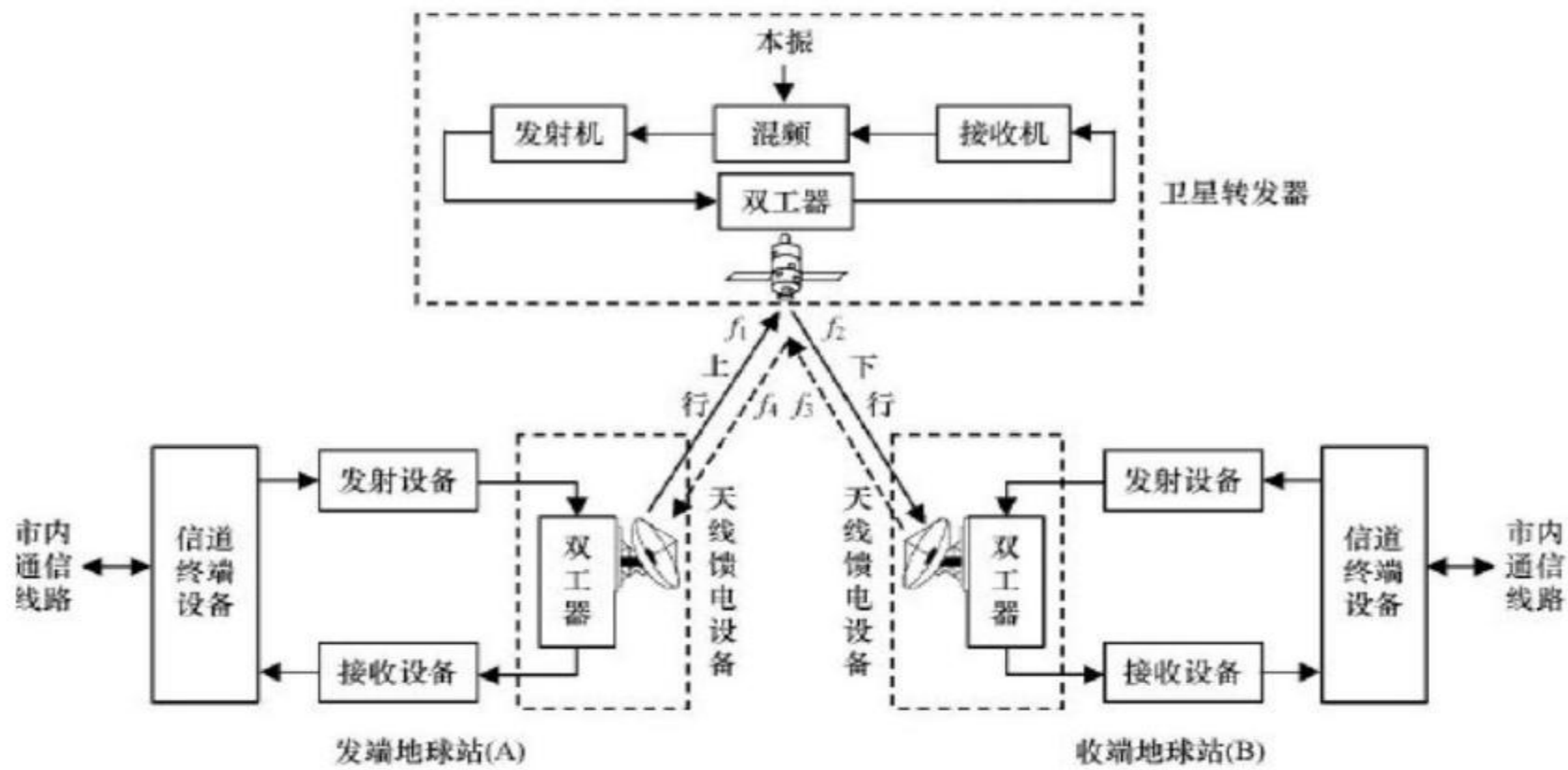


图5-21卫星电话通信系统

卫星通信系统部分包括如下几个部分内容。

- (一) 控制与管理系统
- (二) 星上系统
- (三) 地球站







5.6.3 卫星通信多址技术

多址方式概述：

卫星通信的一个基本特点是：能进行多址通信（多址连接）。系统中的各地球站向卫星发送信号，卫星将这些信号混合并作必要的处理（如放大、变频等）与交换（如不同波束之间的交换），然后向地球某一区域转发或向地球的某些区域分别转发。

多址通信示意图

