

卫星通信系统概述

田红心 副教授

西安电子科技大学**ISN**国家重点实验室

Email: hxtian@mail.xidian.edu.cn

主页: <http://web.xidian.edu.cn/hxtian/index.html>

如何学习

- **教材:**

英文版 **Satellite communications system**
G.Maral

参考书: 张更新翻译《卫星通信》

朱立东等《卫星通信导论》 电子工业出版社

- **考试**

1. 笔试 (**80%**)

2. 计算与仿真、大作业(**20%**)

- **如何学习**

1. 建立系统、总体概念

2. 了解卫星通信特点

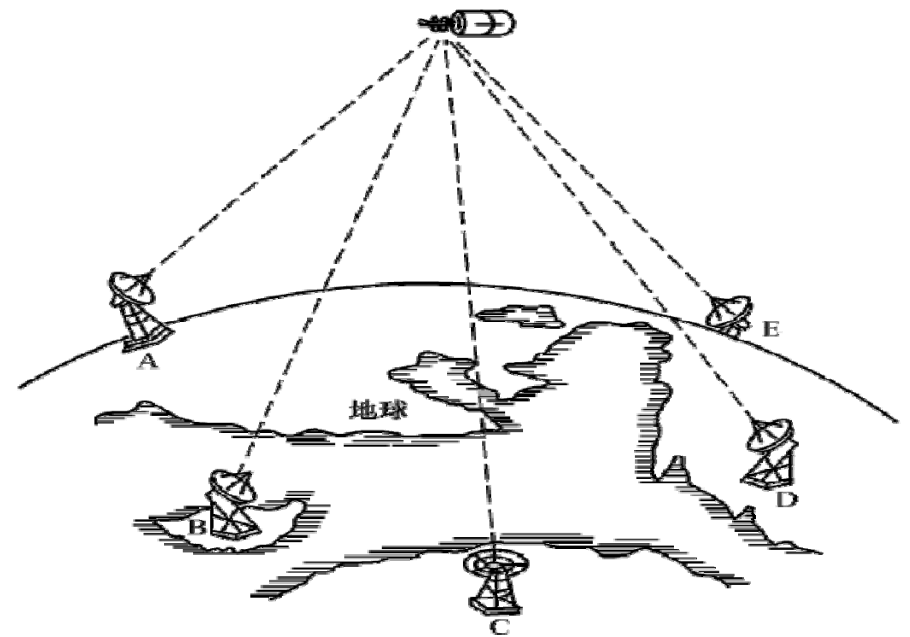
3. 卫星通信采用的技术

□ 什么是卫星通信？

- 卫星通信是利用人造地球卫星作为中继站转发无线电波，在两个或多个地球站(用户终端)之间进行的通信。

卫星通信又是宇宙无线电通信形式之一，而宇宙通信是指以宇宙飞行体为对象的无线电通信，它有三种形式：

- (1) 宇宙站与地球站之间的通信；
- (2) 宇宙站之间的通信；
- (3) 通过宇宙站转发或反射而进行的地球站间的通信。



主要优点：

- 卫星通信距离远、服务范围宽、通信质量好，不受地理条件限制。
- 可用带宽宽，通信容量大。从**UHF**、**C**波段、**ku**到**ka**频段。
- 卫星通信系统与地面通信基础设施相对独立，网络路由简洁。对于稀业务密度地区，有重要意义。
- 网络建设速度快，成本低。
- 安全通信。卫星通信系统是地面公用网的补充、扩展和备份。
- 通信成本与通信距离无关。

主要缺点：

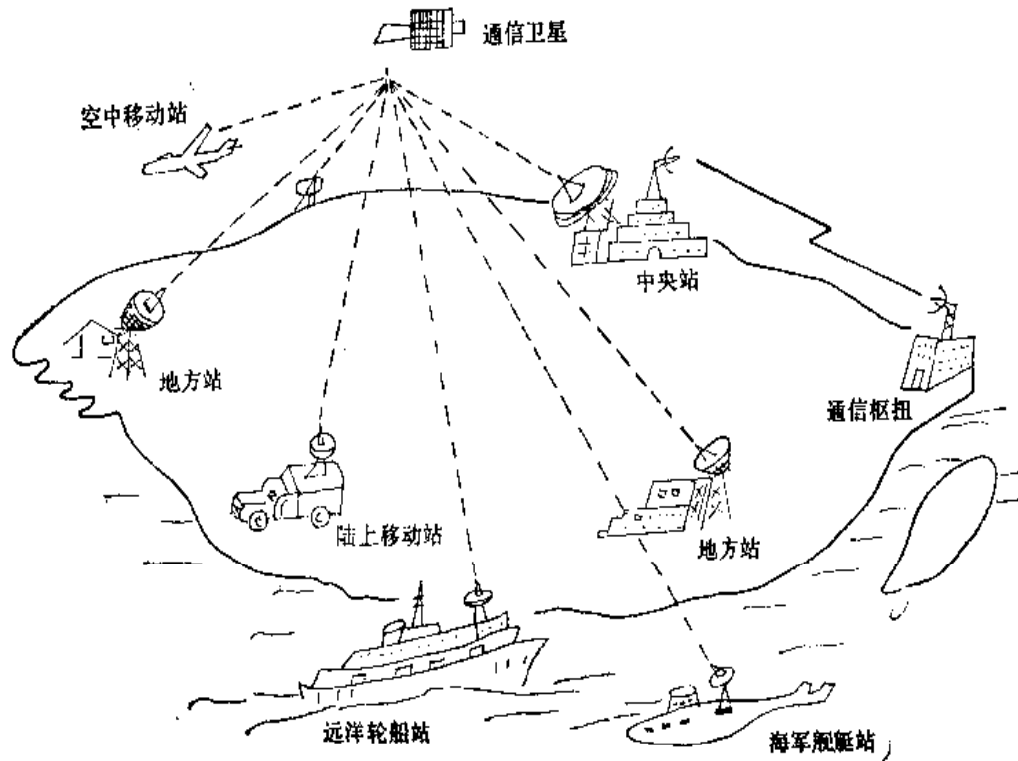
- 发射和控制技术复杂；
- 传播时延大；
- 受外太空影响大，存在日凌和星蚀现象。

卫星通信的历史和发展

- 卫星通信的思想最先由Arthur C. Clarke在论文 “Extra-Terrestrial Relay” (1945) 提出。
- 1957年苏联发射第一颗人造卫星。
- 1958年12月, 美国发射“斯科尔”广播试验卫星, 进行磁带录音信号的传输。
- 1960年8月, 又发射了“回声”(ECHO) 卫星, 首次完成了有源延迟中继通信。
- 1962年7月美国电话电报公司AT&T发射了“电星一号”(TELESTAR-1) 低轨道通信卫星, 在6GHz/4GHz实现了横跨大西洋的电话、电视、传真和数据的传输, 奠定了商用卫星通信的技术基础。
- 1962年11月美国无线电公司RCA发射了“中继1号”(RELAY-1) 低轨道卫星, 完成了横跨太平洋的美、日之间的电视传播。
- 1963年7月美国宇航局发射的“辛康2号”(SYNCOM-II) 静止卫星。
- 1965年苏联发射了“闪电”(MOLNIYA) 同步卫星。
- 1965年, 第一颗商用通信卫星INTELSAT 1正式开始了卫星通信服务业务。

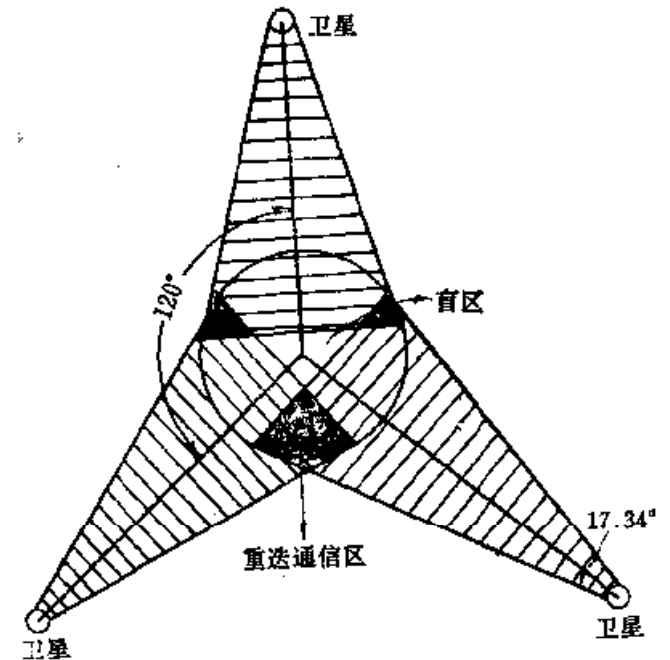
卫星通信的历史和发展

- **50**多年来，卫星通信发展很快，卫星重量从几十**kg**发展到**5000kg**以上；寿命从**1.5**年发展到**15**年以上；通信容量从**480**路电话发展到几万路以上；业务种类包括了电话、电视、数据、多媒体业务。



卫星通信示意图

2014/3/5



卫星全球覆盖示意图

卫星通信的历史和发展

- 组成：卫星与地球站
- 成本：决定其发展

- 降低费用方法
 - 1.** 大推力可靠火箭
 - 2.** 卫星重量大
 - 3.** 新技术：频率复用、多波束
 - 4.** 卫星容量增加
 - 5.** 服务和功能增加，降低地面站成本
 - 6.** 新业务，新网络

我国通信卫星发展情况

- 1970年4月成功发射了第一颗卫星；
- 1984年4月，发射了第一颗试验用“同步通信卫星” STW-1（即东方红二号）；
- 1986年2月成功发射第二颗“实验通信卫星” STW-2。卫星位于东经103° 赤道上空。用于转播广播电视和传送电话，设计容量为1000路电话，寿命为3年。
- 1988年3月发射成功第一颗“实用通信卫星”，即“东二甲”卫星，该星定点于东经87.5° 赤道上空。
- 1988年12月又发射了“东二甲—2”卫星，定点于110.5° E。
- 2006年12月26日，第三代通信卫星东方红四号平台”即“鑫诺2号”发射，卫星质量5000kg，设计寿命15年，可提供22个Ku频段转发器。（但太阳能电池板未打开。）
- 2010年9月发射“鑫诺六号”。
- 2012年7月25日，发射“天链一号03星”中继卫星。



典型卫星通信系统

●静止轨道卫星通信系统：代表是国际海事卫星通信系统（**INMARSAT**）、广播通信卫星系统、国际通信卫星系统和大量军用通信卫星（**WGS**，军事星）；

●中、低轨卫星移动通信系统。代表是铱星（**Iridium**）系统和全球星（**Globalstar**）系统。

a. 海事卫星

海事卫星（**Maritime Satellite**）是一个国际通信卫星系统，现为第四代卫星。**1979**年国际海事卫星组织（**International Maritime Satellite Organization**，简称**Inmarsat**）正式成立。国际海事卫星组织拥有和经营的全球卫星网络被全世界的服务供应商所使用，提供海上、陆地和空中全面的移动通信服务；同时满足全球海上遇险与安全系统（**GMDSS**）的要求，提供公益性的海上遇险安全通信服务。

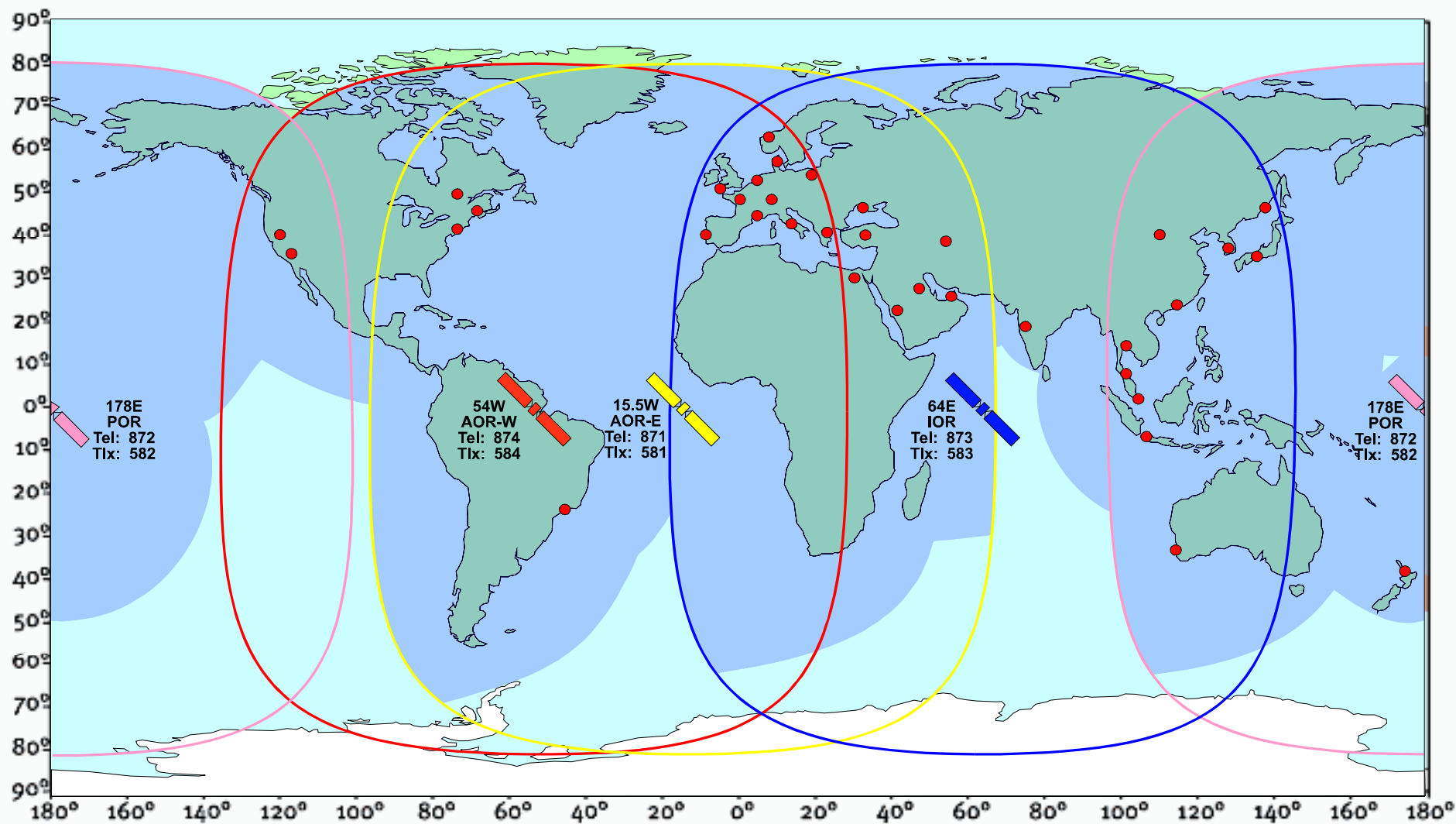
海事卫星系统的空间段为**L波段（1.6G/1.5GHz）**，**34MHz**带宽和**C波段**转发器，分别用于移动通信（手机）、船站通信（**1m**天线）和岸站通信（**13m**天线）。

通信速率语音**4.8kbps**，数据最高**492kbps**。**DAMA**分配。

业务系统分为**A、B、C、M、Mini-M、M4、F**标准。

海事卫星覆盖模式示意图 (3代卫星)

GLOBAL AREA NETWORK WORLDWIDE COVERAGE MAP



注：①图中实线范围为全球波束

②蓝色阴影区为点波束

③小红圈为地面站

b. WGS

宽带全球卫星（**Wideband Global Satellite, WGS**）系统是美国一种高容量军用卫星通信系统。**WGS**将**DSCS**(国防卫星通信系统)和**GBS**(全球广播服务)的功能合二为一。

WGS空间部分目前由太平洋、印度洋和大西洋地区上空的**3**颗对地静止轨道卫星组成，**3**颗卫星分别定点运行在赤道上空**60° E**、**175° E**和**12° W**的对地静止轨道。

WGS是美军在轨服役通信卫星中性能最高的，目前正在规划购买第10颗。

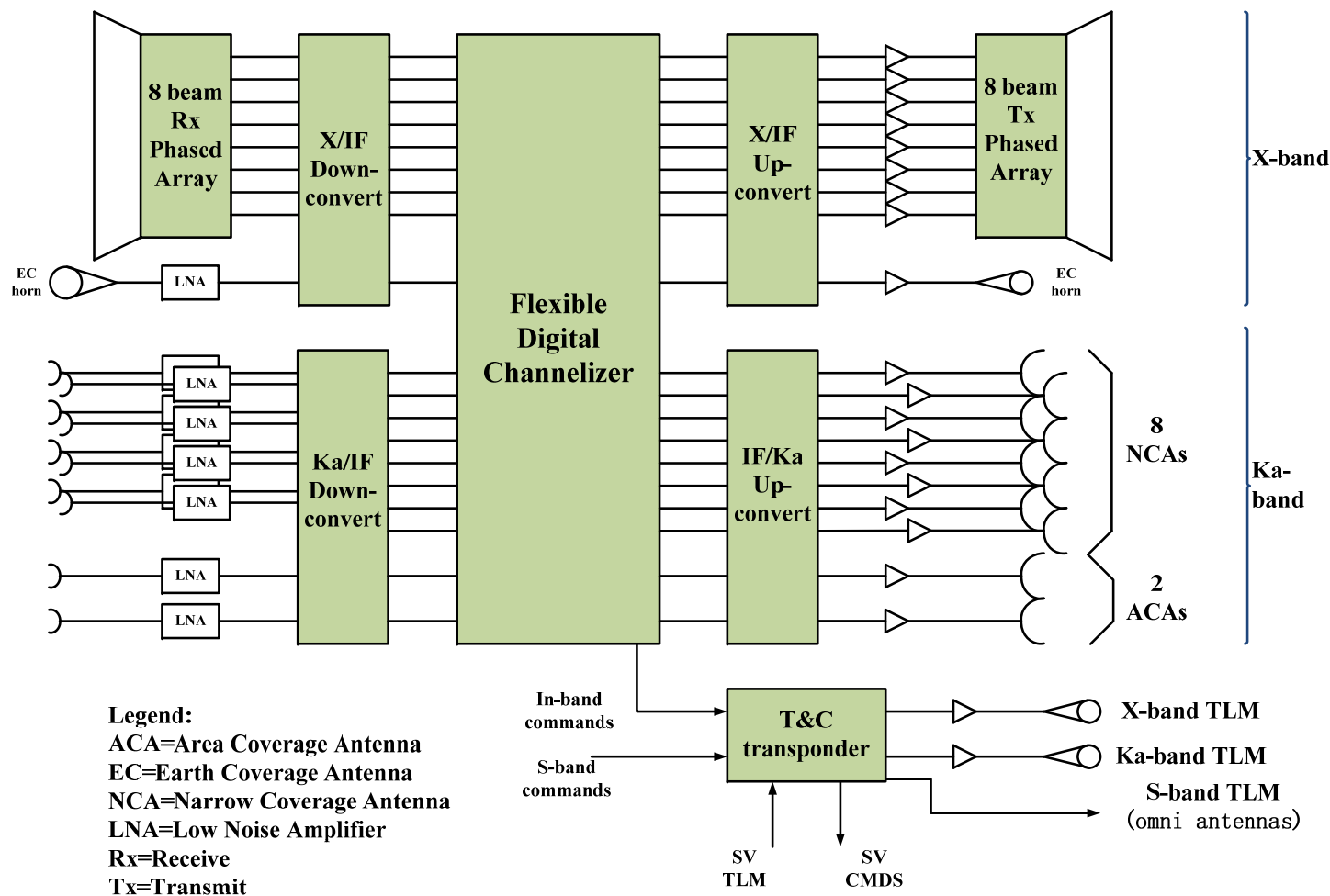
WGS能够提供机载、车载和便捷终端，与现有的控制系统和终端是兼容的

WGS具有**X**频段相控阵天线系统，该天线具有赋形和改变覆盖区域大小的能力，能提供覆盖区域的形成及调整能力。它的选择性波束可以进行电控制通信，这样就可以利用电控制与地球上的不同地点进行通信。

WGS参数

项 目	数 据
类型	大容量军用通信卫星
运营者	美国空军
主承包商	波音公司
天线	2副X频段相控阵天线和10副Ka频段抛物面天线
推进	4台XIPS-125离子发动机
容量	39个125MHz信道
设计寿命（年）	≥12
质量（kg）	5443（发射质量） 4536（在轨质量）
功率（kW）	13
每颗卫星成本	大约3亿美元
工作频段（GHz）	7.25~7.75 空间-地面 7.90~8.40 地面-空间 20.2~21.2 空间-地面 30.0~31.0 地面-空间
每颗卫星的波束种类和数量	10个Ka频段波束（10副装有万向接头的蝶型卫星天线） 8个X频段波束（8副相控阵天线） 1个X频段地球覆盖波束（喇叭天线）
平台	Boeing 702
轨道	GEO
控制	空间地面链路系统（SGLS）、统一S波段（USB）和自动带内（X和Ka频段）控制
任务	双向X频段和Ka频段战术宽带通信，X频段和Ka频段全球广播业务

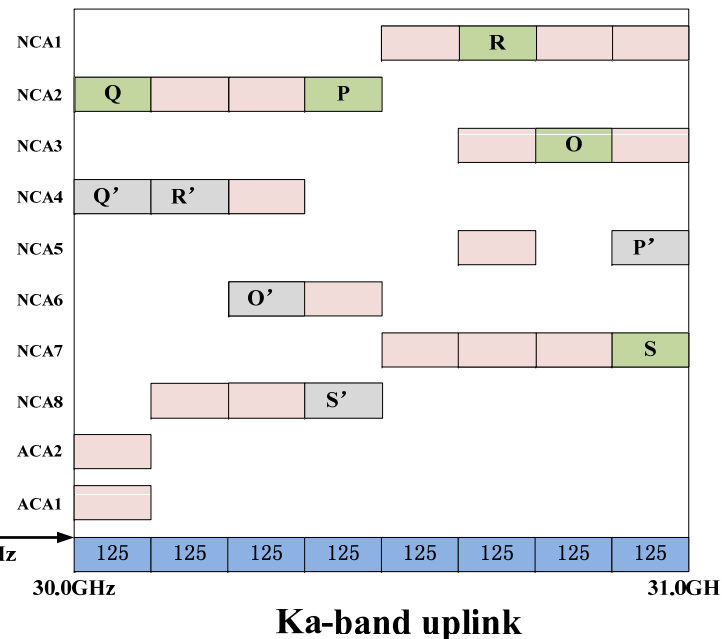
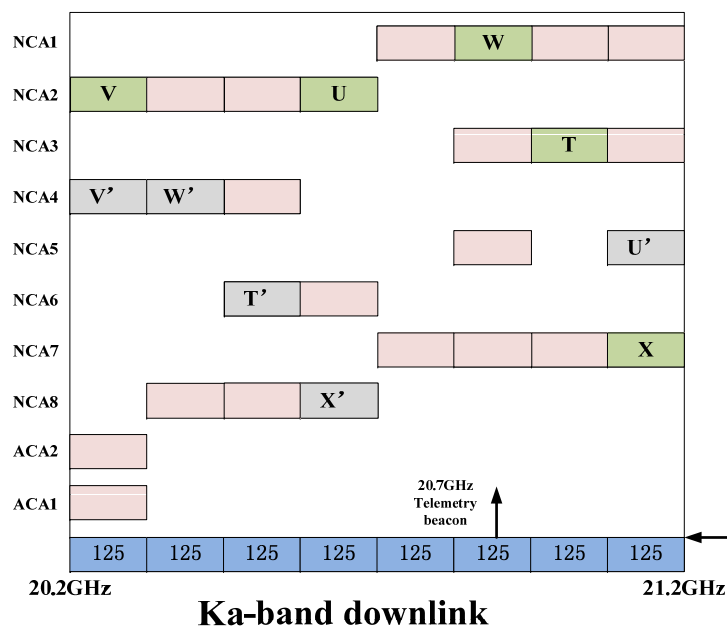
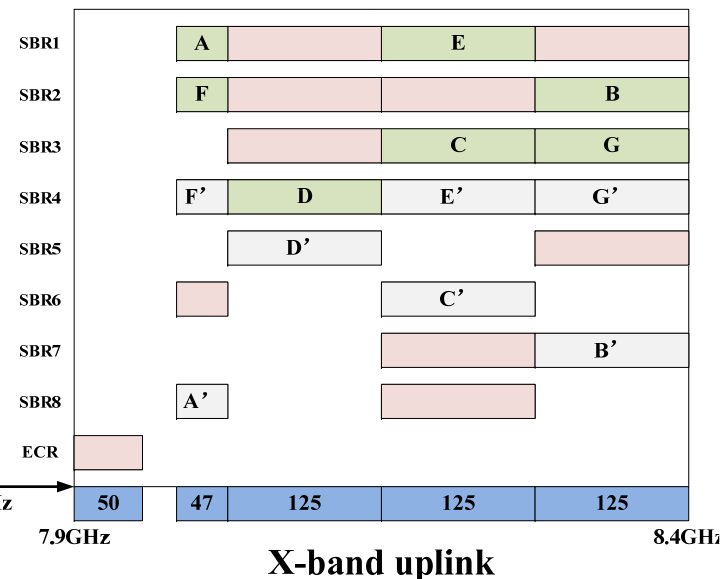
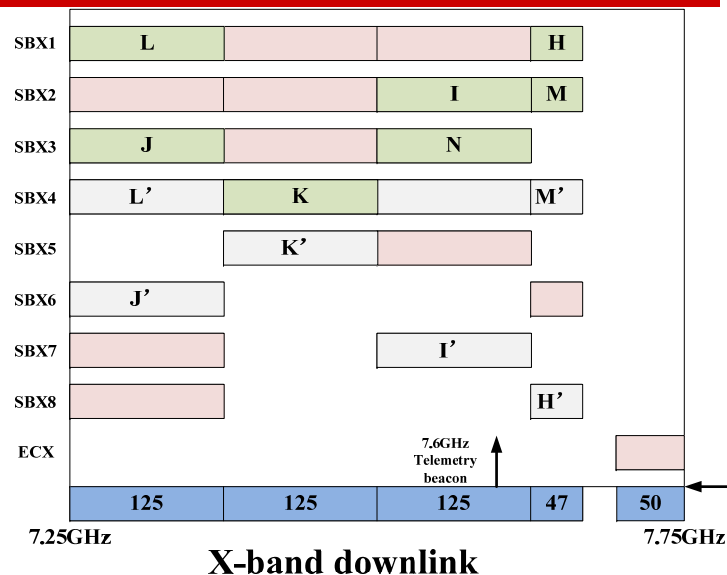
WGS有效载荷



通过**WGS**上独特的数字信道选择器，可以使**X**频段和**Ka**频段相互连接

WGS频段

4.875GHz
的瞬时带宽；
每个转发器
可以分成多个
2.6MHz的子
信道，允许相
邻的子信道进
行组合。



C. 全球星系统Globalstar

● **Globalstar**系统星轨道高度为**1414km**，系统中共**48**颗工作卫星分布在**8**个轨道平面上，工作在**L/S**频段，实现支持手持机的全球覆盖。**Globalstar**系统星上使用一副**16**个点波束的相控阵天线，采用**DS-CDMA/QPSK**/卷积编码通信体制，每颗卫星可提供**2500**条**2.4kb/s**的通信信道。**Globalstar**系统不支持星间链路和星上交换，而是通过地面信关站和地面网络进行连接，因而系统相对简单、造价低，该系统**1999**年开始商业运营。

该系统对现存的本地、长途、公用和专用电信网络是一种延伸、补充和加强，而不是竞争。系统没有星际链路，无需星上处理，系统投资费用低，而且避免了许多技术风险，其运营优于铱星系统。

•D. 铱星系统

●**1987**年提出，**1997—1998**年发射，**2000**年**3**月破产，**2001**年重新服务；在波黑执行任务的美军飞行员每人都配备了一部“铱”手机。

●每个轨道**11**颗星，**6**个轨道，形状像化学元素铱的原子核外的电子轨道而得名（原计划**77**颗星，后论证改为**66**颗）；

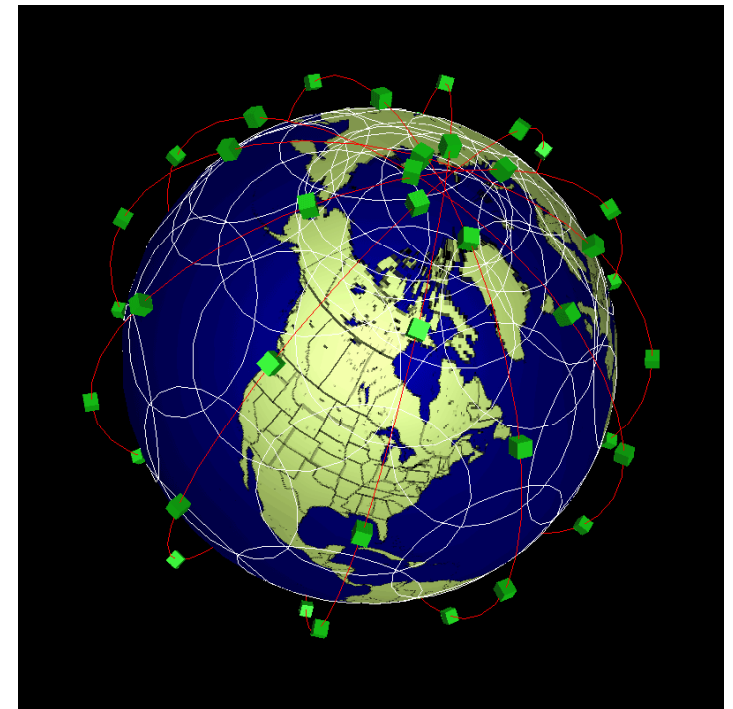
●极地轨道，高度**780km**。

●有星际链路实现全球覆盖，有星上处理；

●使用**3**副相控阵天线，形成**48**个对地覆盖点波束（每副天线**16**个），采用**MF-TDMA/QPSK**/卷积编码技术体制，每颗卫星可提供大于**3000**条**2.4kbps**的通信信道

●优点：轨道低，通信质量好，链路损耗小；手机直接与卫星互联；

●通过关口站与地面通信网连接。



E. 纳卫星(NanoSat)和皮卫星(PicoSat)

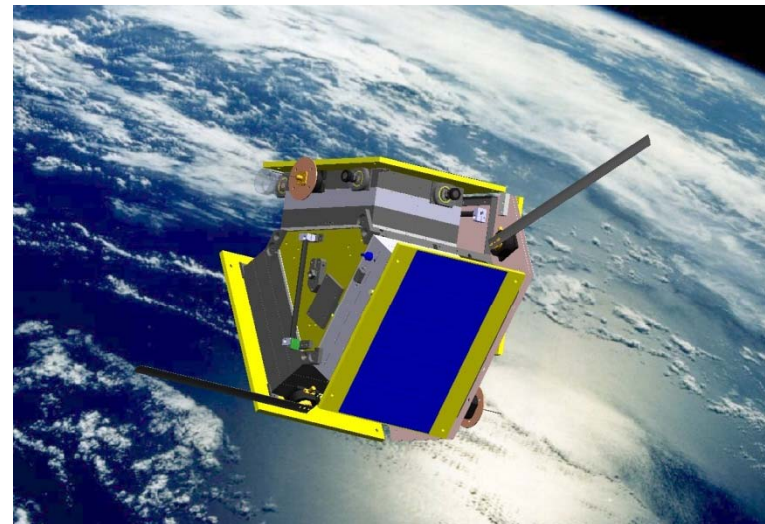
●概念最早是由美国航空航天公司(**Aerospace**)于**1993**年在一份研究报告中首次提出的,它带来了小卫星设计思想上的根本变革.

●纳卫星通常是指重量小于**10**公斤,具有实际使用功能的卫星。

●已经发射的纳型卫星有: 俄罗斯航天研究院的**SPUTNIK—2**卫星; 美国的**Bitsy**卫星, 美国**Arizona**大学的**AUSat**卫星, 美国**Stanford**大学的**PICOSAT**卫星等。

●皮卫星则降低到**1kg**以下。

- 基于微电子、微机电及微光电等技术可将设计实现微小化卫星;
- 微小化降低了发射难度、可实现一箭多星、可通过轨道组合而形成大型卫星、也降低了在轨卫星维护难度;



英国 **Surrey** 大学 **2000**年发射的一颗纳卫星

•F. Milstar

Milstar是美国军用战略卫星。

- 上世纪八十年代初立项，到目前共发展了三代卫星通信系统；
- 为美三军提供世界范围的战略和战术卫星通信，是美国最高优先级的**C³I**计划；
- 1994**年首颗一代星发射，二代星于**99**年到**02**年发射，三代星原计划于**2006**年发射；
- 主要终端设备：车载式**SMART-T**、单信道便携式**SCAMP**、指挥所用**AN/FRC-181**、机载/舰载终端等。

• 主要性能参数

- 工作频率为**EHF**频段，上行**44GHz**，下行**20GHz**，带宽为**2GHz**；
- 星际链路为**60GHz**；
- 同时保留少量**UHF**频段的信道，与老的卫星通信系统兼容；
- 通信速率低速率 $\leq 2.4\text{kb/s}$ ，中速率为**1.544Mb/s**(二代星)。

主要特点：

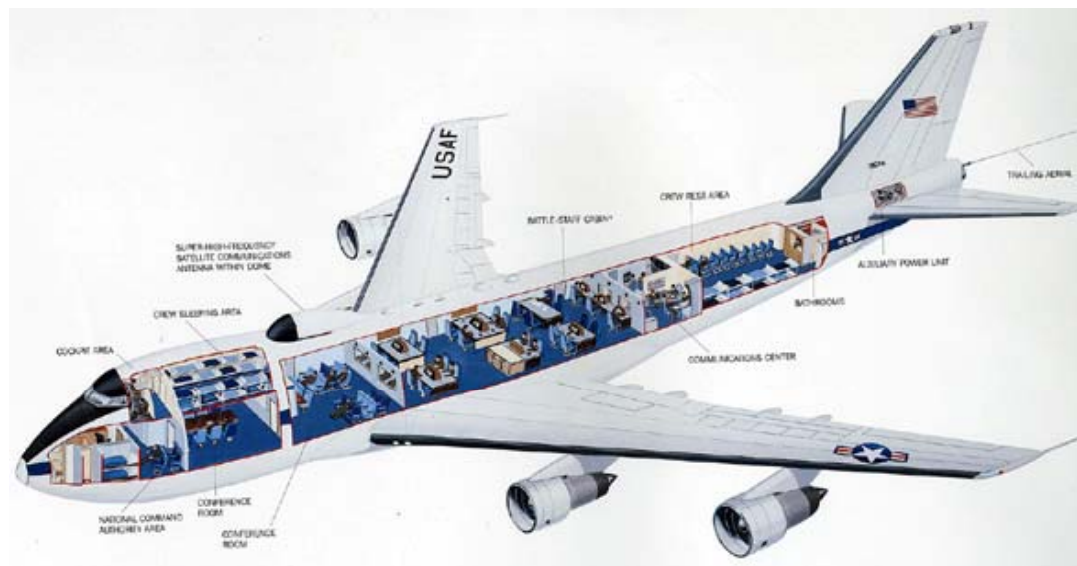
- 具有星上处理能力，地面站天线最小只有十几厘米。
- 有星际链路，减少了全球通信时延，提高了可靠性。
- 采用了大量的抗干扰技术，主要有快跳频技术和自适应天线调零技术。
- 卫星自身机动性能好，抗打击能力强。
- 地面站种类丰富，系统通用性强。

□ UHF波段单兵背负站



RF-3080-AT001 | High Gain UHF SATCOM Antenna

□ 机载站



1、我国通信卫星现状

2、“动中通”

“动中通”卫星通信是指在动载体平台上安装卫星通信天线，当载车高速运动、上下坡、颠簸、转弯条件下，天线伺服控制系统使天线波束始终精确对准卫星，利用地球同步轨道卫星(**GEO**)的**Ku**频段转发器实现移动终端与固定终端、或者移动终端之间的无线通信业务，简称“动中通”。使用**Ku**频段卫星通信系统的接收天线口径可以减少到**0.3~0.8**米，便于伺服控制，此外天线波束宽度也相应地增加，易于跟踪通信卫星。

(1) 天线及跟踪系统主要指标:

- 天线类型: **0.8、1.2、1.5、1.8**米环焦天线
- 工作频段: **Ku**频段
- 天线跟踪范围: 方位不限; 俯仰**20-90**度
- 转台最高转速: $100^{\circ} / s$
- 最高跟踪转速: $60^{\circ} / s$
- 静态对星精度: 0.1°
- 动态跟踪精度: 0.2°
- 初始捕星时间: $\leq 180s$
- 系统遮挡恢复时间: $\leq 1s$ (取决于卫星通信设备)
- 卫星信号遮蔽天线稳定时间: $\geq 60 \text{ min}$

“动中通”系统主要性能

(2) 通信性能

工作频率: **Ku**频段

发送端: **14.0GHz-14.5GHz**

接收端: **12.256GHz-12.75GHz**

信息速率: **2-10Mbps**

业务类型: 语音、数据、图像等。



(3) 使用条件

维持正常通信最大车速:

一级路面 $\leq 120\text{Km} / \text{h}$

二级路面 $\leq 70\text{Km} / \text{h}$

三级路面 $\leq 30\text{Km} / \text{h}$



- ❖ 虽然凭借其广域覆盖特性，卫星在广播业务方面取得了巨大成功，但是由于技术条件和市场需求的限制，在个人通信领域，卫星通信却遭遇了巨大障碍。廉价的地面通信系统的发展如光纤通信系统、蜂窝移动通信系统的蓬勃发展，一下子大大压缩了卫星通信的市场。目前骨干网通信负荷的**80%**以上由光纤网络承担；而地面蜂窝移动通信系统的发展更是如火如荼：继**2G**、**3G**之后，**4G**标准也呼之欲出，并且在一些研究机构已经开始所谓“后**4G**”的研究。
- ❖ 在民用通信领域，卫星通信只在广播电视电视方面占有优势，其它方面为地面通信网的补充和安全通信备份。
- ❖ 军事通信中，卫星通信占优势；
- ❖ 卫星应用十分广泛：定位、侦察、资源、气象.....

❖ 地面无线通信网络存在一些问题：

- 蜂窝不断分裂，基站布设问题；
- 低人口密度地区的昂贵基础设施投资；
- 空中、远洋及特殊场合通信受限；
- 分组数据传输经多跳网络、复杂度高，服务质量难以保证

❖ 卫星通信的曙光

- 战场单兵个人通信系统；
- 民用个人通信领域；
- 无线宽带多媒体应用；
- 全球无缝覆盖等；

•通信卫星进展

(1) . 波束: 全球波束—多点波束—转发器跳转—**SSTDMA**—全球网络。

(2) . 多址及调制:
FDMA/FM, SCPC/FM, TDMA/PSK, CDMA/PSK, 星上处理

(3) . 业务: 干线电话, **L**波段移动, 国内、区域电话, 直接广播, **VSAT**, 数字广播, 宽带, 多媒体。例如**IP star**, 容量**45Gbps**。

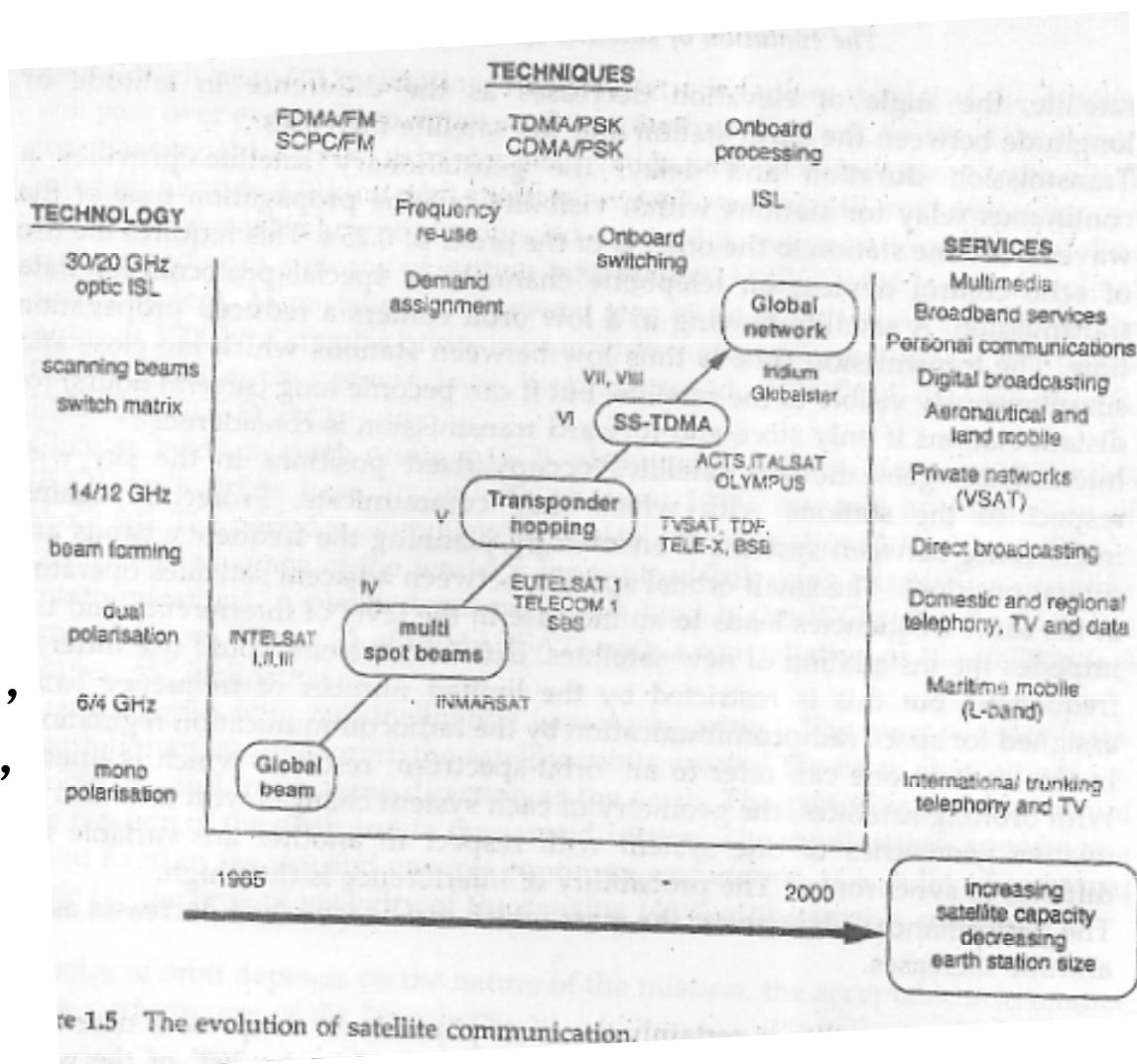


图1.5

(4) . 极化与波段: 单极化, **6G/4G**, 双极化, 波束成型, **14G/12G**, 扫描波束开关矩阵, **30/20G**

(5) . 技术: 频率复用, 按需分配, 星上交换

(6) . 各国进展: 美国、欧洲、日本

- ◆ 通信卫星向大小两级发展；大平台、高功率、大天线、微卫星。
- ◆ 向卫星移动方向发展；实现真正全球覆盖和抢险救灾应急通信。
- ◆ 与互联网技术结合发展；采用**IP**等交换技术和协议。
- ◆ 宽带化方向发展；
- ◆ 向更高频段发展：如光通信；
- ◆ 卫星直播到户：**DVB**广播、电视和网络下载。
- ◆ 卫星群：单颗卫星用多颗卫星群代替，减少星座需求，增大容量；
- ◆ 采用**3G**等地面通信网技术；
- ◆ 星地通信融合，异构网络；
- ◆ 多波束：几十~几百点波束，增大容量和天线增益；
- ◆ 星上处理、抗干扰。

卫星轨道

卫星轨道：卫星运行轨迹，为椭圆型（圆形）。

卫星的轨道由开普勒三大定律和牛顿力学定理来描述。

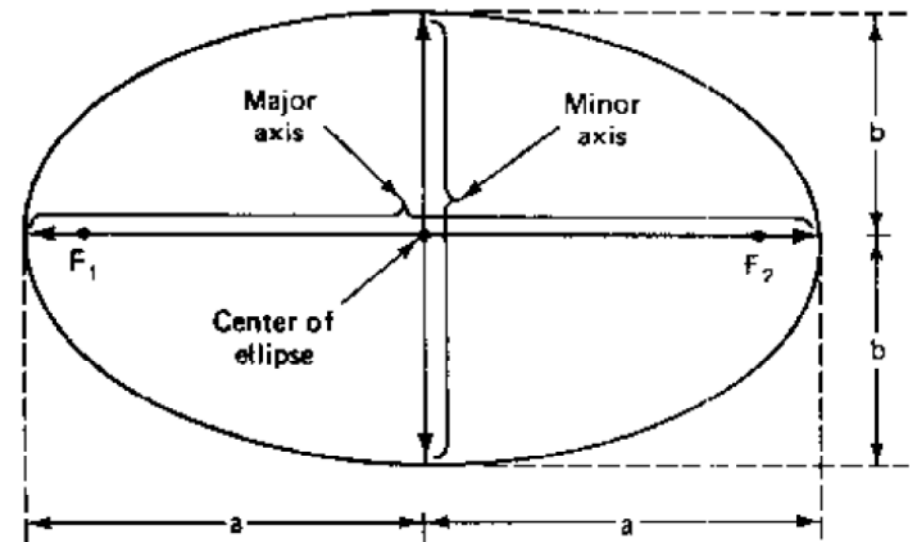
开普勒三大定理：轨道定理、面积定理、周期定理

开普勒三定律

- **第一定律：**地球是该椭圆的其中一个焦点。偏心率和长半轴是描述卫星围绕地球旋转的两个重要参数。

长短半轴分别为 a 和 b ，
偏心率为：

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$



第二定律：对于相同的时间间隔，卫星在其以质心为焦点的轨道面内扫过相同的面积。即卫星离地球越近，速度越快。

■ 第三定律

卫星运行周期的平方与它到地心距离的平均值的立方成正比，即

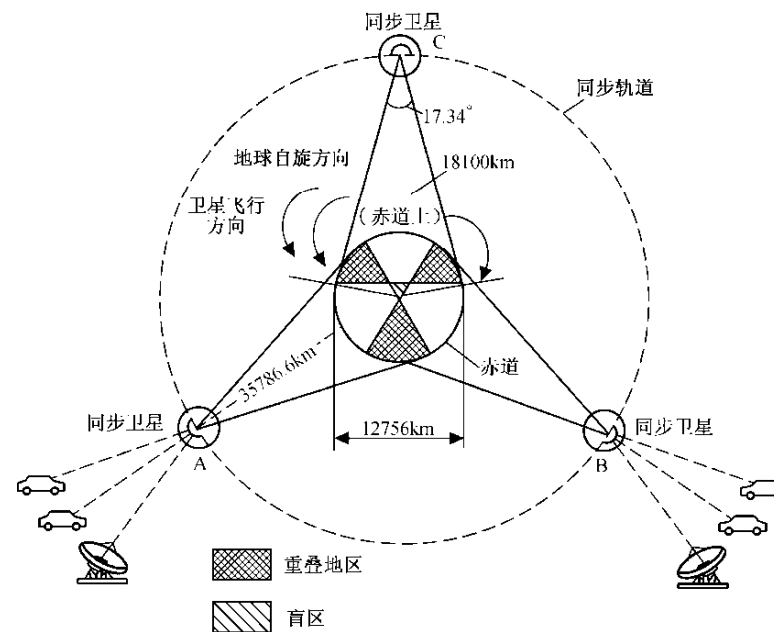
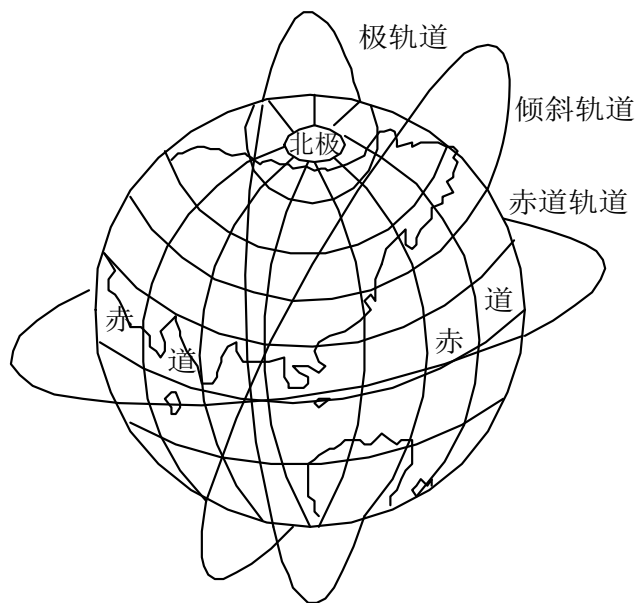
$$P_s = 1.659 \times 10^{-4} (6378 + h)^{3/2}$$

其中， P_s 为卫星运行周期，单位min； h 为卫星离地面的平均高度，单位km（地球半径6378km）

即：卫星轨道越低，周期越短。

卫星轨道

- 从轨道形状分：圆轨道和椭圆轨道。
- 从卫星轨道与地球赤道的夹角分：倾角等于 0° 的赤道轨道；倾角等于 90° 的极轨道；倾角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的倾斜轨道。
- 按轨道高度分：低轨道，轨道高度小于5000km，运行周期为2~4小时；中轨道，高度在5000~20000km之间，运行周期4~12小时；高轨道，高度大于20000km，运行周期12~24小时。



(1) 低轨道卫星, **LEO(low earth orbit)**

- 高度范围**500~1500km**, 轨道周期约为**1.5~2**小时。
- 用户间单跳通信的信号传播延迟一般小于**10ms**。
- 必须解决快速移动带来的多普勒效应。
- 最大卫星可视时间**20**分钟。
- 信号传播距离短, 链路损耗少, 对用户终端的发射功率要求不高。

(2) 中轨道卫星 **MEO(medium earth orbit)**

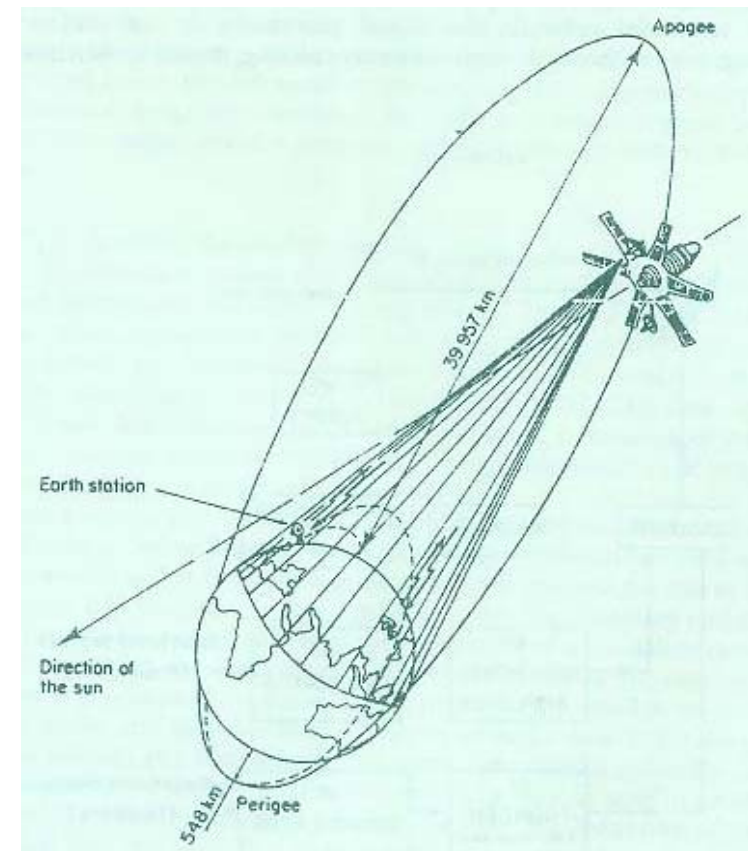
- 轨道高度在**8000km~18000km**左右, 轨道周期约为**5-10**小时。
- 用户间单跳通信的信号传播延迟一般小于**50ms**。
- 最大卫星可视时间一般为几小时。

不同高度轨道的卫星特点

(3) 静止轨道卫星，地球同步轨道卫星，**GEO** (**geostationary earth orbit**)

- 轨道高度约为**36000km**，围绕地球旋转周期为**24**小时。
- 用户间单跳通信的信号传播延迟一般为**250ms**。
- 覆盖区域大，保持不变。

特别轨道：轨道平面与赤道平面夹角为**64**度倾角，此轨道稳定。



地球同步卫星的优点：

1. 卫星相对地球固定，便于对星，多普勒频移可忽略。
2. 卫星跟踪简单。
3. 大覆盖区域。

地球同步卫星存在下列问题：

1. 信号衰减大。
2. 静止卫星的发射与控制技术比较复杂。
3. 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。
4. 存在日蚀和日凌中断现象。
5. 有较大的信号传输时延和回波干扰。

轨道选择

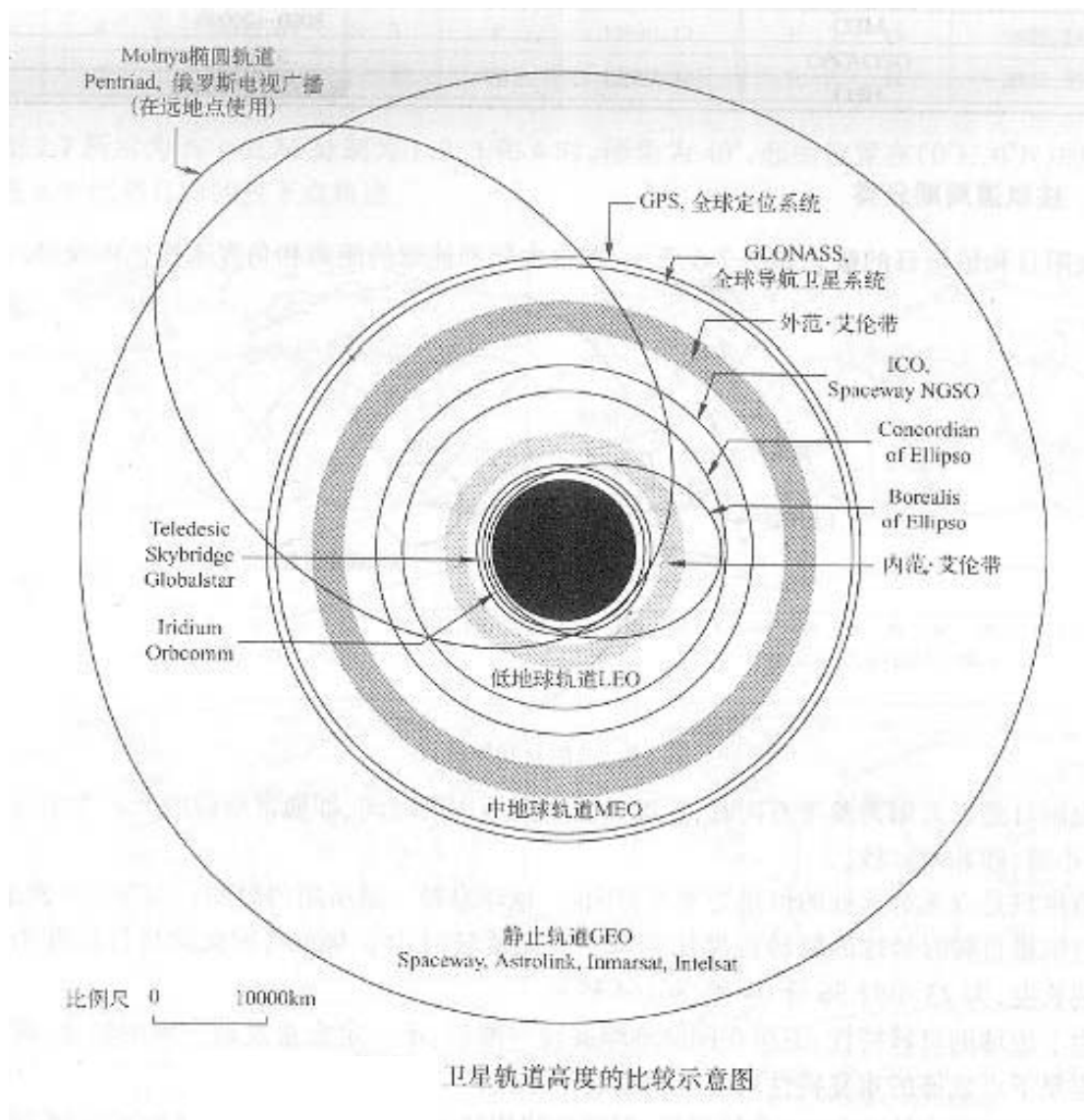
轨道高度选择

- ❖ 范仑带是空间**2000~8000km**的恶劣电辐射环境，它由高度分别为**1500~5000 km**和**13000~20000km**的内外两层组成，具有强电磁辐射。其中的 α 粒子、质子和高能粒子对电路破坏性大。
- ❖ 当高度低于**700km**时大气阻力对卫星运动的影响较大。
- ❖ 通常选择卫星高度的**3**个窗口是：**700~1500km**；**5000~13000km**附近；**20000 km**以上。

选择轨道的因素：

1. 高度：卫星越高、覆盖面积越大、衰越大。
2. 仰角：地球站天线与地平面夹角，**0°~70°**之间。
3. 传播时间：传播距离/光速。
4. 干扰：同频和邻道干扰。
5. 运载火箭性能：火箭技术与可靠性。

轨道高度



1. 卫星距离计算：由卫星和地球站的经纬度可以计算。

$$d = \sqrt{R_e^2 + (h + R_e)^2 - 2R_e(h + R_e)\cos\theta_e\cos(\varphi_s - \varphi_e)}$$

这里**d**为卫星与地球站距离。**h**为卫星高度。**Re**为地球半径。

这里 (φ_e, θ_e) 和 (φ_s, θ_s) 分别为地球站和静止卫星星下点的经纬度。

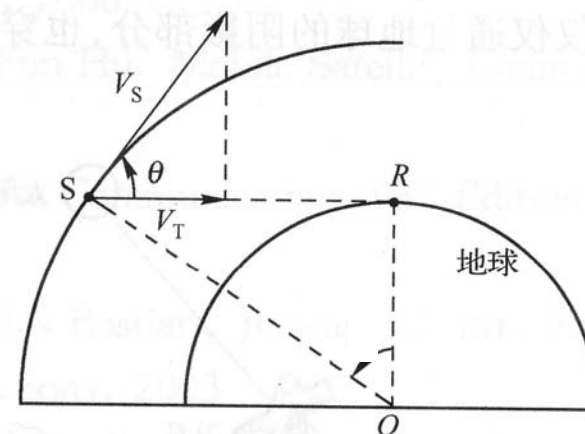
2. 卫星方位角A**、仰角**E**计算：**仰角为地平面与观测点和卫星连线之间夹角；方位角为地平面的北极与观测点、地心和卫星所决定的平面之间的夹角。

$$A = \arctg\left(\frac{\tg(\varphi_s - \varphi_e)}{\sin\theta_e}\right) \quad \mathbf{A > 0} \text{表示南偏东}$$

$$E = \arctg \frac{\cos\theta_e\cos(\varphi_s - \varphi_e) - \frac{R_e}{R_e + h}}{\sqrt{1 - [\cos\theta_e\cos(\varphi_s - \varphi_e)]^2}}$$

3. 多普勒效应:卫星运动时, 卫星到地球某点的距离不断变化, 这样就会产生多普勒效应。 V 为卫星速度, θ 为观测点和卫星之间连线与卫星运行方向的夹角。

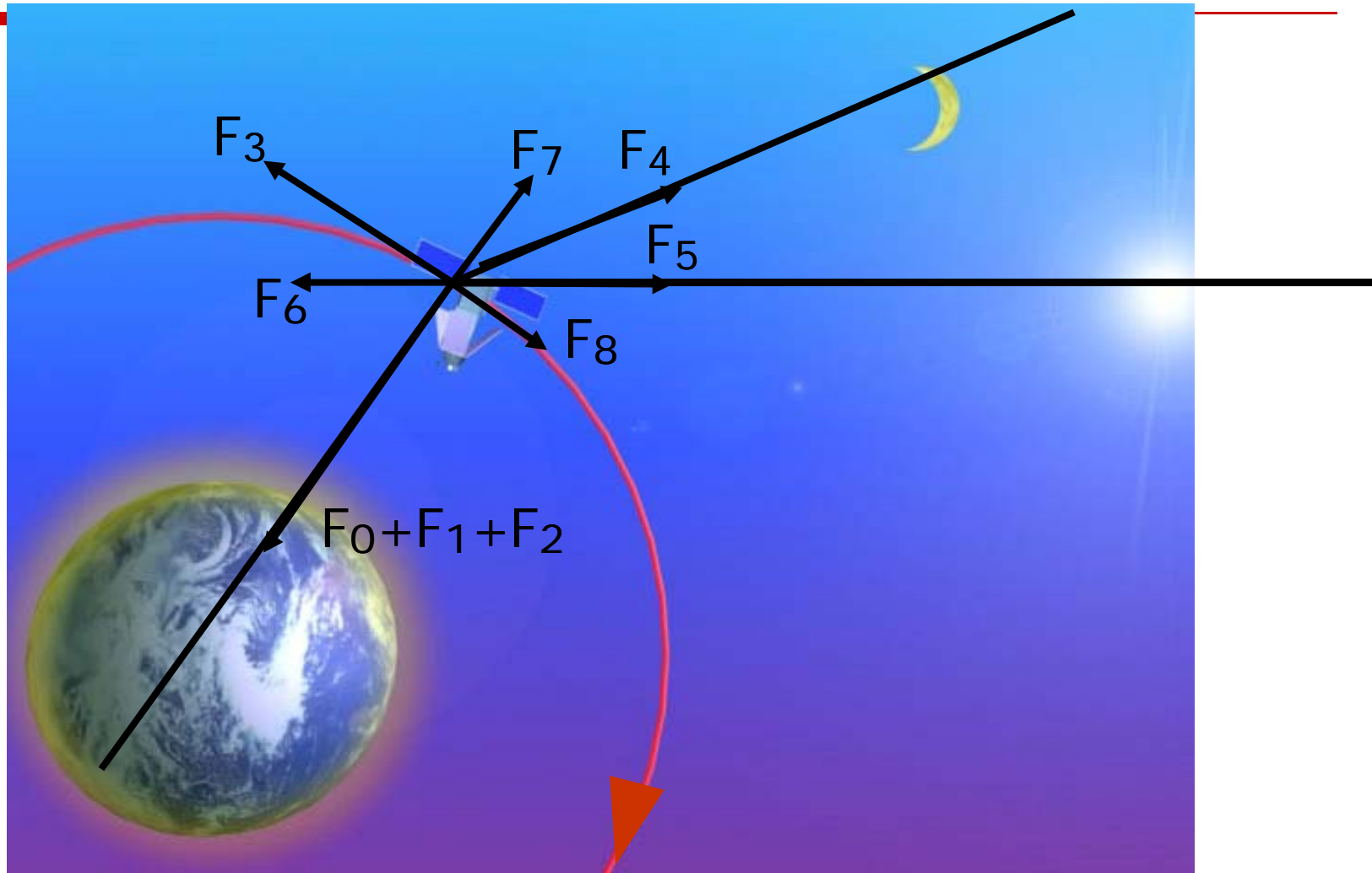
$$\Delta f = \frac{f}{c} V \cos \theta$$



空间几何关系

- 4. 日蚀:** 卫星进入地球或月亮阴影区。
- 5. 日凌:** 地球站天线对准太阳。
- 6. 轨道摄动:** 卫星受到摄动力影响。包括地球不规则引力, 太阳与月亮引力, 太阳辐射压力, 大气阻力和发动机推力。
- 7. 卫星轨道保持:** 卫星轨道发生变化时, 就要进行轨道修正。

轨道摄动--影响航天器运动的各种作用力



F_0 : 地心引力

F_1 : 地球非球形引力

F_2 : 潮汐力

F_3 : 大气阻力

F_4 : 月球引力

F_5 : 太阳引力

F_6 : 太阳光压力

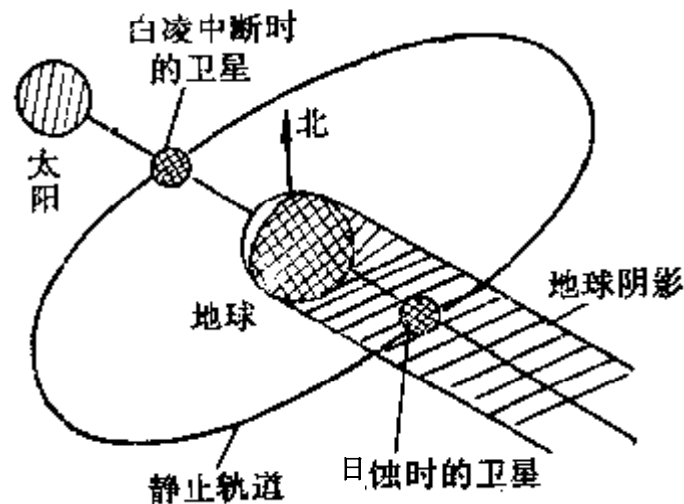
F_7 : 地球红外辐射和反照

F_8 : 航天器姿态控制力

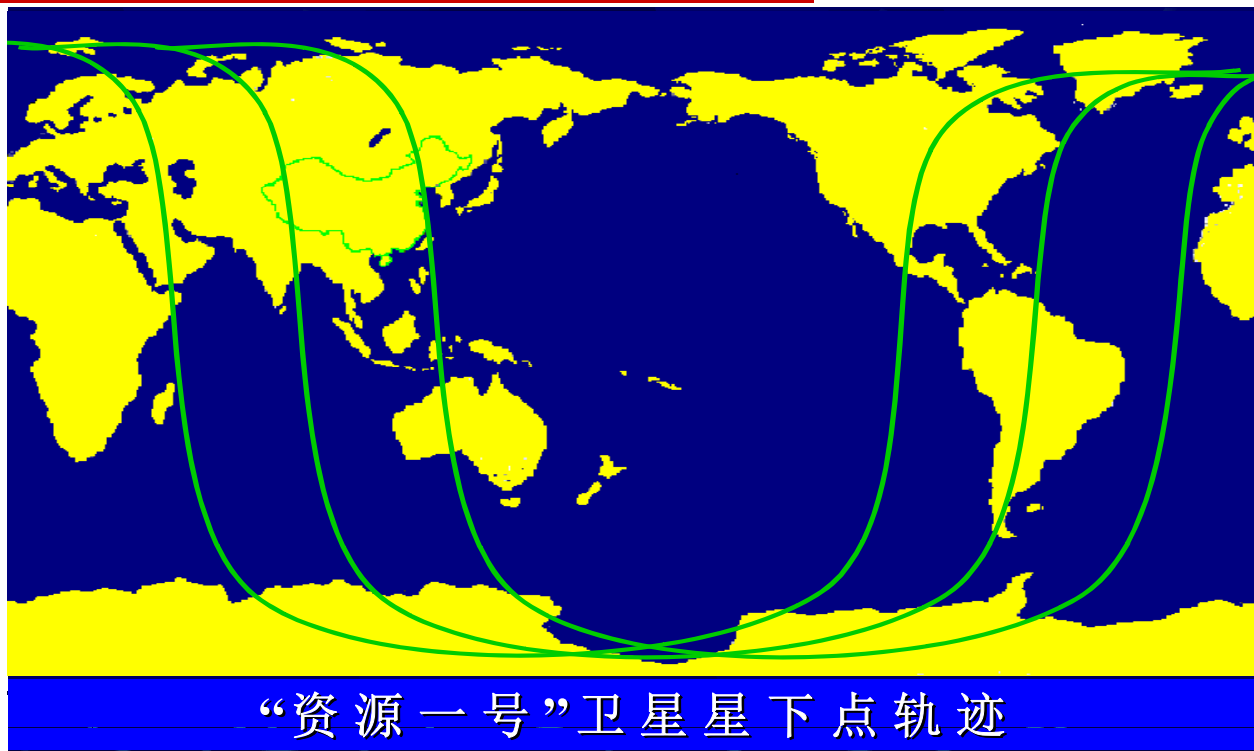
日蚀和日凌

日蚀：当地球的阴影将卫星遮挡，使得卫星上太阳能电池不能工作，卫星的工作能源必须由电池供给，导致功率不足。由于白天卫星的通信容量大，因此卫星的日蚀不希望在白天发生。

日凌：当卫星处于地球和太阳之间，并处于一条直线上时，地球站天线在对准卫星的同时，也对准了太阳，这时太阳处于地球站天线的波束内，此时的太阳就像一个极大的噪声源，完全淹没了卫星的信号，通信中断称为日凌中断，一般情况下最大中断时间约为**10min**。

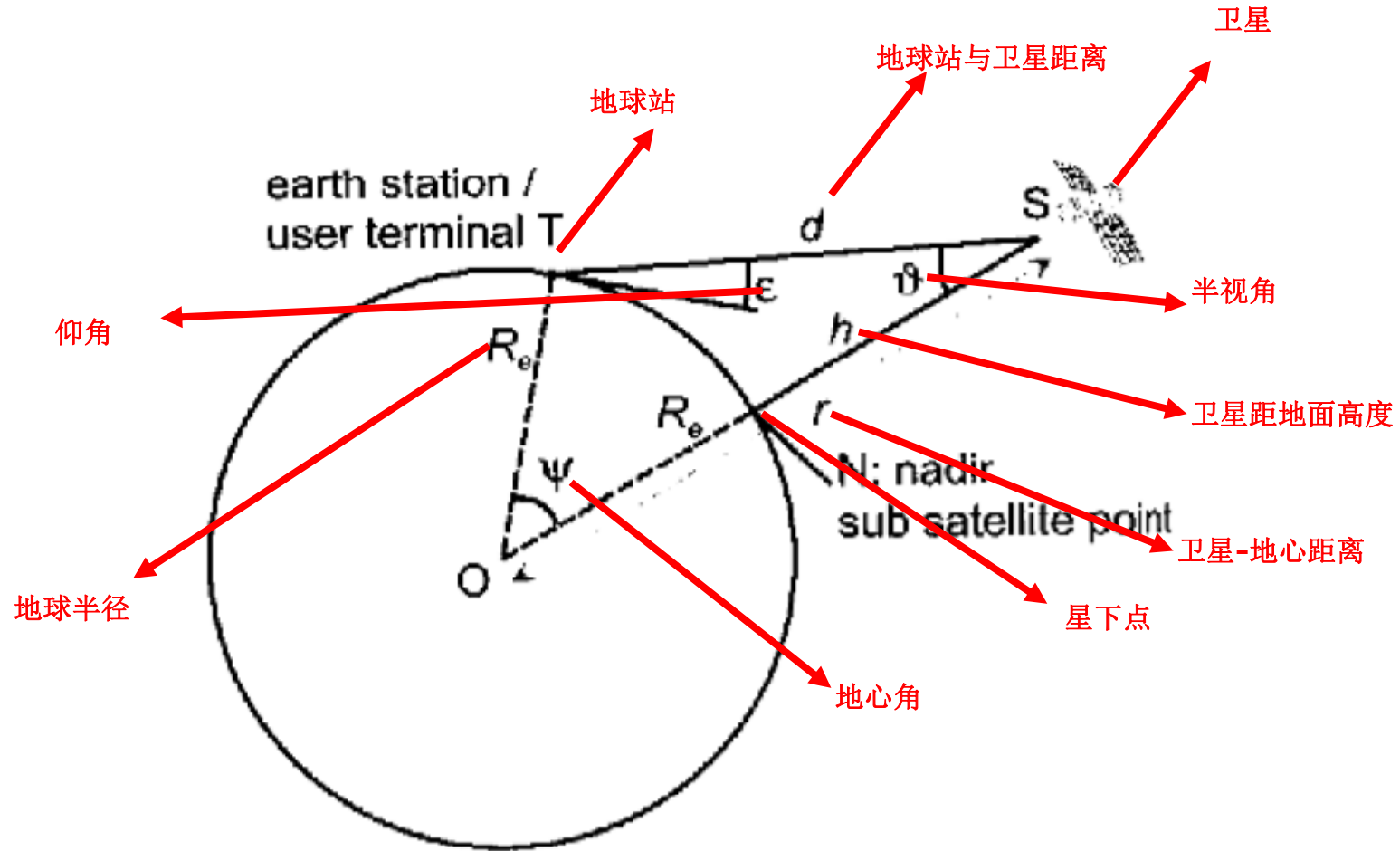


日凌和日蚀示意图

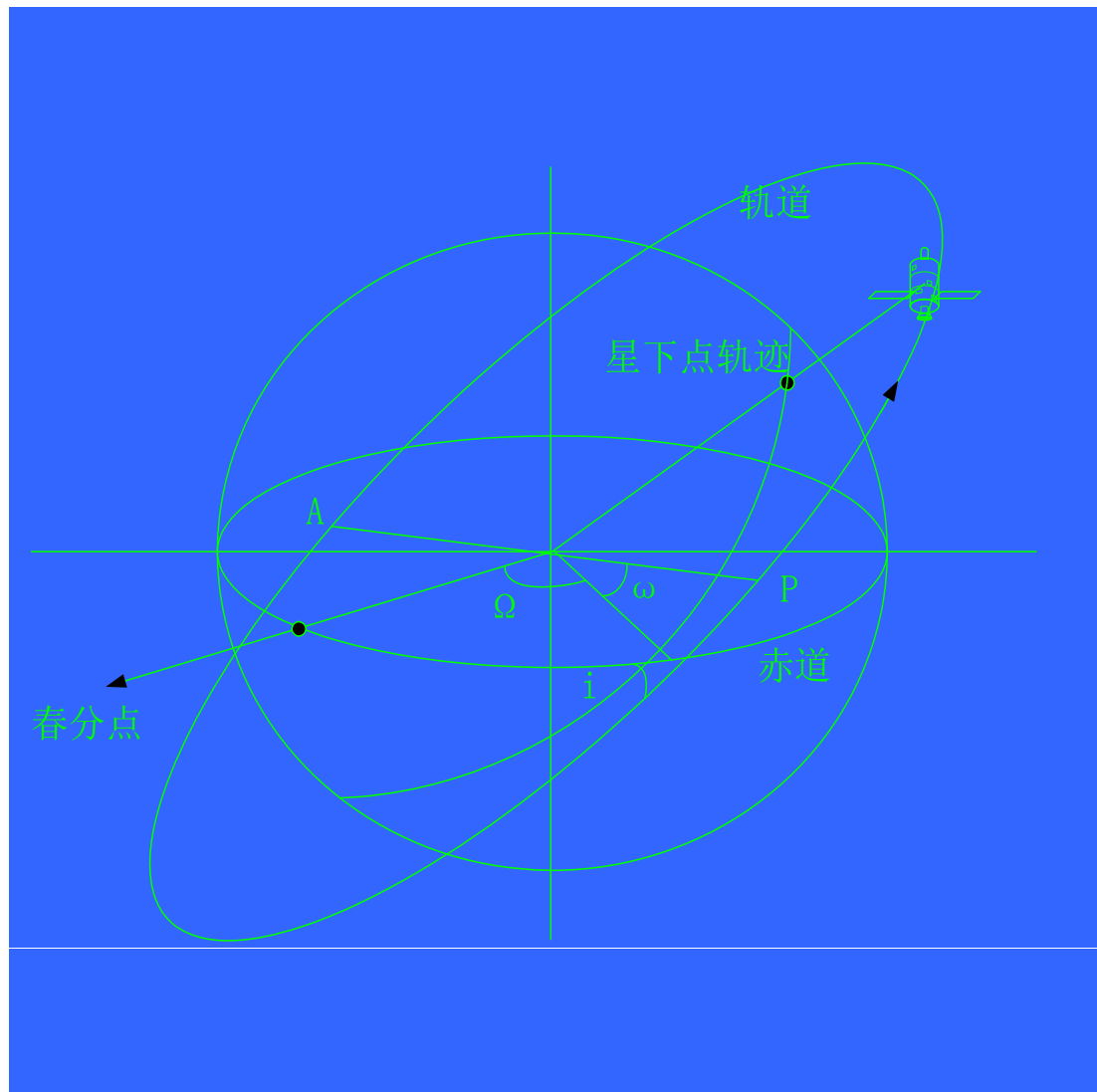
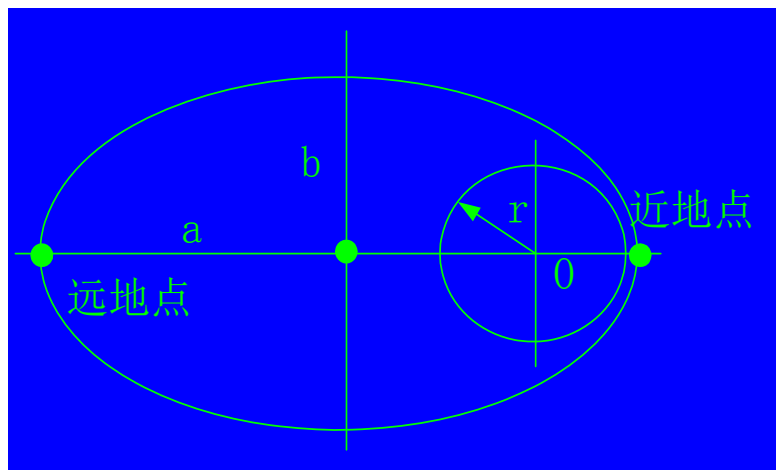


星下点轨迹动画[卫星在轨.rm](#)

□ 卫星和地面终端的几何关系



椭圆轨道及轨道位置



几个概念

- 经度**：从北极到南极点与赤道平面垂直的平面为地球上圆圈为经度线，以伦敦的格林尼治天文台为经度起点，向东为东经，共**180**度，向西为西经。
- 纬度**：平行与赤道平面的地球上圆圈为纬度线，赤道为**0**度。向北为北纬，共**90**度，向南为南纬，也是**90**度。
- 子午线**：即经线（子为北，午为南），**0**度经线为本初子午线。
- 春分点**：假设太阳绕地球运行，则太阳从南半球向北半球过渡时，穿过地球赤道面的交点。即太阳直射赤道的那一刻。
- 倾角**：卫星轨道平面与地球赤道平面的夹角。
- 升交点**：卫星从南半球向北半球运动穿过赤道面的点。
- 升交点赤经**：从春分点到地心的连线与从升交点到地心的连线夹角。显然这是包含春分点的子午面与包含升交点的子午面的夹角。
- 真近地角**：近地点、地心和卫星夹角；**偏近地角**：近地点、中点和卫星夹角；
- 平均近地角**：从近地点开始,卫星以平均角速度转过的角度。
- 近地点幅角**：升交点到地心连线与近地点到地心连线夹角。

轨道确定

地球卫星轨道**6**要素：通信卫星轨道在空间位置由半长轴 **a** , 偏心率 **e** , 倾角 **i** , 升交点赤经 **Ω** , 近地点幅角 **ω** 和近地点**6**个参数确定。

1、形状参数：半长轴和偏心率。

从由半长轴 **a** 和离心率 **e** 可以确定椭圆形状。

2、空间中轨道平面位置参数：倾角 **i 和升交点赤经 **Ω** 。**一个平面由它与另一个平面的交线和夹角确定。

3、轨道位置参数：近地点幅角 **ω 。**决定轨道在轨道平面上位置，即长轴方向。

4、卫星位置参数：真近地角或偏近地角或平均近地角。决定卫星在轨道中位置。

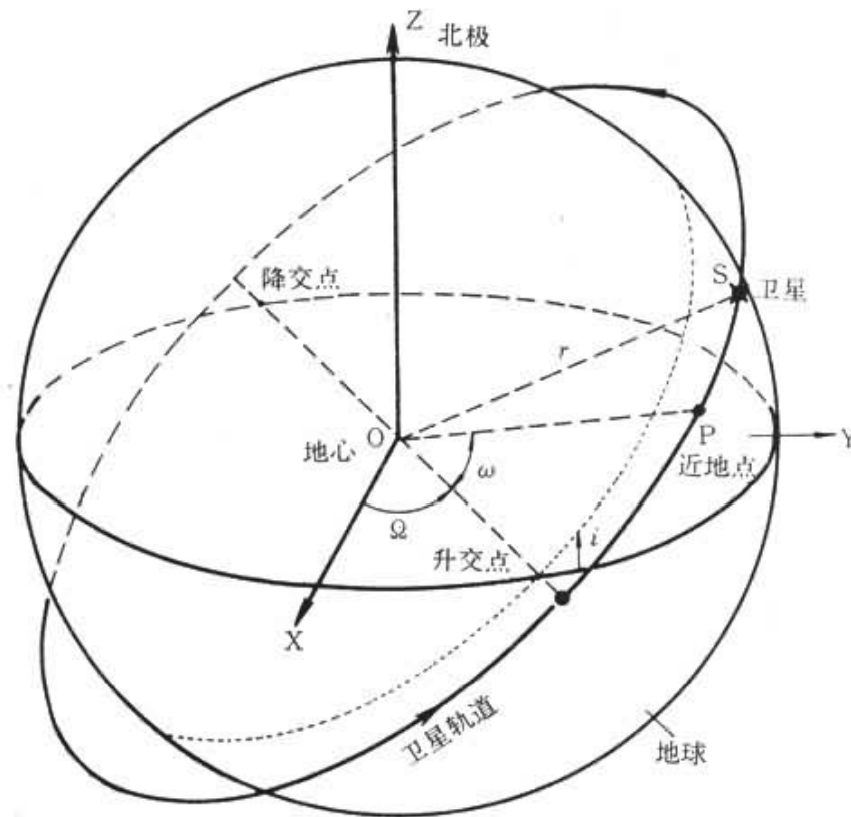


图2 轨道要素的空间关系

□ 地球固定坐标系

原点为地球质心，**XY**平面为赤道平面，**X**轴指向**0**度经度方向，**Y**轴指向东经**90**度方向，**Z**轴指向北极。（这时**X**、**Y**轴方向随地球旋转）

□ 地面水平坐标系

在观察点水平面上，原点为观测点，**X**轴指向正南方向，**Y**轴指向正东度方向，**Z**轴指向天顶。

卫星通信频段

卫星通信频段（微波）

频段	范围（GHz）	频段	范围（GHz）
UHF	0.3~1.12	Ku	12.4~18
L	1.12~2.6	K	18~26.5
S	2.6~3.95	Ka	26.5~40
C	3.95~8.2	毫米波	40~300
X	8.2~12.4		

频率分配

ITU把世界分成三个区域：

- 区域**1**：欧洲，非洲，中东地区和前苏联的一些国家；
- 区域**2**：美洲；
- 区域**3**：除了中东地区的亚洲地区和前苏联的一些国家，以及大洋洲。

卫星通信频段

波长	10 ⁵ km	10 ⁵ m	10 ⁴ m	3~10 ³ m	10 ³ m	200 m	100 m	50 m	10 m	1 m	30 cm	10 cm	1 cm	1 mm
	长波			中波	中短波	短波	超短波	微波						
	ULF	ELF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF				
频率 [Hz]	3	3 k	30 k	300 k	3 M	30 M	300 M	1 G	3 G	30 G	300 G	3 T		

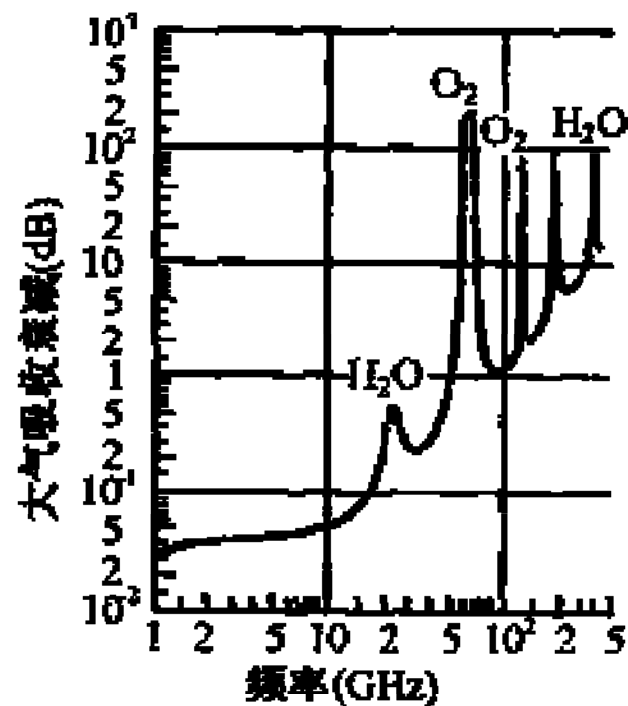
频率 [GHz]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	8.0	10.0	12.4	18.0	26.5	30.0
原有的称呼	L	S	C	X	Ku	Ka					

ULF : 超低频
VLF : 甚低频
MF : 中频
VHF : 甚高频
SHF : 超高频

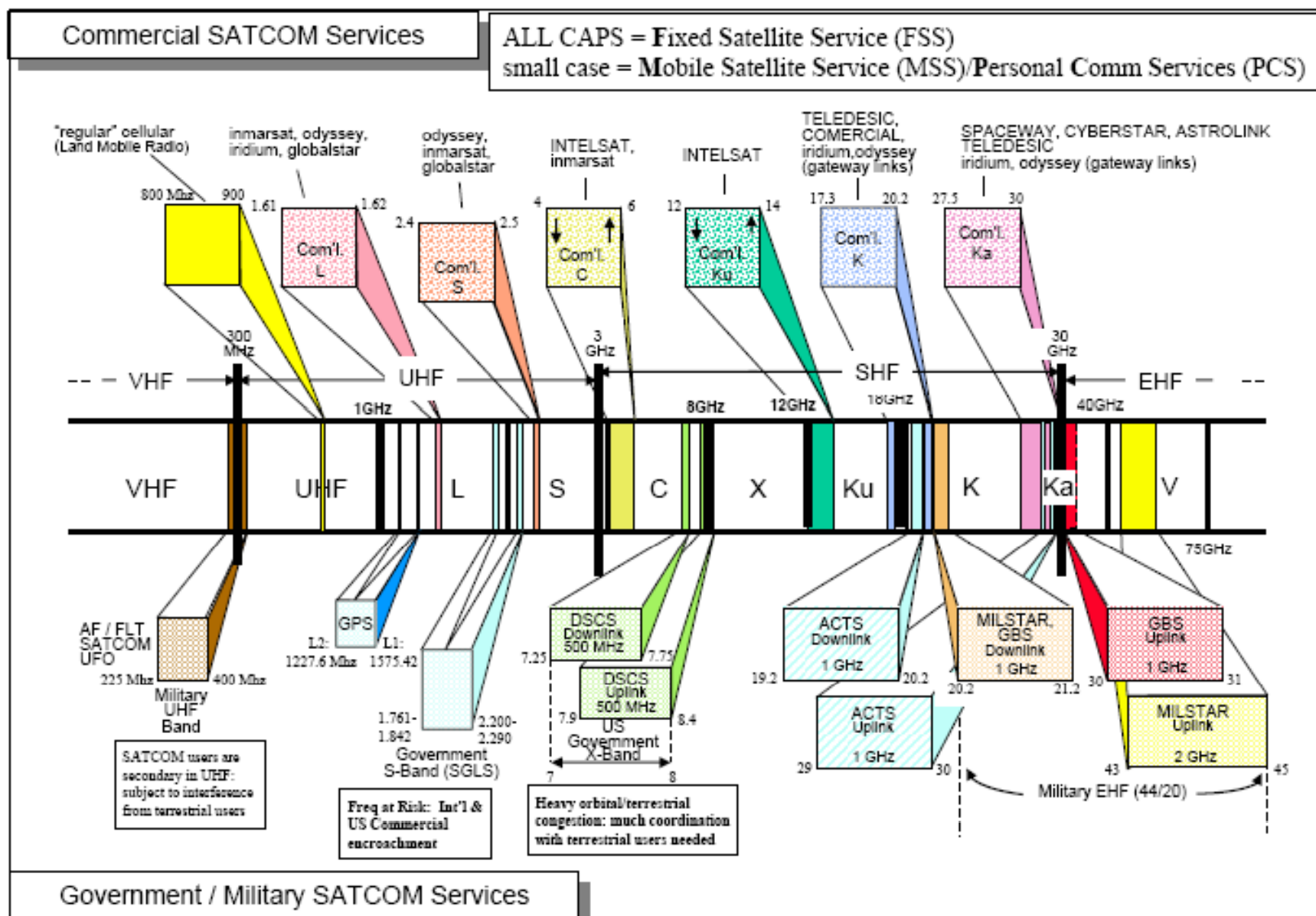
ELF : 极低频
LF : 低频
HF : 高频
UHF : 超高频
EHF : 极高频

卫星通信系统的频率分配

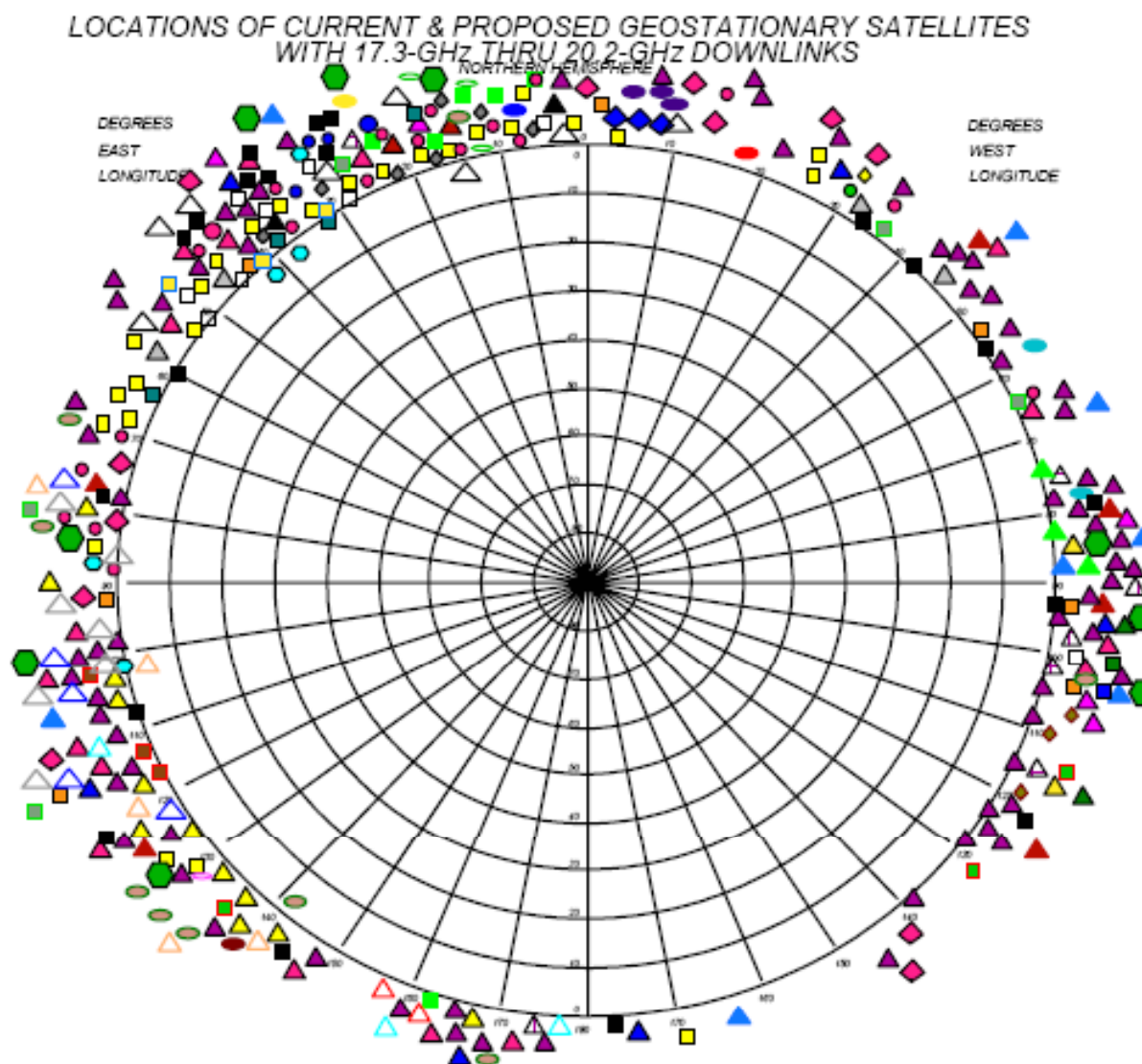
- 卫星通信系统通常使用较高的频率，天线才能有效地进行电磁波的辐射，同时有利于传输较高的信息速率。但电磁波在大气传输中的损耗与频率有关，下图是晴天大气吸收所致的附加损耗。
- 在雨天或有雾的天气，雨滴和雾对较高频率的电磁波会产生散射和吸收作用，带来更大的损耗，称为雨衰。频率越高，雨衰越严重。
- 综合大气吸收和雨衰影响，可知：
 - 在**10GHz**以下，损耗较小且平坦；
 - 频率超过**12GHz**，损耗上升很快；损耗存在若干极大点，使得**60GHz**以上频率不适合星地传送。



美军通信卫星频段



下行链路为17.3GHz~20.2GHz GEO卫星分布

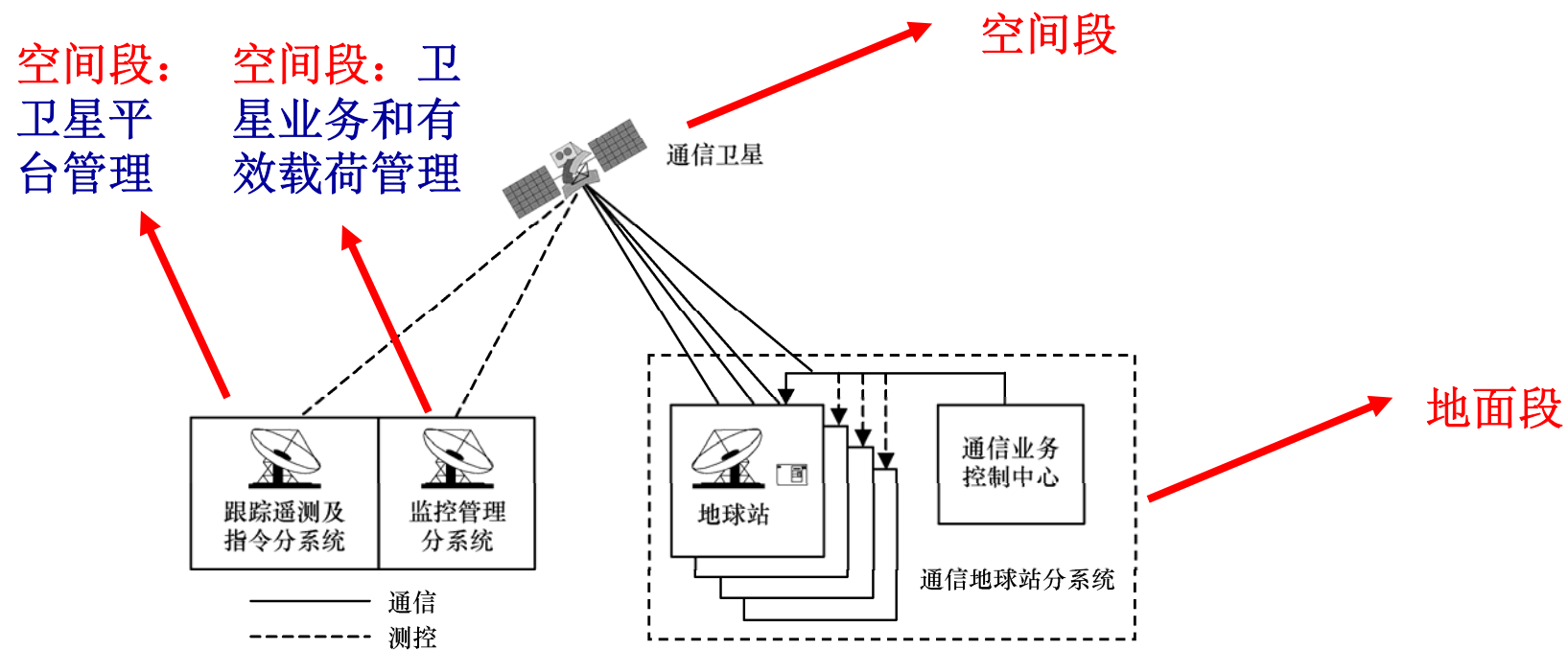


选取工作频段时，考虑的主要因素有：

- (1)** 天线系统接收的外界干扰噪声要小；
- (2)** 电波传播损耗要小；
- (3)** 适用于该频段的设备重量要轻，且体积小；
- (4)** 可用频带宽，以便满足传输信息的要求；
- (5)** 与其他地面无线系统（雷达系统、地面微波中继通信系统等）之间的相互干扰要尽量小；
- (6)** 尽可能地利用现有的通信技术和设备。

卫星通信系统组成

- 组成 **空间段**：包含卫星和测控；
 地面段：地球站



也可以说由**卫星**、**地球站**、**监控管理**、**跟踪遥测**四部分组成

空间段

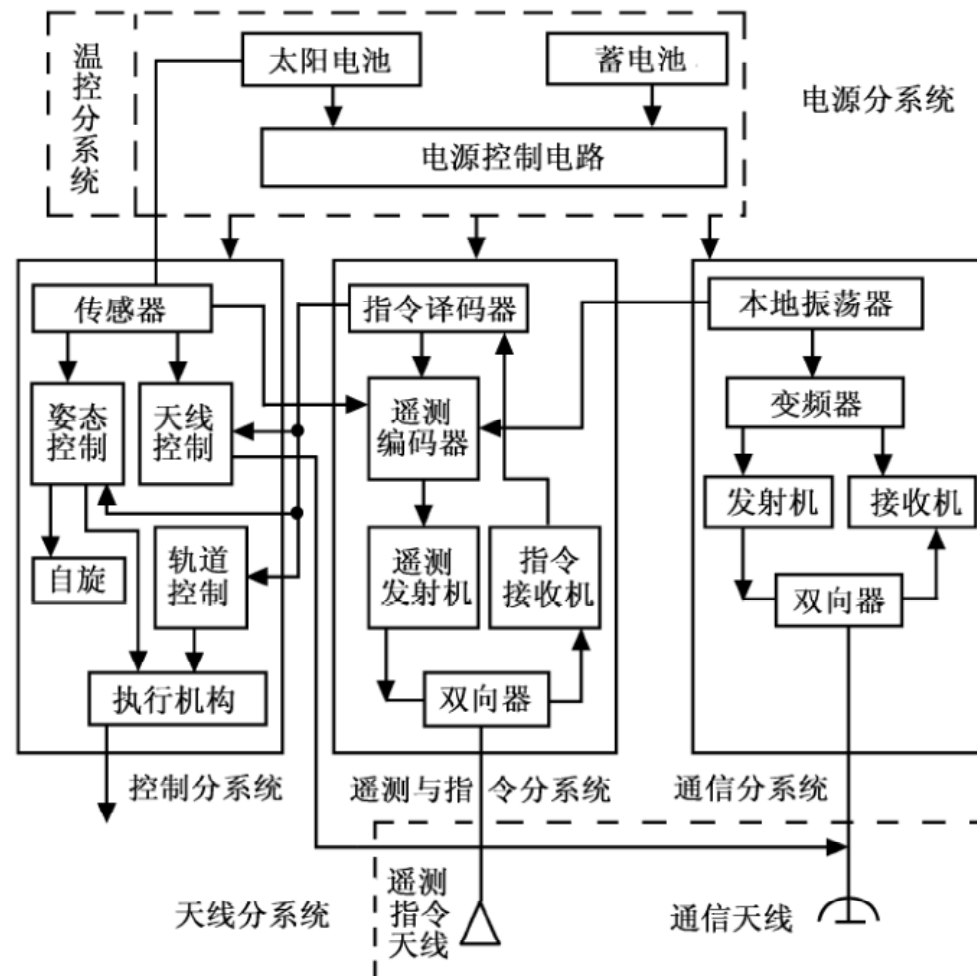
空间段：以卫星为主体，包括地面卫星控制中心（SCC），及其跟踪遥测和指令站（TT&C）。通信卫星可分为**平台**和**有效载荷**两大部分。

• 空间段的几个概念

1. 上行链路：电波从地面段到卫星。
2. 下行链路：电波从卫星到地面段。
3. 链路质量：由载噪比决定。其大小决定误码率
4. 多址技术：**FDMA**、**TDMA**、**CDMA**、空分多址
5. 星际链路：卫星之间通信链路
6. 有效载荷和平台：平台对通信系统起辅助作用，包括电源、结构、太阳能电池板、测控设备、燃料、空调等等。
7. 卫星作用：放大载波、变频。通信卫星上、下行工作频率不同。
8. 转发器：透明和再生转发器。
9. 卫星冗余、生命期、可靠性

通信卫星的组成

通信卫星由控制分系统、通信分系统、遥测指令分系统、电源分系统和温控分系统等组成。



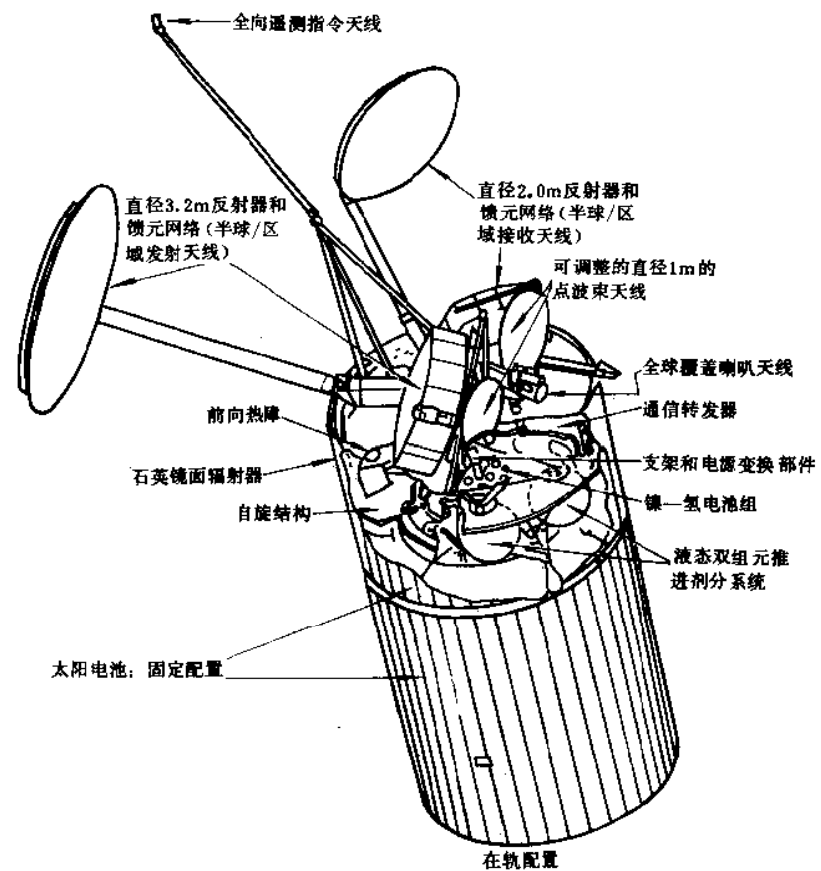
通信卫星的组成

- 通信分系统：即**有效载荷**。转发器+卫星通信天线，主要完成通信功能；
- 控制分系统：由各种可控的调整装置、驱动装置和转换开关等组成，用于姿态、轨道控制等；
- 遥测指令分系统：与**TT&C**进行通信，控制卫星设备产生一定的动作；
- 电源分系统：为卫星提供所需的电源输出，除要求体积小、重量轻、效率高和可靠性高之外，还要求其能在长时间内保持足够的输出。
- 温控分系统：控制卫星工作部件的温度，使其正常工作。

通信卫星

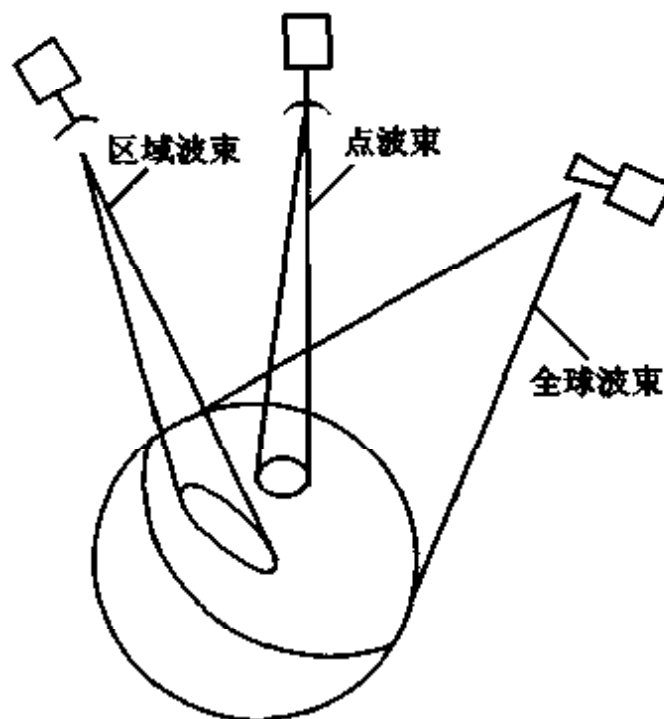


东方红3号



通信卫星天线波束

- 通信天线按其波束覆盖区的大小，可分为全球波束天线、区域(赋形)波束天线、点波束天线。在一颗卫星上可混合使用这三种波束。
- 现在的发展趋势是多波束卫星，即一颗卫星上有多个点波束。
- 多波束卫星能实现扩大覆盖范围与高增益卫星天线之间的矛盾。



三种波束示意图

星际链路（**ISL**）

目的：实现多个卫星或卫星网之间互联互通。

星际链路（**ISL**）可被看作是多波束卫星的一种特殊波束，该波束直接与其他卫星相连，而非地球站。

星际链路可分为以下三种类型：

- 静止轨道（**GEO**）卫星和低轨道（**LEO**）卫星之间的链路（**GEO-LEO**），也称为轨道际链路（**IOL**）；
- 静止轨道卫星间的链路（**GEO-GEO**）；
- 低轨道卫星间的链路（**LEO-LEO**）。

卫星通信转发器

- 转发器按传输信号形式的不同可分为：透明转发器和处理（再生）转发器。

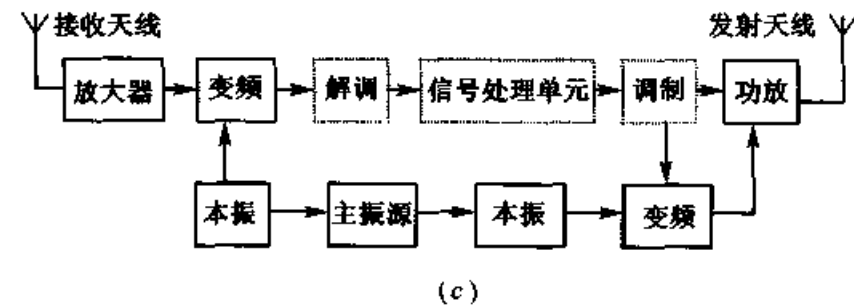
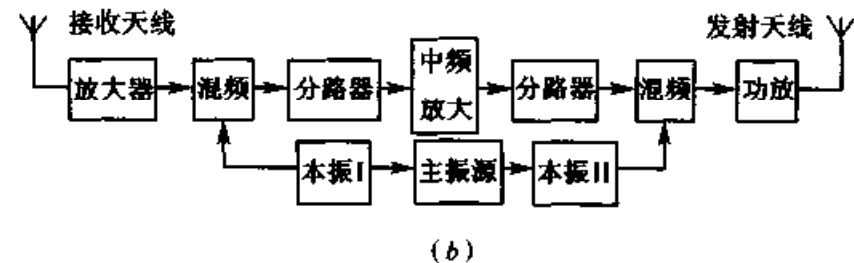
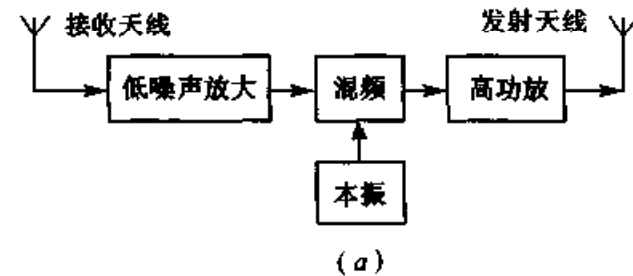
透明转发器：只对接收信号变频、放大后发送出去。

处理转发器：把信息解调出来，再调制变频后发送出去。

- 透明转发器按照变频方式可分为：

一次变频转发器、二次变频转发器。

- 双变频转发器：
优点：转发增益高，电路工作稳定；
缺点：中频带宽窄，不适于多载波工作。



地面段

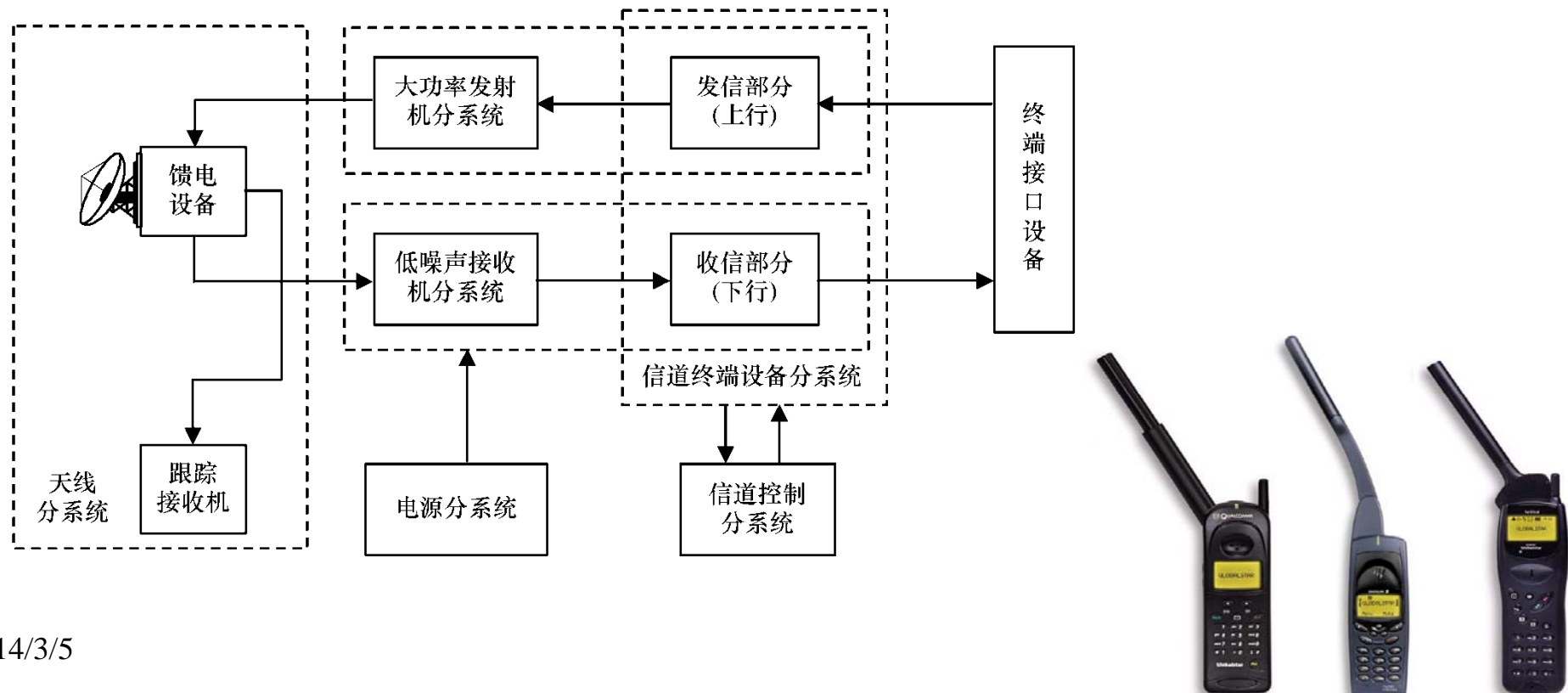
•**地面段**：包含支持用户访问卫星转发器来实现用户间通信的所有地面设施；地球站是地面段的主体，提供用户与卫星的连接链路。除地球站外，还有“陆地链路”，即用户终端间以及用户终端与地球站连接的地面设备。**狭义的理解：地面段为地球站。**

•地面段的几个概念

1. 地球站分类：大站、小站/单收、收发
2. 地球站结构：天线、双工器、电源、跟踪、监控、射频高功放、中频调制解调器、低噪声放大器等。
3. 信号处理技术：复用、预加重、去加重、加扰、加密、语音内插、压扩等

地面段

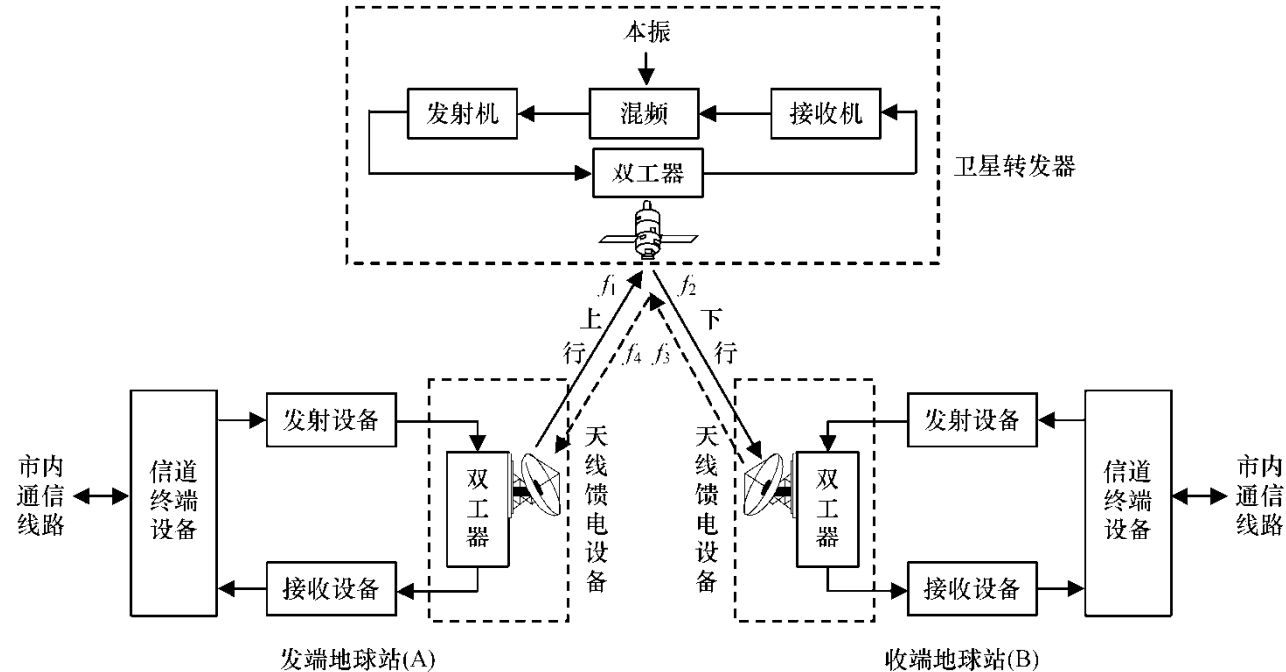
- 卫星通信地球站有固定站(大、中、小型), 移动站(如船载、车载、机载)、可搬移站(含超小型流动站, 如背负式、便携式)等不同类型。
- 卫星通信地球站一般由天线分系统、发射机分系统、接收机分系统、通信控制分系统、信道终端设备分系统和电源分系统六大部分组成。



卫星通信线路

卫星通信线路是包括无线电波至基带信号在内的整个线路，即由发端地球站、上行线路、卫星转发器、下行线路和收端地球站所组成的整个线路。

频率分配中，存在着上行和下行链路波段的分配，其中上行链路波段总是高频率。因为高频率相对低频而言有更高的传播和真空损耗，而地面站可提供较高功率以进行弥补。



- 卫星通信的电磁波由地面发出（或返回），经低空大气层和电离层而到达外层空间的传播。由于电磁波传播的距离很远，且主要是在大气以外的宇宙空间内进行，而宇宙空间近似于真空状态，因而电波在其中传播时，它的传输特性比较稳定。我们可以把电波穿过电离层外面的空间传播，基本上当作自由空间中的传播来研究。至于电波在大气层中传播所受到的影响，可以在考虑这一简单的情况基础上加以修正。因此，常认为卫星信道为恒参信道。
- 卫星通信的电波在传播中要受到损耗，其中最主要的是自由空间传播损耗，它占总损耗的大部分。其他损耗还有大气，雨，云，雪，雾等造成的吸收和散射损耗

因为固定地球站使用定向天线、工作频率高、可以避开遮挡，所以此时卫星信道可以看成高斯白噪声信道。

移动卫星信道

卫星移动信道多采用较低通信频率和（半）全向天线，所以与地面移动通信一样，存在多径和阴影遮挡，为衰落信道。

- 大气空间部分：接收信号的包络和相位在受到天气条件（如降雨、降雪等）的影响下均服从高斯分布。
- 地面部分：接收信号受到地面障碍物的阻挡而发生阴影慢衰落。还可能因障碍物的反射、散射或绕射等发生多径传播。多径传播时包络服从瑞利分布（无直达路径）或莱斯分布（有直达路径），阴影遮挡时包络服从对数正态分布。多径和遮挡同时存在，包络服从对数高斯条件下莱斯分布。

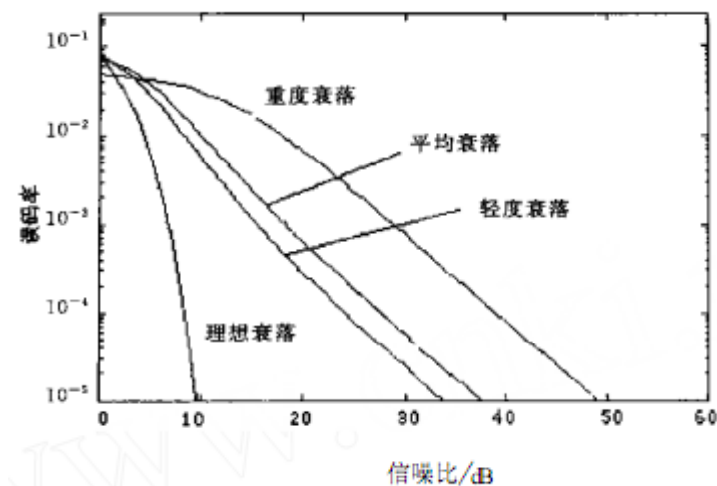
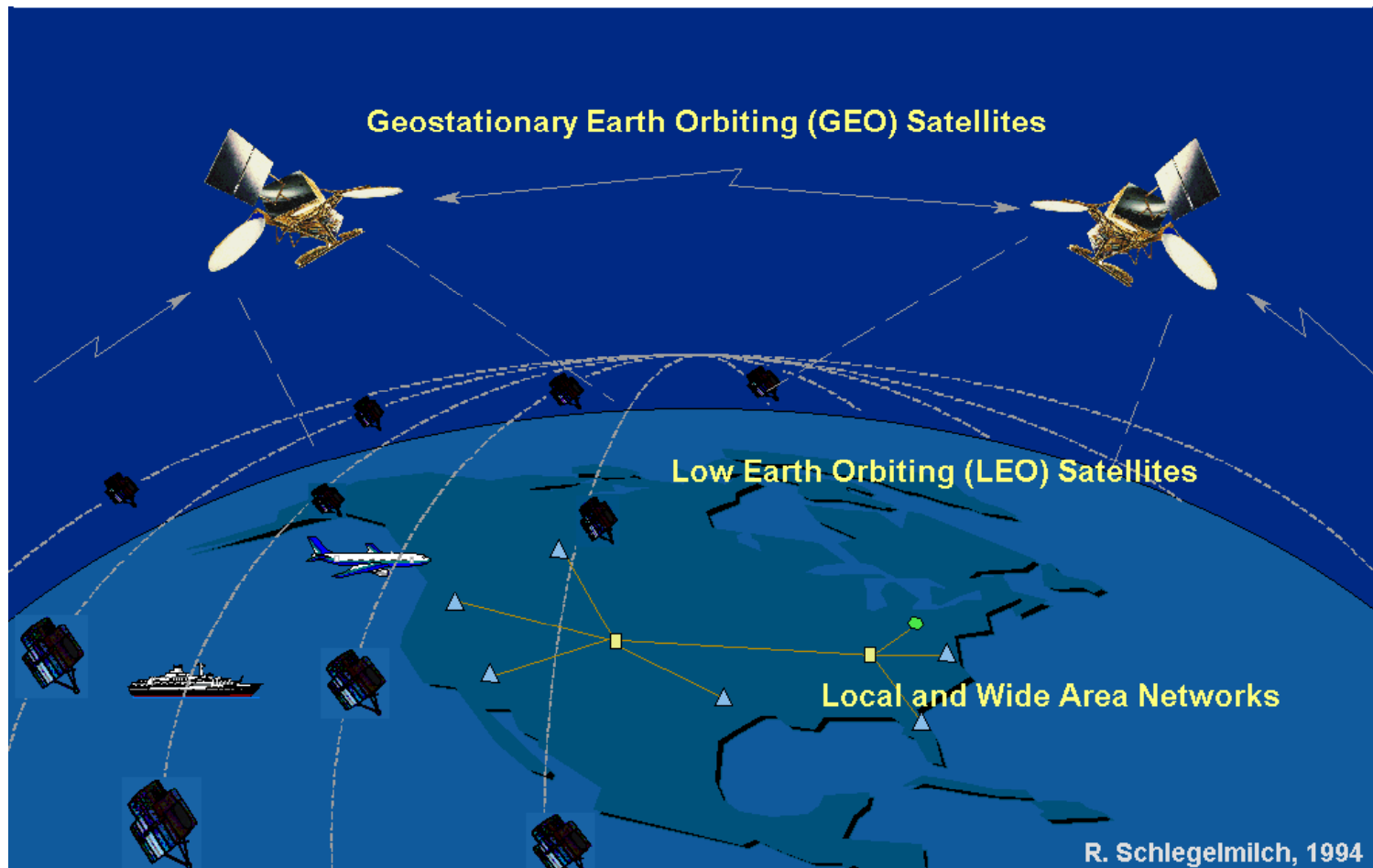


图3 QPSK调制信号在Rice/bgnomal信道中的误码率曲线

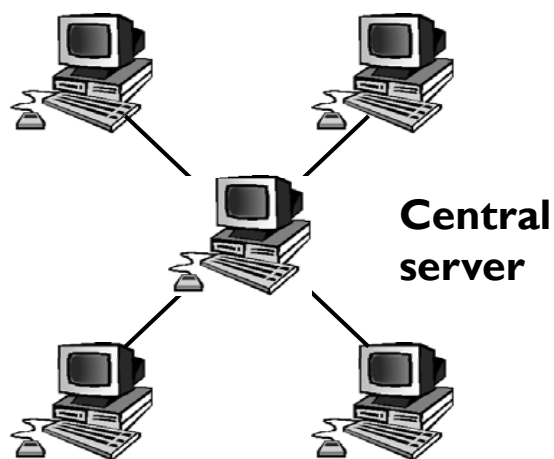
卫星通信网

- 卫星通信网提供三种用户之间的连接链路：点到点，点到多点，多点到点。

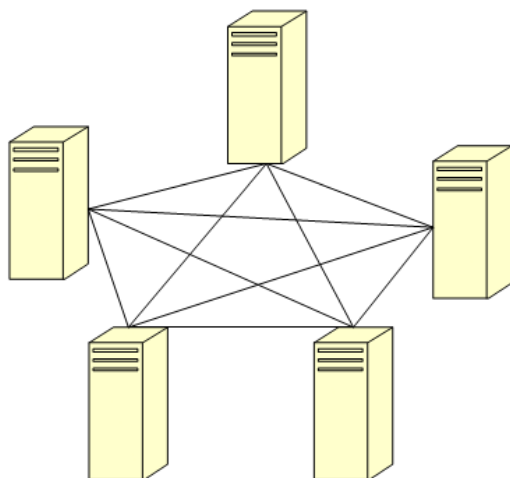


网络结构

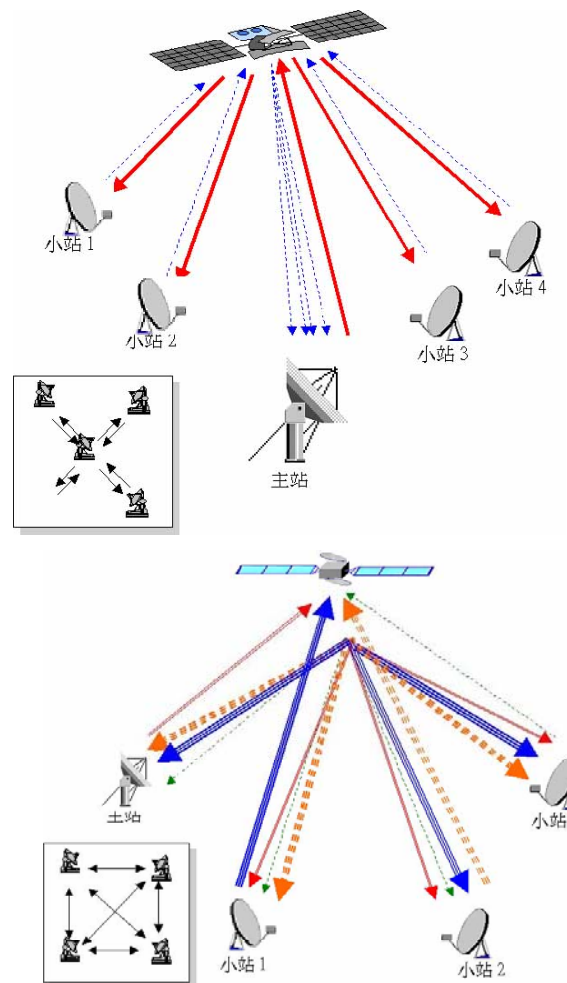
- 卫星通信网络的常用拓扑结构有：星形、网状网和混合网



星形网

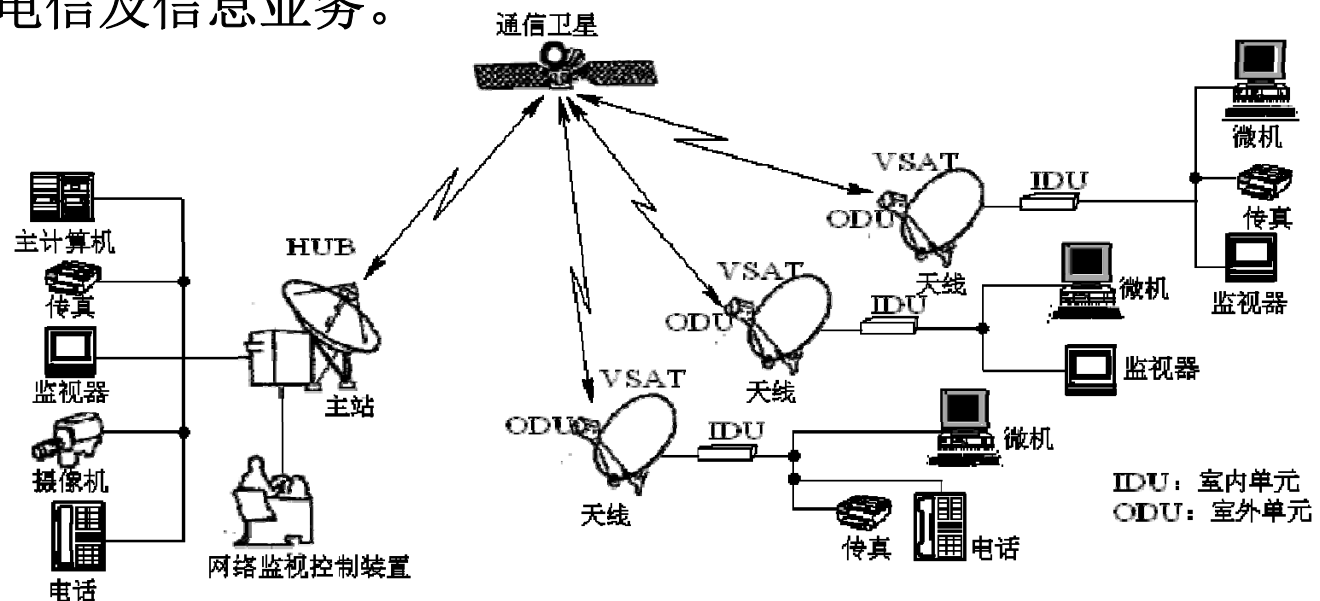


网状网



VSAT通信网

- ❑ **VSAT(Very Small Aperture Terminal)**是指具有甚小口径天线(一般小于**3米**)的智能化小型式微型地球站。
- ❑ 它是国外**20**世纪**80**年代发展起来的一个卫星通信新系统。典型的**VSAT**网是星形网，由一个**中心站**、**卫星**和广泛分布在各地的**VSAT小站**构成。大量这类小站与一个大站协同工作，构成一个卫星通信网，能够支持范围广泛的单向或双向数据、话音、图像及其它综合电信及信息业务。



主站

- 主站：主站也叫中心站或中央站，是**VSAT**网的**心脏**。
- 使用大型天线，天线直径一般约为**3.5m~8m**（**Ku**波段）或**7m~13m**（**C**波段）。
- 在数据**VSAT**卫星通信网中，主站既是业务中心也是控制中心。网络控制中心（**NCC**）负责对全网进行监测、管理、控制和维护。
- 在话音**VSAT**网中，控制中心可以与业务中心在同一个站，也可以不在同一个站，通常把控制中心所在的站称为主站或中心站。

小站和卫星转发器

□VSAT小站：VSAT小站由小口径天线、室外单元（**ODU**）和室内单元（**IDU**）组成。在相同的条件下（例如相同的频段、相同的转发器条件）话音VSAT网的小站为了实现小站之间的直接通信，其天线明显大于只与主站通信的数据VSAT小站。

□卫星转发器：一般采用工作于**C**或**Ku**波段的同步卫星透明转发器。在第一代VSAT网中主要采用**C**波段转发器，从第二代VSAT开始，以采用**Ku**波段为主。具体采用何种波段不仅取决于VSAT设备本身，还取决于是否有可用的星上资源，即是否有**Ku**波段转发器可用，如果没有，那么只能采用**C**波段。

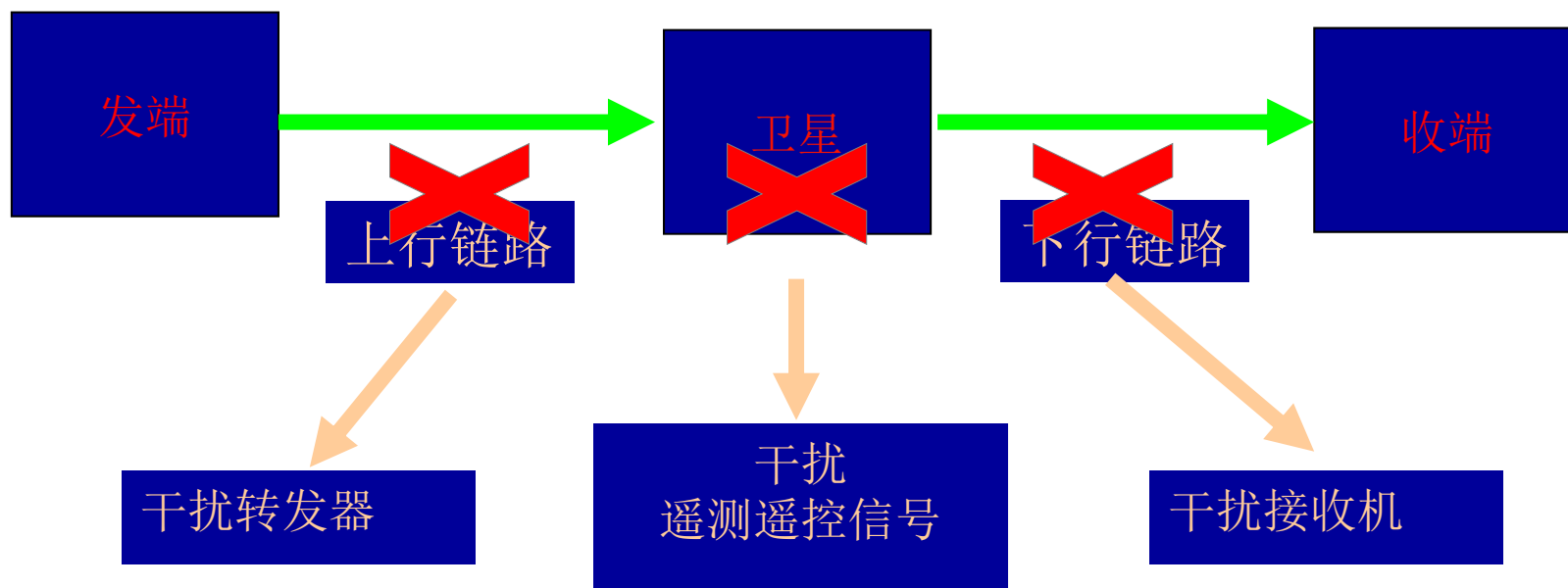
VSAT数据网传输体制

□ **外向链路**：从主站通过卫星向小站方向传输的数据，叫作外向传输数据。外向信道通常采用时分复用(**TDM**)或统计**TDM**技术。为保证各**VSAT**站的同步，每帧(约**1s**)开头发射一个同步码。同步码特性应能保证各**VSAT**小站在未纠错误比特率为 1×10^{-3} 时，仍能保证可靠同步。该同步码还应向所有终端提供**TDMA**帧的起始信息(**SOF**)。

□ **内向链路**：各远端小站通过卫星向主站传输叫作内向传输。内向传输采用随机方式发射突发信号。采用信道共享协议，一个内向信道可同时容纳多个小站。

分散的小站，以分组的形式，通过随机竞争的方式向主站发送数据。由于小站本身一般不能用自发自收的方法监视本站发射信号的传输情况。因而要求主站成功收到小站信号后，回传**ACK**信号，宣布接收成功。如果小站收不到**ACK**信号，则视为分组传输失败，需要重传。

通信卫星抗干扰



抗干扰技术可分为三类：

- 1. 基于自适应调零天线综合抗干扰技术。**利用自适应天线调零技术，可以把零点方向对准干扰方向。则既可独立应用于抗干扰，也可与扩、跳频技术相结合，实现时域、频域与功率域的综合抗干扰。
- 2. 基于信号处理的综合抗干扰技术研究。**如跳频、扩频、混合扩频、自适应干扰抑制、伪信号隐蔽、前向纠错等。
- 3. 基于其它技术综合应用的综合抗干扰技术。**如信道编码技术等；新型的调制技术；重复传输和多数表决处理技术；突发传输技术；信号交错技术；分集技术；功率控制策略限幅箱压技术；**SmartAGC**等等。

一、天线抗干扰技术

1、非盲算法波束形成：

常用的非盲算法有：**LMS**算法、**DMI**算法和**RLS**算法。

2、盲波束形成算法

(1) 基于信号结构的自适应波束形成

常用算法：基于恒模的算法**CMA**，基于高阶累积量的算法基于周期平稳的算法。

(2) 基于**DOA**估计的盲波束形成算法

基于**DOA**估计的算法一般分为**DOA**估计和波束形成两部分。

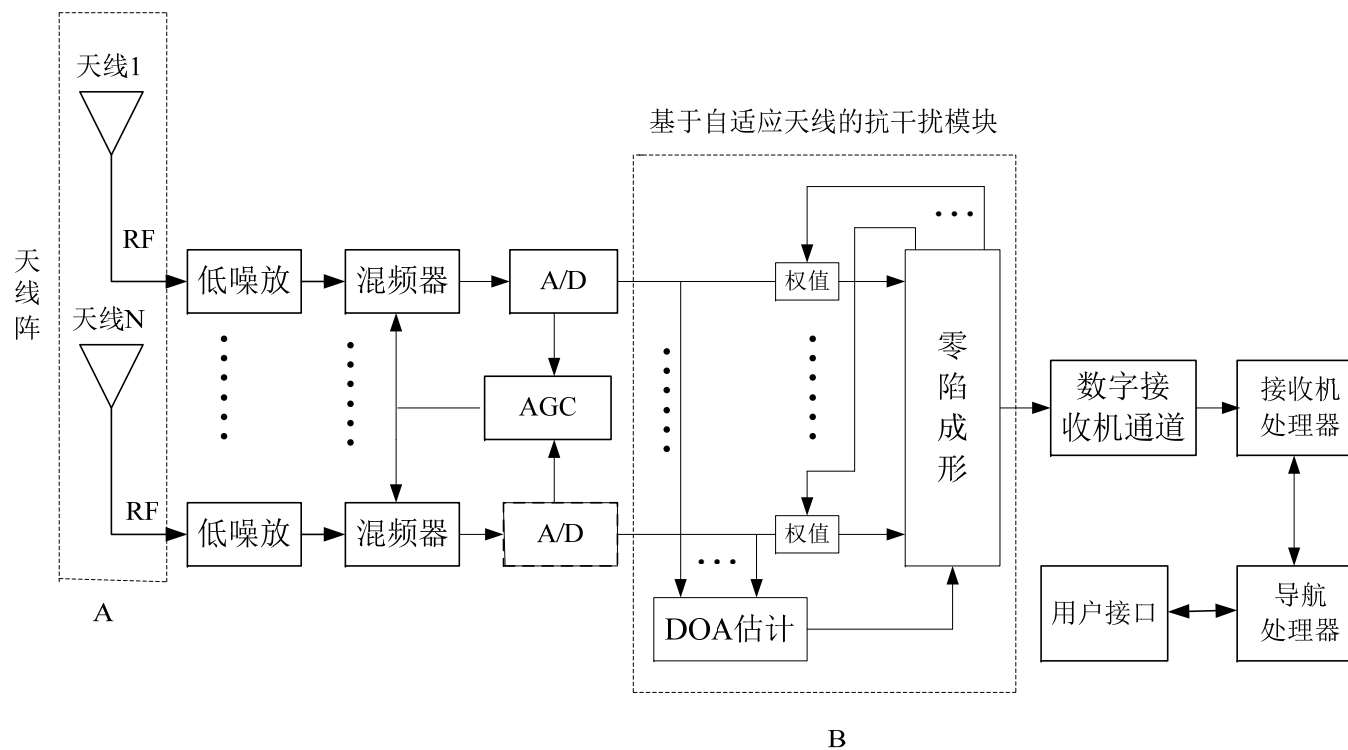
(a) **DOA**估计

- 传统法：主要有延迟—相加法和**Capon**最小方差法。
- 最大似然法：
- 子空间法：主要有**MUSIC**，**ESPRIT**和传播算子算法；

(b) 波束形成算法

包括功率反演算法，基于特征空间的波束形成算法等。

基于自适应天线的抗干扰卫星接收机框图



信号处理抗干扰技术

二、信号处理抗干扰技术

1、扩展频谱

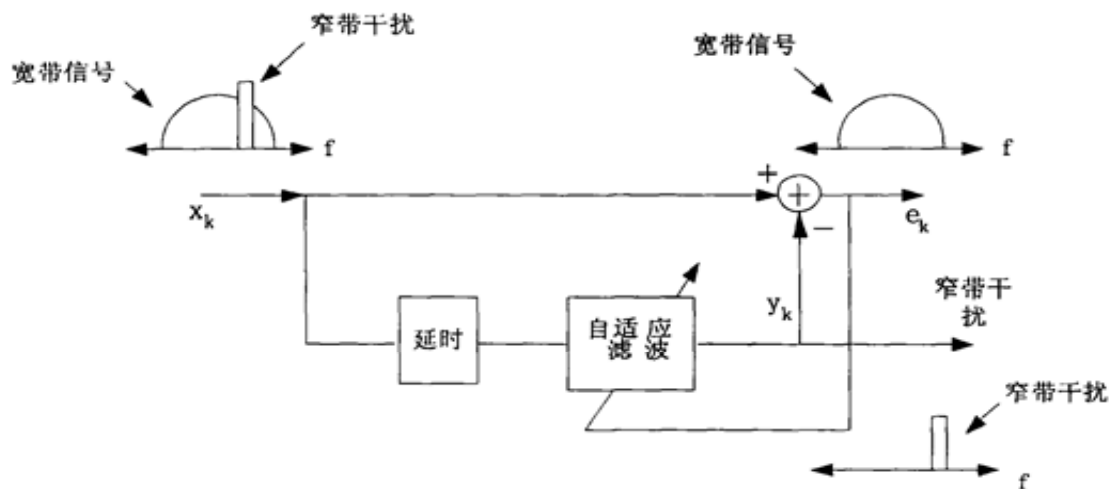
常用为跳频和直接序列扩频，通过频谱扩展抗窄带干扰。

2、自适应滤波

通过滤波抑制强干扰，分为时域和变换域两种方法。

A、时域自适应滤波：

时域预测/估计滤波，其基本原理是窄带干扰的时间相关性很强，而宽带扩频信号的时间相关性很弱，因而可以预测窄带干扰，然后在接收信号中将预测到的干扰减去。



B、变换域自适应干扰抑制

采用变换域干扰抑制技术，在时域复杂的滤波过程就可以在变换域通过简单的相乘来完成，而且变换域处理的速度更快。变换域干扰抑制常用离散傅立叶变换（**DFT**）实现，可以采用快速**FFT**变换**IP**核，易于硬件实现。

A、限幅

采用限幅技术，可以保护接收机，同时抑制强干扰，但会带来信号的非线性变化。

B、抗干扰策略

典型的为猝发通信，通过极短时间完成通信，躲避干扰和隐蔽通信。

C、Smart AGC

Smart AGC是一种基于包络处理的自适应限幅技术，它利用一种零区可变的非线性变换电路来抑制强干扰。零区根据干扰包络的大小自适应调节，使更多的干扰落入零区而消除，无干扰时工作在线性区。

D、重叠通信

将己方通信隐藏在公开通信信号中，在不影响公开通信情况下，实现隐蔽重叠通信。

1、星上抗干扰措施

措施为智能零陷天线、**Smart-AGC**和干扰限幅。

2、星上信号处理

a, 对信号进行解跳、解扩、解调再生, 使噪声不累积。

b, 进行信号变换和处理, 例如**FDMA-TDM**。

c, 波束交换

d, 星间链路

3、新的抗干扰体制

高速、宽带跳/扩频（跨转发器跳，数百兆带宽内跳、扩频，高速跳频）

4、扩展频段（毫米波、光通信），智能组网，空间段转移等技术抗干扰

结束语

• 结论与前景

- 有效性高;
- 安全通信;
- 特殊领域: 广播电视、数据采集、移动通信、深空探测等
- 军事用途。

卫星通信发展趋势:

- 同步通信卫星向大容量、多波束、智能化发展。
- 低轨卫星群与蜂窝技术相结合, 实现全球个人通信。
- 小型卫星通信地面站(**VSAT**)广泛应用。
- 电视直播(**DVB**)和数字声广播(**DAB**)步入家庭和个人用户。
- 多媒体通信和因特网接入。
- 微小卫星和纳卫星。
- **本章作业:** **1**、介绍一种卫星通信**新**系统或卫星通信**新**技术。
要求: 有分析、有总结, 有参考文献。做**PPT**, 做报告。

欢迎批评指正！

谢谢！