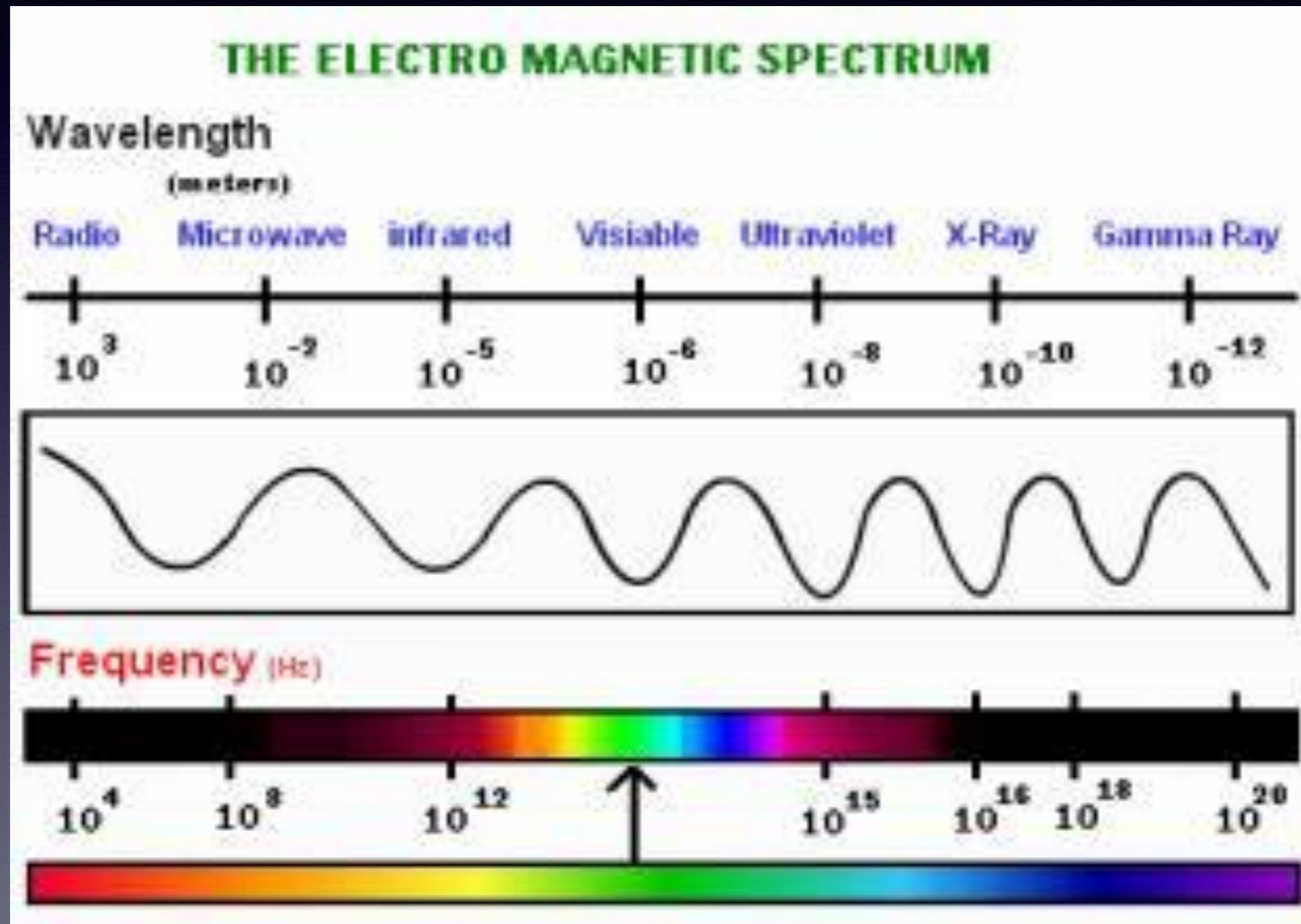


第六章

空间天气事件对通信的影响与应对

1、无线电通信与电离层

无线电波： 频率低于300GHz的电磁波



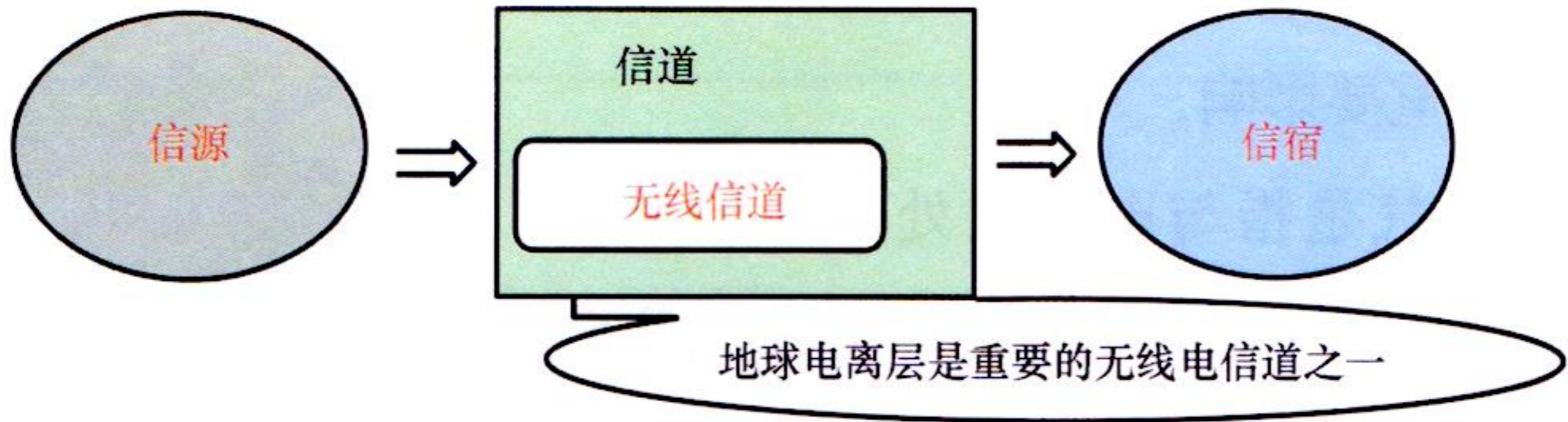
电磁谱频段划分

频段名称	频段范围	传播方式	传播距离	可用带宽	干扰量	利用
甚低频 (VLF)	3-30kHz	波导	数千公里	极有限	宽扩展	世界范围长距离无线电导航
低频 (LF)	30-300kHz	地波天波	数千公里	很有限	宽扩展	长距离无线电民航战略通信
中频 (MF)	300-3000kHz	地波天波	几千公里	适中	宽扩展	中等距离点到点广播和水上移动
高频 (HF)	3-30MHz	天波	几千公里	宽	有限的	长和短距离点到点全球广播, 移动
甚高频 (VHF)	30-300MHz	空间波对流层散射绕射	几百公里以内	很宽	有限的	短和中距离点到点移动, LAN声音和视频广播个人通信
特高频 (UHF)	300-3000MHz	空间波对流层散射绕射视距	100公里以内	很宽	有限的	短和中距离点到点移动, LAN声音和视频广播个人通信卫星通信
超高频 (SHF)	3-30GHz	视距	30公里左右	很宽	通常是有限的	短和中距离点到点移动LAN声音和视频广播移动/个人通信卫星通信
极高频 (EHF)	30-3000GHz	视距	20公里	很宽	通常是有限的	短和中距离点到点移动, LAN个人通信卫星通信

无线电频段及用途

无线通信信道

- ★ **有线通信**：利用线缆远距离传输信息
- ★ **无线通信**：利用电磁波在大气等介质中传递信息



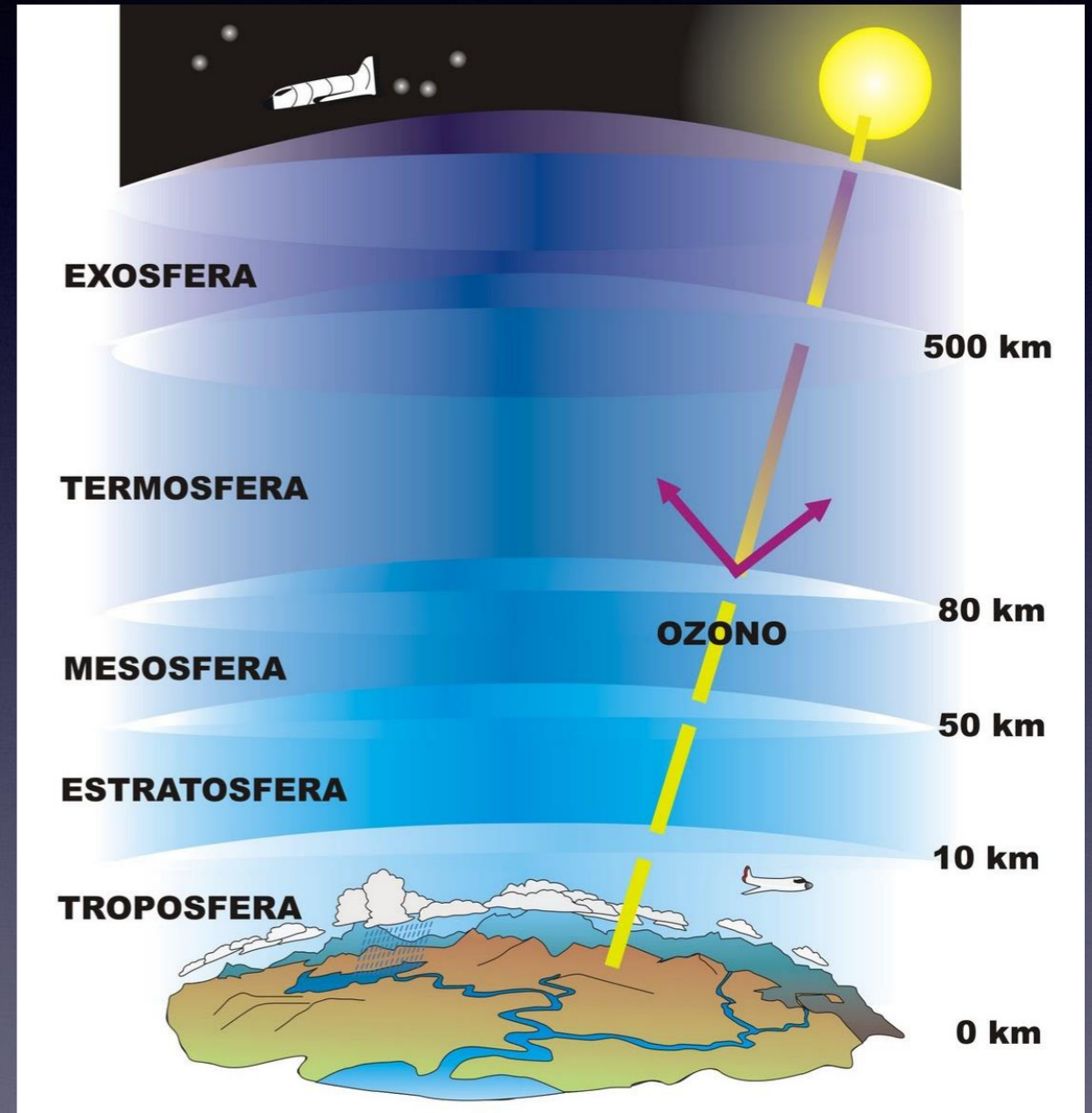
无线通讯的基本过程

地球空间环境对无线通信的影响

对流层：影响甚高频及以上的无线电信号，特别是微米和毫米波

- ▶ 对流层雨衰减对10GHz以上频段的卫星通信影响较大
- ▶ 对流层会引起无线电信号的折射、衰减、衰落、多径传播等效应，影响无线电通信的质量、容量和可靠性

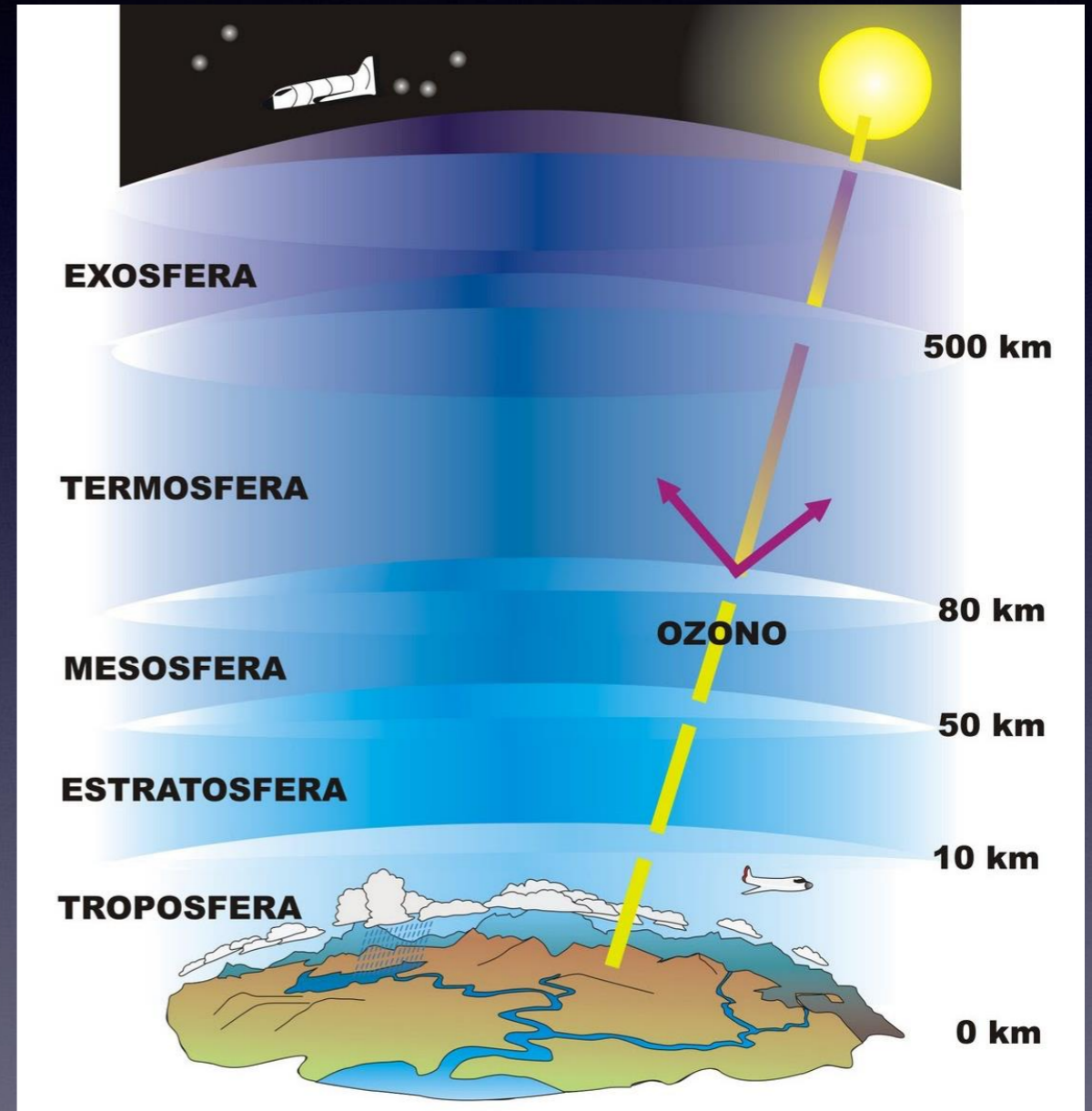
平流层：对无线电信号传播影响不大



地球空间环境对无线通信的影响

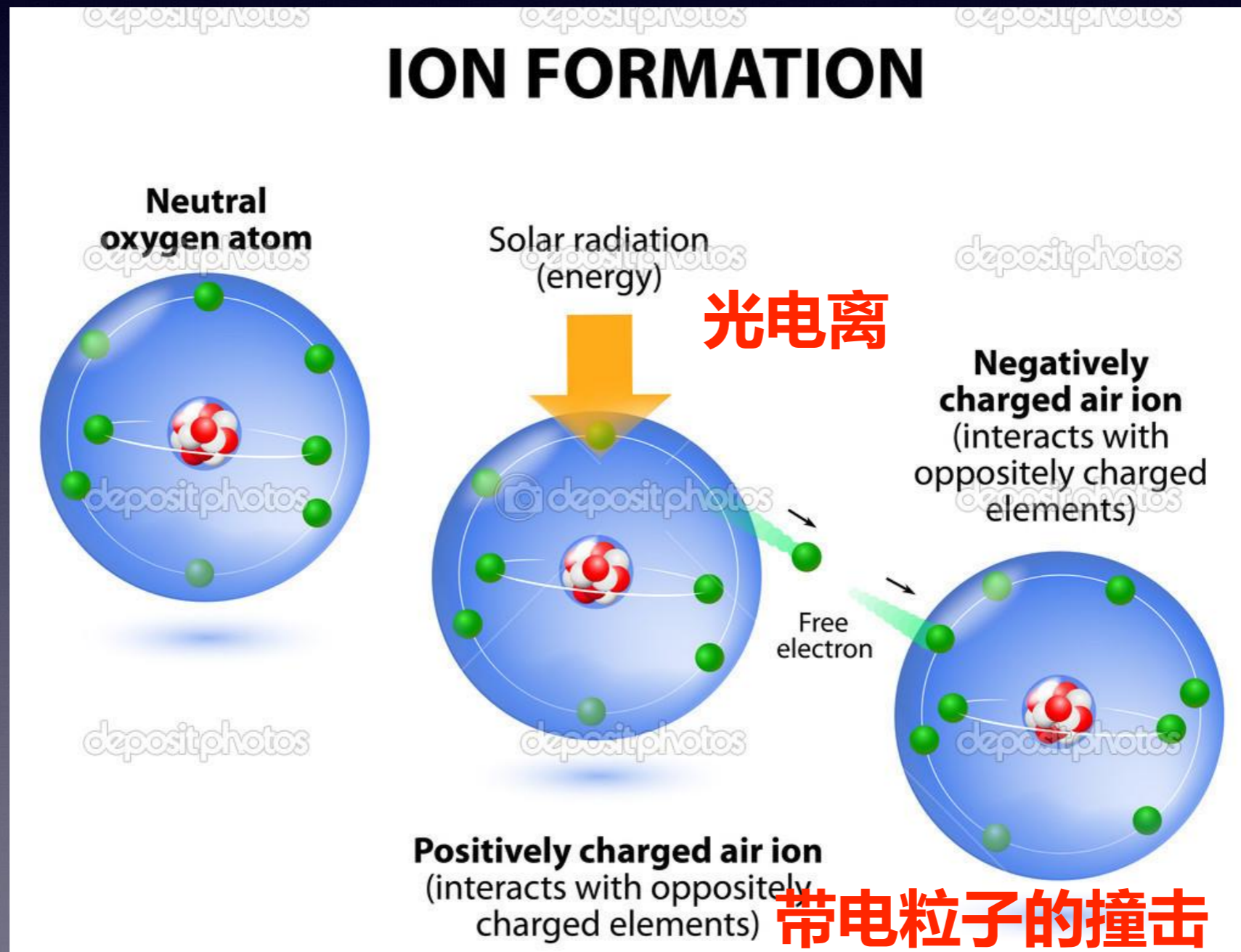
电离层：对长波至约10GHz频段的无线电传播都有重要影响

中高层大气：与电离层相同高度的未被电离的中性大气成分，其变化显著影响电离层

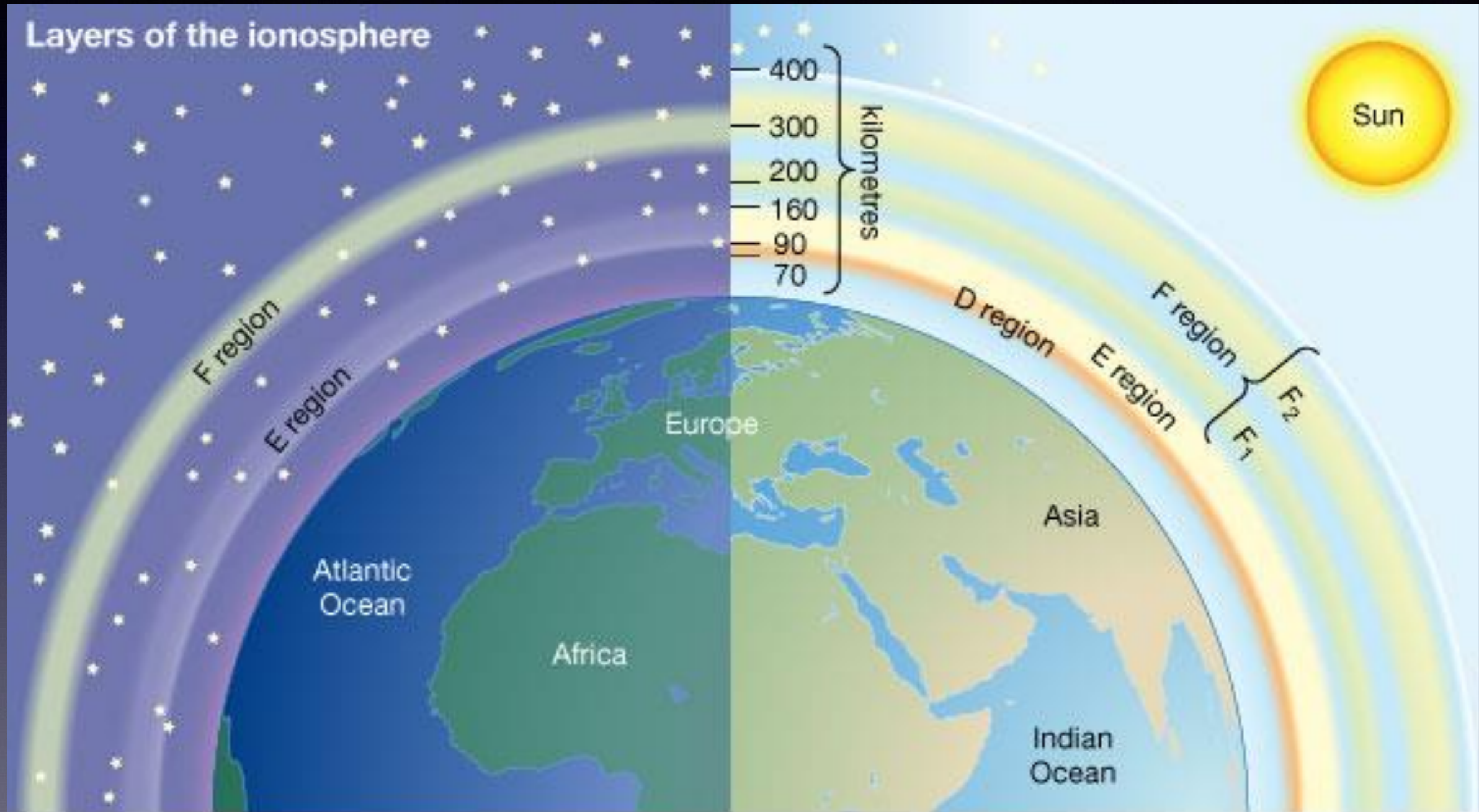


电离层:无线电通讯的重要信道

电离层: 地球大气中部分电离的区域, 其中含有“大量(不到中性粒子的1%)”自由电子



电离层的分层



电离层中电磁波的传播

Appleton-Hartree Equation

折射指数n:

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{\frac{1}{2}Y^2 \sin^2 \theta}{1 - X - iZ} \pm \frac{1}{1 - X - iZ} \left(\frac{1}{4}Y^4 \sin^4 \theta + Y^2 \cos^2 \theta (1 - X - iZ)^2 \right)^{1/2}}$$

n = complex refractive index

$$i = \sqrt{-1}$$

$$X = \frac{\omega_0^2}{\omega^2}$$

$$Y = \frac{\omega_H}{\omega}$$

$$Z = \frac{\nu}{\omega}$$

ν = electron collision frequency

$\omega = 2\pi f$ (radial frequency)

f = wave frequency (cycles per second, or Hertz)

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} = \text{electron plasma frequency}$$

$$\omega_H = 2\pi f_H = \frac{B_0 |e|}{m} = \text{electron gyro frequency}$$

ϵ_0 = permittivity of free space

B_0 = ambient magnetic field strength

e = electron charge


m = electron mass

θ = angle between the ambient magnetic field vector and the wave vector

电离层中电磁波的传播

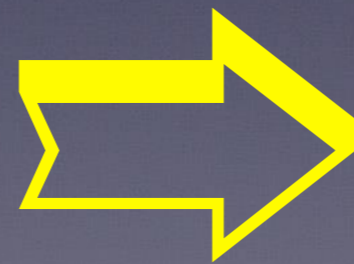
- ☑ 考虑吸收很小或者没有吸收的情况, $Z=0$
- ☑ 不考虑地磁场效应, $Y=0$

Appleton-Hartree Equation


$$n^2 = 1 - X = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m f^2}$$

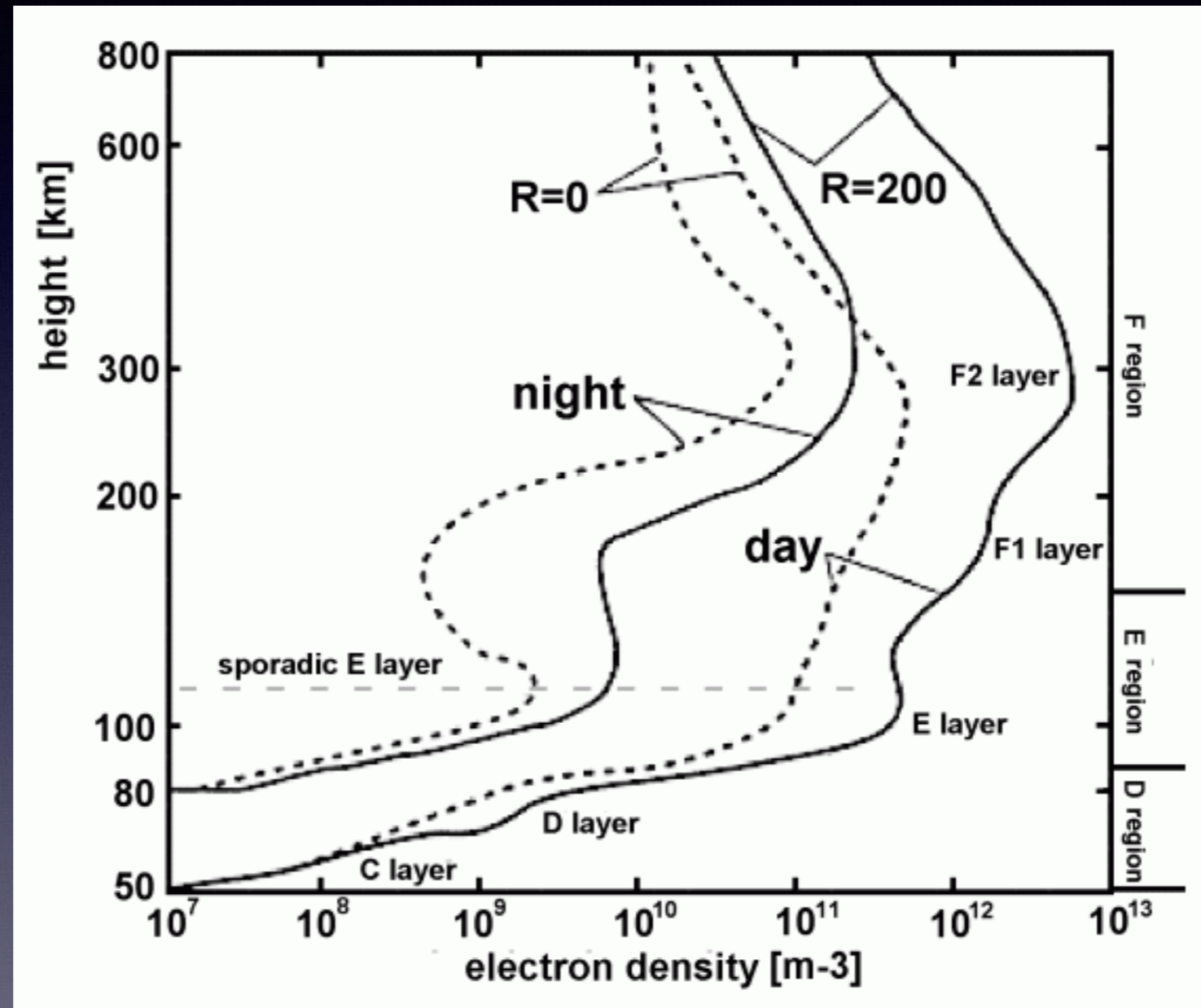
电子密度越大

电波频率越低



折射指数越小

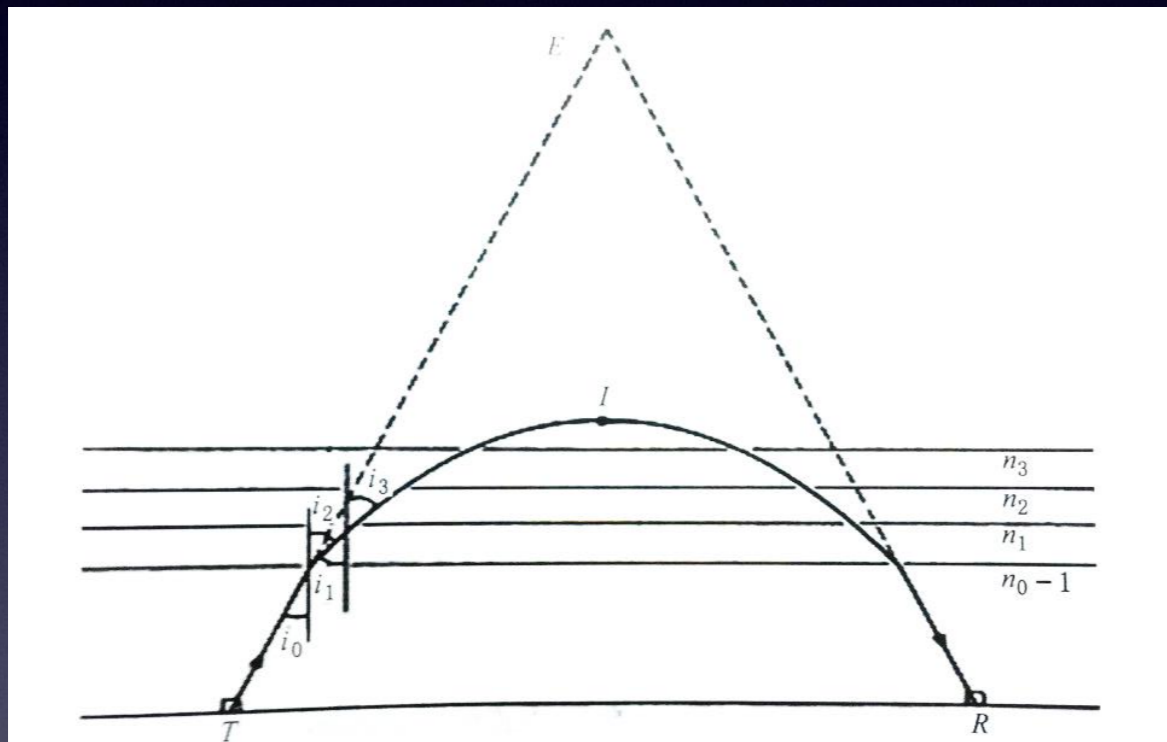
电离层不同高度的电子密度



高度越大，折射指数越小

电离层中电磁波的传播

高频波(3-20MHz,波长100m-10m)在电离层中的反射



$$\begin{aligned} \sin i_0 &= n_1 \sin i_1 \\ n_1 \sin i_1 &= n_2 \sin i_2 \\ n_2 \sin i_2 &= n_3 \sin i_3 \\ &\dots \end{aligned}$$

$$n_{r-1} \sin i_{r-1} = n_r$$



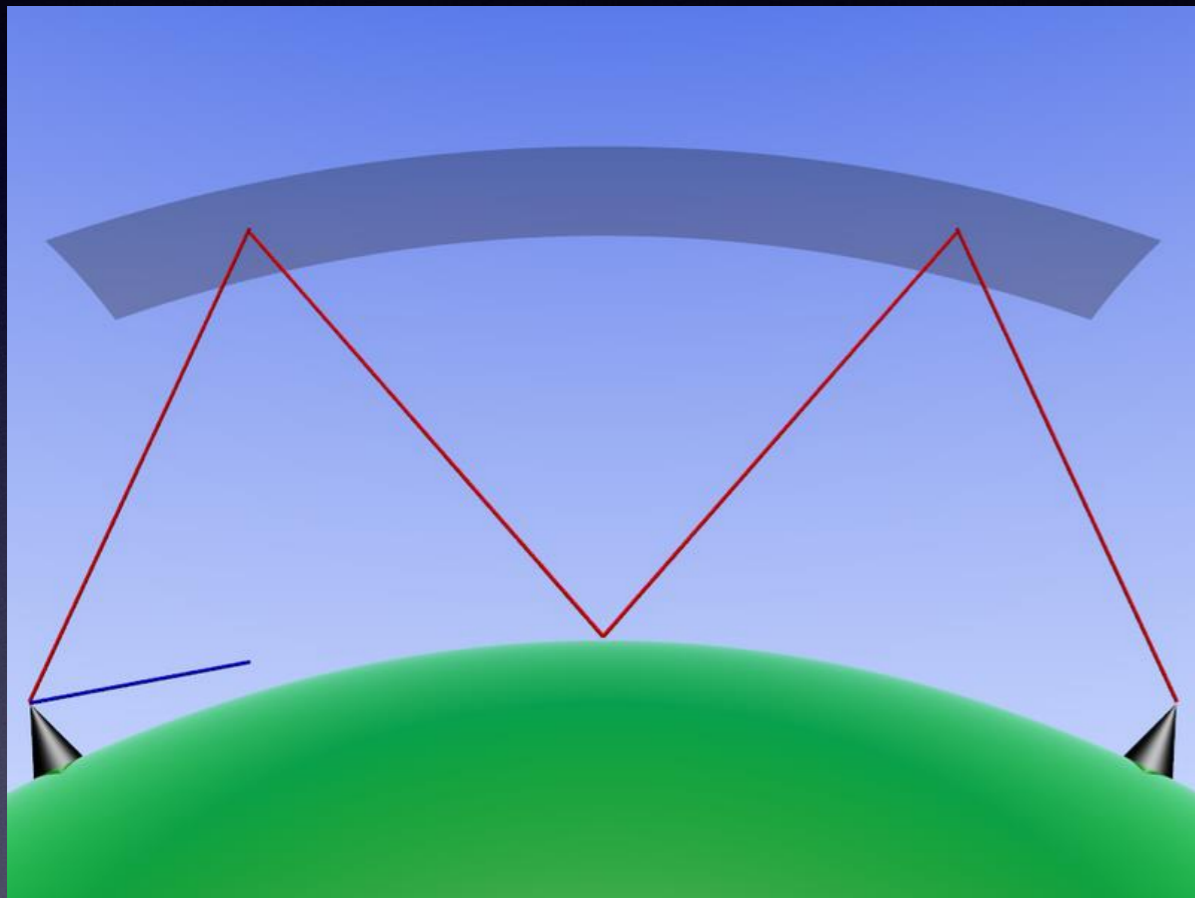
$$\sin i_0 = n_r$$

反射时: $\frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1 - n^2 = 1 - \sin^2 i_0 = \cos^2 i_0$



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}} = \omega \cos i_0$$

电离层反射临界频率



- 临界频率: 一定值的电子密度情况下, 使折射指数为零的频率, 即 f_N 。超过该频率的电磁波将不能被反射而返回。
- 在斜投射时, 只有当频率小于最高可用频率时, 电磁波才能返回地球

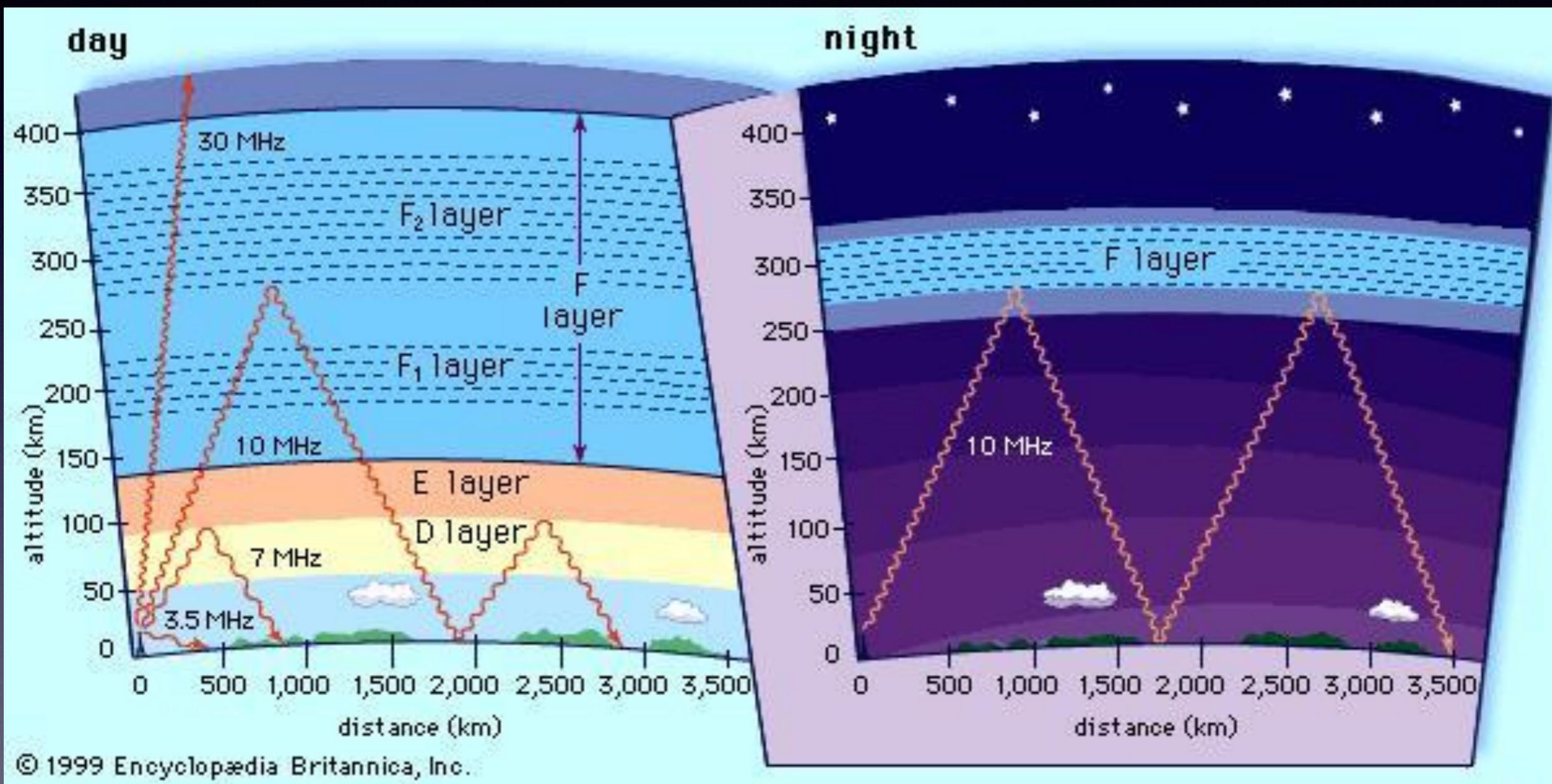
电离层对短波的影响过程:

★ 折射

★ 反射

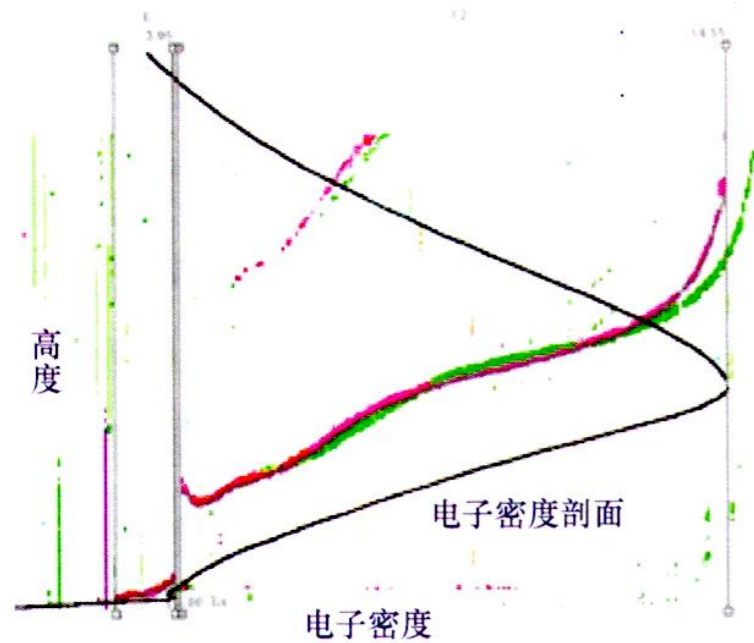
★ 吸收

电离层反射临界频率



电离层的探测：垂直探测仪

垂直探测仪：连续可变频的高频雷达，测量不同频率波的反射时间，可得不同高度的电子密度

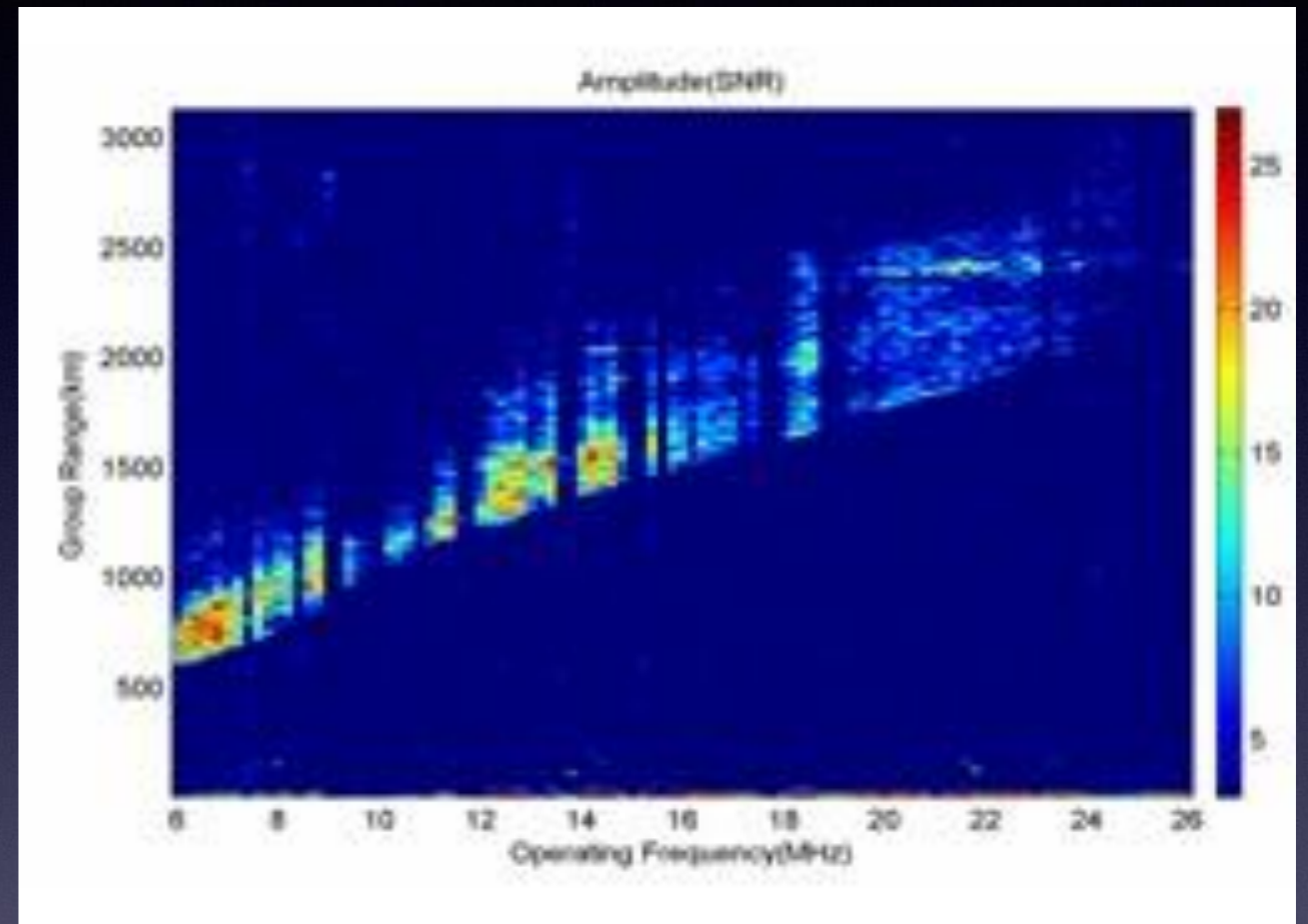


▲ 垂直探测电离图与电子密度高度剖面



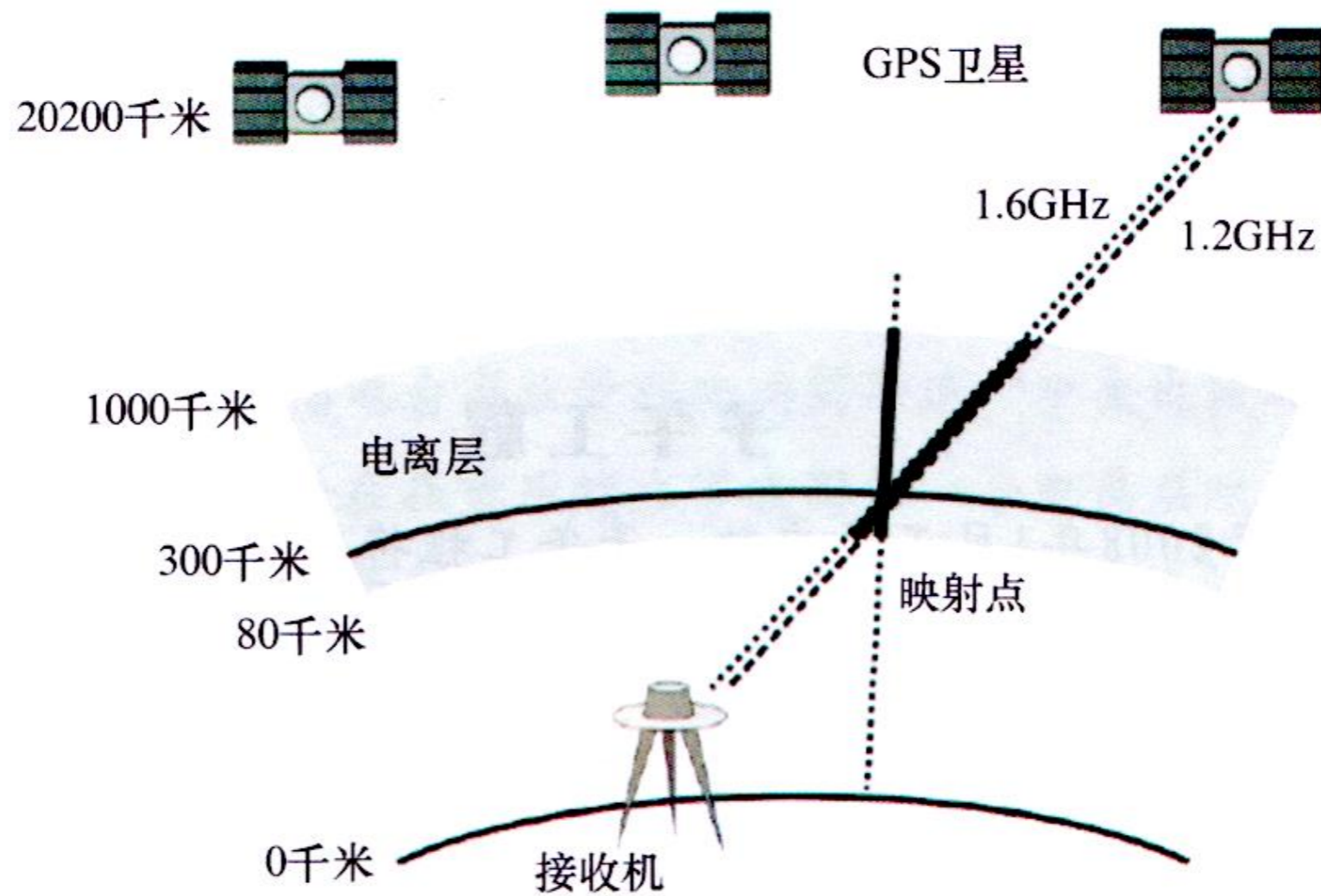
▲ TYC-1型数字式垂直探测仪的发射天线、接收天线和主机柜

电离层的探测：斜向探测仪



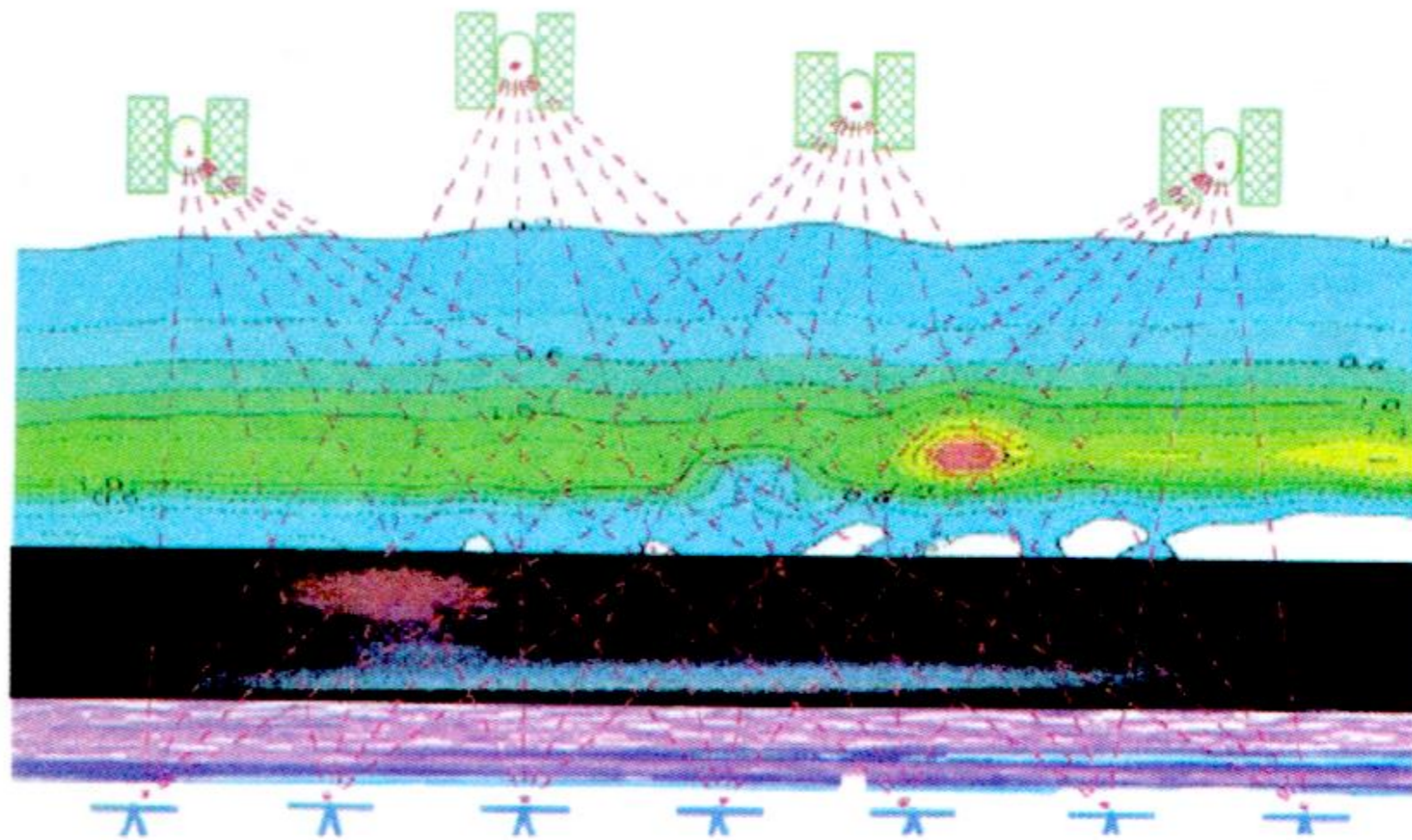
发射机工作在扫频状态，在远处的接收点同步接收电离层反射的信号，则可记录到类似的频率-时延曲线，可用于探测反射点的电子密度

电离层的探测：GPS卫星信标



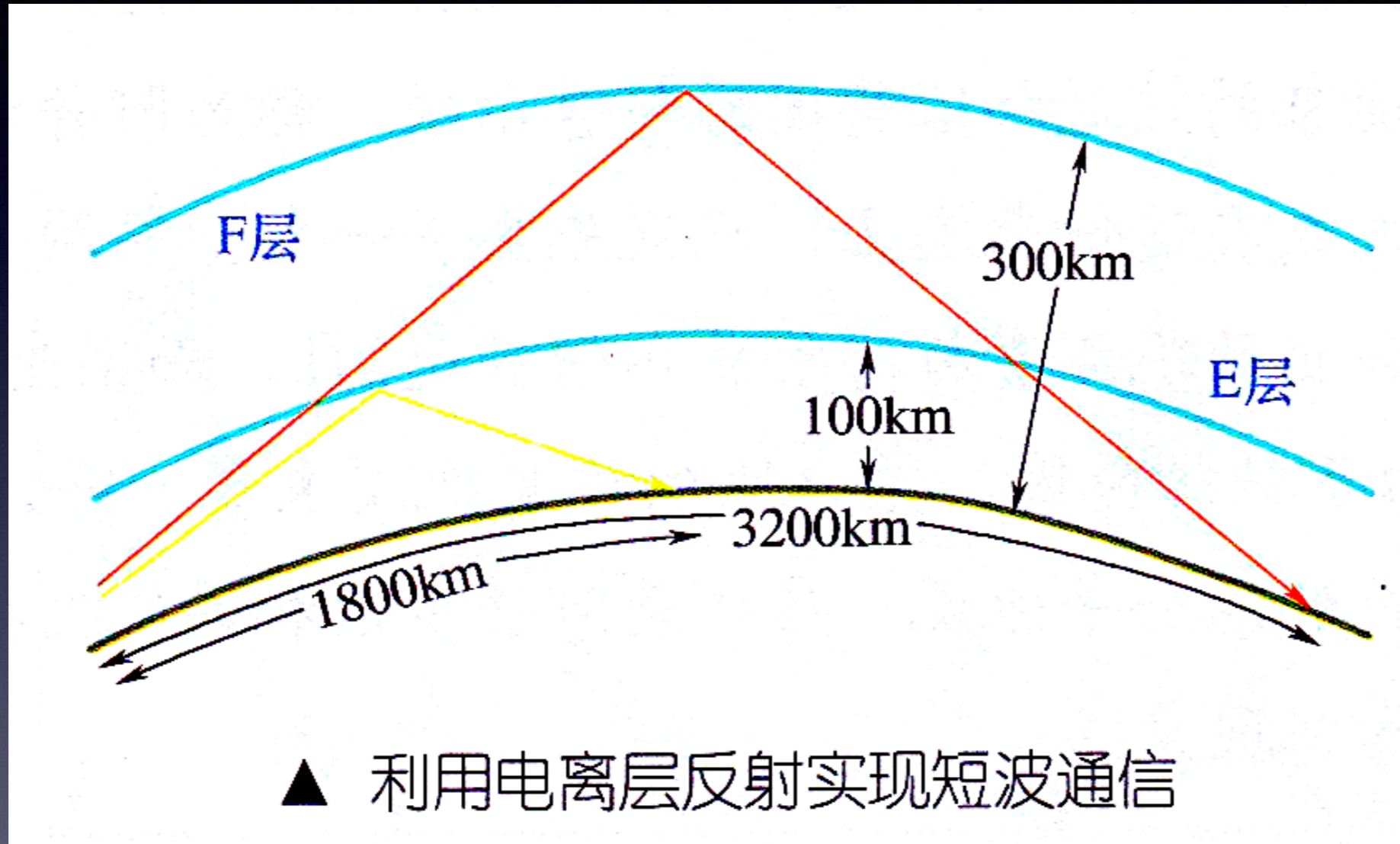
▲ GPS卫星信标的电离层探测

电离层的探测：CT成像探测

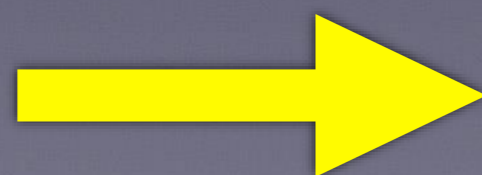


▲ 利用地面接收机进行电离层CT成像探测

电离层对无线通信的影响



电离层反射地面向上的短波信号



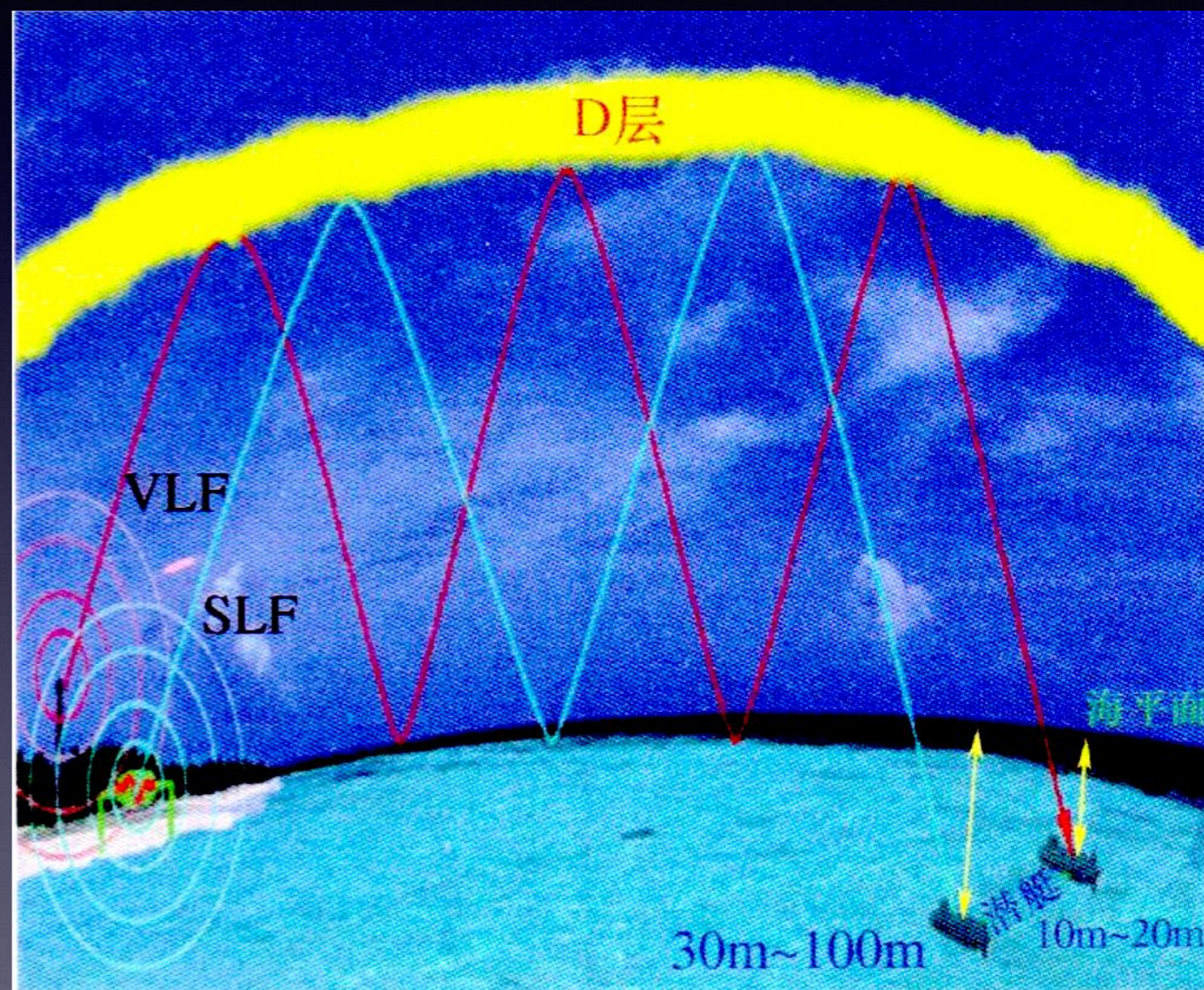
实现远距离短波通信

电离层对无线通信的影响

低电离层和地表层构成
同心球壳波导结构



甚长波在其中波导传播

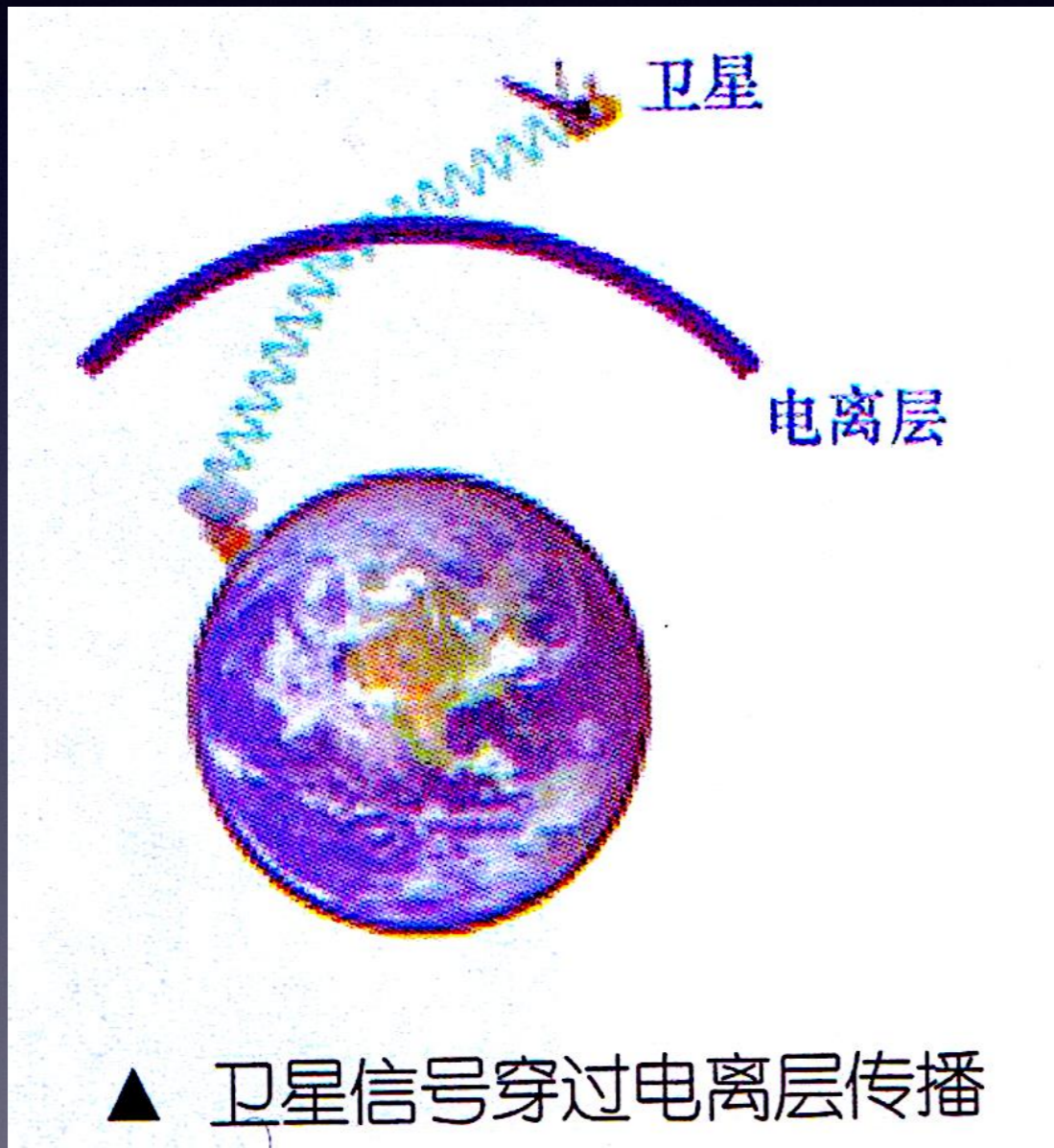


▲ 利用地海面—电离层波导实现
甚长波/超长波对潜通信

电离层对无线通信的影响

电离层对甚长波直到10GHz以下的信号的影响：

- ▶ 吸收衰减
- ▶ 闪烁
- ▶ 色散
- ▶ 时延
- ▶ 极化旋转
- ▶ 频率漂移



电离层吸收

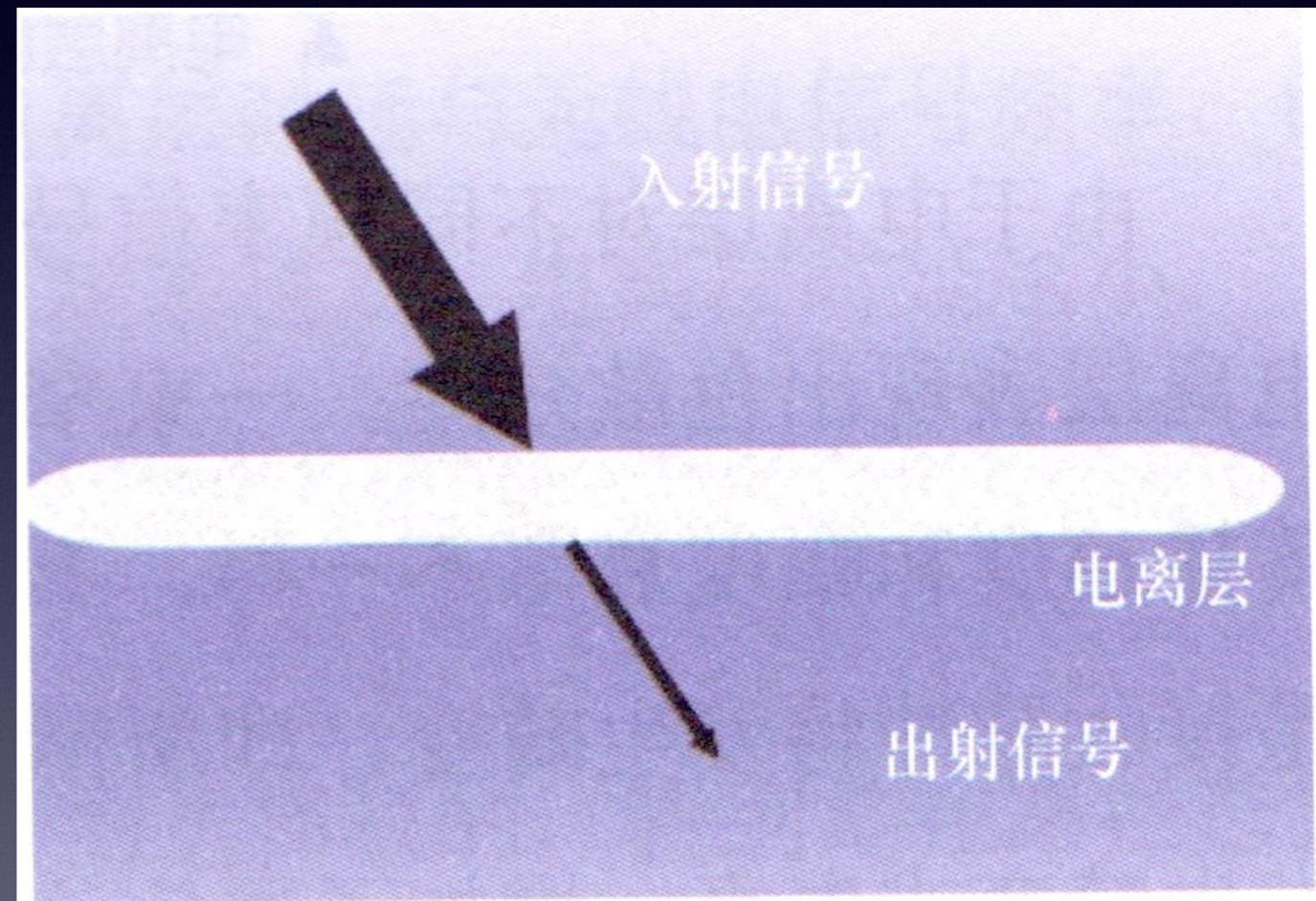
电磁波在电离层中传播



电场矢量引起电子运动



电子与其他粒子碰撞
引起电磁波衰减



▲ 穿过电离层后的信号衰减

电离层色散

一束窄的脉冲：包含不同频率的成分

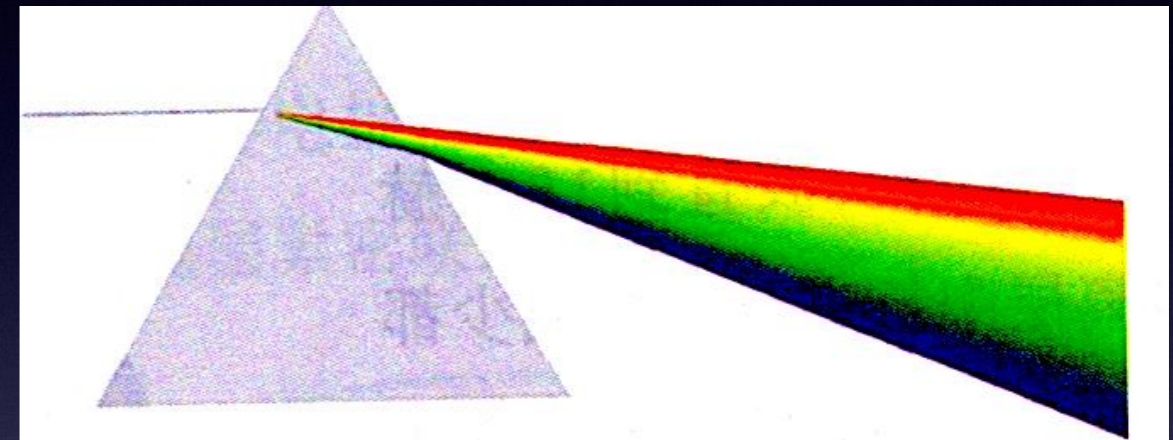


不同频率成分传播速度和幅度衰落不一样

不同频率的信号将不能同时到达接收端



脉冲发生畸变，即色散

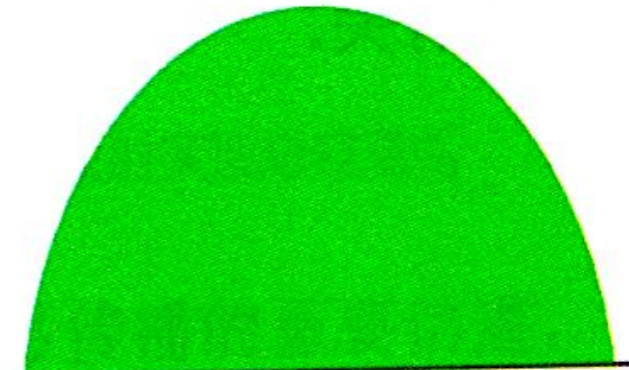


▲ 三棱镜的分光现象

发射脉冲



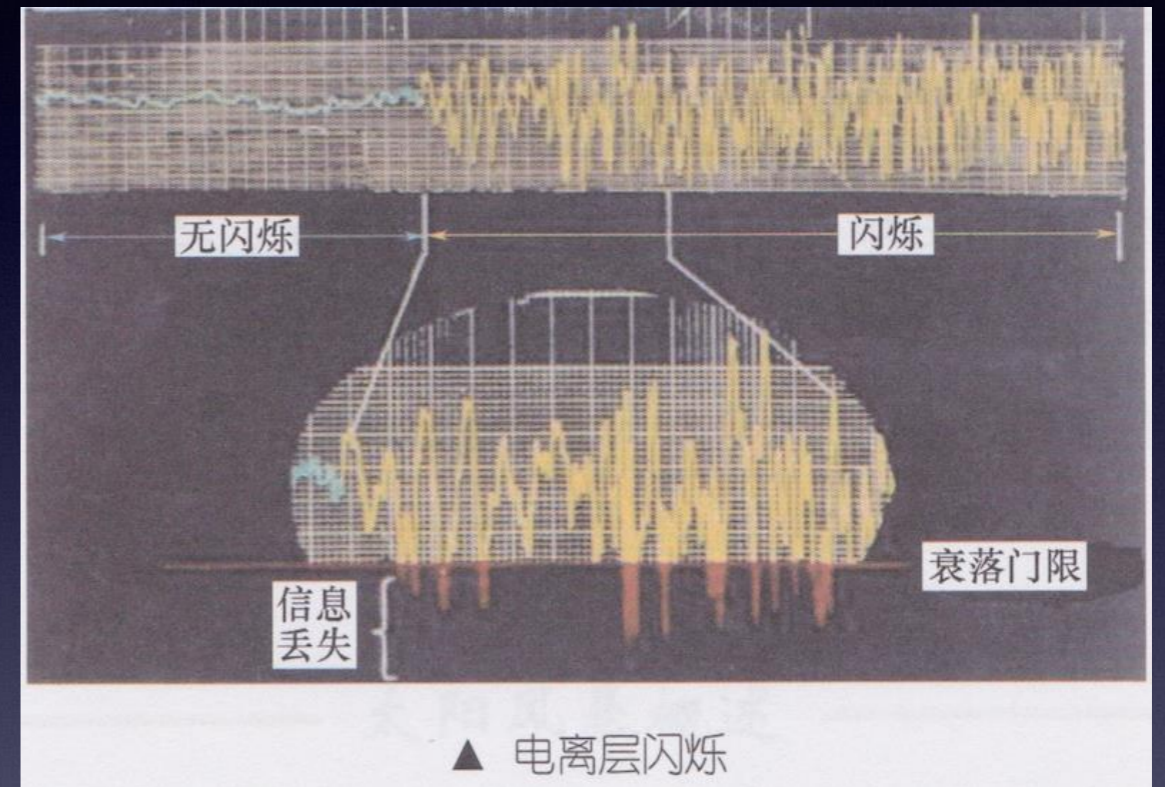
接收脉冲



▲ 电离层色散使无线电信号发生畸变

电离层闪烁

电离层闪烁：电离层电子密度不规则体会导致接收信号幅度、相位、极化等发生快速随机变化



- ▶ 信号的峰值起伏有时可达数十分贝
- ▶ 持续时间几分钟到几个小时
- ▶ 影响30MHz ~ 10GHz频率范围的无线电信号
- ▶ 频率越低，闪烁越强

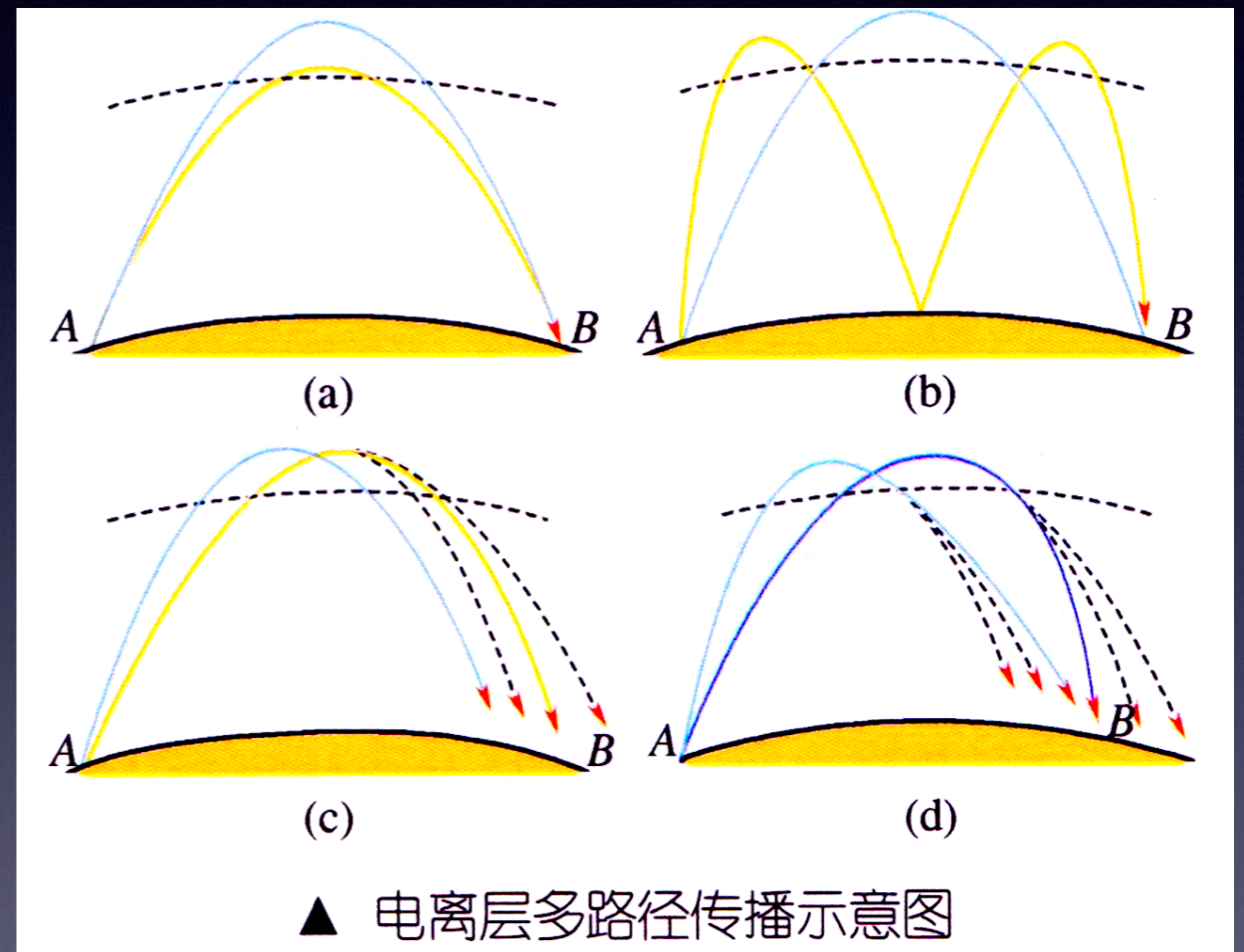
电离层时延

电离层时延： 由于电磁波在电离层中传播的速度小于真空中的速度，引起电磁波在电离层中传播的时间延迟。

- ▶ 与无线电信号频率、传播路径上的总电子含量等有关
- ▶ 频率越高，电离层时延越小

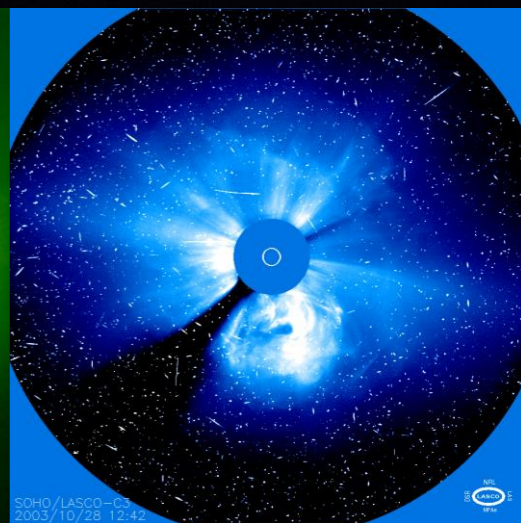
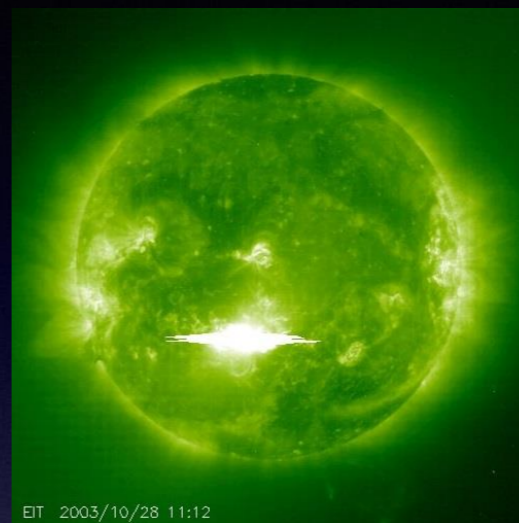
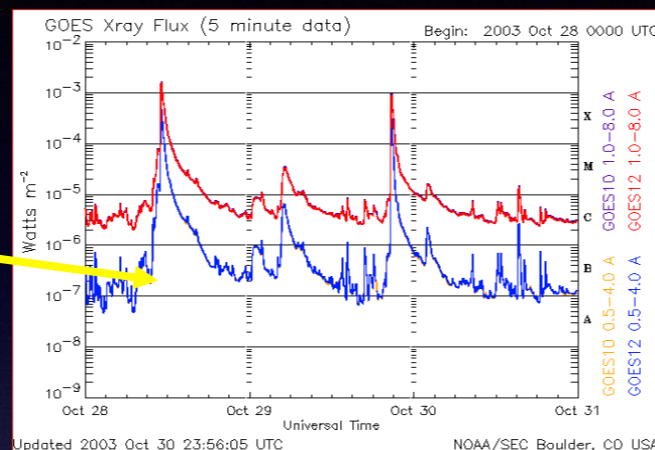
电离层多路径效应

电离层多路径效应：由于电离层的分层结构、加上短波的天线波束较宽，发射的电波波束具有一定的张角，所以电波的多条射线可能在不同的 height 被反射而反射到达同一个接收点，因此在一条通信电路中存在着多种传播路径。

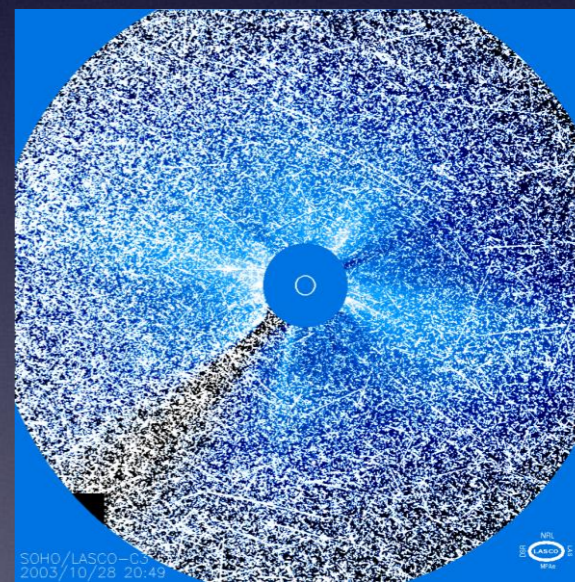
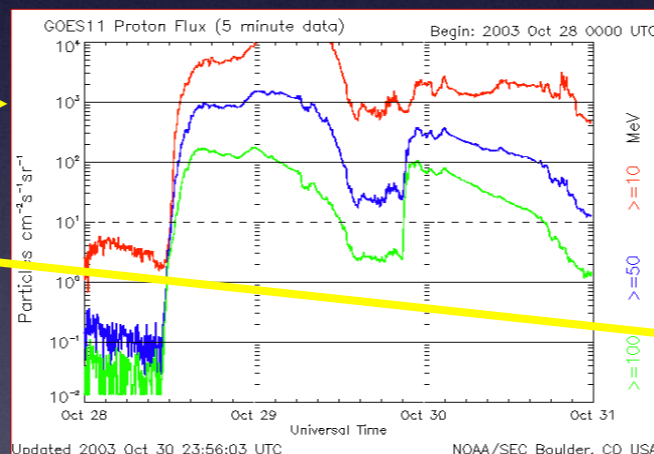


太阳爆发对地球的三轮攻击

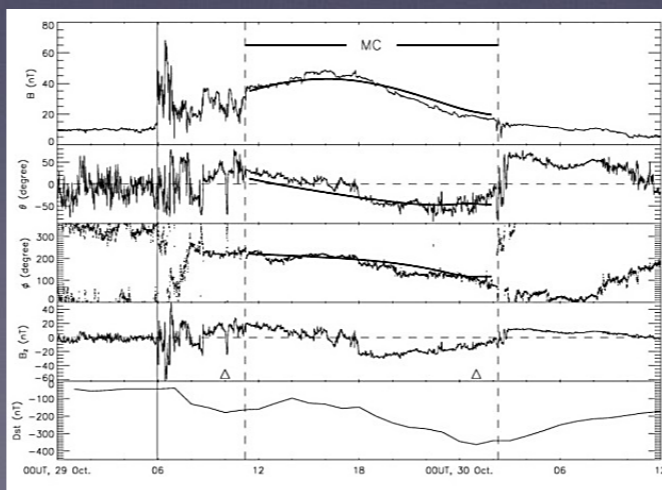
★ **8分钟后软X射线**
流量剧增



★ **1小时后高能质子**
通量增加, 8小时
后形成雪暴



★ **1天后CME到达**
地球, 造成近-
400nT特大地磁
暴



2003年10月28
日万圣节事件

太阳爆发对地球的三轮攻击

★ **8分钟后**软X射线流量剧增 → **辐射** → **电离层突然骚扰**

★ **1小时后**高能质子通量增加，**8小时后**形成雪暴 → **高能粒子** → **极盖吸收**

★ **1天后**CME到达地球，造成近-400nT特大地磁暴 → **等离子体** → **电离层暴**

电离层突然骚扰

紫外线和X射线增强



电离层D层密度增加

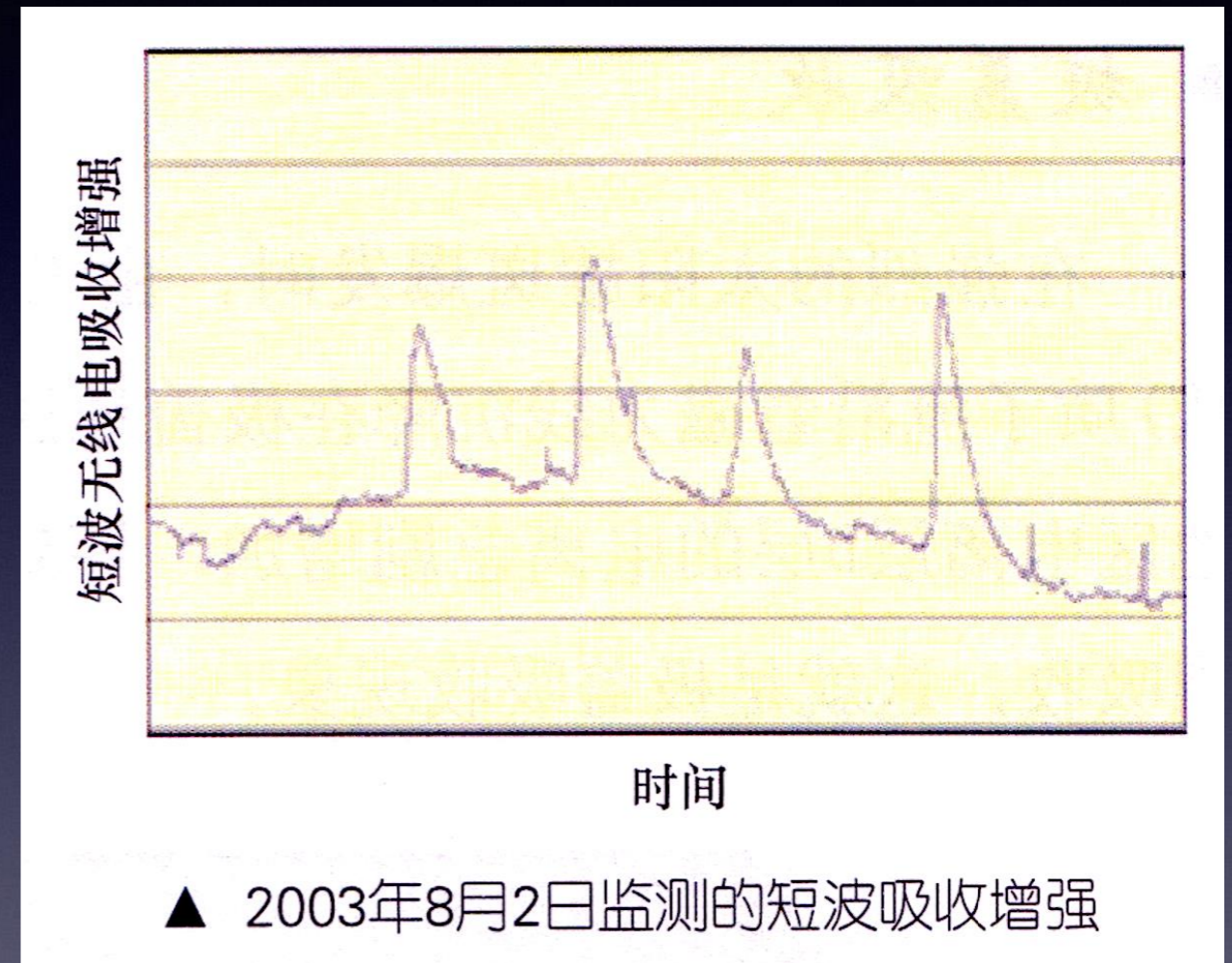


无线电信号的突然骚扰

★ 短波吸收突然增强

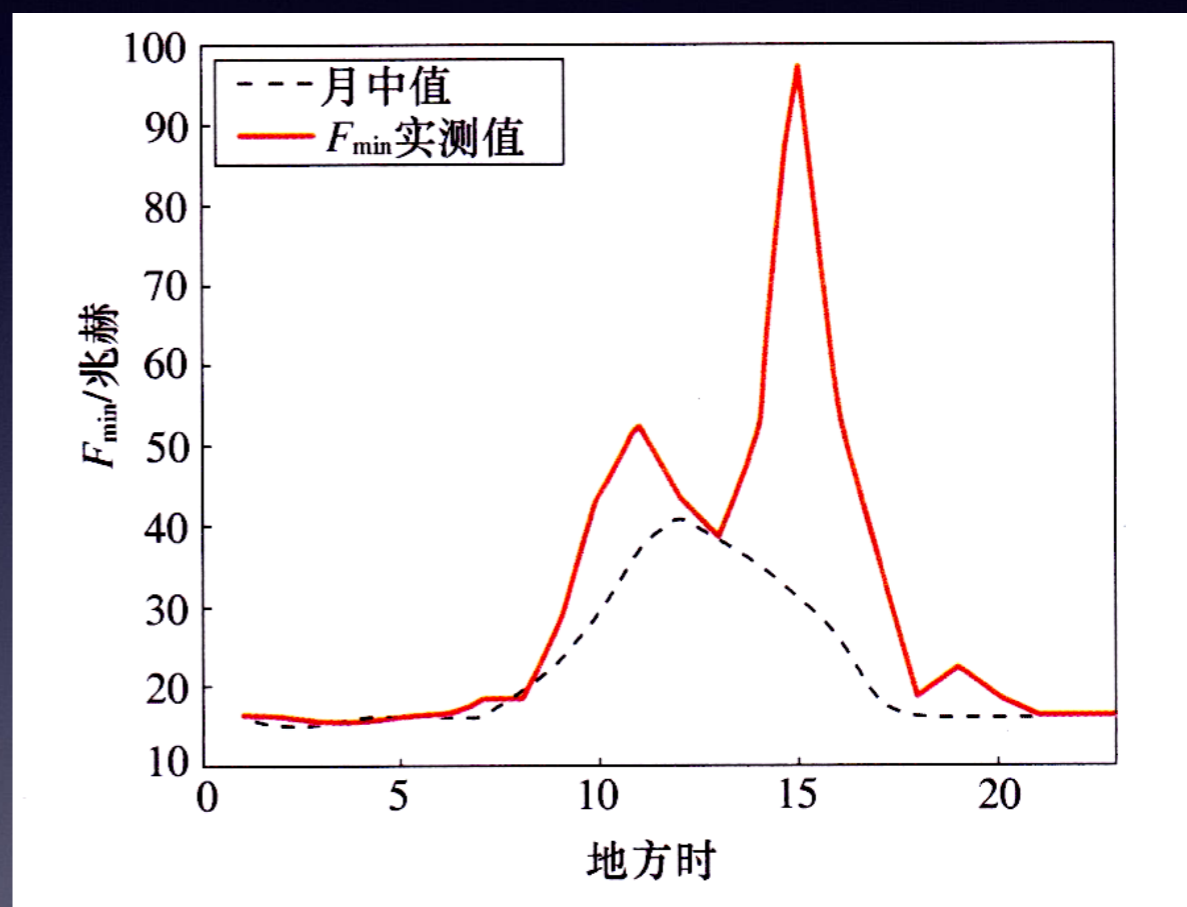
★ 短波吸收突然相位异常

★ 短波吸收突然频率漂移



电离层突然骚扰

电离层最低可测频率(f_m): 地面垂直探测电离层结果图中描迹的最低频率 f_m 称最小起测频率。小于这个频率的回波强度低于可记录电平。 f_m 与测高仪的放大系数、灵敏度、噪声电平和电离层吸收有关。如果采取适当定标措施, 这个参数可以作为吸收的指示量。



2003年10月26日发生电离层突然骚扰时最低可测频率急剧上升

极盖吸收

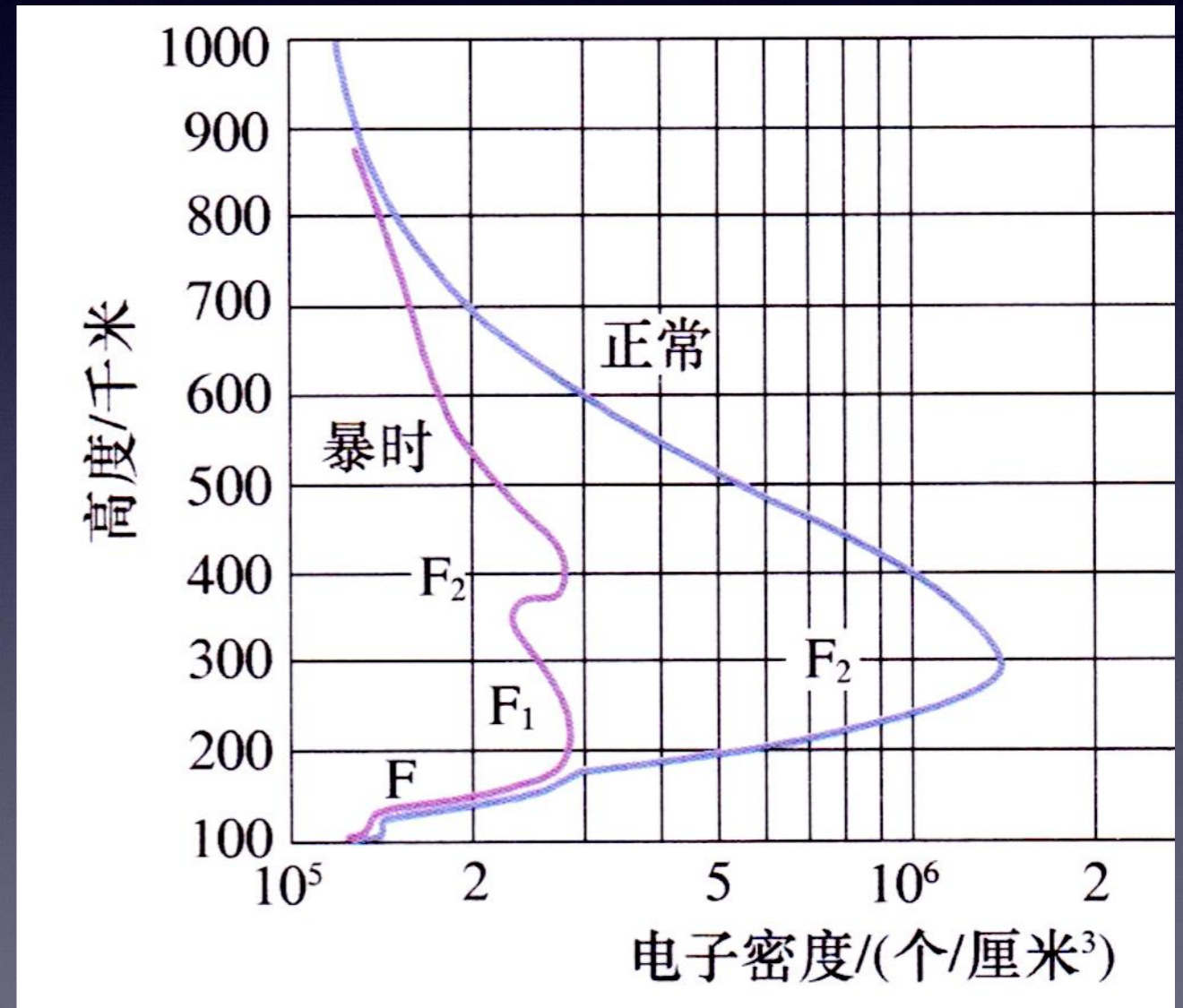
极盖吸收：在强烈的太阳耀斑爆发时，喷射出来的**高能质子流**沿着地磁力线沉降在极盖区上层大气中，使极盖地区D层(高度约60~90km)的电离急剧增大，通过极盖地区电离层的无线电波被强烈吸收，常使无线电通信中断的现象。



极盖吸收可能干扰跨极区航线的通信和导航

电离层暴

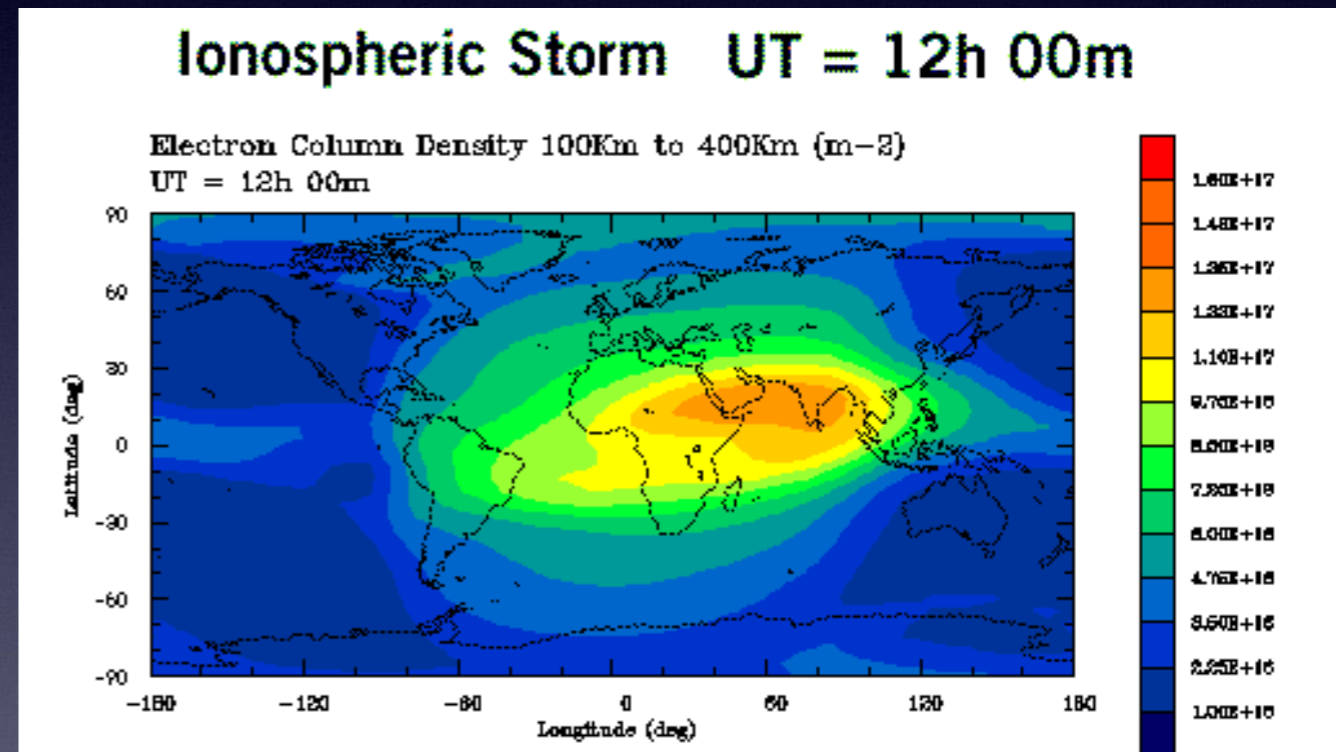
类型	电离层电子密度
正暴	显著增加
负暴	显著减小
双向暴	增加和减小交替出现



电离层暴

电离层暴：伴随磁暴发生的电离层全球性扰动，一般用F区电子密度的变化来表示。

- ▶ **开始阶段**：相关磁暴发生后临界频率有所增加
- ▶ **负相阶段**：临界频率减少到正常值以下，并在午夜前减少到最小值，午后有增加的趋势
- ▶ **恢复阶段**：日变化减弱，扰动与局域地方时相联系



电离层暴形成的机制仍不清楚！

电离层影响无线通讯的事例

- ▶ 1984年4月 里根总统访华通讯中断
- ▶ 1989年3月 造成数十次全球短波通信中断
- ▶ 2001年4月，绝大多数短波通信受到影响，多次出现短波通信中断现象
- ▶ 2003年10月，向日面地区短波中心平均中断约10小时，61%卫星通信发生异常



太阳风暴攻击下的幸存者

★ 流星余迹通信

流星与大气产生摩擦使
自己发热而燃烧



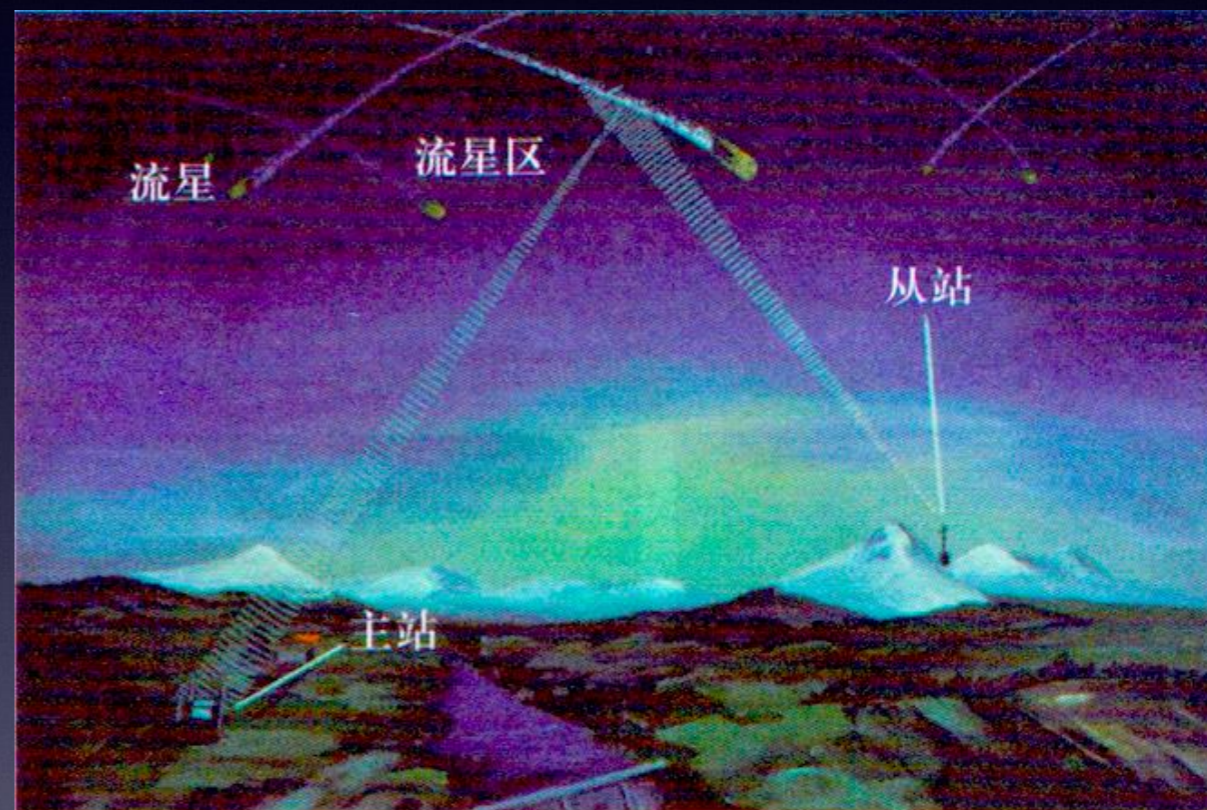
燃烧过程蒸发具有高
能量的分子



分子撞击周围气体分子
使之电离



流星余迹可反射或散射无
线电信号

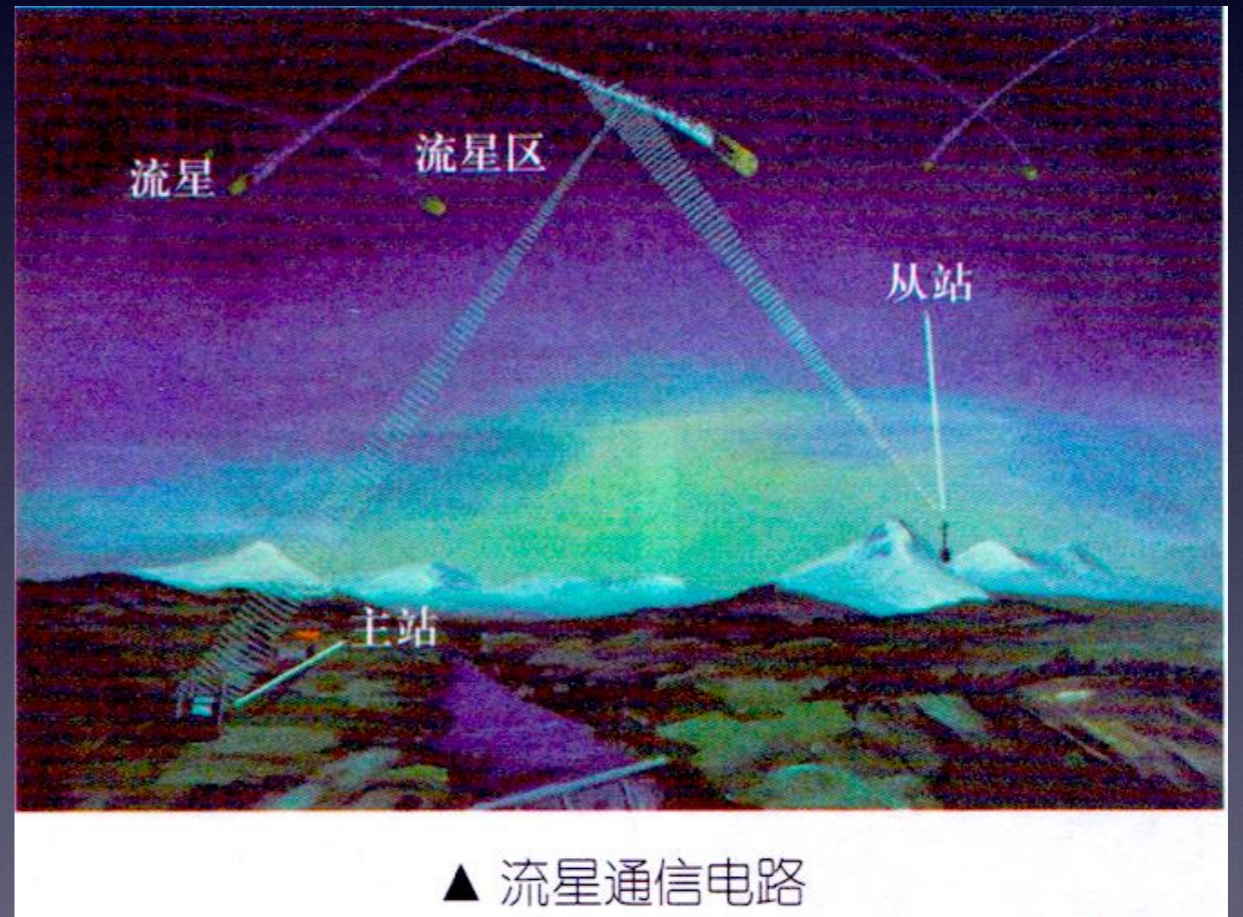


▲ 流星通信电路

太阳风暴攻击下的幸存者

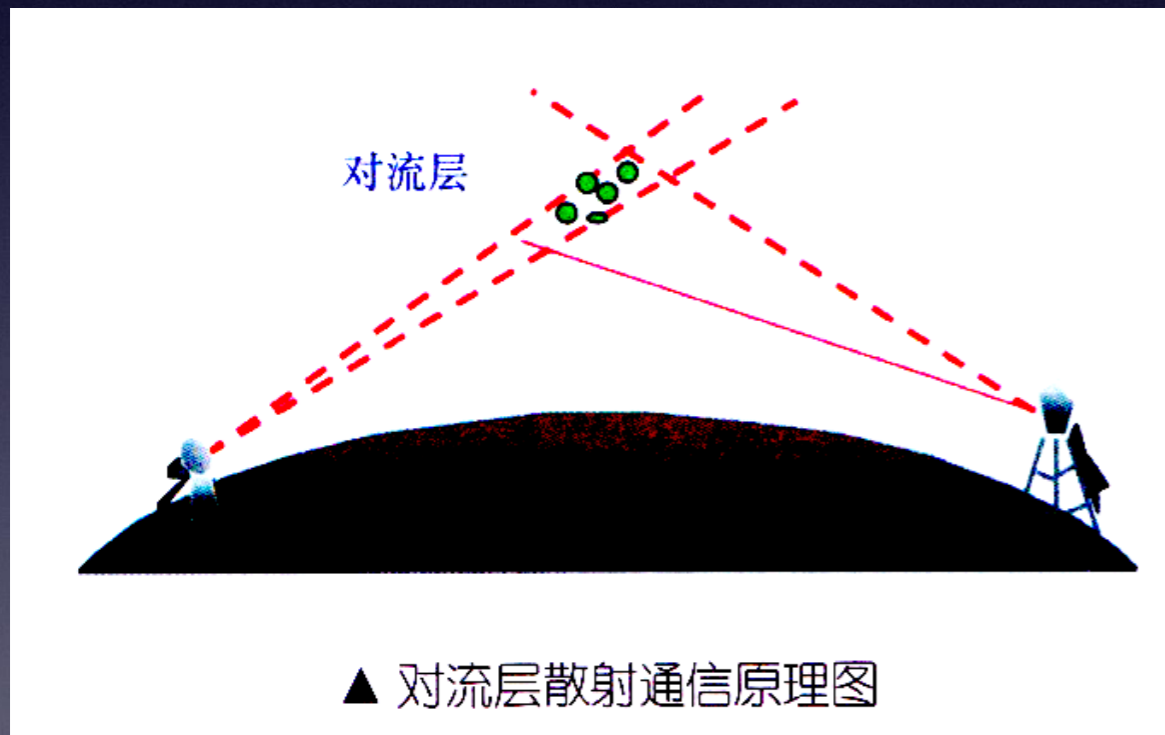
★ 流星余迹通信

- ▶ 通信距离远
- ▶ 保密性强
- ▶ 抗电子干扰
- ▶ 成本低廉
- ▶ 不受电离层影响



太阳风暴攻击下的幸存者

★ 对流层散射通讯



- ▶ 利用对流层大气不均匀层结对无线电信号的散射，可实现超视距远距离散射通信
- ▶ 常用频段：100MHz - 10GHz
- ▶ 实用距离：一般300km，最远1000km
- ▶ 传输带宽：数百Hz — 几GHz（语音、数据、电视等信号）
- ▶ 数据传输可靠度可达 99.9%

太阳风暴攻击下的幸存者

★ 对流层散射通讯

- ✓ 适中的传输容量、传输质量和可靠度
- ✓ 特别强的抗核爆能力



★ 与其他通讯的比较

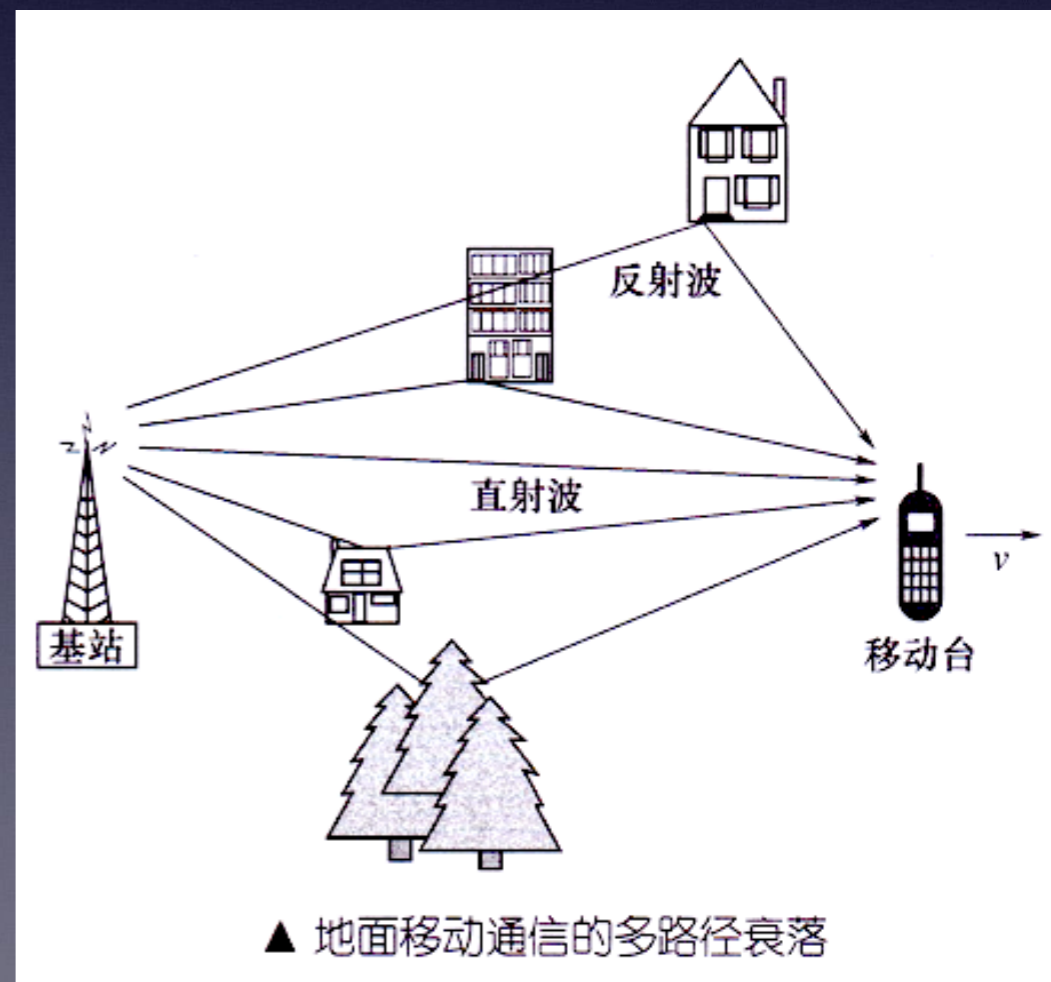
	传输容量	传输质量	传输距离	可靠度
短波通信	✓	✓	X	✓
微波接力传输	X		✓	
卫星传输	X		X	✓

太阳风暴攻击下的幸存者

★ 地面移动通信

移动通信：在通信中一方或双方均处于移动状态的通信状态，包括移动体和移动体之间的通信，移动体和固定点之间的通信

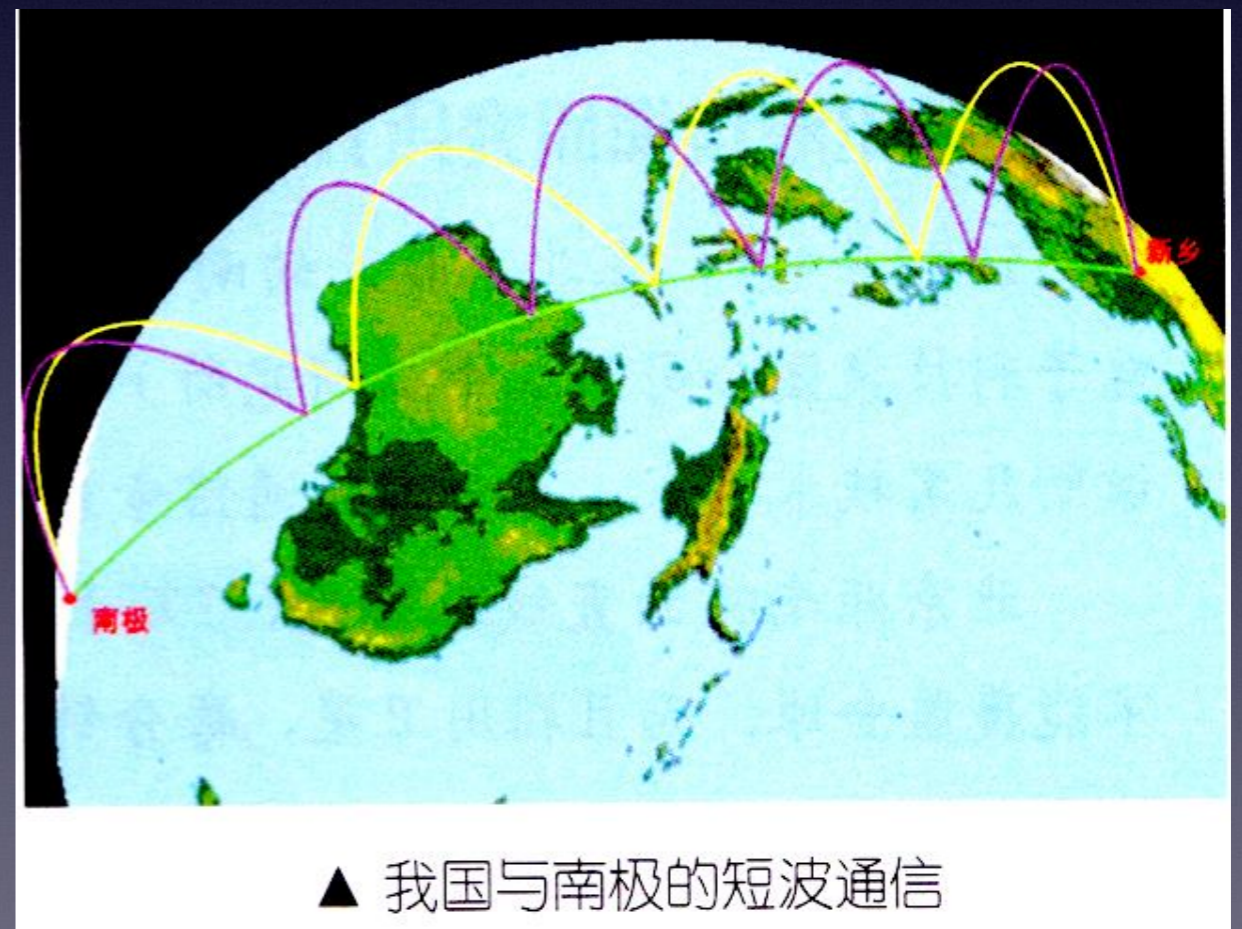
- ▶ 移动通信的无线电波传播环境复杂，具有多路径衰减、多普勒效应等复杂的传播效应
- ▶ 移动通信可利用的频谱资源非常有限，而移动通信的业务量的需求与日剧增
- ▶ 移动通信系统的网络结构多种多样，网络管理和控制必须有效



2、太阳风暴对短波通信的影响和应对

短波通信：利用短波(3MHz-30MHz)无线电波进行信息传输的一种通信技术，也称高频通信

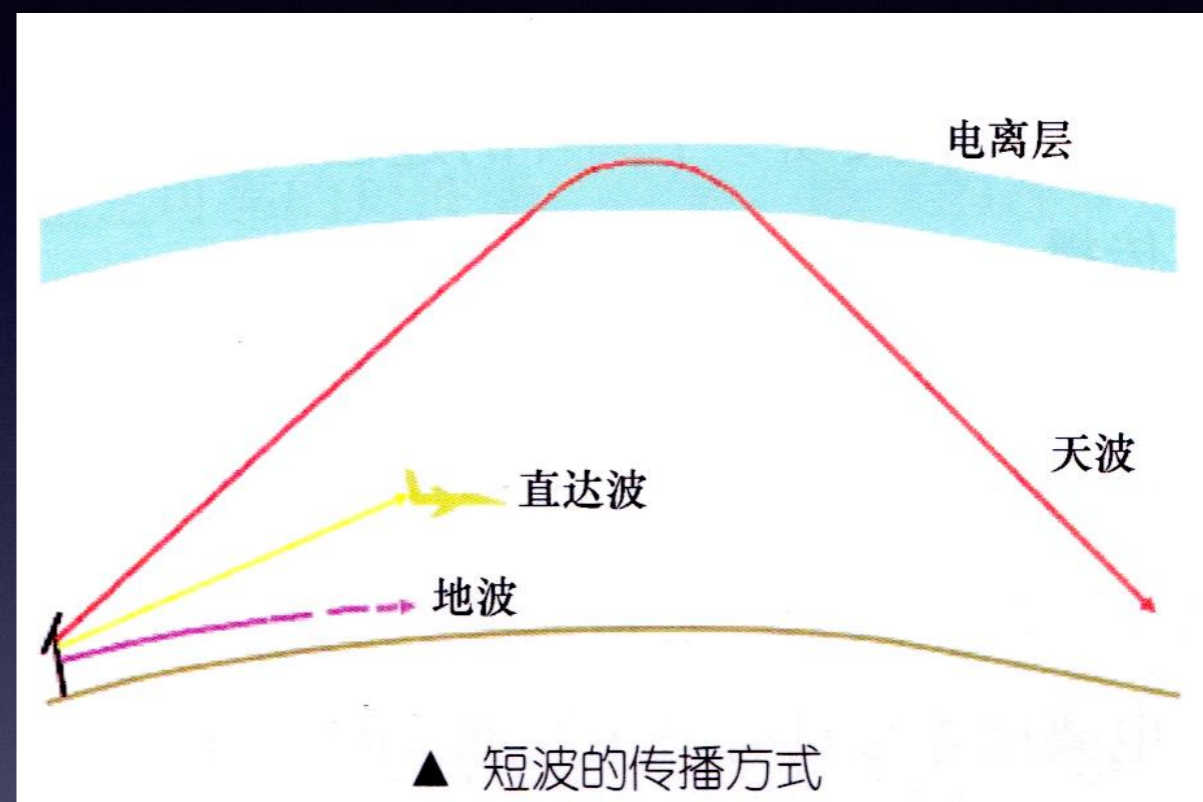
- ▶ 通信距离远
- ▶ 设备简单、成本低、使用方便、机动性强、能够在短时间内迅速有效的组网
- ▶ 抗摧毁能力强
- ▶ 适应能力强



电离层—短波通信的空间桥梁

短波通信的主要传播方式

- ★ **地波：**沿大地与空气的分界面贴地传播的电波
- ★ **空间直射波**
- ★ **电离层反射波**

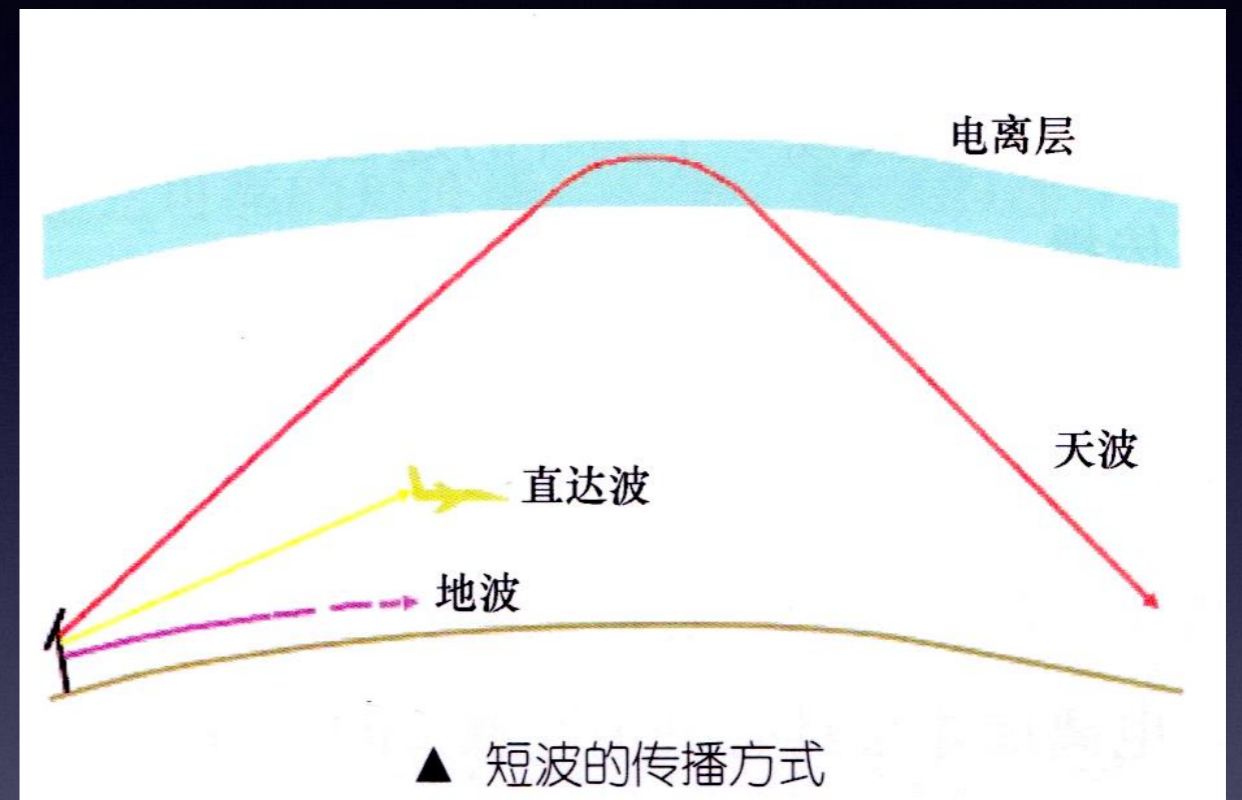


- ▶ 传播距离不远，不易于无线电广播和远距离通信
- ▶ 不受气候影响，可靠度高
- ▶ 最远通信距离可达上千千米左右

电离层—短波通信的空间桥梁

短波通信的主要传播方式

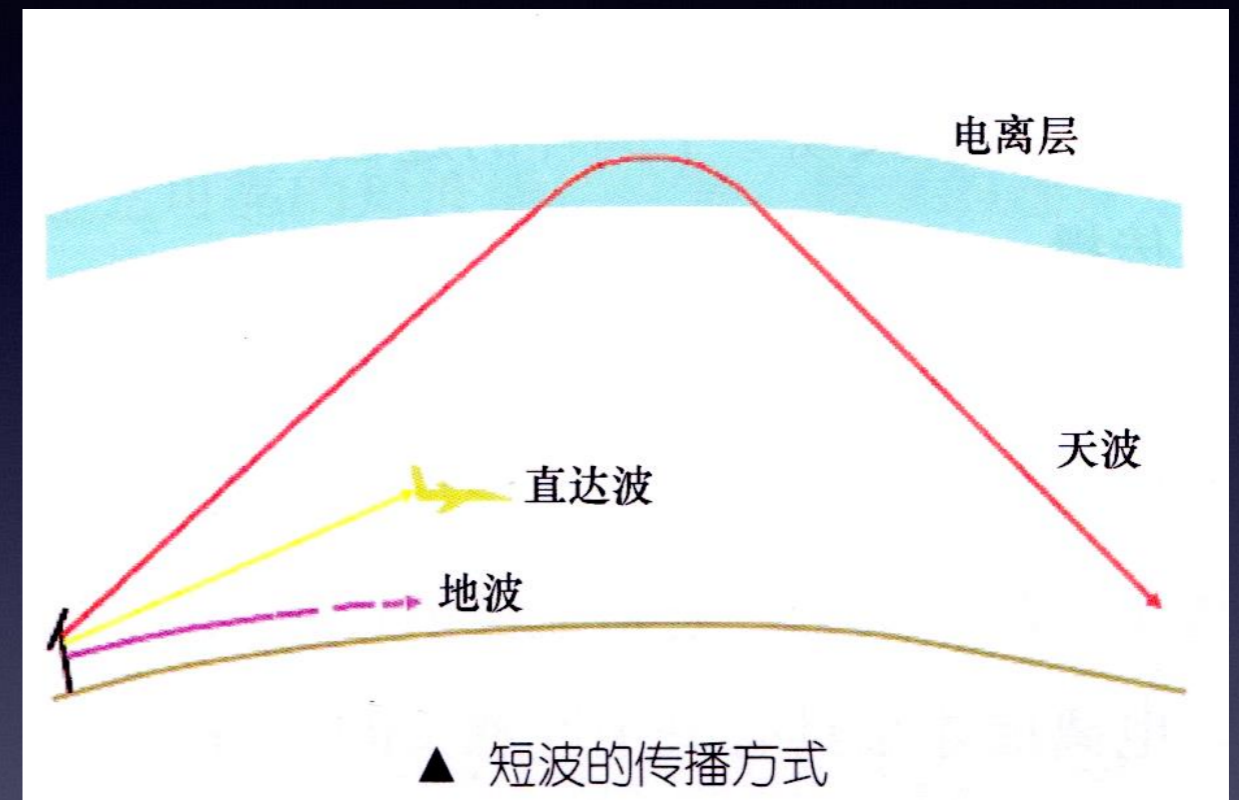
- ★ 地波
- ★ 空间直射波:传播距离
限于视距范围
- ★ 电离层反射波



电离层—短波通信的空间桥梁

短波通信的主要传播方式

- ★ 地波
- ★ 空间直射波
- ★ 电离层反射波:靠电离层的一次或多次反射而实现远距离传输



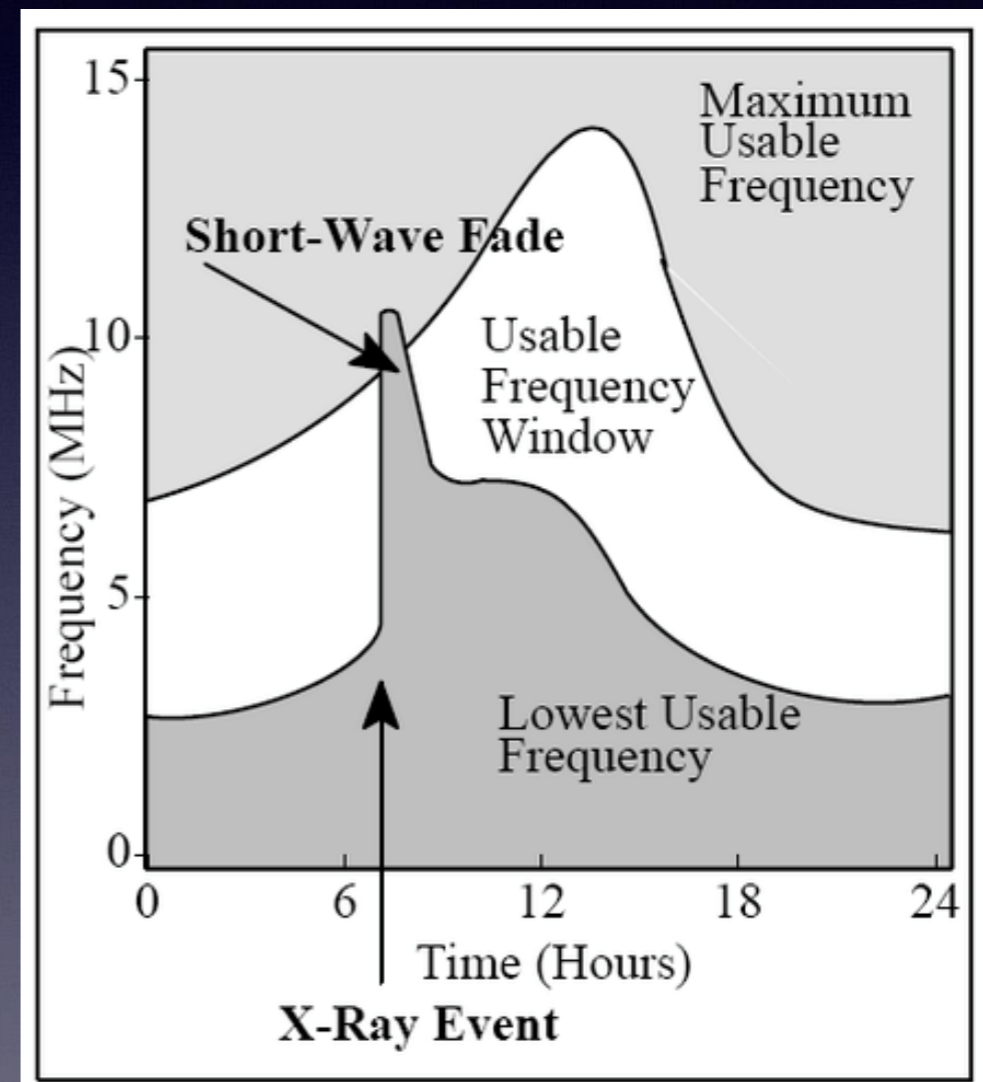
受电离层的影响显著!

短波可用频段和工作频率

最高可用频率(MUF)

基本MUF: 超过此频率电波将穿透电离层不能发射回地面

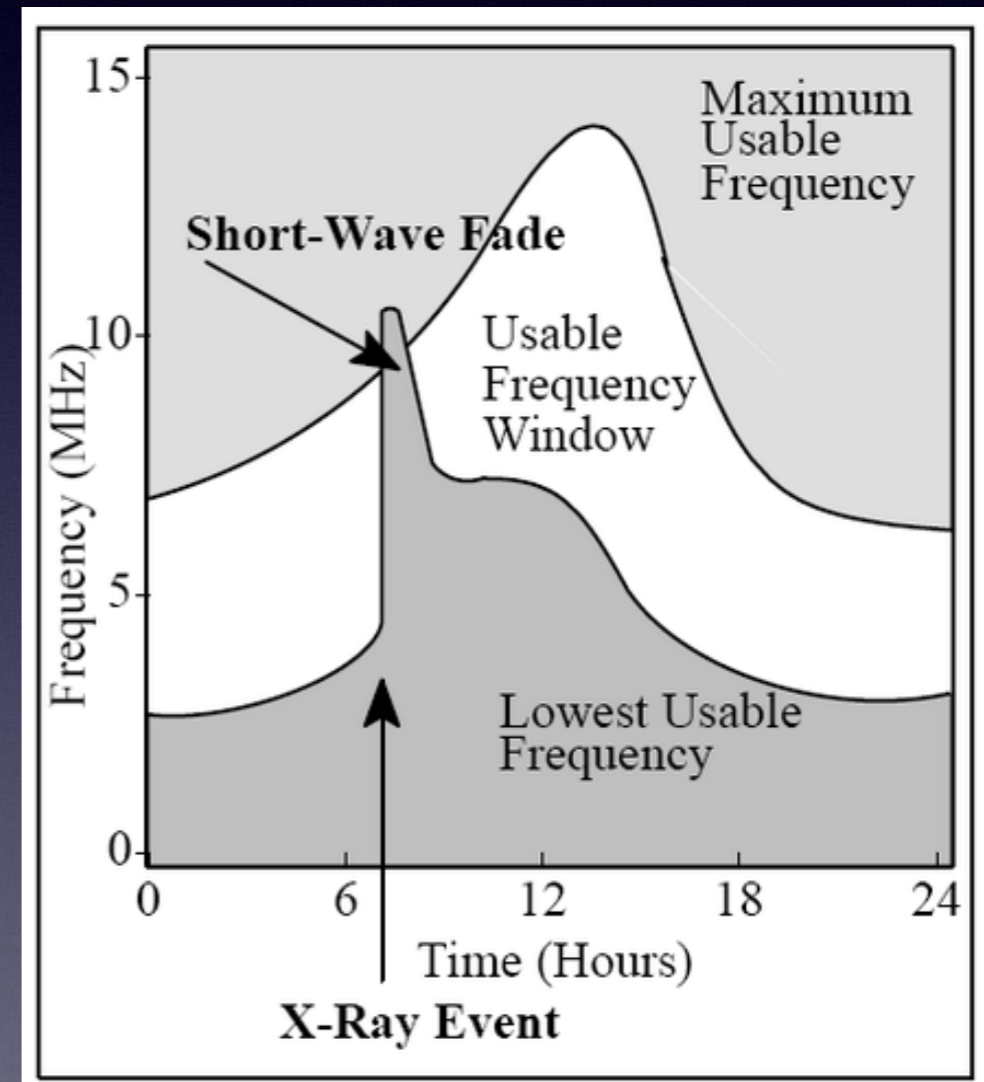
工作MUF: 其他一些传播机制以及电离层观测的误差和理论公式带来的高于MUF频率的波段被反射



短波可用频段和工作频率

最低可用频率(LUF)

最低可用频率：在给定的时间和特定的工作条件下，经电离层传播到达接收点处的信噪比等于最低所需信噪比时的频率

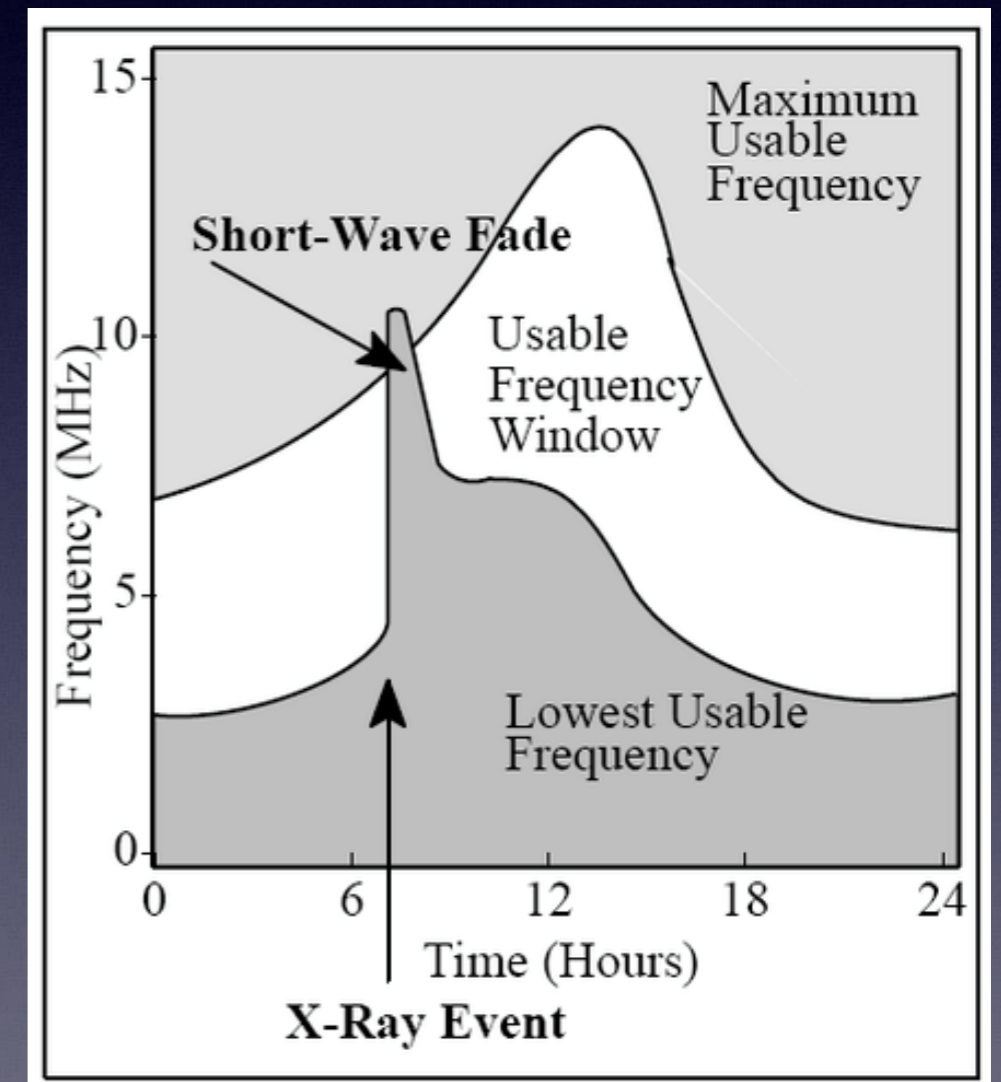


短波可用频段和工作频率

最佳工作频率(OWF)

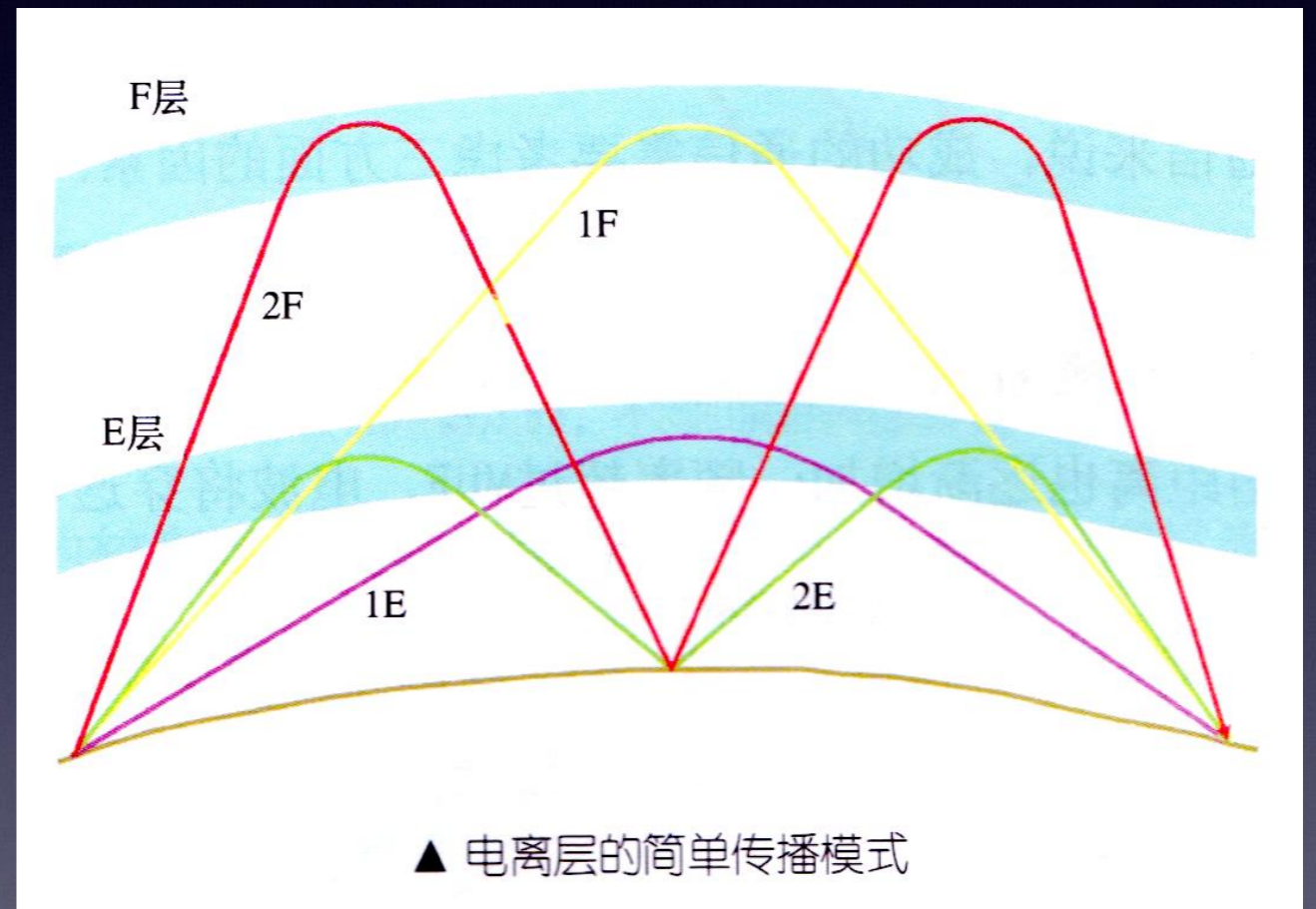
最佳工作频率： MUF的月中值乘以0.85

- ★ 使用最佳工作频率是：一个月内大约有90%的概率能到达指定的接收点
- ★ 0.85为最佳频率因子，与地理纬度、太阳活动性、季节、一天中的时间不同而变化



短波天线传播模式

- ★ 无线电波通过电离层反射一次到达地面接收点(或反射点), 称为**一跳**, 一跳的地面距离称为**跳距**, 而经过多次反射的则称为**多跳**。
- ★ 对于特定的反射层, 具有最少跳数的模式称为**一阶模式**, 比一阶模式多一跳的模式称为**二阶模式**。



短波天线传播模式

一跳最长的地面距离：当仰角为0时的一跳距离

E层反射 (高度110KM)

一跳最长距离2000km

F层反射 (高度320KM)



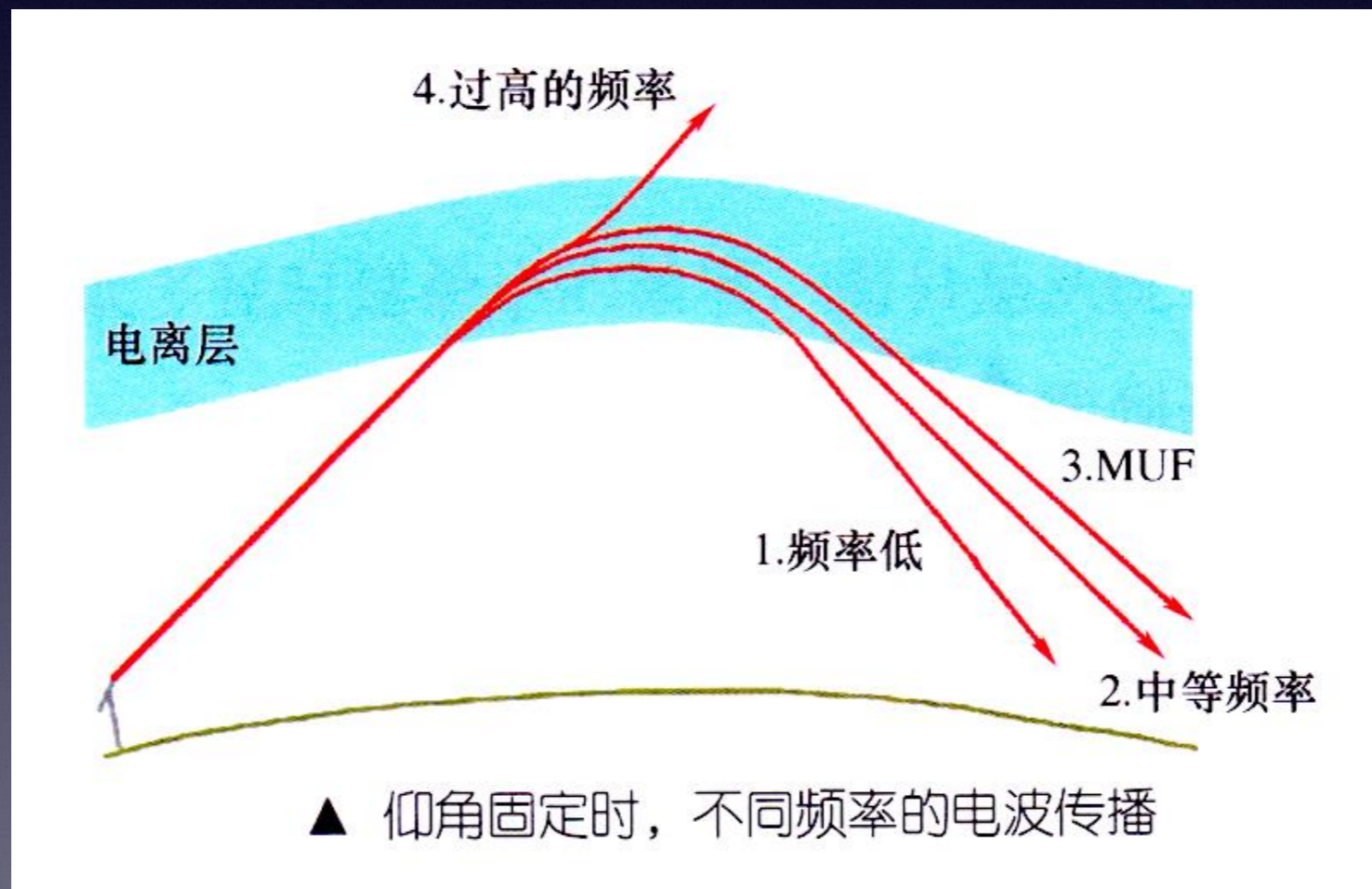
一跳最长距离4000km

通信距离/km	可能的传播模式
0-2000	1E,1F, 2E
2000-4000	2E,1F,2F,1E1F
4000-6000	3E,4E,2F,3F,4F,1E1F,2E1F
6000-8000	4E,2F,3F,4F,1E2F,2E2F

不同通信距离时的可能传播模式

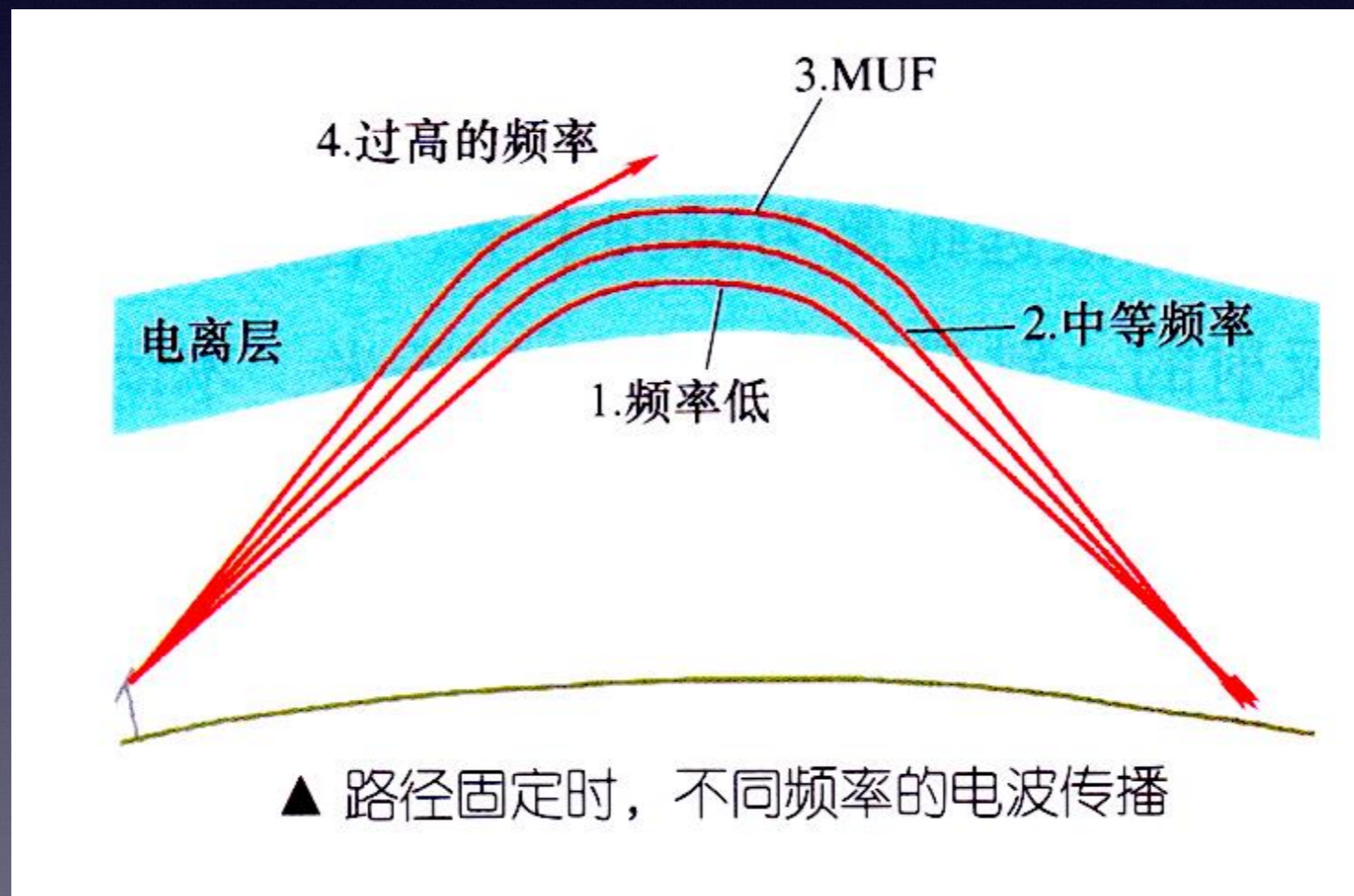
短波天线传播模式

短波通信成功三要素：**频率**、距离、天线仰角



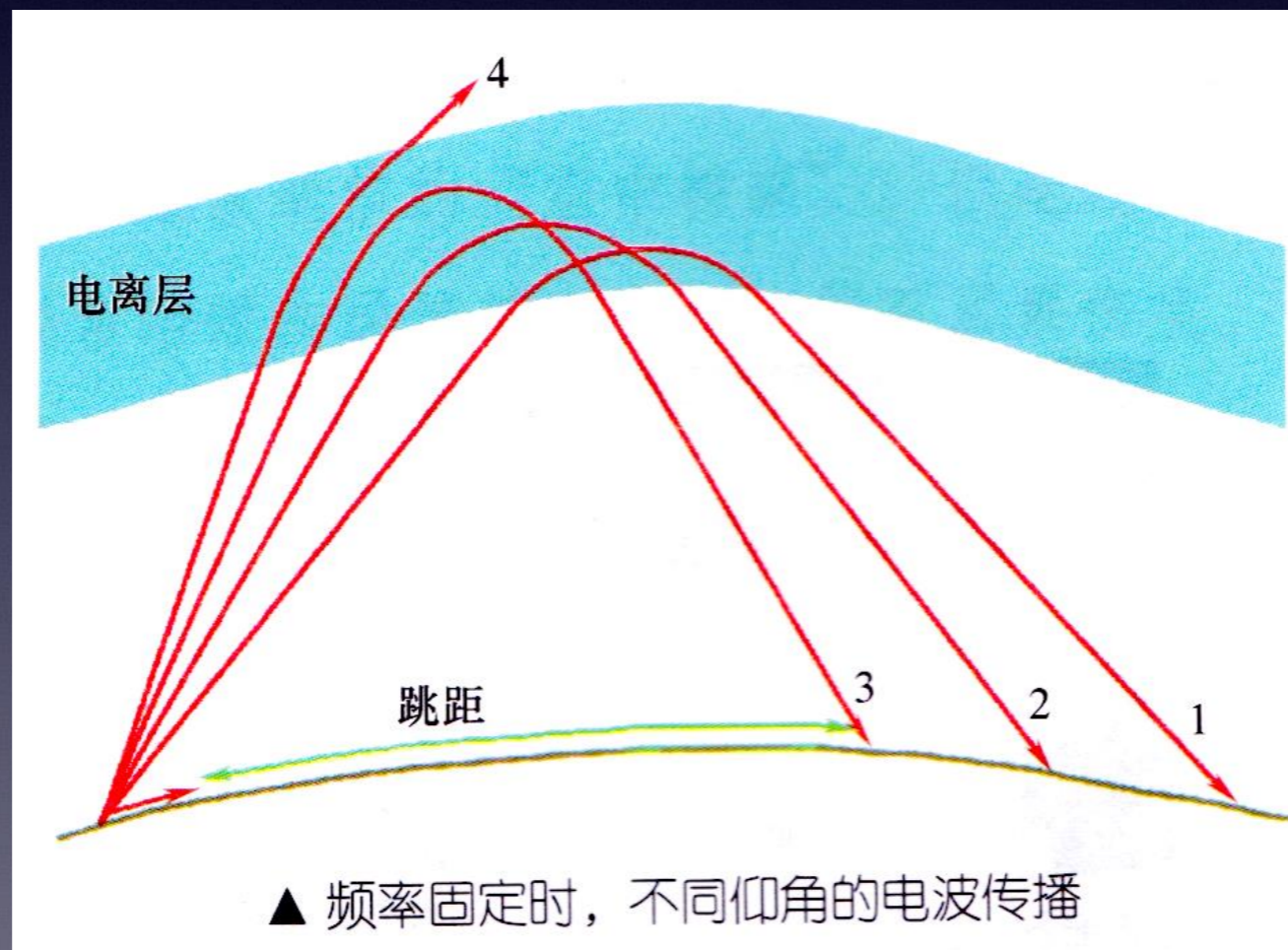
短波天线传播模式

短波通信成功三要素：频率、距离、天线仰角



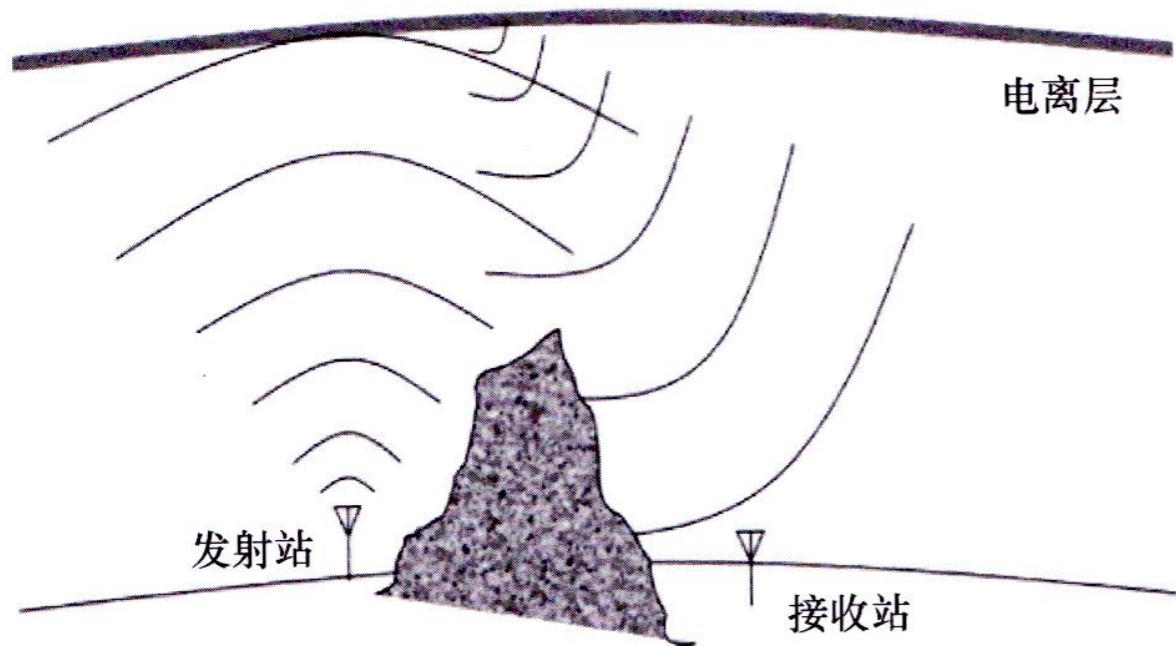
短波天线传播模式

短波通信成功三要素：频率、距离、**天线仰角**



短波天线传播模式

近垂直入射短波通信



▲ 近垂直入射短波通信原理图



当视距传播由于被山峰或地形阻挡时，可利用近垂直入射天波模式进行短波通信。

太阳风暴影响短波通信的事例

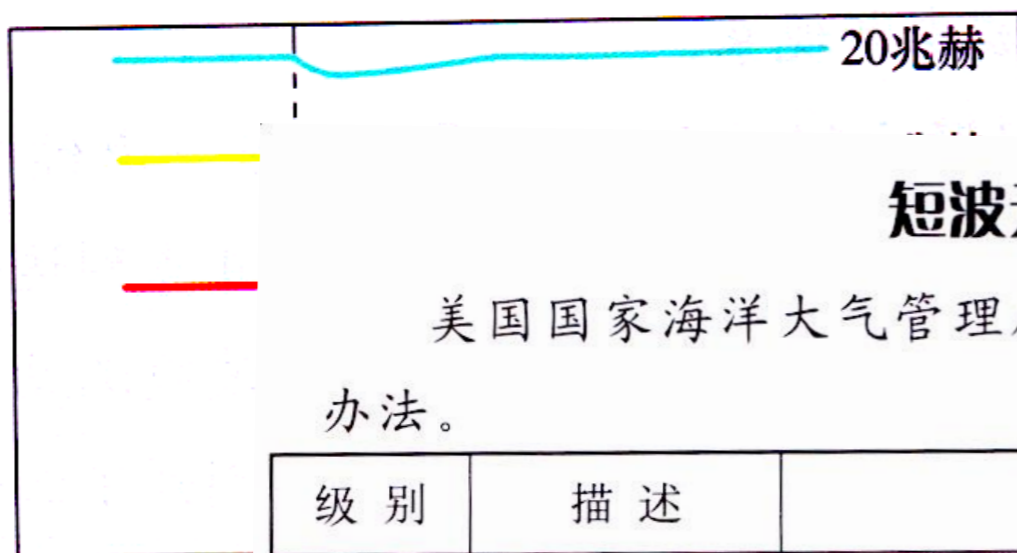
- ★ **1989年3月**：高纬地区短波无线电中断2-3天，低纬地区无线电中断20小时左右，美国国防部短波无线电中断7天，军用航天无线电系统中断超过24小时
- ★ **2000年6月**：我国北方大范围短波通信中断
- ★ **2001年4月**：全球大面积短波通信中断
- ★ **2006年12月**：广州、海南、重庆等电波观测站短波信号全部中断

电离层突然骚扰中断短波通信

造成向地面短波通信中

成大信

信号强度



短波无线电中断的分级评估

美国国家海洋大气管理局 (NOAA) 介绍了短波无线电中断的分级评估办法。

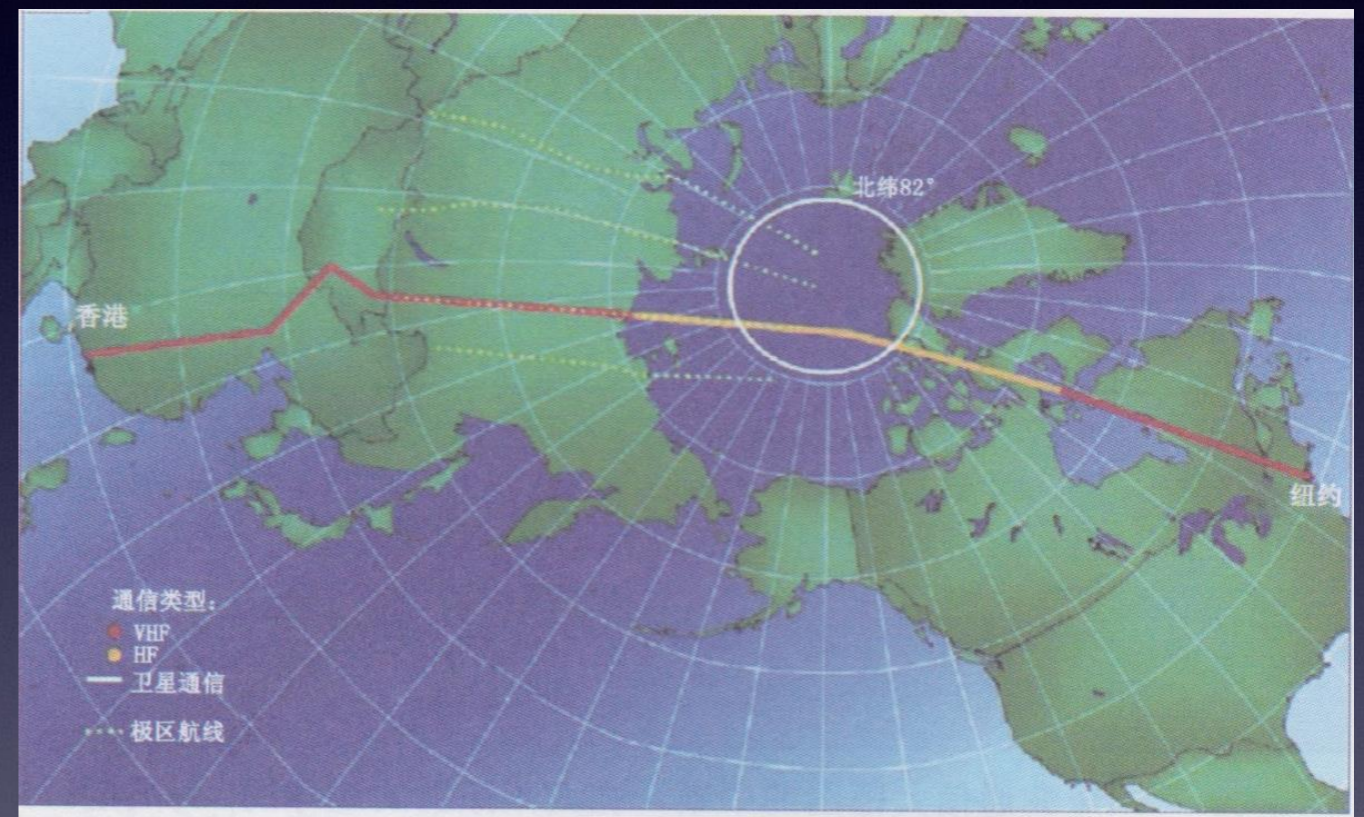
级别	描述	影响	发生次数
R5	极其严重	在太阳能照射到的地球那一面，短波通信中断，并且持续几个小时。导致在此区域的飞行员和海员没有短波通信联络	一个周期少于一次
R4	严重	在太阳能照射到的大部分区域，短波通信中断一到两个小时，在此时间无短波联络	每个周期8次
R3	强烈	短波通信大范围的中断，在太阳照射的地球的那一面大约一小时无短波联络	每周期175次
R2	中等	太阳照射的地球那一面，部分短波通信中断，大约10分钟无短波联络	每周期350次
R1	较小	太阳照射的地球那一面有较小的短波通信性能下降，偶尔无短波联络	每周期2000次

耀斑开始

▲ 太阳耀斑

极盖吸收事件干扰跨极区短波通信

- ▶ **开始时间不同**：电离层突然骚扰后几十分钟至十几个小时后开始
- ▶ **持续时间不同**：持续时间长，可持续数十小时至几天，甚至一个星期以上
- ▶ **影响地区不同**：电离层突然骚扰影响向阳面地区，极盖吸收时间影响两级盖区附近



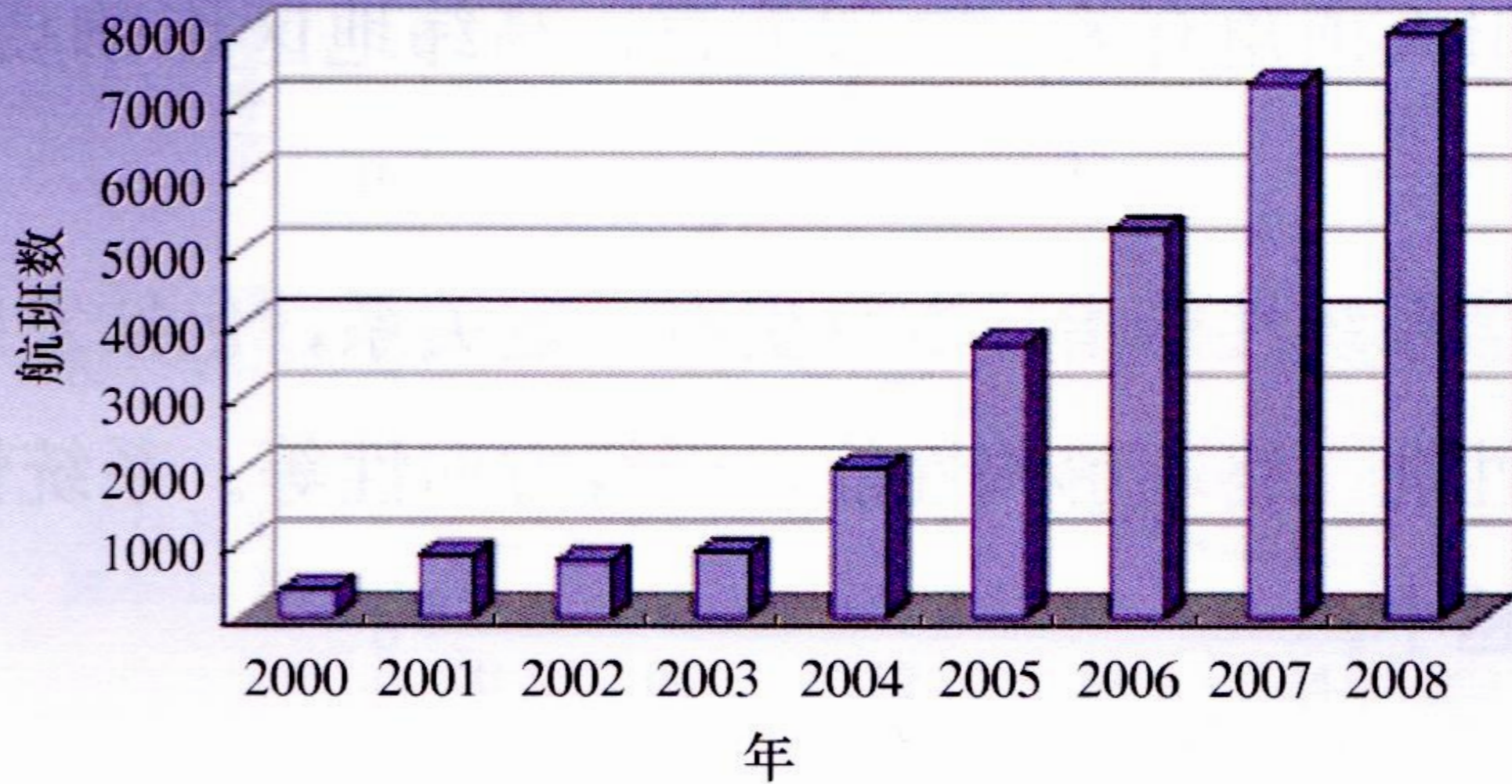
极区航线与使用的通信类型

极盖吸收事件干扰跨极区短波通信

- ▶ **2003年10月19日**：所有短波网络受到中到强的影响，造成短波通信服务降级超过2个小时，导致航班路线转到可使用数据链和卫星通信的极区航线，需要额外**26600磅**燃油，导致减少运输**16500磅**的货物
- ▶ **2003年10月24日**：埃德蒙顿飞行控制中心发布航空情报，严格限制极区航线业务；联合航空公司从芝加哥到香港的895次航班调整航线，多花30分钟飞行时间，多消耗**3000加仑**燃油
- ▶ **2005年9月7日**：造成地球向日面半球的短波通信完全中断，芝加哥到香港的航班不得不转向安克雷奇，使得航班延误3个小时，每架飞机额外消耗超过**25万美金**。

极盖吸收事件干扰跨极区短波通信

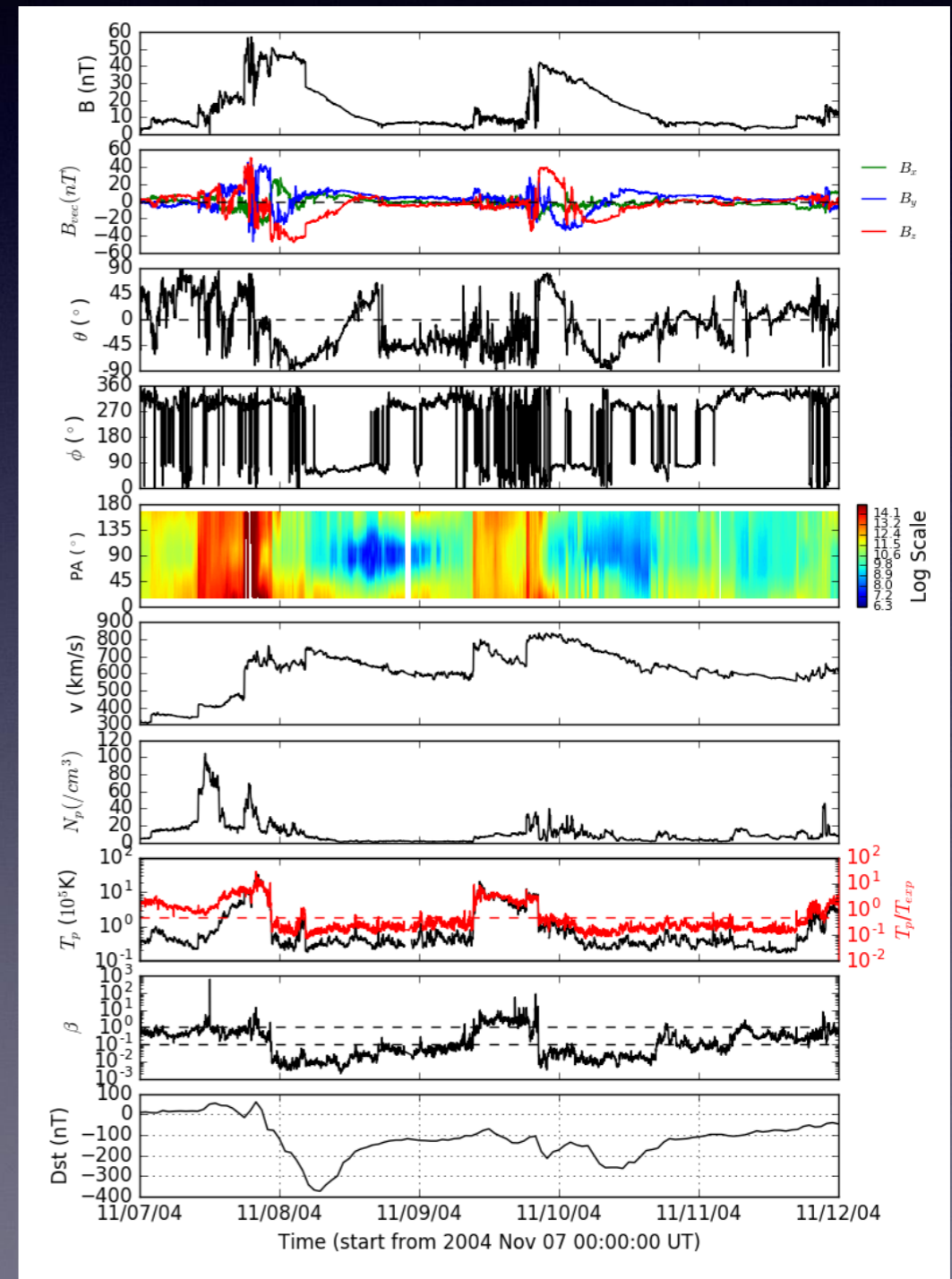
极区航班流量



电离层扰动是短波可用频段变窄

2004年11月电离层暴:中高纬地区电离层的临界频率严重降低

- ▶ 满洲里地区的电离层临界频率从凌晨2时开始下降, 至中午13时仍在继续, 9时以后, 下降幅度普遍超过50%
- ▶ 北京地区的电离层临界频率从8时开始下降, 至下午15时仍在继续, 11时以后, 下降幅度普遍超过50%。



电离层扰动是短波可用频段变窄

可用频段变窄的相关因素：

- ★太阳爆发强度越大，造成可用频段越窄
- ★与太阳天顶角有关，高纬地区影响要小，晚上影响也较小
- ★与通信系统系能指标本身也有一定关系，包括发射功率，接收机灵敏度，抗干扰性能、终端调节性能，天线方向性等。系统性能越优，受影响程度越小。

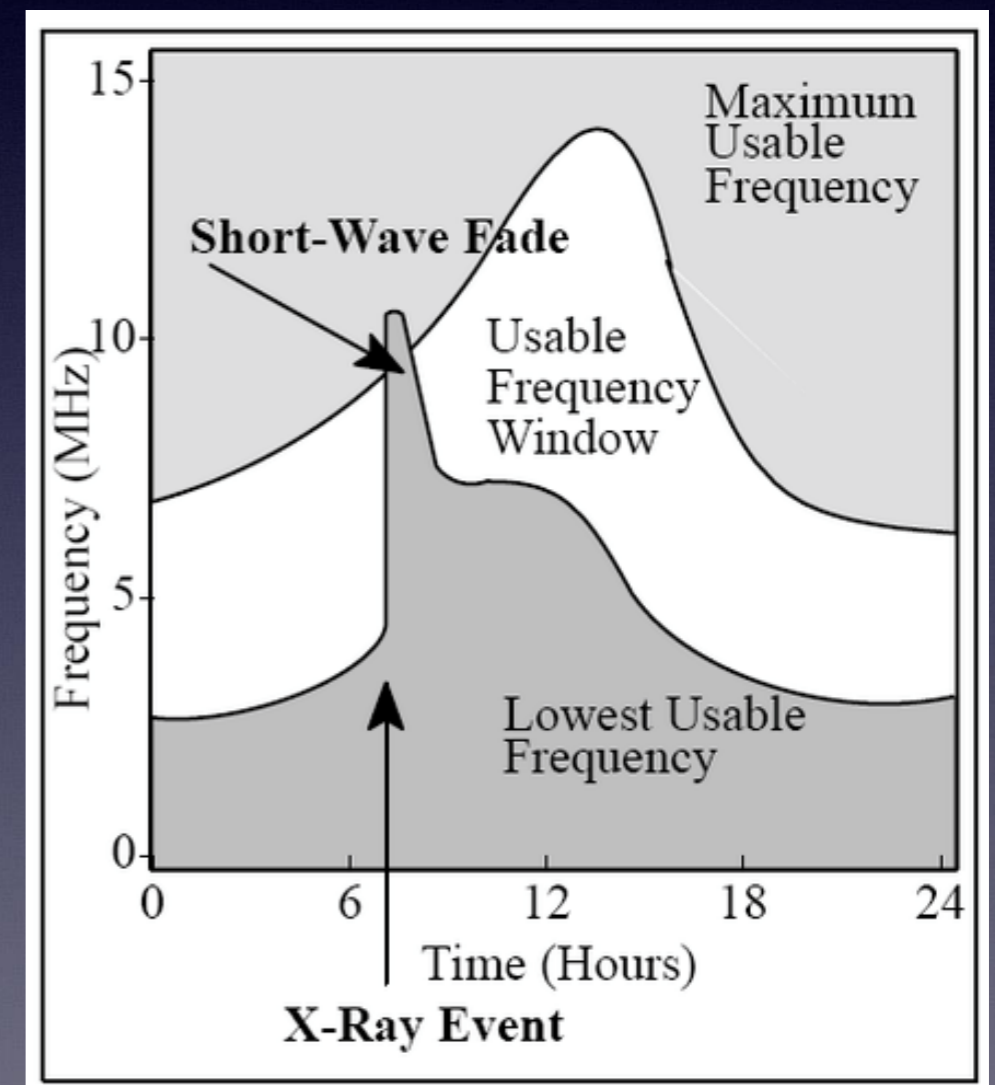
短波通信会怎样

短波通信会怎样

短波通信中断

2006年5月5日电离层暴期间，新疆喀什至南亚(新德里)的17.54MHz、北京至中亚(杜尚别)的17.855MHz短波广播长时间中断

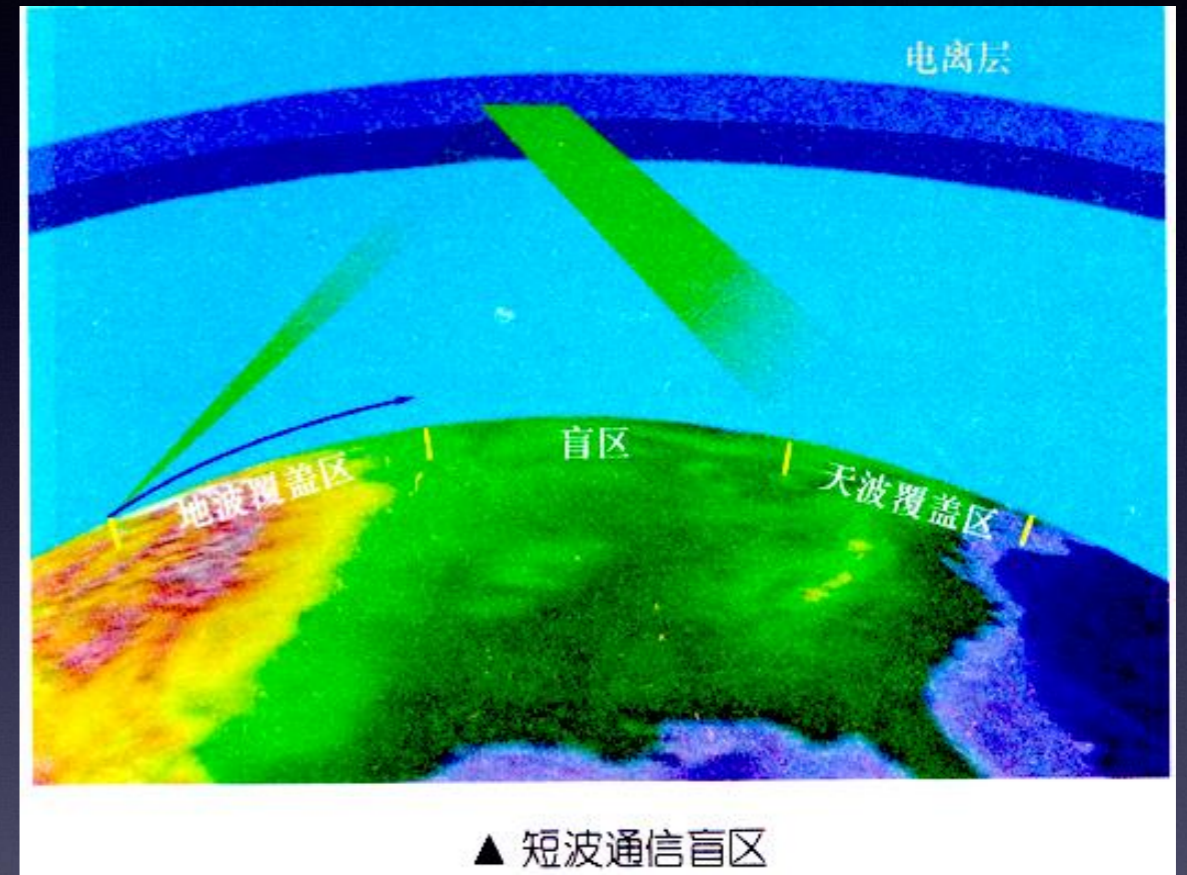
信道拥挤，降低通信质量



短波通信盲区改变

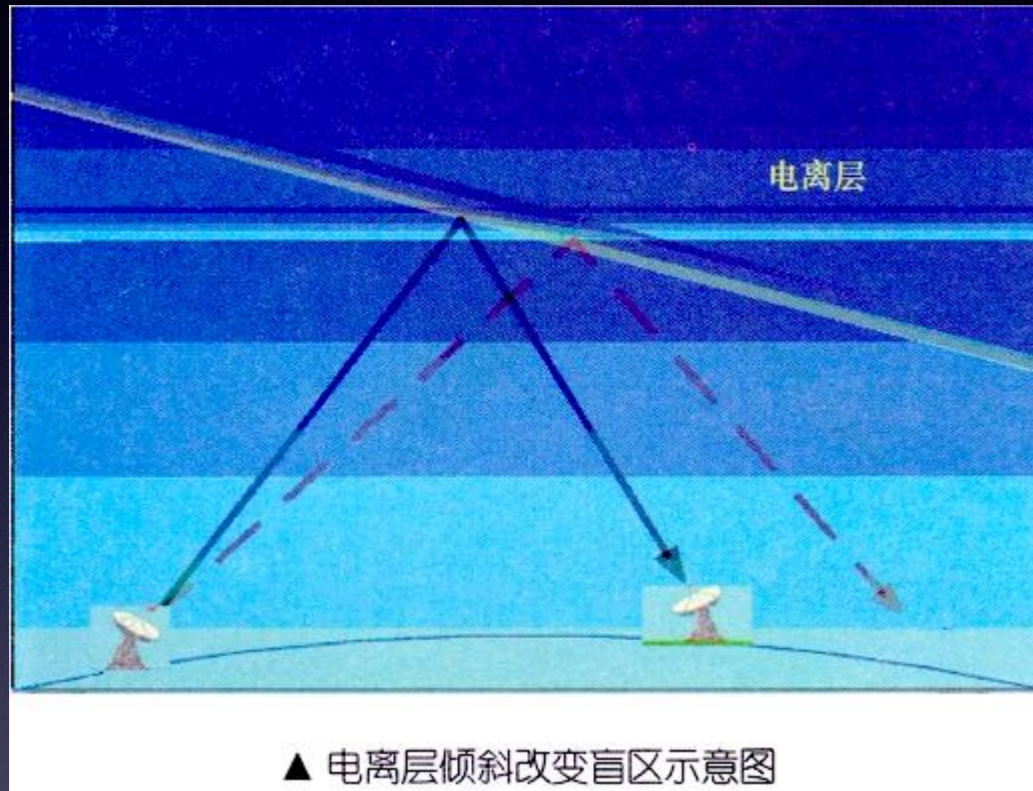
短波通信盲区

- ▶ 无线电波仰角越大、反射到地面的距离越小
- ▶ 仰角越高，可用频率越小
- ▶ 不同频率的天波盲区不同
- ▶ 同一频率的传播盲区在不同的时间也不同



短波通信的盲区是天波和地波都无法达到的区域

短波通信盲区改变



太阳风暴对盲区的改变

- ▶ 太阳风暴导致电离层电子密度快速变化
- ▶ 这种变化从高纬向低纬传播
- ▶ 引起南北方向上电子密度的大尺度倾斜

盲区改变的后果

☑ 改变通信距离

☑ 影响通信质量

通信信号衰落

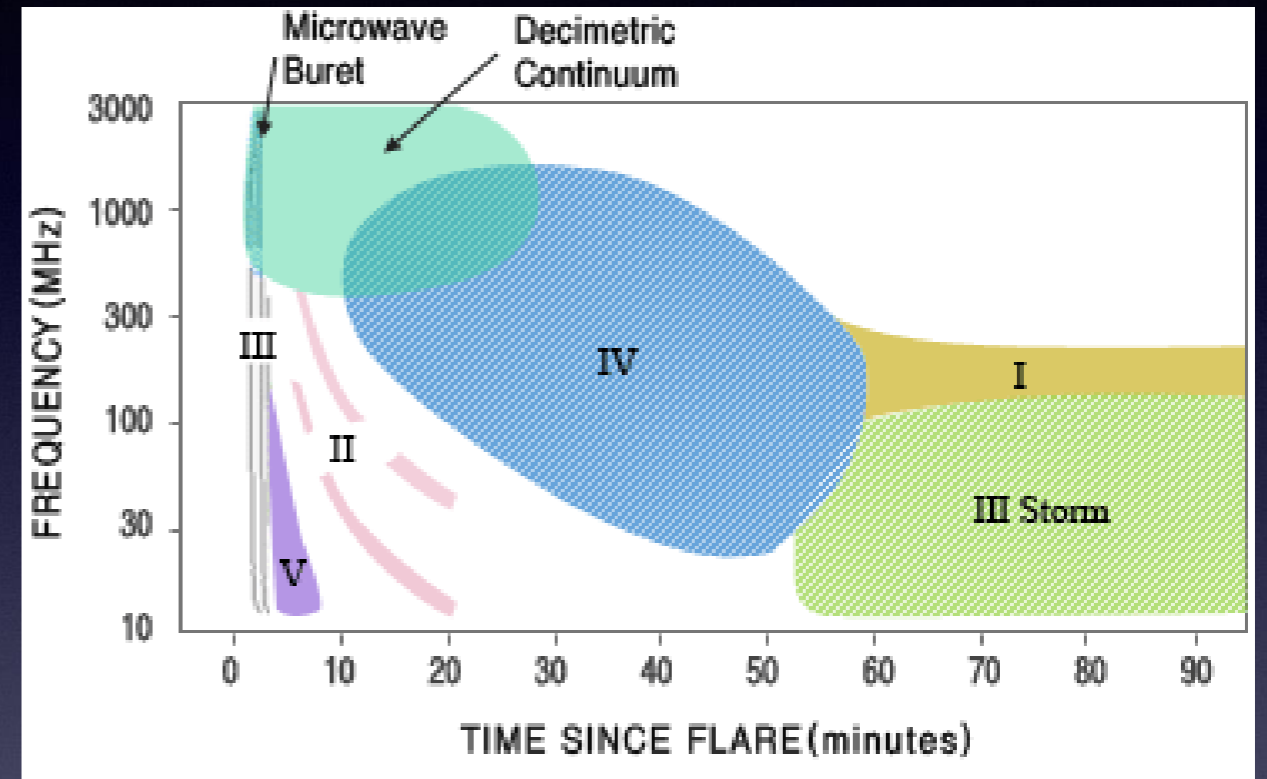
通信信号衰落：通信系统接收端的信号忽大忽小、随机起伏变化的现象

- ▶ **干涉衰落：**不同模式信号之间发生干涉引起的衰落
- ▶ **吸收衰落：**电离层对无线电波吸收引起的衰落
- ▶ **极化衰落：**地磁场作用下电离层的各项异性造成的衰落

太阳射电干扰

太阳活动射电辐射引起的无线电干扰：

- ▶ 影响地球向日面短波通信
- ▶ 噪声增加
- ▶ 信噪比降低



射电爆发影响的条件：

- ▶ 太阳位于短波接受链路的实现方向
- ▶ 射电爆发频率与短波通信系统频率相匹配且强度足够强

可能的技术措施

应对电离层突然骚扰

- ★ 加大发射功率:
 - ▶ 低频端需要加得更大
- ★ 提高工作频率
 - ▶ 频率越高、吸收越小
 - ▶ 不要超过最高工作频率
- ★ 改变通信链路或由全向天线改为定向天线
 - ▶ 避开或缩短经过太阳天顶角小的地区

可能的技术措施

应对极盖吸收

- ★ 和应对电离层突然骚扰一样
- ★ 改变航线是跨极区各行业常见的一种形式

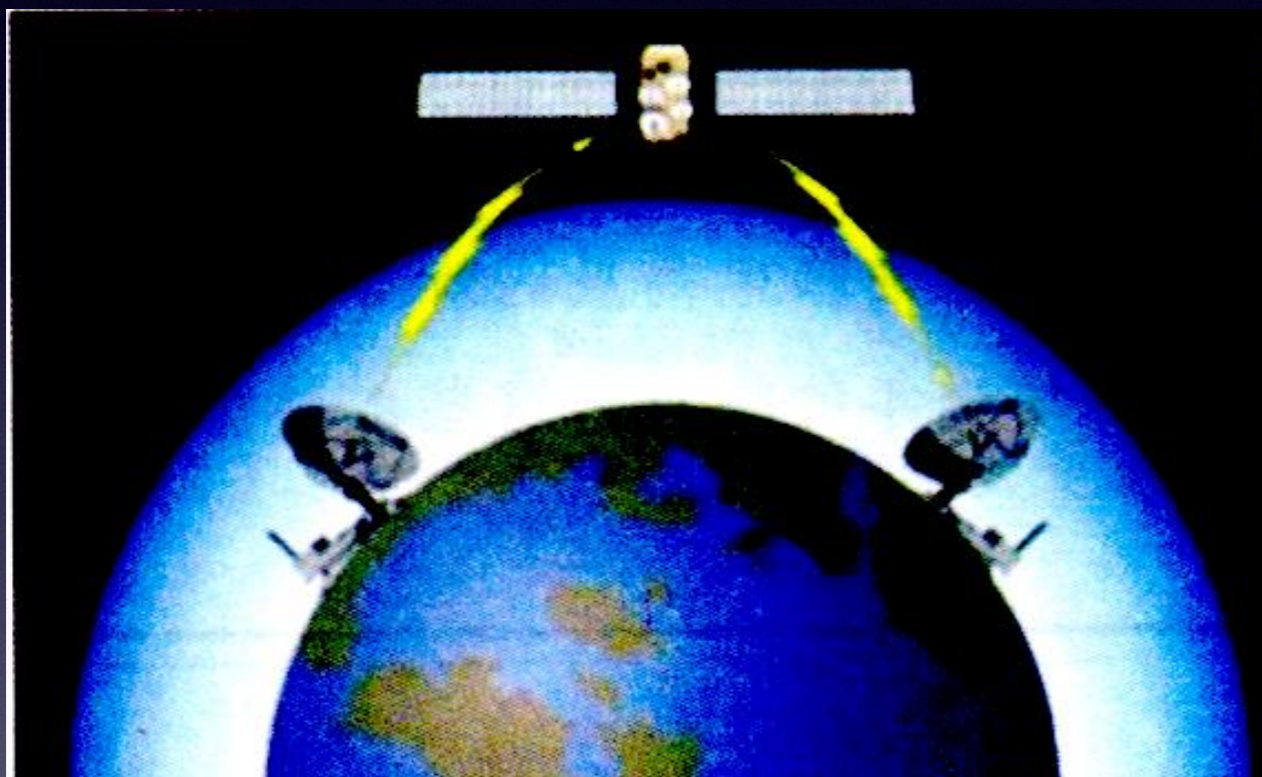


应对电离层暴

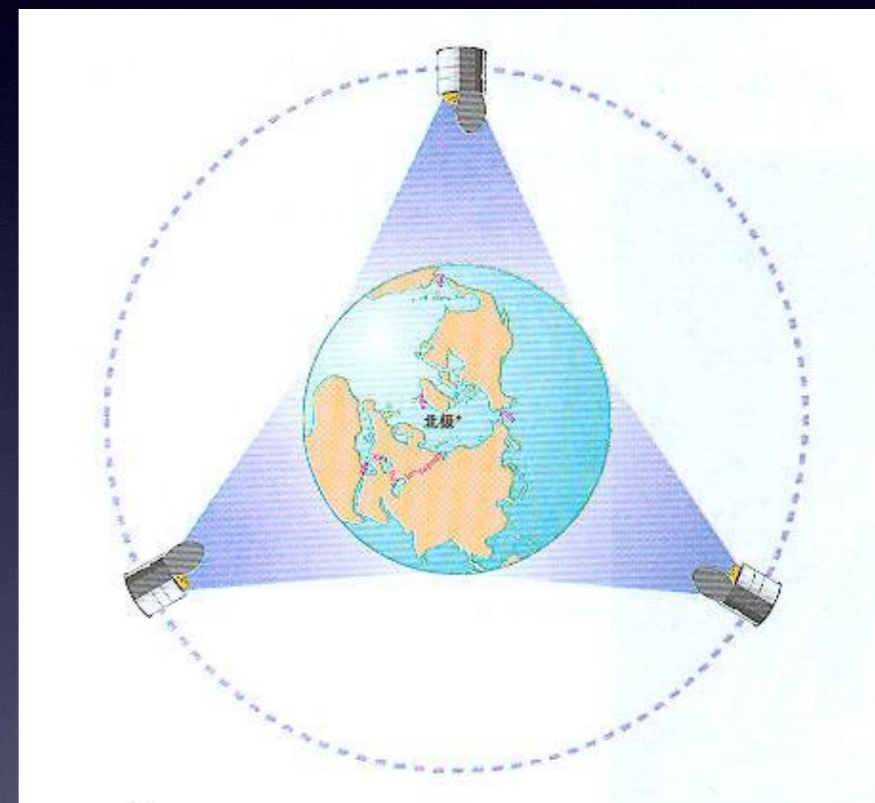
- ★ 适当降低工作频率
- ★ 改变通信传播路径
- ★ 适当抬高天线发射仰角

3、太阳风暴对卫星通信的影响和应对

卫星通信：利用卫星进行信息传递



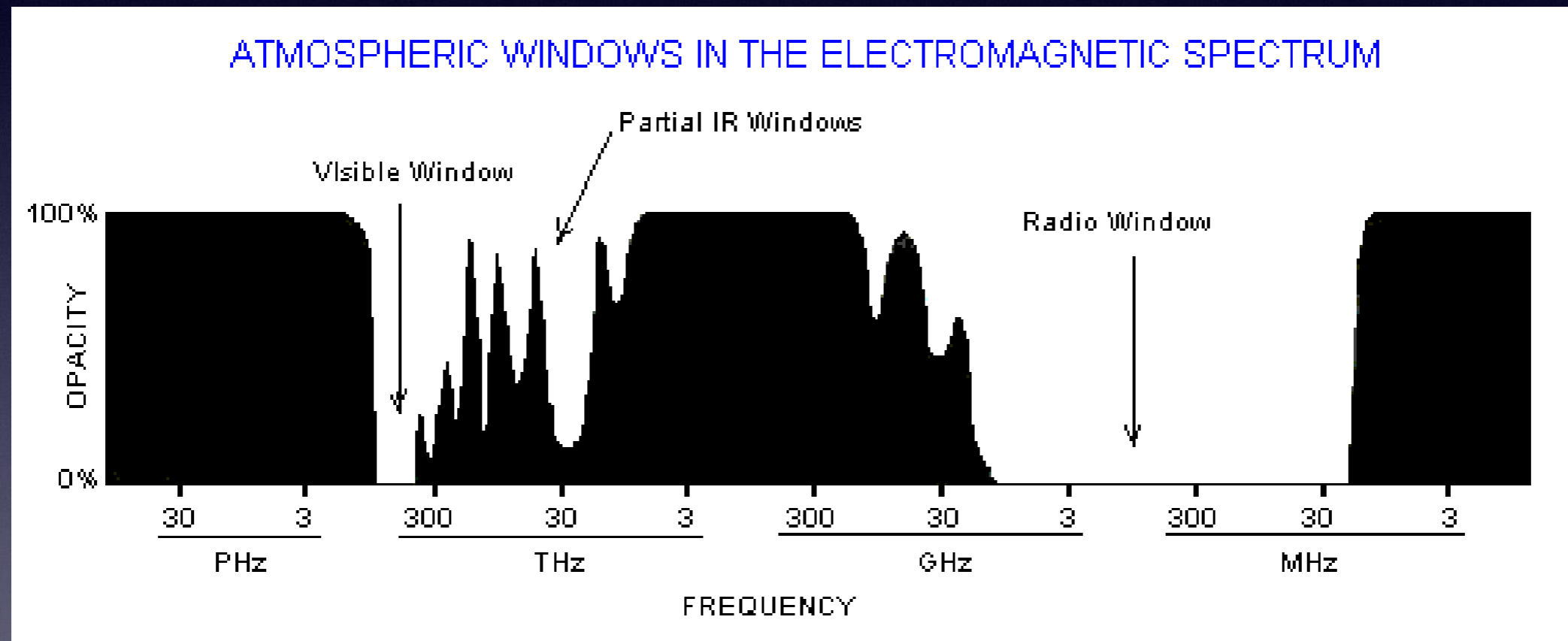
地面站借助同步卫星进行通信



三颗同步卫星可实现全球通信

三种形式：地面站与卫星之间的通信；卫星之间的通信；地面站之间的通信

卫星通信频率



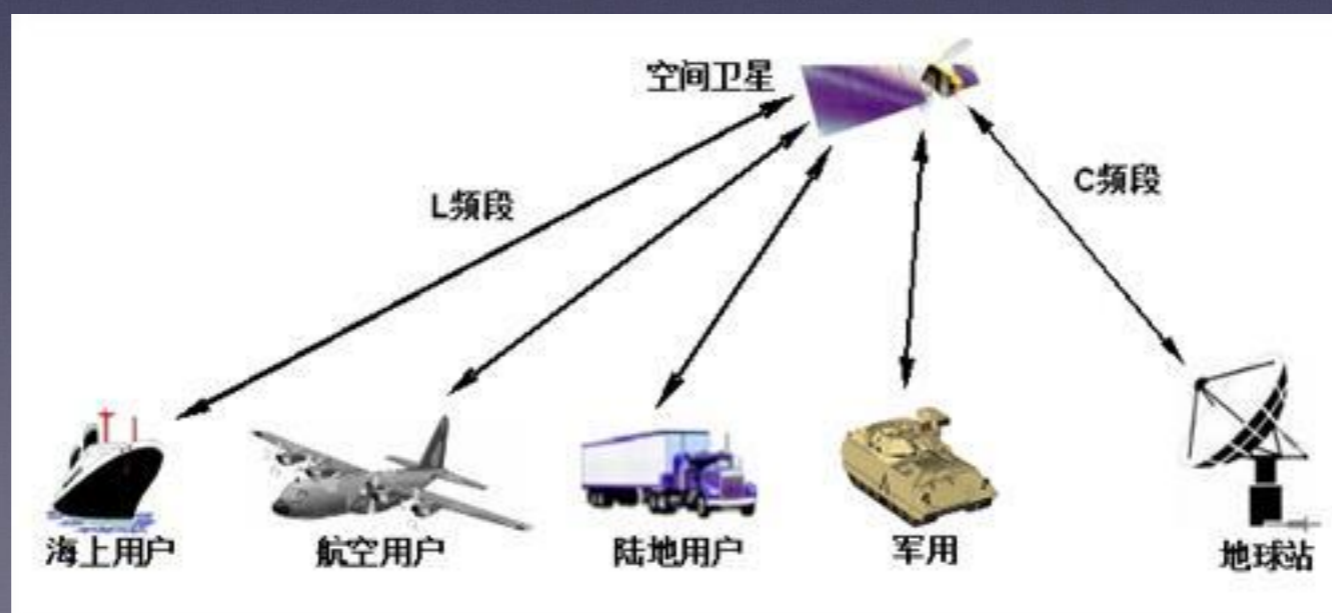
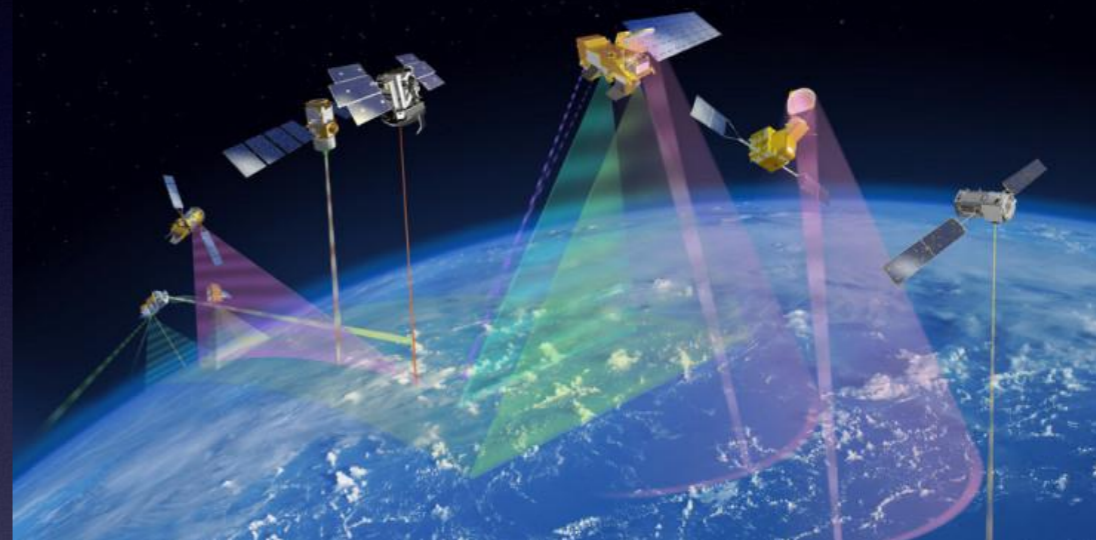
卫星通讯的频率窗口

卫星通信频率

- ★ **C频段:**是频率从4.0- 8.0GHz的一段频带，作为通信卫星下行传输信号的频段。在卫星电视广播和各类小型卫星地面站应用中，该频段首先被采用且一直被广泛使用。
- ★ **Ku波段:** 受国际有关法律保护，Ku频段下行从10.7到12.75GHz，上行从12.75到18.1GHz。Ku波段卫星节目的天线口径远小于C波段，从而可有效地降低接收成本，方便个体接收。

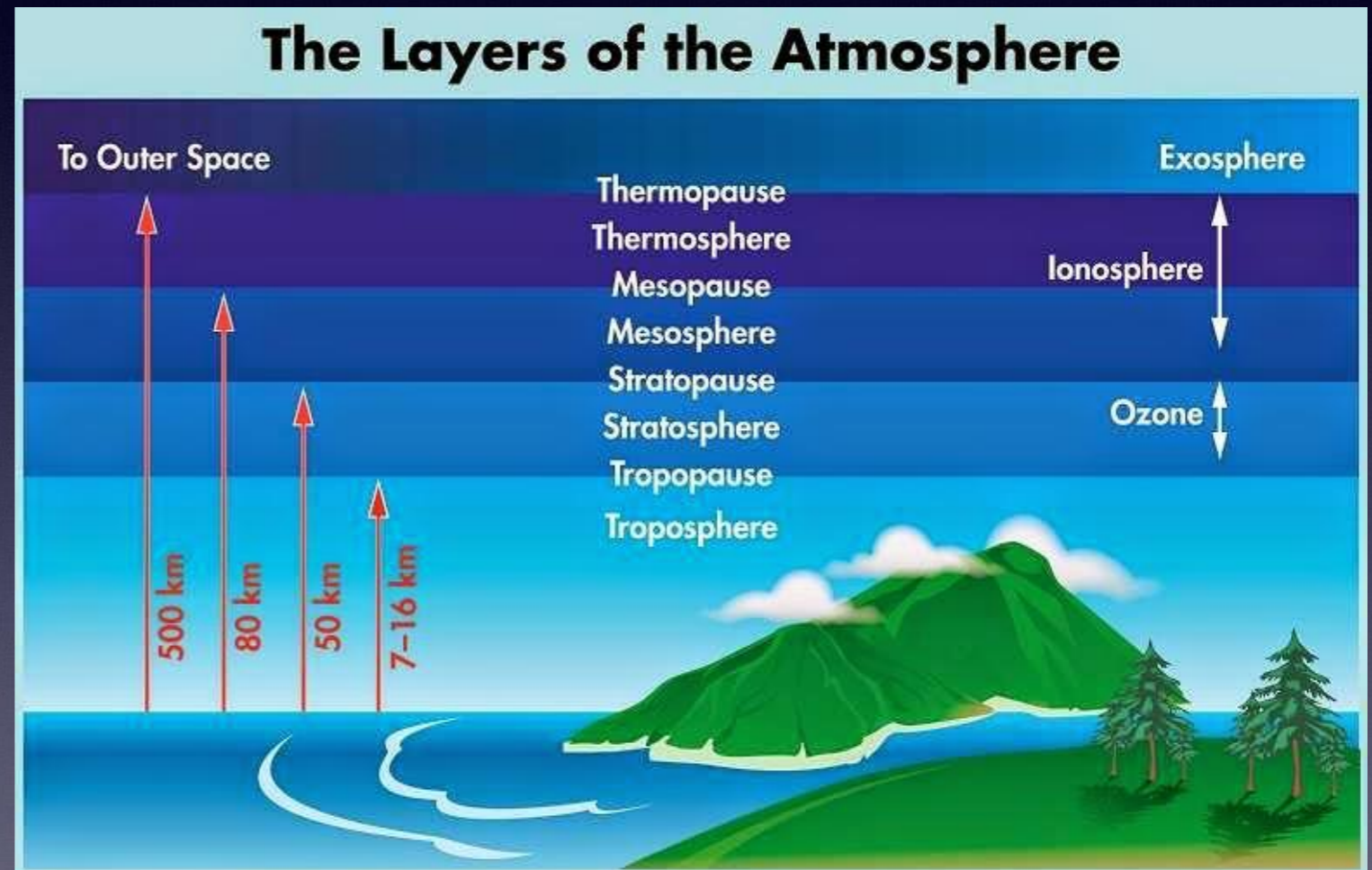
卫星通信特点

- ★ 站得高，看得远
- ★ 频带宽，通信容量大
- ★ 通信可靠性高
- ★ 通信机动灵活
- ★ 卫星通信技术复杂、成本高



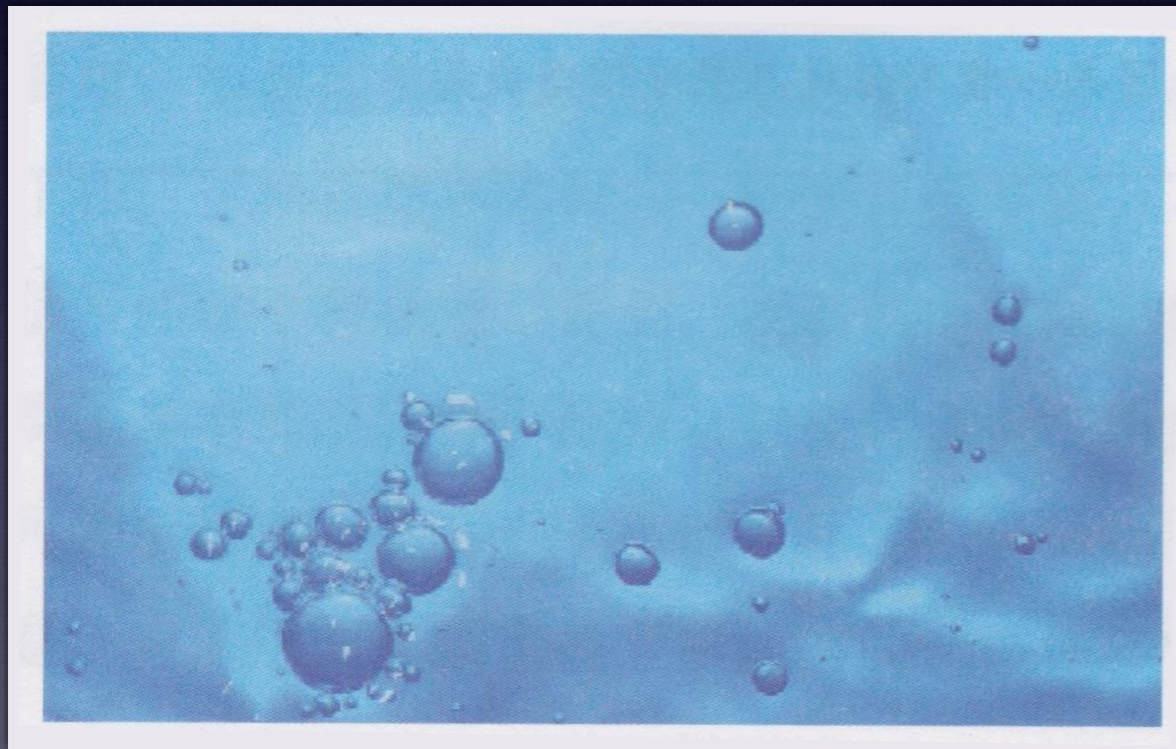
电离层对卫星通信的影响

- ★ 电离层闪烁
- ★ 日凌



电离层闪烁

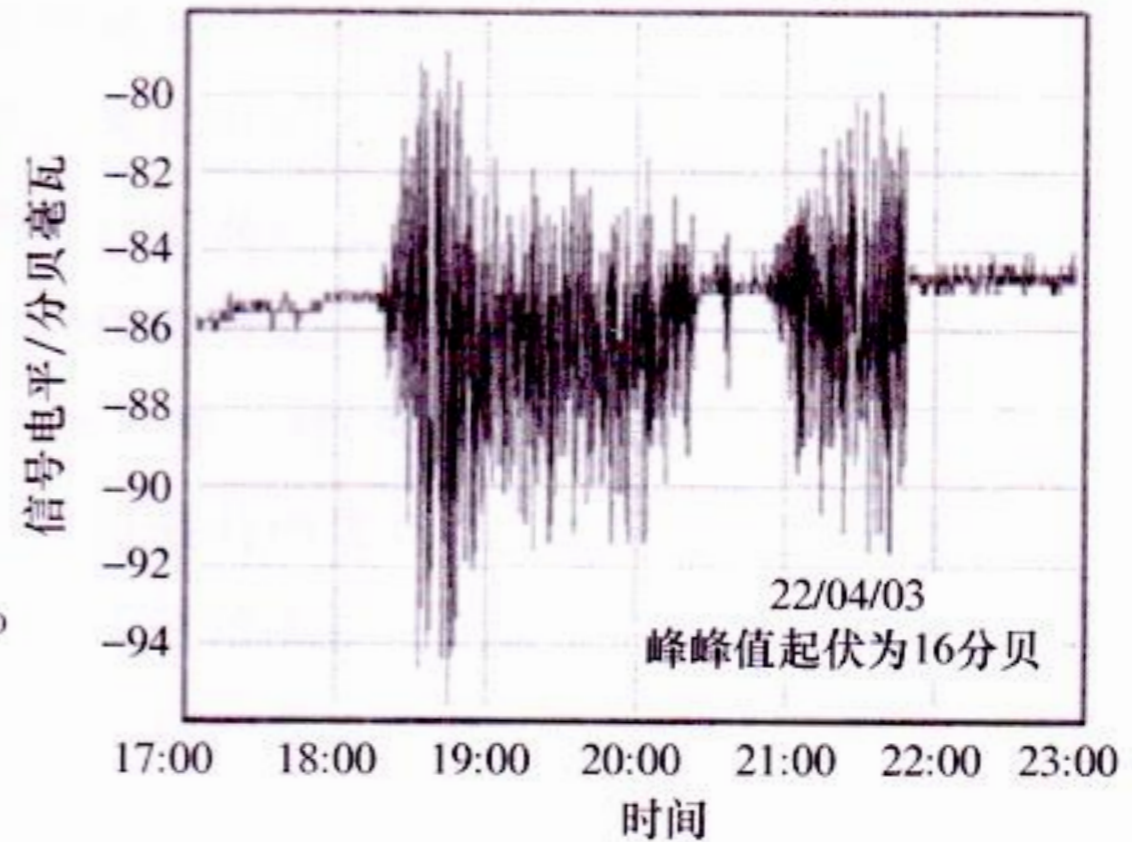
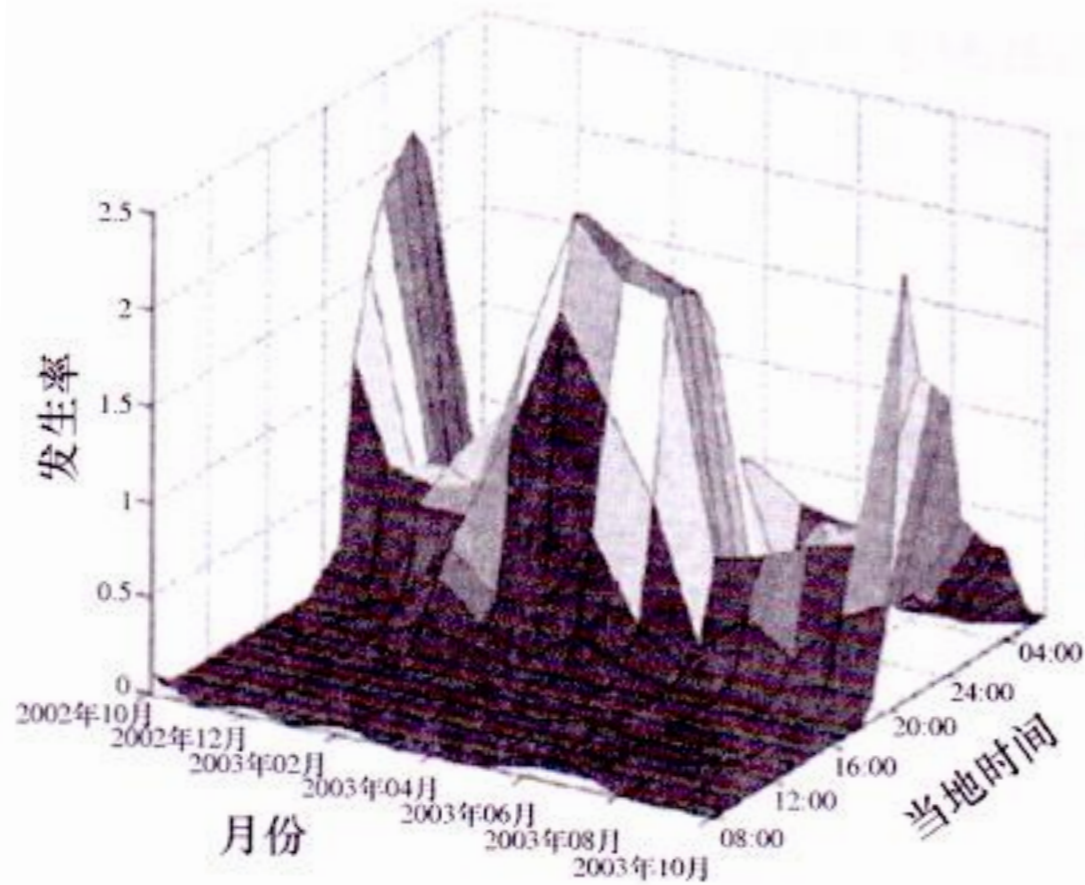
电离层不规则体： 电离层中经常存在的一些电子密度不均匀区域



不同尺度的水泡

电离层闪烁： 当卫星穿过不规则体时，会导致卫星信号幅度、相位、极化和到达角变化，表现为信号电平的快速起伏，信号的峰值起伏可达数十分贝，持续几分钟到几小时。对于甚高频的频率，电离层闪烁会导致卫星接收信道的信噪比下降，误码率上升，严重时使卫星通信中断。

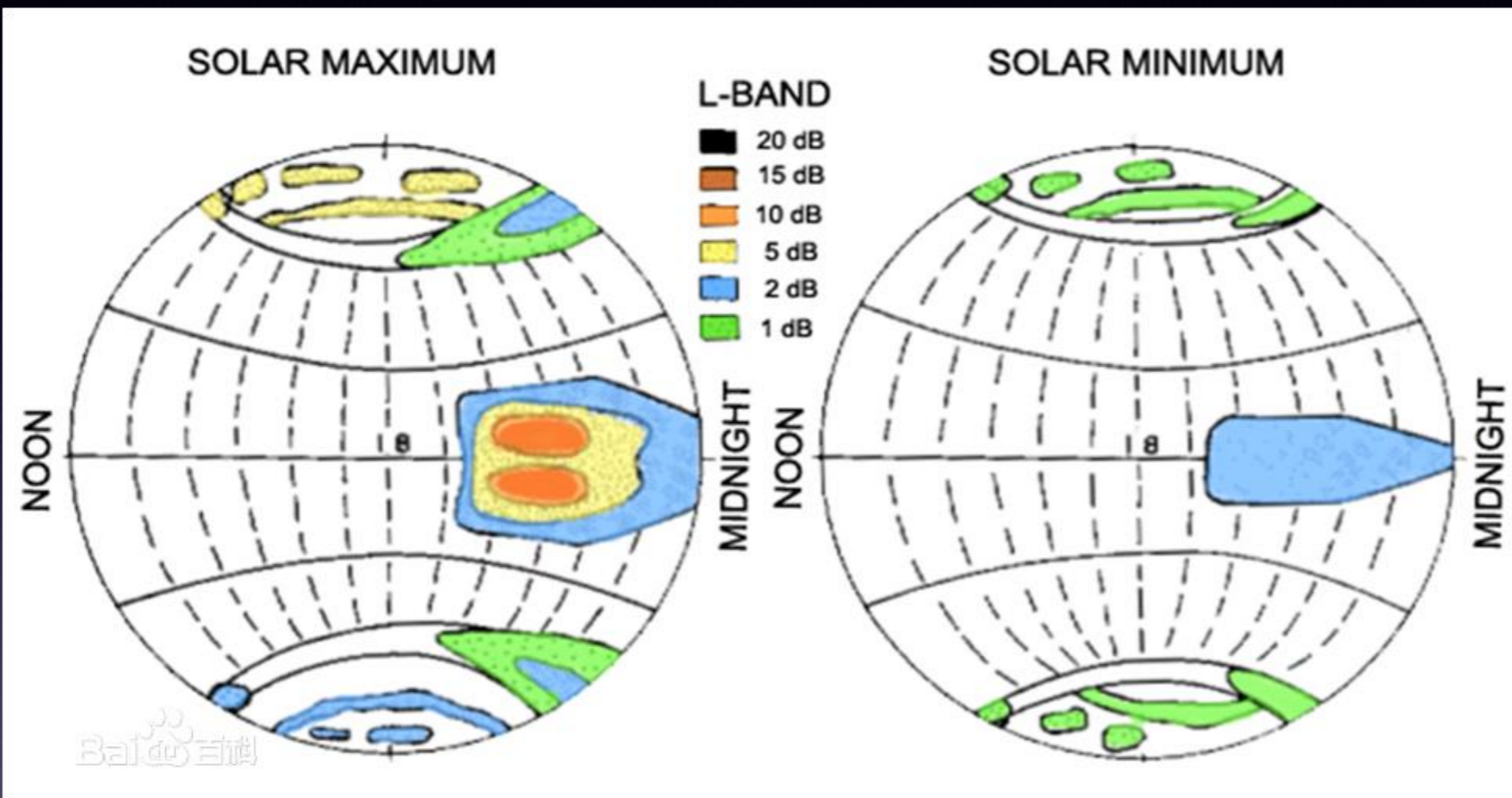
电离层闪烁



▲ 电离层闪烁出现率分布 (2002.10—2003.10)

某地(东经100.8, 北纬 13.7)接受美国舰队通信卫星信号进行
电离层闪烁实验和分析结果

电离层闪烁

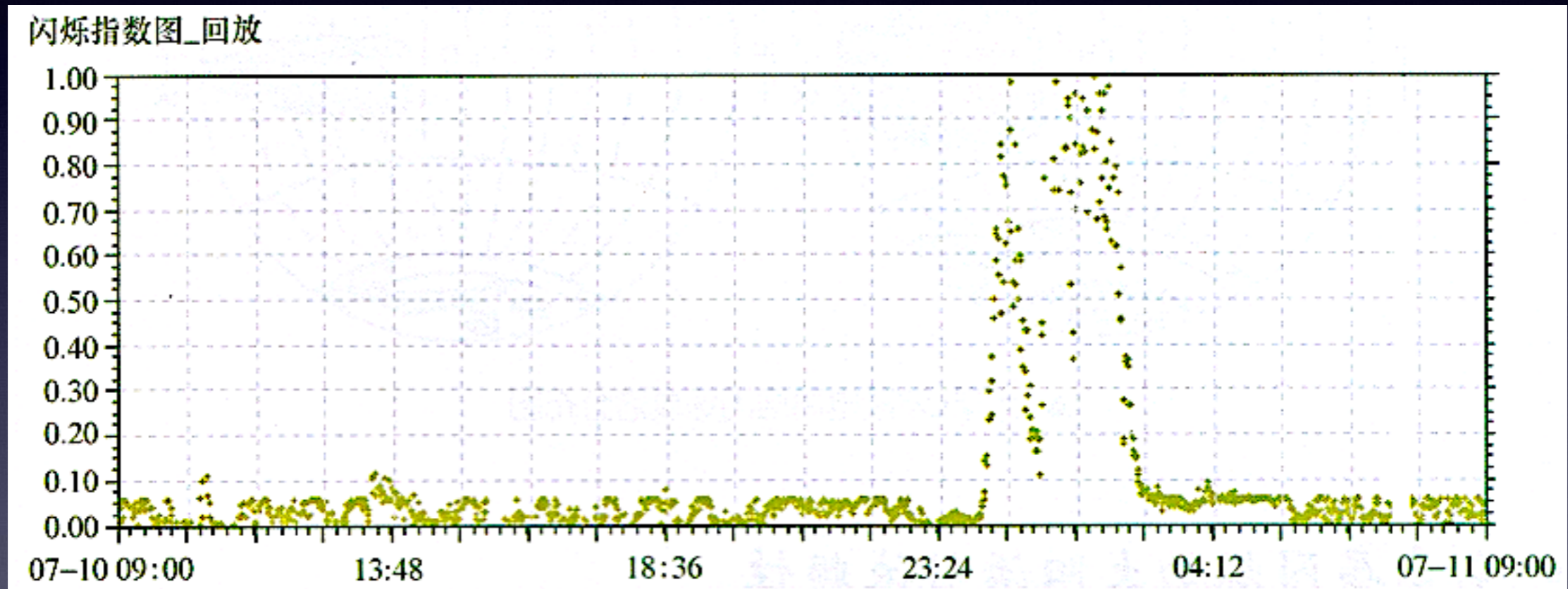


- ▶ **两极：** 电离层闪烁随时出现，夜间更强
- ▶ **靠近赤道的区域：** 电离层闪烁晚点出现，午后消失

两个主要的电离层闪烁带

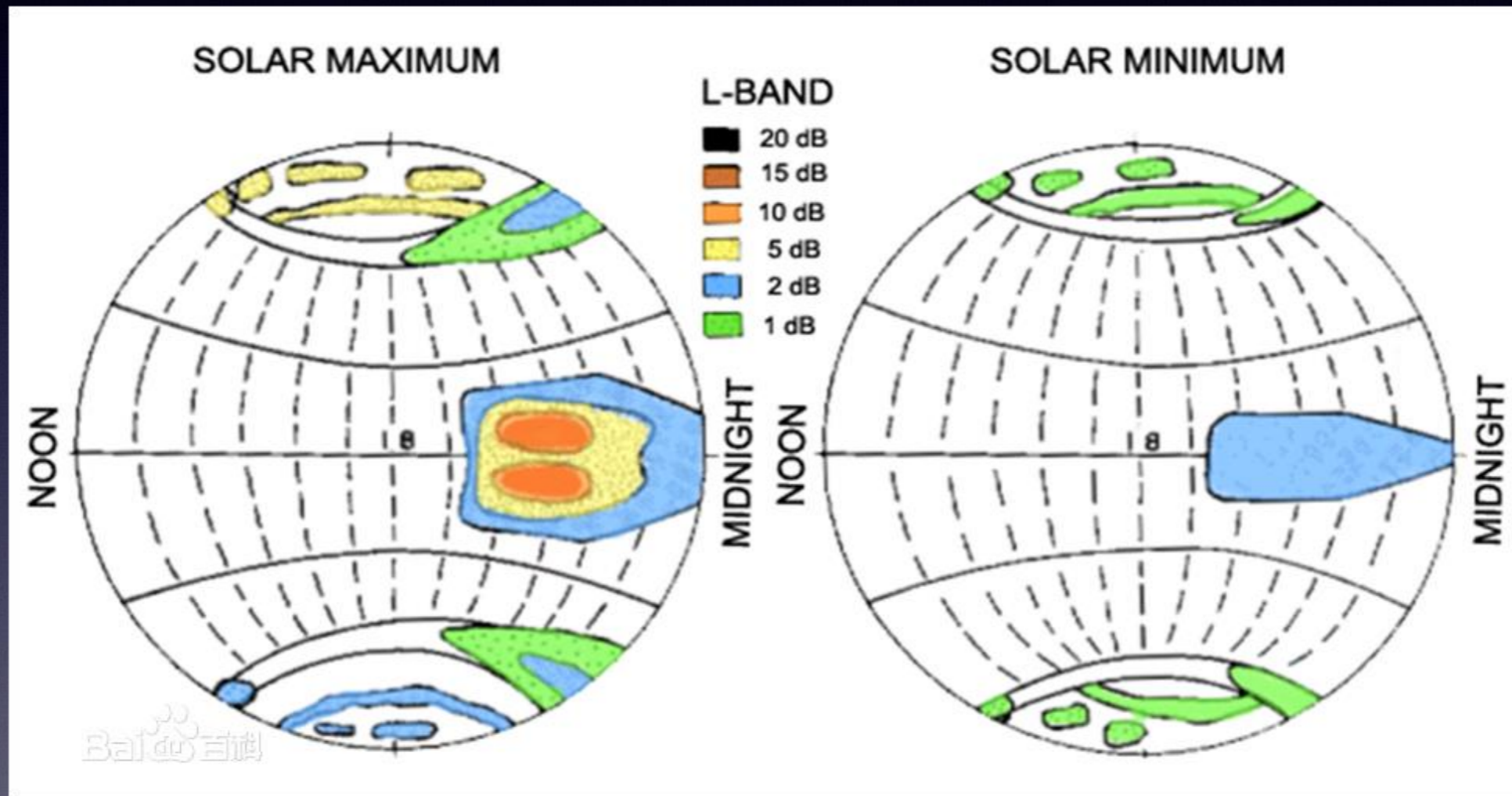
- ★ 一般春秋季节出现的概率和强度要高于冬夏季

电离层闪烁



2004年7月强太阳风暴期间北京地区UHF频段发生强烈闪烁

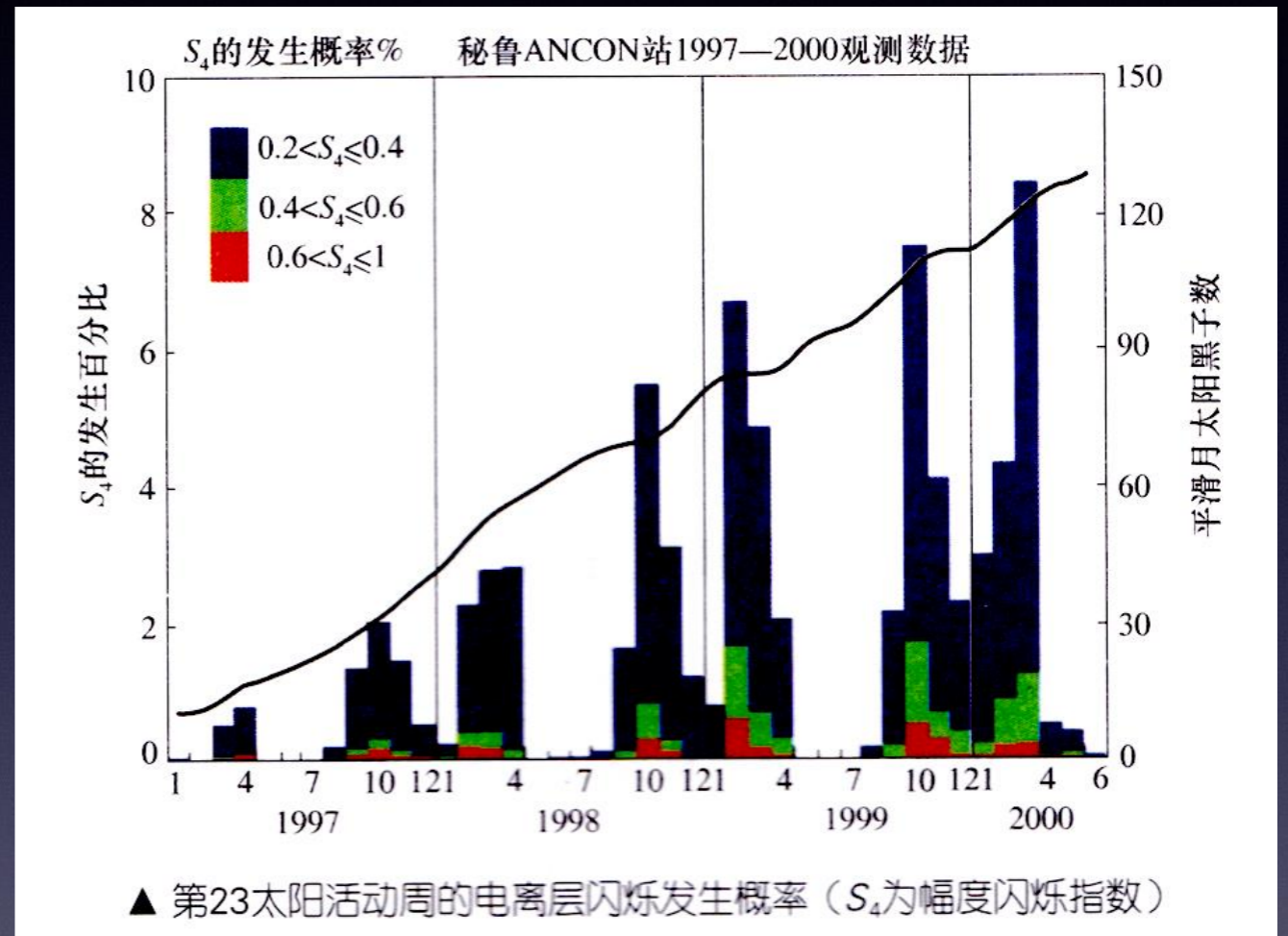
电离层闪烁



全球L波段(1GHz-2GHz)电离层闪烁衰落分布图

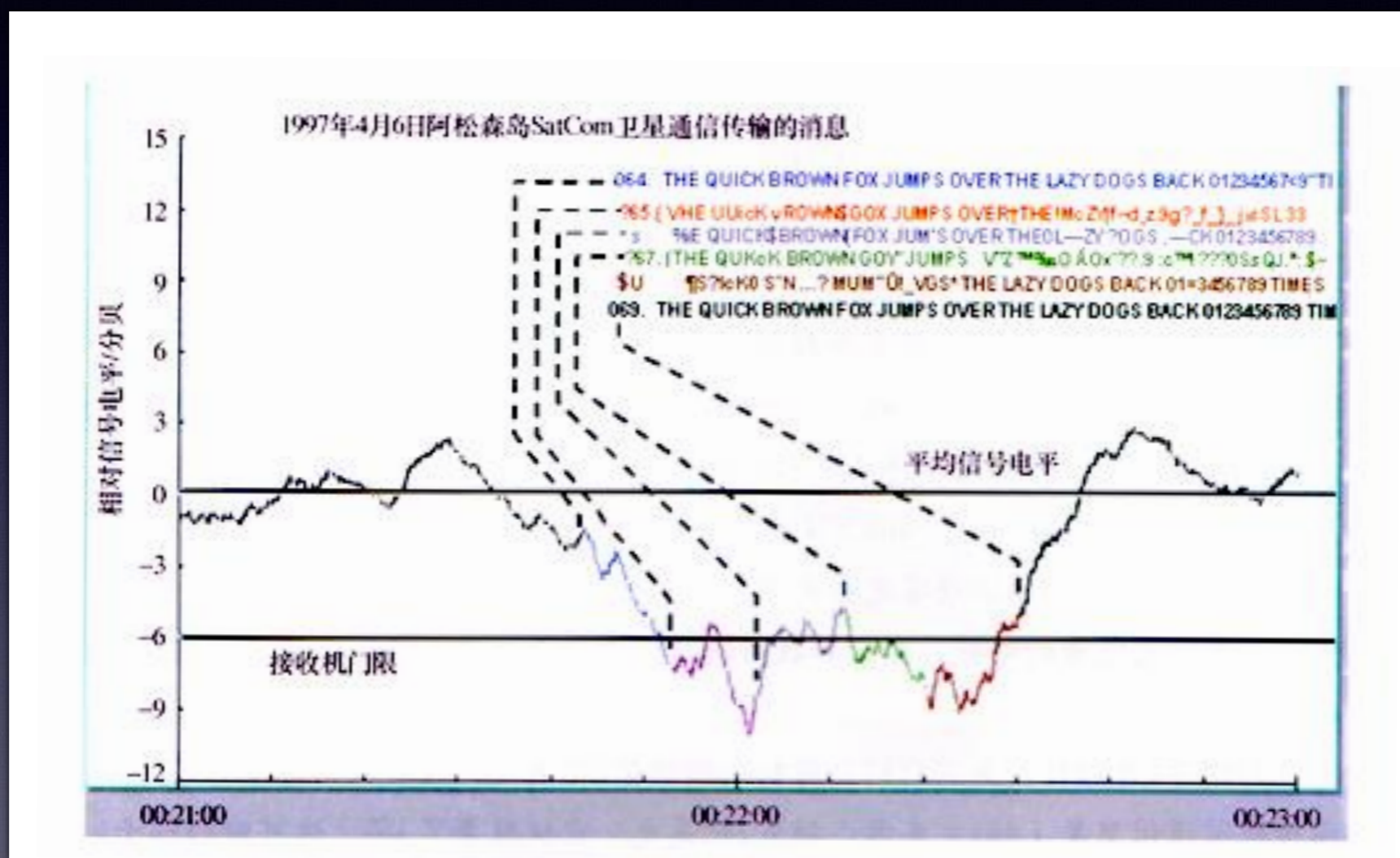
电离层闪烁

- ▶ 在太阳活动高年电离层闪烁的概率和强度要强于太阳低年
- ▶ 电离层闪烁强度随着太阳旋转以27天周期变化



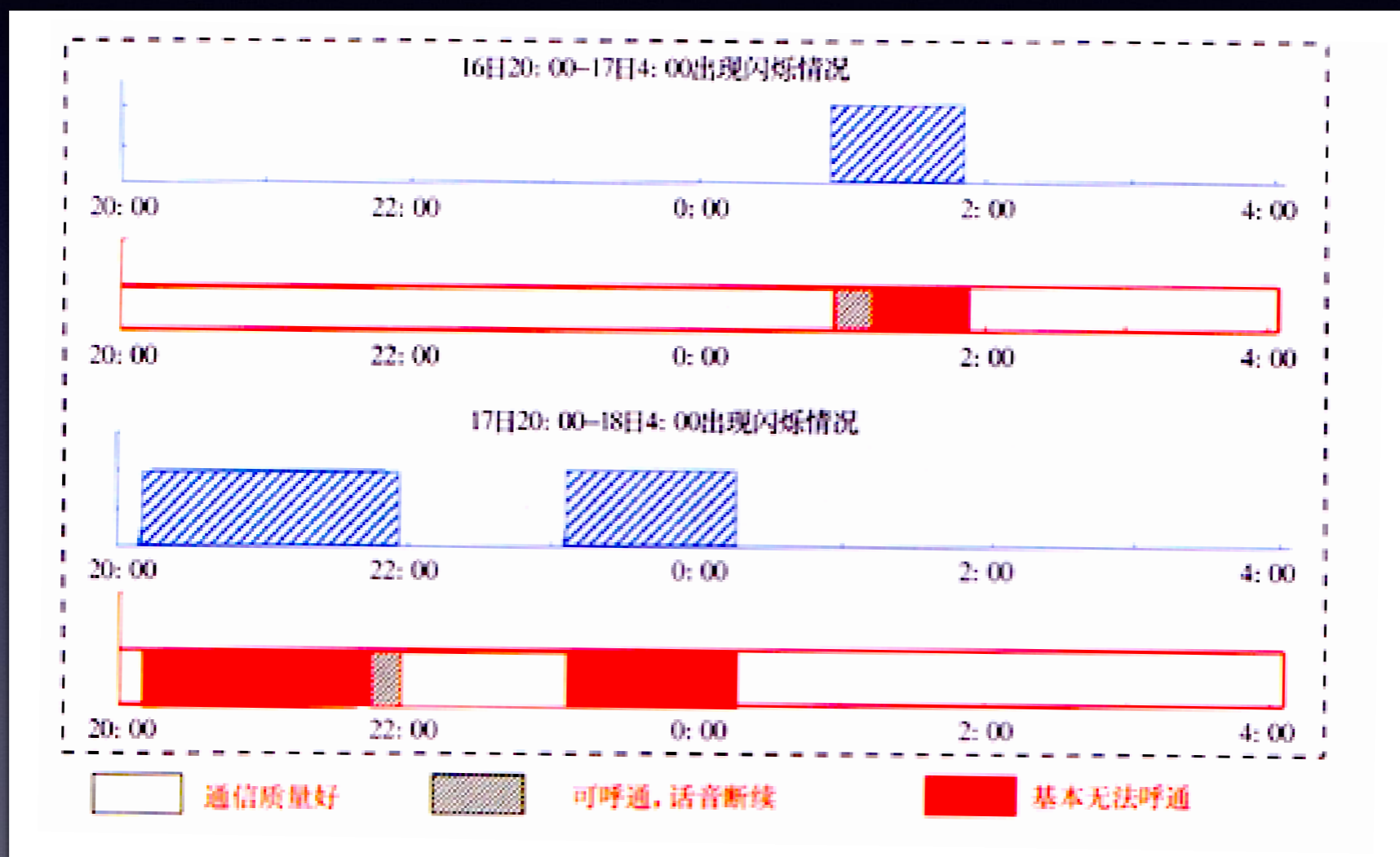
★ 在太阳活动高年，我们南方地区(如广州)几乎每天都观测到电离层闪烁发生

电离层导致卫星通信出现严重误码



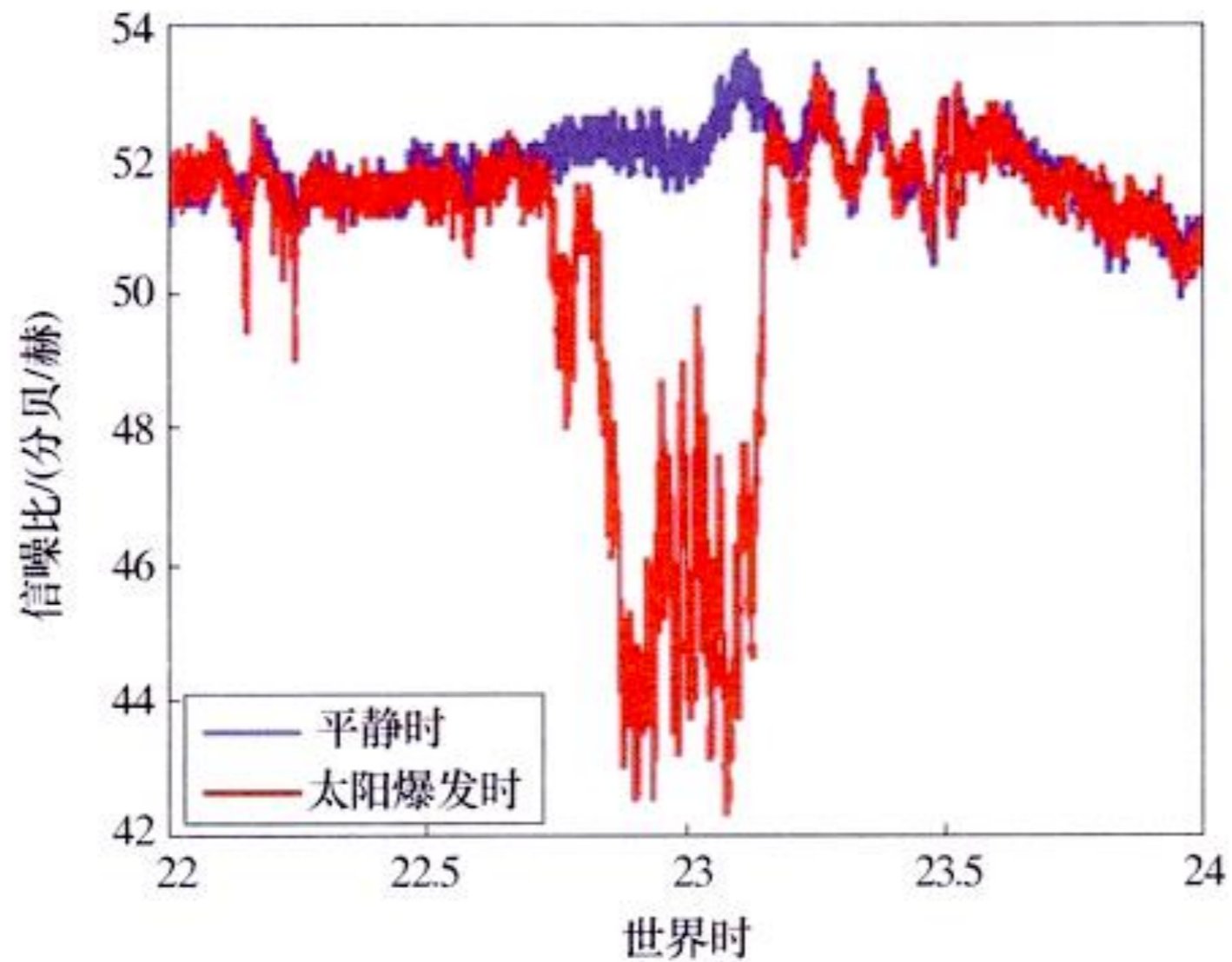
1997年4月6日，美军阿松森岛SatCom卫星通信出现严重误码

电离层导致卫星通信时断时续



电离层闪烁对卫星通信影响的实验结果

电离层导致卫星通信时断时续



可能的技术措施

- ★ 切换使用频段应对电离层闪烁
 - ▶ 切换到更高的工作频段可一定程度改善卫星的通信质量
- ★ 合理设计通信系统编码方式、
 - ▶ 选择合适的抗衰落编码方式
- ★ 合理设计卫星通信系统工作模式
 - ▶ 可采用“接受-确认-重发”的工作模式
- ★ 使用备份通信手段
 - ▶ 可选择短波通信、有线通信、流星余迹通信等备用手段
- ★ 科学规划作业时机
 - ▶ 作业时间安排在电离层平静期

日凌使卫星地面接收机致盲

日凌：每年春分和秋分前后，太阳穿过赤道，这段时间太阳位于地球赤道上空。由于通讯卫星多定点在赤道上空运行，在这期间，如果太阳、通信卫星和地面卫星接收天线恰巧又在一条直线上，那么太阳强大的电磁辐射会对卫星下行信号造成强烈的干扰



日凌的特征

日凌出现在春秋分时期的连续数天内，每次持续的天数和每天造成传输中断的时间因地面站位置、天线直径和工作频率的不同而不同。

★ 与地面站位置的关系

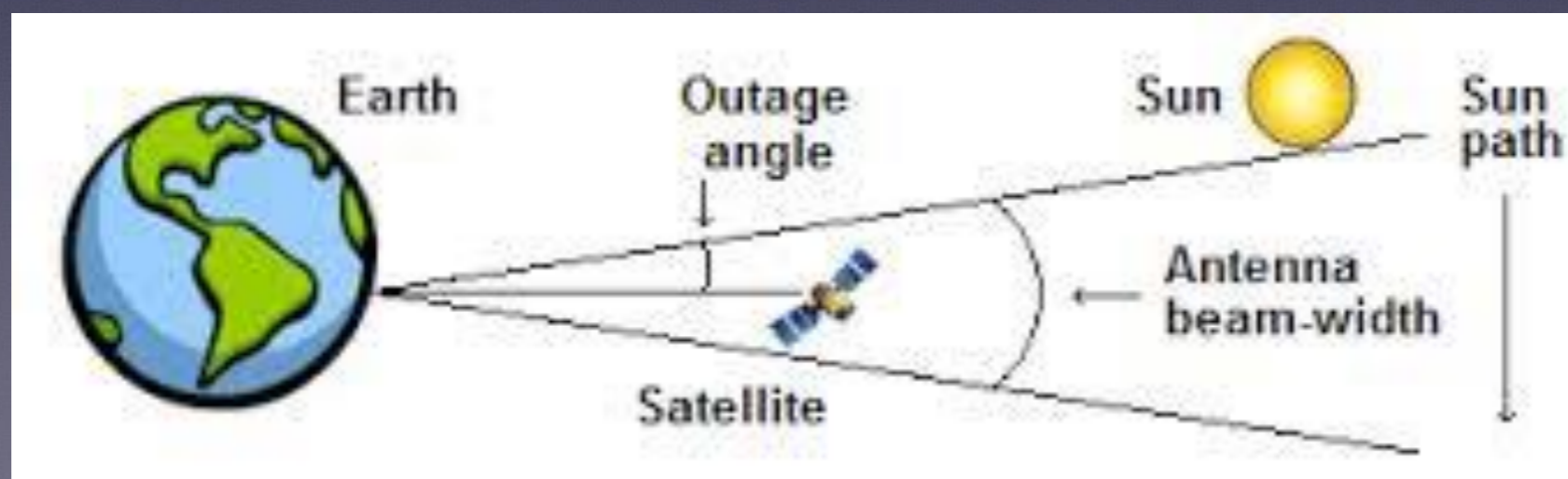
- ▶ 春分期间，地面站越靠北发生日凌时间越早，秋分则相反
- ▶ 若两地经度一样，纬度相差3，日凌开始和结束的日期就会差一天
- ▶ 卫星如果在地面站西边，日凌则发生在下午，反之则在上午
- ▶ 如果两地纬度一样，经度由西向东每增加2度，日凌开始和结束的时间就晚1小时

日凌的特征

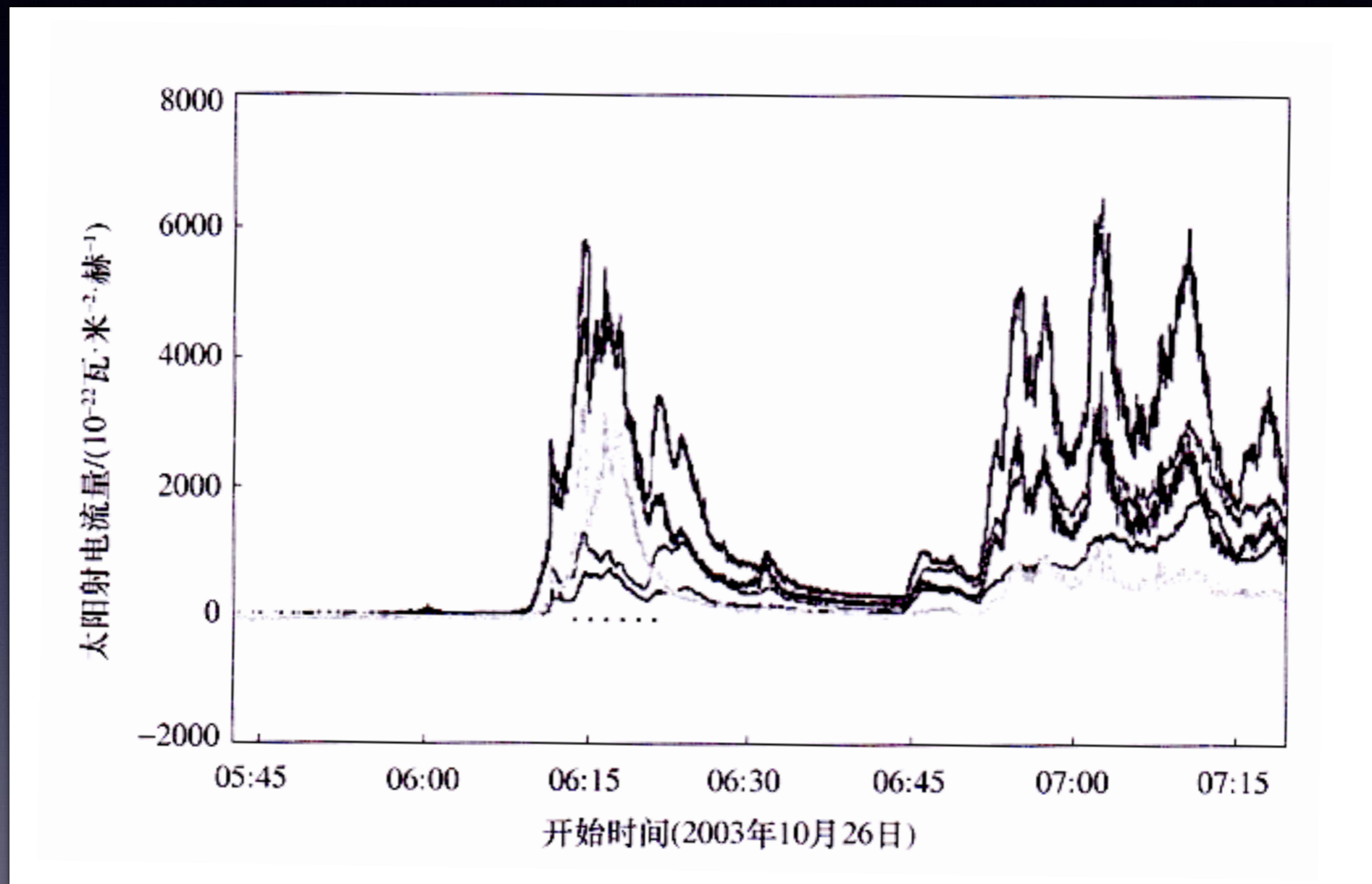
日凌出现在春秋分时期的连续数天内，每次持续的天数和每天造成传输中断的时间因地面站位置、天线直径和工作频率的不同而不同。

★ 与天线的关系

- ▶ 天线波束越宽，日凌每次持续时间越长
- ▶ 接收频率越高，天线口径越大，则日凌持续时间越短



日凌使卫星地面接收机致盲



太阳爆发期间不同频段电磁辐射通量明显增强

4、太阳风暴对甚长波/超长波通信的影响和应对

甚长波通信的特点

★ **甚长波**：频率为30KHz的电磁波，波长10KM以上，对海水和地层的穿透性特别强，在海水中衰减小，传播距离长

★ 穿透水深

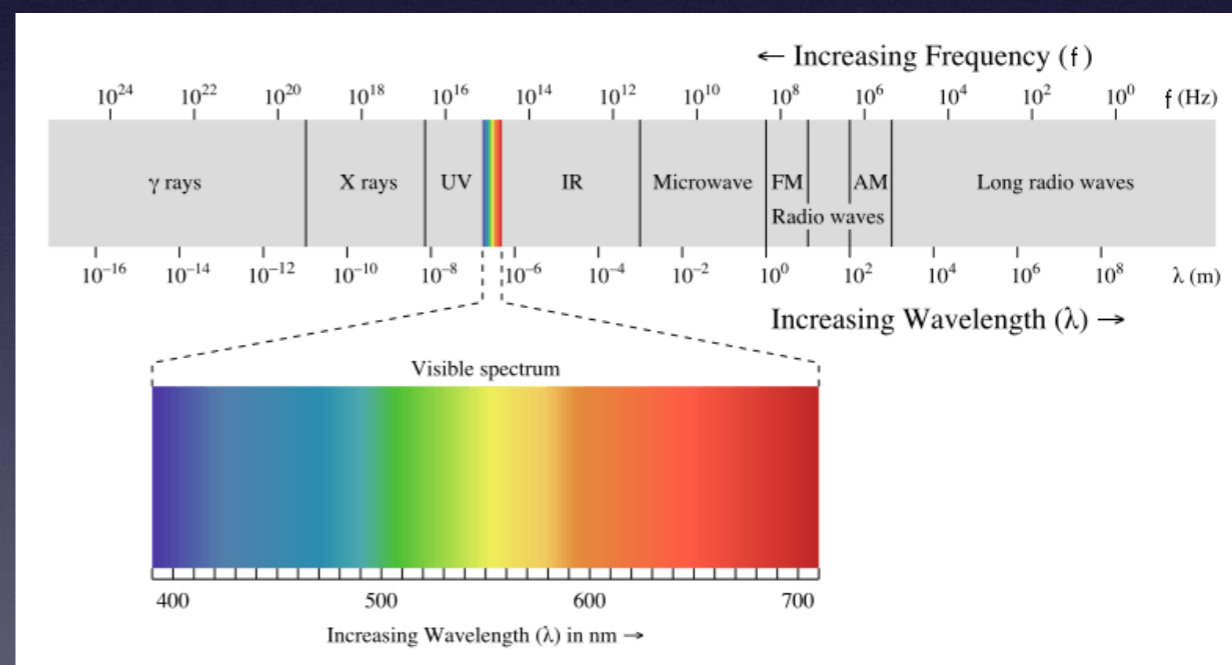
甚长波： 10 米-20米

超长波： 100米-200米

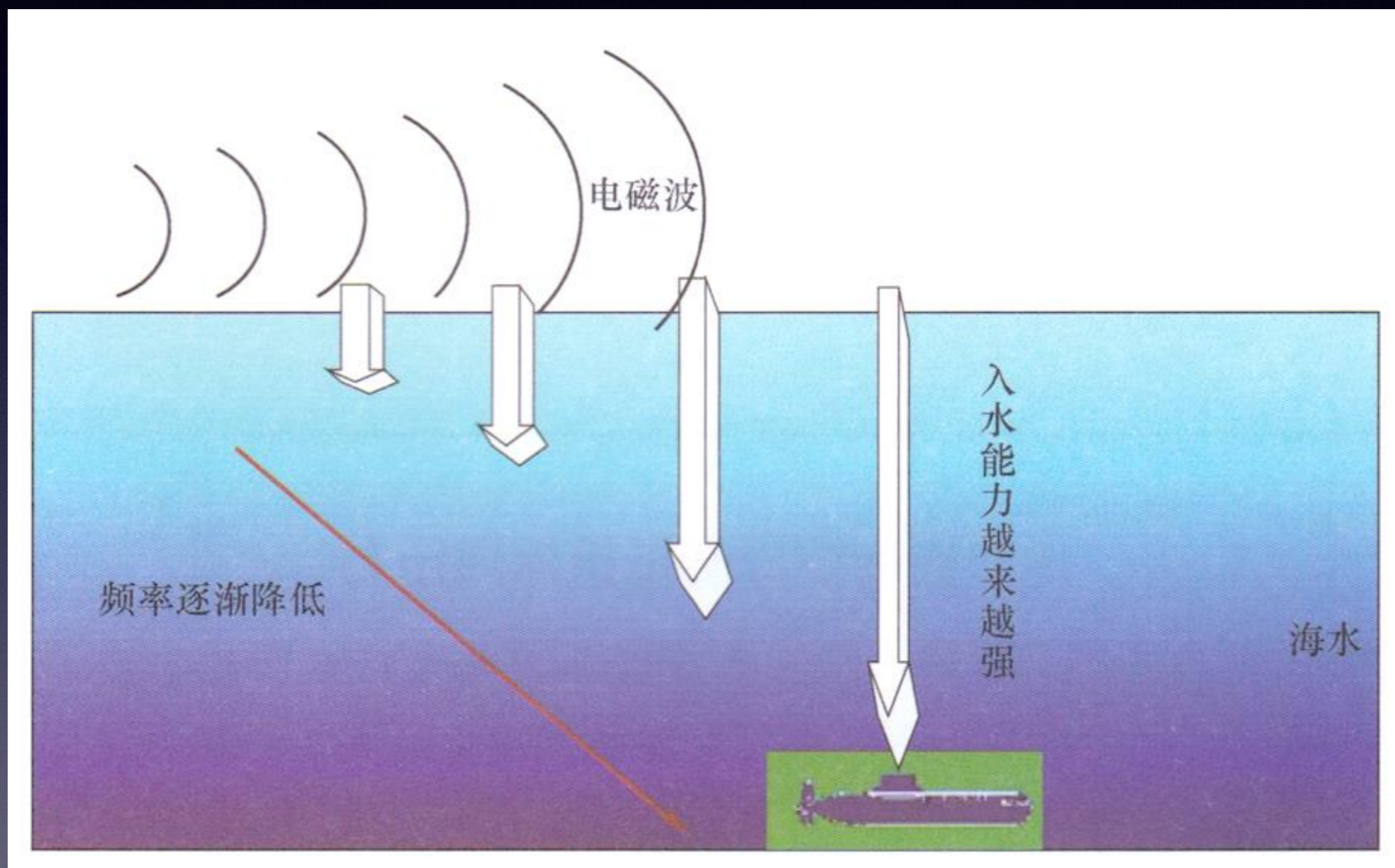
★ 衰减

大气： 1.5分贝/兆米 - 3分贝/兆米

海水： 10.2分贝/米 - 10分贝/兆



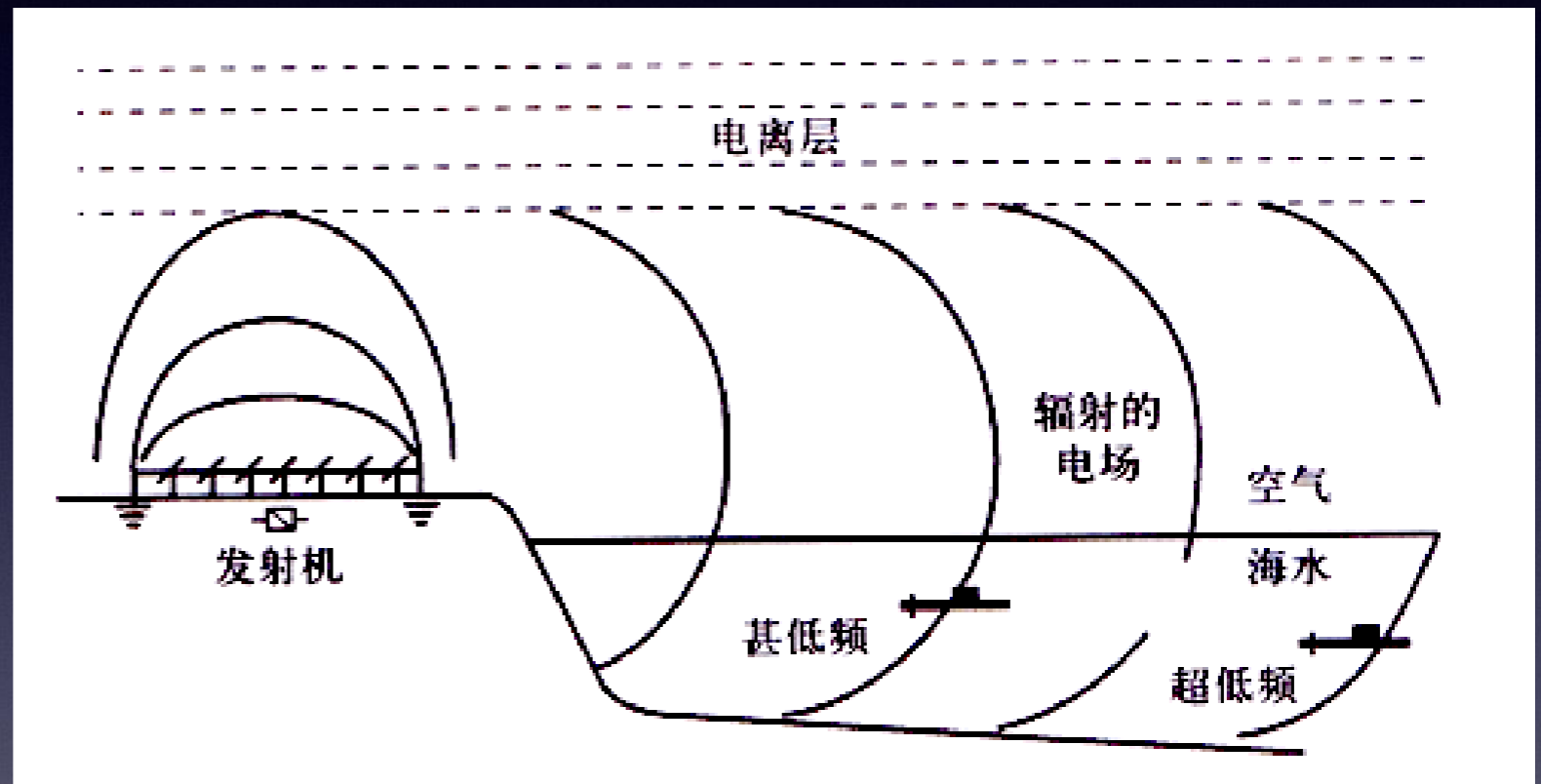
甚长波通信的特点



入水深度与无线电频率之间的关系

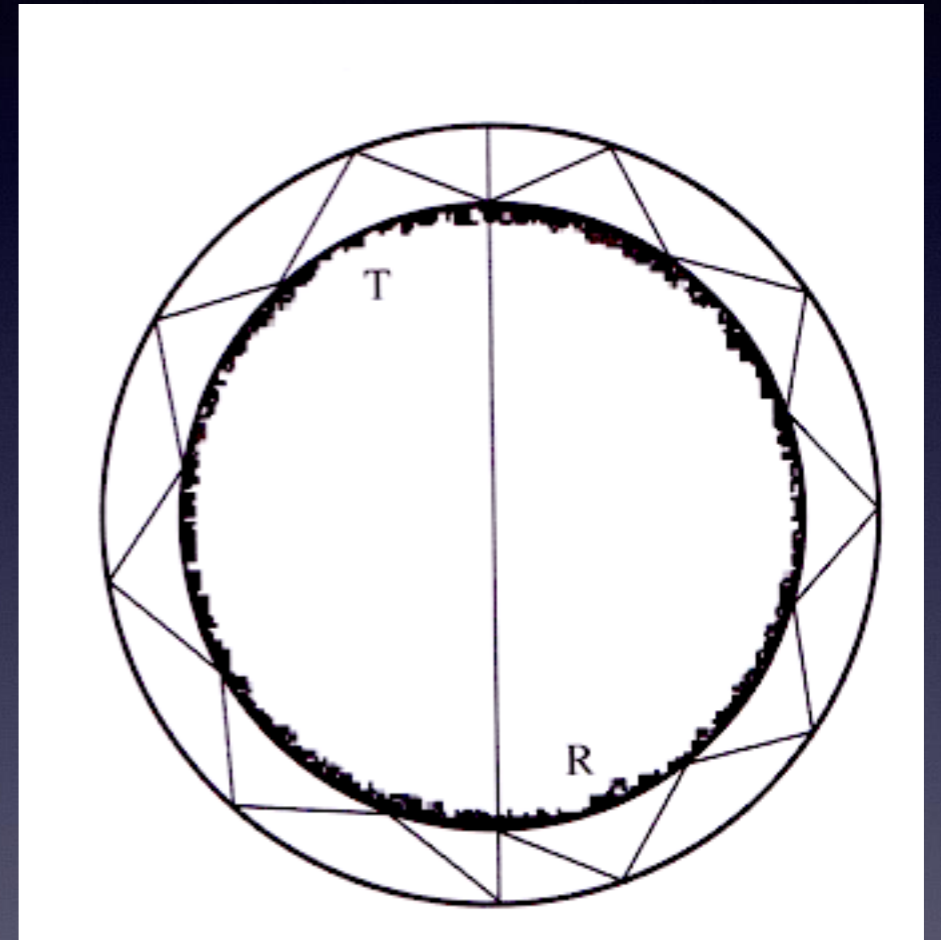
甚长波对潜通信的隐蔽性

- ★ 广播式
- ★ 只收不发
- ★ 看不见摸不着



地-电离层波导

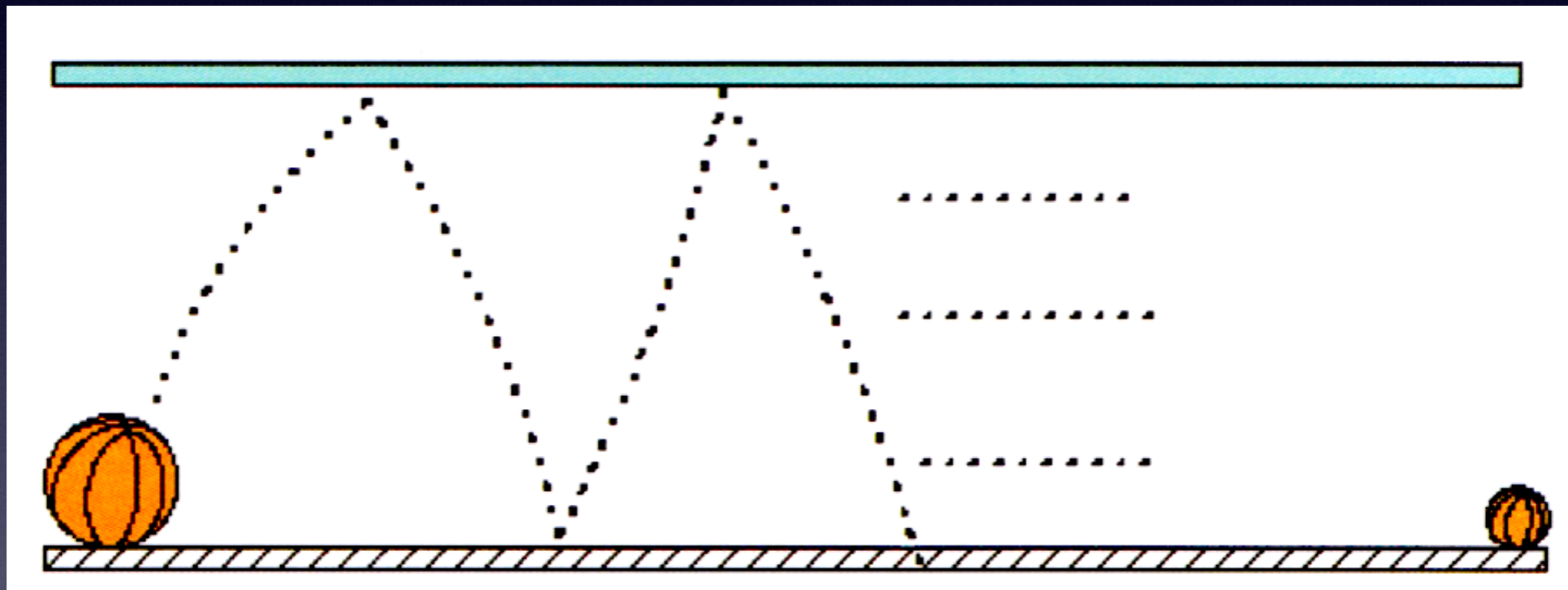
- ▶ 对于甚长波/超长波，电离层和地面一样都具有良好的反射特性
- ▶ 电离层越高或入射角度越小，反射的距离越大
- ▶ 电波可在地面和电离层之间被来回多次反射，被两个反射壁引导向前传播，这就是夹缝中的跳跃



夹缝中的跳跃

低电离层的影响

★ 传播衰减

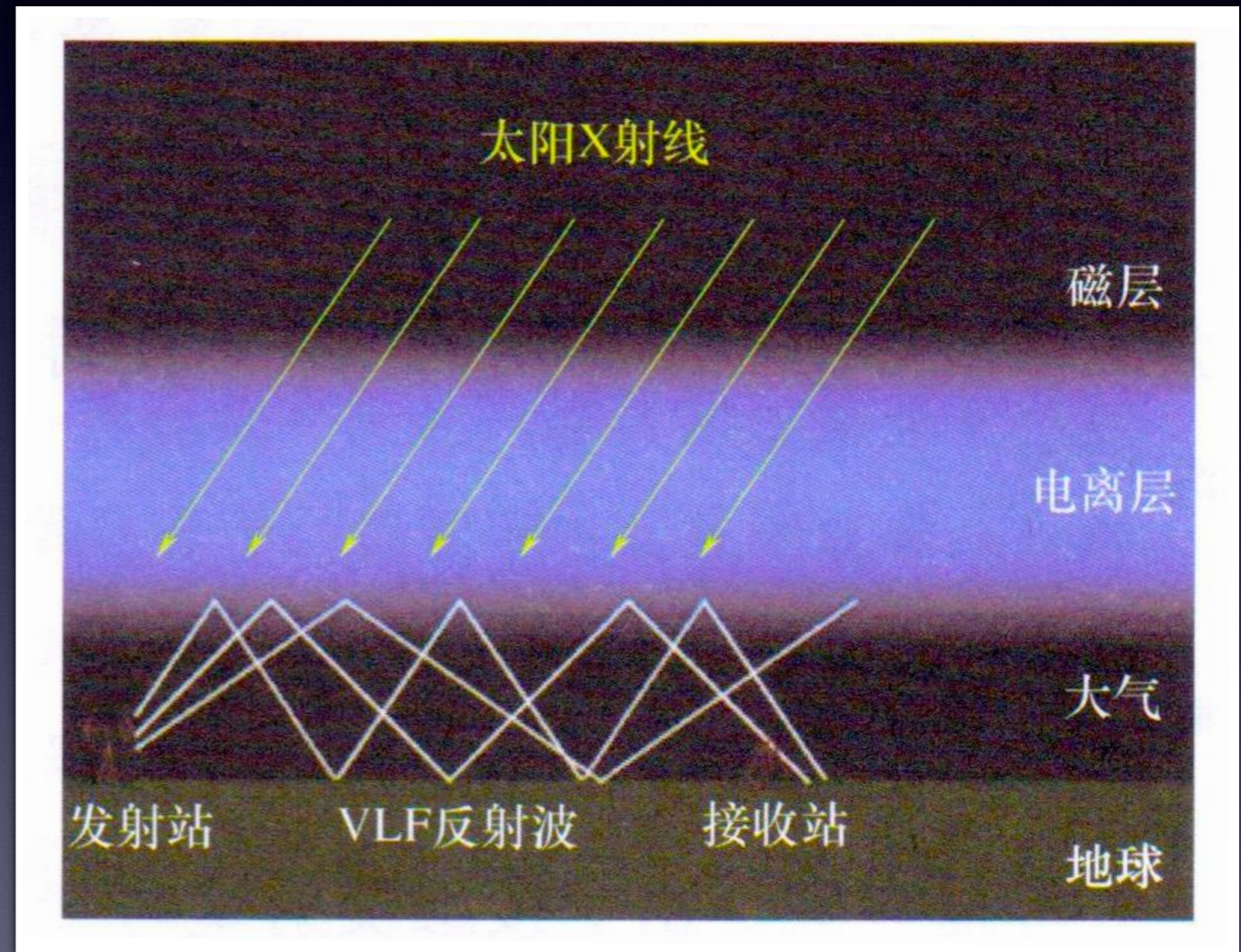


- ▶ 电离层等效高度越低，衰减越厉害
- ▶ 无线电波频率表越高，损耗越明显

低电离层的影响

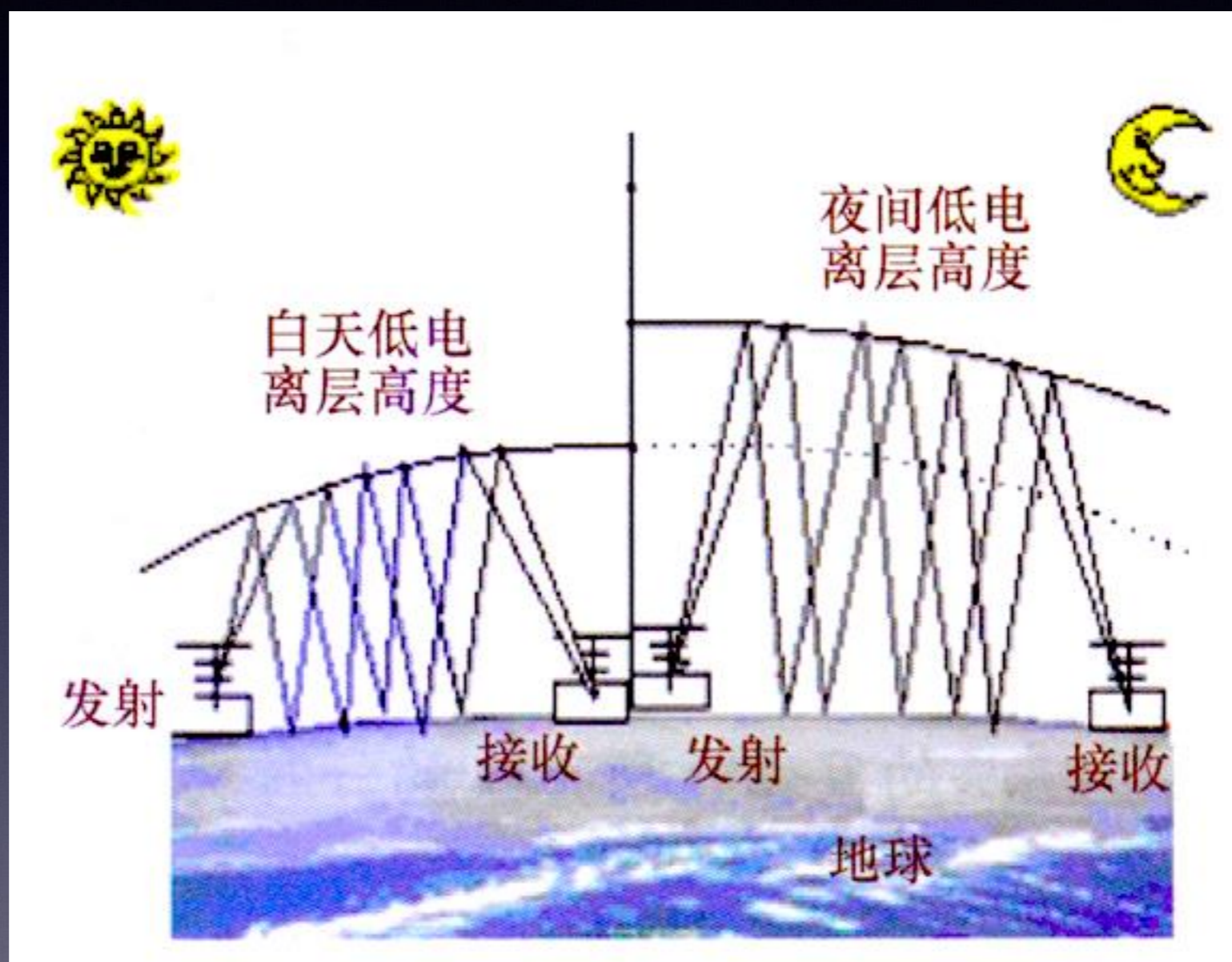
★ 甚长波多模干涉

多模干涉：在甚长波的传播中，接收到的电磁场是各个波模的叠加。由于各个波模传播相速度不一样，所以叠加后的VLF电波总场强随传播距离并不呈单调下降的变化，而是随距离的增大呈现起伏震荡的下降



甚长波电波传播示意图

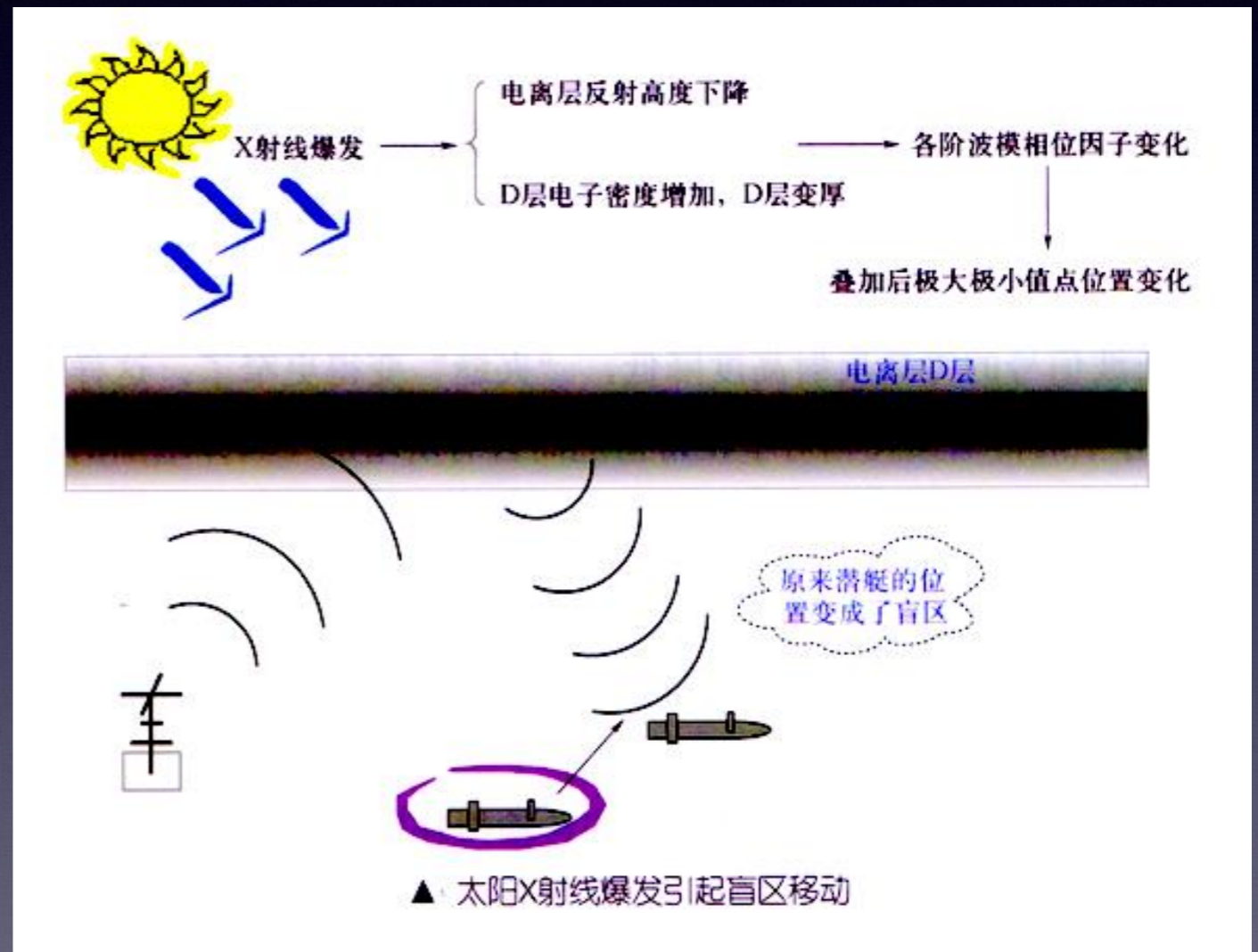
太阳风暴对甚长波/超长波通信的影响



甚长波/超长波电波反射高度变化

太阳风暴对甚长波/超长波通信的影响

在波导中传播的各阶波模的相位因子因反射高度的降低而发生变化，导致波模干涉产生的场强极大极小值点发生了“位移”现象。这种现象持续时间和电离层扰动持续时间一致



太阳风暴对甚长波/超长波通信的影响

