



航天器控制原理

第十四讲 姿态敏感器(2)

主讲：黄 河

西北工业大学 精确制导与控制研究所





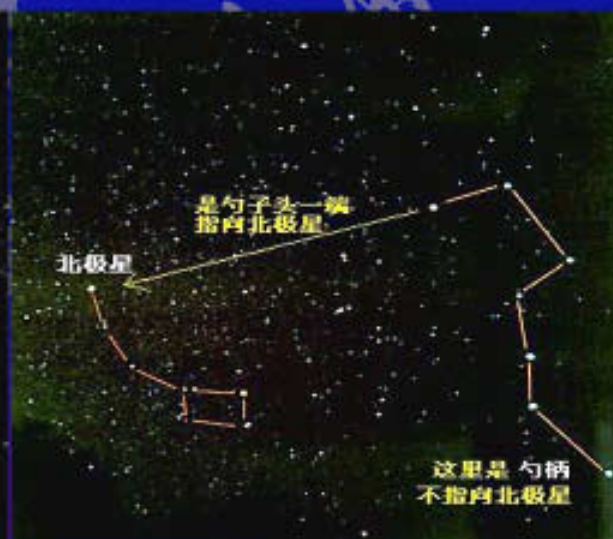
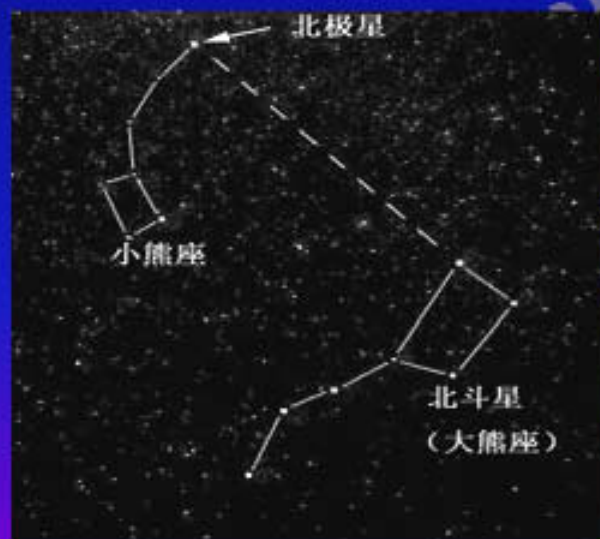
第十四讲 姿态敏感器(2)

- 1、星敏感器
 - 2、陀螺和加速度计
 - 3、磁强计
 - 4、射频敏感器
 - 5、姿态敏感器的比较
 - 6、典型航天器（嫦娥2）敏感器介绍
- 

1、星敏感器

恒星作为惯性基准

“北斗星导航”





(1) 星敏感器的主要特点

1) 精度高

中等精度 $10''$ ，高精度 $1''$

2) 信号弱

零等星照度 $2.1 \times 10^{-6} \text{lx}$

克服杂散光干扰很重要

3) 需要恒星识别

4) 能够提供三轴姿态信号





(2) 恒星的光学特性

1) 恒星的光谱

恒星探测器有一定的光谱特性

对不同光谱，探测器灵敏度不同

按最大辐射波长的递升顺序分为：

O, B, A, F, G, K, M 7个型





(2) 恒星的光学特性

2) 恒星的星等

星等是星体亮度的表征。

星等亮度是大气层外接收到的恒星辐射照度来衡量的，

$$m = -2.51 \log_{E_0} E$$

E 辐射照度， E_0 零等星辐射照度，
 m 星等。

辐射照度越大，星等越负。





(2) 恒星的光学特性

3) 恒星的分布

按各光谱段分布

光谱段	O	B	A	F	G	K	M
数目 (%)	1	10	22	19	14	31	3

按恒星星等分布

视星等	+3.0	+4.0	+5.0	+6.0	+7.0	+8.0
数目 (颗)	187	556	1660	5146	15095	44700

分为88个星座，恒星不均匀分布。







(3) 星敏感器的分类

星敏感器分星图仪和星跟踪器两种类型，星跟踪器又可分为框架式和固定式两种形式。

(1) 星图仪：又称星扫描器。一般都是狭缝式，用在自旋卫星上，利用星体的旋转来搜索和捕获目标恒星。





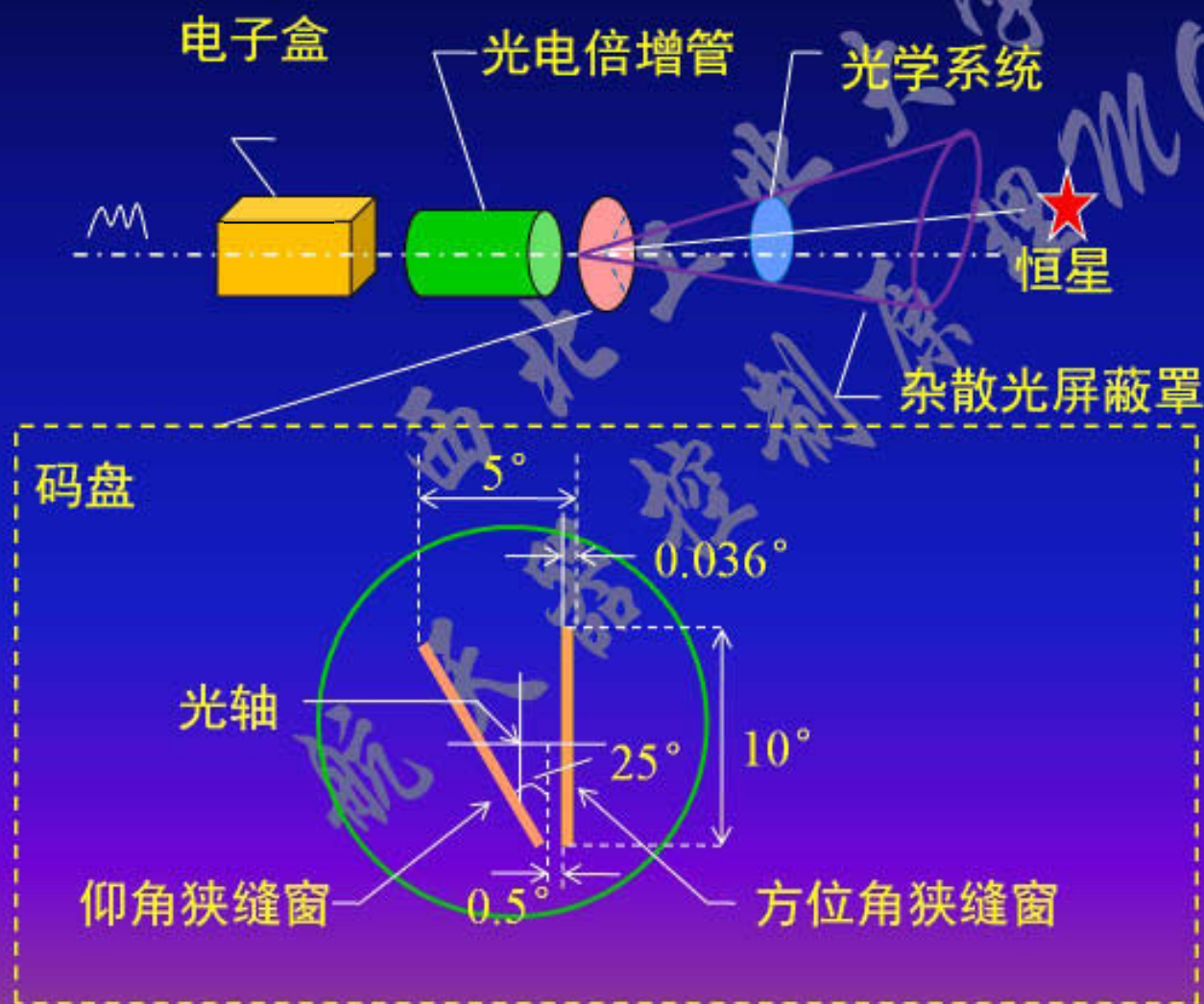
(2) 框架式星跟踪器：是把敏感头装在可转动的框架上，且通过旋转框架来搜索和捕获目标。

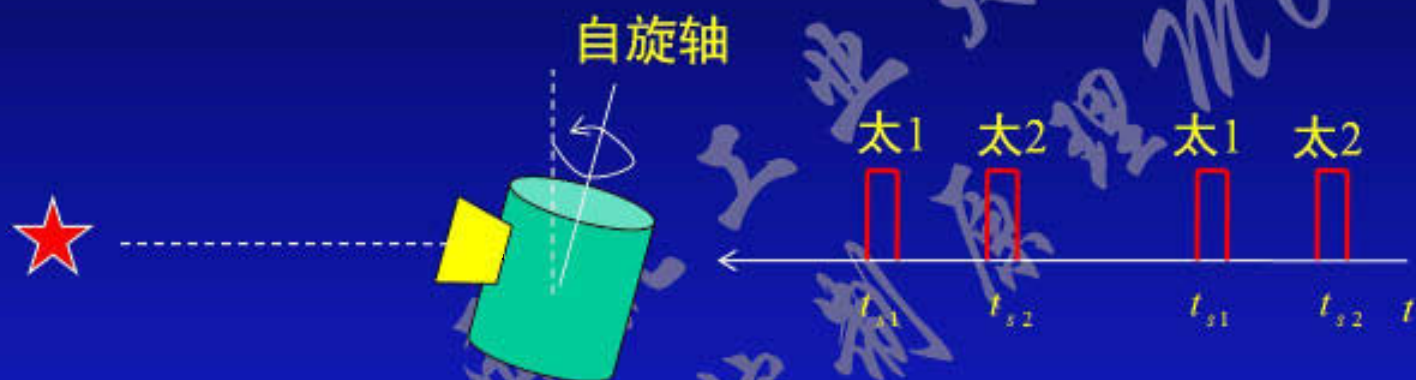
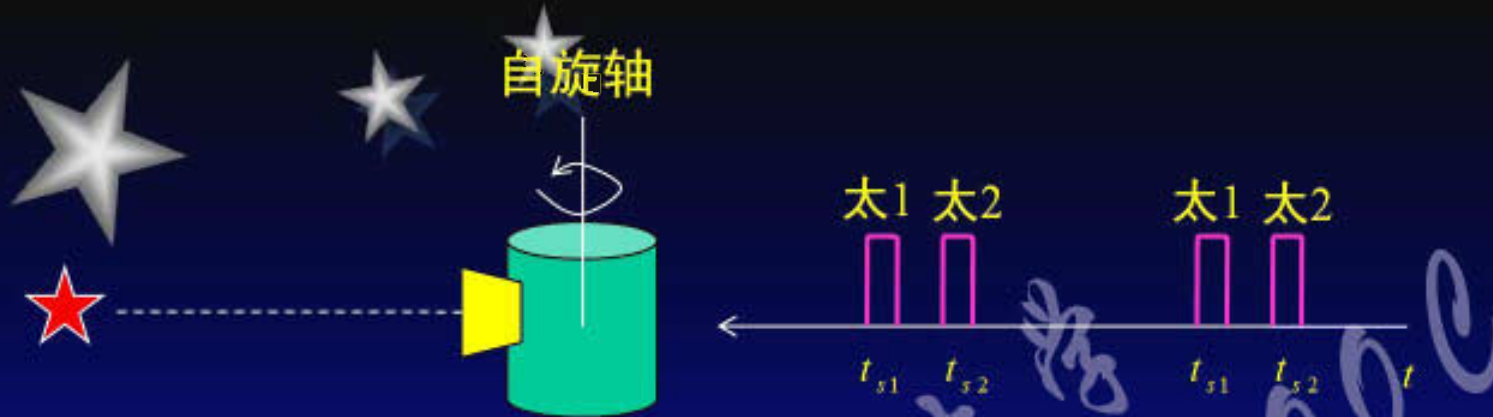
(3) 固定式星跟踪器：这种跟踪器的敏感头相对航天器固定，在一定的视场内具有搜索和跟踪能力。



航天器姿态控制

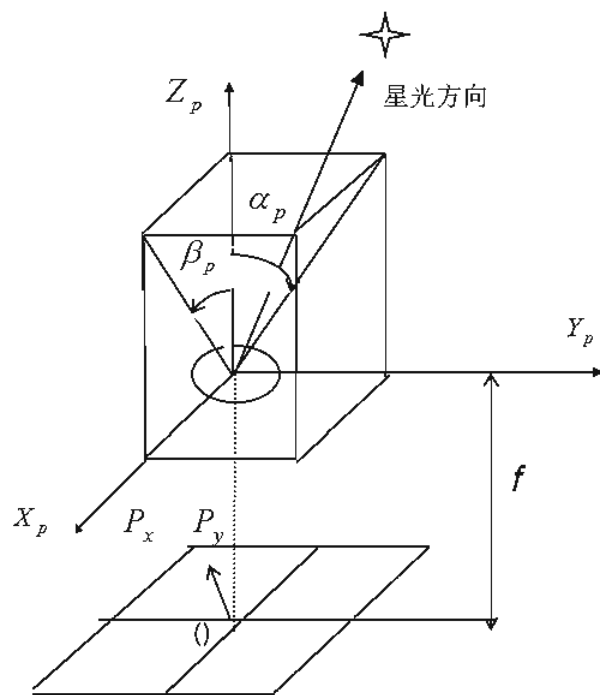
1、狭缝式星敏感器





2、CCD星敏感器

它能够同时跟踪多颗星，对磁场不敏感，精度得到改善。



CCD星敏感器原理示意图



(4) 星敏感器的主要技术指标

(1) 视场与灵敏度：

视场：探测器能观测到的范围。

灵敏度：能敏感到的最暗星等。

(2) 精度：

定位精度：一般附带动态条件。

星等精度：目前约为 ± 0.2 个星等。





(4) 星敏感器的主要技术指标

(3) 数据更新率:

主要与CCD光积分时间有关

目前高于10Hz。

(4) 工作模式:

捕获模式: 计算星像中心, 识别。

跟踪模式





(4) 星敏感器的主要技术指标

(5) 环境、寿命、体积、质量、功耗：

环境因素包括：

温度：与安装位置有关，温控？

振动和冲击：火箭发射过程。

抗辐照能力：

卫星轨道高低，工作时间长短。





星敏感器优点:

- 精度高, 可达到角秒量级
- 不受轨道影响

缺点:

- 信号弱
- 结构复杂, 成本高
- 要防止太阳干扰
- 星识别复杂
- 确定初始姿态, 需要第二个姿态确定系统

(5)星敏感器国内外现状

国外星敏感器的发展经历了4代,
以法国Sodern公司为例:

1970s,光电析像管(IDT)

主要代表: SED03/04

特点: 非自主, 视场很小

15kg, 40w

应用: EXOSAT satellite



1985,非自主CCD

主要代表：SED12/12D

特点：中等视场, 8 kg, 20 W

应用：法国对地观测卫星Helios
系列等，至2011年4月



90s末, 全自主CCD

主要代表: SED16/SED26/SED36

➤ SED16

特点: 全自主, 大视场, 3 kg, 10 W

适用于各种轨道

应用: SPOT5(2002.5), 直到现在



➤ SED26

特点：1. 精度高

光轴方向 0.004° , LFE 0.007° (3σ)

垂直光轴 0.0008° , LFE 0.001° (3σ)

2. 同时观测10颗星

3s以内可以获得卫星的姿态

3. 数据更新率：10Hz

应用：2005年第一次发射使用，高轨道情况下设计寿命18年



➤ SED36

特点：1.精度进一步提高

光轴方向 0.0017° , LFE 0.0047° (3σ)

垂直光轴 0.00028° , LFE 0.00072° (3σ)

2.同时观测14颗星

3.数据更新率：8Hz

4.光学部件与电子部件分开，以减小热耦合影响



APS, HYDRA系列

动态像元敏感器

特点：1.精度进一步提高

$$\text{LFE} < 0.00017^\circ \quad (3\sigma)$$

$$\text{NEA} < 0.0003^\circ \quad (3\sigma)$$

2.一个电子单元上最多可以安装4个
光学单元，每个光学单元同时跟踪
15颗星

3.嵌入卡尔曼滤波，数据融合等算法
可确定角速度最大值为 $10^\circ / \text{s}$

应用：2010年已完成地面测试





我国的星敏感器

主要飞行经历：cbers-1 03/04 及嫦娥-1

特点：1.精度

0.0033° (1σ)(俯仰, 滚动)

0.028° (1σ)(偏航)

NEA: 0.00083° (1σ)

2.视场: 8.5°

3.数据更新率: 1hz (标准)

4.功耗: 8.1w (标准)

2、惯性姿态敏感器

姿态敏感器的两大类别：

1) 依靠外部基准

光学敏感器

无漂移姿态

精度越高，视场越小

通频带窄，更新率低

阴影区工作受限

2) 自主惯性敏感器

陀螺和加速度计

有固有漂移

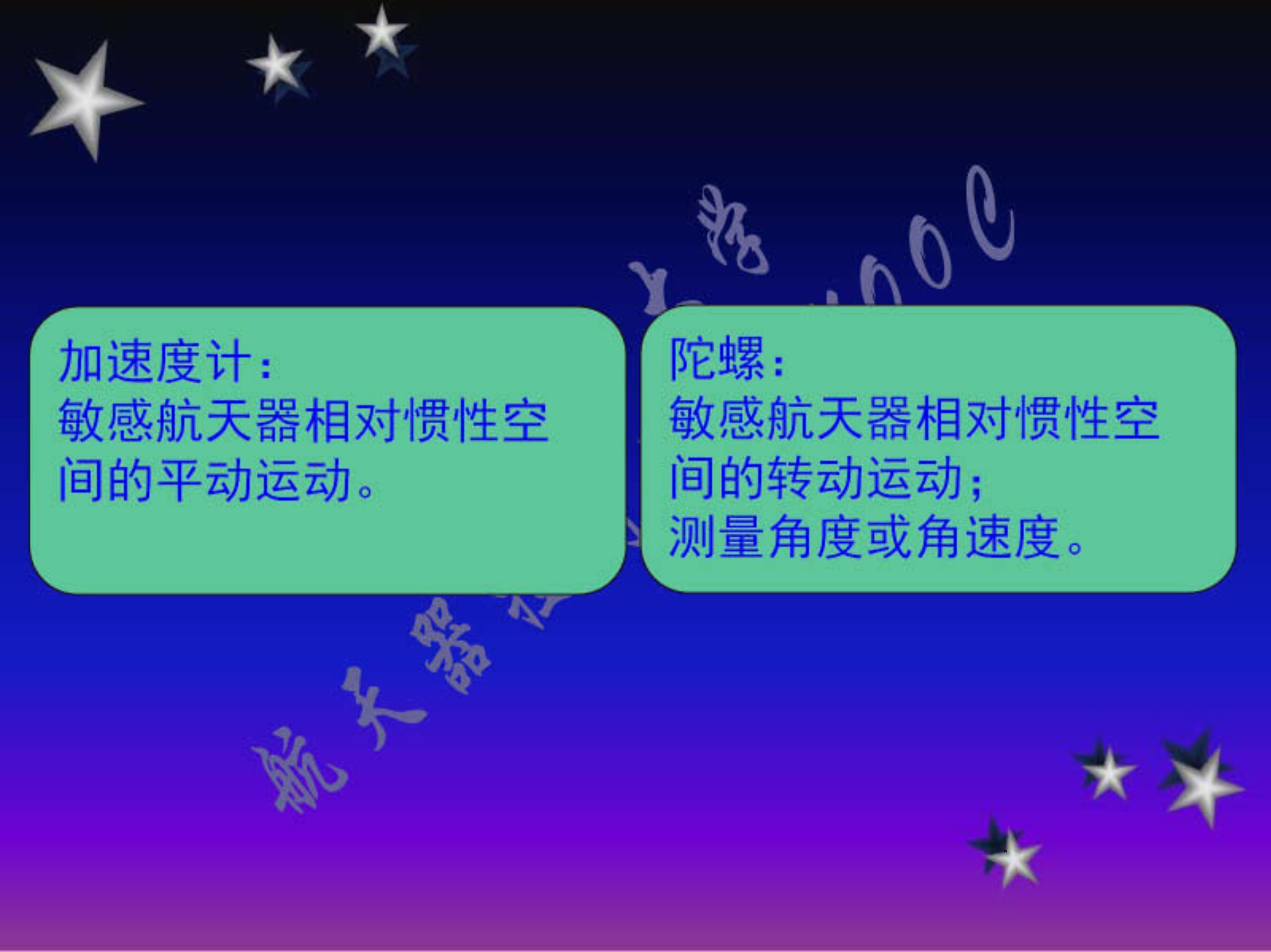
短时间内精度高

通频带高，更新率高

抗干扰性能强

区别

优势互补，组合定姿。



加速度计：
敏感航天器相对惯性空间的平动运动。

陀螺：
敏感航天器相对惯性空间的转动运动；
测量角度或角速度。



陀螺在航天器中的应用

- (1) 速度阻尼，相对惯性空间稳定
- (2) 提供短时间姿态基准
- (3) 组成光学-惯性测量单元

卡尔曼滤波器



加速度计在航天器中的应用

(1) 载人航天惯导平台

初始对准

载体高度和距离测量

(2) 变轨控制和推力测量

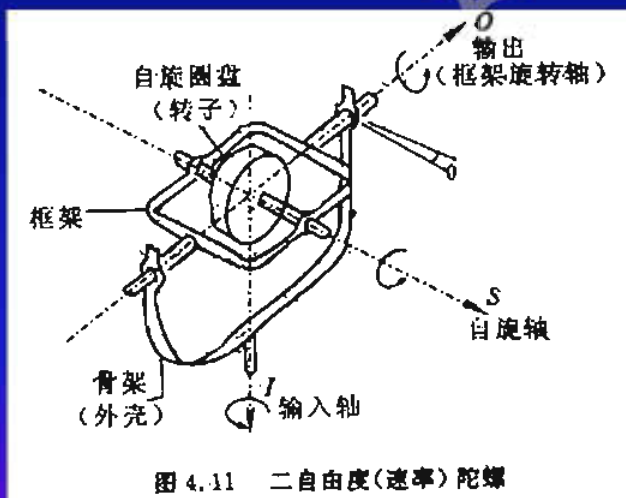
(3) 主动章动测量

(4) 外层空间微重力环境测量



陀螺的基本工作原理

陀螺是利用一个高速旋转的质量来敏感其自旋轴在惯性空间定向的变化。



激光陀螺：固态陀螺，没有运动部件。



陀螺的发展

➤20世纪初：滚珠轴承支承陀螺，框架陀螺

➤1940s~1950s：液浮陀螺，气浮陀螺

➤1960s以后：挠性支承转子陀螺

➤现今：静电陀螺，光学陀螺，振动陀螺





惯性敏感器优点:

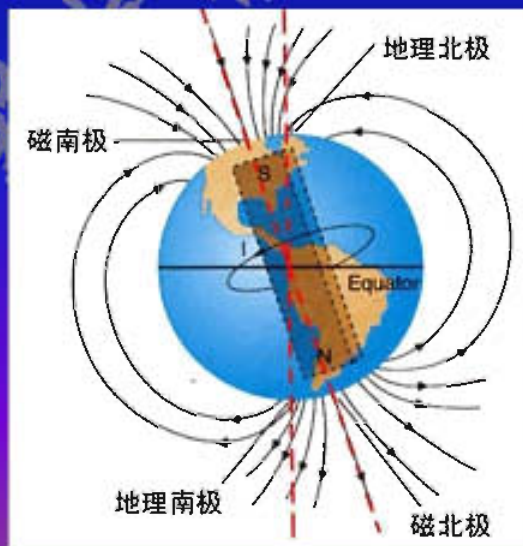
- 自主性强
- 不受轨道影响
- 有限时间内精度高
- 星体上容易实现

缺点:

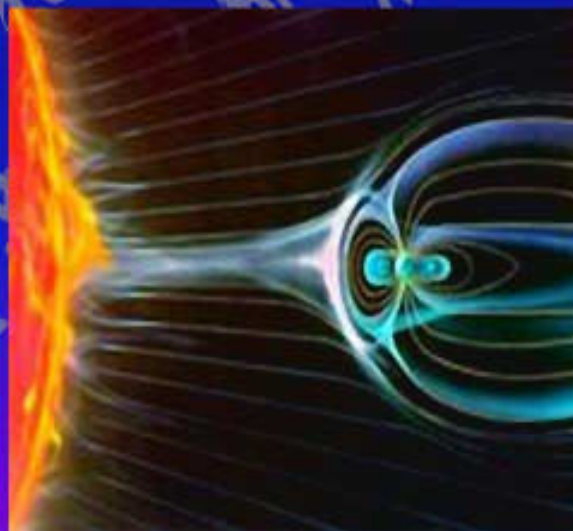
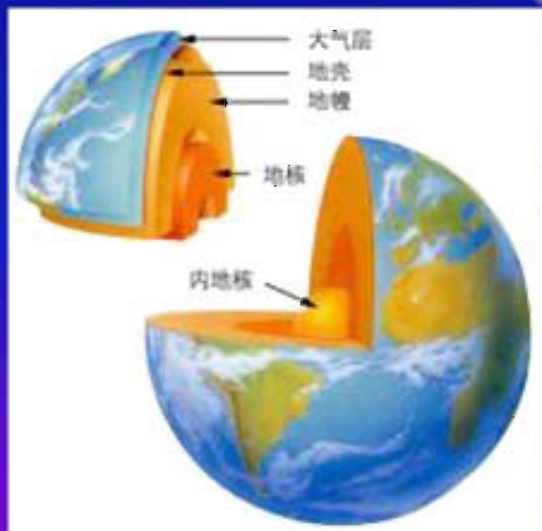
- 易漂移
- 有高速转动部件, 易磨损
- 功率大, 质量大


3、磁强计

地磁场包括基本磁场和变化磁场两个部分。基本磁场起源于地球内部，比较稳定。偶极子磁场是地磁场的基本成分，其强度约占地磁场总强度的90%。



包在内核外层的外核是由液态铁质混和液态镍和其他轻元素组成的。外核中的对流加上地球的自转是产生地磁场的原因。

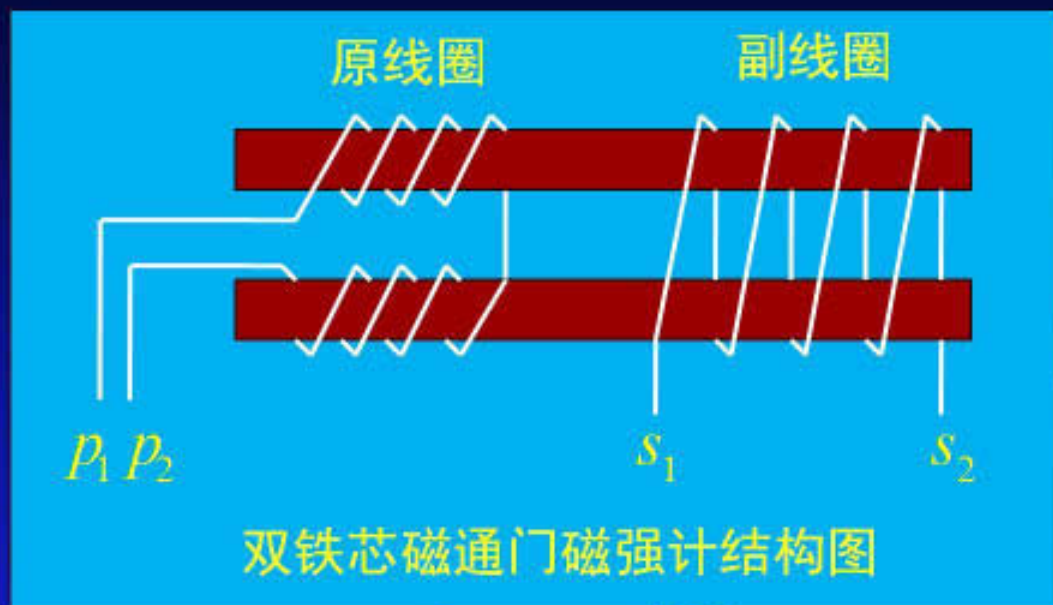


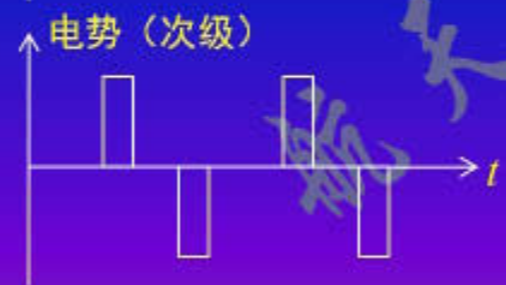
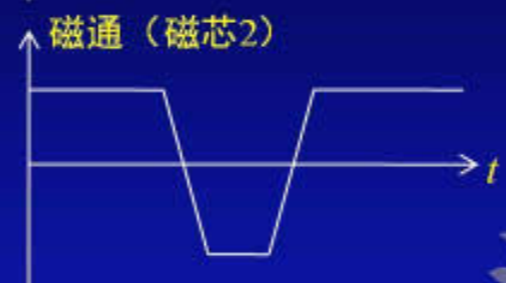
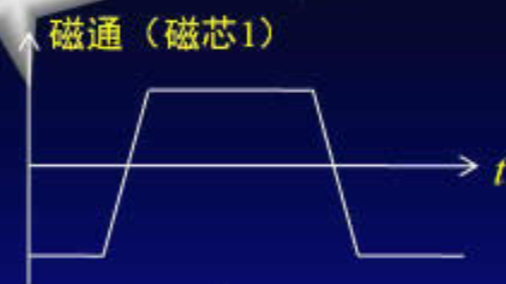


磁强计是以地球磁场为基准，测量航天器姿态的敏感器。地球周围每一点的磁场强度都可以由地球磁场模型事先确定，利用航天器上的磁强计测得的信息与之对比便可以确定出航天器相对于地球磁场的姿态。

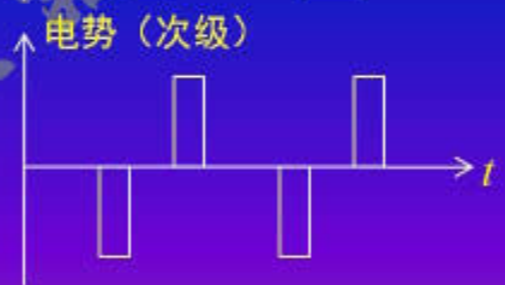
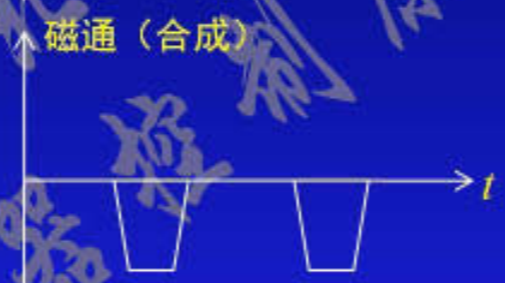
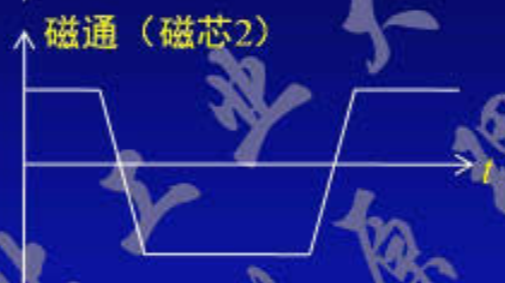
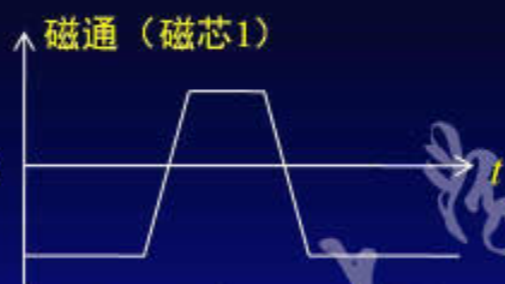
目前应用较多的是感应式磁强计。







(a) 外部磁场为正向



(b) 外部磁场为负向

3个磁通门磁强计互相垂直安装，可以测量三轴当地磁场强度。利用它与已知环境磁场模型相比较，可以估算出航天器姿态。

磁强计质量小，性能可靠，消耗功率低，工作温度范围宽，没有活动部件。

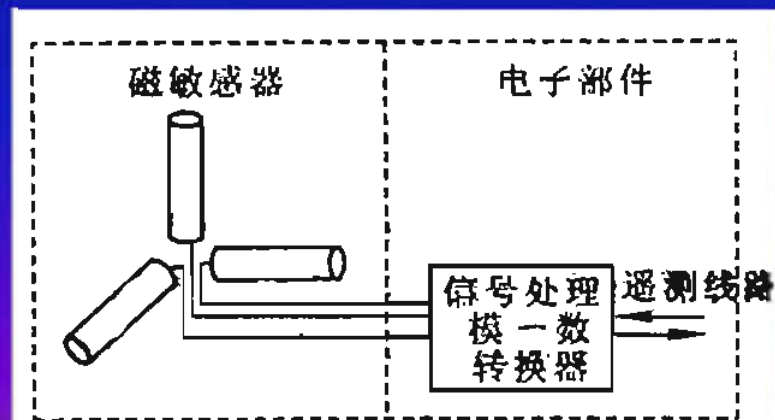




图 4.12 用来测量姿态的磁强计结构图



地球磁场模型仅是对地球磁场的近似描述，以此模型作为基准必然会带来较大的误差，所以磁强计姿态测量精度不高。

某点地球磁场强度与该点距地心的距离的3次方成反比，这使得中高轨道(轨道高度大于1000km)上地球磁场强度很弱，使磁强计的应用受轨道高度限制。





磁强计优点:

- 成本低, 功耗低
- 低轨道卫星灵敏度高

缺点:

- 分辨率大于 0.5°
- 受轨道影响大
- 星体内要进行磁清洁

4、射频敏感器

测量量：

天线视轴与信号源之间的角误差

卫星有效载荷

地面站天线，
用户星可控天线

应用方向：

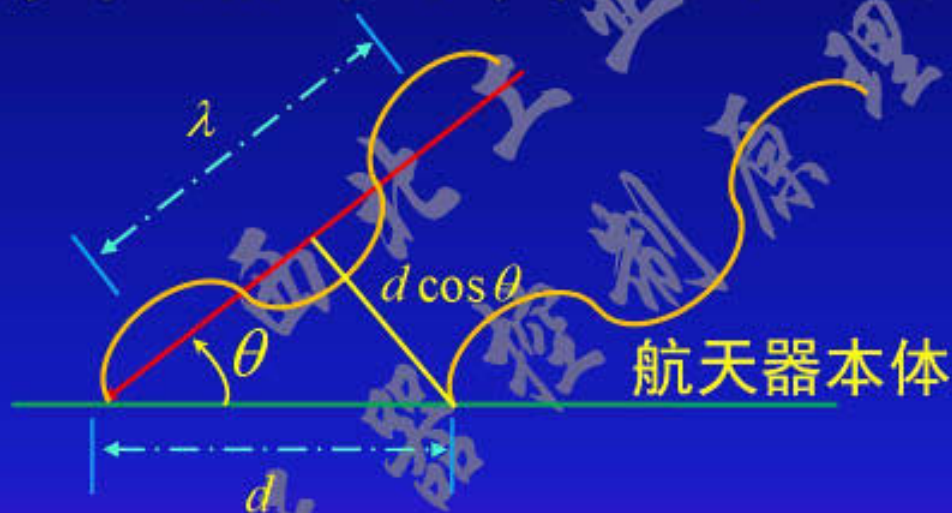
卫星有效载荷的高精度复合控制

如：地球静止轨道通信卫星天线。

射频敏感器的工作原理

两种类别：

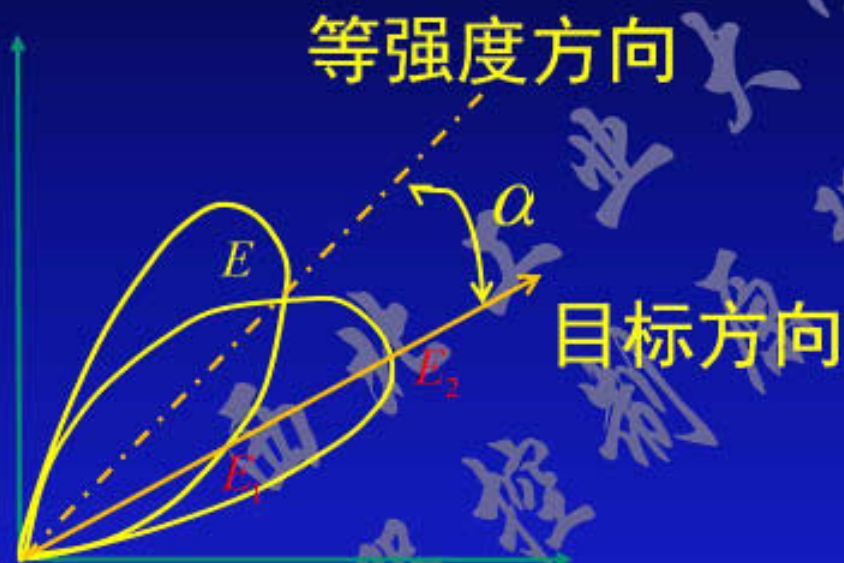
单脉冲比相式(干涉仪式)和比幅式。



φ 两天线接收电波相位差

$$\cos \theta = \frac{\lambda}{2\pi d} \varphi \rightarrow \text{预先给定}$$

单脉冲比幅式



相互叠交的天线方向图

两个信号的幅度差值包含角度信息



射频敏感器优点:

- 精度约 0.03°
- 结构易实现

缺点:

- 无自主性
- 受地面站分布限制

5、姿态敏感器的比较

敏感器类型	优点	缺点
太阳敏感器	(1)信号源强 (2)功耗低，质量轻	(1)有阴影区 (2)精度约1'
地球敏感器 (地平仪)	(1)适用于近地轨道卫星 (2)信号强 (3)轮廓清楚 (4)分析方便	(1)一般需要扫描机构 (2)需要防止太阳干扰 (3)精度约0.1° (4)受轨道影响大

敏感器类型	优点	缺点
星敏感器	(1)精度约 0.003° (2)不受轨道影响	(1)信号弱 (2)结构复杂，成本高 (3)要防止太阳干扰 (4)星识别复杂 (5)确定初始姿态，需要第二个姿态确定系统
惯性敏感器	(1)自主性强 (2)不受轨道影响 (3)有限时间内精度高 (4)在星体上容易实现	(1)易于漂移 (2)有高速旋转部件，易磨损 (3)功率大、质量大



敏感器类型	优点	缺点
磁强计	(1)成本低，功耗低 (2)对低轨道卫星灵敏度高	(1)分辨率大于 0.5° (2)受轨道影响大 (3)在星体内要进行磁清洁
射频敏感器	(1)精度约 0.03° (2)不受航天器形变弯曲影响 (3)结构易实现	(1)无自主性 (2)受地面站分布限制

6、典型姿态(嫦娥2)传感器介绍

