北航数字导航中心
DIGITAL NAVIGATION CENTER

北京航空航天大學
BEIHANG UNIVERSITY

公共选修课

第7章 视觉导航技术——图形图像匹配导航技术

主讲教师：赵龙

办公电话：**82316764**

办公地点：新主楼**E402**

网站：**www.digitnav.com**

E_mail：flylong@buaa.edu.cn

本章的学习目的

1、了解图形图像匹配导航技术的发展；

2、了解图形图像匹配导航技术的工作原理；

3、了解图形图像匹配导航技术的应用。

1 引言

- 现代战争对各种战略、战术武器提出来越来越高的要求
  - 对定位精度的要求高，通常在**50m**以内，甚至只有几米
  - 要工作在高对抗的电子环境中，执行着回避地空导弹、低空突防、武器投放、空空格斗等高机动、复杂的多种战斗任务；
  - 要实现不依赖气象条件、可昼夜工作、寂静（低截获概率）的导航。

1 引言

➢有效应用

- 以**1991**年海湾战争中使用**TAN**的武器为例：

“爱国者”防空导弹准确地拦截了“飞毛腿”导弹；

“斯莱姆”导弹继第一枚在巴格达附近水电站的墙壁上穿个洞之后，第二枚由该洞进入水电站内部爆炸；

“战斧”式导弹的攻击成功率高达**95**%，在海湾战争中大显身手。

1 引言

- 提高导航精度的主要方法有三类：
  - 提高单个导航系统的精度；
  - 采用卡尔曼滤波技术将两个或多个导航系统相组合，构成最优组合导航系统；
  - 采用一种能精确修正系统误差的辅助手段对主导航系统实施修正的修正法。

1 引言

- 视觉导航技术（**VN**）

利用视觉的基本原理计算载体的导航参数的一项技术。

- 地形辅助导航技术（**TAN**）

用数字地图来辅助惯性导航以提高导航精度的一种导航技术；

其精度取决于数字地图的精度和地形的变化情况；

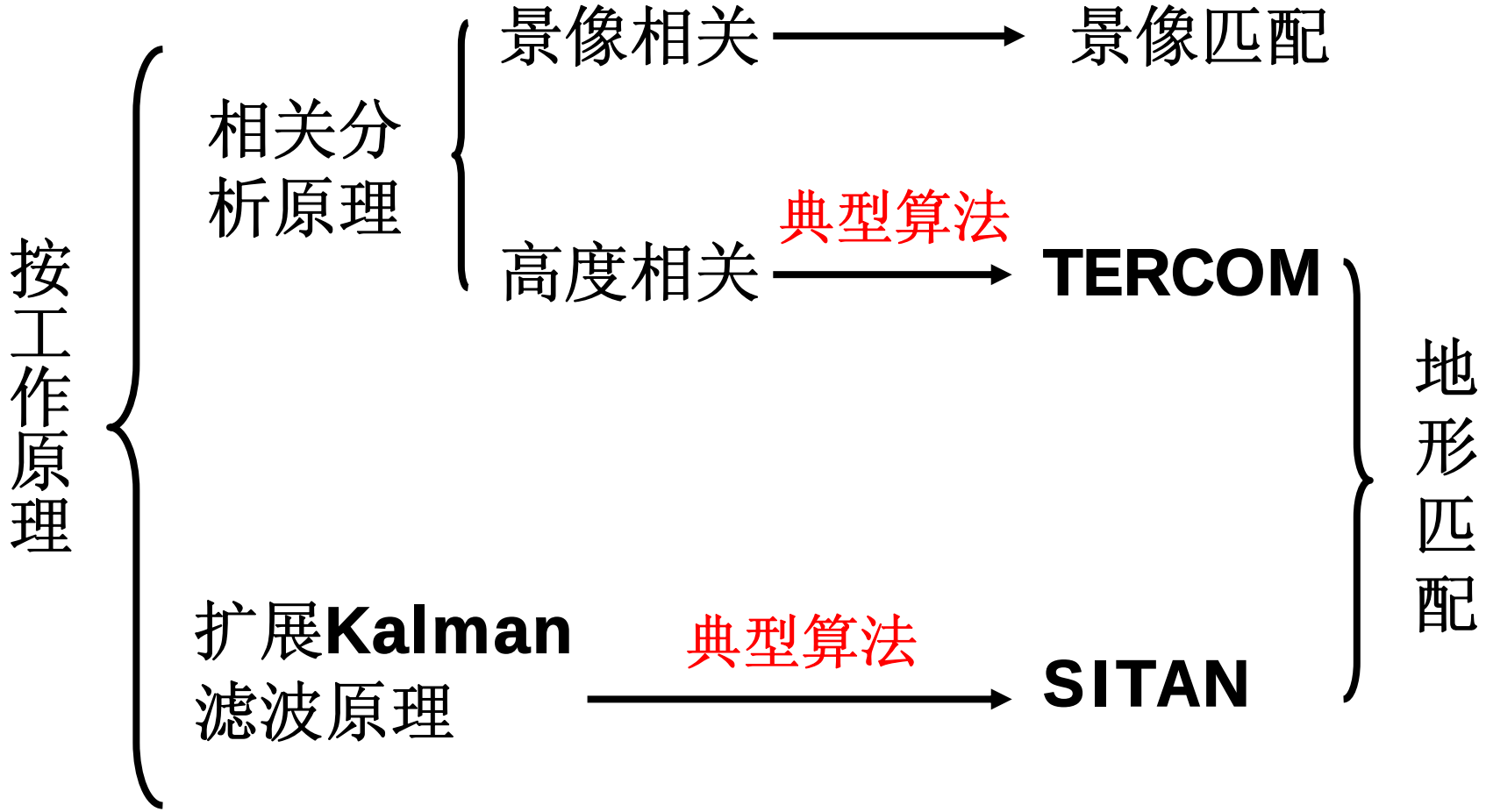
1 引言

- 地形辅助导航与组合导航系统的根本区别
  - 数字地图对主导航系统仅能起辅助的修正作用，非独立的
  - 离开了惯导系统，数字地图无法独立地提供任何导航信息
  - 由于其工作原理与组合导航类似，有时也将其称为地形/惯性组合导航。

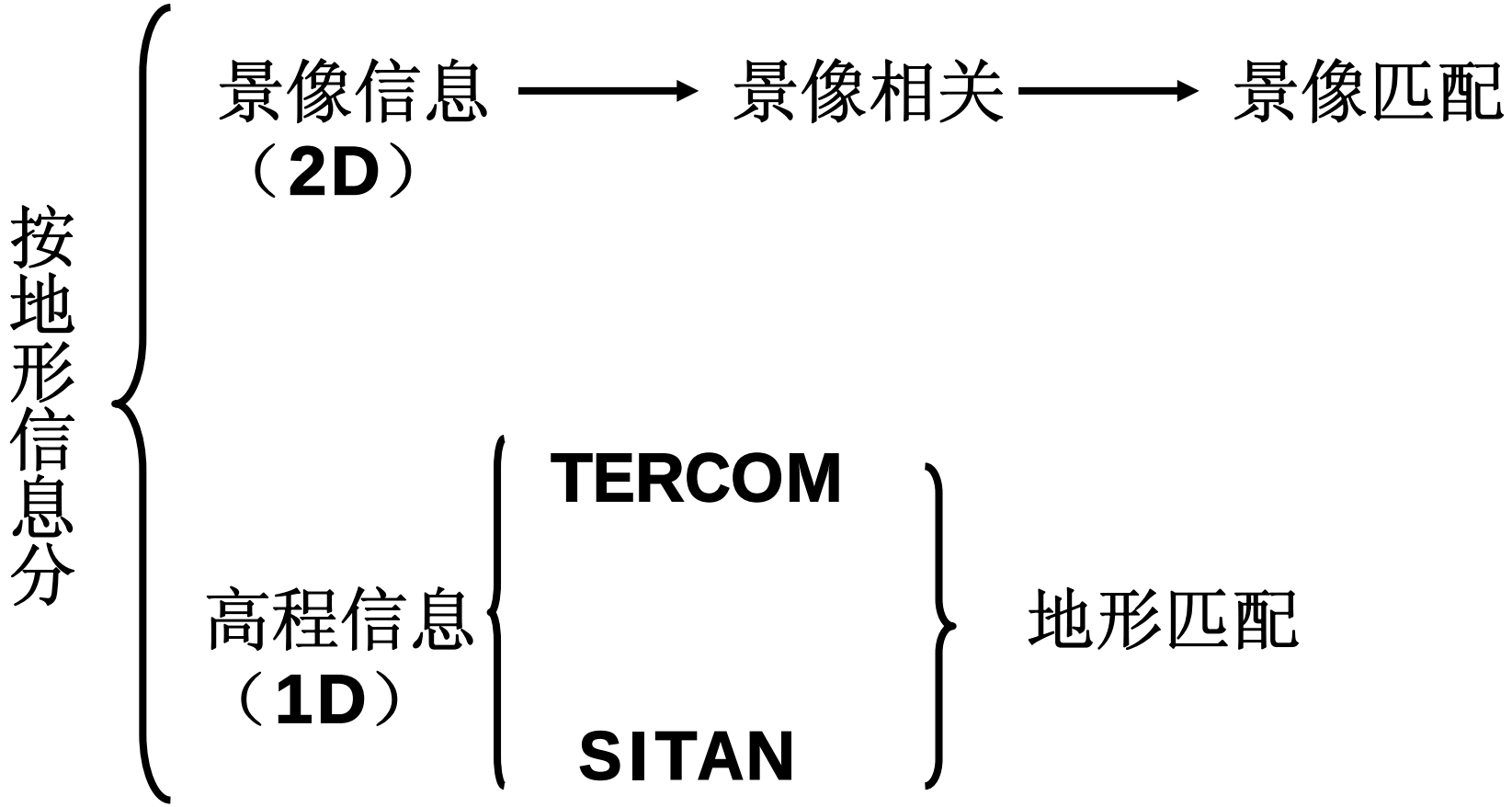
1 引言

- 地形辅助导航与GPS的优缺点
  - 在低高度、特别是丘陵和山区，TAN优于GPS；
  - TAN隐蔽性好，卫星信号易被干扰；
  - TAN仅增加了大容量存贮器硬件；
  - GPS的位置用WGS-84球体定义的，TAN用地图表示
  - GPS定位信息是相对WGS－84坐标系椭球体定位的
  - TAN自动相对地图定位；
  - TAN成本低。

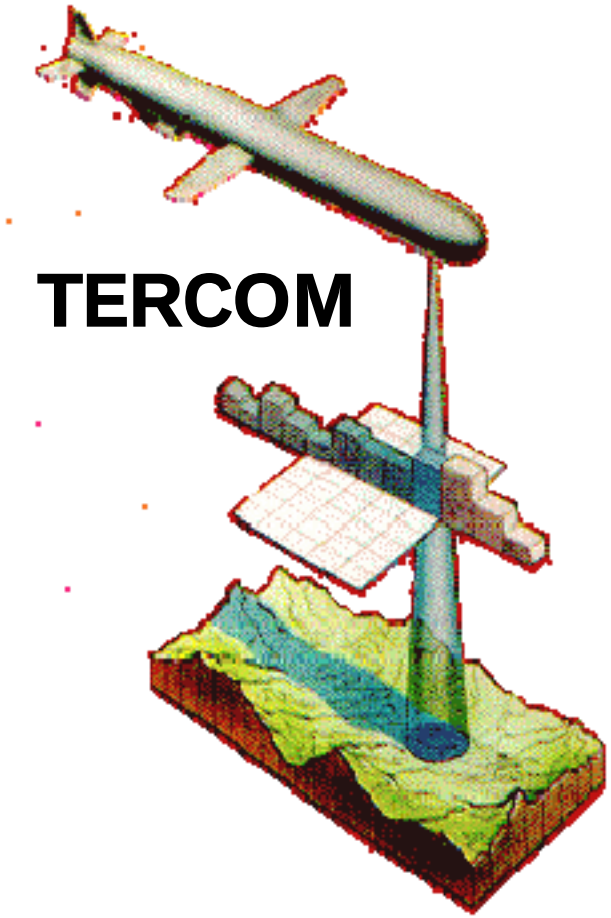
1 引言

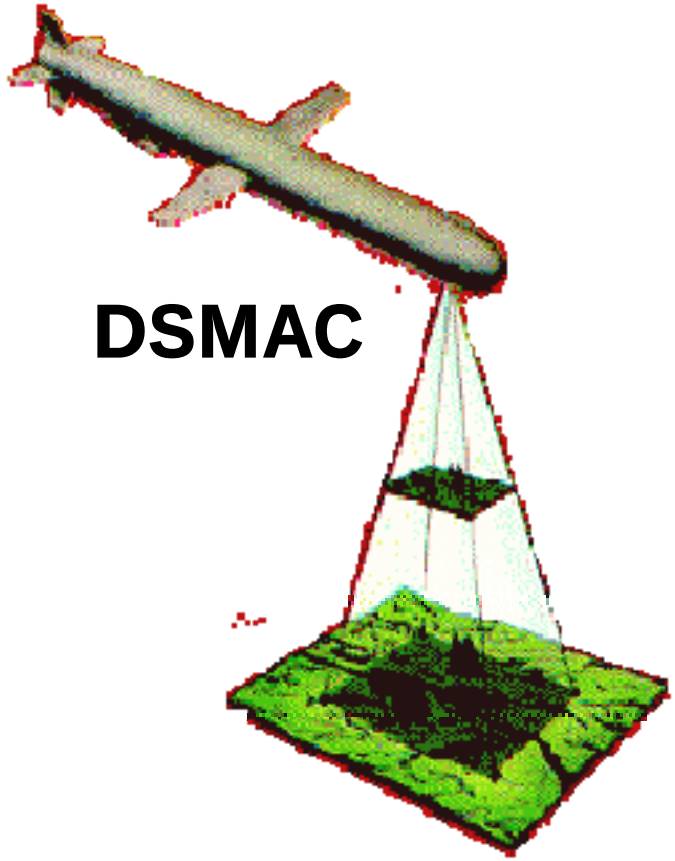

按工作原理
相关分析原理
景像相关
景像匹配
高度相关
典型算法
TERCOM
扩展Kalman滤波原理
典型算法
SITAN
地形匹配

1 引言



1 引言





2 地形匹配导航技术

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

2.2 地形匹配导航技术的分类

2.3 数字地图技术

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

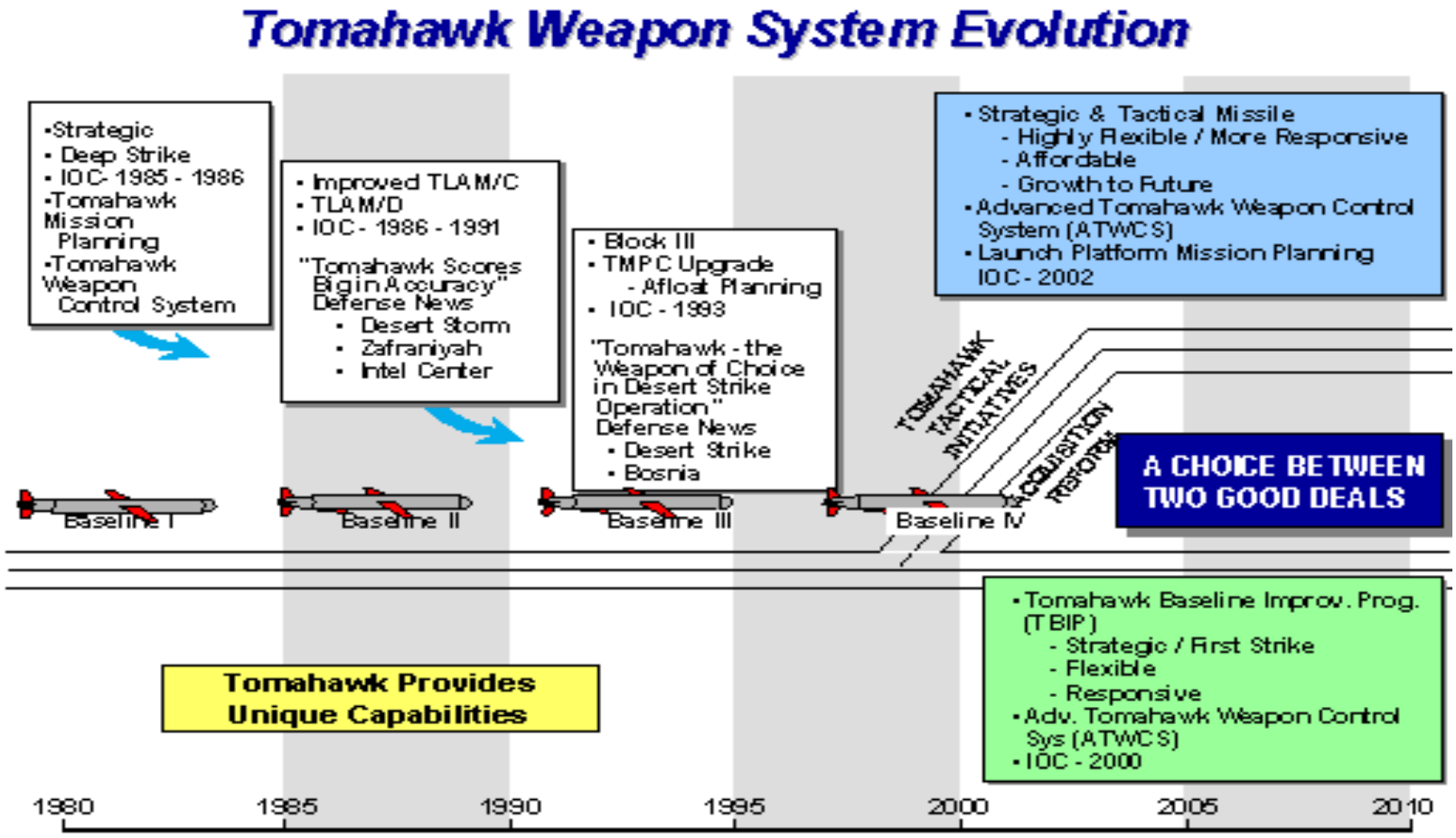
- 20世纪50年代，西方发达国家开始研究地形匹配。
- 美、英起步早，相继提出多种方案，并付诸实施。
- 20世纪80年代，先后进行了广泛的试飞实验。
- 20世纪90年代投入使用。
- 1995年，英国更新了飓风式飞机的导航设备。
- 一些主要系统及其应用见下表。

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

国别	公　　司	系统名称	试飞情况
美国	桑迪亚公司	桑迪亚惯性/地形辅助导航系统	1982年C-54 AFT/F16
	E系统公司	地形轮廓匹配系统	
	德克萨斯仪器公司	地形障碍穿越系统	1985年试飞
	洛克韦尔仪器公司	数字地形相关系统	F-16飞机
	麦道飞机公司	机动地形相关系统	金氏航空公司
英国	不列颠宇航公司(BAE)	地形剖面匹配系统	飓风飞机，F-16
	费伦蒂公司	利用地形参考设备	飓风飞机
	GEC航空电子	地形参考导航系统	飓风飞机，F-16
德国	道尼尔公司	智能传感器系统	CH-53型飞机
法国	SAGEM公司	地形剖面匹配系统	幻影2000,5BA

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

- 地形匹配导航技术的发展



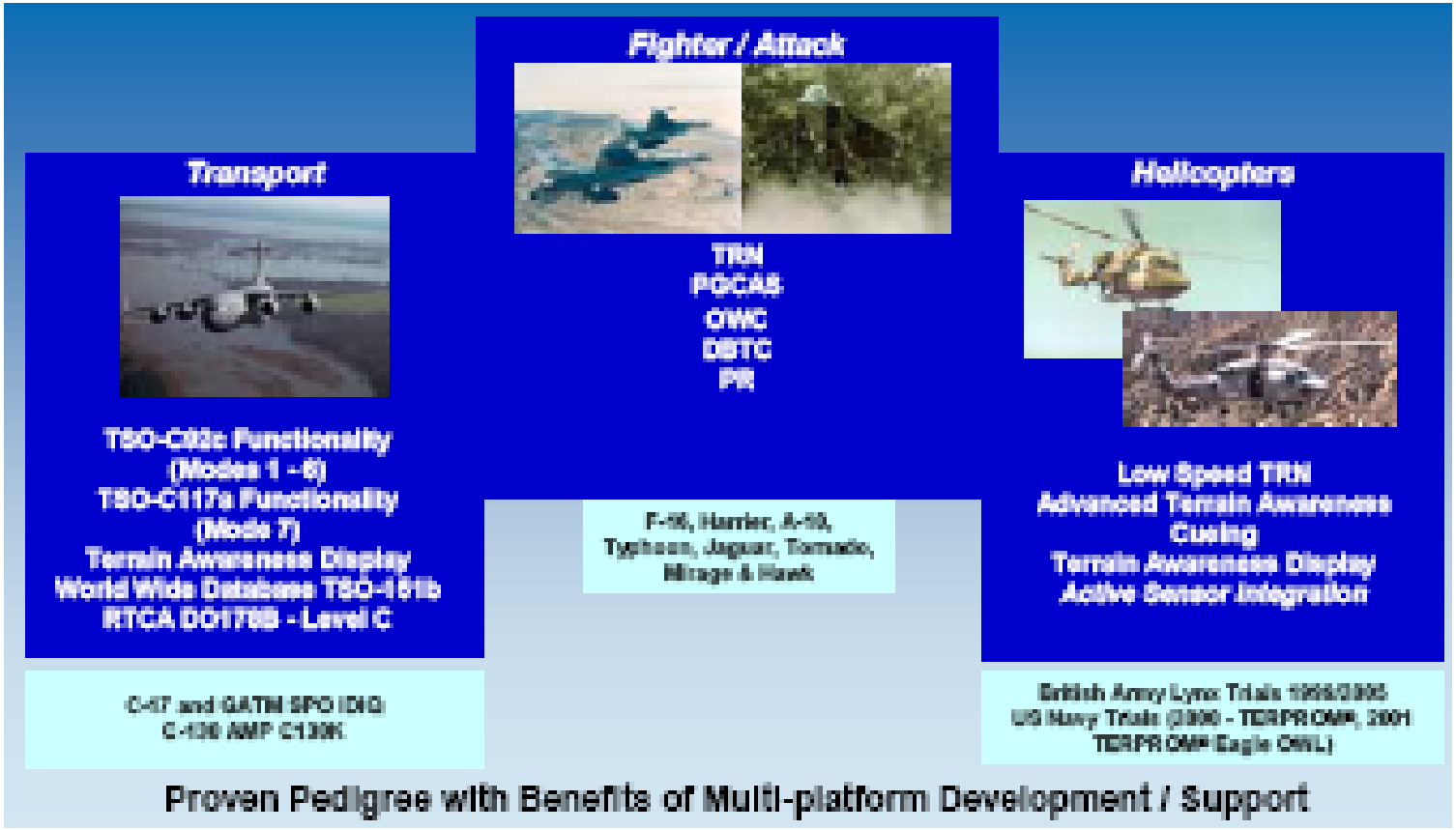
- 美国GPS成熟，地形匹配为备份导航系统。

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

地形匹配导航技术的发展

- 法国的风暴之影仍用地形匹配/景像技术。
- 德国的金牛巡航导弹。
- 俄罗斯的X－55SM导弹。

2.1 地形匹配导航技术的发展现状



TERPROM

2.1 地形匹配导航技术的发展现状



TERPROM

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

- 北京航空航天大学 www.digitnav.com
- 华中科技大学
- 国防科技大学
- 南京航空航天大学
- 西北工业大学
- 航天科工集团三院三部、35所

2 地形匹配导航技术

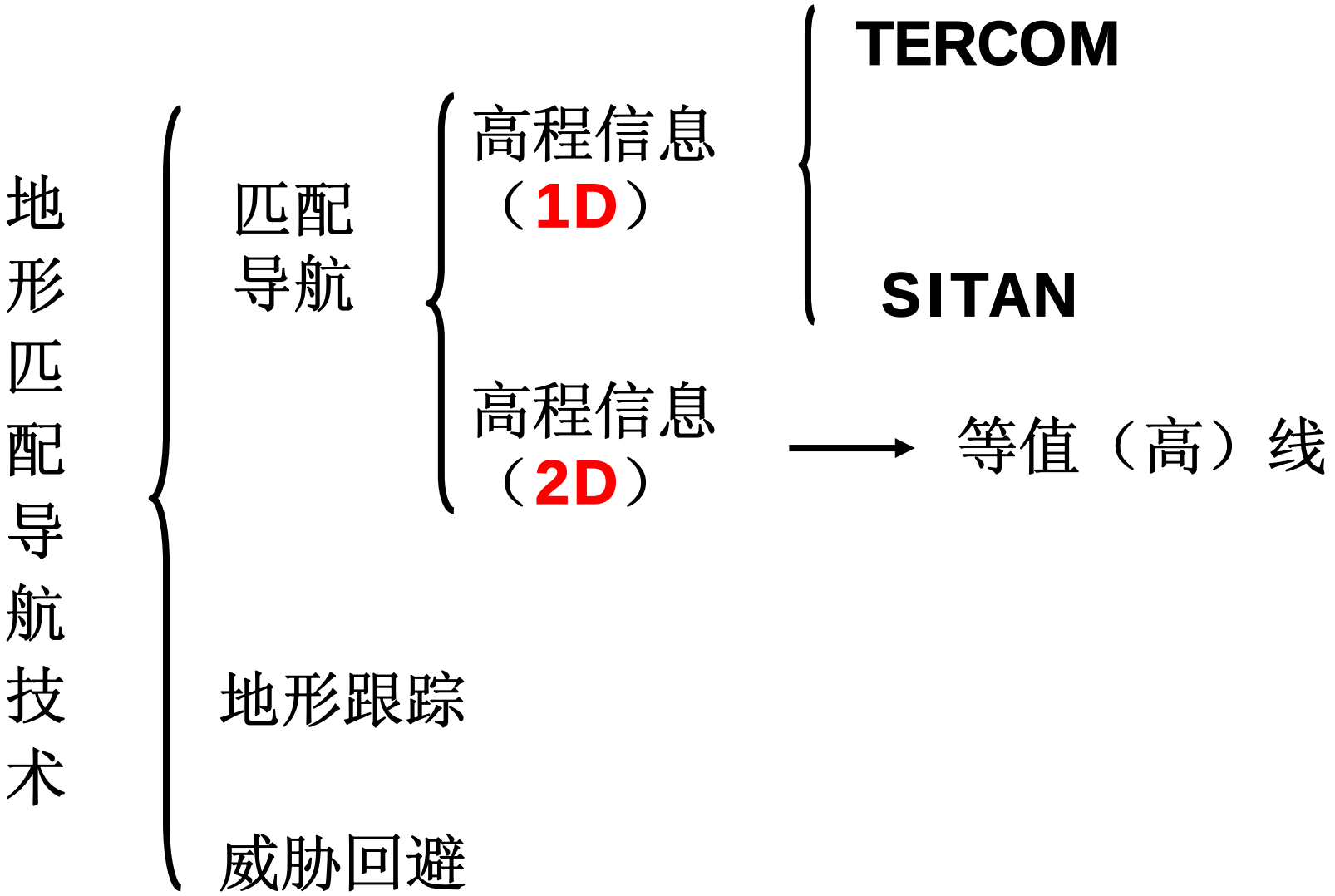
2.1 地形匹配导航技术的发展现状

2.2 地形匹配导航技术的分类

2.3 数字地图技术

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

2.2 地形匹配导航技术的分类



2 地形匹配导航技术

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

2.2 地形匹配导航技术的分类

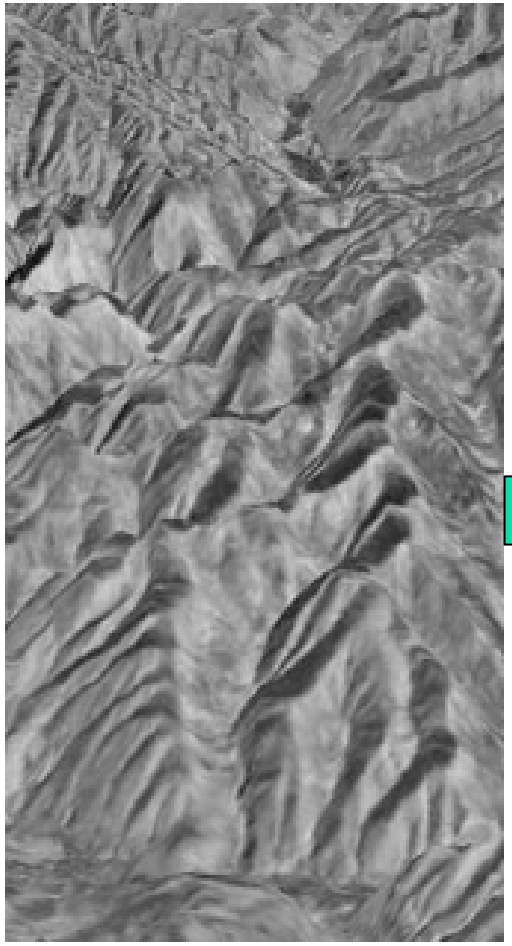
2.3 数字地图技术

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

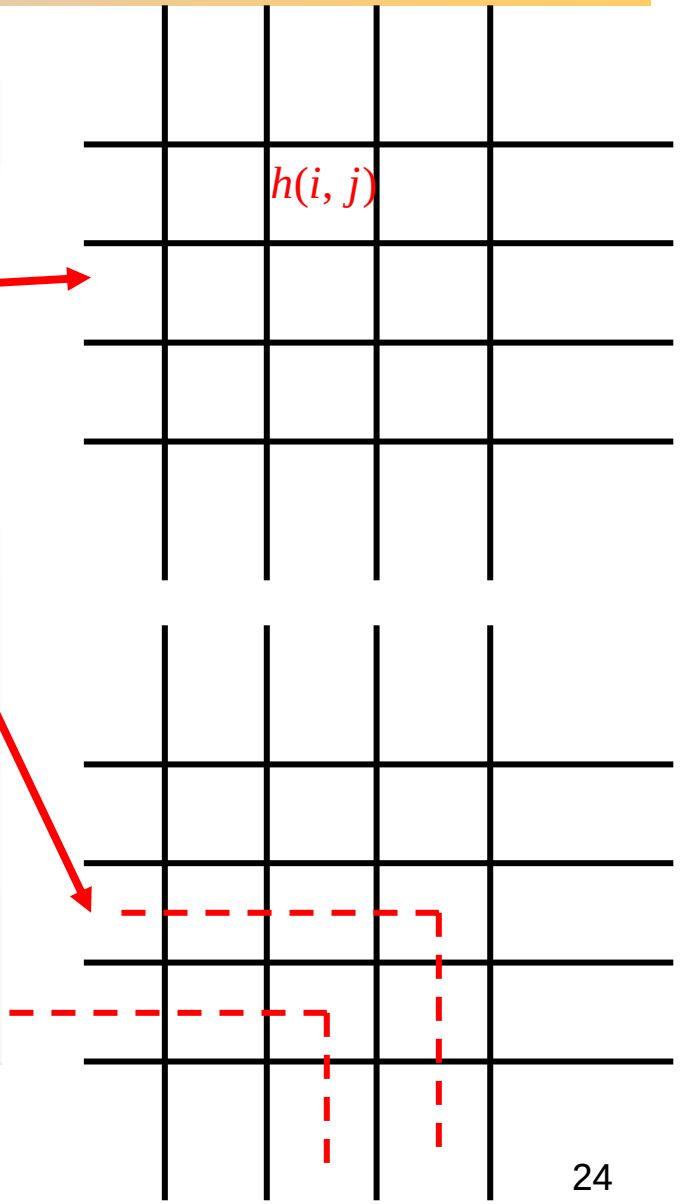
2.3 数字地图技术

- 采用大地测量的方法直接从地形上测出高程；
- 利用航空摄影测量照片，采用数字高程判读仪从两张对应照片上读取高程；
- 利用卫星摄影测量照片读取高程；
- 从小比例尺普通等高线地形图上读取高程。

2.3 数字地图技术



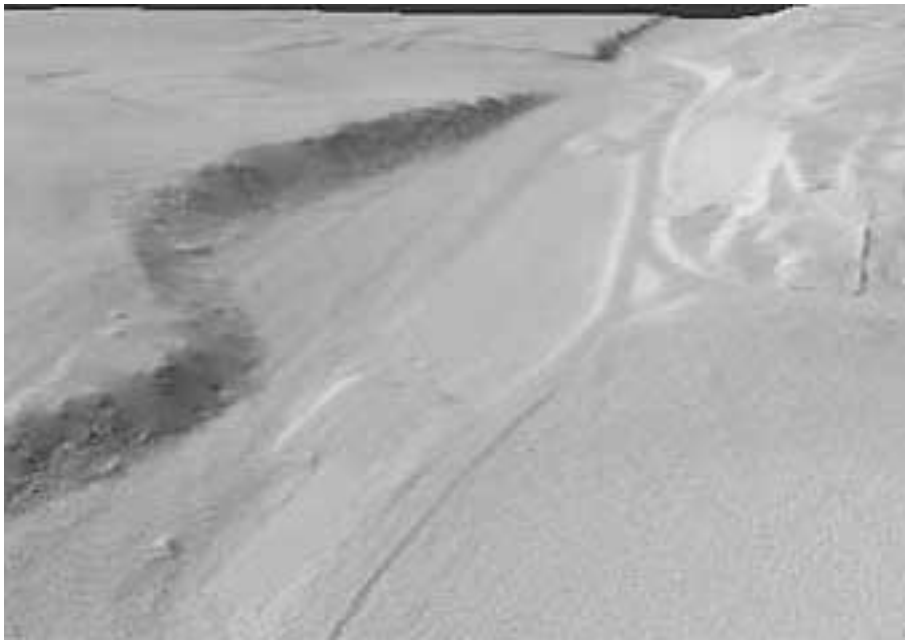




2.3 数字地图技术

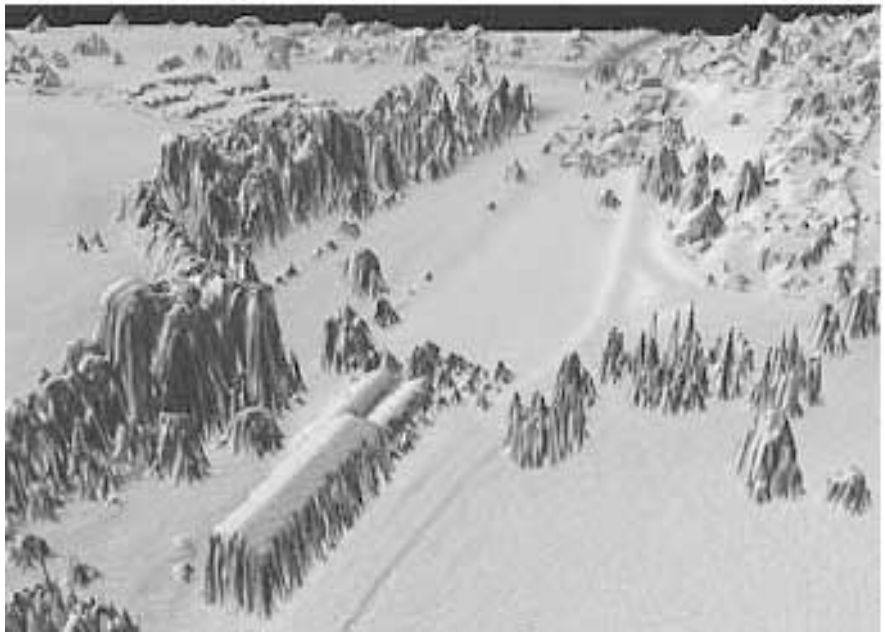
- 通过对地形高度的离散采样并量化得到
- 采样距离叫做格网距离；
- 采用二维平面坐标，通常采用**WGS-84**大地坐标系；
- 地理坐标系经高斯—克吕格投影转换为数字地图坐标系。

2.3 数字地图技术



数字地形模型

（DTM, Digital Terrain Model）



数字地表模型

（DSM, Digital Surface Model）

2.3 数字地图技术

➢ 数字地图的误差与精度

数字地图的误差随制作方法不同而不同，一般有测量误差、判读误差和制图误差等。

- 目前用小比例尺等高线地图制作的数字地图的高程精度通常为**3～5m**。
- 由航测照片制作的数字地图总高程误差约为**5m**。

总之，由数字地图制作导致的误差可近似为白噪声，构成量测噪声中的γ_m项。

2 地形匹配导航技术

2.1 地形匹配导航技术的发展现状

2.2 地形匹配导航技术的分类

2.3 数字地图技术

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

➢ 匹配导航

- 惯性导航系统——可提供全部导航信息；
- 无线电高度表——测量飞行器对地面的相对高度；
- 气压式高度表或大气数据中心——单独或与惯导系统综合地提供飞行器的海拔或绝对高度；
- 导航计算机和大容量存储器——完成导航计算和存储数字地图。

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

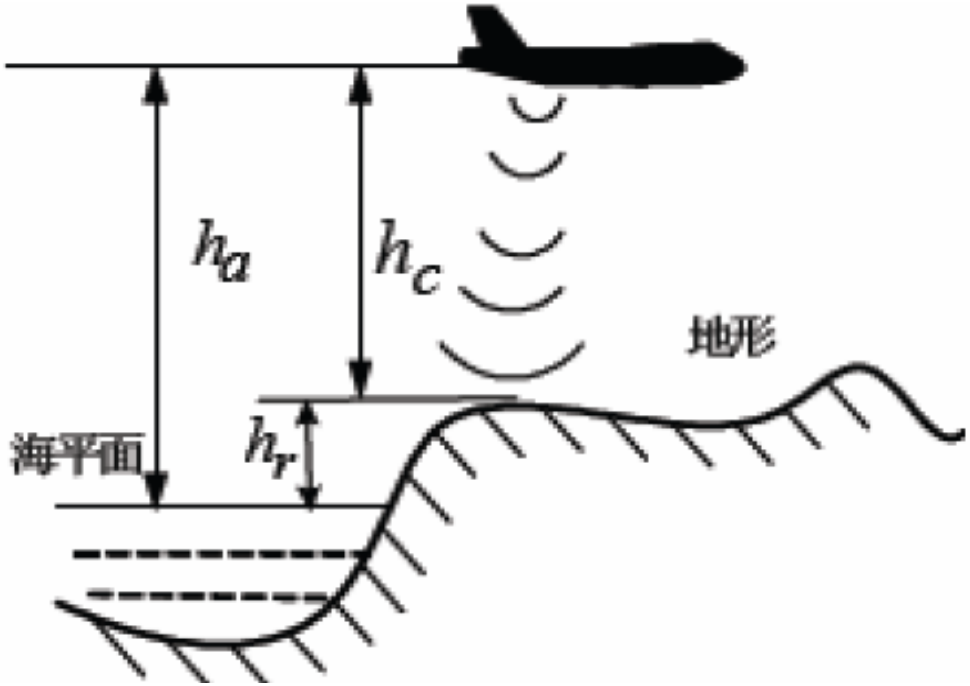
➢ 匹配导航

h_a：海拔高度

H_r：地形的高度

h_c：相对高度

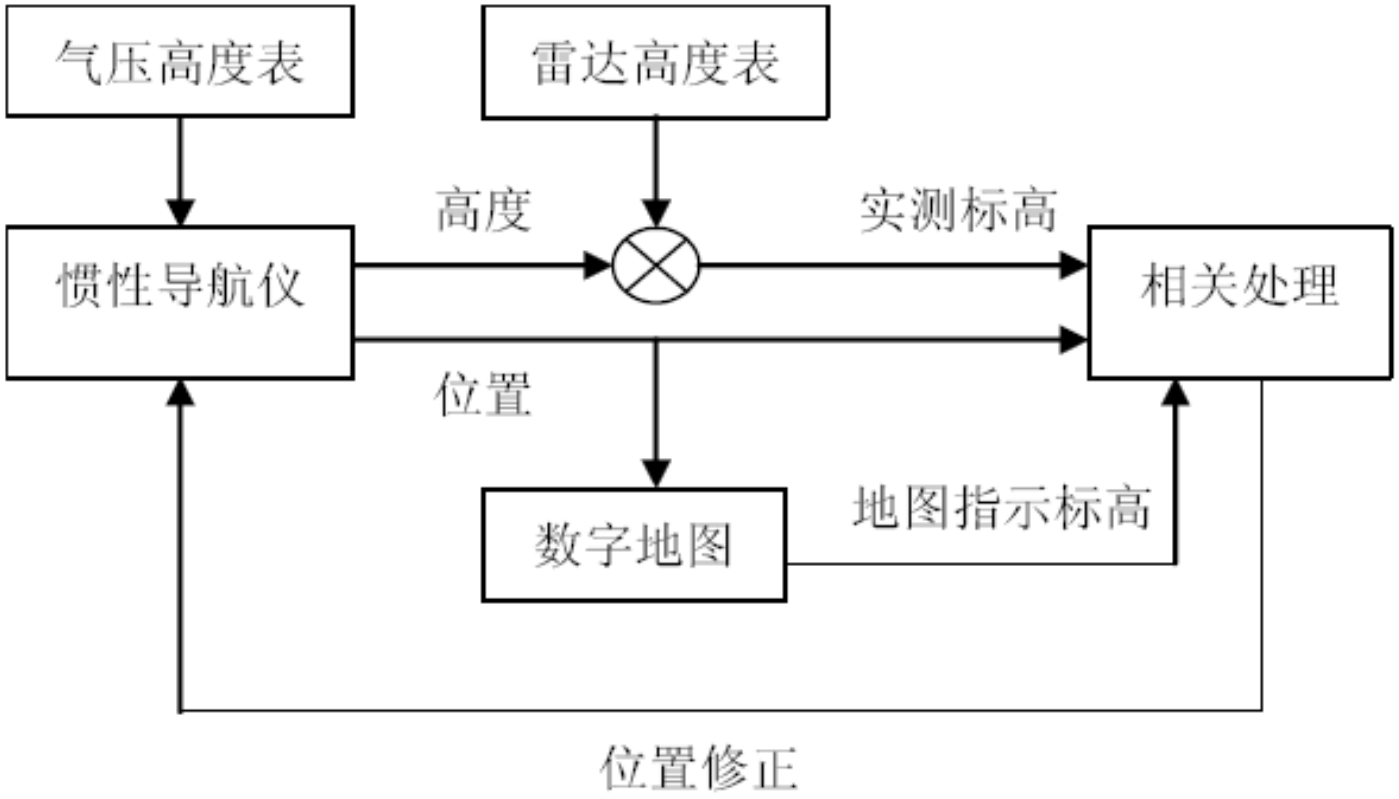
$h_r=h_a-h_c$



- 惯性导航系统——可提供全部导航信息；
- 无线电高度表——测量飞行器对地面的相对高度；
- 气压式高度表或大气数据中心——单独或与惯导系统综合地提供飞行器的海拔或绝对高度；
- 导航计算机和大容量存储器——完成导航计算和存储数字地图。

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

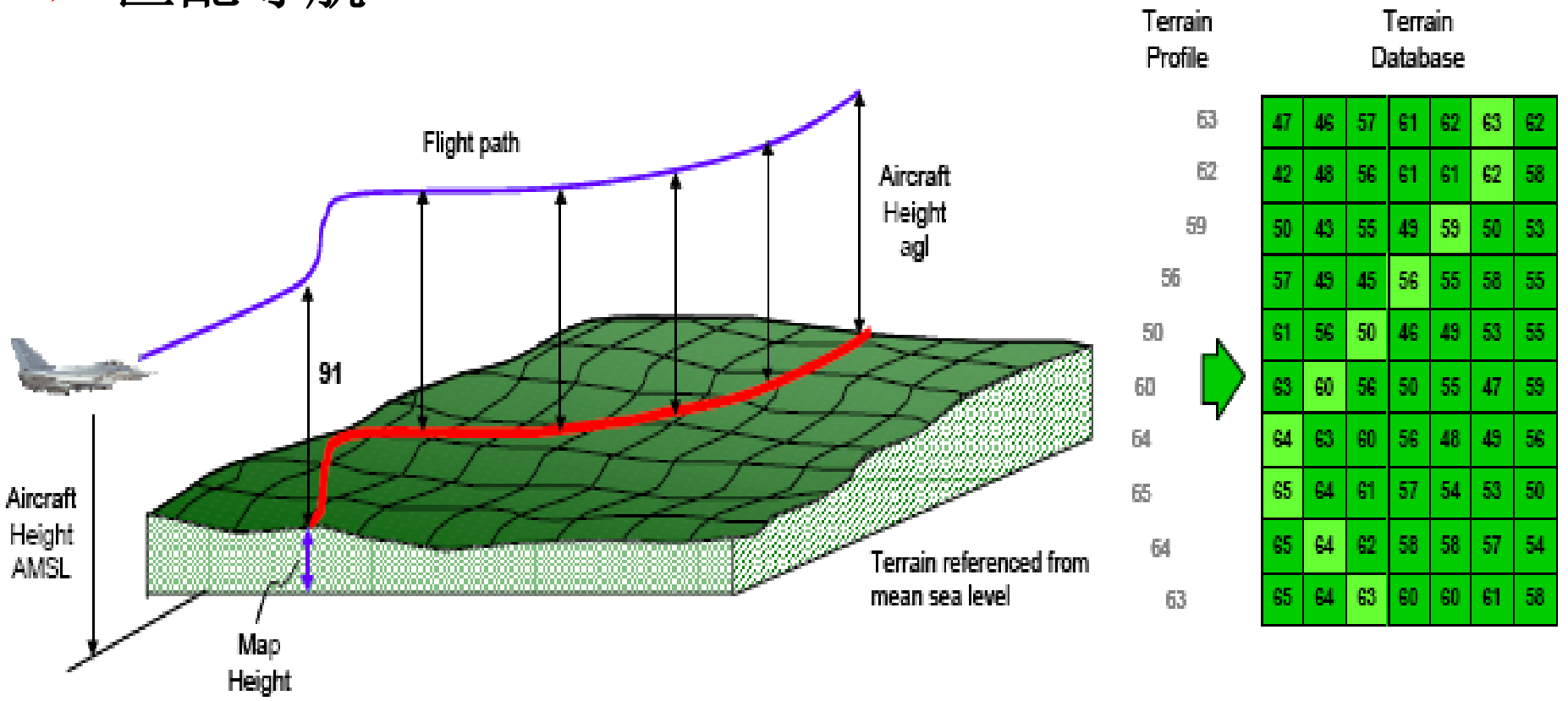
- 匹配导航



相关分析原理

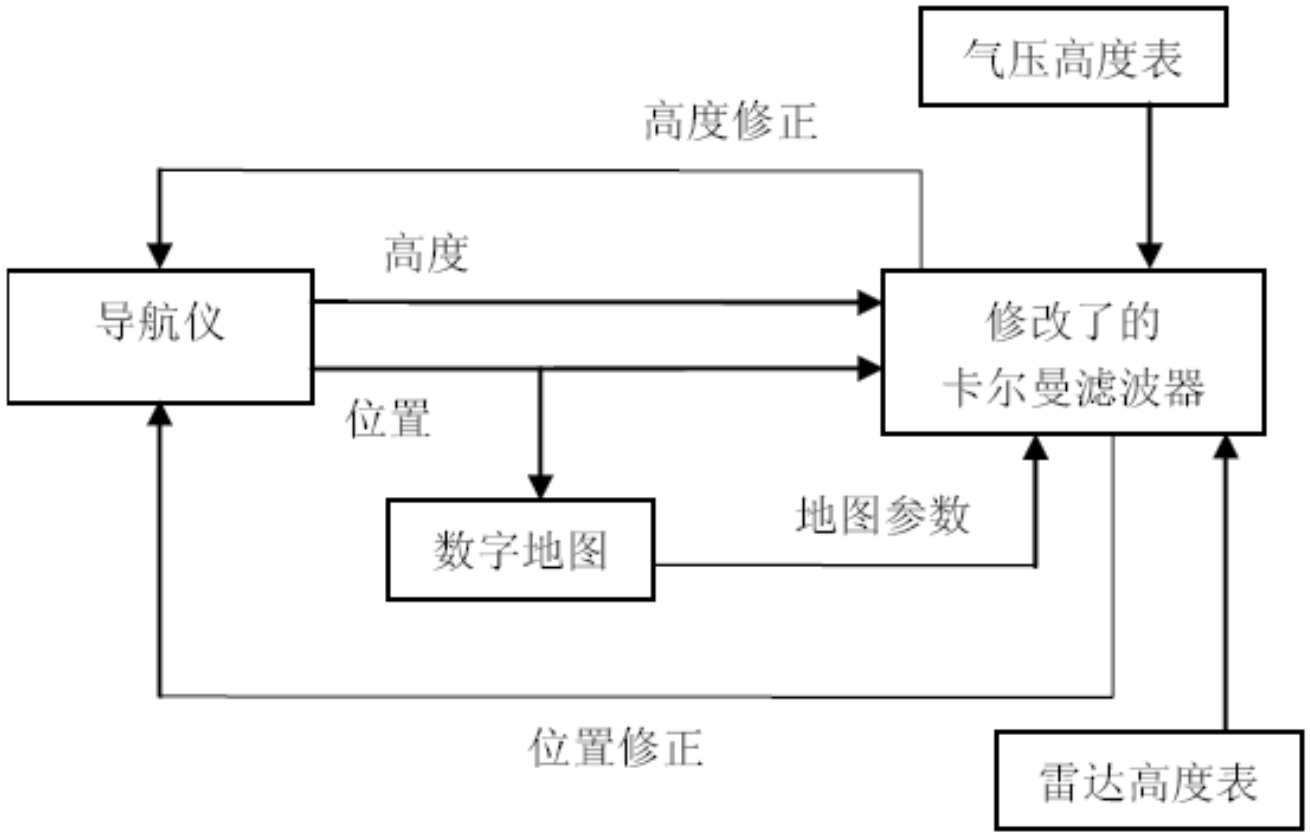
2.4 地形匹配导航技术的基本原理

- 匹配导航



2.4 地形匹配导航技术的基本原理

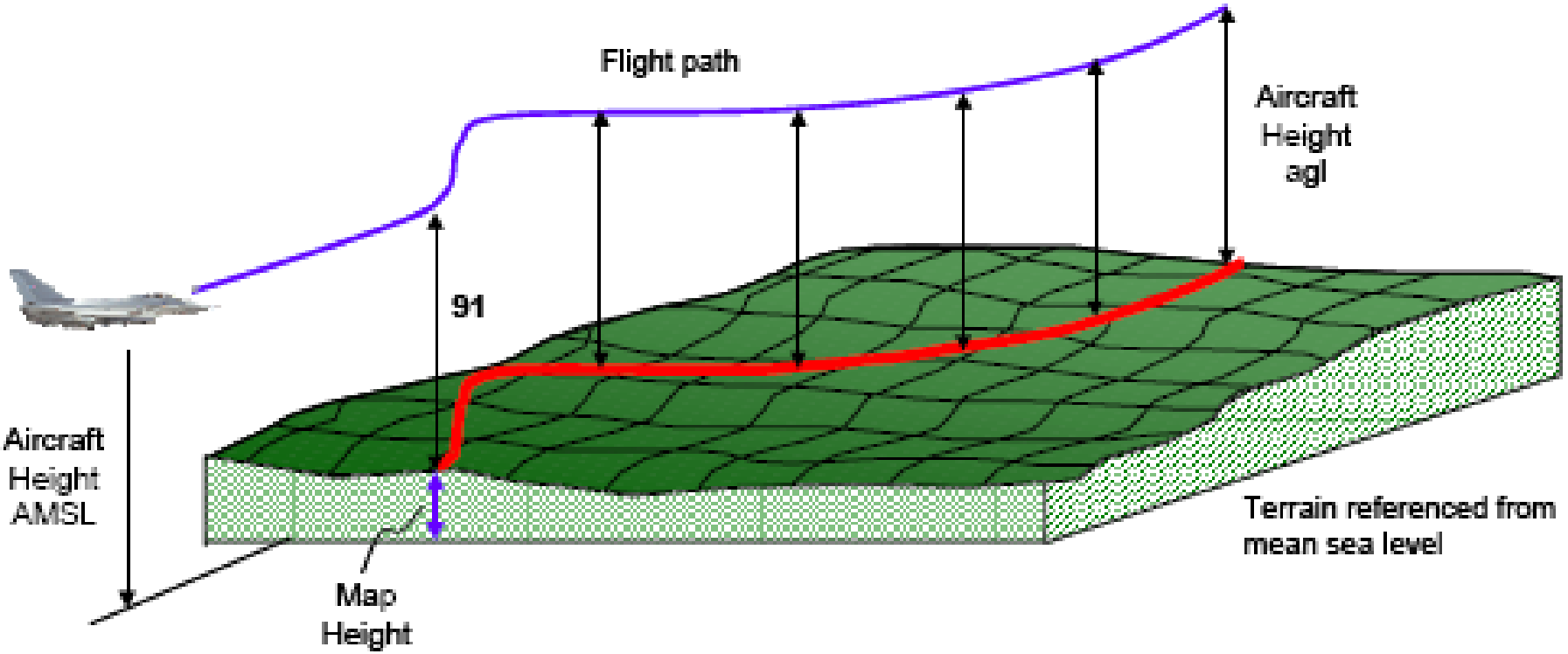
- 匹配导航



基于扩展Kalman滤波的方法

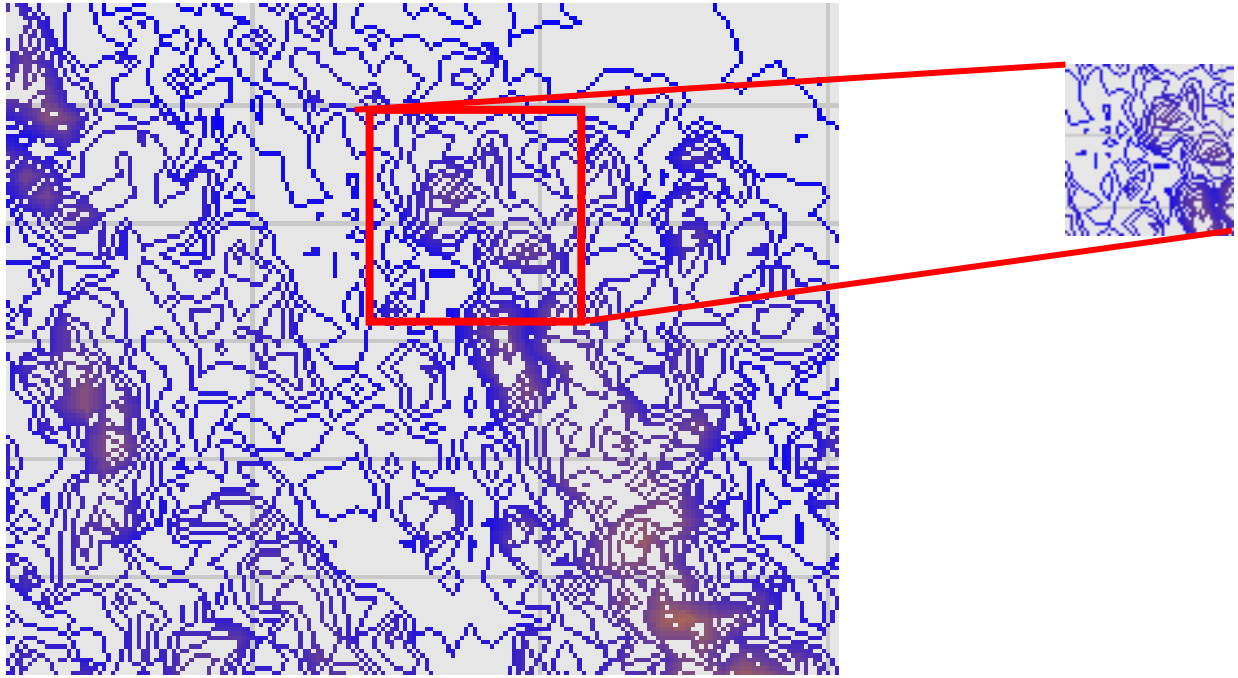
2.4 地形匹配导航技术的基本原理

- 匹配导航



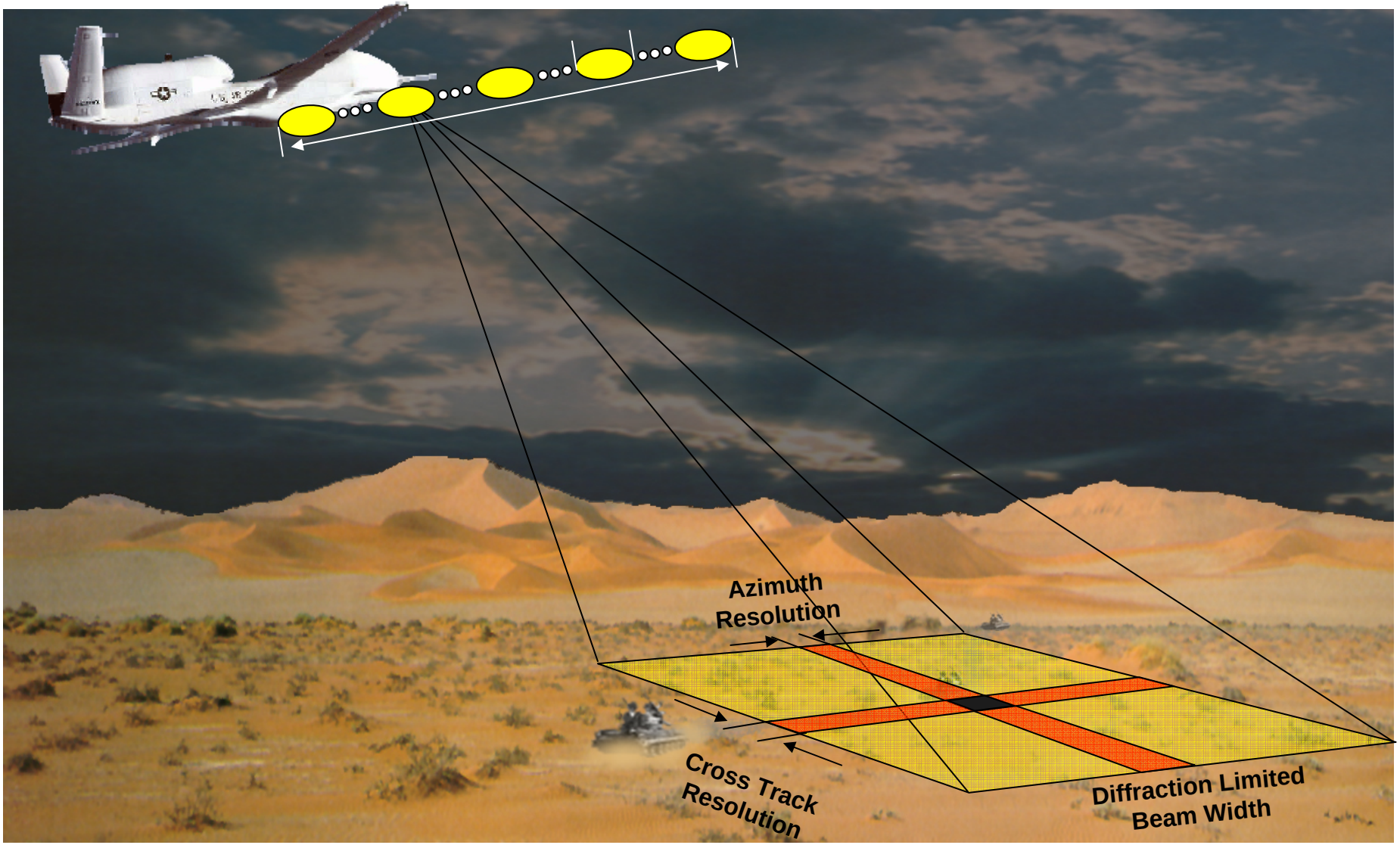
2.4 地形匹配导航技术的基本原理

- 等值线匹配



2.4 地形匹配导航技术的基本原理

- 匹配导航



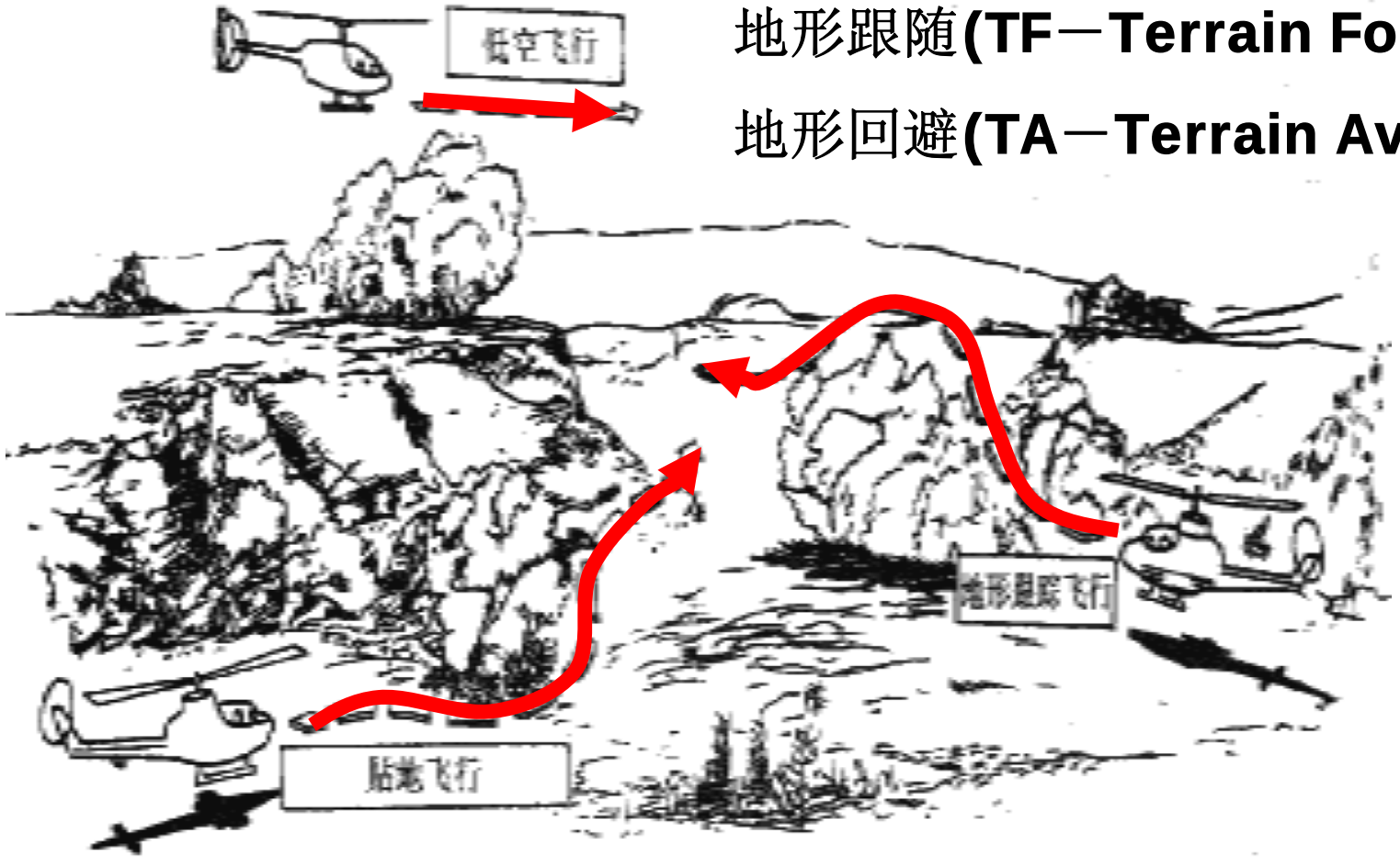
2.4 地形匹配导航技术的基本原理

- 地形跟踪和地形回避

地形辅助导航**(TAN)**

地形跟随**(TF－Terrain Follow)**

地形回避**(TA－Terrain Avoid)**



2.4 地形匹配导航技术的基本原理

- **TERCOM**系统三种典型算法
  - 交叉相关算法**(COR-Cross CoRelation)**

$$J_{COR}=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}h_m(x+i\delta x,y+j\delta y)h_r(i) \Rightarrow \textbf{MAX}$$

  - 平均绝对值算法**(MAD-Mean Absolute Difference)**

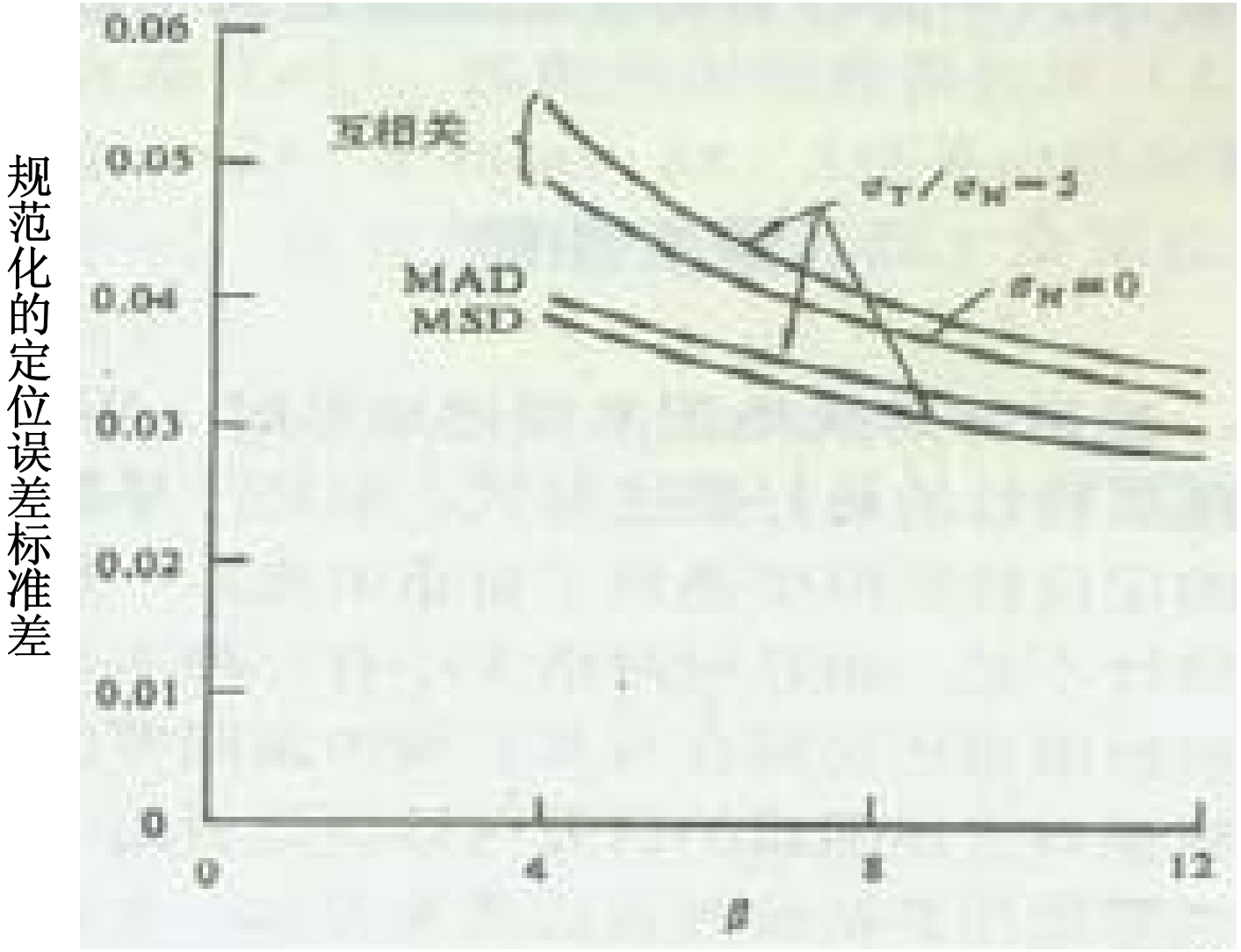
$$J_{MAD}=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}|h_m(x+i\delta x,y+j\delta x)-h_r(i)| \Rightarrow \textbf{MIN}$$

  - 均方差算法**(MSD-Mean Square Difference)**

$$J_{MSD}(j\delta x)=\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}[h_m(x+i\delta x,y+j\delta y)-h_r(i)]^2 \Rightarrow \textbf{MIN}$$

2.4 地形匹配导航技术的基本原理

- **TERCOM**系统三种典型算法的精度比较



2.4 地形匹配导航技术的基本原理

TERCOM算法的特点

- 可以看出，上述算法只能预测飞行器的位置。只有将该位置作为观测值通过卡尔曼滤波，才能估计出其他的导航状态误差。
- 工作时，测得了一串地形轮廓序列之后才可实现相关算法。正是这种全局搜索的特点使其计算时间很长。

3 景像匹配导航技术

3.1 什么是景像匹配技术

3.2 景像匹配导航技术的发展

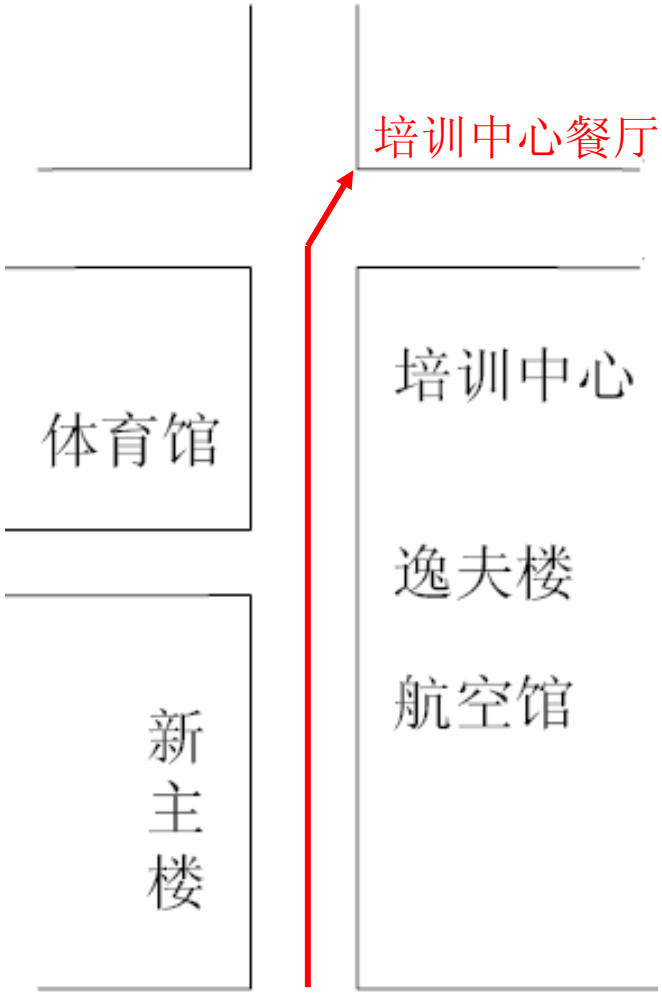
3.3 数字景像基准图技术

3.4 景像匹配导航技术的基本原理

3.1 什么是景像匹配技术



3.1 什么是景像匹配技术



完成这一过程的要素：

（1）基准信息

（2）实时获取信息

（3）对实时获取信息处理

3.1 什么是景像匹配技术

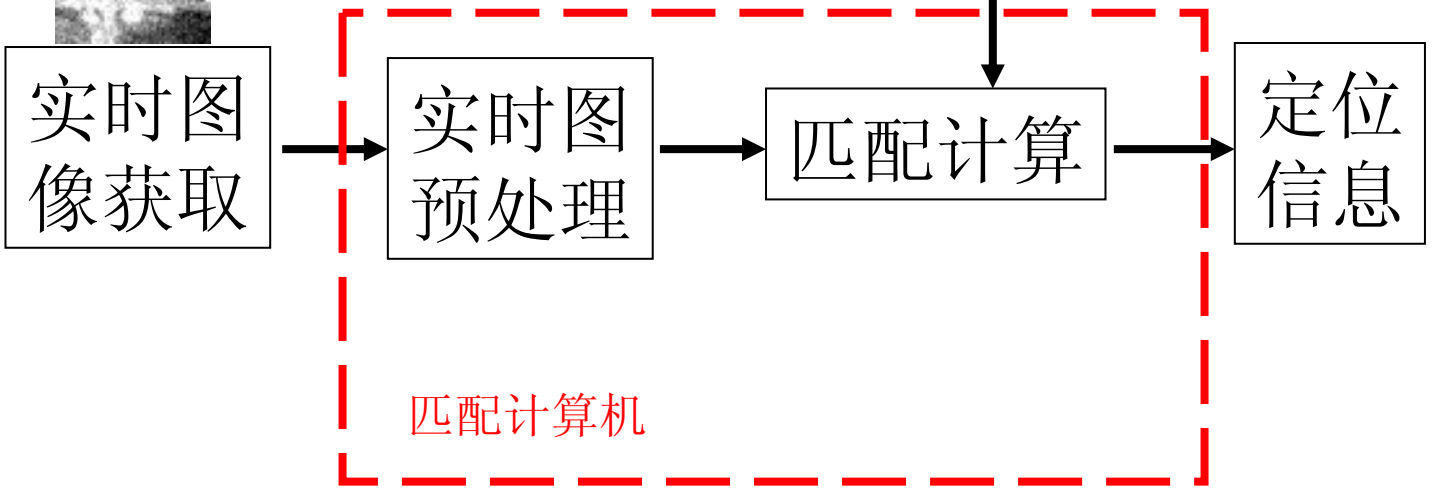
景像匹配导航技术

利用飞行器实时采集的景像实时图与预先制备的景像基准图进行匹配，获得飞行器精确定位的一项技术。

3.2 什么是景像匹配技术







3 景像匹配导航技术

3.1 什么是景像匹配技术

3.2 景像匹配导航技术的发展

3.3 数字景像基准图技术

3.4 景像匹配导航技术的基本原理

3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 20世纪50年代，美国最先制出景象匹配系统。
- 美国在其精确制导武器上一直使用该技术。
- 20世纪90年代，法国将将该技术用于空军。
- 1995年，英国将其装配到狂风飞机上。
- 美 俄等国重点开发传感器和算法。

3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 美军A-10雷电式飞机的武器投放系统。
- 美军TR-1A的精确定位攻击系统。
- 美军Tier无人机的对地攻击系统。
- 多源图像融合。
- 捕食者、全球鹰和暗星等无人侦察机上携带多传感器。

3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 美国GPS成熟，地形匹配为备份导航系统。
- 法国的风暴之影仍用地形匹配/景像技术。
- 德国的金牛巡航导弹。
- 俄罗斯的X－55SM导弹。

3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 北京航空航天大学
- 华中科技大学
- 国防科技大学
- 南京航空航天大学
- 西北工业大学
- 航天科工集团三院三部、35所

3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- “九五”重点预研项目、两期航空基金和教育部“211”建设资金资助；
- 建立了景像匹配完整体系；
- 研发了新型的景像匹配算法（匹配精度达0.1~0.2像素、实时图像智能选取识别率>91%）；
- 基于景像匹配的导航全信息估计方法研究；
- 率先建立了地形匹配和景像匹配综合实验装置；
- 率先开发了景像匹配三种仿真平台；
- 开发了陆基巡航导弹仿真飞行软件。

3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 项目成果水平达到：“国际领先、国内领先”；

- 1997年11~12月进行了景像匹配试飞实验，共进行了4次飞行，飞了7条航线，涵盖了25个景像匹配区；



3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 在部分航线上完成了景像匹配的实时（在线）匹配，达　到了0.3~0.5像素的定位精度。



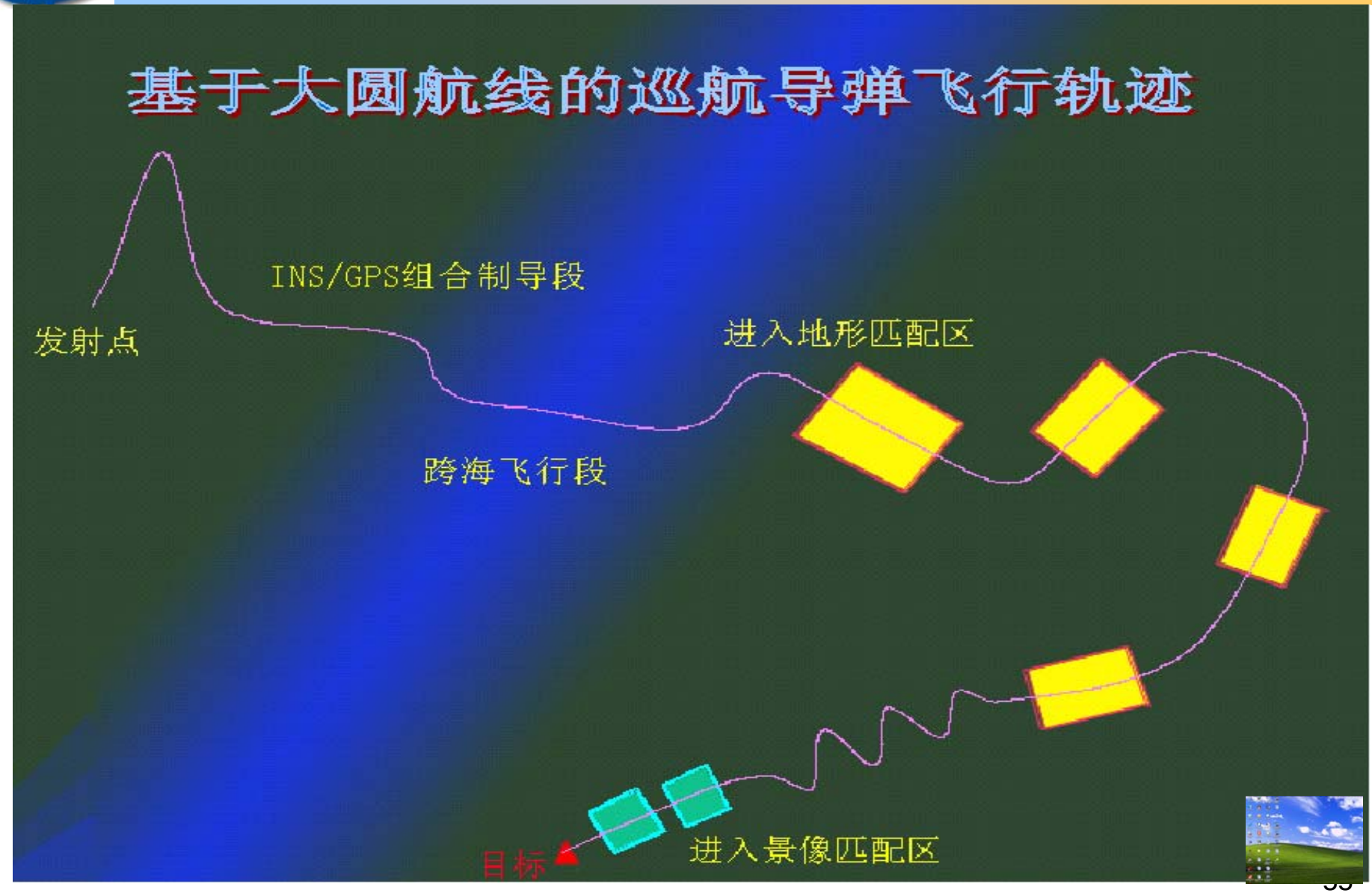
3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 开发了景像匹配系统试飞软件；
- 研发了景像匹配原理样机；
- 2004年进行了试飞实验；
- 率先开展了景像匹配技术在飞机上应用的研究。



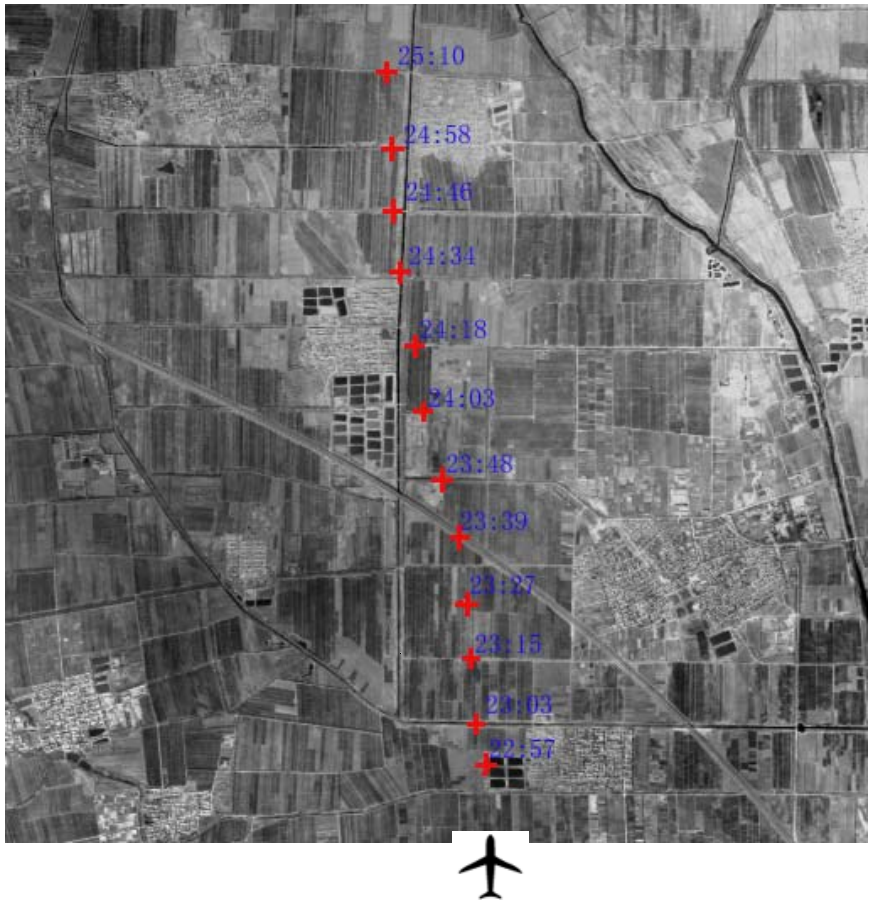


3.2 景像匹配导航技术的发展现状



3.2 景像匹配导航技术的发展现状

- 基准图象



- 实时图象

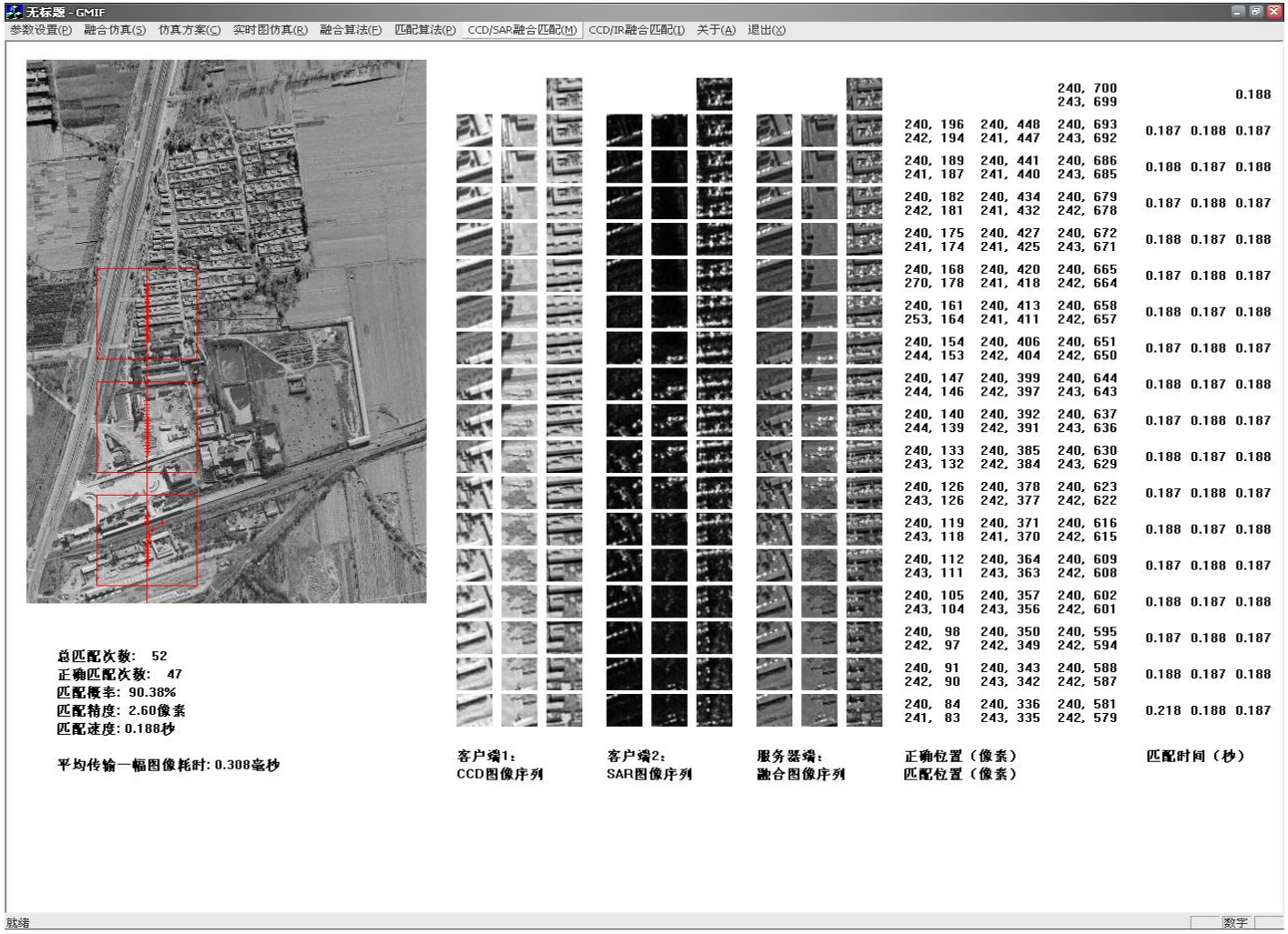


- CCD图象源



- 红外图象源

3.2 景像匹配导航技术的发展现状



基于高速局域网多源图像融合景像匹配技术

3 景像匹配导航技术

3.1 什么是景像匹配技术

3.2 景像匹配导航技术的发展

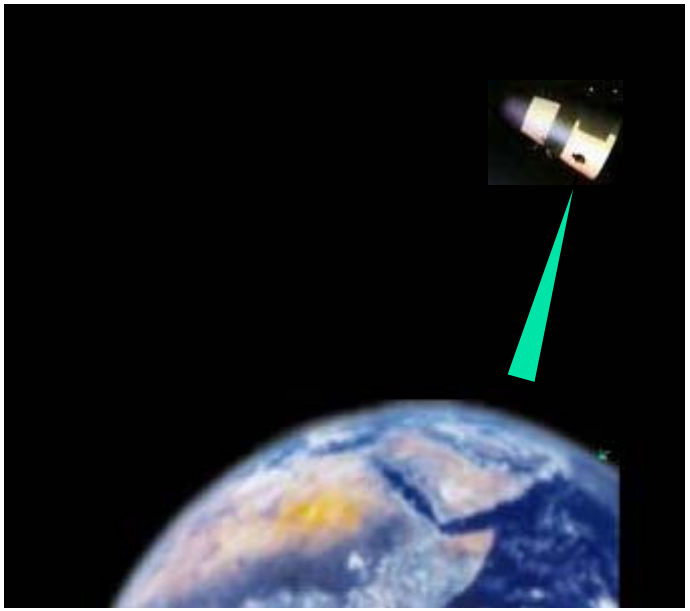
3.3 数字景像基准图技术

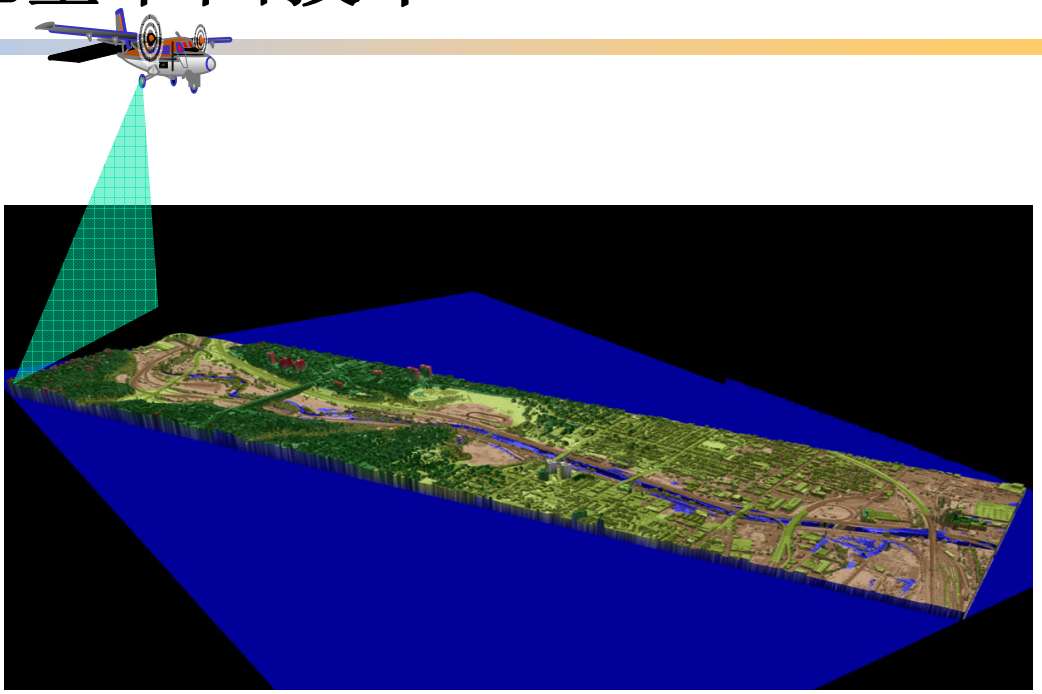
3.4 景像匹配导航技术的基本原理

3.3 景像匹配基准图技术

- 景像基准图的制备由测绘部门来完成， 通常要求基准图具有以下特征。
  - 道路、水渠、河流、干河床、以及它们的交叉点；
  - 居民区、耕地、树丛、水渠、以及它们的交界处。
- 景像基准图还要具有较高的分辨率。
  - 5米/像素
  - 10米/像素

3.3 景像匹配基准图技术

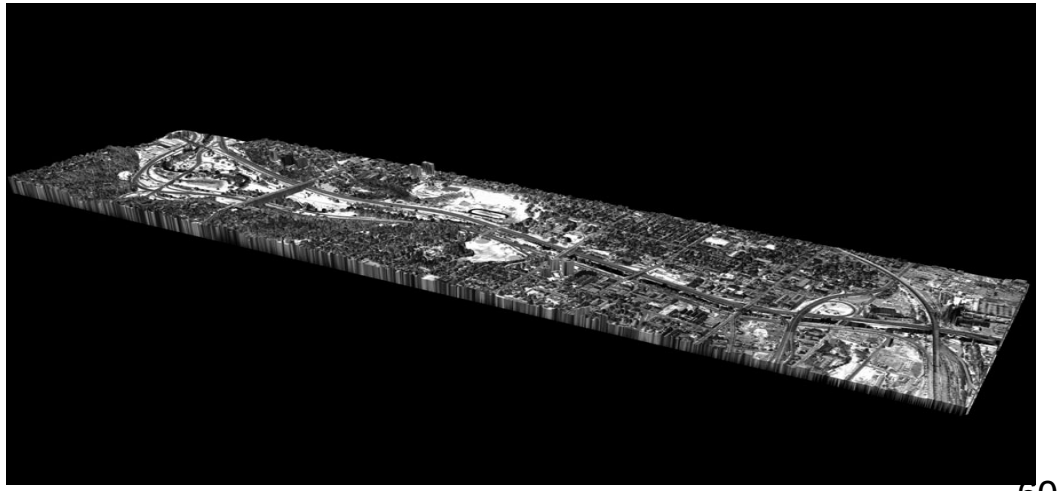




卫片基准图 ⬅

航片基准图 ⬅

正射校正 ⬅



3 景像匹配导航技术

3.1 什么是景像匹配技术

3.2 景像匹配导航技术的发展

3.3 数字景像基准图技术

3.4 景像匹配导航技术的基本原理

3.4 景像匹配导航技术的原理

- 实时图像的获取
  - 获取的硬件设备
    - 摄像机
    - 图像采集卡
  - 实时图像获取设备的工作过程

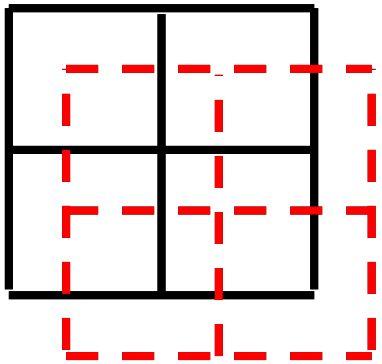
当飞行器进入预先规划的景像匹配区域时，实时景像采集器启动，并实时垂直对地摄像，导航控制计算机实时将景像传输到存储器中，供景像匹配系统使用。

3.4 景像匹配导航技术的原理

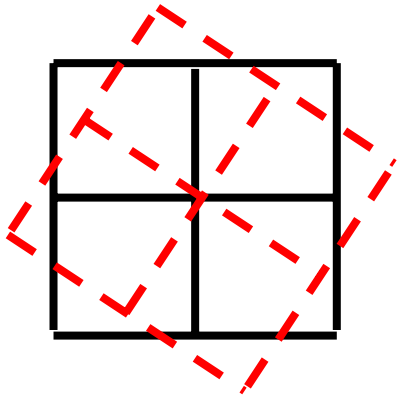
- 实时图和基准图间存在着以下差异
  - 由于获取时间上的差异，导致二者在地面特征上存在着自然（季节、日照等）和人为（建筑物等）的差别；
  - 飞行航向的变化，使实时图和基准图存在旋转变化；
  - 由于飞行高度原因，采集的实时图与基准图分辨率存在较大差异；
  - 由于相机本身因素，两图在灰度分布上也不同；
  - 由于相机本身无法在采集过程中保证绝对垂直地面，与基准图相比，存在着一定的畸变和图像变形。

3.4 景像匹配导航技术的原理

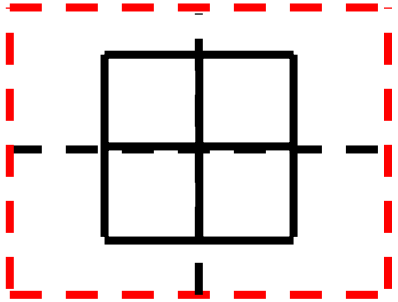
- 实时图预处理



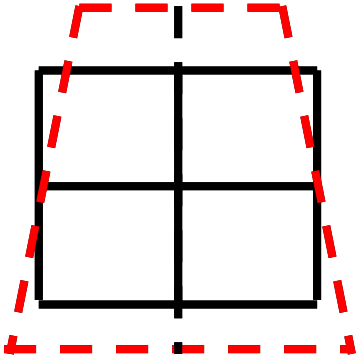
（a）同步不准



（b）旋转



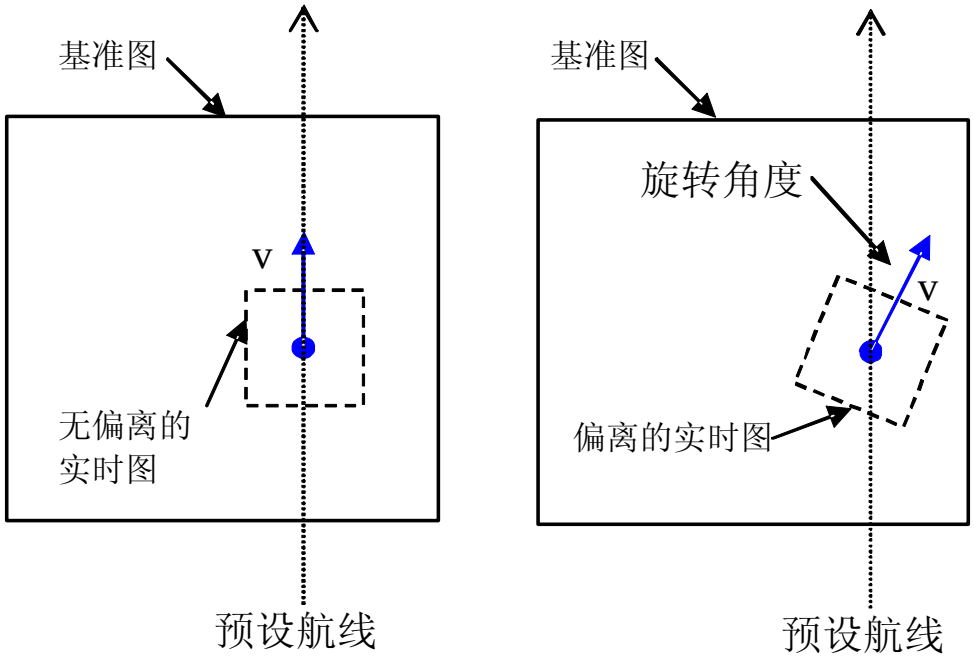
（c）比例缩放

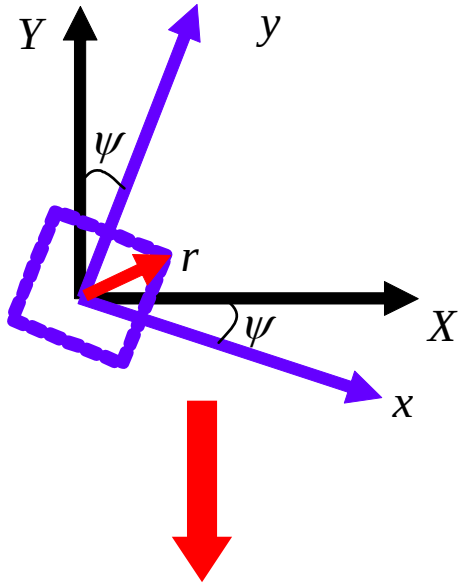


（d）透视失真

3.4 景像匹配导航技术的原理

➢ 实时图预处理





旋转的角度由飞行器的惯导系统或随动平台提供

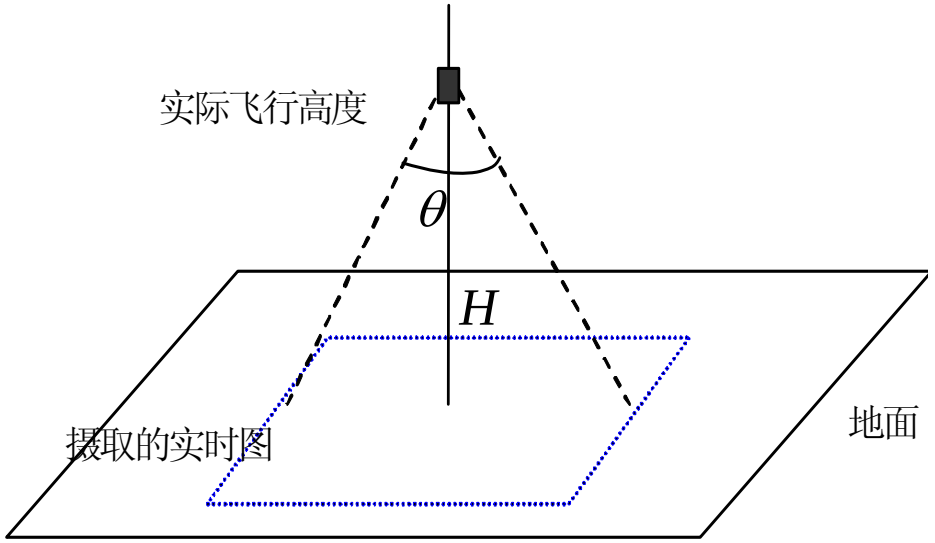
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

3.4 景像匹配导航技术的原理

➢ 实时图预处理

基准图由测绘部门提供，其分辨率固定，通过调整实时图的分辨率，使基准图和实时图的分辨率保持一致。

- 相机的焦距为6mm
- 相机的视场角120度
- 相机的有效像素为768×576
- 飞行器的飞行高度为1000m
- 基准图分辨率为10米/像素

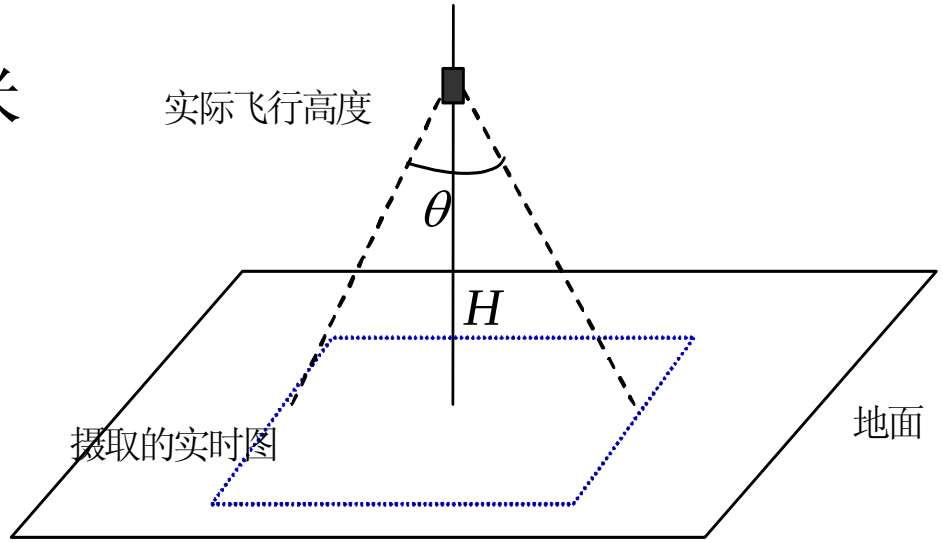


3.4 景像匹配导航技术的原理

➢ 实时图预处理

$$L = 2 \times 1000 \times tg60^{o} \approx 3463\text{米}$$

$$\Delta L = \frac{L}{N} = \frac{3463}{768} = 4.5\text{米/像素}$$



X方向的比例因子　　y方向的比例因子

$$\frac{f_x}{H} = \frac{\nabla x}{R_{es}} \qquad \frac{f_y}{H} = \frac{\nabla y}{R_{es}}$$

基准图分辨率

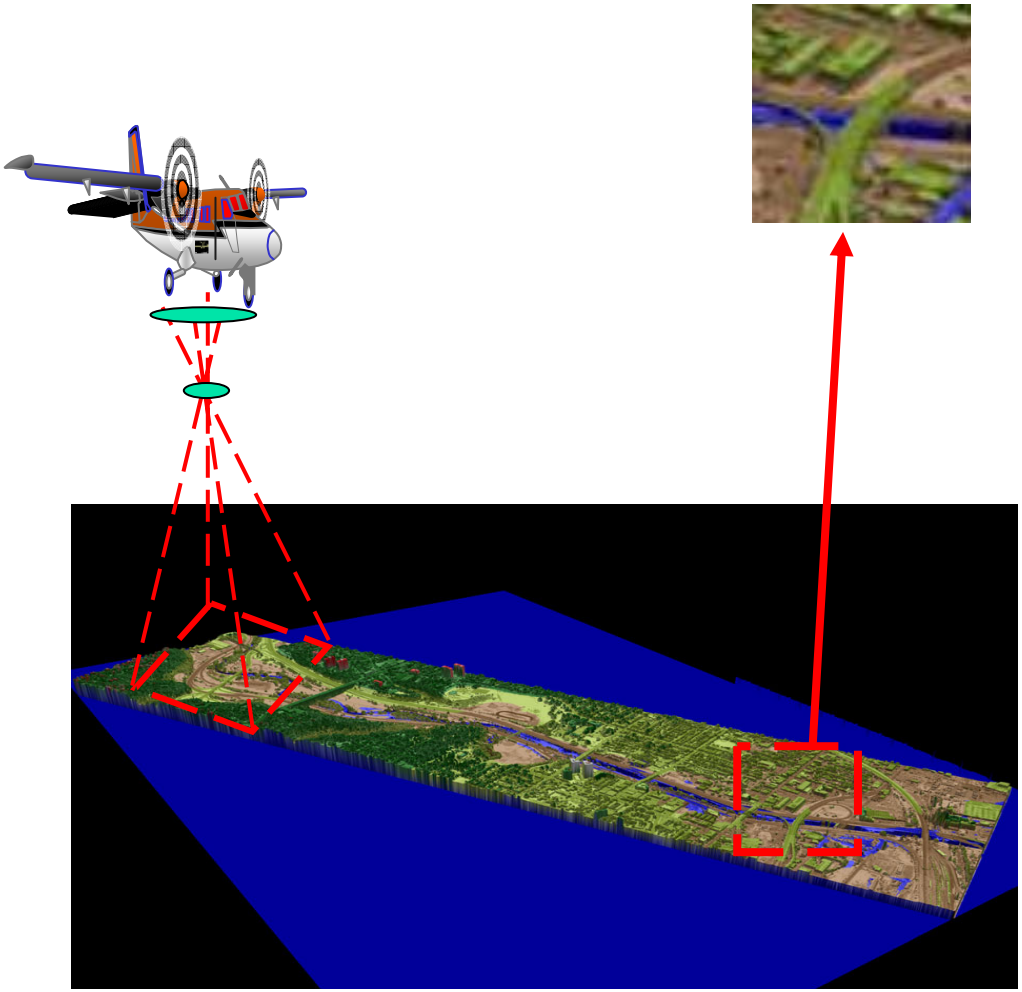
3.4 景像匹配导航技术的原理

➢ 实时图预处理

- 图像灰度校正（直方图调整）
- 图像增强
- 图像滤波（低通、带通、高通滤波和中值滤波）
- 特征提取（Sobel、LOG算子、Laplace 算子）

3.4 景像匹配导航技术的原理

- 匹配计算 ⇒ 粗匹配和精匹配





3.4 景像匹配导航技术的原理

➢ 匹配计算

- 平均绝对差（**Mean Absolute Difference**）

基准图　实时图

$$MAD(x,y)=\frac{1}{Nx\cdot Ny}\sum_{i=1}^{Nx}\sum_{j=1}^{Ny}\left|g(x,y)_{i,j}-f_{i,j}\right| \rightarrow \text{MIN}$$

- 修正相关系数（**Correction Correlation Function**）

$$COR(x,y)=\left.\frac{Cov(g(x,y)_{i,j},f_{i,j})}{\sqrt{D(g(x,y)_{i,j})}\sqrt{D(f_{i,j})}}\right|_{i,j\in W} \rightarrow \text{MAX}$$

基准图和实时图互协方差

基准图自协方差

3.4 景像匹配导航技术的原理

匹配计算——粗匹配算法性能

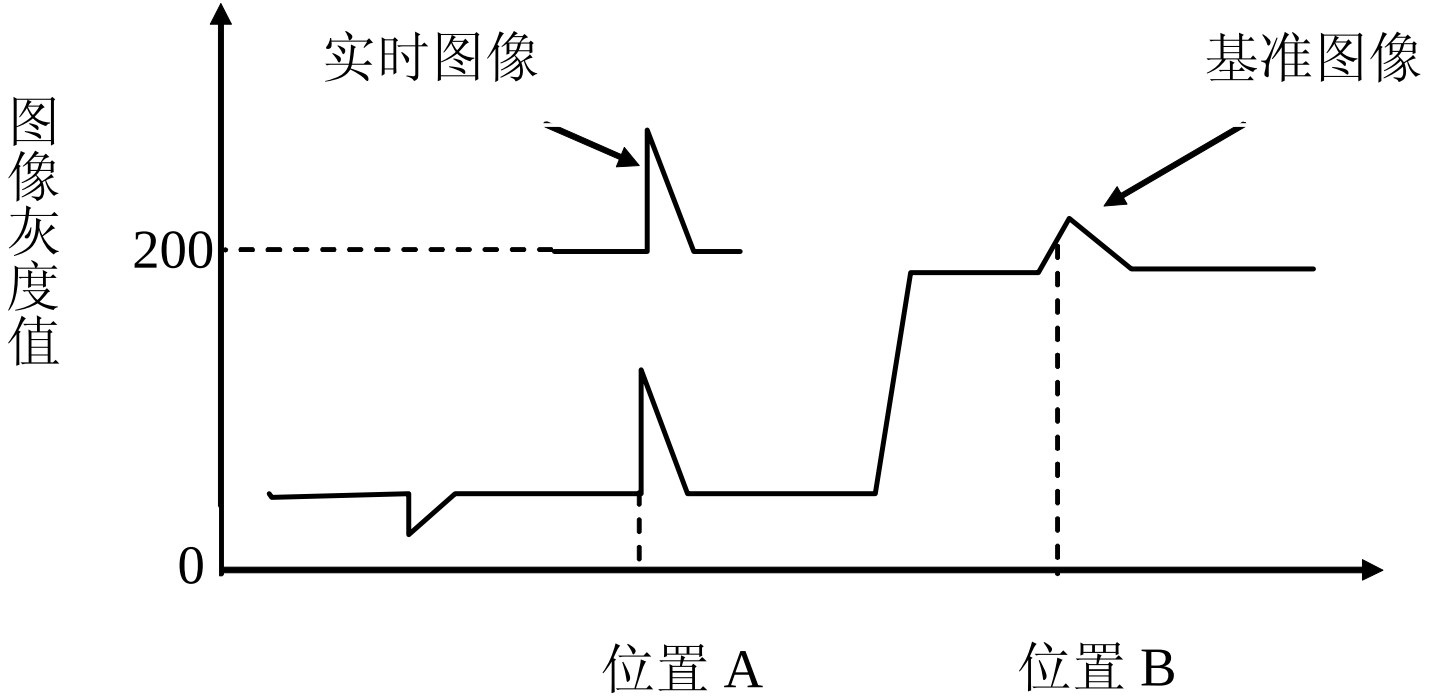
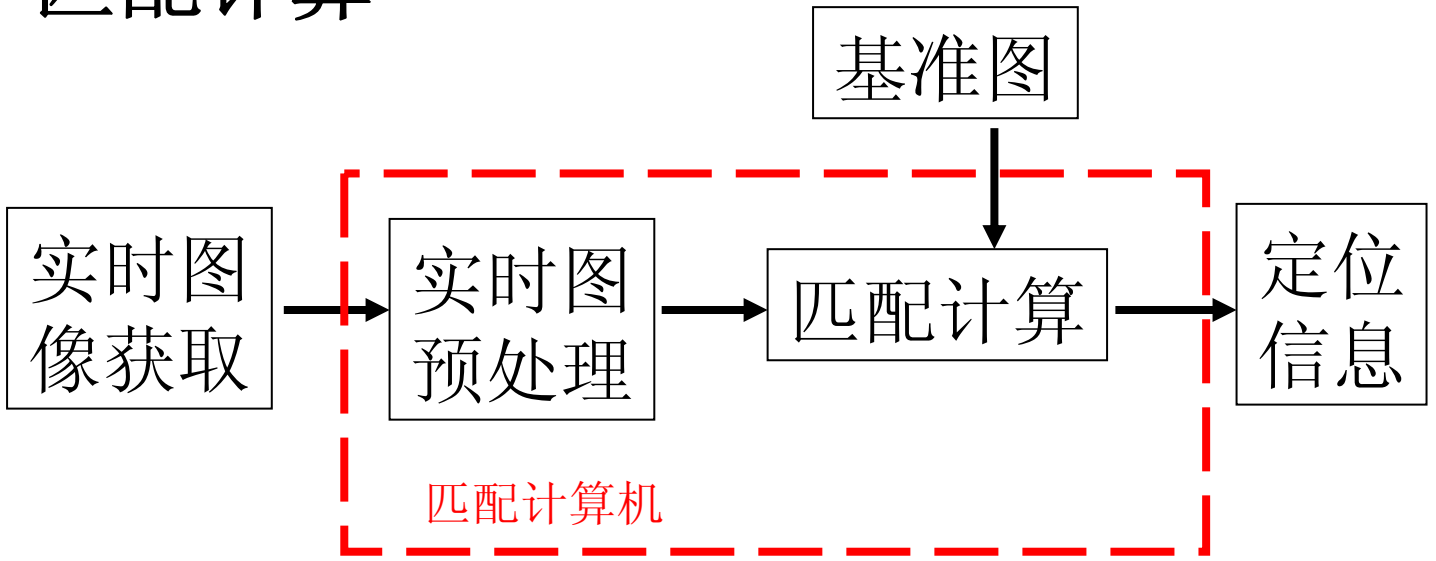


图 11.3 实时图像在 A 位置的相似性更好，而在 B 位置的差异性更小。CCF 会准确确定 A 为匹配点，而 MAD 会错误地确定为 B 位置。

3.4 景像匹配导航技术的原理

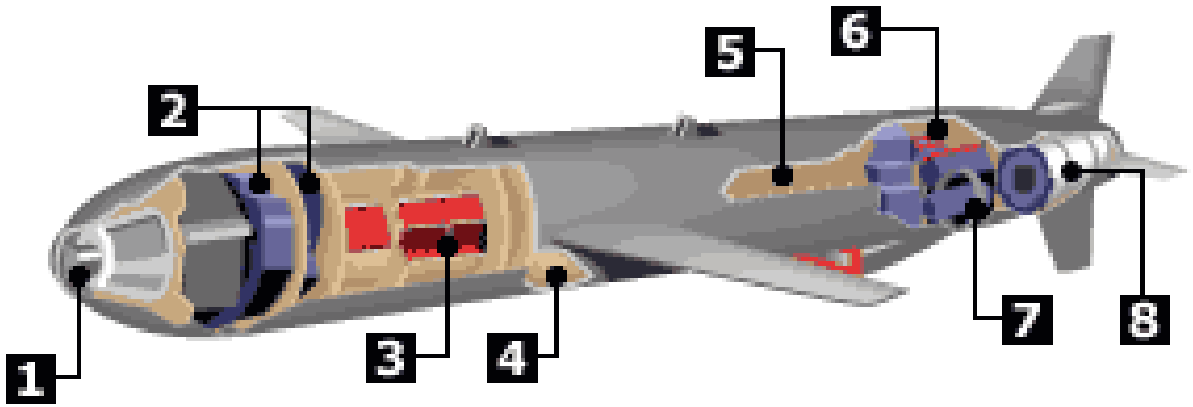
- 匹配计算







3.5 图形图像匹配导航技术的应用



1.红外线图像感应器　　2. DSMAC导航系统

3. 数据/通讯系统　　4. 1000磅常规弹头

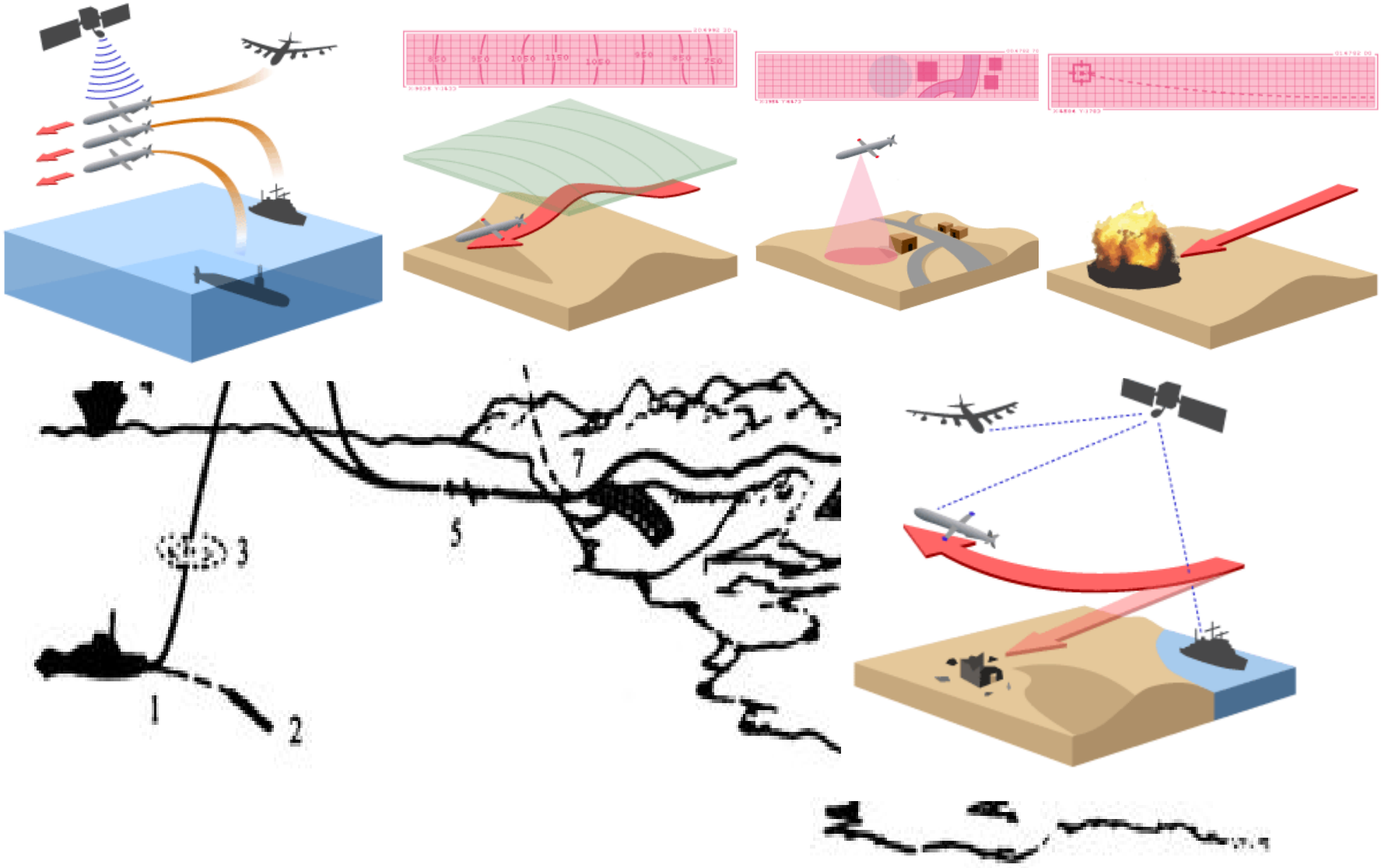
5. DSMAC照明装置　　6. 燃料仓

7. TERCOM地形相配系统　　8. 涡轮喷气发动机

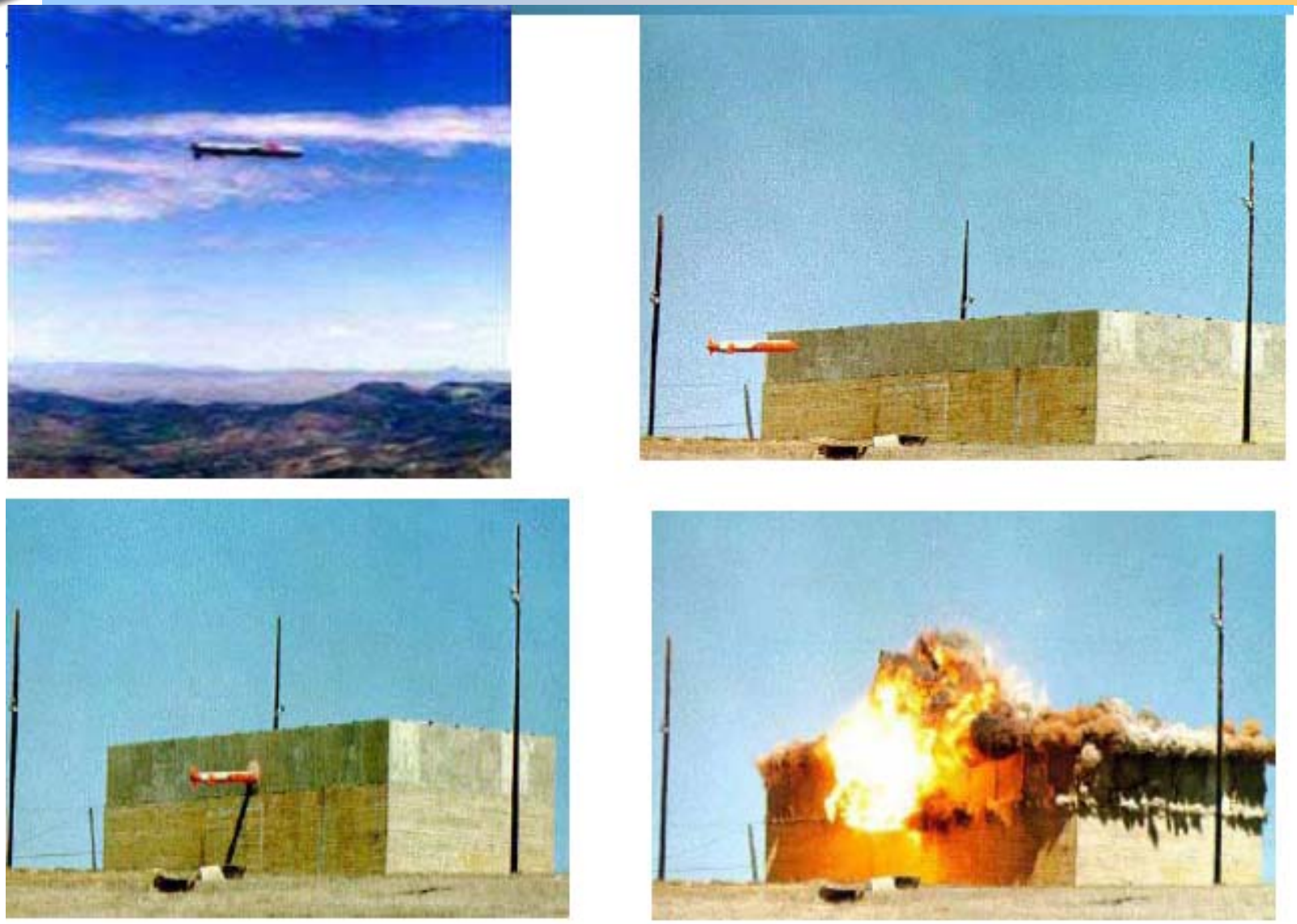
3.5 图形图像匹配导航技术的应用



3.5 图形图像匹配导航技术的应用



3.5 图形图像匹配导航技术的应用



战斧巡航导弹攻击目标过程图

3.5 图形图像匹配导航技术的应用

空地战斧巡航导弹





3.5 图形图像匹配导航技术的应用



美国捕食者无人侦察机

美国全球鹰无人侦察机



3.5 图形图像匹配导航技术的应用



俄罗斯——车载战略导弹

白杨M



3.5 图形图像匹配导航技术的应用



DH—10



红鸟



鹰击81

3.5 图形图像匹配导航技术的应用

