

# 声纳与雷达技术（应用篇）

7/8

浙江大学海洋学院

2023.12.27

# 内容提纲

## □ 声纳与雷达系统分析

▶ 声纳系统分类

▶ 声纳方程

▶ 单水听器接收系统分析

▶ 优质因数与作用距离

Sonar & Radar System Analysis

Sonar System Classification

Sonar Equation

Single Receiver System Analysis

Figure Of Merit and Operational Range

## □ 声纳与雷达系统设计

▶ 设计原则

▶ 设计基础

▶ 结构与指标

Sonar & Radar System Design (Synthesis)

Design Principle

Design Fundamental

Structure and Specification

## □ 声纳系统测试

▶ 消声水池校准

▶ 湖海外场试验

Sonar System Test

Anechoic Tank Calibration

Lake and Sea Field Experiment

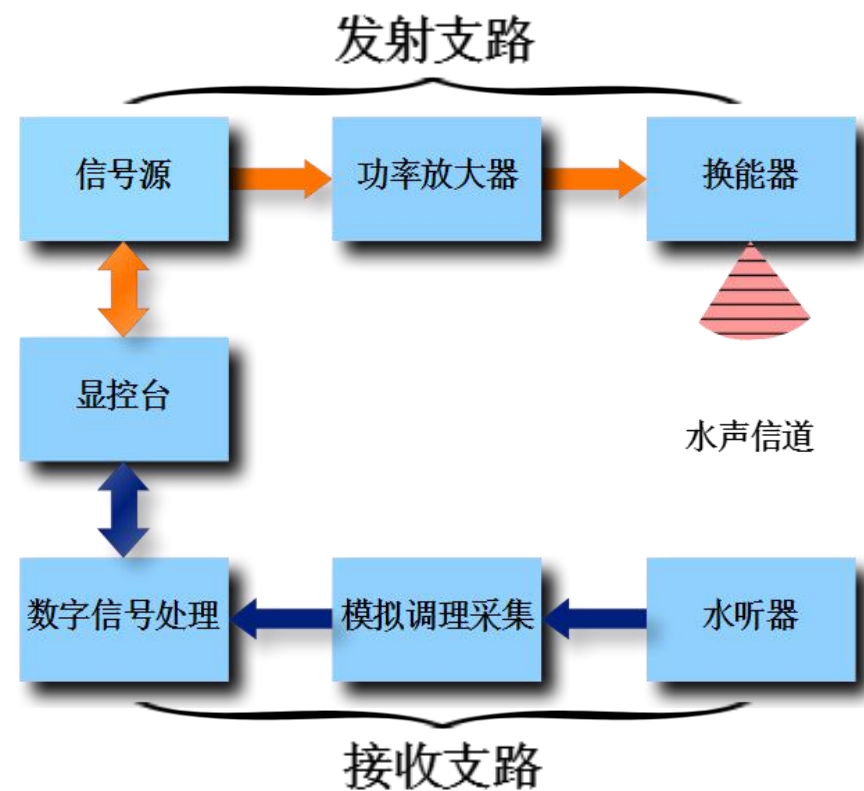
# 引言

- 历史篇
- 入门篇
- 物理篇
- 波形篇
- 检测篇
- 估计篇
- 应用篇

## 系统分析

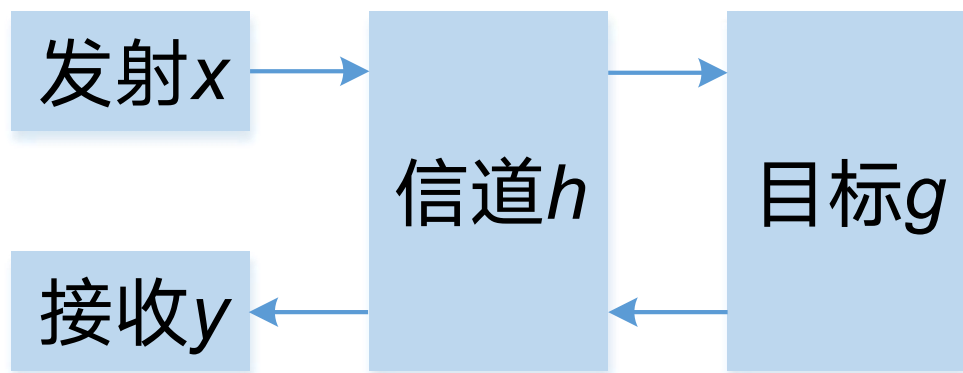
已知系统组成及其工作参数  
分析系统性能，如距离等

## 声纳方程



## 系统设计

已知系统功能和性能  
设计系统组成及其工作参数



# 声纳方程 Sonar Equations

- SL—Source Level 声源级
- TL—Transmission Loss 传播损失
- NL—Noise Level 噪声级
- DI—Directivity Index 指向性指数
- DT—Detection Threshold 检测阈
- RL—Reverberation Level 混响级
- TS—Target Strength 目标强度

( ALL SEVEN in  
dB! )

**被动声纳方程：**  $SL - TL - (NL - DI) \geq DT$

**主动声纳方程：**  $SL - 2TL + TS - RL \geq DT$

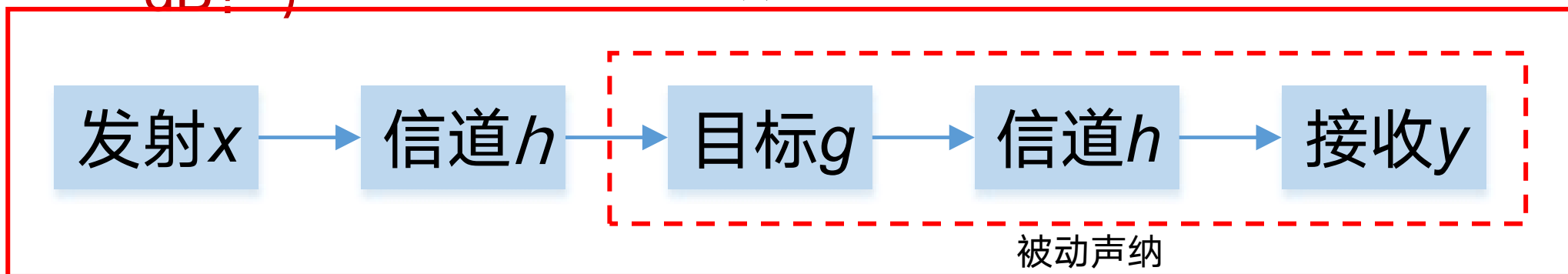
发射：SL

信道：TL、NL、RL

目标：TS

接收：DI、DT

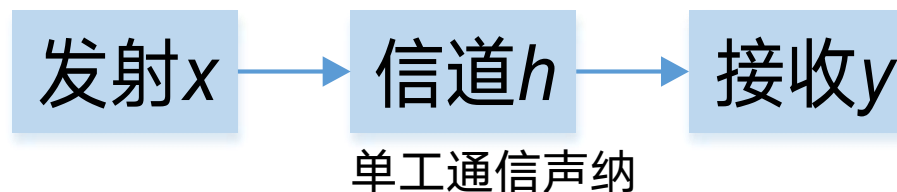
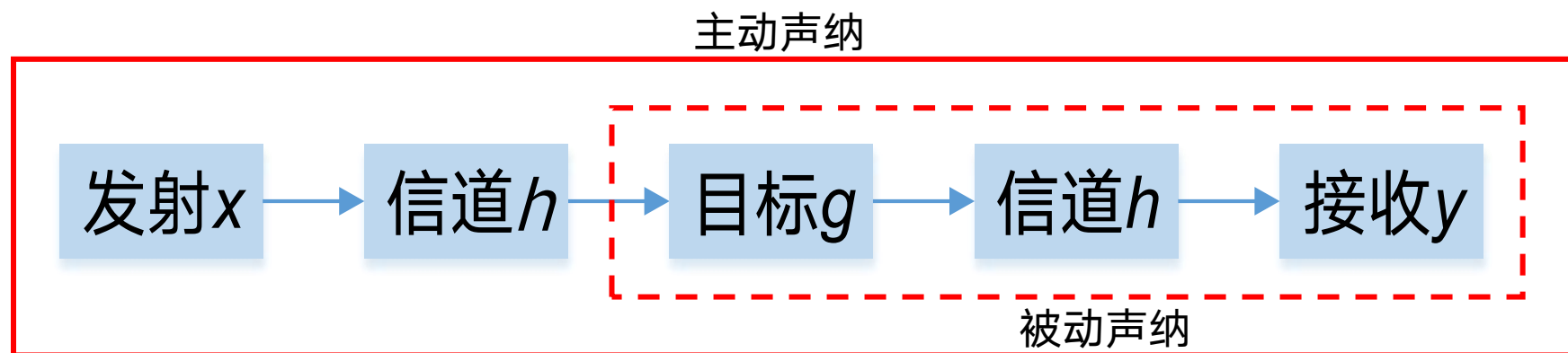
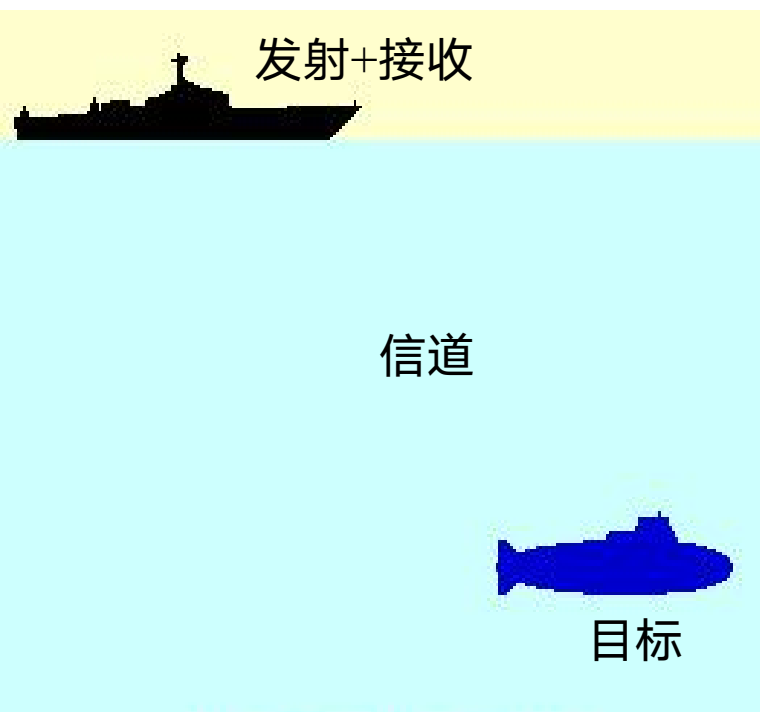
主动声纳



# 1、声纳分类及其对应的声纳方程

根据有无目标回波和先验波形，分成如下三类声纳：

- 被动声纳：无目标回波，无先验波形，被动声纳方程
- 主动声纳：有目标回波，有先验波形，主动声纳方程
- 通信声纳：无目标回波，有先验波形，被动声纳方程



# 1.1、三类声纳系统及其声纳方程

## □ 被动声纳

$$SL-TL-(NL-DI) \geq DT$$

## □ 主动声纳

### ■ 单基地混响控制（中近程）

$$SL-2TL-RL+TS \geq DT$$

### ■ 单基地噪声控制（远程）

$$SL-2TL-(NL-DI)+TS \geq DT$$

### ■ 多基地混响控制

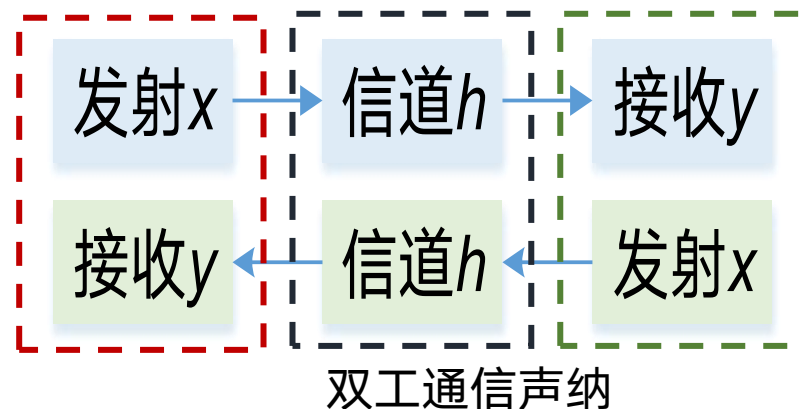
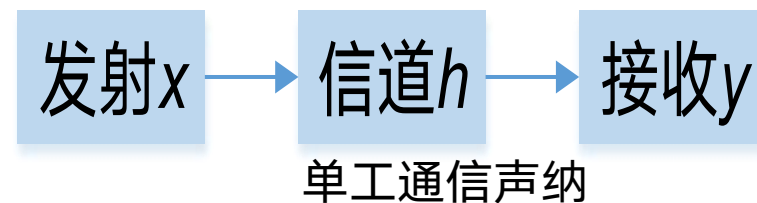
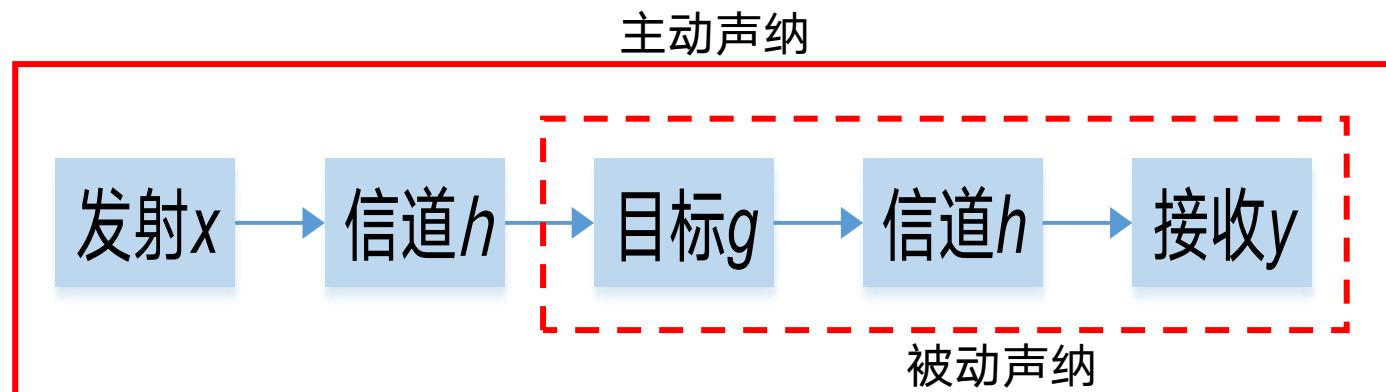
$$SL-TL_T-TL_R-RL+TS \geq DT$$

### ■ 多基地噪声控制

$$SL-TL_T-TL_R-(NL-DI)+TS \geq DT$$

## □ 通信声纳

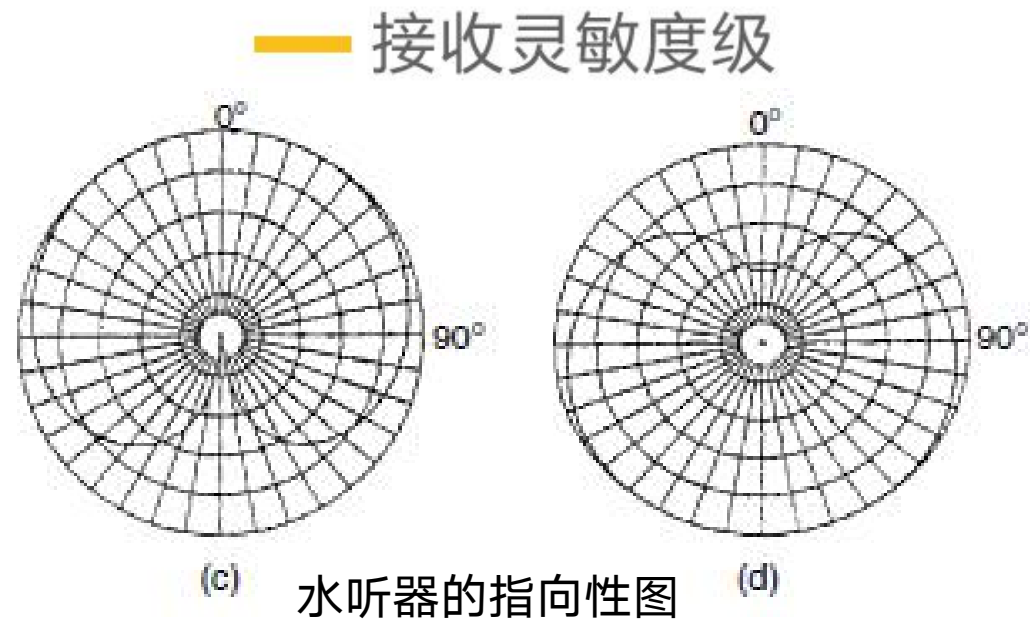
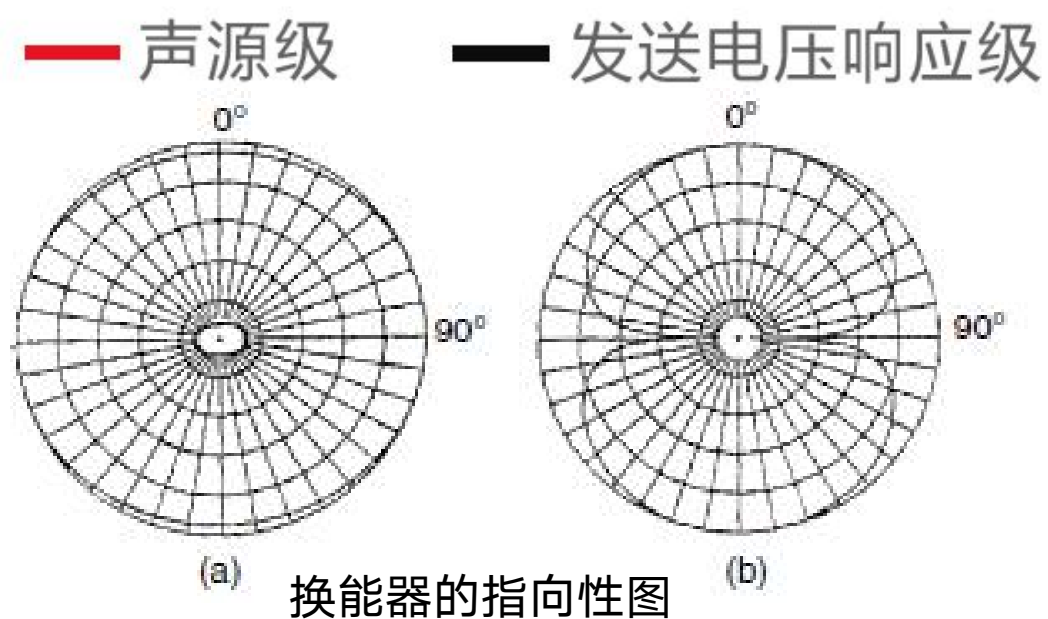
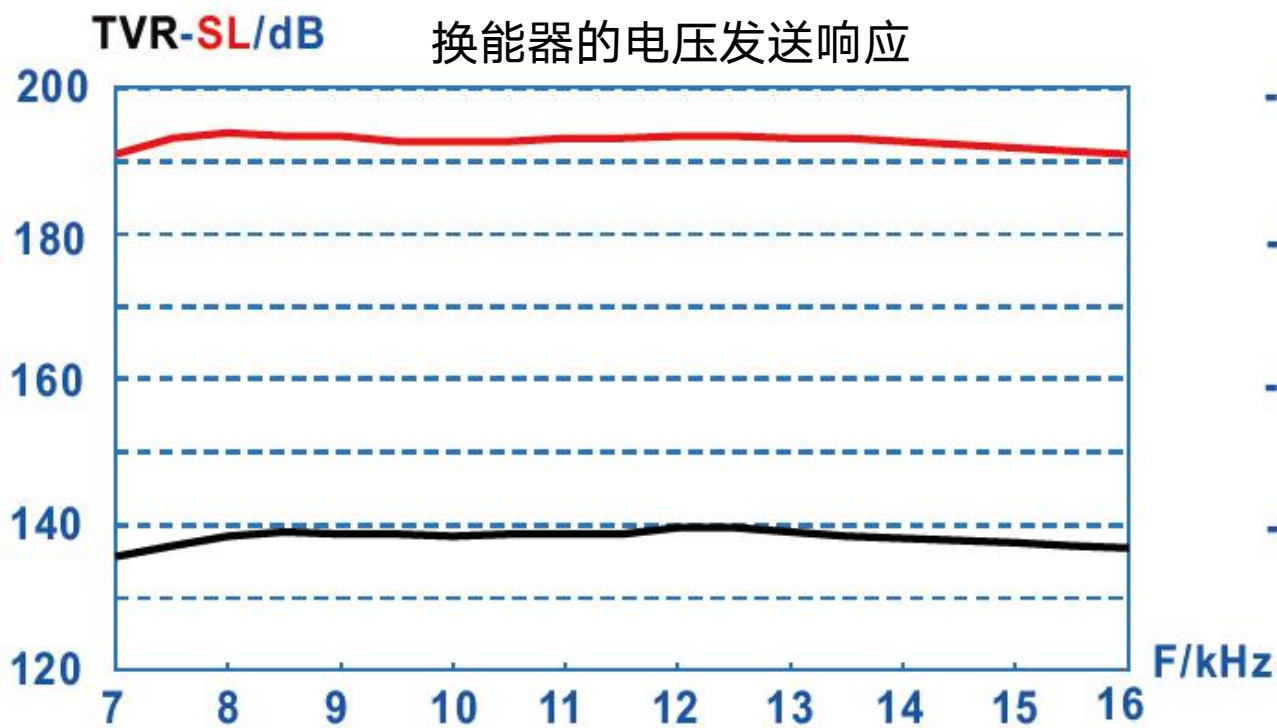
$$SL-TL-(NL-DI) \geq DT$$



## 1.2、单水听器接收系统分析

- $P_f=10\text{e-}4$
  - $P_d=90\%$
- $$\left. \begin{array}{l} P_f=10\text{e-}4 \\ P_d=90\% \end{array} \right\} d=25$$
- $51\text{gd}=7\text{dB}$
- $T=100\text{s}$ ,  $B_1=1\text{Hz}$ ,  $B_2=100\text{Hz}$
  - $DT=51\text{gd}-51\text{gT}+51\text{gB}_1$  窄
- $DT=-3\text{dB}$  窄
- $DT=51\text{gd}-51\text{gT}-51\text{gB}_2$  宽
- $DT=-13\text{dB}$  宽
- $f=1\text{kHz}$
  - $SL_0=120\text{dB}$  in 单位带宽
- $$SL=SL_0+10\lg B$$
- $NL_0=70\text{dB}$  in 单位带宽
- $$NL=NL_0+10\lg B$$
- $DI=0\text{dB}$
  - $FOM \leq SL-(NL-DI)-DT$
- $FOM \leq 53\text{dB}$  窄
- $FOM \leq 63\text{dB}$  宽

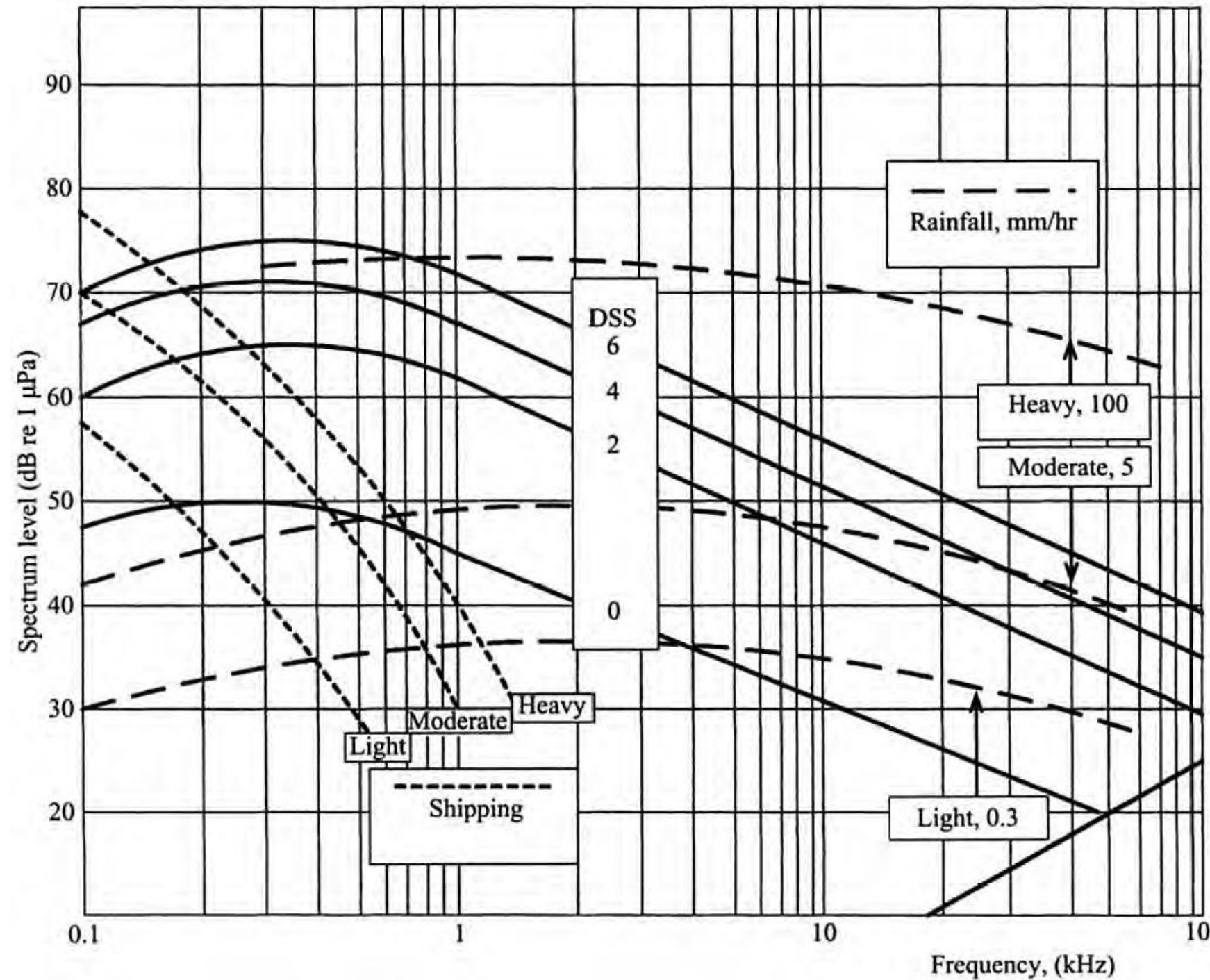






# 海洋环境噪声级

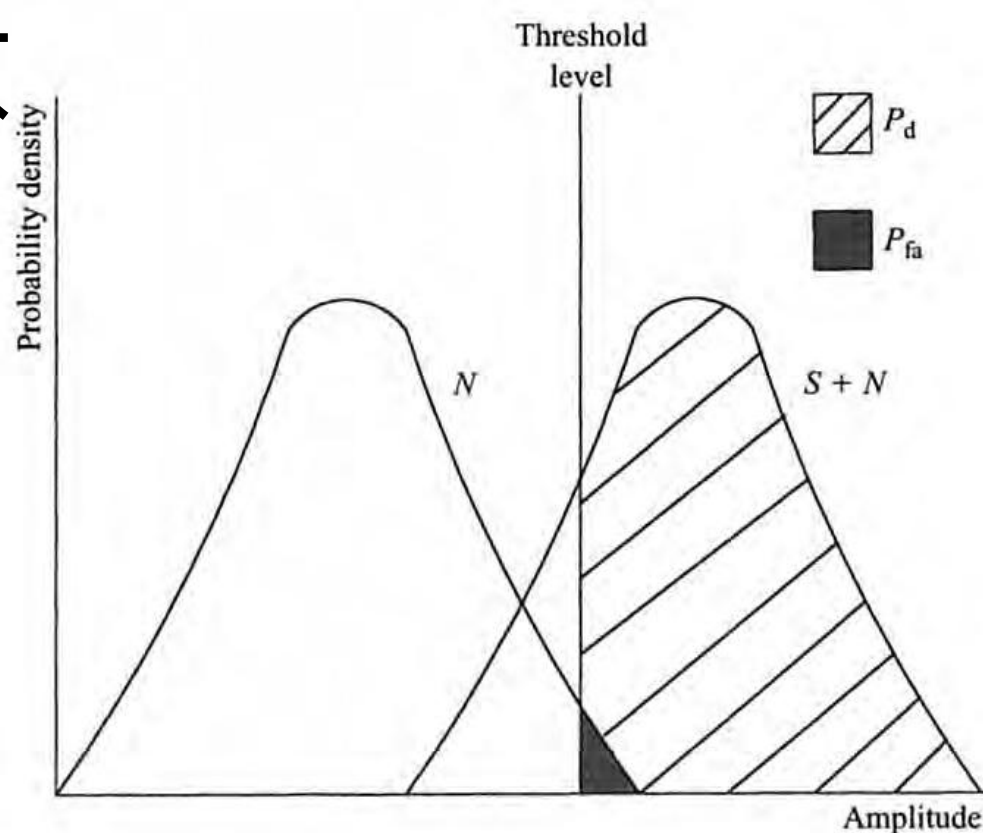
• NL=70dB



# 优质因数

$$\left. \begin{array}{l} P_f = 10e-4 \\ P_d = 90\% \end{array} \right\} d=25$$

$5\lg d = 7\text{dB}$



- 宽带信号用宽带检测

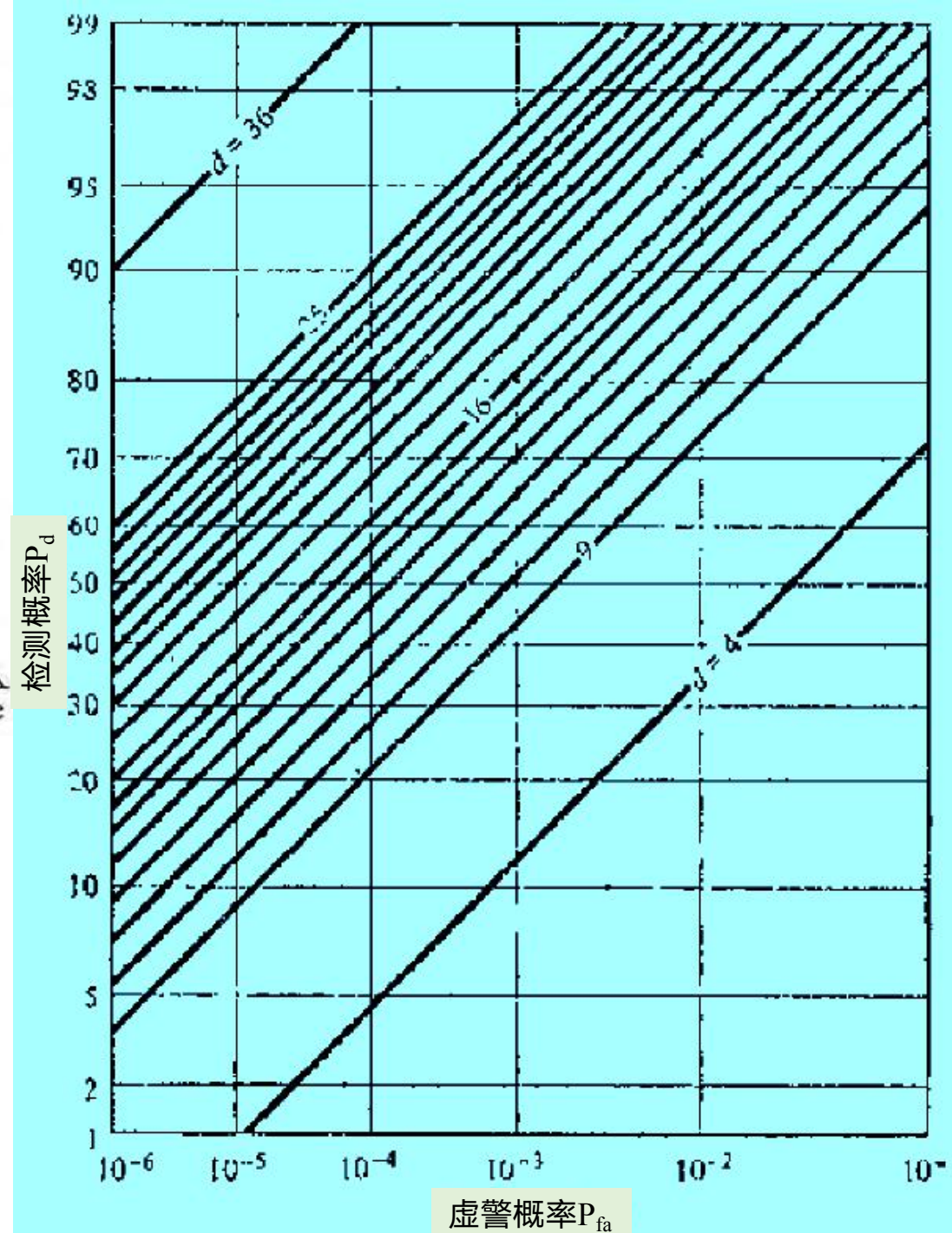
$$FOM \leq SL - NL - 5\lg d + 5\lg T + 5\lg B_2 \text{ 宽带}$$

- 窄带信号用窄带检测

$$FOM \leq SL - NL - 5\lg d + 5\lg T - 5\lg B_1 \text{ 窄带}$$

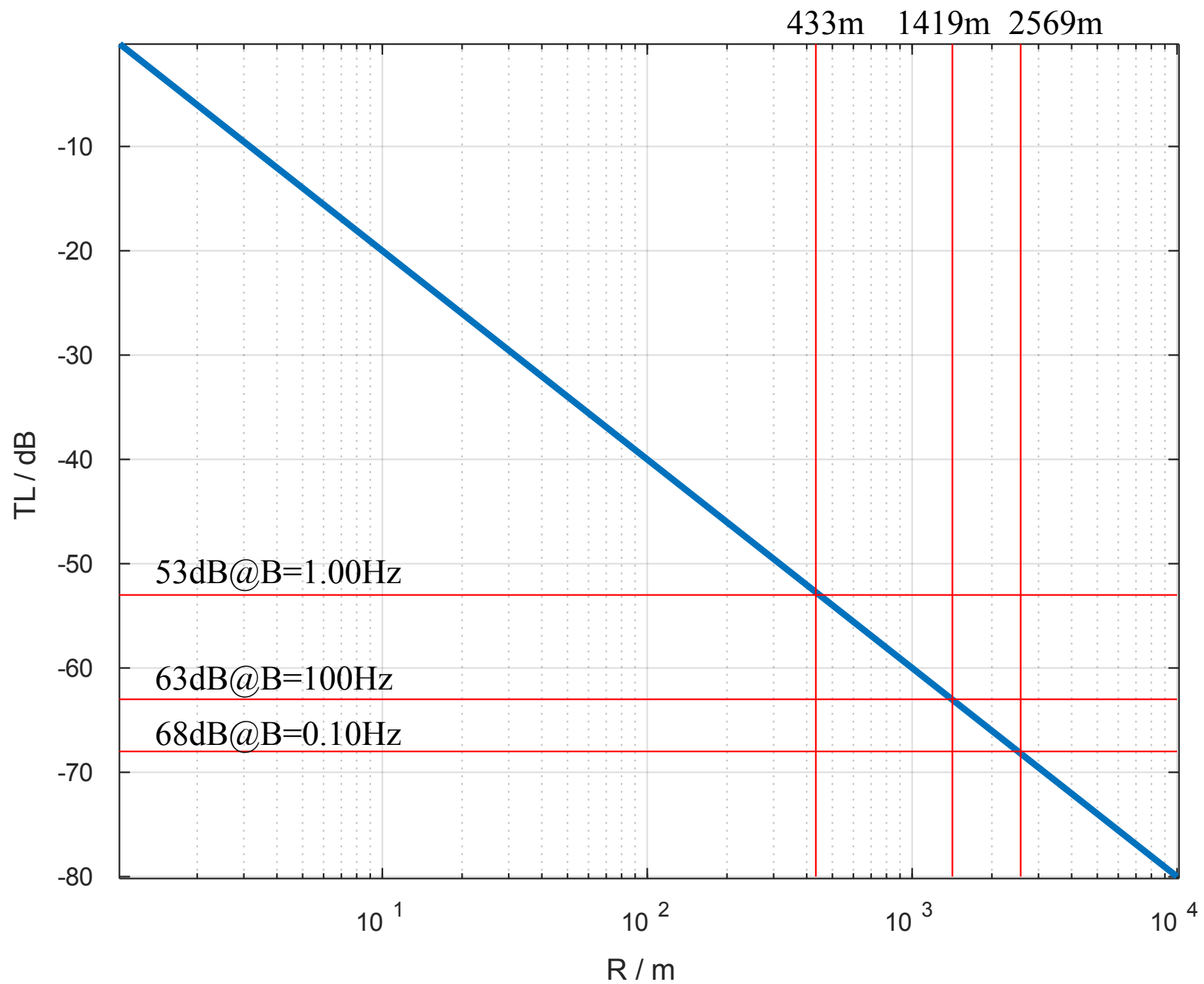
$$B_1 = 0.1\text{Hz 时 } FOM \leq 68\text{dB} \gg B_1 = 1 \text{ 时 } 53\text{dB}$$

$$DT = 5\lg d - 5\lg T \pm 5\lg B \leftarrow \text{能量检测}$$



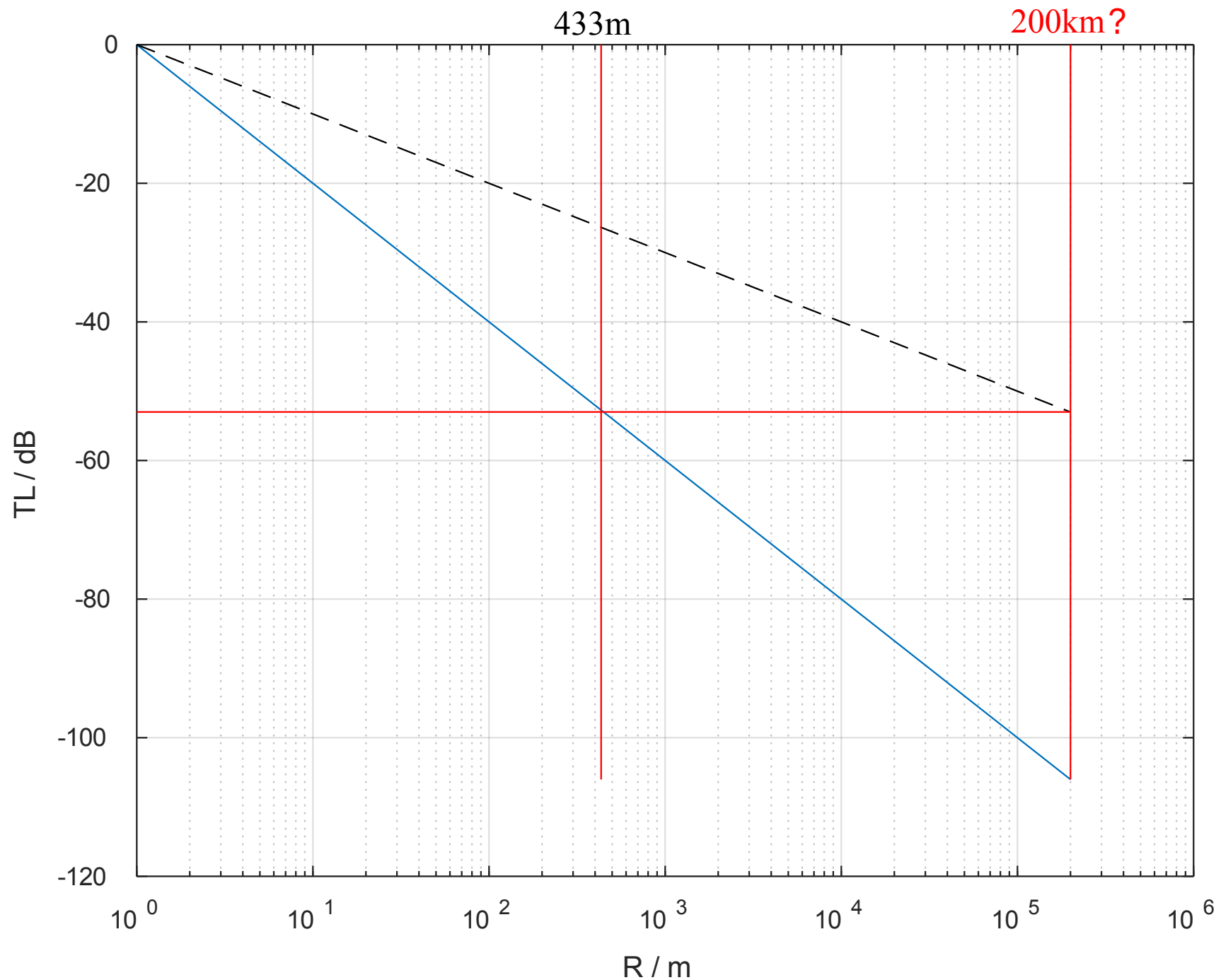
# 作用距离R

- $FOM(R) = 20 \lg R$  球面



# 传播损失TL

- $FOM(R)=10\lg R$ 柱面
- 海深距离内球面衰减
- 几倍海深距离内过渡
- 最后才是柱面波衰减



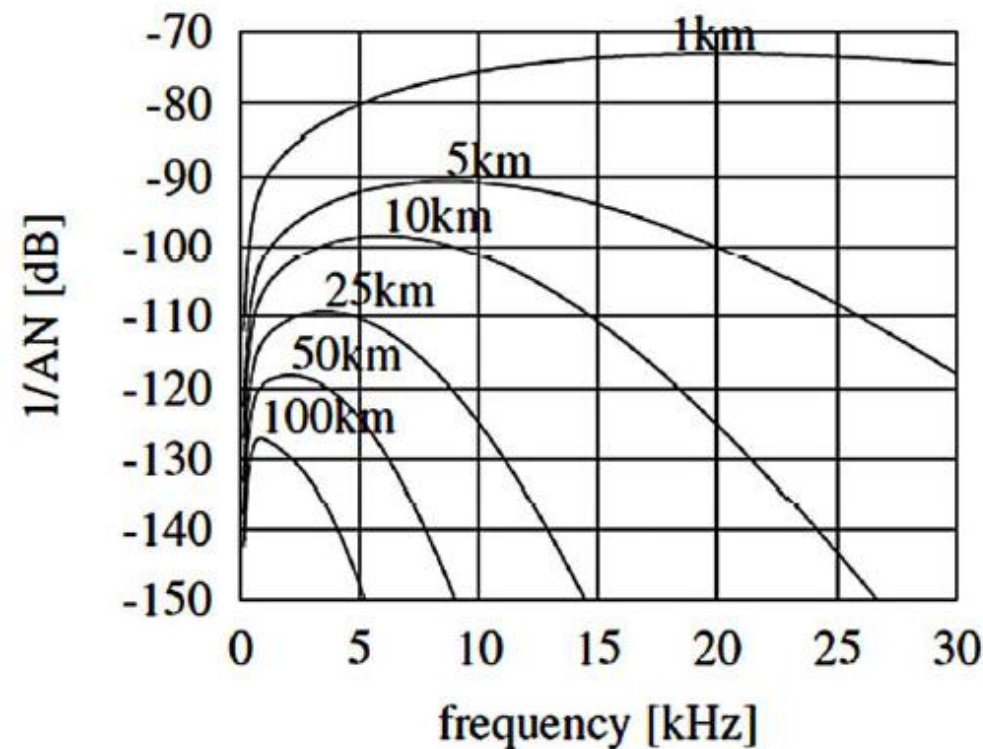
# 1.3、水声通信系统分析

宽带：

- $DT=5\lg d-10\lg BT$  匹配滤波器
- $DT=5\lg d-5\lg BT$  能量检测器
- $B=1\text{kHz}$ ,  $T=0.1\text{s}$
- $DT=7-20=-13\text{dB}$
- $SL=180\text{dB}$ ,  $NL_0=70\text{dB}$ ,  $DI=0\text{dB}$
- $FOM \leq SL-(NL-DI)-DT=93\text{dB}$

相差10dB!

水声通信最优频率选择

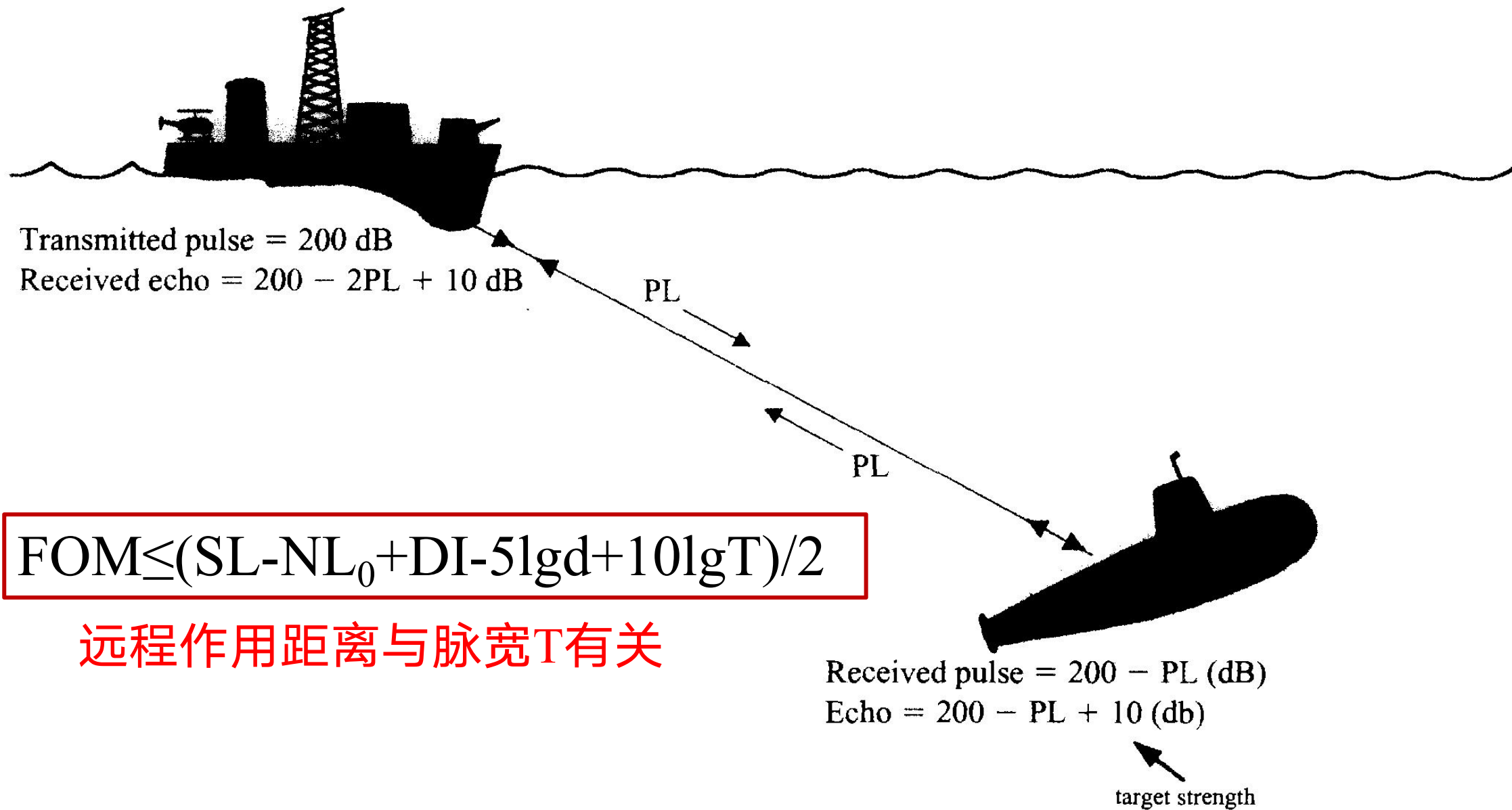


$$FOM \leq SL - NL_0 + DI - 5\lg d + 10\lg T$$

通信距离与脉宽T有关  
通信速率与带宽B有关  
距离-速率乘积上限

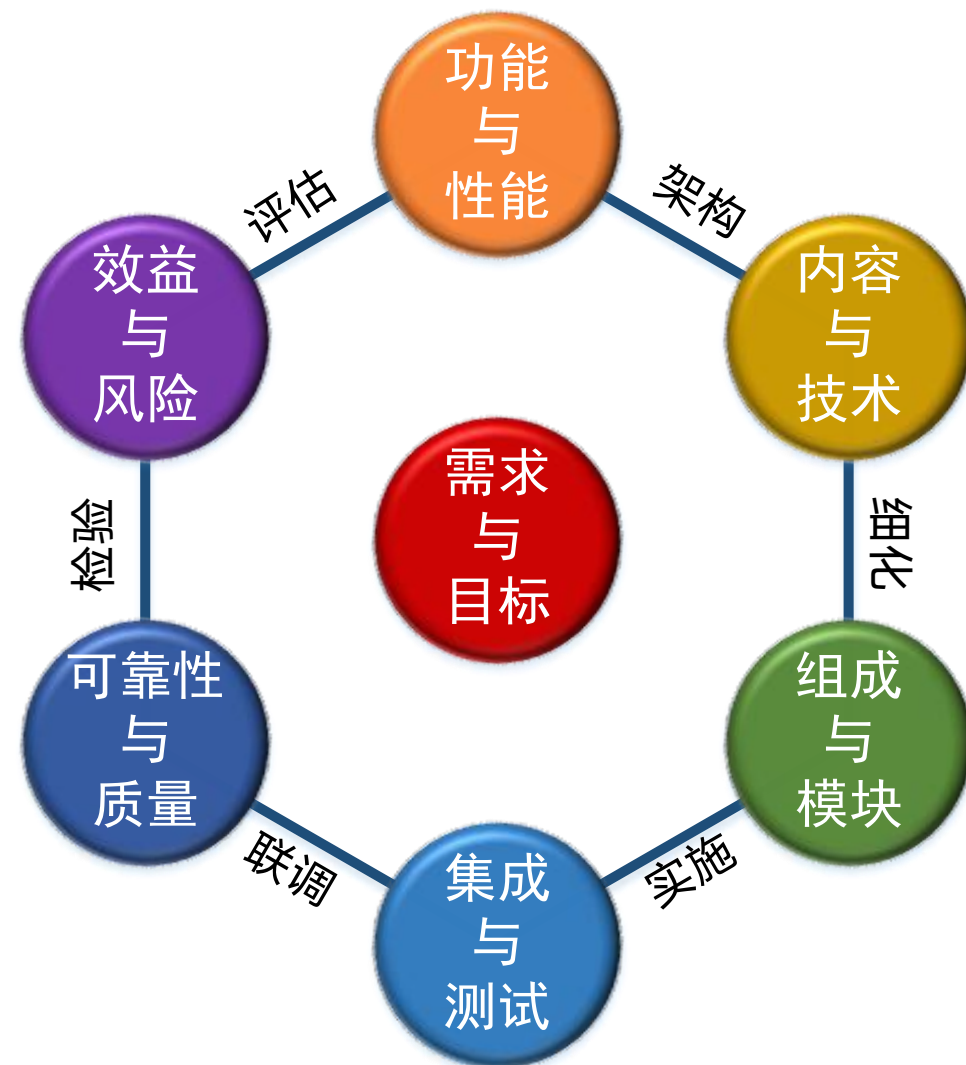


## 1.4、主动声纳



## 2、声纳系统设计

- 需求与目标 Demand and Objective
- 功能与性能 Function and Performance
- 内容与技术 Content and Technology
- 组成与模块 Composition and Module
- 集成与测试 Integration and Test
- 可靠性与质量 Reliability and Quality
- 效益与风险 Benefit and Risk



声纳设计原则—七彩球

## 2.1、声纳系统设计基础

**被动声纳方程：**  $SL - TL - (NL - DI) \geq DT$

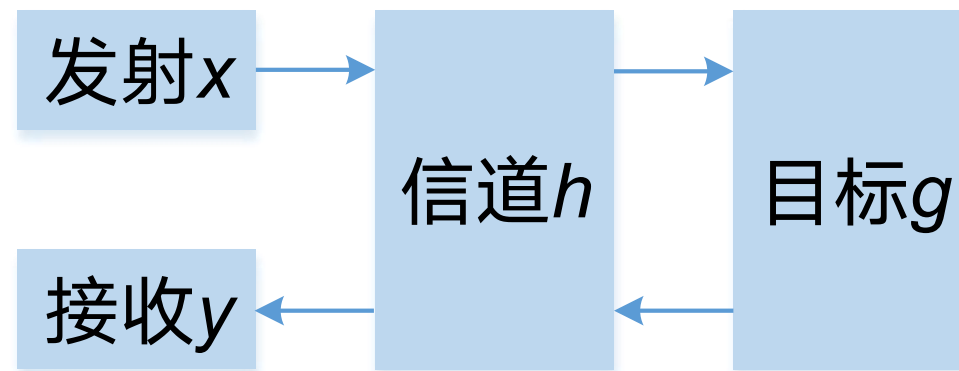
**主动声纳方程：**  $SL - 2TL + TS - RL \geq DT$

发射：SL

信道：TL、NL、RL

目标：TS、SL

接收：DI、DT

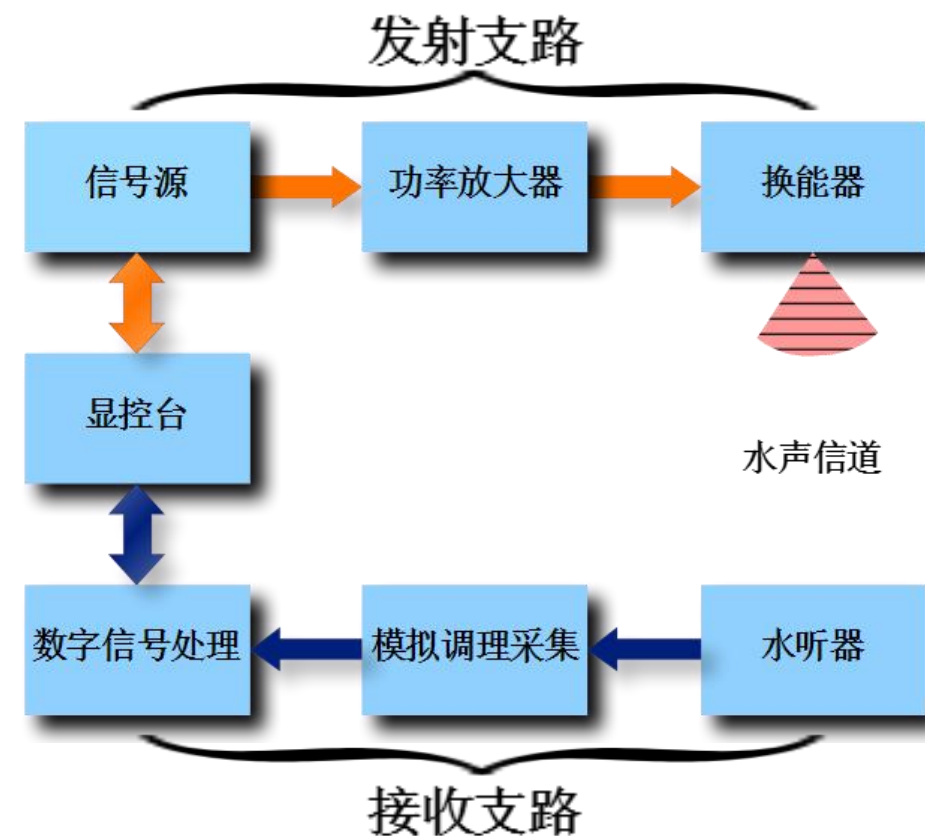




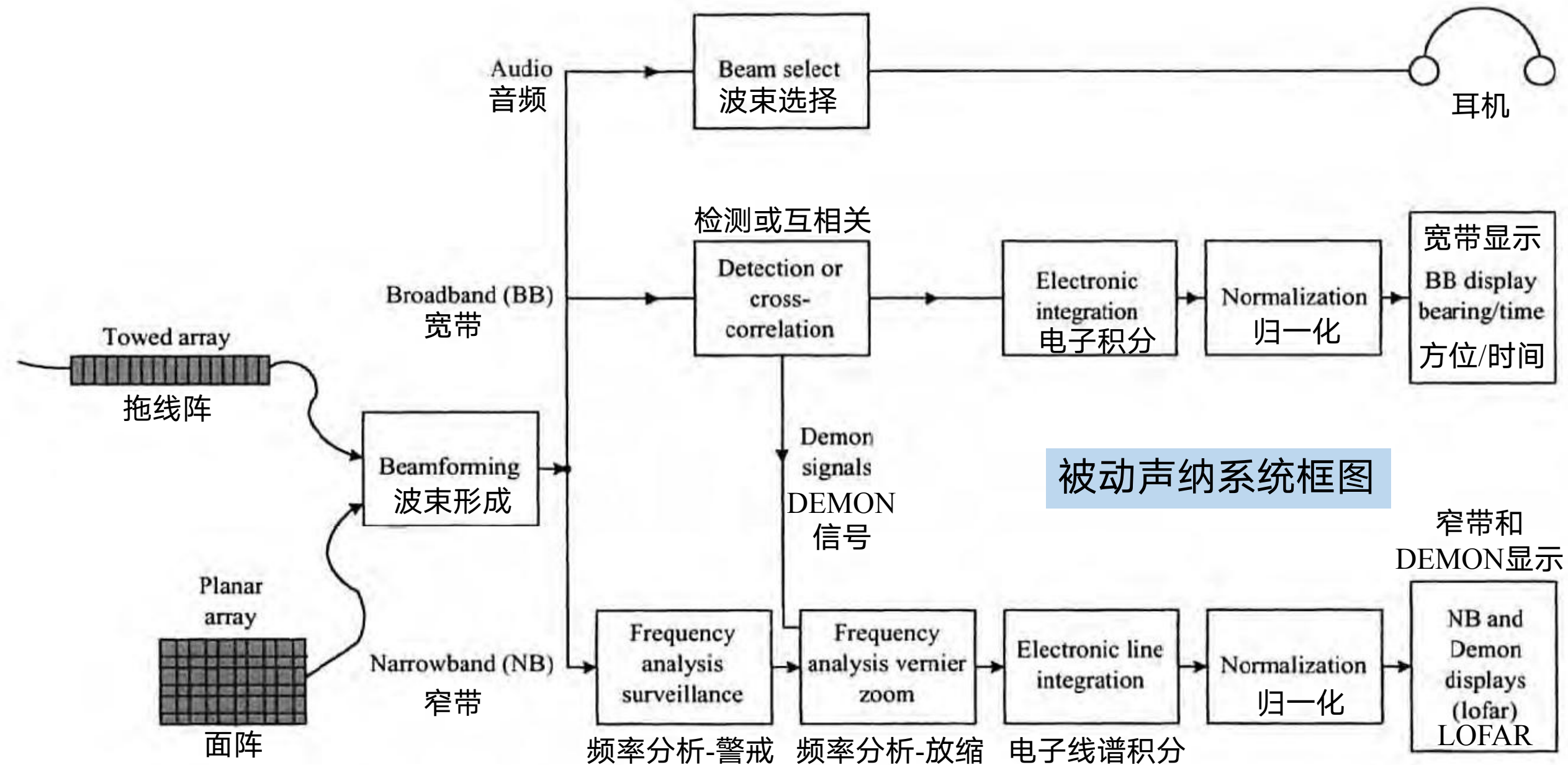
## 2.2、声纳系统主要构成及其关键指标

- 水听器：工作频带、接收灵敏度、指向性图
- 换能器：工作频带、电压发送响应（声源级）、指向性图
- 前放：工作频带、短路自噪声、幅相频响应、放大量
- 调理：工作频带、带内幅相频响应、带外衰减、放大量
- 采集：采样速率、采样精度、电压量程
- 处理：主频、内存、接口
- 显示：屏幕、像素
- 控制：按键、滚球
- 听闻：耳机
- 录音：录音机

模拟前端：放大+滤波+中频外差  
机内测试：BIT—Built-in Testing



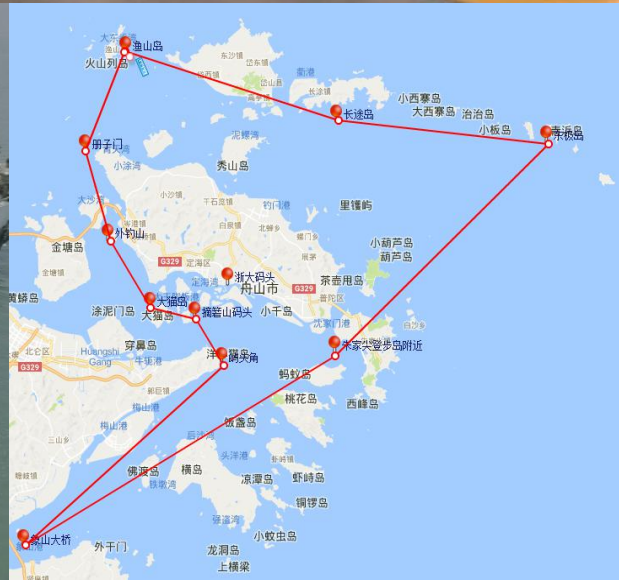
## 2.3、声纳系统集成与联调





# 3、声纳系统测试

- 消声水池校准
- 湖海外场试验





- 千岛湖试验场（中科院声学所东站、中船重工715所）
- 新安江试验场（中船工业721厂）
- 莫干山试验场（中船重工726所）





北京



上海



大

陆

架

坡

陆

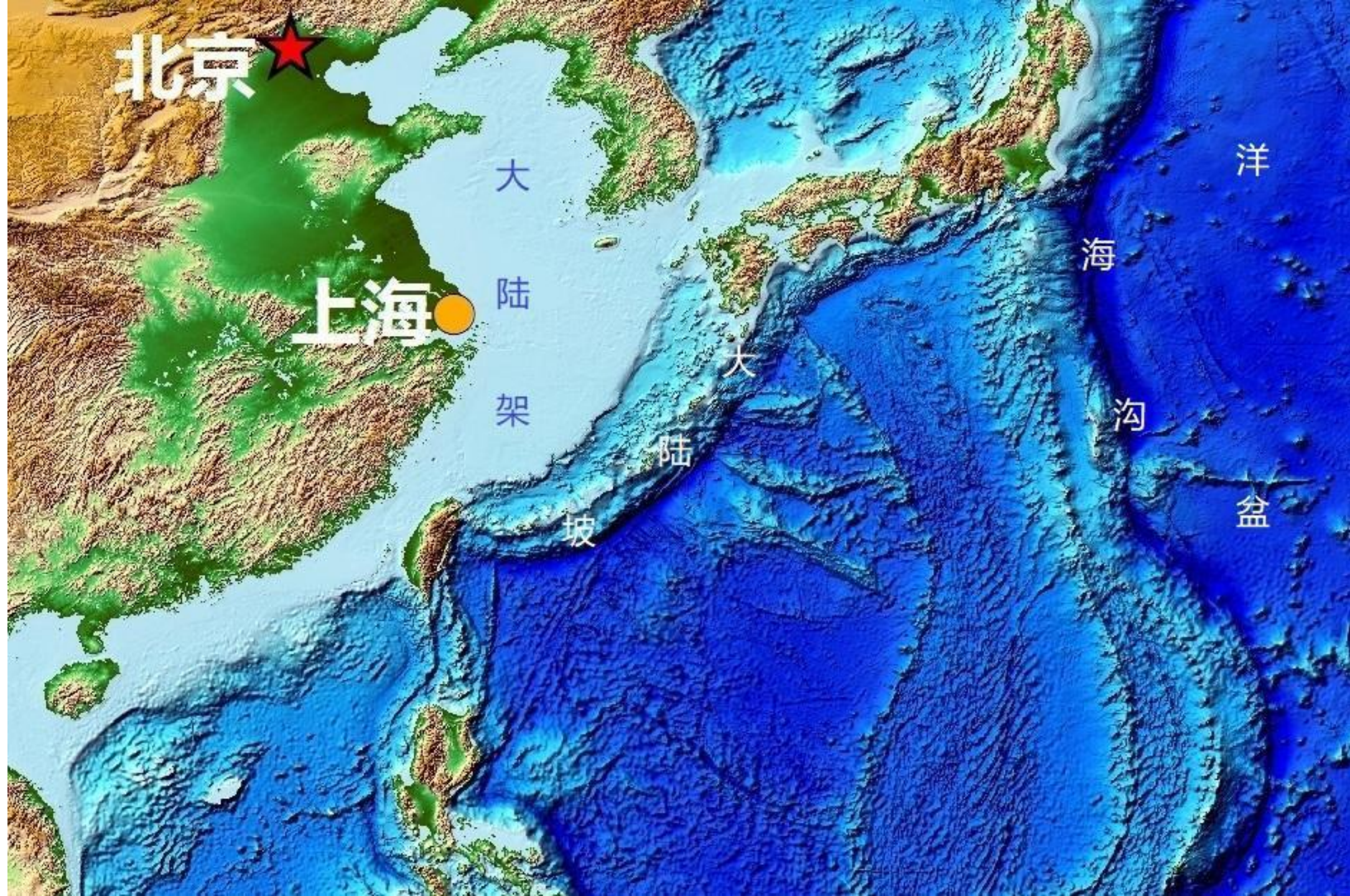
大

海

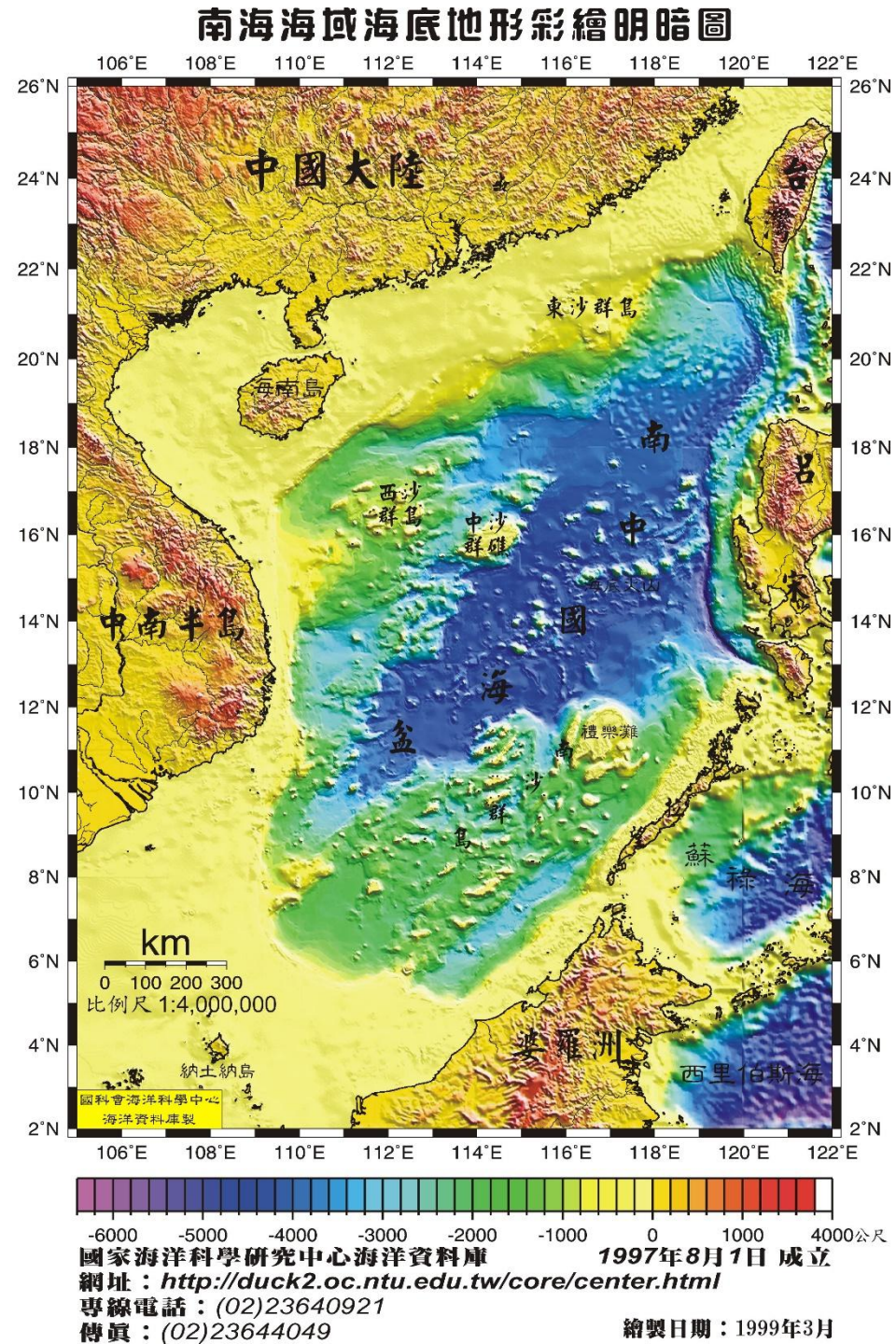
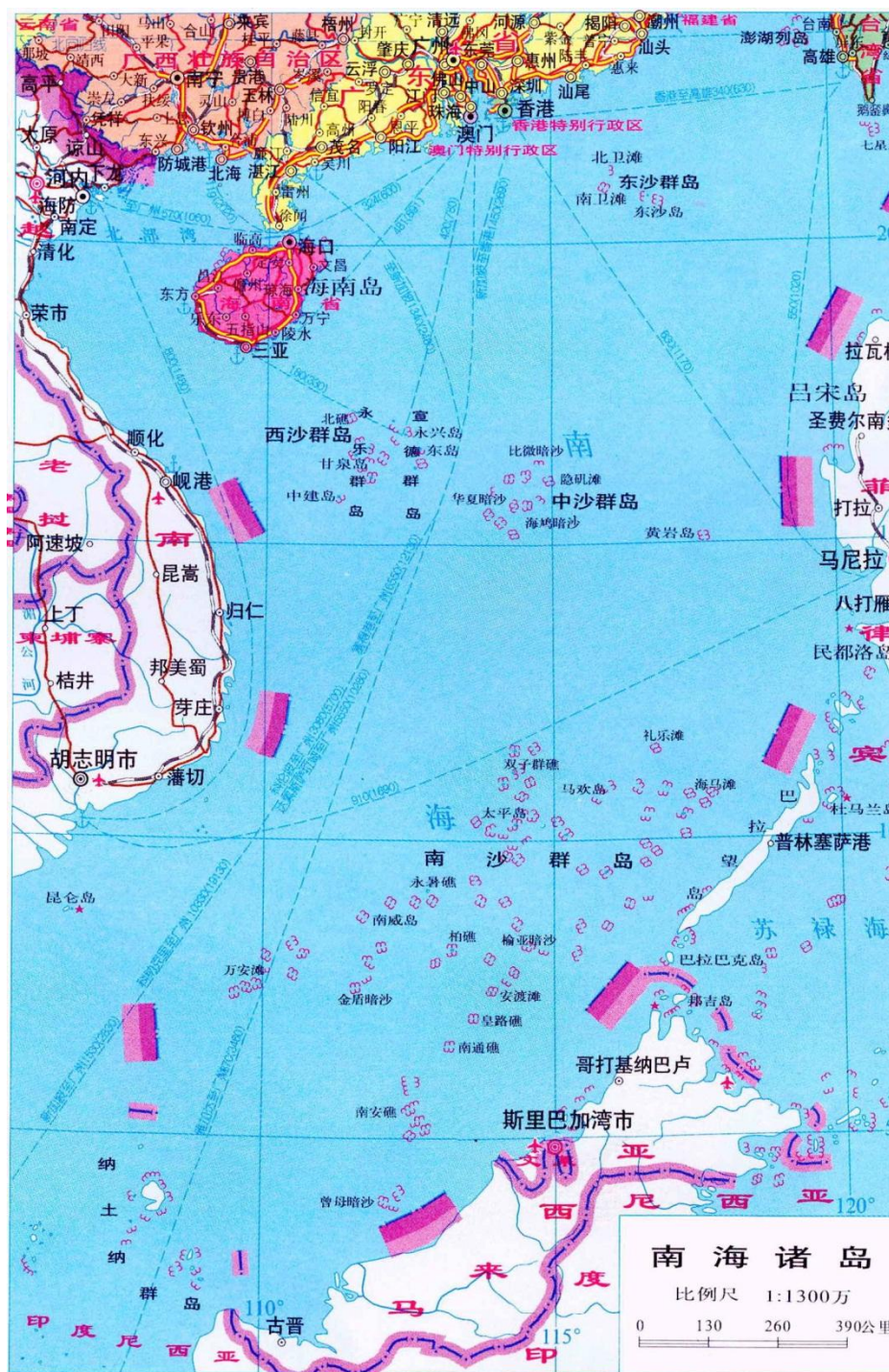
沟

洋

盆









# 大作业：水下小目标高分辨、低虚警检测

- 要求：考试前将报告word和可运行的MATLAB软件源代码压缩后提交到学在浙大课程群中。可自由组合研究小组，每组不超过3人。组间和组内可自由讨论、相互借鉴，但杜绝抄袭。充分表达自己的技术观点，全面深入提出自己的解决方案，有必要的仿真计算和理论分析。报告正文A4纸页数>20页，逻辑严密，内容丰富，语句通顺，用词准确，公式图表规范，附参考文献目录及其原文。
- 目的：熟练使用课程知识点，结合专业文献调研，针对蛙人、水下无人航行器等水下小目标开展距离-速度-方位域高分辨、低虚警检测，解决连续主动声纳的指标论证、方案设计、发射波形、波束形成、匹配滤波、检测跟踪等关键技术，达成全方位、远距离、高精度目标检测。
- 指标：
  - (1) 覆盖水平360度方位，测向均方根误差 $\leq 1^\circ$
  - (2) 最大斜距500米，测距均方根误差 $\leq 1\text{m}$ ,
  - (3) 覆盖 $\pm 5$ 节径向速度，测速均方根误差 $\leq 0.5\text{m/s}$
  - (4) 虚警概率 $\leq 10^{-4}$

# 1、指标论证

- 混响控制的主动声纳方程： $SL - 2TL - RL + TS > DT$
- 声源级SL
- 传播损失TL
- 混响级RL
- 目标强度TS
- 检测阈



## 2、方案设计

- 波形设计
- 波束形成
- 匹配滤波
- 目标检测
- 目标跟踪
- 目标分类