



无线传感器网络 ——物理层设计

重庆邮电大学

主要内容

- 概述
- 频率分配
- 通信信道
- 调制解调方式
- **WSN**物理层设计
- 总结

1 概述

- 本章主要讨论物理层设计中的一些关键问题并进行高效能优化的探讨。物理层最主要的任务就是完成无线信号的接收与发送以及相关信号的处理等工作，可以说是通信系统的基石，所以本章首先对通信的一些基础知识进行简单回顾，然后针对无线传感器网络应用的物理层，给出设计中的一些折中考虑和方法。

2 频率分配

- 对于一个无线通信系统来说，频率波段的选择非常重要。由于在**6 GHz**以下频段的波形可以进行很好的整形处理，能较容易地滤除不期望的干扰信号，所以当前大多数射频系统都是采用这个范围的频段。
- 无线电频谱是一种不可再生的资源，无线通信特有的空间独占性决定在其实际应用中必须符合一定的规范。为了有效利用无线频谱资源，各个国家和地区都对无线电设备使用的频段、特定应用环境下的发射功率等作了严格的规定，中国无线电管理机构的设置如表所示。

频段划分及主要用途

名称	甚低频	低频	中频	高频	甚高频	超高频	特高频	极高频
符号	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
频率	(3~30) kHz	(30~300) kHz	(0.3~3) MHz	(3~30) MHz	(30~300) MHz	(0.3~3) GHz	(3~30) GHz	(30~300) GHz
波段	超长波	长波	中波	短波	米波	分米波	厘米波	毫米波
波长	1 000~ 100 km	10~ 1 km	1~ 100 m	100~ 10 m	10~1 m	1~0.1 m	10~1 cm	10~1 mm
传播特性	空间波 为主	地波为主	地波与 天波	天波与 地波	空间波	空间波	空间波	空间波
主要用途	海岸潜艇 通信；远 距离通 信；超远 距离导航	越洋通 信；中距 离通信； 地下岩层 通信；远 距离导航	船用通 信；业余 无线电通 信；移动 通信；中 距离导航	远距离 短波通 信；国 际定点 通信	电离层散射 (30~ 60 MHz)；流星余 迹通信；人造电离 层通信 (30~144 MHz)；对空间飞 行体通信；移动 通信	小容量微波中继通 信 352~420 MHz； 对流层散射通信 700~10 000 MHz； 中容量微波通信 1 700~2 400 MHz	大容量微波中继 通信 3 600 ~ 4 200 MHz；大 容量微波中继通 信 5 850~ 8 500 MHz；数字通信； 卫星通信；国际 海事卫星通信 1 500~1 600 MHz	再入大气层时 的通信；波导 通信

HF: High Frequency

VHF: Very high frequency

UHF: Ultra high frequency

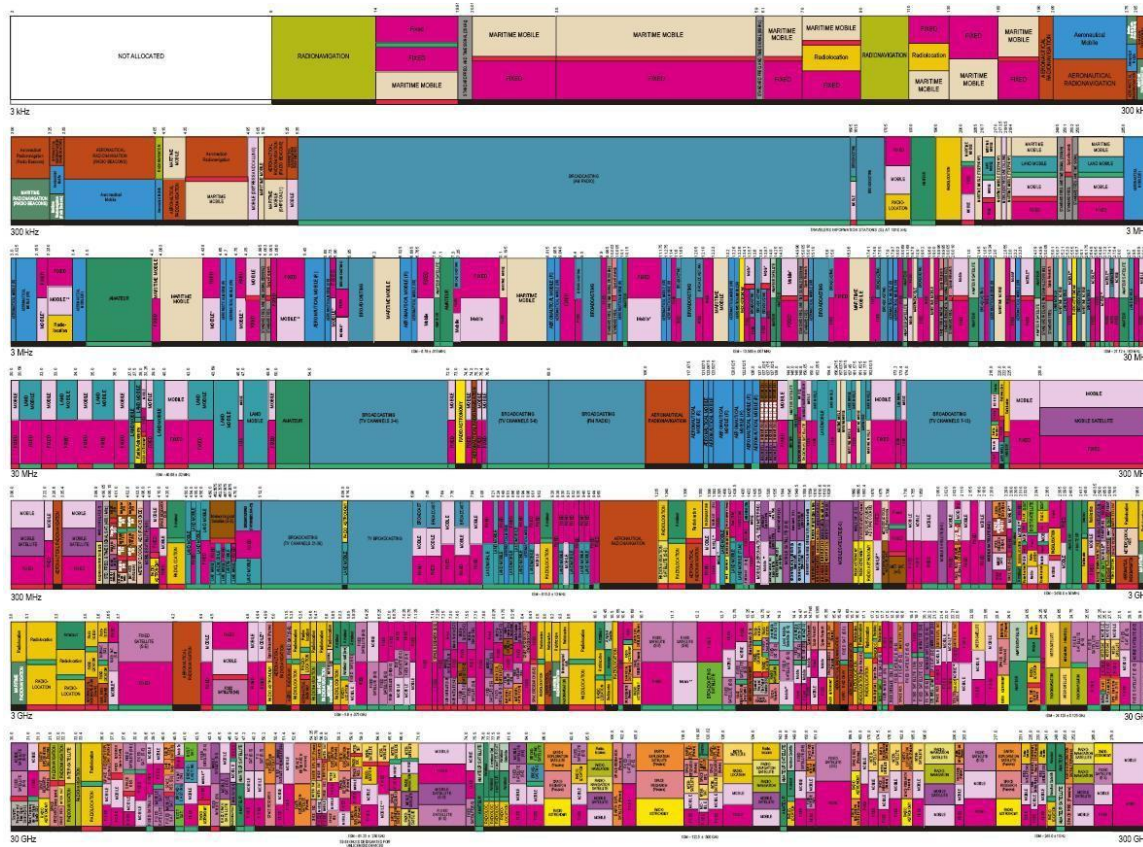
SHF: Super high frequency

EHF: Extremely high frequency

几个特指频率

- **microwave frequency**（微波）：从1米到1毫米（不是指波长是微米），频率从300MHz (100 cm) 到300GHz (0.1 cm)
- **millimeter wave**（毫米波）：波长为1毫米到10毫米，频率从30GHz到300GHz。（**5G的重要频段**）
- **Sub-G Hz**：频率低于1GHz的频段（低功耗广域WSN常用的频率范围）
- **Sub-6G Hz**：频率低于6GHz的频段（**5G的另外一个重要频段**）
 - 注意频率对5G基站覆盖范围的影响
 - 电信：3.4-3.5GHz，联通：3.4-3.5GHz，移动：2.5-2.6，4.8-4.9GHz

拥挤的频段



FCC对
700MHz频段
进行拍卖（模拟
电视向数字电视
转换后空出来的
频率），创下了
195.9 亿美元的
记录新高。

U.S. Frequency Allocation

2 频率分配

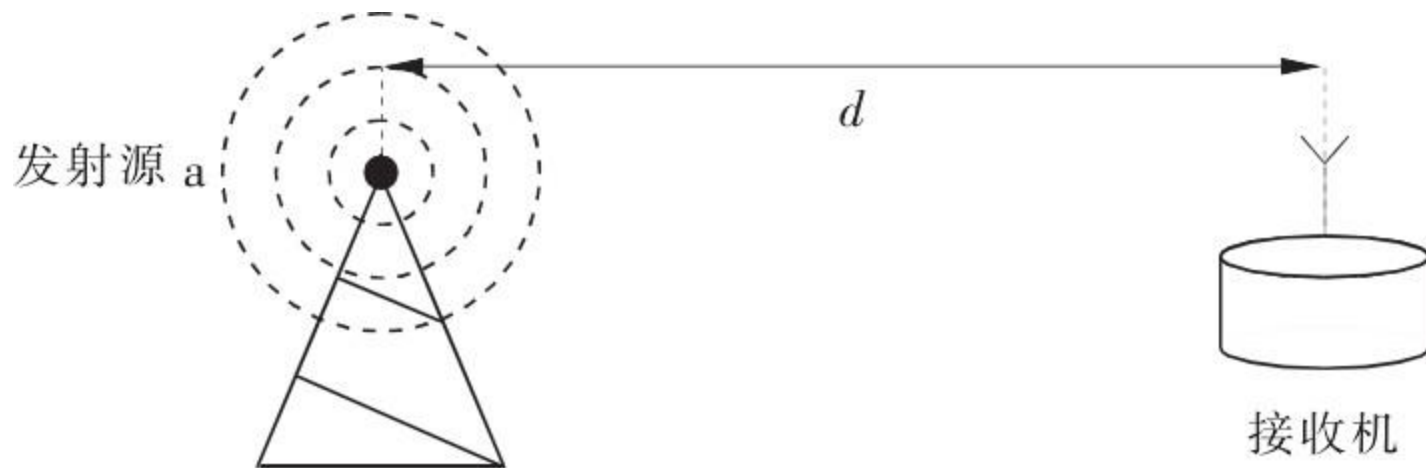
- 在**WSN**频段的选择上必须按照相关的规定来使用。无线传感器网络节点基本上都是采用**ISM(Industrial, Scientific and Medical)**频段，**ISM**频段是对所有无线电系统都开放的频段，发射功率要求在**1W**以下，无需任何许可证，是非授权频段（**unlicensed Spectrum**）。

频率	说明
13.553~13.567 MHz	
26.957~27.283 MHz	
40.66~40.70 MHz	
433~464 MHz	欧洲标准
902~928 MHz	美国标准
2.4~2.5 GHz	全球 WPAN/WLAN
5.725~5.875 GHz	全球 WPAN/WLAN
24~24.25 GHz	

3 通信信道

- 自由空间传输信道

- 自由空间信道是一种理想的无线信道，无阻挡、无衰落、非时变的自由空间传播信道。



3 通信信道

- 与发射机相距 d 的接收机接收到的信号载波功率为

$$P_r = \frac{P_t G_1 G_2 \lambda^2}{4\pi d^2 \cdot 4\pi} = \frac{P_t G_1 G_2}{(4\pi d / \lambda)^2} (\text{W}) = \frac{P_t G_1 G_2}{L_{fs}} (\text{W})$$

- P_r : 接收信号功率; P_t : 发射信号功率
- d : 距离; λ : 波长
- G_1 : 发送天线增益; G_2 : 接收天线增益
 - 天线分为全向天线和定向天线, **WSN**首选全向天线

重要结论:

- 1、距离越远, 信号衰减越大;
- 2、频率越高 (波长越小), 信号衰减越大;
- 3、增大发射功率能够增大信号传播范围;
- 4、良好的天线设计能够改进传输性能。

在线课程

- 重庆高校在线开放课程平台
 - 网址: <http://www.cqooc.com/>
 - 账号: 10617+学号
 - 密码: cq+账号
 - 有**58**名同学应该是以前统一按上述规则注册过的, 密码已自己修改了, 这部分同学按自己修改的密码登录。
- 登录后在课程搜索中, 搜索 无线传感器网络, 找到我们学校的课程 无线传感器网络 (第二次开课), 点击“立即参加”就可以加入课程的学习。
- 学习课程视频和**PPT**, 并通过该平台布置、提交作业。

Sub-6GHz表示频率

- ☐ A 高于6GHz
- ☒ B 低于6GHz
- ☐ C 等于6GHz

提交

下列选项中，位于毫米波频段的是

- ☐ A 5MHz
- ☐ B 500MHz
- ☐ C 5GHz
- ☒ D 50GHz

提交

下列频段中，不属于ISM频段的是

- ☐ A 433MHz
- ☒ B 600MHz
- ☐ C 2.4GHz
- ☐ D 5.8GHz

提交

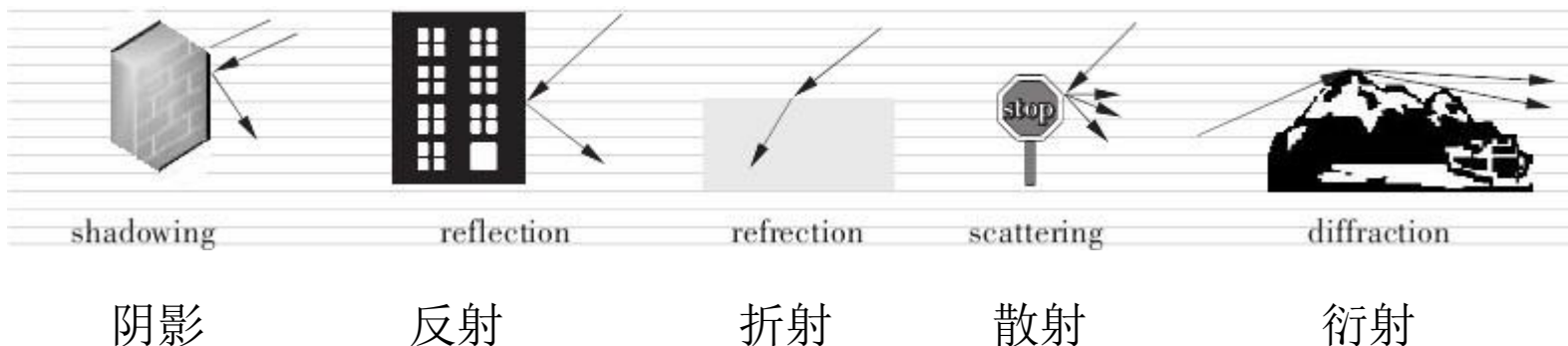
无线信号强度表示

- 功率的标准单位为瓦（**W**）。功率之间的相对关系常用**dB**来表示。两个功率量**PA**和**PB**的相对功率计算方式为： **$10\lg(PA/PB)$**
 - 若**PA**是**PB**的**2**倍，则相对功率为**3dB**， **$10\lg 2=3$** 经常说增益为**3dB**，相当于性能变为原来的**2**倍。
 - 功率增加**10dB**，相当于功率变为原来的**10**倍；增加**20dB**，相当于**100**倍。
- 另外一个功率单位是**dBm**，它是相对于**1mW**，以**dB**为单位的功率级。功率**PA**为 **$10\lg(PA/1mW)$** 个**dBm**。
 - 发射功率为**1mW**，对应为**0dBm**
 - 发射功率为**10mW**，对应为**10dBm**
 - 发射功率为**100mW**，对应为**20dBm**
 - 发射功率为**0.1mW**，对应为**-10dBm**（**dBm**可以为负值，仍表示正的功率）
- **dB**表示的是相对大小，无量纲；**dBm**有量纲，表示功率的绝对值。

3 通信信道

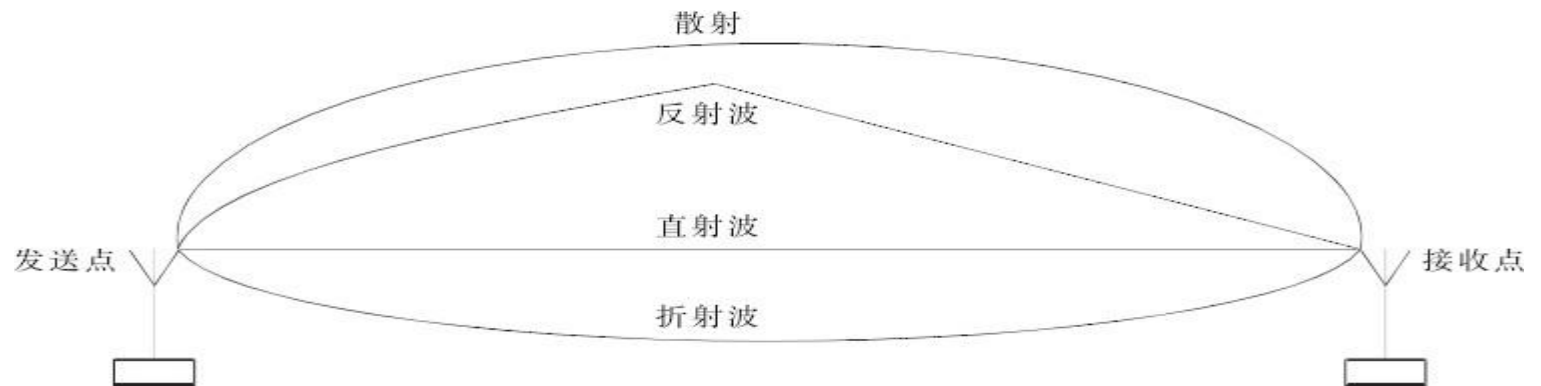
○ 多径信道

- 在超短波、微波波段，电波在传播过程中还会遇到障碍物，例如楼房、高大建筑物或山丘等，对电波产生反射、折射或衍射等。因此，到达接收天线的信号可能存在多种波，这种现象称为多径传播。



3 通信信道

- 对于无线传感器网络来说，其通信大都是节点间短距离、低功率传输且一般离地面较近，所以对于一般的场景(如走廊)可以认为它主要存在三条路径，即障碍物反射(**Re-Election**)、直射(**Direct**)以及地面反射(**Ground Reflection**)
- 直视距离传输: **Line-of-sight**



多径传输实际例子

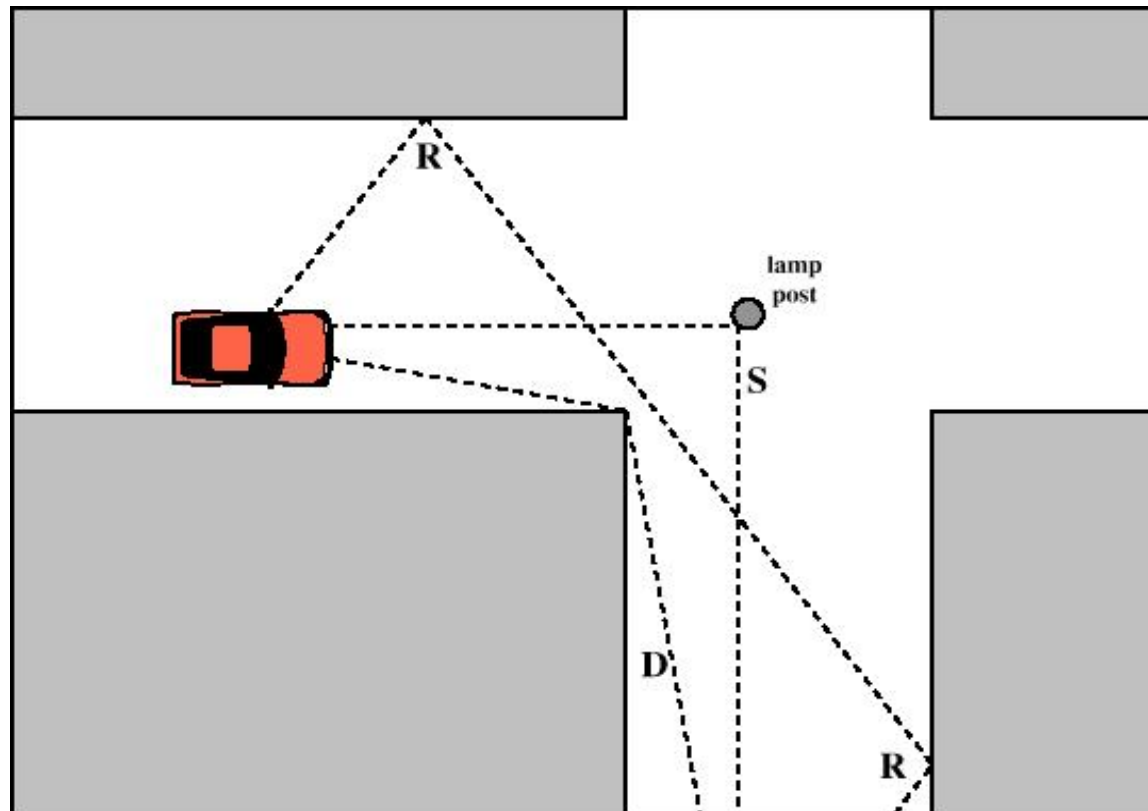
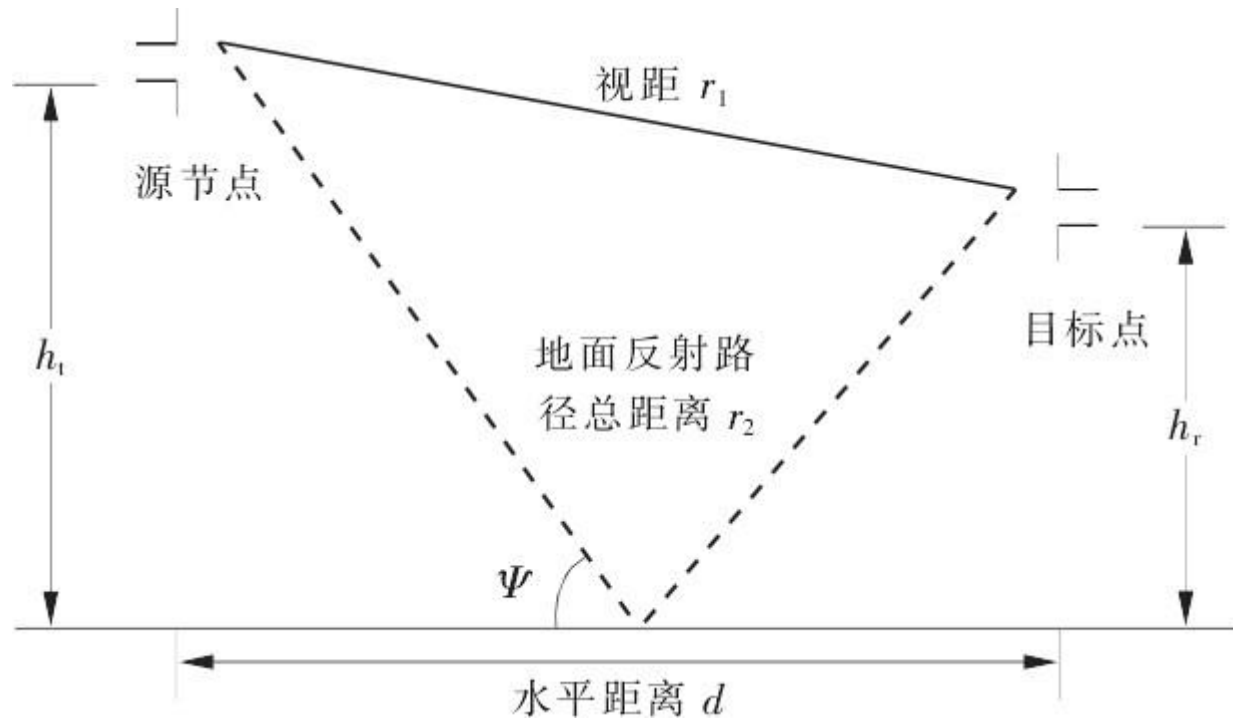


Figure 5.10 Sketch of Three Important Propagation Mechanisms: Reflection (R), Scattering (S), Diffraction (D) [ANDE95]

多径传输简单模型



多径传输的影响

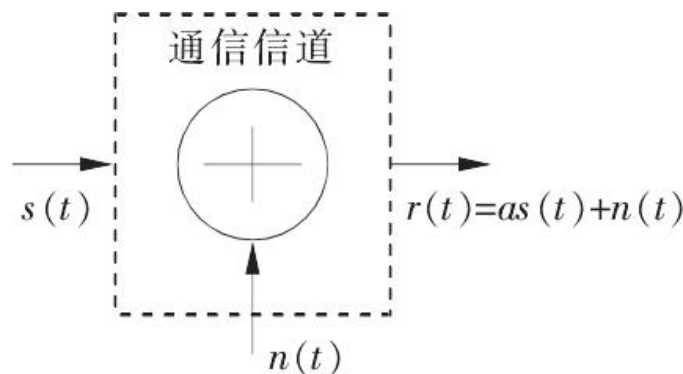
- 从同一个源节点发出的信号，因为走的传播路径不同，距离不等，因此各个路径的信号到达接收机的时间不一致。
- 这就导致虽然只有一个源节点发送了信号，但接收机收到了一个信号后，马上又会来一个相同信号，再待一会又立刻会来第三个信号，...，这些信号之间的时间差非常短，相互之间一般会重叠在一起，单独接收任何一个信号都会受到其他信号的干扰，从而导致接收失败。
- 多径信号本身是缺点，因为会干扰接收。但通信系统采用了**分集机制**后，反而能变缺点为优点，大幅度提高接收质量。
 - 奥妙何在？

如果能把多个接收信号在时间或空间或频率上分开，则不仅不会再让它们之间相互干扰，反而会因为接收了同一个信号的多个副本，将它们同相位叠加起来会增强接收信号！

3 通信信道

○ 加性噪声信道

- 对于噪声通信信道，最简单的数学模型是加性噪声信道。传输信号 $\mathbf{s(t)}$ 被一个附加的随机噪声， $\mathbf{n(t)}$ 所污染。加性噪声可能来自电子器件和系统接收端的放大器，或传输中受到的干扰，无线传输主要采用这种模型。



噪声通常服从高斯分布。

系数 \mathbf{a} 可以是复数，表明信道对信号既进行了幅度影响，也进行了相位影响。

3 通信信道

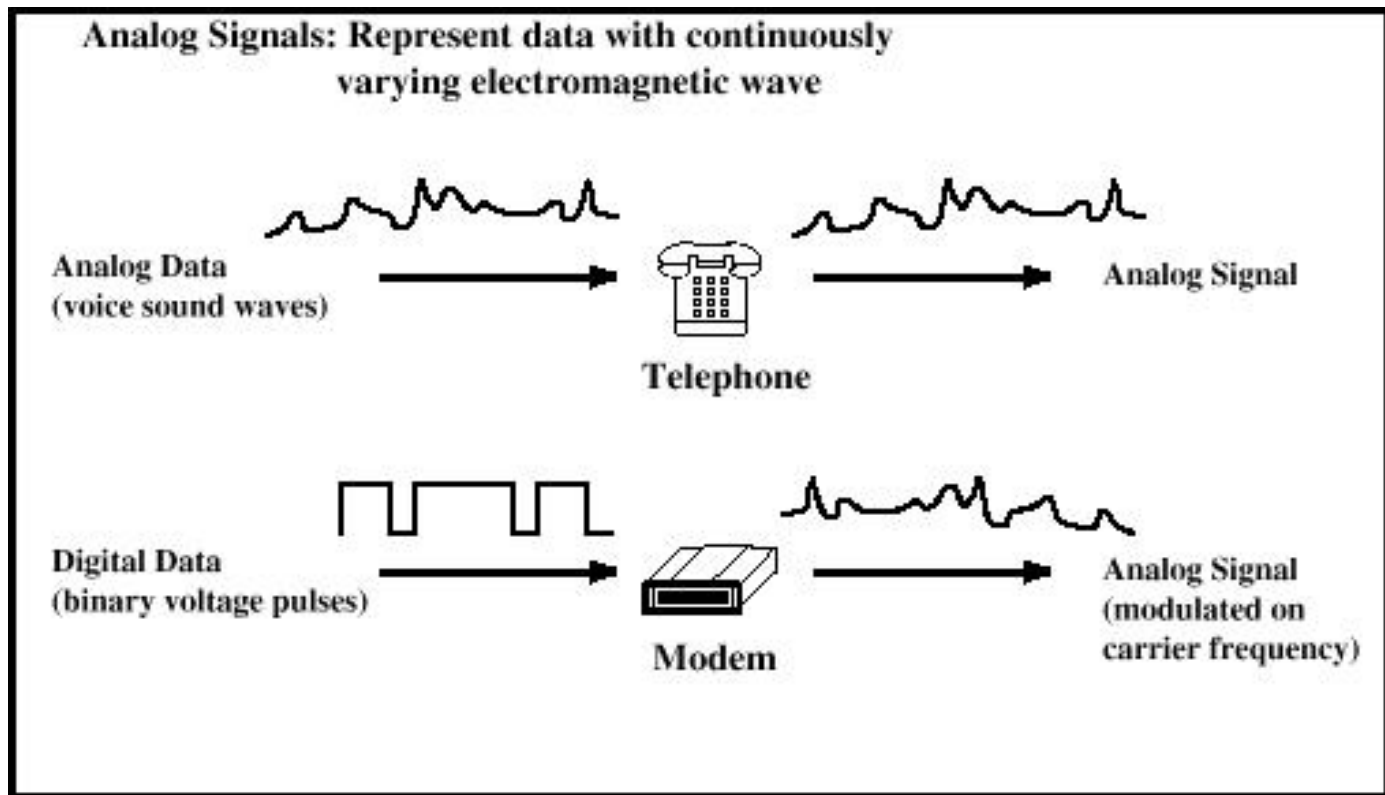
- 实际环境中的无线信道
 - 实际环境中的无线信道往往比较复杂，对信道分析时通常采用来自于大量测量所得出的经验公式。例如，对于无线传感器网络、蓝牙(**Bluetooth**)等短距离通信，工程上往往采用改进的**Friis**方程来表示实际接收到的信号强度，即为

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \left(\frac{d_0}{d} \right)^n G_1 G_2$$

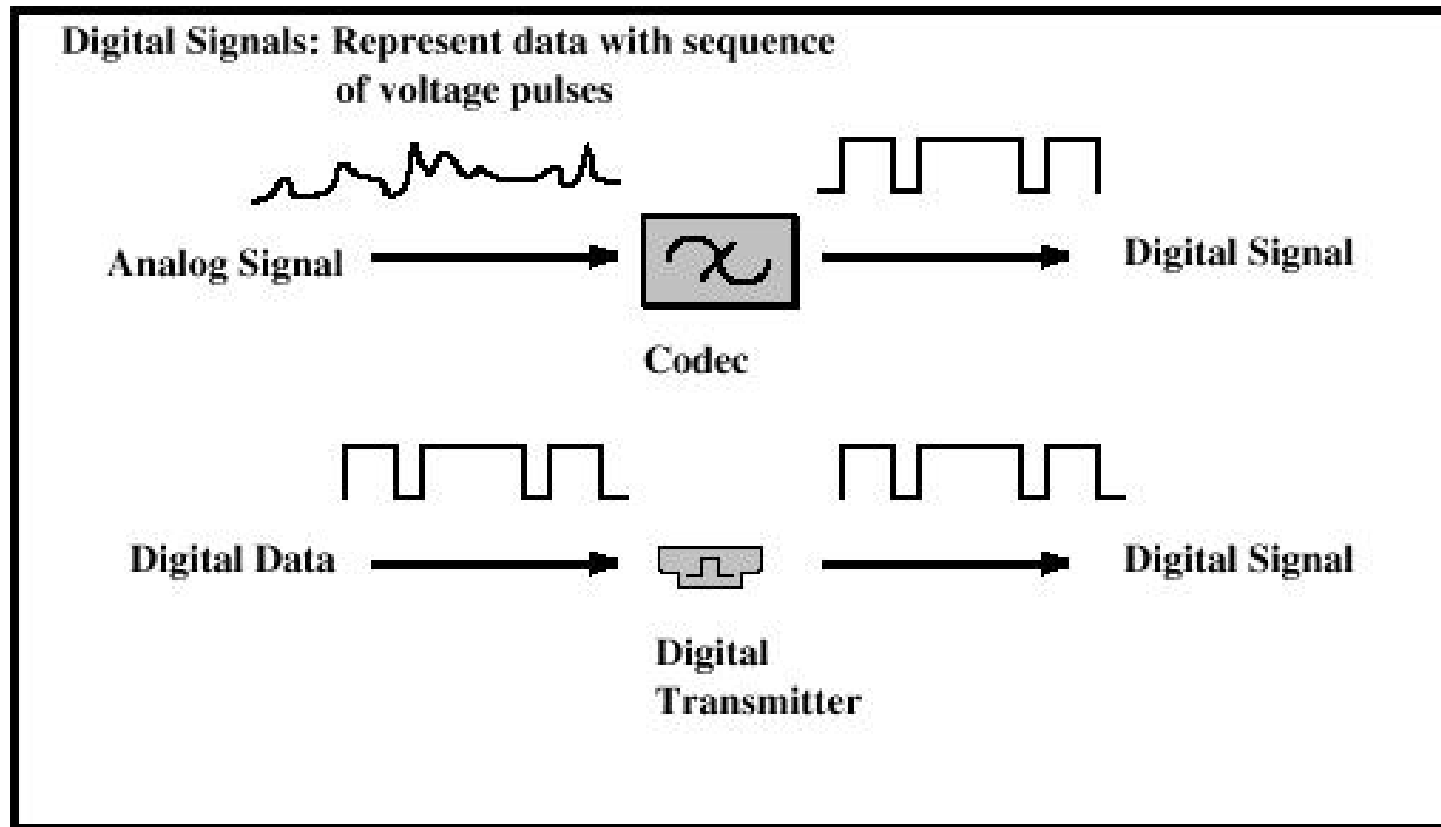
4 调制解调方式

- 模拟信号与数字信号
 - 模拟数据/信号：连续变化的数据/信号。例子：声音
 - 数字数据/信号：离散变化的数据/信号。例子：比特流
- 数据与信号传输方式
 - 模拟数据——利用模拟信号传输
 - 模拟数据——利用数字信号传输
 - 数字数据——利用模拟信号传输
 - 数字数据——利用数字信号传输

信号类别与传输方式（1）



信号类别与传输方式（2）



什么是调制

- 所谓**调制**，就是把信号转换成适合在信道中传输的形式的一种过程。一般调制均指载波调制。
- **载波调制**，就是用待调制信号去控制载波的参数的过程，使载波的某一个或某几个参数随着调制信号的规律而变化。调制信号是要真正传输的信息，可以是模拟信号，也可以是数字信号。
- 未受调制的周期性振荡的信号称为**载波**，一般是正弦波（或脉冲序列）。载波调制后称为**已调信号**，它含有调制信号的全部特征。
- **解调**是调制的拟过程，其作用是将已调信号中的调制信号恢复出来。

为什么需要调制（了解内容）

- 发射电磁波时，天线尺寸必须与发射信号的波长相比拟。原始信号（例如基带信号）一般包含大量的低频信息，若把这些波长很长的低频信息通过无线电波发送出去，则需要过长的天线而难以实现。
 - 例如**3000Hz**的信号若不通过调制而直接耦合到天线发送，则需要**25Km**的天线！而如果通过调制将信号搬到较高的载波频率上发送，则可以用较小的功率和天线来辐射电磁波。例如**GSM**所用的**900MHz**频率，所需天线仅需**8cm**。
- 把多个基带信号分别搬移到不同的载波频率处传送，能够实现多个信号同时发送（频率不同），提高信道利用率。
 - 类似盖楼房，通过分层，可以容纳更多的用户。
- 能够提高系统抗干扰、抗衰落能力。

调制的分类

- 模拟调制与数字调制
 - 在载波是连续波（一般为正弦波）的情况下，根据待调制的信号是模拟信号还是数字信号，可将调制方式划分为模拟调制和数字调制两种。

4 调制解调方式

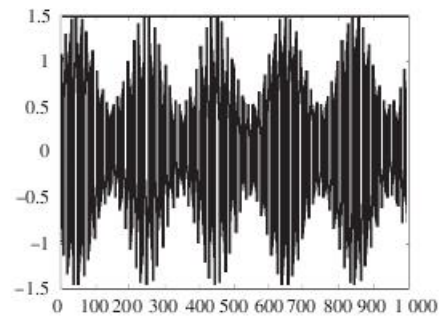
- 模拟调制

- 一个简单的正弦波可表示为

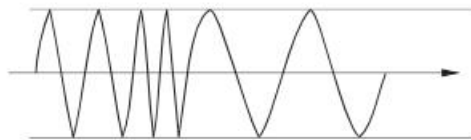
- $$s(t) = A(t) \sin (2\pi f(t) + \varphi(t))$$

- 基于正弦波的调制技术可对其参数幅度 **$A(t)$** 、频率 **$f(t)$** 、相位 **$\varphi(t)$** 的调整。分别对应的调制方式为幅度调制(**AM**)、频率调制(**FM**)、相位调制(**PM**)。下一页图中给出了这几种调制方式的一般波形图。由于模拟调制自身的功耗较大且抗干扰能力及灵活性差，所以正逐步被数字调制技术替代。但当前，模拟调制技术仍在上(下)变频处理中起着重要作用。

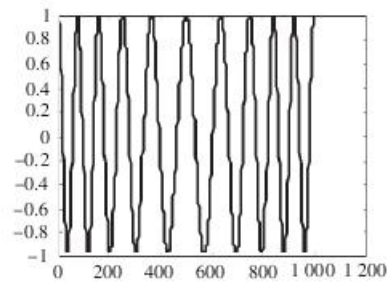
模拟调制信号波形



(a)



(b)



(c)

图 4-7 模拟调制信号波形

(a) AM 调制波形图 (双边带); (b) 调频信号; (c) 调相信号

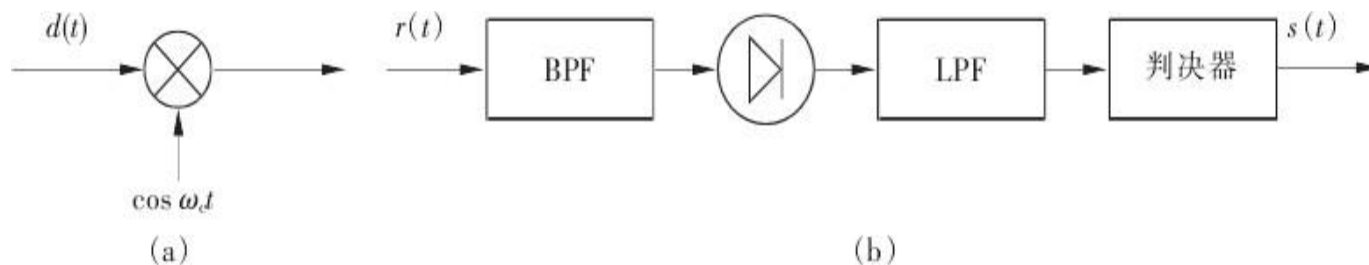
4 调制解调方式

- 数字调制

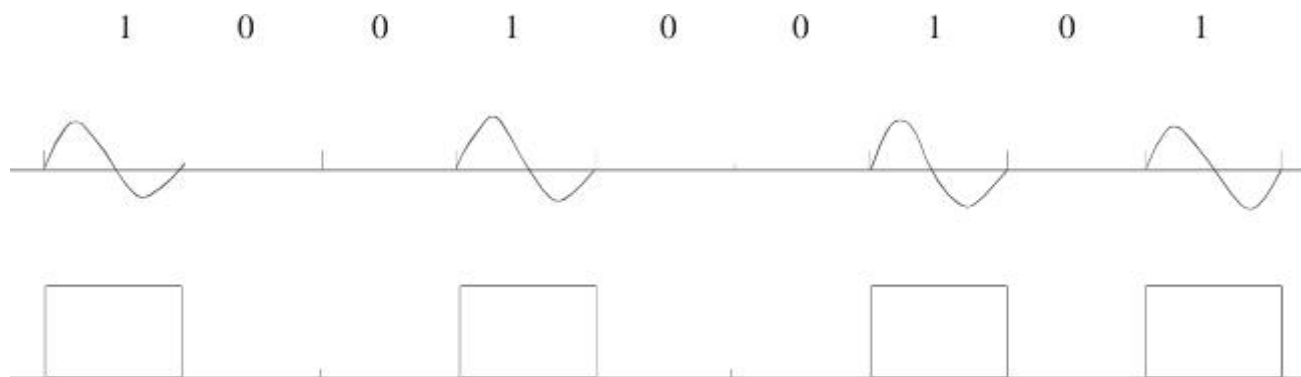
- 调制信号是二进制数字信号时，称为二进制数字调制。在二进制数字调制中，载波的幅度、频率和相位只有两种变化状态。相应的调制方式有二进制振幅键控（**2ASK**, **Amplitude Shift Keying**），二进制频移键控（**2FSK**, **Frequency Shift Keying**），二进制相移键控（**2PSK**, **Phase Shift Keying**）。

ASK调制解调结构图

ASK调制电路结构如图 (a)，解调结构如图 (b)，这种调制方式最大的特点是结构简单易于实现。



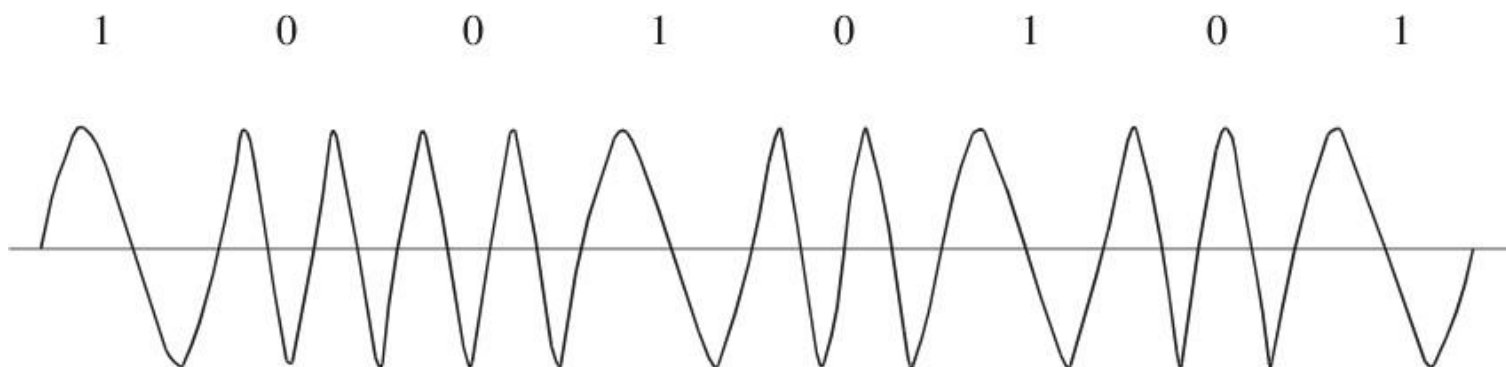
ASK调制解调波形图



图中用载波有幅度表示1，用载波没有幅度表示0，这种方式又称为OOK（On-Off Keying）。

4 调制解调方式

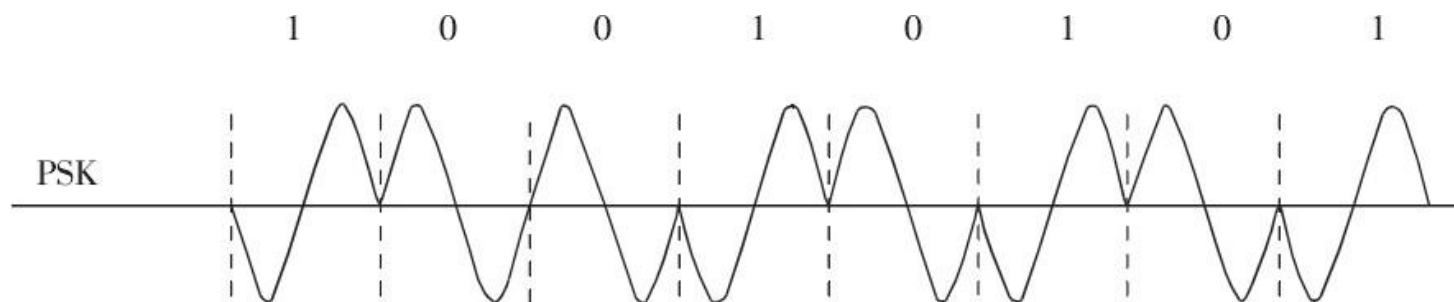
- **FSK**调制是使用两个频点携带信息的技术。



图中用频率慢的载波表示1，频率快的载波表示0。

4 调制解调方式

- 在**2PSK**中，载波的相位随着调制信号**1**和**0**而改变。



图中用载波的 0° 相位表示**0**，用载波的 180° 相位表示**1**。

不同调制方式的复杂度

- 其他调制方式有**DPSK**、**QPSK**（四个相位表示**4**种状态）、**O-QPSK**、**GFSK**、**GMSK**等
- 蓝牙采用了**GFSK**调制技术，**GSM**（第二代移动通信系统）采用了**GMSK**调制技术。

相对复杂性	简单————→复杂												
调制方式	OOK	FSK	CP-FSK	DPSK	DQPSK	BPSK	QAM	OK-QPSK	MSK	CP-FSK	QPR	M-ary PSK	MQAM

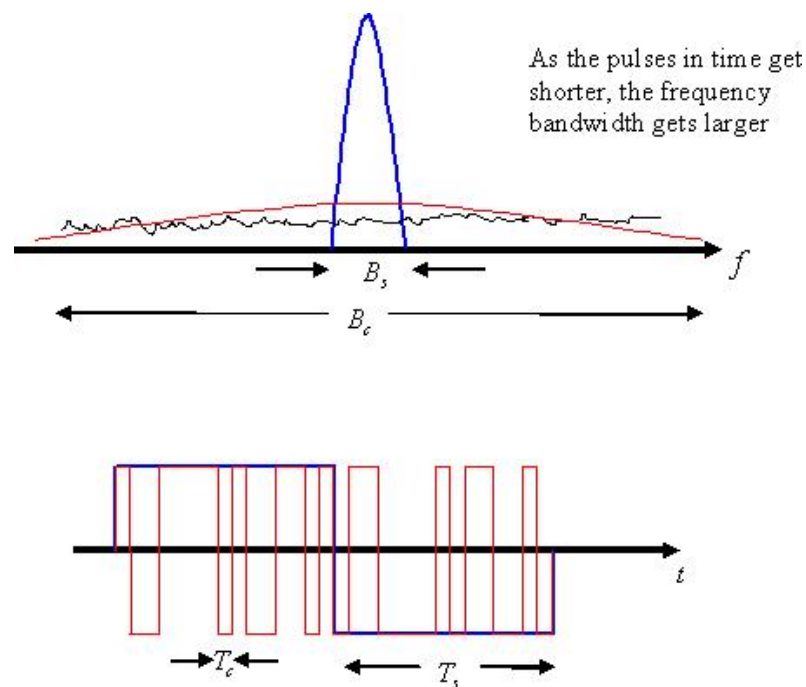
4 调制解调方式

○ 扩频通信

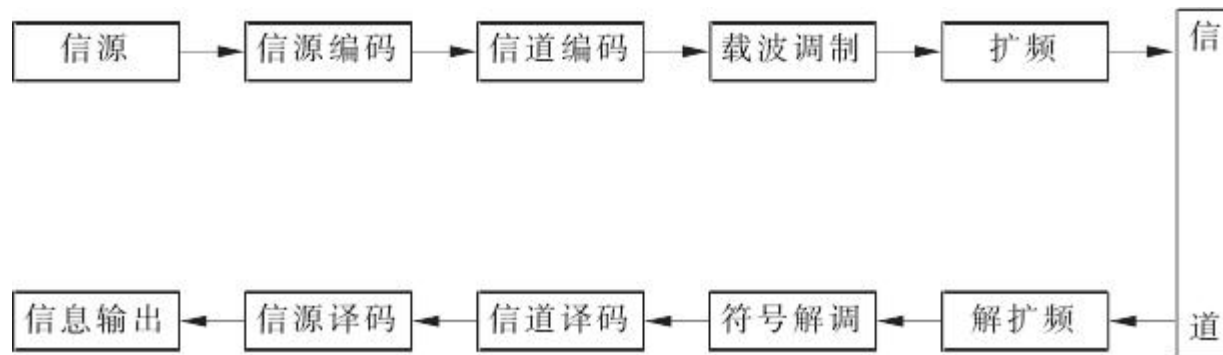
- 扩频通信是将待传送的信息数据被伪随机编码(扩频序列:**Spread Sequence**)扩频处理后,再将频谱扩展了的宽带信号在信道上进行传输;接收端则采用相同的编码序列进行解扩、解调及相关处理后,恢复出原始信息数据。
- 与常规的窄带通信方式相比,这种通信方式主要特点在于:
 - 一是信息的频谱扩展后形成宽带传输;
 - 二是经过相关处理后恢复成窄带信息数据。

扩频的基本原理

- 一个脉冲信号在时域越窄，在频域就越宽。
- 窄带信号容易被同频段的其它信号所干扰，而且很容易被截获。
- 宽带信号接近于噪声信号，很难在一堆噪声中被发现，因为没有峰值波形，保密性很好。



典型的扩频收发机结构图



4 调制解调方式

○ 扩频通信具有如下的优点：

- 抗多径干扰
- 抗噪声
- 保密性强
- 可多址复用
- 易于高精度测量

香农公式

- 扩频通信的理论基础，来源于香农(**Shannon**)公式：

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

- 其中，**C**是信道容量;**B**是信号频带宽度;**S**是信号功率;**N**是噪声功率。
- 香农公式表明，在给定的传输速率**C**不变的条件下，频带宽度**B**和信噪比**S/N**是可以互换的。即可通过增加频带宽度的方法，在较低的信噪比**S/N**下传输信息。
- 扩展频谱换取信噪比要求的降低，正是扩频通信的重要特点，并由此为扩频通信的应用奠定了理论基础。

Claude Shannon

- **信息论创始人：**1948年发表的论文《通信中的数学理论》诞生了信息论。
- **数字通信之父：**通信理论的奠基人。
- **数字计算机和数字电路的奠基人之一：**1937年在MIT的硕士论文证明了布尔代数可以构建和解析所有的逻辑和数学关系（当时只有21岁！），被称为20世纪最重要的一篇硕士论文。
- 一生在Bell实验室和MIT中的研究中度过。



4 调制解调方式

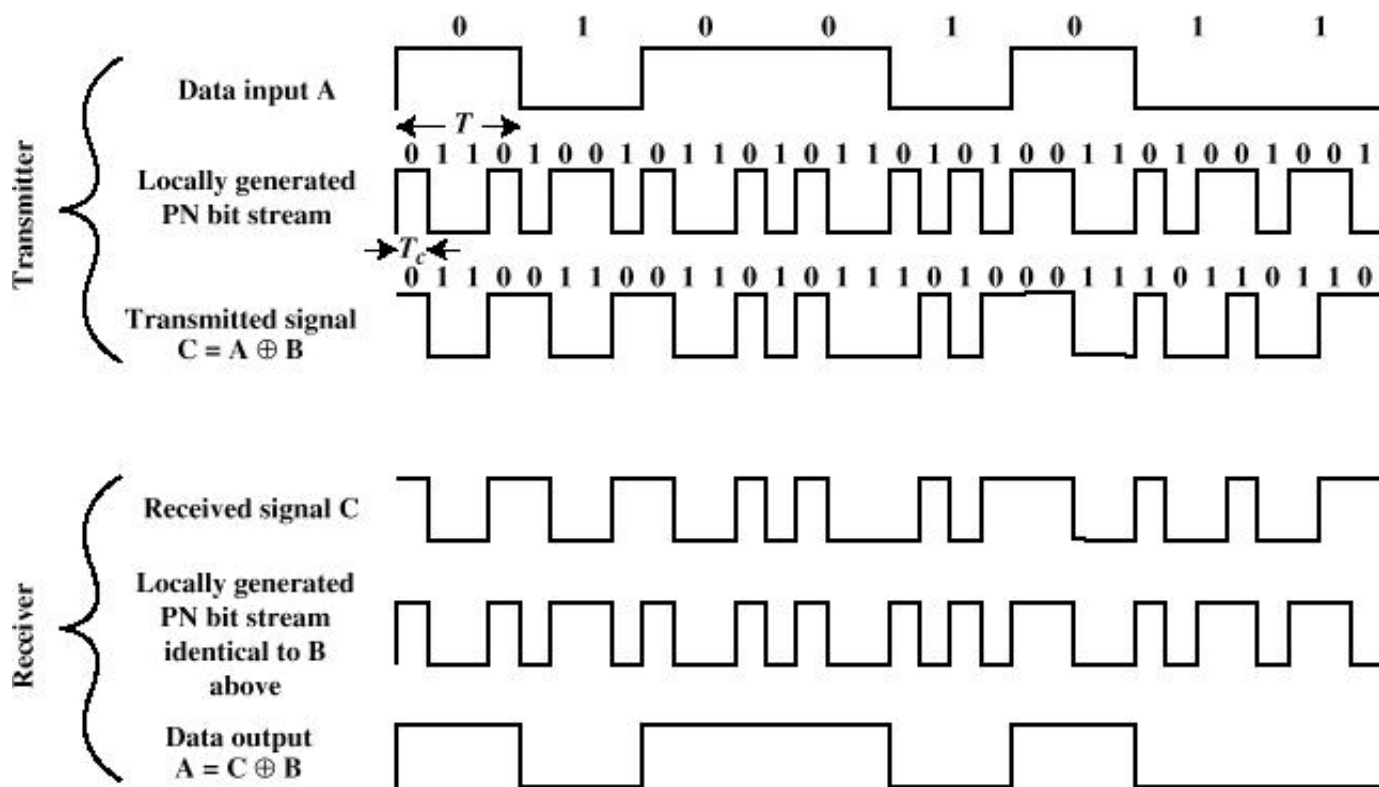
- 按照扩展频谱的方式不同，现有的扩频通信系统分为：
 - 直接序列扩频(**DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum**)工作方式，简称直扩(**DS**)方式；
 - 跳变频率(**Frequency Hopping**)工作方式，简称跳频(**FH**)方式；
 - 跳变时间(**Time Hopping**)工作方式，简称跳时(**TH**)方式；
 - 混合方式，即在几种基本的扩频方式的基础上组合起来，构成各种混合方式，如**DS/FH**、**DS/TH**、**DS/FH/TH**等。

4 调制解调方式

○ 直序扩频

- 直接序列扩频(**DSSS**) ,通常是直接用具有高码率的扩频码序列在发端与调制信号相乘实现信号的频谱扩展。而在收端,用相同的扩频码序列去进行相关处理解扩,把展宽的扩频信号还原成原始的信息。

直序扩频例子



进一步理解**CDMA**（码分多址），通过不同的编码实现同时同频多用户传输。

讨论：**CDMA**有哪些缺点？

下列调制方式中，通过控制载波相位变化来实现信息传输的是

- ☐ A 2ASK
- ☐ B 2FSK
- ☒ C BPSK
- ☐ D FM

提交

下列调制方式中，复杂度最低的是

- ☒ A OOK
- ☐ B FSK
- ☐ C DPSK
- ☐ D QAM

提交

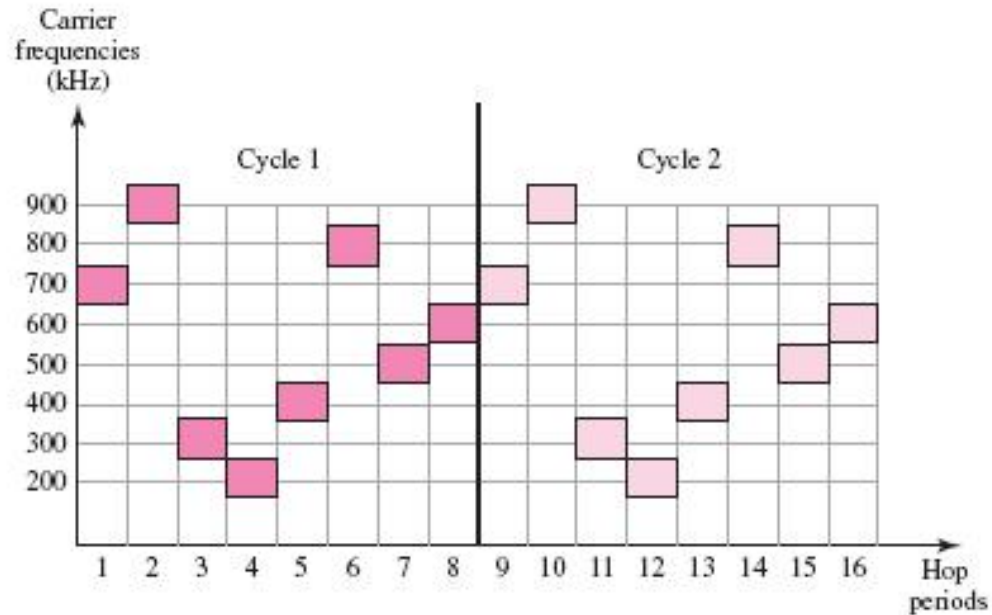
4 调制解调方式

○ 跳频扩频

- 跳频扩频方式是使伪随机序列控制被数据调制的载波中心频率在一组频率中随机地跳动。根据跳频速率的快慢，可把跳频系统分为快跳频和慢跳频。根据相位关系又把跳频分为相干与非相干跳频系统。

跳频扩频例子

Figure 6.30 *FHSS cycles*



5 无线传感器网络物理层设计

- 物理层设计考虑
- 物理层主要负责调制解调、发送与接收等功能，是决定 **WSN** 的节点体积、成本以及能耗的关键环节。
- 物理层的设计目标是以尽可能少的能量消耗获得较大的链路容量。
- 物理层需要考虑如下内容：
 - 编码调制技术
 - 通信速率
 - 通信频段

5 无线传感器网络物理层设计

- 目前，无线传感器网络还没有定义物理层标准，很多研究机构设计的无线传感器网络节点物理层基本上都是在现有的器件工艺水平上开展的。
- 比如当前使用最多的**Mica2 mote**节点，主要是采用了分离的器件实现节点的物理层设计，可以选择**433 MHz**或**868 MHz**两个频段，调制方式采用了简单的**2FSK/ASK**方式。
- 在低速无线个人局域网(**LR-PAN**) **802. 15. 4**标准中定义的物理层为：**868 MHz, 915MHz, 2. 4 GHz**三个载波频段收发数据。

5 无线传感器网络物理层设计

- 总的来看，针对无线传感器网络的特点，现有的物理层设计基本上都是采用结构简单的**OOK (ASK)**、**FSK**以及**MSK**调制方式，在频段的选择上也都集中在**433~ 464 MHz**、**902~928 MHz**以及**2.4~2.5 GHz ISM**波段。
- 然而在无线传感器网络物理层设计中，当前仍面临着以下两个方面的挑战。
 - 1. 成本
 - 低成本(**low cost < \$ 1**)是无线传感器网络节点的基本要求。只有低成本，才能将节点大量地布置在目标区域内，表现出无线传感器网络的各种优点。物理层的设计直接影响到整个网络的硬件成本。节点最大限度的集成化设计、减少分离元件是降低成本的主要手段。

5 无线传感器网络物理层设计

- **2.功耗**
- 低功耗是无线传感器网络物理层设计的另一重要指标。要使得无线传感器网络节点寿命达**2~7**年(电池供电)，这就要求节点的平均能耗在几个 **μW** ，虽然可以采用**duty-cycle**的工作机制来降低平均功耗，但当前商业化通信芯片功耗仍在几个**mW**，这对于能源受限的无线传感器网络节点来说仍是难以接受的。由于当前射频前端辐射出去的能量远远小于收发机电路自身的能量消耗，所以如何有效地降低收发机电路自身的功耗是当前无线传感网络物理层设计需要解决的主要问题之一。

本章总结

- 本章首先介绍了当前频率分配情况，尤其对**ISM**波段的频率分配情况进行了较详细的介绍。由于无线通信中最宝贵的资源之一就是频谱，所以对于无线传感器网络，应该针对其实际应用场景来选择合适的频段。接着对通信信道的特性与分析方法进行了综述。当节点间距离较近且无障碍物时，可以基于自由空间信道的分析方法进行简单估算；当环境较复杂时则需基于多径传播理论进行分析。由于调制技术直接决定着收发机结构，本章还对单载波窄带调制、扩频调制技术进行了介绍，并对各自的性能与复杂度进行了比较。

作业（第1章、第4章、第5章）

○ P40 **1.6**

○ P136 **4.3**

○ P163 **5.12 5.13 5.17**

说明1： 5.13：“灵敏度最高位”应为“灵敏度最高为”，灵敏度为接收机能正确收到信号的功率，该题目中没有提到收发天线增益，默认为**1**（即不考虑天线增益影响）

说明2：在纸上手写完成，然后拍照，于**10月9号18:00**前通过在线开放平台本课程的作业上传功能提交照片版。

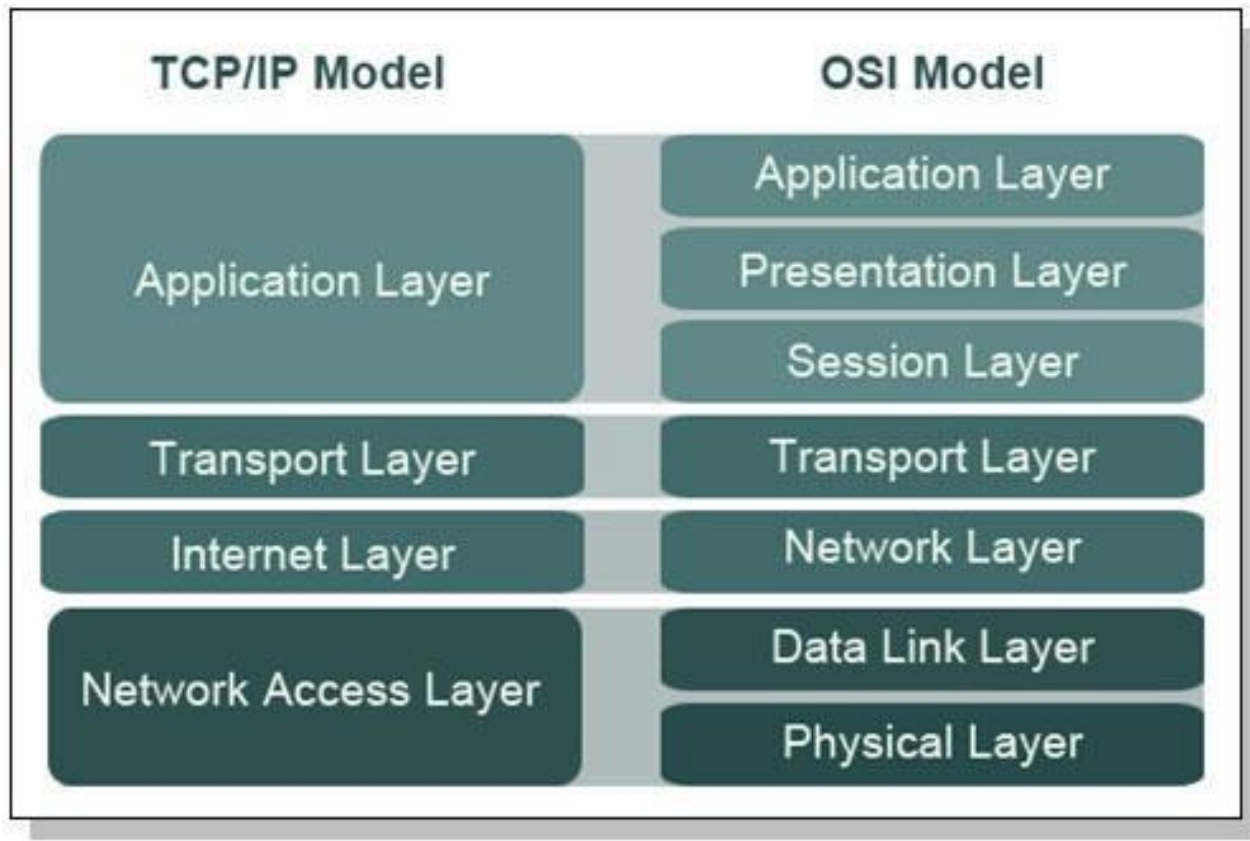


回顾计算机网络知识

两大网络体系结构

- 计算机网络有两大体系结构
 - OSI参考模型
 - TCP/IP模型
- 每个体系结构都采用分层模型
 - 每一层都负责各自的事务，层之间通过接口相连接。
 - 发送数据包时，从上层走到下层；接收数据包时，从下层转到上层。

TCP/IP和OSI模型



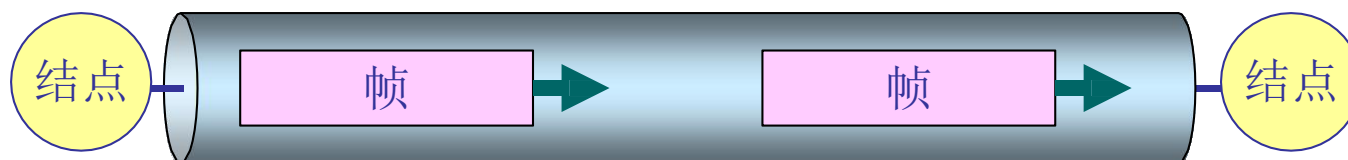
计算机网络协议架构中，第三层通常指的是

- ☐ A 物理层
- ☐ B 数据链路层
- ☒ C 网络层
- ☐ D 传输层

提交

数据链路层

- 功能：实现相邻两个节点之间以“帧”为单位的数据传输。



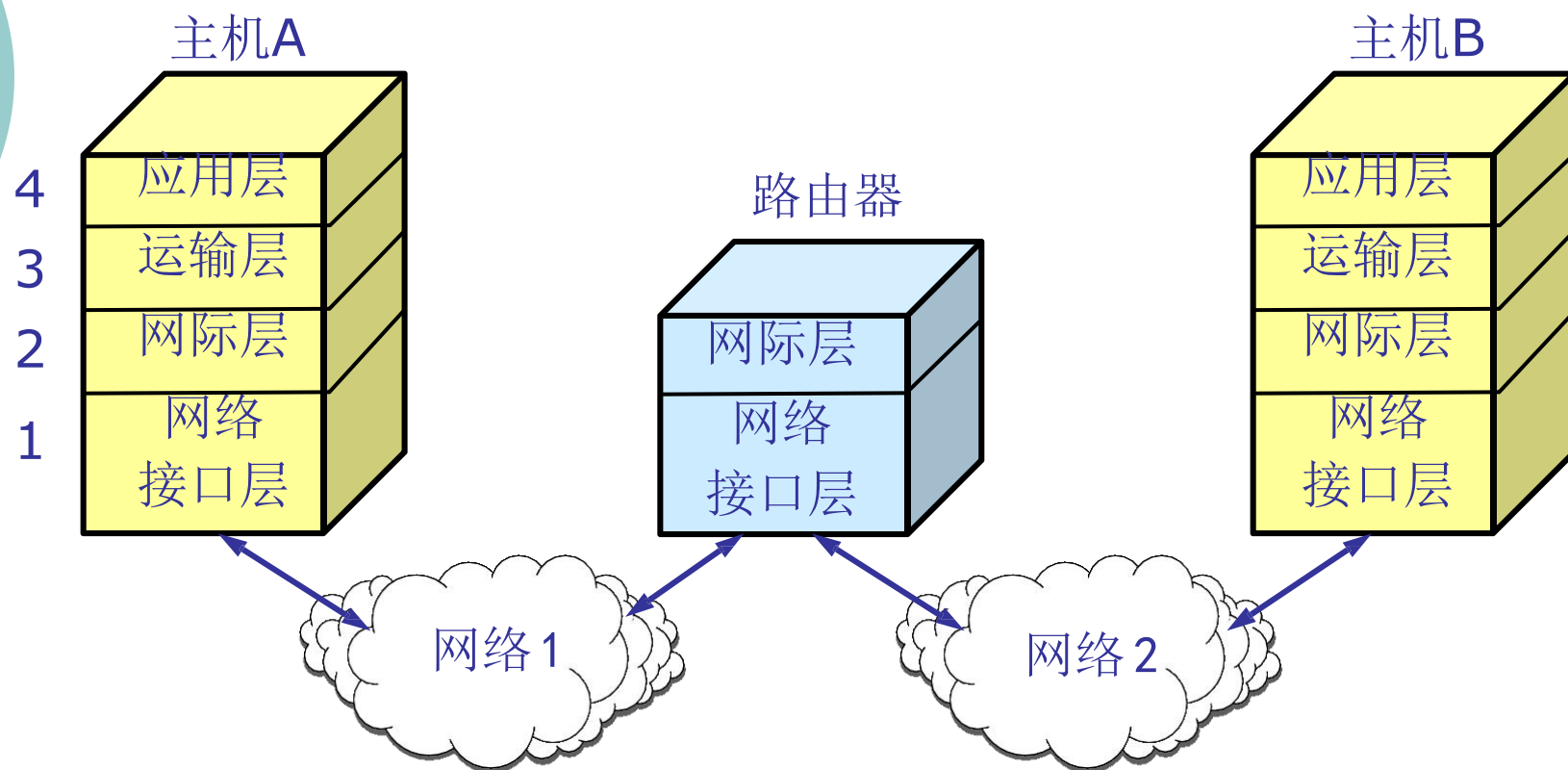
数据链路层的两个子层

- 为了使数据链路层能更好地适应多种局域网标准，802 委员会就将局域网的数据链路层拆成两个子层：
 - 逻辑链路控制 LLC (Logical Link Control)子层
 - 媒体接入控制 MAC (Medium Access Control)子层
- 与接入到传输媒体有关的内容都放在 **MAC**子层，而 **LLC** 子层则与传输媒体无关，不管采用何种协议的局域网对 **LLC** 子层来说都是透明的

一般不考虑 LLC 子层

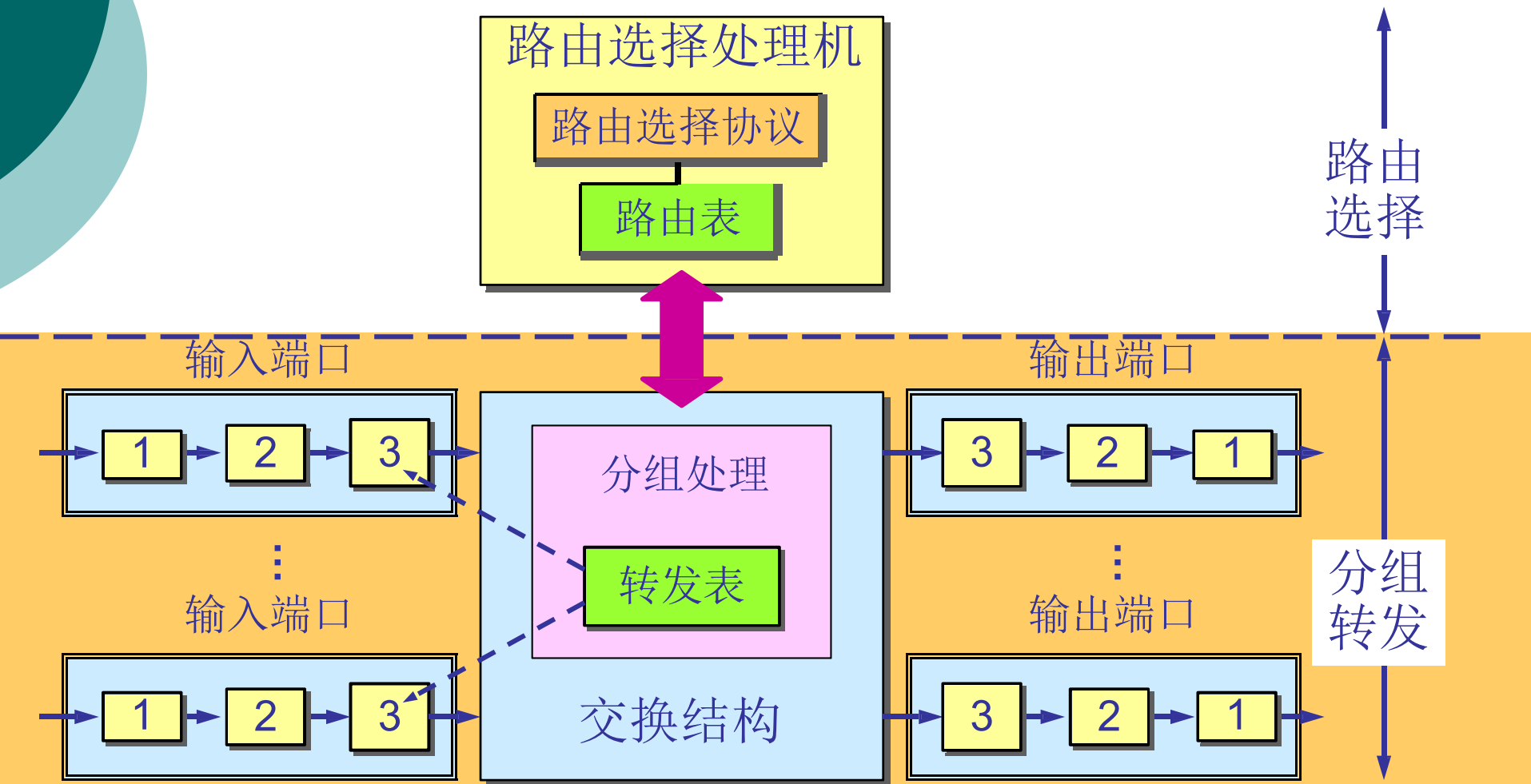
- 由于 TCP/IP 体系经常使用的局域网是 DIX Ethernet V2 而不是 802.3 标准中的几种局域网，因此现在 802 委员会制定的逻辑链路控制子层 LLC（即 802.2 标准）的作用已经不大了。
- 很多厂商生产的适配器上就仅装有 MAC 协议而没有 LLC 协议。

网络层的功能



路由器在转发分组时最高只用到网络层
而没有使用运输层和应用层。

典型的路由器的结构



路由协议

- 有线互联网中已经具有了大量性能优良的路由协议。
 - OSPF
 - BGP
 -
- 无线传感器网络中的路由协议仍在大量研究中。

对网络的全局理解

- 假如一个重邮的学生与他在北邮的同学聊QQ，经历哪些网络过程呢？
 - 应用层：QQ软件
 - 如何区分收发的是哪个好友的？（QQ软件自身负责）
 - 如何区分是哪个QQ发出的？（操作系统负责，不同QQ号进程号不同）
 - 传输层：UDP协议
 - 如何区分是哪个进程（软件）在使用网络收发数据？（端口号）
 - 网络层：IP
 - 如何区分是Internet里的哪台机器？要到达哪里子网？（IP地址）
 - 数据链路层：以太网帧
 - 子网内部如何知道哪个IP对应的是哪台主机？（网卡MAC地址）
 - 物理层：双绞线
 - 主干网用光纤传输

CERNET2 全IPV6网





Thank you !