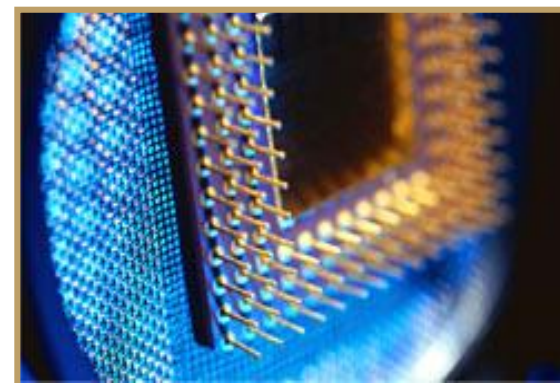
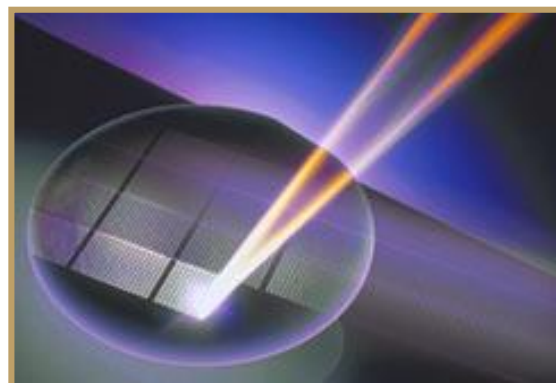
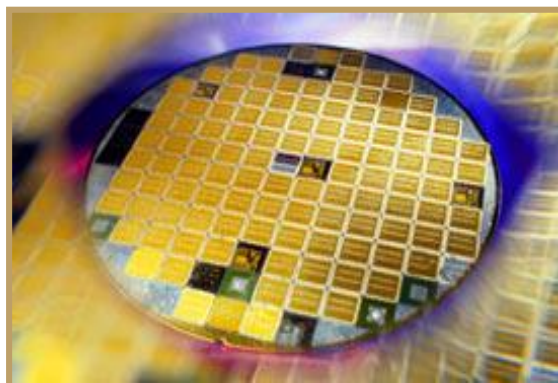




《VLSI数字通信原理与设计》课程

主讲人：贺光辉

第十二讲：衰落信道



无线信号与人们的生活密切相关



无线接收信号幅度变化



为什么声音
时大时小？



高速移动引起无线信号失真



为什么高速移动
会引起无线信号
失真?





目录

01 信道基本概念

02 电磁波的传播

03 无线信道的多径效应

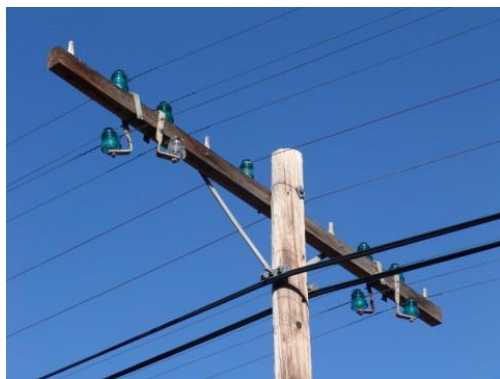
04 无线信道的多普勒效应

05 总结

01.信道基本概念——信道的分类

根据传输媒质分类：

- **有线信道：明线、电缆、光纤**



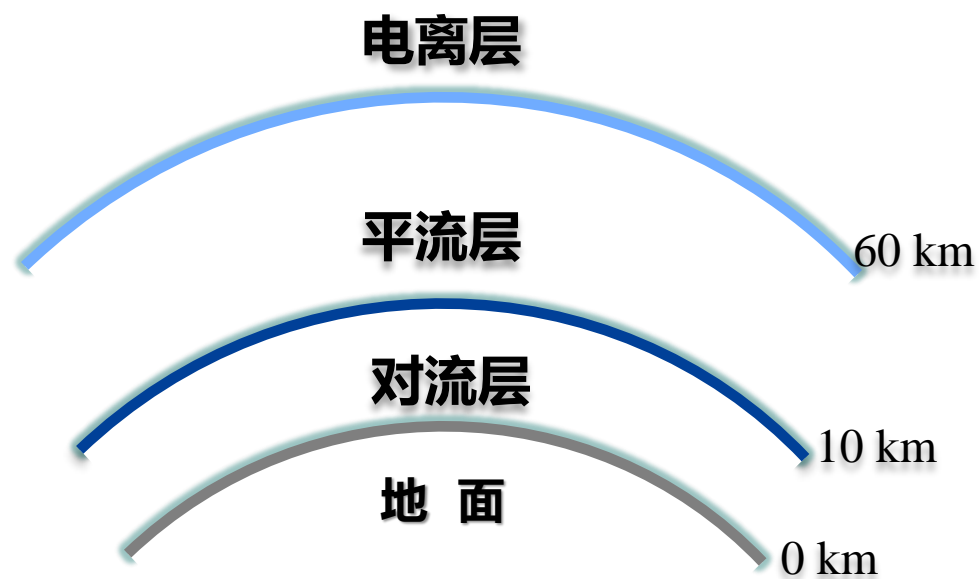
- **无线信道：自由空间或大气层**

无线信道举例：

地波传播、短波电离层反射、
超短波或微波视距中继、卫星
中继、散射及移动无线电信道

01.信道基本概念——无线信道

地球大气层的结构



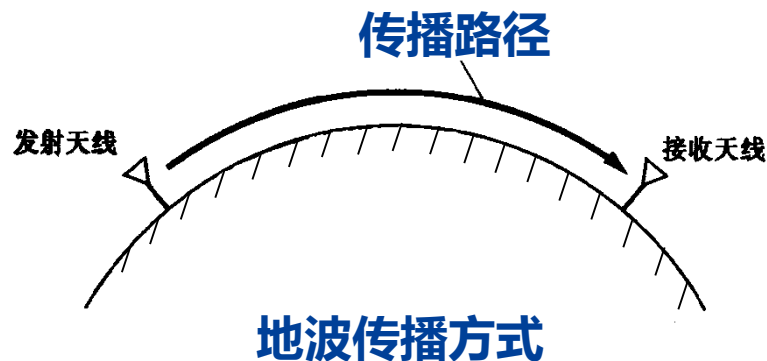
对流层：约 0 ~ 10 km
平流层：约 10 ~ 60 km
电离层：约 60 ~ 400 km

01.信道基本概念——无线信道

电磁波的传播方式:

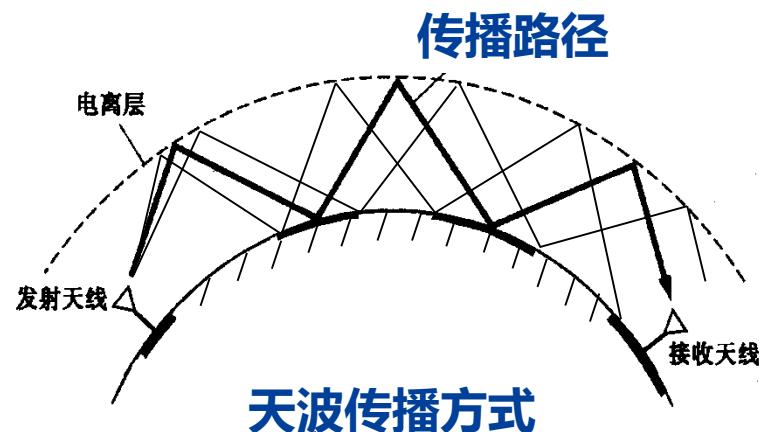
● 地波 (ground-wave)

- 频率: $< 2 \text{ MHz}$
- 特性: 有绕射能力
- 特性: 有绕射能力
- 用于: AM广播



● 天波 (sky-wave)

- 频率: $2 \sim 30 \text{ MHz}$
- 特性: 被电离层反射
- 距离: $< 4000 \text{ km}$ (一跳)
- 用于: 远程、短波通信



01.信道基本概念——无线信道

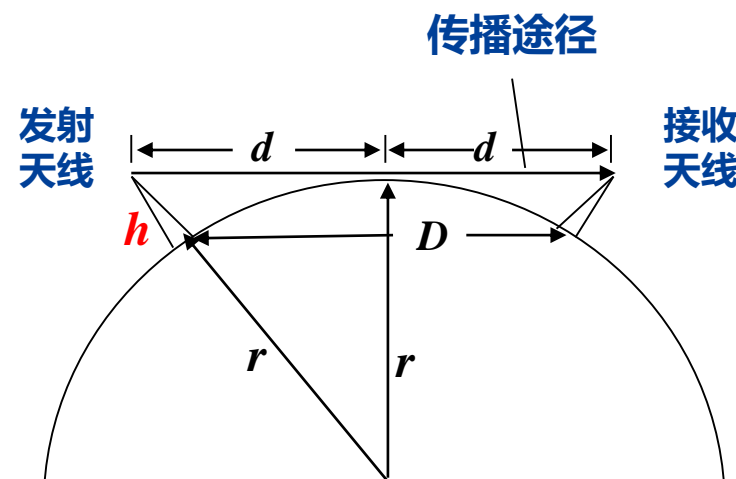
电磁波的传播方式:

- 视线传播 (line-of-sight)

- 频率: $> 30 \text{ MHz}$
- 特性: 直线传播、穿透电离层
- 用途: 卫星和外太空通信、超短波及微波通信
- 与天线高度有关

- 例如: 设收发天线的架设高度均为40 m, 则最远通信距离为:

$$D = 44.7 \text{ km}$$



视线传播方式

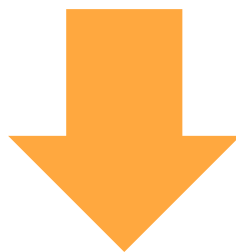
$$h = \frac{D^2}{8r} \approx \frac{D^2}{50} (m)$$

□ D 为收发天线间距离(km)

01.信道基本概念——无线信道



增大视线传播距离的其他途径？

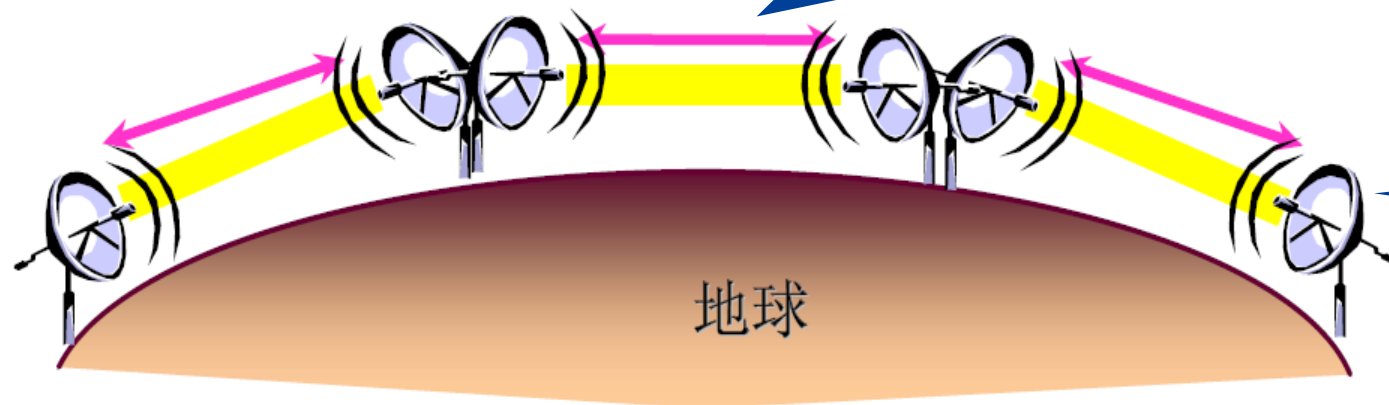


- **微波中继（微波接力）**
- **卫星中继（静止卫星、移动卫星）**
- **平流层通信**

01.信道基本概念——无线信道

微波中继:

两点间传输距离: 30km~50km



远距离通信时, 需建立多个中继站

地面站之间的直视线路

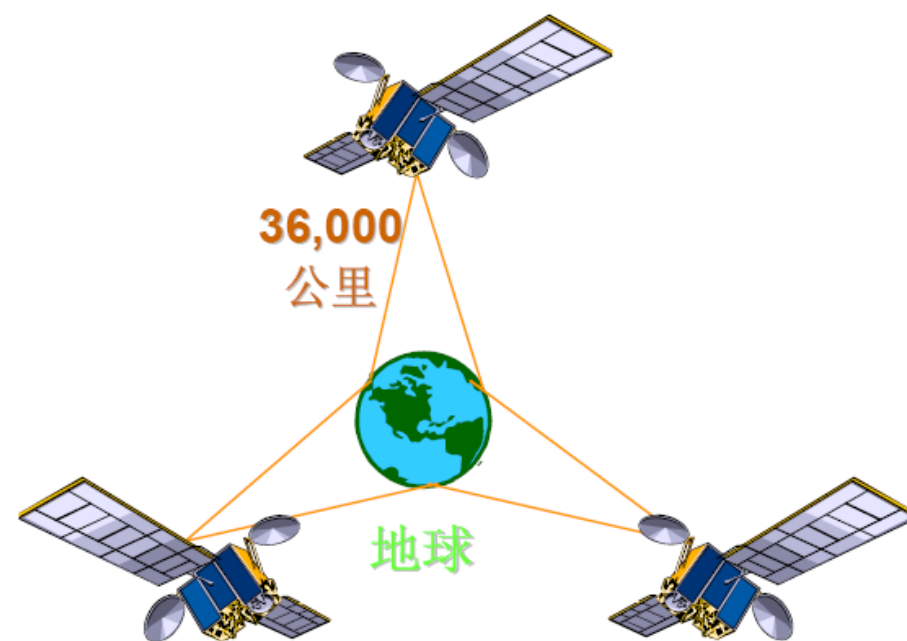
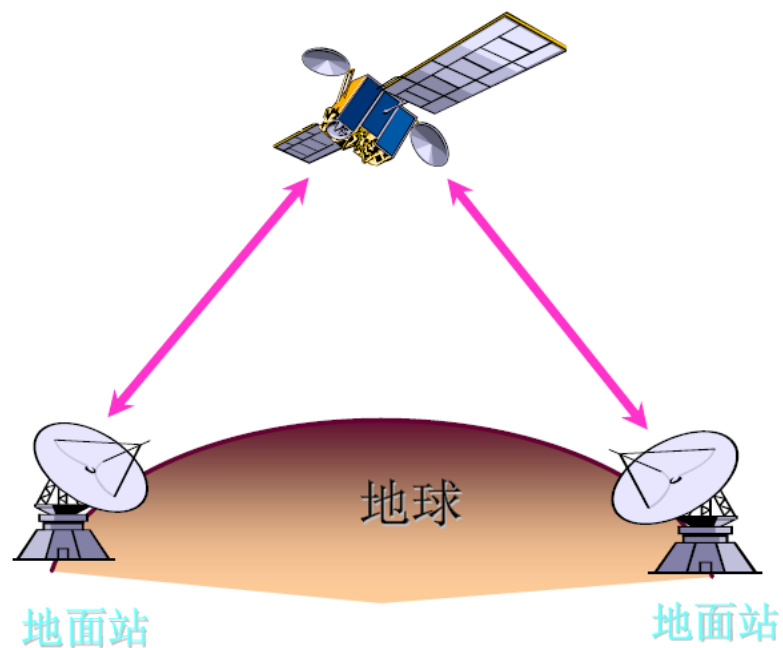
微波传送塔

优点: 容量大、投资少、维护方便、传输质量稳定

应用: 远距离传输话音和电视信号

01.信道基本概念——无线信道

■ 卫星中继:

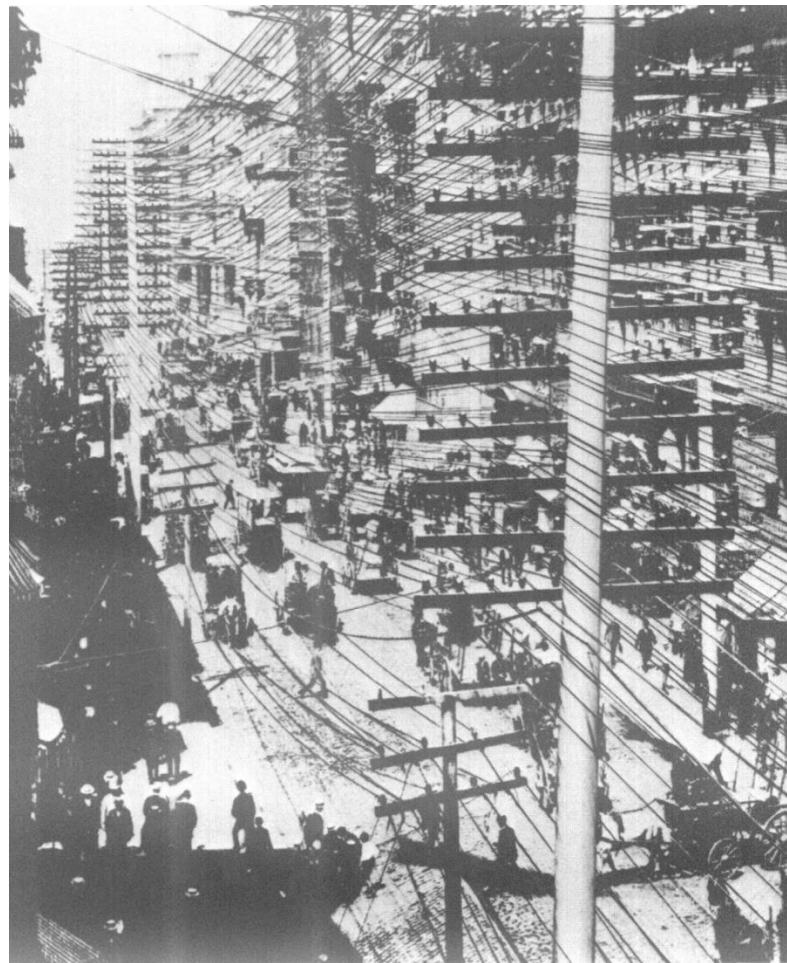


优点：通信容量大、传输质量稳定、传输距离远、覆盖范围广

缺点：传输延时大、信号衰减大、造价高

01.信道基本概念——有线信道

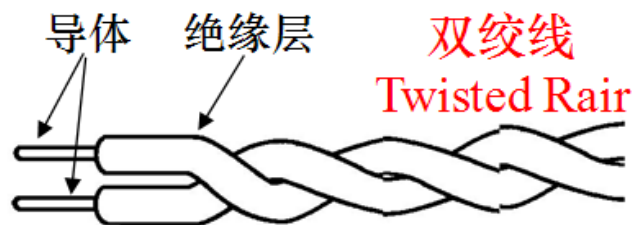
■ 明线:



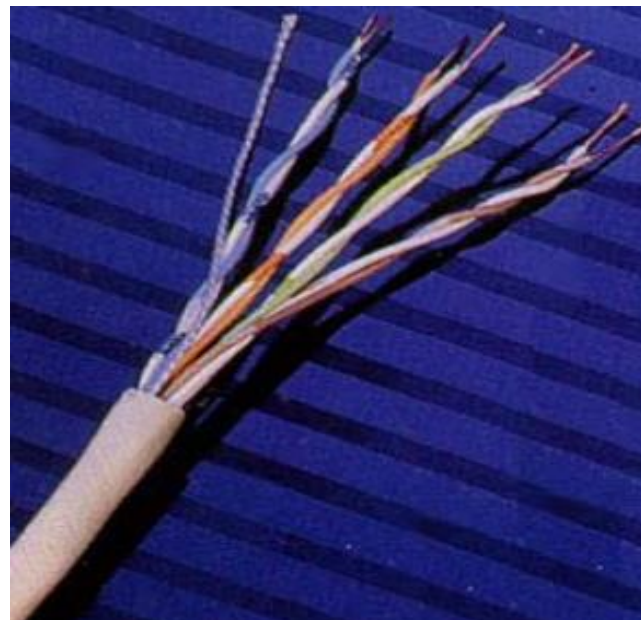
1880年纽约街貌

01.信道基本概念——有线信道

■ 对称电缆：



- **特点：**每对呈扭绞状，以减小各线对的互相干扰
- **缺点：**传输衰减大/距离短，邻道间有串话干扰
- **应用：**电话线路、局域网及综合布线工程中的传输介质



非屏蔽双绞线(UTP)
(便宜、易弯曲、易安装)

屏蔽双绞线(STP)
(可减少噪声干扰)

01.信道基本概念——有线信道

同轴电缆：

- **组成：**由同轴的两个导体组成

- 内芯：金属导线

- 外导体：金属编织网

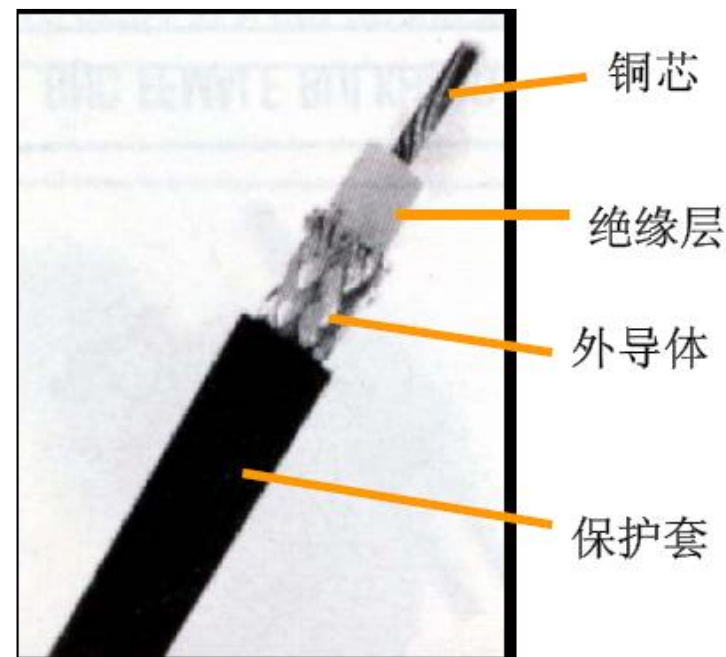
- **优点（相比双绞线）：**

- 抗电磁干扰能力强

- 带宽更宽、速率更高

- **缺点：成本较高**

- ⇒ 解决方式：用光缆代替（干线）



01.信道基本概念——有线信道

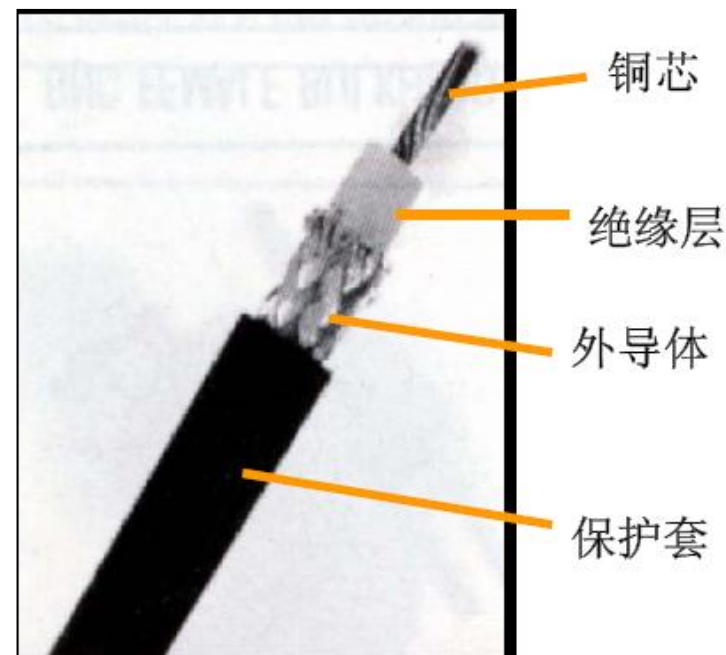
同轴电缆：

- 基带同轴电缆：

- 50Ω ，多用于数字基带传输
- 速率可达 10Mb/s
- 传输距离 $<$ 几千米

- 宽带（射频）同轴电缆：

- 抗电磁干扰能力强 75Ω ，用于传输模拟信号
- 多用于有线电视（CATV）系统
- 传输距离可达几十千米



01.信道基本概念——有线信道

■ 光纤:

- 结构:

- 纤芯

- 包层

- 按折射率分类:

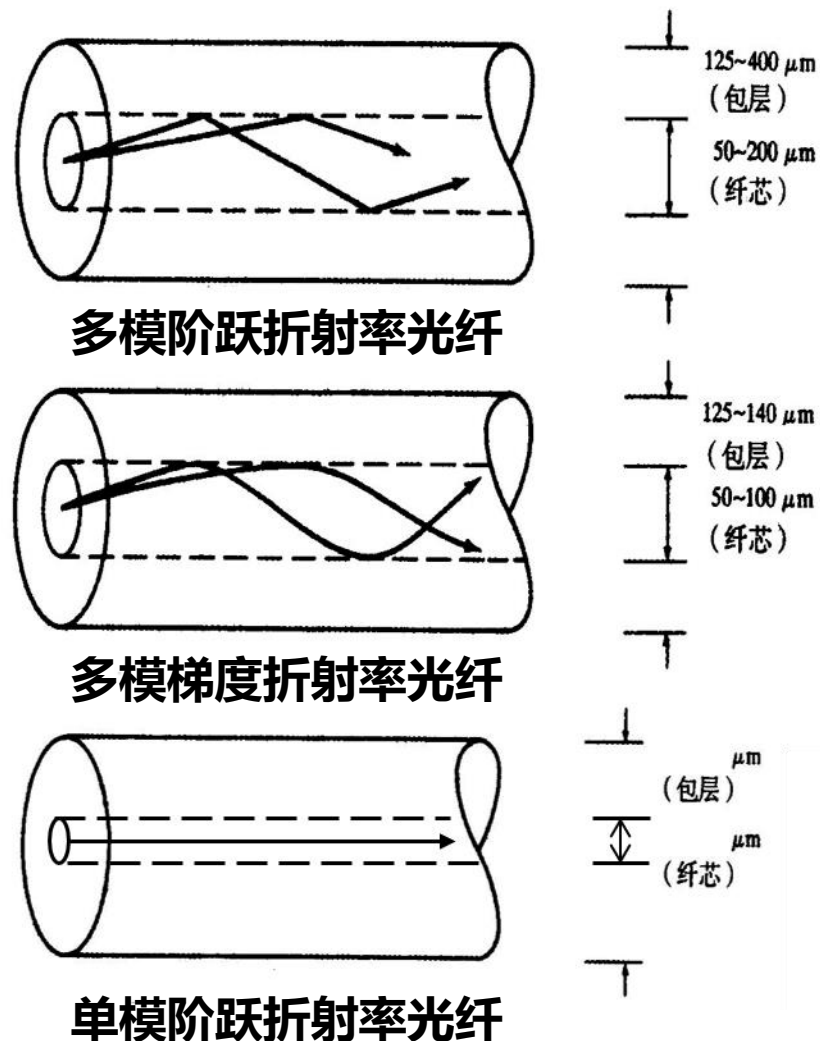
- 阶跃型

- 梯度型

- 按模式分类:

- 多模光纤

- 单模光纤



01.信道基本概念——有线信道

■ 光纤:

- 优点:

- 传输带宽宽、通信容量大
- 传输衰减小 ($<0.2\text{dB/km}$) , 无中继传输距离远 (几百公里)

- 缺点:

- 易碎、接口昂贵、安装和维护需要专门技能

- 应用:

- 长途电话网、有线电视网等的主干线路中

01.信道基本概念——信道噪声

何谓噪声：

- 信道中存在的不需要的电信号
- 它独立与信号始终存在，所以又称**加性**干扰
- 它使信号失真，发生错码，限制传输速率

噪声类型：

按噪声来源

- 人为噪声
- 自然噪声
- 内部噪声
(如**热噪声**)

按噪声性质

- 脉冲噪声
- 窄带/单频噪声
- 起伏噪声
(**热噪声**、散弹噪声和宇宙噪声)

01.信道基本概念——信道噪声

■ 热噪声：

- 来自一切电阻性元器件中电子的热运动
- 均匀分布在 $0 \sim 10^{12}$ Hz频率范围内
- 性质：高斯白噪声

■ 热噪声电压有效值： $V = \sqrt{4kTRB}$ (V)

- 式中：

□ $k = 1.38 \times 10^{-23}$ (J/K) - 波兹曼常数

□ T - 热力学温度 (°K)

□ R - 阻值 (Ω)

□ B - 带宽 (Hz)

01.信道基本概念——信道特性对信号传输的影响

■ 恒参信道的影响：

- 恒参信道举例：各种有线信道、卫星信道...
- 频率失真：振幅 ~ 频率特性不良引起的
 - 频率失真 \Rightarrow 波形畸变 \Rightarrow 码间串扰
 - 解决办法：线性网络补偿
- 相位失真：相位 ~ 频率特性不良引起的
 - 对语音影响不大，对数字信号影响大
 - 解决办法：同上
- 非线性失真，频率偏移、相位抖动...

01.信道基本概念——信道特性对信号传输的影响

变参信道的影响：

- 变参信道：又称时变信道，信道参数随时间而变
- 变参信道举例：天波、地波、视距传播、散射传播...
- 变参信道的特性：
 - 衰减随时间变化
 - 衰减随时间变化
 - 多径效应：信号经过几条路径到达接收端，而且每条路径的长度（时延）和衰减都随时间而变，即存在多径传播现象。



目录

01 信道基本概念

02 电磁波的传播

03 无线信道的多径效应

04 无线信道的多普勒效应

05 总结

02.电磁波的传播——电磁波的频率

■ 电磁波的频率与波长的关系：

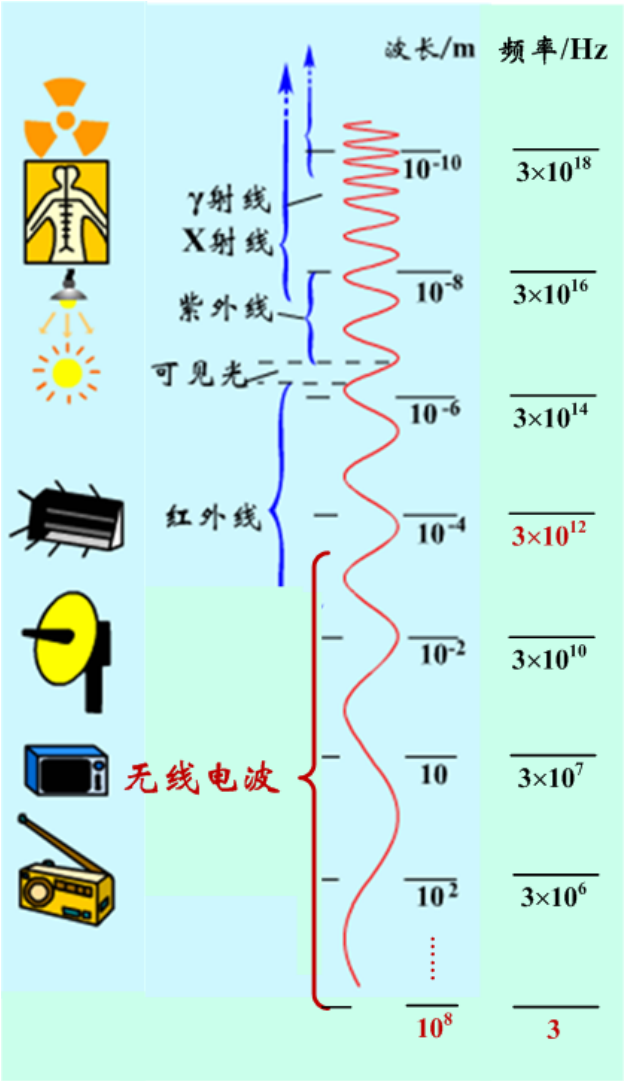
$$f = \frac{c}{\lambda}$$

其中 f 为电磁波的频率，单位为赫兹（Hz: Hertz）；

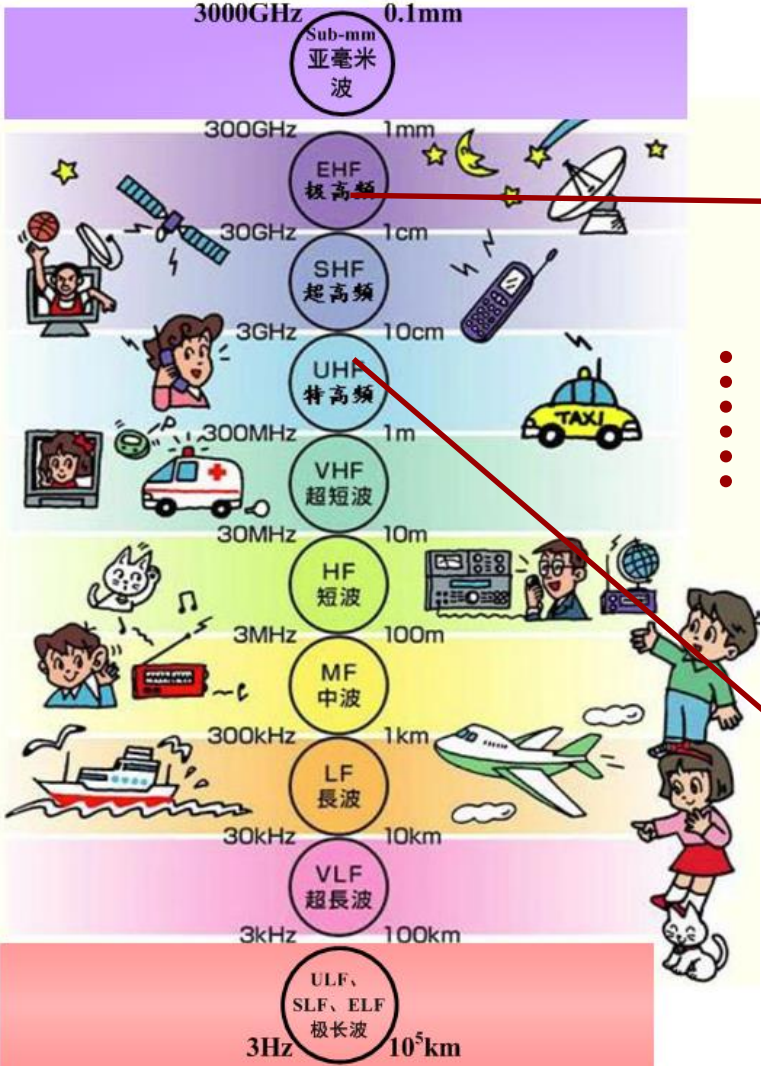
c 是电磁波的传播速度， $c = 3 \times 10^8$ 米/秒；

λ 是电磁波的波长，单位是米

02.电磁波的传播——无线电波频段划分



电磁波谱



无线电波频段

频率/GHz	
Ka	27~40
K	18~27
Ku	12~18
X	8~12
C	4~8
S	2~4
L	1~2

02.电磁波的传播——电波频段的划分

频段名称	频段范围(含上限)	频段名称	波长范围(含上限)
极低频(ELF: Extra Low Frequency)	3Hz~30Hz	极长波	100兆米 ^[1] ~10兆米
超低频(SLF: Super Low Frequency)	30Hz~300Hz	超长波	10兆米~1兆米
特低频(ULF: Ultra Low Frequency)	300Hz~3000Hz	特长波	100万米~10万米
甚低频(VLF: Very Low Frequency)	3KHz ~30KHz	甚长波	10万米~1万米
低 频(LF: Low Frequency)	30KHz~300KHz	长 波	10千米~1千米
中 频(MF: Middle Frequency)	300KHz~3000KHz	中 波	1000米~100米
高 频(HF: High Frequency)	3MHz~30MHz	短 波	100米~10米
甚高频(VHF: Very High Frequency)	30MHz~300MHz	米 波	10米~1米
特高频(UHF: Ultra High Frequency)	300MHz~3000MHz	分米波	10分米~1分米
超高频(:Super High FrequencySHF)	3GHz~30GHz	厘米波	10厘米~1厘米
极高频(EHF: Extra High Frequency)	30GHz~300GHz	毫米波	10毫米~1毫米
至高频	300GHz~3000GHz	丝米波	10丝米 ^[2] ~1丝米

[1] 1兆米等于10⁶米。

[2] 1毫米等于10丝米。

02.电磁波的传播——电波频段的划分

- 频率从300MHz至3000GHz范围内的电磁波，又叫做微波（Microwave）
- 微波的波长从1米至0.1毫米，它包括四个波段：分米波、厘米波、毫米波、亚毫米波(丝米波)。
- 微波还被划分成更细的频段，用拉丁字母代号来代表：

波段代号	标称波长(cm)	频率(GHz)	波长范围(cm)
L	22	1~2	30~15
S	10	2~4	15~7.5
C	5	4~8	7.5~3.75
X	3	8~12	3.75~2.5
Ku	2	12~18	2.5~1.67
K	1.25	18~27	1.67~1.11
Ka	0.80	27~40	1.11~0.75
U	0.60	40~60	0.75~0.5
V	0.40	60~80	0.5~0.375
W	0.30	80~100	0.375~0.3

02.电磁波的传播——传播机制

■ 电磁波的基本传播机制主要有五种方式：

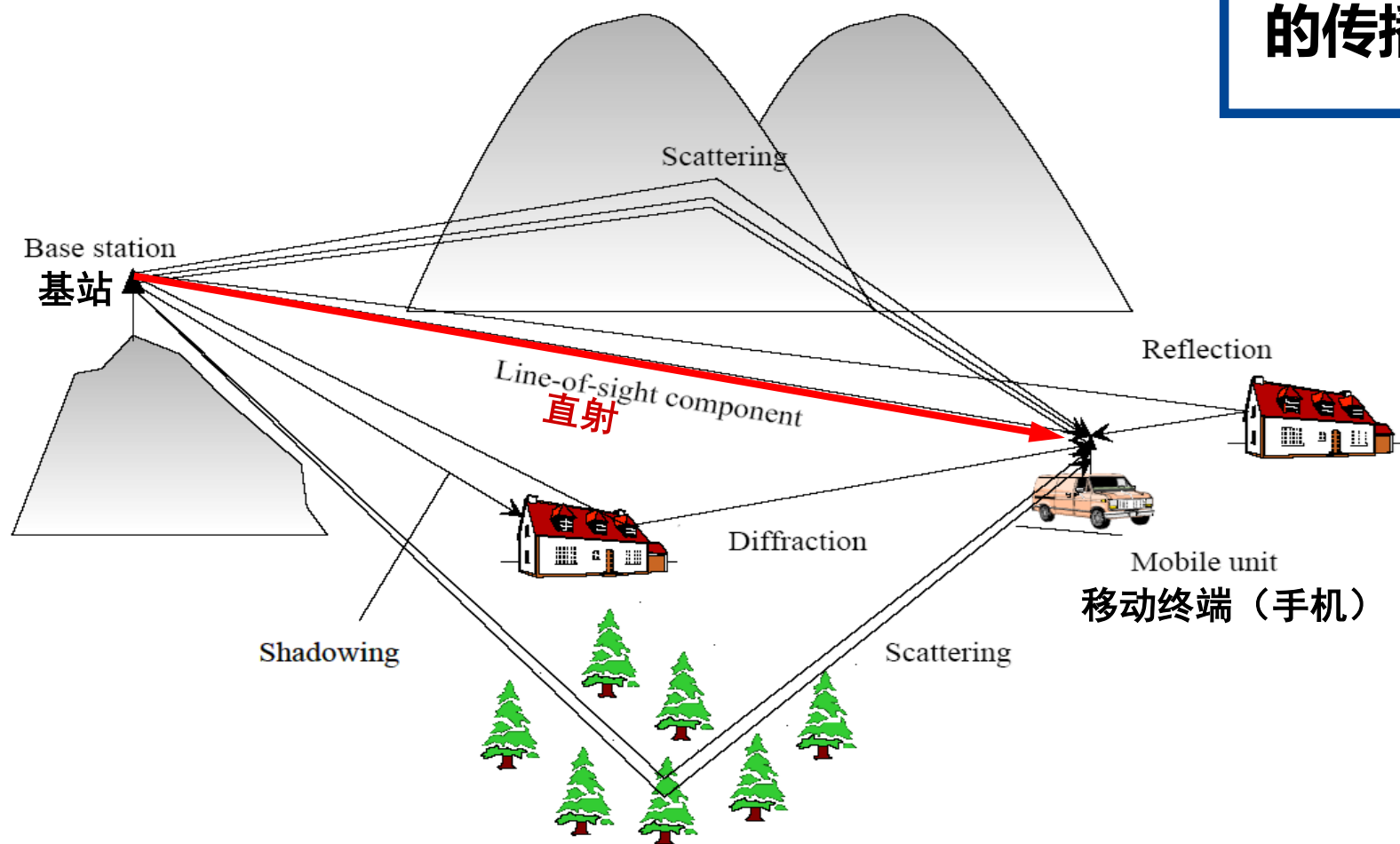


02.电磁波的传播——传播机制

无线信道中客观存在的多径信号：

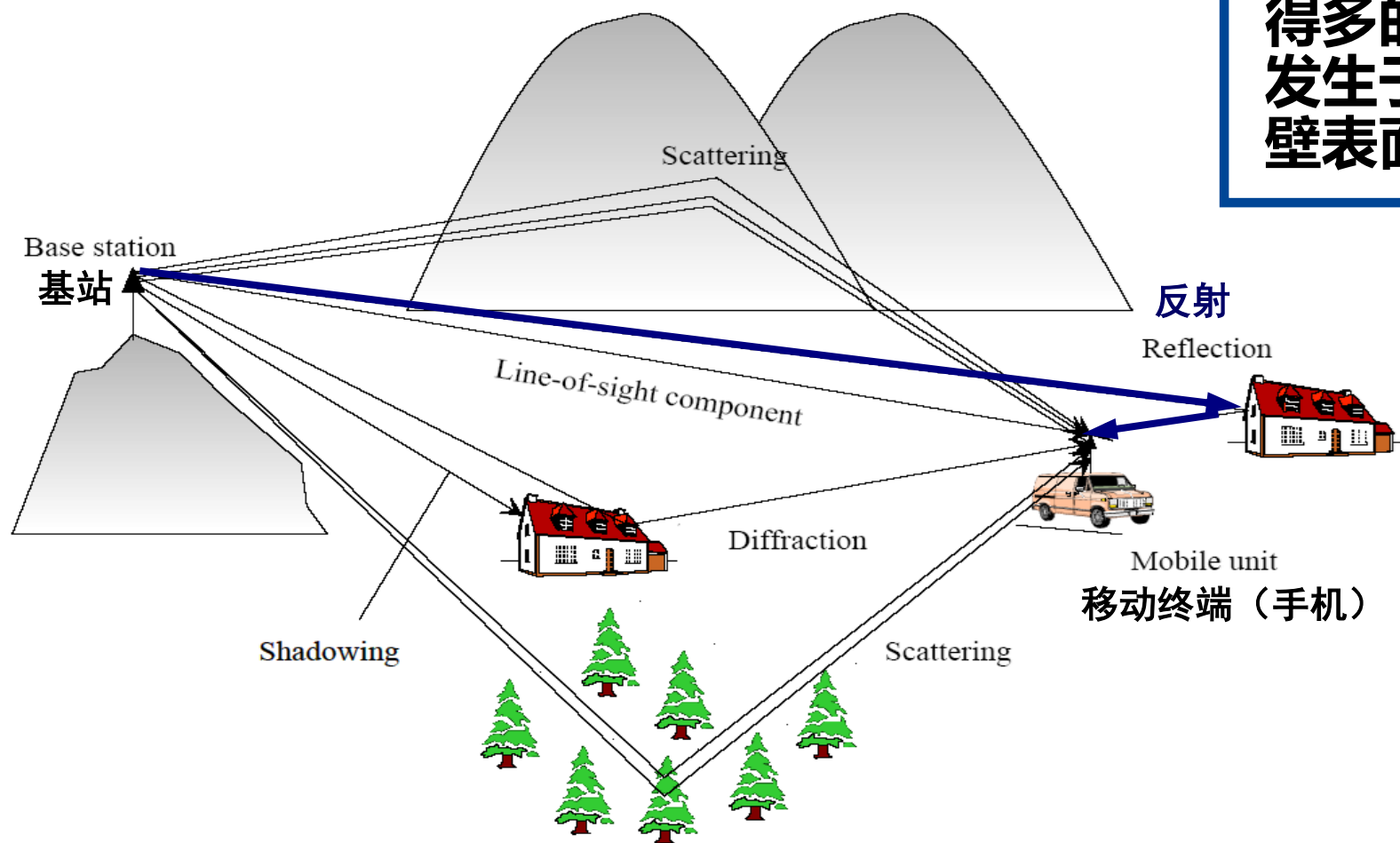
直射波

直射：是指视距范围内无遮挡的传播。



02.电磁波的传播——传播机制

无线信道中客观存在的多径信号:

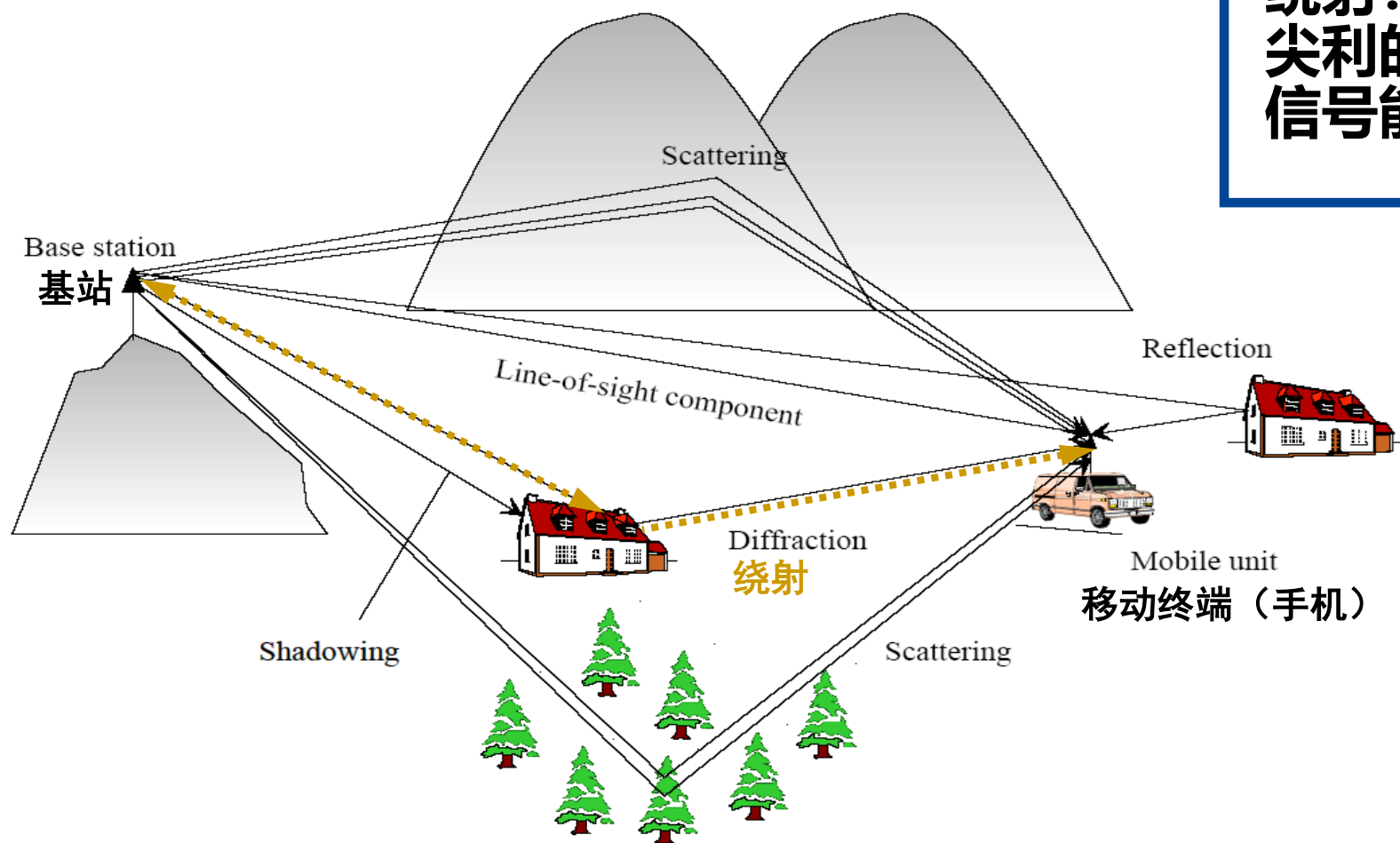


反射波

反射: 当电磁波遇到比波长长得多的物体时发生反射, 反射发生于地球表面、建筑物和墙壁表面。

02.电磁波的传播——传播机制

无线信道中客观存在的多径信号:

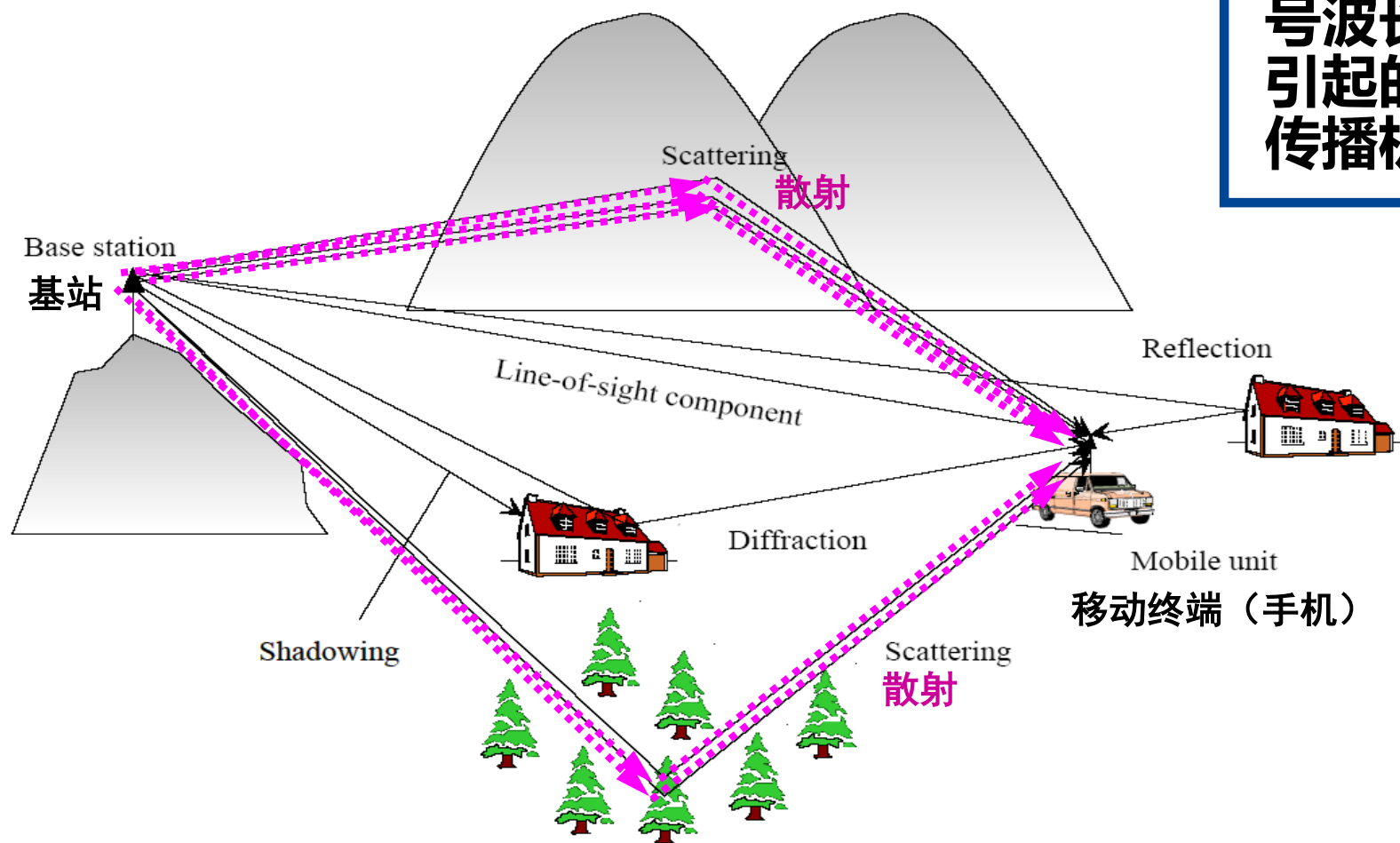


绕射波

绕射：收发之间的传输路径被尖利的边缘阻挡时发生绕射，信号能量绕过障碍物传播。

02.电磁波的传播——传播机制

无线信道中客观存在的多径信号:



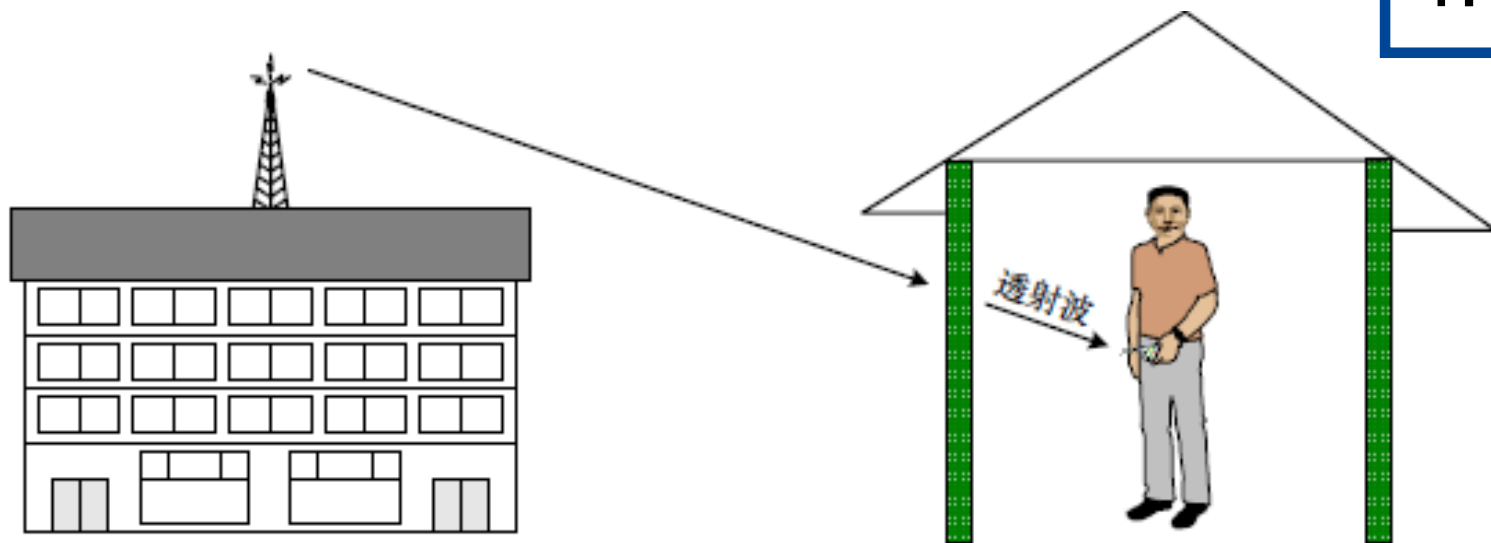
散射波

散射：当电波传播遇到小于信号波长的障碍物或粗糙表面时引起的漫反射后到达接收点的传播机制。

02.电磁波的传播——传播机制

■ 透射:

- 例如，在室内接收室外天线发射的无线电信号，有很大的一部分电磁波信号是穿透墙体后进入室内的。



透射波

透射：空气中的电磁波照射到某一物体时，一部分能量的信号经反射、绕射或散射后在空气中传播，另一部分能量的信号会直接穿透该物体，在该物体的背面空气中传播。



目录

01 信道基本概念

02 电磁波的传播

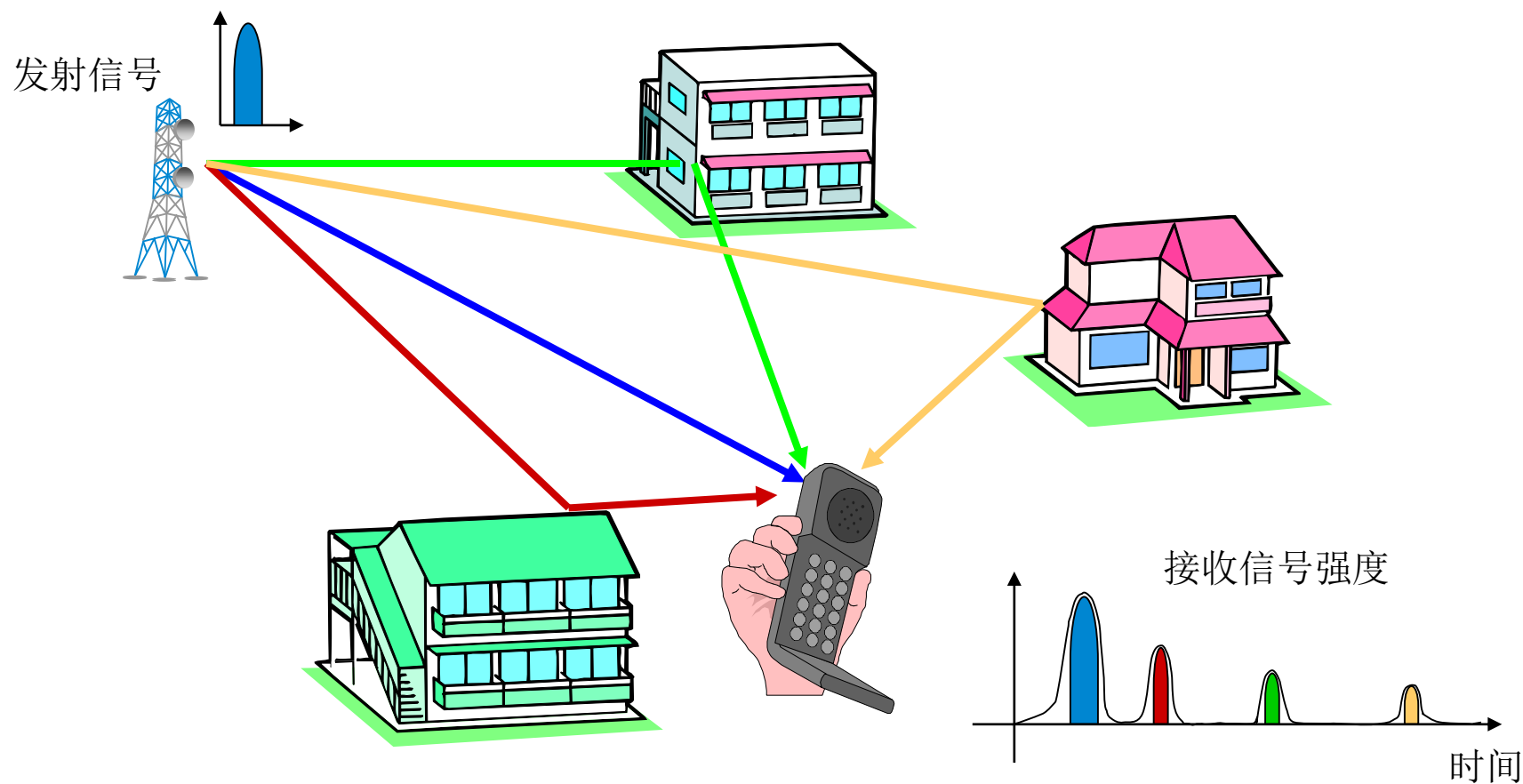
03 无线信道的多径效应

04 无线信道的多普勒效应

05 总结

03.无线信道的多径效应——信道中的衰落

信道的衰落(fading)是指，无线通信具体信道特征的变化，引起接收机接收到的信号强度随时间而变化的现象



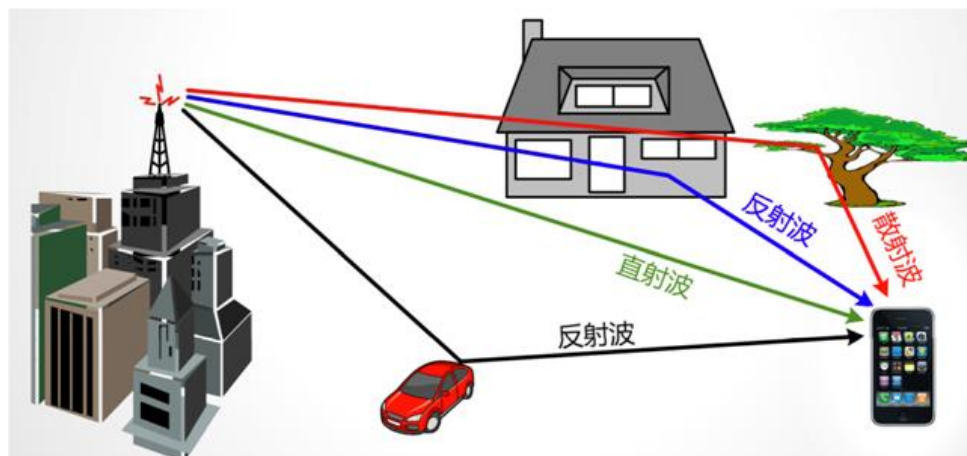
03.无线信道的多径效应——多径衰落

多径衰落：

- 无线通信接收机接收到的多个子径信号所合成的信号，在不同的时间、地点上会时大时小的现象。

多径衰落的原因：

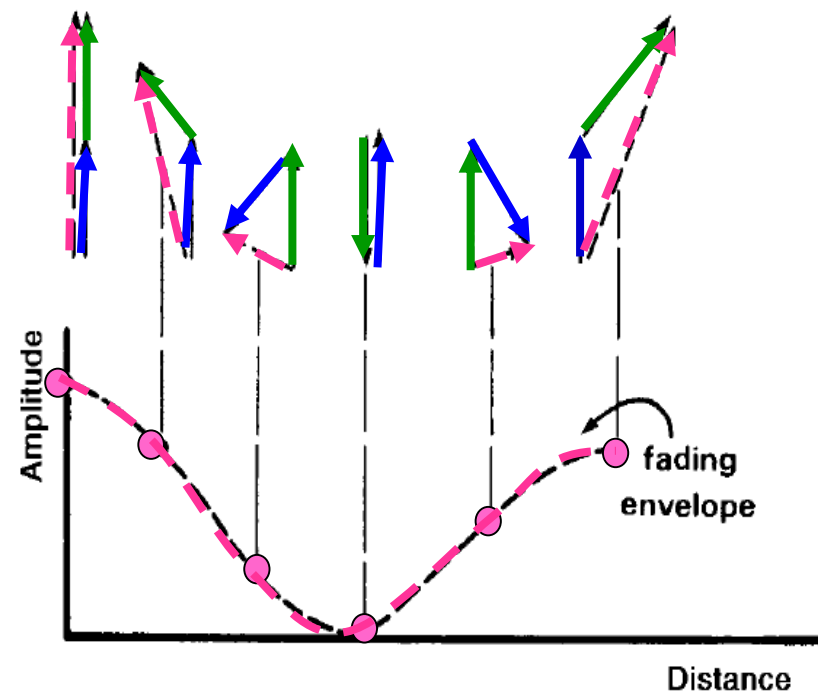
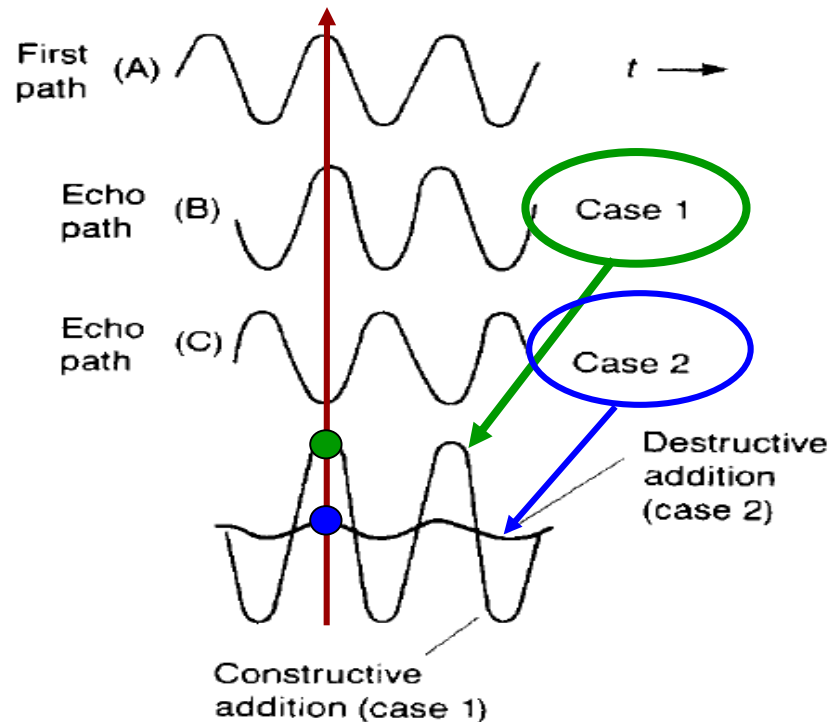
- 发射的电波经历了不同路径，导致传播时间和相位均不相同
- 合成的接收信号幅度在较短时间内急剧变化，产生了衰落



03.无线信道的多径效应——多径衰落产生原因

多径衰落产生原因

- 传播时间和相位不相同
- 接收信号幅度短时间内急剧变化



图(a) 两径传播的叠加（加强和减弱）

图(b) 包络随两径不同相位的变化

03. 无线信道的多径效应——时延扩展

时延扩展是对多径信道的统计描述

平均附加时延

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)}$$

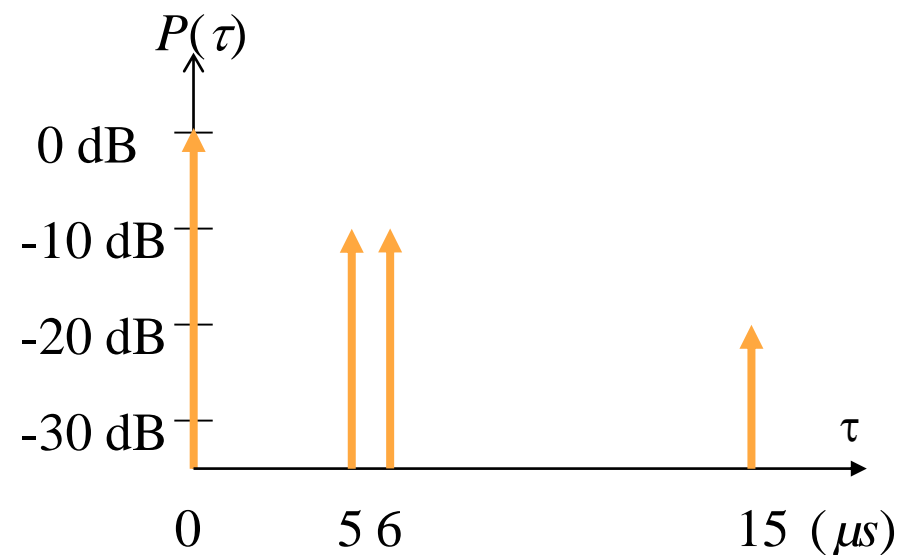
其中

τ_k 是接收到的第 k 个时延信号的延迟时间

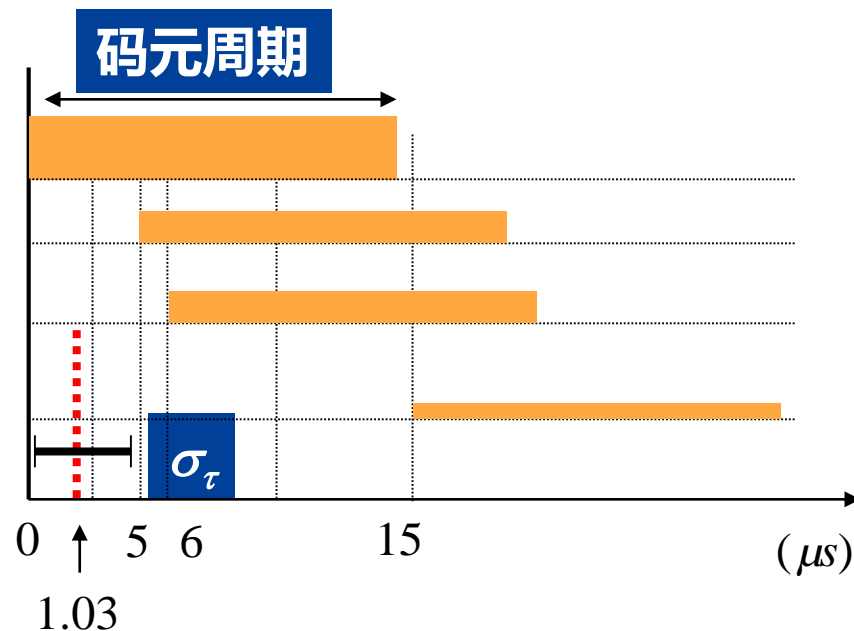
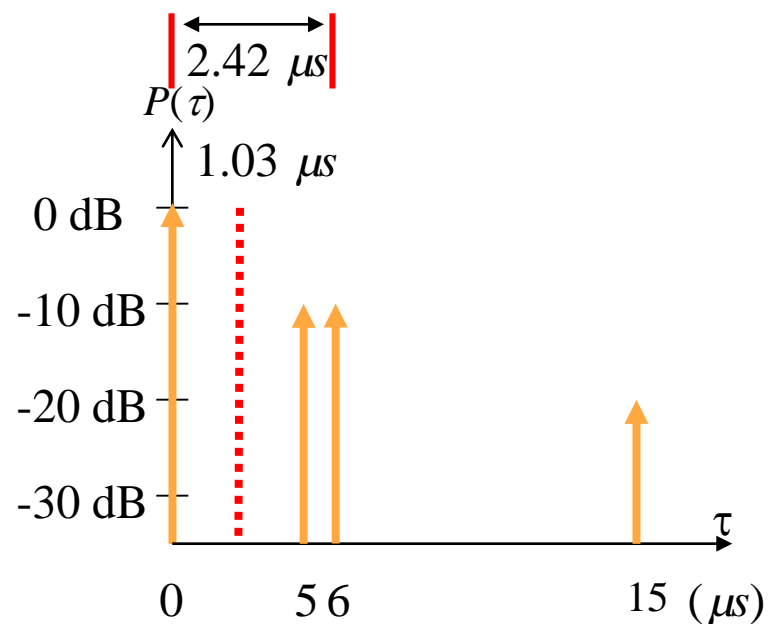
$P(\tau_k)$ 是接收到的第 k 个时延信号的功率

时延扩展：平均附加时延扩展标准差

$$\sigma_{\tau} = \tau_{\text{RMS}} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2}$$



03.无线信道的多径效应——时延扩展实例



$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} = \frac{1 \cdot 0 + 0.1 \cdot 5 + 0.1 \cdot 6 + 0.01 \cdot 15}{1 + 0.1 + 0.1 + 0.01} = 1.03 \mu s$$

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} = \frac{1 \cdot 0^2 + 0.1 \cdot 5^2 + 0.1 \cdot 6^2 + 0.01 \cdot 15^2}{1 + 0.1 + 0.1 + 0.01} = 6.9 \mu s^2$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} = \sqrt{6.9 - (1.03)^2} = 2.42 \mu s$$

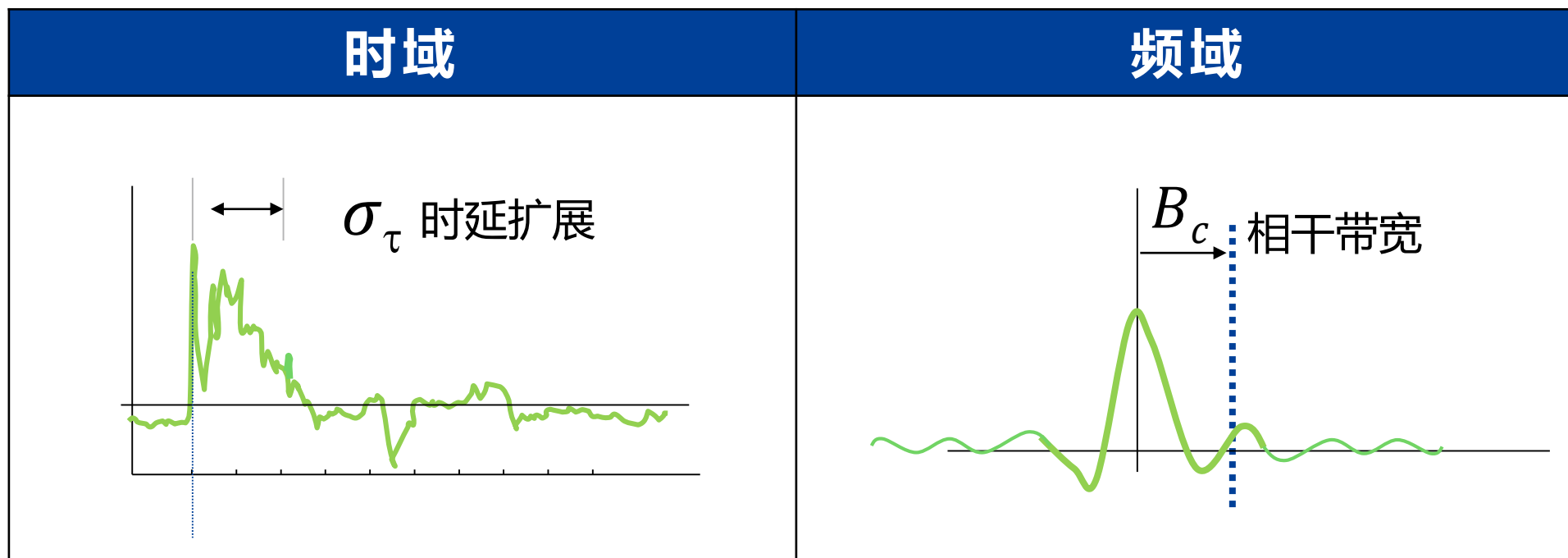
03.无线信道的多径效应——相干带宽

相干带宽：

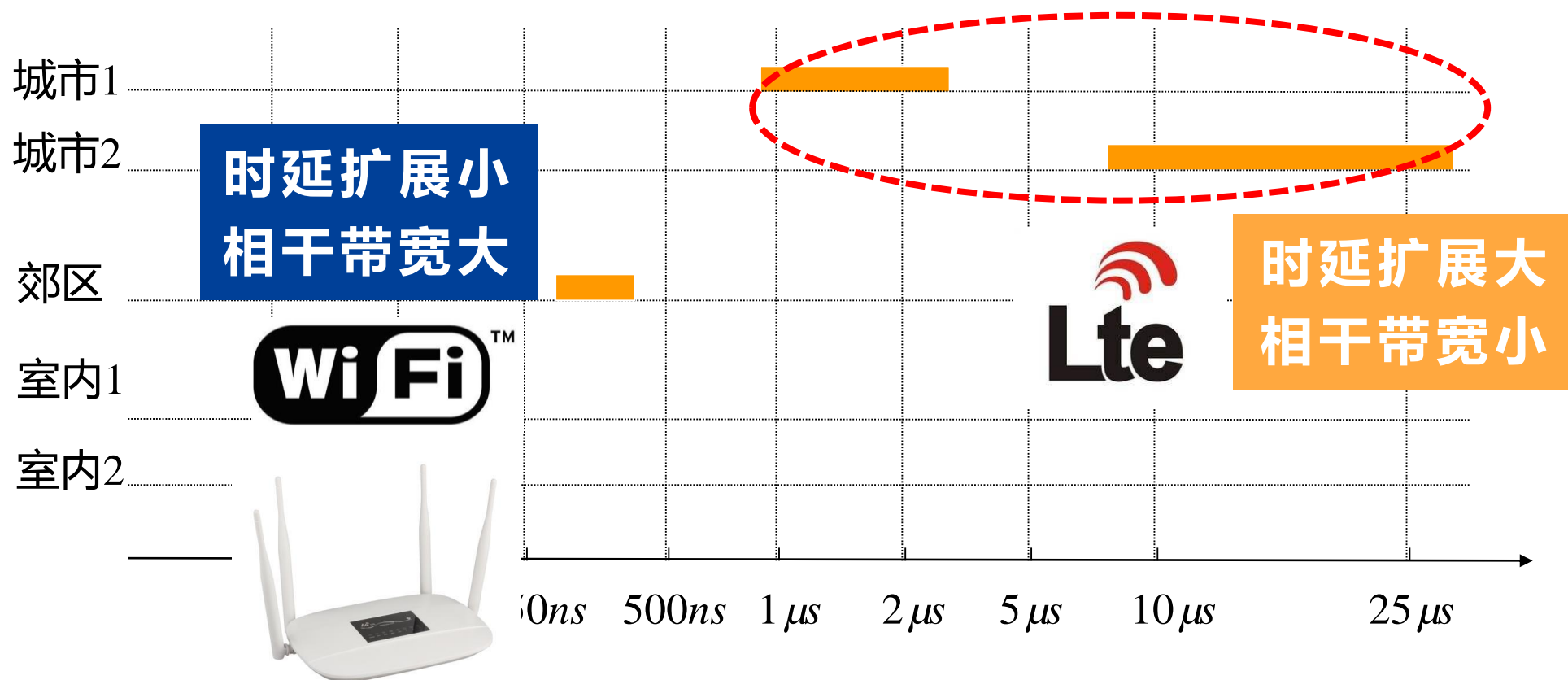
接收信号在频带内任两个频率分量的信号，相关系数不小于0.5

在相干带宽范围内，两个频率分量有很强的相关性

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau}$$



03.无线信道的多径效应——生活中的时延扩展



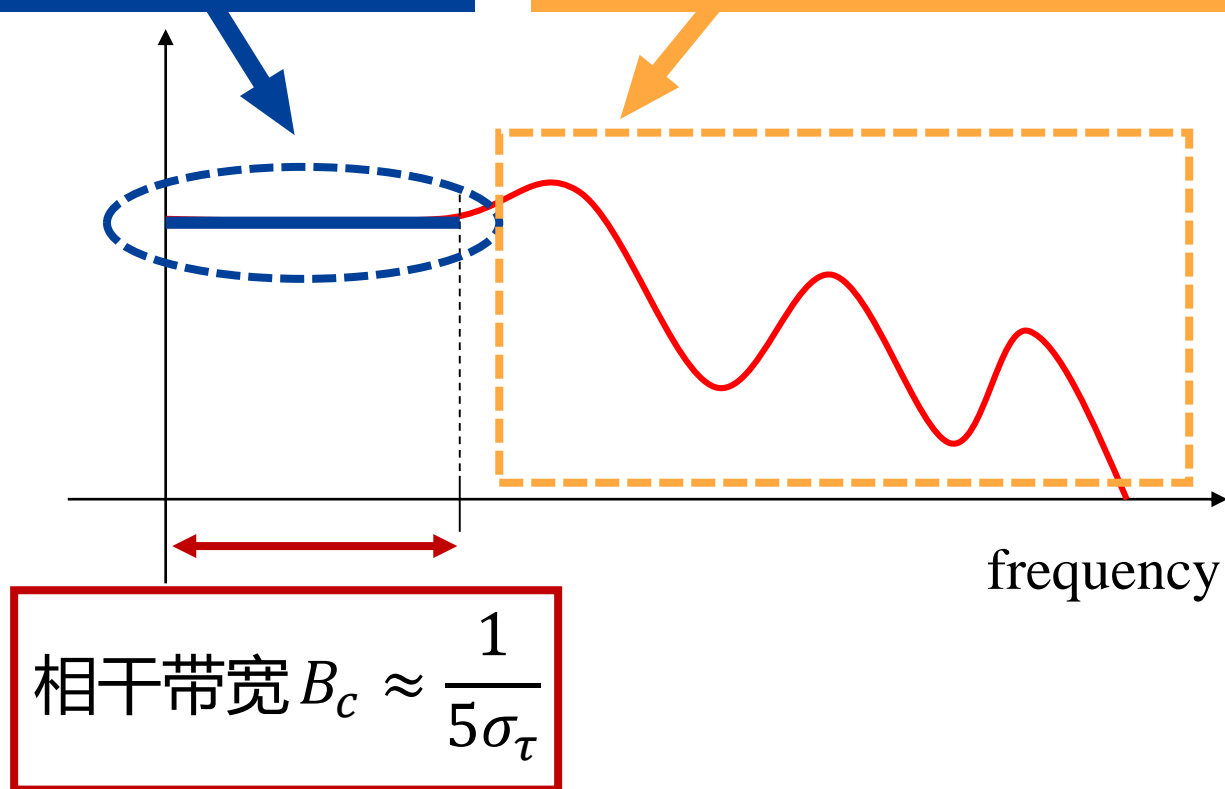
03.无线信道的多径效应——平衰落与频率选择性衰落

平衰落：在相干带宽内，信号的所有频率分量经历相同的衰落

条件：信号带宽 < 相干带宽

频率选择性衰落：在相干带宽外，信号的不同频率分量经历不同的衰落

条件：信号带宽 > 相干带宽



03.无线信道的多径效应——衰落信道实例分析

已知： 信道中的信号分别在时刻 $T = [0, 5, 6, 15] \mu s$ 的信号功率为 $P = [0, -10, -10, -20] \text{ dB}$ ，调制方式是 QPSK，当符号速率分别是 $R_S = 10k$ 波特， $R_S = 100k$ 波特时，该信道是平衰落还是频率选择性衰落？

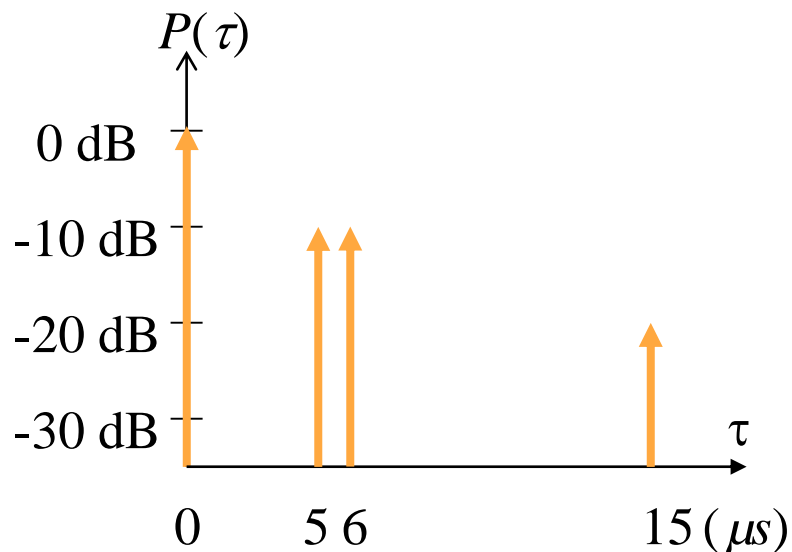
解答：

时延扩展

$$\sigma_\tau = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2} = \sqrt{6.9 - (1.03)^2} = 2.42 \mu s$$

相干带宽

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} = \frac{1}{5 \times 2.42 \times 10^{-6}} = 83 \text{ kHz}$$



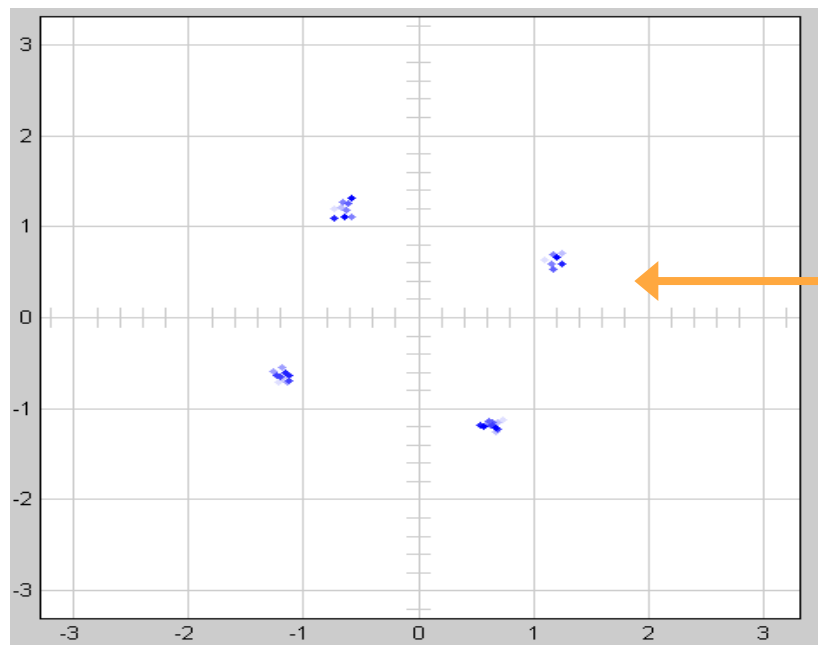
03.无线信道的多径效应——衰落信道实例分析

符号速率 $R_S = 10k$ 波特

信号带宽 $W = R_S = 10kHz$

信号带宽 < 相干带宽

该信道是平衰落



信号星座图

码间串扰小

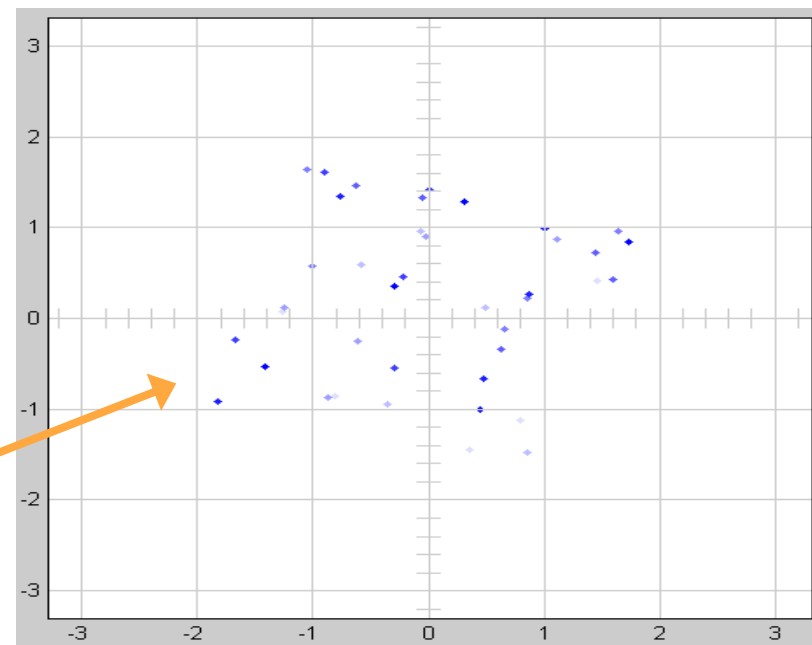
码间串扰大

符号速率 $R_S = 100k$ 波特

信号带宽 $W = R_S = 100kHz$

信号带宽 > 相干带宽

该信道是频率选择性衰落





目录

01 信道基本概念

02 电磁波的传播

03 无线信道的多径效应

04 无线信道的多普勒效应

05 总结

04.无线信道的多普勒效应——基本概念

■ 物体辐射的波长，因波源和观测者的相对运动而产生变化

■ 运动的波源前面

- 波长变短，频率变高

■ 运动的波源后面

- 波长变长，频率变低

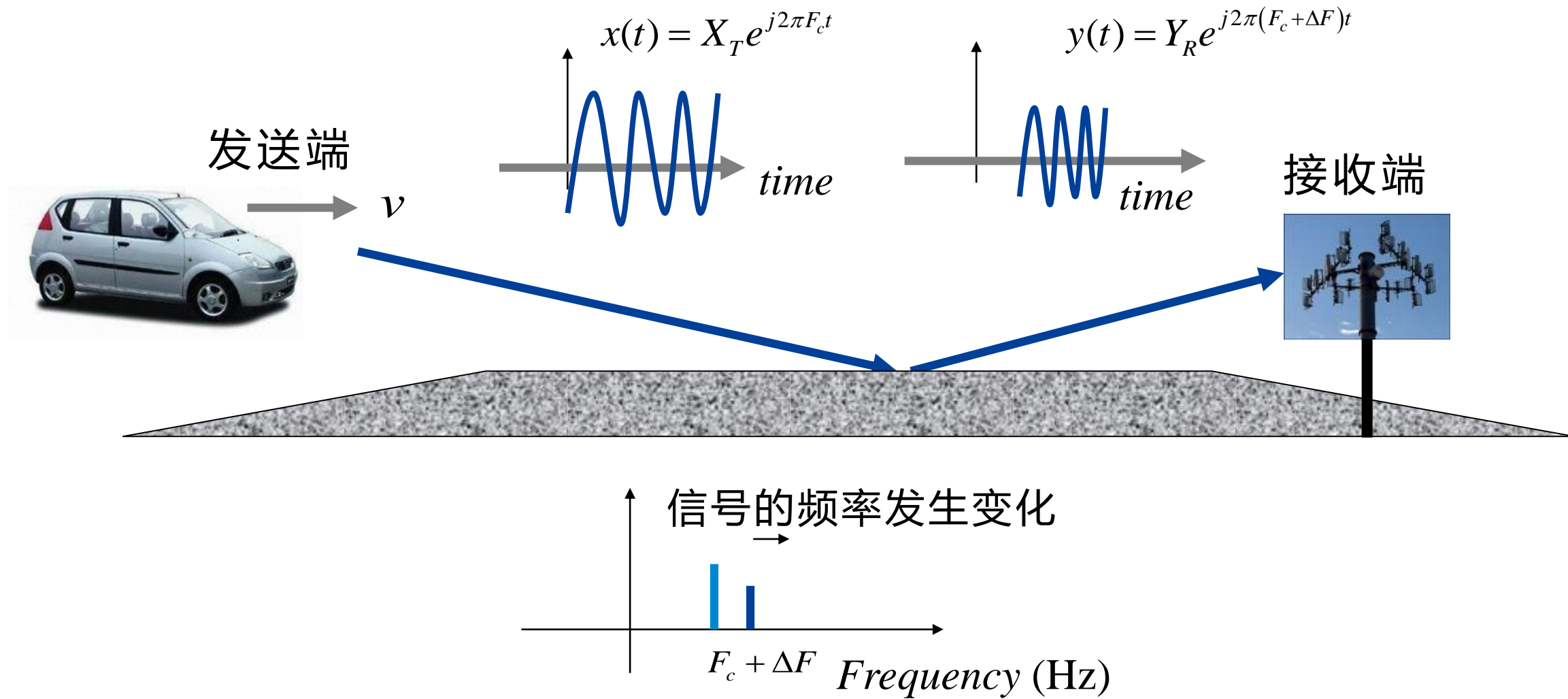


多普勒(1803-1853)，奥地利物理学家，数学家和天文学家。因发现多普勒效应而闻名于世。

04.无线信道的多普勒效应——生活实例



04.无线信道的多普勒效应——多普勒效应示意图



04.无线信道的多普勒效应——无线信道的多普勒频移

定义：

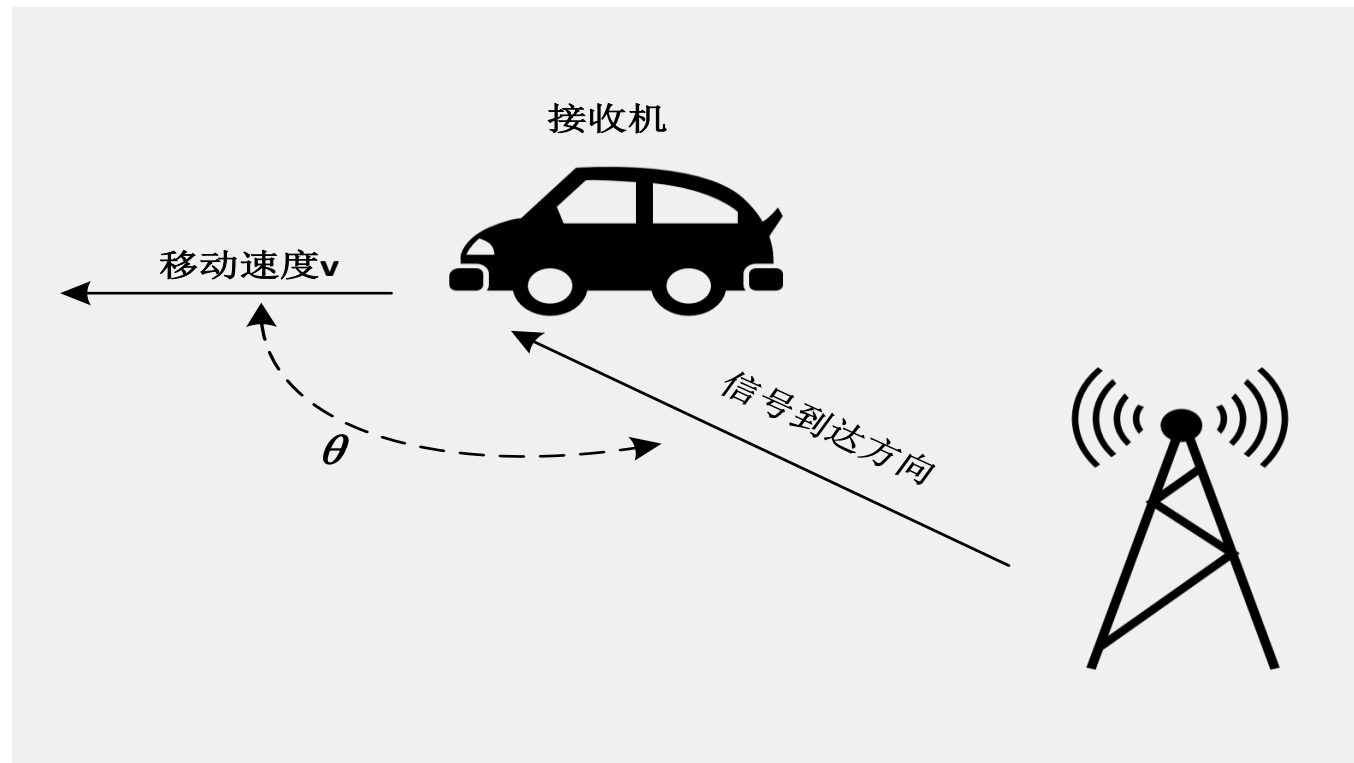
- 接收机接收信号频率

$$f_r = f_t - f_d$$

f_t : 发射信号频率

f_d : 多普勒频移

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos\theta$$



04.无线信道的多普勒效应——无线信道的多普勒频移

■ 夹角对多普勒频移的影响

$$f_d = \frac{v}{c} f_t \cos \theta$$

电磁波的到达方向与接收机移动方向的夹角 θ

$$\theta = 0$$

多普勒频移最大

$$|f_{d,max}| = \frac{v}{c} f_t = \frac{v}{\lambda}$$

$$\theta = 90^\circ$$

多普勒频移最小

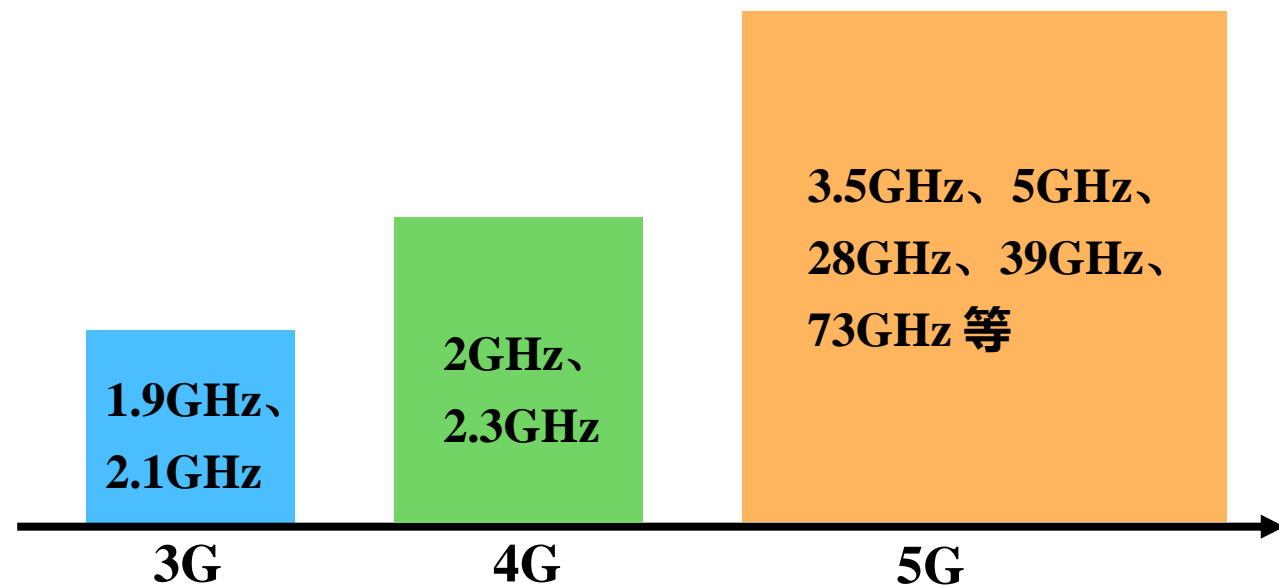
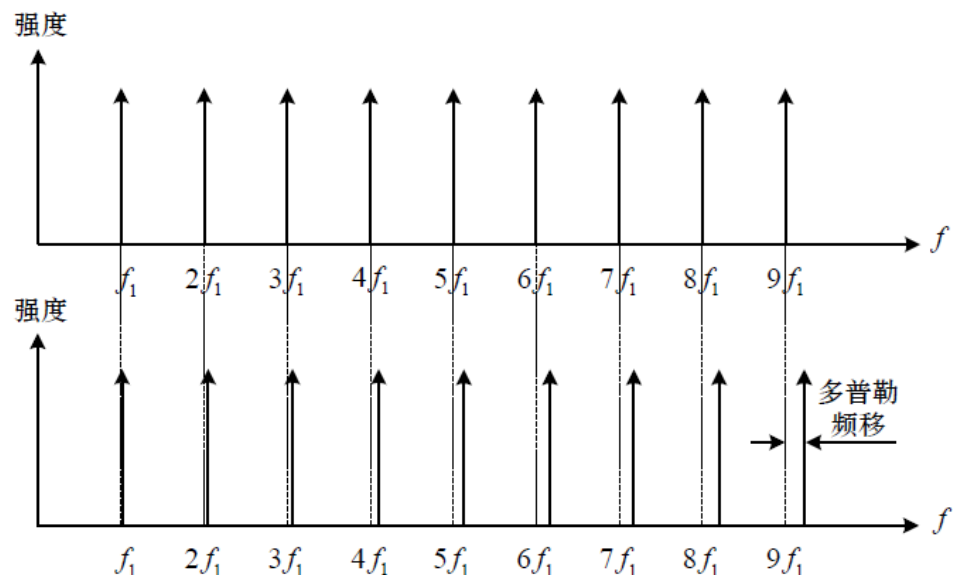
$$f_{d,min} = 0$$

04.无线信道的多普勒效应——无线信道的多普勒频移

接收信号频率：接收机接收信号的频率

$$f_r = f_t \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

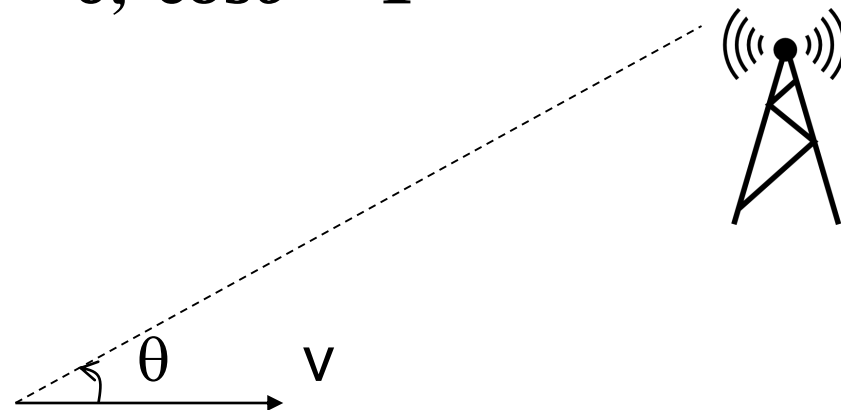
信号频率越高，多普勒频移越大



04.无线信道的多普勒效应——无线信道的多普勒频移

- **实例：**
- 1.载波频率为： $f_c = 1900\text{MHz}(\lambda = 15.79\text{cm})$
 - 2.高铁时速为： $v = 350\text{km/h} = 97.22\text{m/s}$
 - 3.假设高铁直接开向接收机，即 $\theta = 0$ ， $\cos\theta = 1$

无线信号的多普勒频移是多少？



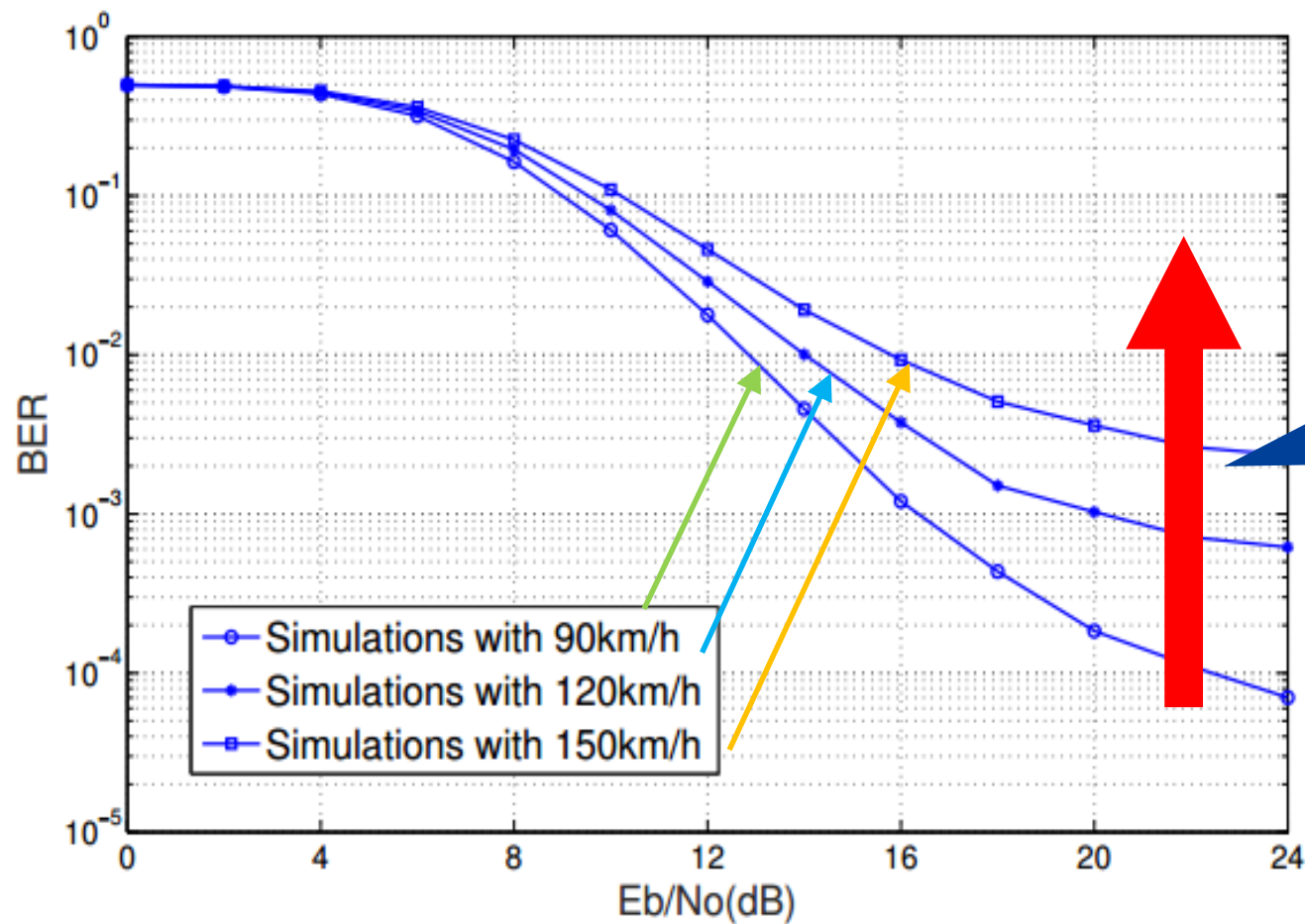
■ **解答：**

多普勒频移为：

$$f_d = \frac{v \cos\theta}{\lambda} = \frac{97.22}{0.1579} = 616\text{Hz}$$

04.无线信道的多普勒效应——无线信道的多普勒频移

多普勒频移的影响：



移动速度增大，
多普勒频移变大，
导致误码率上升。

- 调制方式： QPSK
- 信道编码： 卷积码

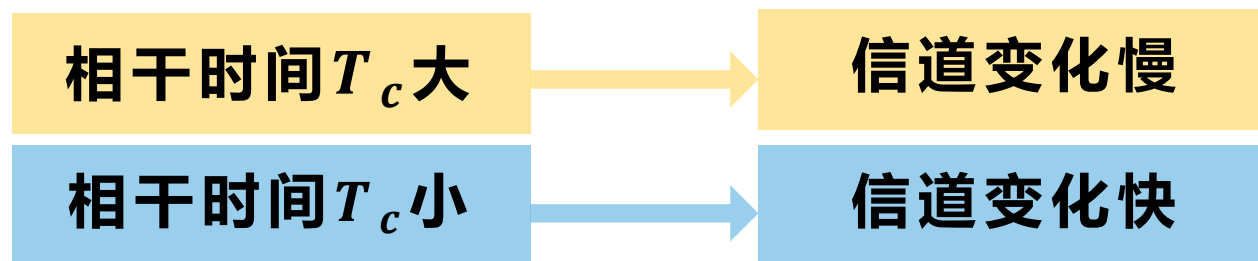
04.无线信道的多普勒效应——无线信道的快衰落与慢衰落

相干时间基本概念：

- 无线信道的**相干时间**：在此时间间隔内任两个时刻对接收信号的复包络采样，各频率分量信号的相关系数不小于0.5
- 在**相干时间**间隔内，接收的信号幅值有很强的相关性

$$T_c \approx \frac{0.5}{f_d}$$

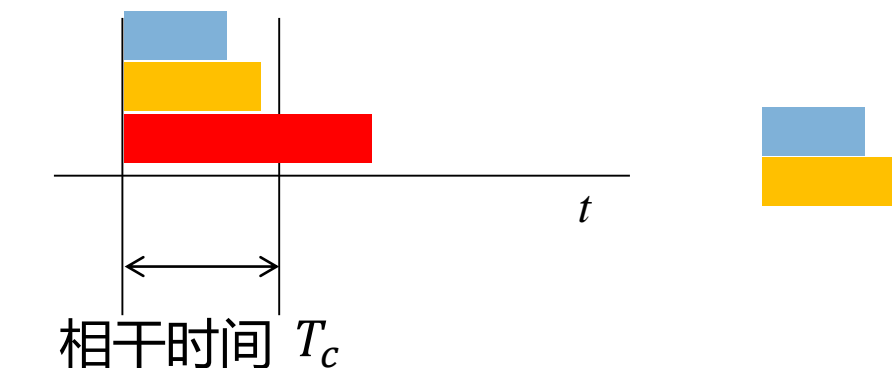
相干时间度量了信道的时变特性



04.无线信道的多普勒效应——无线信道的快衰落与慢衰落

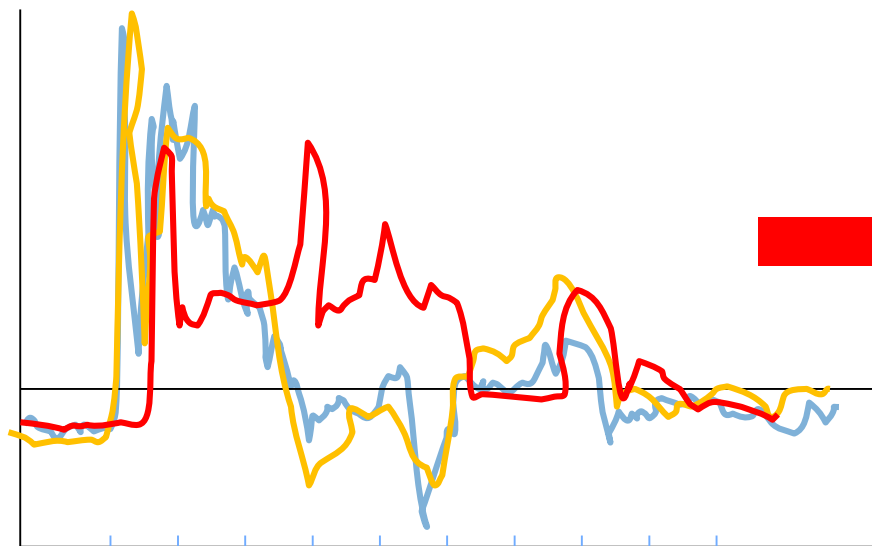
信号幅值相关性：

码元周期



在相干时间的时间间隔内，
接收信号幅值有很强的相关性

信号幅值



在相干时间的时间间隔外，
接收信号幅值的相关性不明显

04.无线信道的多普勒效应——无线信道的快衰落与慢衰落

快衰落与慢衰落的判定：

$$T_c > T_s$$

相干时间 T_c 大于码元周期 T_s ，该信道即为慢衰落



慢衰落信道误码率性能降低的主要原因是信噪比的损失

$$T_c < T_s$$

相干时间 T_c 小于码元周期 T_s ，该信道即为快衰落



衰落特性将在码元周期内改变多次，误码率提升

04.无线信道的多普勒效应——无线信道的快衰落与慢衰落

实例：在GSM系统中，其载频 f_c 为1900MHz，假设码元速率 f_s 为1k波特，高铁行驶速率为350km/h，行人行走速率为4km/h，对于高铁和行人的信道分别是快衰落还是慢衰落？



码元周期 $T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{1000} = 1ms$

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{3 \times 10^8}{1.9 \times 10^9} = 0.1579m$$

相干时间：高铁

$$f_d = \frac{v}{\lambda} = \frac{97.22}{0.1579} = 616\text{Hz}$$

$$T_c \approx \frac{0.5}{f_d} = \frac{0.5}{616} = 0.8ms$$

$$T_c < T_s$$

快衰落

相干时间：行人

$$f_d = \frac{v}{\lambda} = \frac{1.11}{0.1579} = 7\text{Hz}$$

$$T_c \approx \frac{0.5}{f_d} = \frac{0.5}{616} = 71.4ms$$

$$T_c > T_s$$

慢衰落

04.无线信道的多普勒效应——无线信道的快衰落与慢衰落

生活中的快衰落与慢衰落：



移动速度慢
多普勒频移小
相干时间大

慢衰落



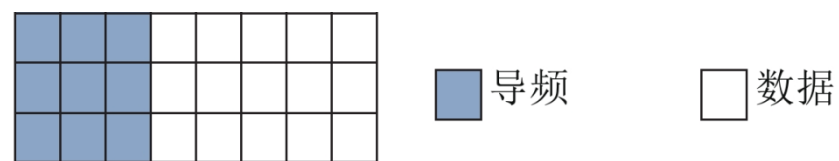
移动速度快
多普勒频移大
相干时间小

快衰落容易发生

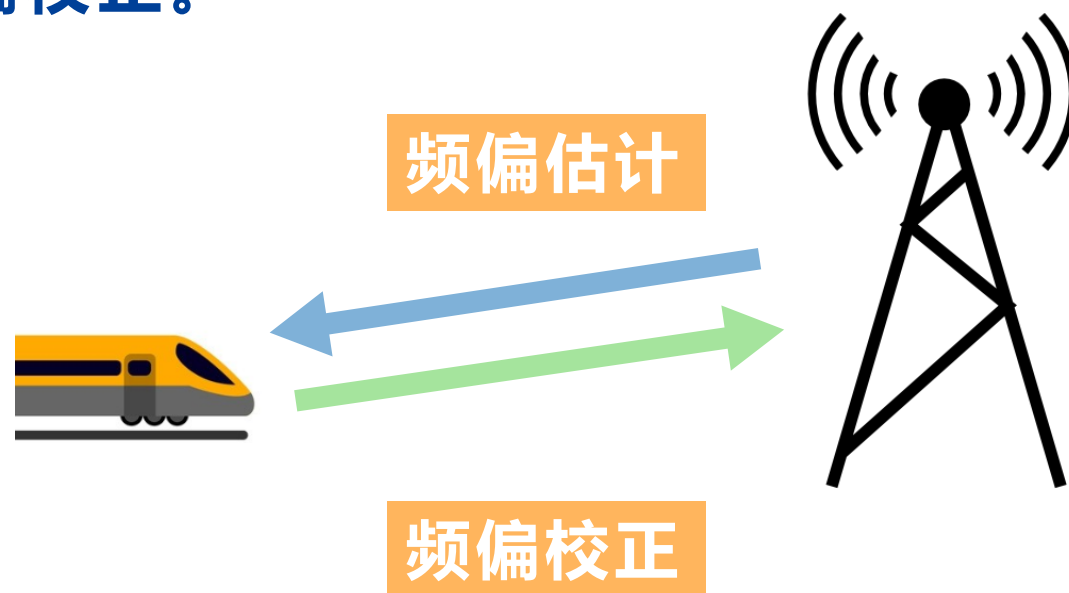
04.无线信道的多普勒效应——无线信道的快衰落与慢衰落

无线信道快衰落的解决方法：

- 导频，是在数据帧中加入一段接收端和发射端均已知的数据，估计无线信道特征，用来频偏校正。



发送的数据帧结构



将估计出的频率偏移消除



目 录

01 信道基本概念

02 电磁波的传播

03 无线信道的多径效应

04 无线信道的多普勒效应

05 总结

05.总结

■ 多径衰落

多个子径信号所合成的信号，在不同的时间、地点上会时大时小

■ 多径衰落的影响

是产生码间串扰的根源，引起“地板效应”

■ 平衰落与频率选择性衰落的判断

基于多径时延扩展

平衰落
信号带宽 < 相干带宽

频率选择性衰落
信号带宽 > 相干带宽

05.总结

码间串扰

- 有限的频谱资源，导致前后码元畸变产生拖尾
- 引起“地板效应”

满足无码间串扰的均衡器

$$\text{ISI} = \sum_{\substack{n=-\infty \\ n \neq k}}^{\infty} a_n h[(k-n)T_B] = 0$$

- 通过横向滤波器使得信号在抽样判决时刻取最大值，同时对临近脉冲影响最小
- 迫零法确定滤波器抽头系数
- 均衡器性能和复杂度需要权衡

05.总结

无线信道的多普勒效应

波源和观察者之间的相对运动，使观察者感到频率发生变化

多普勒频移

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos\theta$$

快衰落与慢衰落的判断

快衰落
多普勒频移大
相干时间 < 码元周期

基于多普勒频移

慢衰落
多普勒频移小
相干时间 > 码元周期

快衰落的解决办法

频偏估计后校正

课后作业

15.10 传输信号的带宽为5kHz，传输信道的相干带宽为50kHz，显然这是一个平坦衰落信道，解释为什么这样的信道有时会表现出频率选择性衰落？

15.16 信道多径衰落的rms时延扩展 $\sigma_\tau = 10\mu\text{s}$ ，多普勒扩展 $f_d = 1\text{Hz}$ ，基带脉冲持续时间 $T_s = 1\mu\text{s}$ 。

- a) 信道相干带宽是多少？
- b) 信道相干时间是多少？
- c) 试确定该信道的频率选择性类型和衰落快速性类型
- d) 如何改变脉冲持续时间（或信息速率）以减小衰落影响

谢谢！

