

通信原理

通信原理

第一章 绪 论

教材： 《数字通信基础》（修订版）

仇佩亮，陈惠芳，谢磊

统计人数

参考书：

《Communication Systems Engineering》，

J.G. Proakis and M. Salehi

《Digital Communications: Fundamentals and Applications》

B. Sklar

《通信原理教程》，樊昌信

- (1) **课件** 学在浙大网站
- (2) **我的联系方式**: 单杭冠, hshan@zju.edu.cn, 15868191637, 信电楼230房间
- (3) **助教**: 张越, zhangyuezy@zju.edu.cn, 17300986756, 信电楼234房间, 答疑时间周一下午15:00~17:00
- (4) **期末总评的规则**:
- 期末考试 50%
 - 平时成绩
 - 期中考试 13%
 - 习题 13%
 - 课堂互动/出勤 5%
 - 随堂测试 5%
 - 课程实践 10%
 - 课程思政 4%

3 / 31

课程内容

第一章 绪论 (熵和互信息、通信系统的组成和性能指标)

第二章 确定性信号、随机变量与随机过程 (分析通信系统的基本数学知识: 信号的频域分析、随机变量/随机过程的刻画方法)

第三章 通信信道 (刻画信道、分析噪声和信道容量)

第四章 模拟调制系统 (线性、非线性模拟调制系统设计和性能分析)

第五章 模拟信号的数字化 (数字传输前的准备工作: 抽样量化、脉冲编码)

第六章 数字基带传输 (数字基带系统设计和性能分析)

第七章 数字通带传输 (数字通带系统设计和性能分析)

第八章 数字通信中的同步技术 (同步的方法和性能分析)

期中考试范围

期末考试范围

4 / 31

绪论

§ 1.1 通信技术发展历史回顾

有线通信

1799年 Volta 发明电池；

1837年 S. Morse发明电报（变长度信源码）；

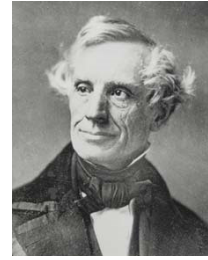
1844年 华盛顿——巴尔的摩电报演示；

1858年 第一条横跨大西洋的越洋电报电缆建成；

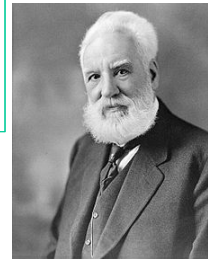
电报 1875年 E. Baudet发明定长信源码；

1876年 Bell申请电话专利；

1877年 建立Bell电话公司；



S. Morse



A. G. Bell

5 / 31

1906年 De Forest发明电子三极管放大；

1915年 实现横跨美洲大陆的电话；

二次大战和经济大萧条推迟了越洋电话业务；

1953年 建立第一条横越大西洋电话电缆；

1897年 Strowger发明步进制自动交换；

1947年 Bell实验室发明晶体管；

1960年 Bell实验室发明数字交换；

在过去50年中电话有极大发展，光纤代替铜缆；

6 / 31

无线通信历史

1820年 Oersted 发现电流产生磁场；

1831年 Faraday发现导线作切割磁力线运动产生感应电流；

1864年 **Maxwell** 提出电磁场方程（电磁统一理论），预言电磁波存在；

1883年 Hertz用实验证明Maxwell电磁理论；



Maxwell



Hertz

1894年 O. Lodge发明粉末检波器，

在牛津检测到150码远发出的无线信号；

7 / 31



马可尼

1895年 Marconi发明无线电报，传输2公里；

1897年 Marconi申请无线电报专利，建立无线电报公司；

1901年12月12日 **Marconi**在加拿大纽芬兰岛收到从英国Cornwall发出的无线信号，传输距离1700mile；

1900年 专利《调谐电话》获得批准，专利号为No. 7777；同年公司改名为Marconi公司；

1907年 获诺贝尔物理奖；

1904年 Flemin发明电子二极管；

1906年 De Forest发明电子三极管放大；

1920年 AM广播在美国Pittsburgh开通；

8 / 31

在一次大战中 E. Armstrong发明超外差AM接收机；

1933年 E. Armstrong发明FM；

1929年 美国人Zworykin发明电视；

1933年 英国BBC广播电视开通；

近50年来通信的发展

1947年 Brattain, Bardeen, Shockley发明晶体管（Bell实验室，
1956年诺贝尔物理学奖）



W. SHOCKLEY
(1910-1989)



J. BARDEEN
(1908-1991)



W. H. BRATTAIN 9/31
(1902-1987)

1955年 Bell实验室皮尔斯（Pierce）提出卫星通信；

1962年 Telstar I卫星发射，转播欧、美之间电视广播；

1965年 发射商用通信卫星；

1958年 Townes, Schawlow发明激光；

1966年 英国学者高锟（K. C. Kao）与霍克汗姆（G. A. Hockham）预言光
纤损耗可以降到20db/km以下，使光纤通信成为可能；（0.1db Now）

1958年 Kilby发明集成电路（2000年诺贝尔物理学奖）；

1959年 Robert Noyce 发明平面工艺技术



10/31

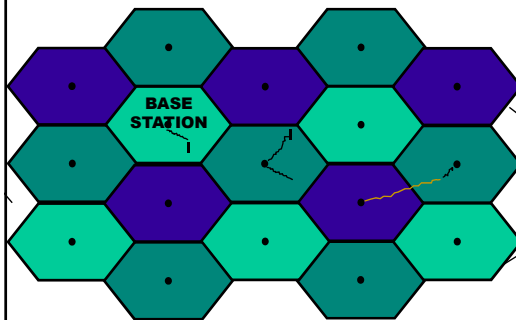
70年代末 Bell 实验室提出蜂窝式无线公众移动通信网；

从波形到系统的飞跃

1G→2G→3G→4G→5G→...

发展趋势

- 密集化 (small cell network)
- 异构化 (heterogeneous network)
- 智能化 (cognitive, cooperative, self-organized, software-defined,...)



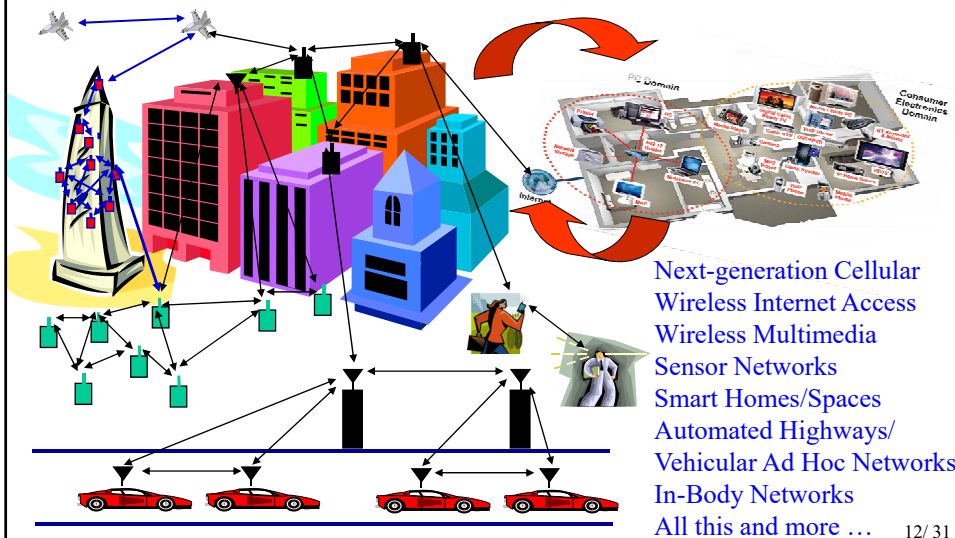
Clinton 总统给 R. Frenkiel 授奖

MTSO
Mobile Telephone
Switching Office

11 / 31

Future Wireless Networks

Ubiquitous Communication Among People and Devices



12 / 31

通信系统理论

1924年 奈奎斯特 (Nyquist) 研究表明带宽为 W 的信道最多可以支持每秒 $2W$ 个符号的**无码间干扰传输**，现代数字通信的开端。

1928年 维纳 (Wiener) 提出滤波理论和预测理论，奠定了控制论；

1943年 诺斯 (D. O. North) 提出了**匹配滤波器**理论；

1947年 苏联学者卡捷尔尼可夫 (Kotelnikov) 发展了**信号的几何表示**理论，并建立了信号的潜在抗干扰理论；

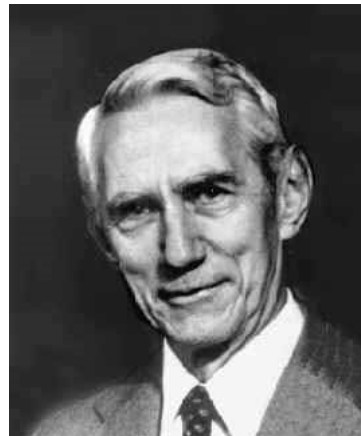
上世纪40年代，赖斯 (O. Rice) 关于**随机噪声**的数学研究；

1948年 Shannon建立信息论（通信的数学理论）

1950年 Hamming提出纠错编码；

之后在Shannon理论指导下，各种信道纠错编码，信源压缩编码，调制方式，多用户通信理论，网络理论，扩谱理论，多天线理论，合作通信理论等蓬勃发展起来；

13 / 31



C. Shannon (1916-2001) 比特之父

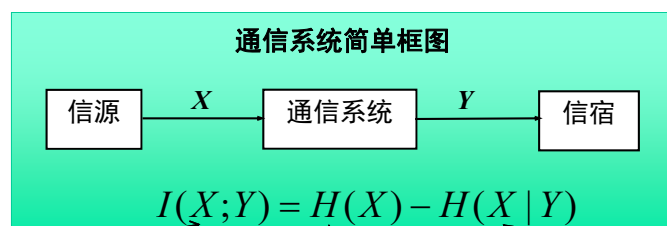
14 / 31

§ 1.2 不确定性与信息量

通信的目的：信息从空间的某处发到另一处

1.2.1 消息，信号与信息

- (1) 信源和信宿：消息的产生者和消息的接收者
- (2) 消息：信源输出
- (3) 信号：电压、电流等表征
- (4) **信息：不确性（熵）的减小**



$I(X;Y)$ 对X提供的信息量（接收到Y使X不确定性的减少量）

信源输出的平均不确定性

接收端收到Y后对X还存在的平均不确定性

15 / 31

1.2.2 熵和互信息

一、熵

用随机变量 X 来描述消息。设 X 是一个离散随机变量，它可以取 M 个可能值 $\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$ ，并且 X 取 x_i 的概率为 $p(x_i)$ ，于是把 X 的平均不确定性（熵）定义为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M p(x_i) \log_a p(x_i)$$

当对数的底 a 等于2时，熵的单位为比特（bit），当 a 等于 e 时，熵的单位称为奈特（nat）。

16 / 31

两个例子说明熵定义的合理性

[例1.2.1] 设 X 、 Y 、 Z 是三个二元随机变量，它们的概率分布分别为

$$\begin{Bmatrix} X \\ p(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 \\ 0.01 & 0.99 \end{Bmatrix}$$

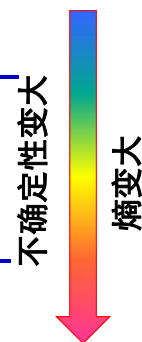
$$H(X) = -0.01 \log 0.01 - 0.99 \log 0.99 \approx 0.08 \text{ bit}$$

$$\begin{Bmatrix} Y \\ p(y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_1 & y_2 \\ 0.4 & 0.6 \end{Bmatrix}$$

$$H(Y) = -0.4 \log 0.4 - 0.6 \log 0.6 \approx 0.97 \text{ bit}$$

$$\begin{Bmatrix} Z \\ p(z) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} z_1 & z_2 \\ 0.5 & 0.5 \end{Bmatrix}$$

$$H(Z) = -0.5 \log 0.5 - 0.5 \log 0.5 = 1 \text{ bit}$$



17 / 31

[例1.2.2] 设随机变量 X 等可能地取4个值，而 Y 等可能地取二个值，即

$$\begin{Bmatrix} X \\ p(x) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \end{Bmatrix} \quad \begin{Bmatrix} Y \\ p(y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y_1 & y_2 \\ 0.5 & 0.5 \end{Bmatrix}$$

$$H(X) = 4 \cdot \left\{ \frac{-1}{4} \log \frac{1}{4} \right\} = 2 \text{ bit}$$

$$H(Y) = 1 \text{ bit}$$

18 / 31

二、互信息——发送信息与接收信息的桥梁

通信信道的输入、输出 X 和 Y 是一对相关的随机变量， X 和 Y 的关系是通过条件概率 $\{p(y_j | x_i)\}$ 描述的，表示当发送为 $X = x_i$ 时，接收到 $Y = y_j$ 的概率。于是

$$\begin{aligned} p(x_i | y_j) &= P\{X = x_i | Y = y_j\} \\ &= \frac{p(x_i, y_j)}{p(y_j)} \\ &= \frac{p(x_i)p(y_j | x_i)}{p(y_j)} \end{aligned}$$

在收到 $Y = y_j$ 条件下，对 X 的平均不确定性为：

$$H(X | Y = y_j) = -\sum_i p(x_i | y_j) \log p(x_i | y_j)$$

19 / 31

由于接收方也可能收到其它的 Y 值，所以条件不确定性 $H(X | Y = y_j)$ 应对 Y 取平均。于是在 Y 给定条件下 X 的平均不确定性，或称**条件熵**为：

$$\begin{aligned} H(X | Y) &= \sum_j p(y_j) H(X | Y = y_j) \\ &= -\sum_j \sum_i p(x_i, y_j) \log_a(p(x_i | y_j)) \end{aligned}$$

互信息：

$$\begin{aligned} I(X; Y) &= H(X) - H(X | Y) \\ &= -\sum_i p(x_i) \log_a p(x_i) + \sum_j \sum_i p(x_i, y_j) \log_a(p(x_i | y_j)) \\ &= \sum_j \sum_i p(x_i, y_j) \log_a \left(\frac{p(x_i | y_j)}{p(x_i)} \right) \end{aligned}$$

如接收到 Y 后，完全消除 X 的不确定性，则由 Y 对 X 所获得的信息就是

$$I(X; Y) = H(X) \quad \leftarrow \text{与信源编码的关系是什么？}$$

所以信源的熵也可称为是信源所输出的信息量。———无错信道特征

20 / 31

[例1.2.3] 信源以相等概率，输出二进制数字“0”和“1”，在信道传输过程中“0”错成“1”和“1”错成“0”的概率都等于1/10，二个符号不错的概率为9/10，求从信道收到一位二进制数字对发送数字平均提供多少信息。-----**有错信道的互信息特征**

[解] 已知：

信源输出 X 的概率： $p(X=0)=p(X=1)=0.5$

给定 $X=0$ 时 Y 的条件分布： $p(Y=0|X=0)=0.9, p(Y=1|X=0)=0.1$

给定 $X=1$ 时 Y 的条件分布： $p(Y=0|X=1)=0.1, p(Y=1|X=1)=0.9$

可推得：

Y 的分布： $p(Y=0)=p(Y=0|X=0)p(X=0)+p(Y=0|X=1)p(X=1)$

$p(Y=1)=p(Y=1|X=0)p(X=0)+p(Y=1|X=1)p(X=1)$

X 的条件分布： $p(X=0|Y=0)=p(Y=0|X=0)p(X=0)/p(Y=0)$

$p(X=1|Y=0)=p(Y=0|X=1)p(X=1)/p(Y=0)$

$p(X=0|Y=1)=p(Y=1|X=0)p(X=0)/p(Y=1)$

$p(X=1|Y=1)=p(Y=1|X=1)p(X=1)/p(Y=1)$

互信息为： $I(X;Y) = H(X) - H(X|Y) = 0.531 \text{ bit}$ 21/31

熵的物理意义(不做考试要求)

设一个信源输出随机消息符号 X ， X 可取 $\{a_1, a_2, \dots, a_K\}$ ，相应概率为

$$P(X=a_i)=p_i, i=1,2,\dots,K$$

如果信源连续输出相互独立的 L 个消息符号，构成长度为 L 的符号串，这样的符号串的总数为 K^L

根据大数定理，长度为 L 的符号串中符号为 a_i 的个数约为 Lp_i ，具有这样构成成分的序列称为**典型列**

任何一个**典型列**出现的概率为：

$$\prod_{i=1}^K p_i^{Lp_i} = 2^{L \sum_{i=1}^K p_i \log_2 p_i} = 2^{-LH(X)}$$

22/31

根据组合公式，长度为 L ，组成成分为 $\{Lp_i, i=1, 2, \dots, K\}$ 的不同典型列的个数为

$$M = C_L^{Lp_1} \times C_{L-Lp_1}^{Lp_2} \times \dots \times C_{L-Lp_1-Lp_2-\dots-Lp_{K-2}}^{Lp_{K-1}} = \frac{L!}{\prod_{i=1}^K (Lp_i)!}$$

利用斯特林公式 $n! \approx \left(\frac{n}{e}\right)^n \sqrt{2\pi n}$

$$\lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\log_2 M}{L} = \lim_{L \rightarrow \infty} \left\{ -\sum_{i=1}^K p_i \log_2 p_i - \frac{1}{2L} \left[(K-1) \log_2 (2\pi L) + \sum_{i=1}^K \log_2 p_i \right] \right\}$$

$$= -\sum_{i=1}^K p_i \log_2 p_i = H(X) \quad \leftarrow \text{一个信源输出符号所需的平均最少比特数}$$

典型列的个数 $M \approx 2^{LH(X)}$ 每个典型列的概率 = $2^{-LH(X)}$

如对于等概率取 M 个可能值的随机变量，可用 $\log_2 M$ 个比特来描述它的取值。忽略了出现概率很小的非典型列序列串，可用 $LH(X)$ 个比特来描述长度为 L 的信源输出符号串，平均每个信源输出符号用 $H(X)$ 个比特描述。

23/31

§ 1.3 数字通信系统

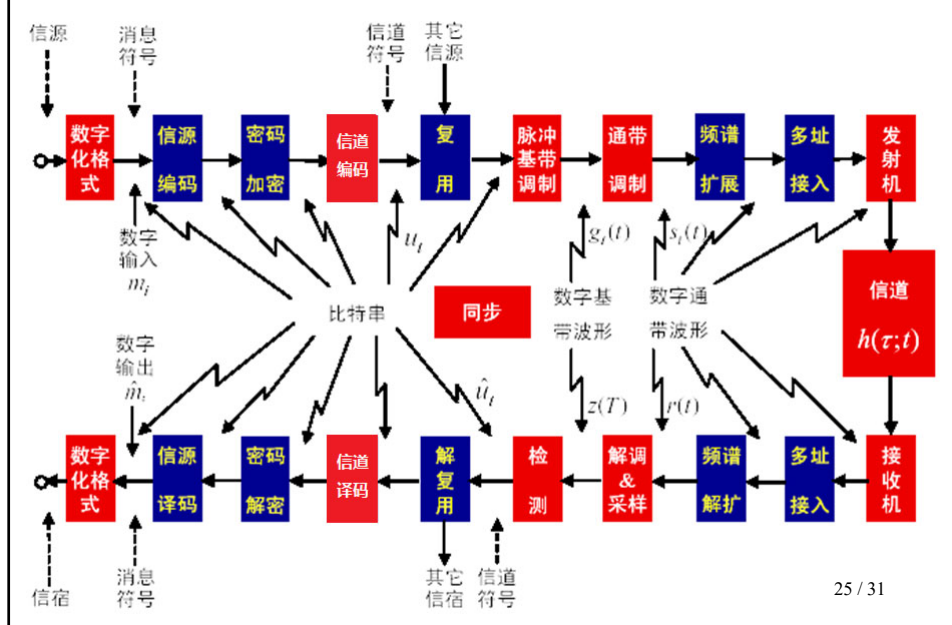
1.3.1 基本概念

数字通信与模拟通信相比有许多优点：

- (1) 在良好设计的数字通信链路上，中继转发不会产生**误差积累**；
- (2) 在数字通信中可以通过纠错编码技术极大提高**抗干扰性能**；
- (3) 数字通信系统中容易采用保密措施，大大提高通信**安全性**；
- (4) 在数字通信中，可以通过各种方式把语音、图像和文字都变换成数字，在**同一信道中传输多种媒体信息**；并便于**存贮和处理**；
- (5) 数字信号可以通过信源压缩编码，减少冗长度，**提高信道利用率**；
- (6) 数字通信系统可采用大规模数字集成电路，使**设备重量轻，体积小，功耗省**；
- (7) 数字通信系统更加**适合于信息论的理论框架**，有利于在信息论理论指导下发展新技术，新体制。

24 / 31

1.3.2 数字通信系统的组成



25 / 31

一个数字通信系统主要包括如下九部分信号处理功能：

- 1、模拟信号的数字格式化，和信源编、译码；
- 2、基带信号方式：第六章
- 3、通带信号方式：第七章
- 4、均衡：基带传输时会涉及
- 5、信道编、译码：第九、十章
- 6、复用与多址：《通信网络》
- 7、扩展频谱与解扩：《无线通信与无线网络》
- 8、密码的加密与解密：《网络安全》
- 9、同步：第八章

26 / 31

1.3.3 数字通信系统的主要性能指标

(1) 传输速率:

① 符号速率(码元速率): 每秒传送的符号数目, 用 R_B 表示, 单位“波特(Baud)” 。 --- sps (symbol per sec)

② 比特速率(信息速率): 每秒传送的比特数目, 用 R_b 表示, 单位是“比特/秒(bit/s)” 。 --- bps (bit per sec)

若符号是 M 进制的, 则每个符号要用 $\log_2 M$ 个比特表示它, 则这个系统的信息速率为

$$R_b = R_B \log_2 M \text{ (bit/s)}$$

$$R_B = R_b / \log_2 M \text{ (波特)}$$

27 / 31

(2) 错误概率:

① 误码率或误符号率: 指在所传送的符号总数中错误符号所占的比例, 即

$$P_e = \text{错误符号数目} / \text{总传输符号数目}$$

② 误比特率: 指在所传输的总比特数中, 错误比特所占的比例, 即

$$P_b = \text{错误比特数目} / \text{总传输比特数目}$$

如果一个符号有 k 个比特组成, 若其中有一个比特出错, 则这个符号必然错了, 所以 $P_e \geq P_b$; 如果一个符号错了, 则组成它的 k 个比特中至少有一个比特错, 所以, $P_e = 1 - (1 - P_b)^k \leq kP_b$ 。

$$P_b \leq P_e \leq kP_b$$

③ 误码字率或者误帧率:

$$P_f = \text{错误码字数 (误帧数)} / \text{总码字数 (总帧数)}$$

28 / 31

A traffic classification based on the quality-of-service (QoS) parameters defined in the LTE QoS framework

QCI	Type	Packet delay budget	Packet error loss rate	Example services
1	GBR	80 ms	10^{-2}	Conversational voice
2		130 ms	10^{-3}	Conversational video (live streaming)
3		30 ms	10^{-3}	Real-time gaming
4		280 ms	10^{-6}	Non-conversational video (buffered streaming)
5	Non-GBR	80 ms	10^{-6}	IMS signaling
6		280 ms	10^{-6}	Video (buffered streaming) TCP-based (e.g., web, -mail, chat, FTP, P2P file sharing, progressive video)
7		80 ms	10^{-3}	Voice, Video (live streaming) Interactive gaming
8		280 ms	10^{-6}	Video (buffered streaming) TCP-based (e.g., web, email, chat, FTP, P2P file sharing)

N. A. Ali, A.-E. M. Taha, and H. S. Hassanein, "Quality of Service in 3GPP R12 LTE-Advanced," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 8, pp. 103-109, August 2013. 29/ 31

(3) **频带利用率**：每赫兹频带所能支持的信息速率，用**比特/秒/赫兹**作为单位。频带利用率和调制方式与编码方式有关。

(4) **能量利用率**：为了达到一定的误比特率，传输每比特所需的信号能量，用**焦耳/比特**作为单位。在通信中用误码率与 E_b / N_0 的关系曲线来衡量，其中 E_b 是每比特能量， N_0 为噪声功率谱密度。

LTE-A targets for full buffer traffic

Environments	DL LTE-A targets		UL LTE-A targets	
	Sector (b/s/Hz)	Cell edge (b/s/Hz)	Sector (b/s/Hz)	Cell edge (b/s/Hz)
Indoor	3	0.1	2.25	0.07
Microcellular	2.6	0.075	1.80	0.05
Base coverage urban	2.2	0.06	1.4	0.03
High speed	1.1	0.04	0.7	0.015
Peak spectral efficiency	15		6.75	

A. Ghosh, R. Ratasuk, et al, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 3, pp. 10-22, June 2010. 30/ 31

作业： 1, 3, 5

31/31