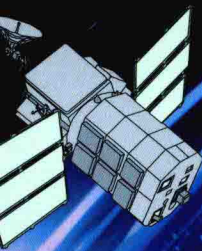


Principles of  
Communications



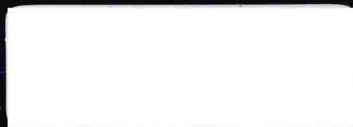
# 通信之道

从微积分到5G

杨学志 编著

大师者，在平凡自然之中引领潮流，于谈笑风生之际授业解惑。

聆听大师讲解 —— 通信之道



# 通信之道

从微积分到5G

杨学志 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书按照读者的思维顺序讲述了从微积分到 5G 所涉及的基础知识和关键技术。全书共 20 章，具有以下特点：

(1) 跨度极大，内容翔实：涉及数学、信号处理、通信原理、通信前沿技术等多个学科领域，知识密度极高，并且是最精华的部分。

(2) 降低难度，提升高度：本书叙述符合读者的思维发展规律，并逐级提高，前后呼应，语言风趣幽默，节奏平稳；作者站高望远，直击本质，学术境界超越经典。

(3) 启发互动，培养创新：在多个环节上对读者提出挑战，启发读者思考，并给出作者的思考过程，培养读者的创新思维。

本书可作为通信和信号处理相关专业的本科生及研究生的教辅书，也可作为从业技术人员的参考资料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

通信之道：从微积分到 5G / 杨学志编著. —北京：电子工业出版社，2016.2  
ISBN 978-7-121-28068-9

I. ①通…II. ①杨…III. ①通信技术—基本知识 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 009853 号

策划编辑：牛 勇 官 杨

责任编辑：王 静

印 刷：北京季蜂印刷有限公司

装 订：北京季蜂印刷有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开 本：720×1000 1/16 印张：27.5 字数：660 千字

版 次：2016 年 2 月第 1 版

印 次：2016 年 2 月第 1 次印刷

定 价：79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：(010) 88258888。

# 前 言

2012年9月，我离开华为公司，标志着职业生涯一个阶段的结束。

我于1988年考入清华大学精密仪器与机械学系，在这里度过了10年求学生涯，拿到博士学位。毕业后，我在北京大学做博士后研究工作，方向为图像压缩。2000年进入华为公司，开始了我在通信领域的职业生涯，一晃就是12年。

12年的风风雨雨，总算没有虚度：

2002年，在TD-SCDMA领域，我提出了一种新的频域联合检测算法，是业界效率最高的。反映这一成果的论文“*A Frequency Domain Multi-User Detector for TD-CDMA Systems*”，于2011年9月发表在“*IEEE Trans. Commu., Vol 59, No. 9*”上（P 2424-2433）。

2003年，提出了随机波束赋形（random beam-forming）技术，高效地解决了智能天线广播信道的赋形问题。反映这一成果的论文“*A Random Beamforming Technique for Omni-directional Coverage in Multiple Antenna Systems*”，于2012年12月发表在“*IEEE Trans. Vehi. Tech., No.99*”上。

2004—2005年，我提出了软频率复用（soft frequency reuse）技术，反映这一成果的论文“*Soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE*”，于2005年5月发表在“*Huawei, R1-050507, 3GPP RAN1 41*”上。该技术解决了长期困扰业界的OFDM的频率复用问题，被广泛研究和应用，成为LTE小区间干扰协调（Inter cell interference coordination）这一领域的事实标准。

2005年，我提出的论文“*Proposal for the reduced set of DL transmission parameters*”，于2005年8日发表在“*R1-050824, 3GPP RAN 1 42*”上，统一了LTE多种带宽的采样率，并用一个IFFT承载多个载波，提高了LTE产业的规模效应，简化了基站和终端的产品架构，降低了产业成本。

这些创新技术均处于无线通信的核心位置，被业界广泛研究和应用，并且已经获得了中国、美国、欧洲的专利授权。

在我的研究工作过程当中，每当获得了一些心得，总有把它们写出来的冲动，但是由于工作的繁忙一直没能实现。从华为离职后，在寻找新的发展平台之前，利用这段时间实现这个愿望，算是对我12年无线创新人生的一个总结，也希望能够对读者有所帮助。

杨学志

2012年10月22日于北京

# 目录

<b>第 1 章 绪 论</b>	<b>1</b>
1.1 这是一本什么样的书	1
1.2 什么是通信	3
1.3 通信的历史	3
<b>第 2 章 帮“菜鸟”复习一下微积分</b>	<b>5</b>
2.1 微积分的创立	5
2.2 极限	7
2.2.1 数列的极限	7
2.2.2 函数的极限	8
2.3 你讨厌数学公式吗	9
2.4 连续	11
2.5 导数	12
2.6 微分	15
2.7 积分	16
2.8 微积分基本定理	18
2.9 积分中值定理	20
2.10 稍微等一等	21
2.11 微积分第一基本定理的证明	21
2.12 微积分第二基本定理的证明	22
2.13 泰勒级数	25
2.14 多元函数与偏导数	26
2.15 后记	28
<b>第 3 章 信号与系统</b>	<b>31</b>
3.1 “信号与系统”是一门什么样的课程	31
3.2 连续系统与离散系统	31
3.3 线性系统	34

3.4	时/移不变系统 . . . . .	34
3.5	线性系统对激励的响应 . . . . .	35
3.5.1	离散 $\delta$ 信号 . . . . .	35
3.5.2	离散卷积 . . . . .	35
3.5.3	连续 $\delta$ 函数 . . . . .	38
3.5.4	连续卷积 . . . . .	40
3.6	卷积的性质 . . . . .	43
<b>第 4 章</b>	<b>复变函数</b>	<b>45</b>
4.1	从实数到复数 . . . . .	45
4.2	复数的四则运算 . . . . .	46
4.3	虚数 $i$ 是怎样的一个数 . . . . .	47
4.4	复指数函数 . . . . .	50
4.5	著名的欧拉公式 . . . . .	52
<b>第 5 章</b>	<b>傅里叶分析</b>	<b>55</b>
5.1	傅里叶级数 . . . . .	55
5.1.1	三角形形式的傅里叶级数 . . . . .	55
5.1.2	为什么正弦信号如此重要 . . . . .	57
5.1.3	什么是频率 . . . . .	58
5.1.4	复指数形式的傅里叶级数 . . . . .	59
5.1.5	理解负频率 . . . . .	59
5.2	傅里叶变换 . . . . .	60
5.2.1	理解谱密度 . . . . .	61
5.2.2	傅里叶变换存在的条件 . . . . .	62
5.3	傅里叶变换的性质 . . . . .	62
5.4	典型函数的傅里叶变换 . . . . .	66
5.5	卷积定理 . . . . .	69
5.6	线性系统的频率特性 . . . . .	70
5.7	离散傅里叶变换 . . . . .	71
5.8	离散序列的连续傅里叶变换 . . . . .	74
5.9	离散傅里叶变换的性质 . . . . .	76
5.10	循环卷积 . . . . .	79
5.11	离散卷积定理 . . . . .	81

<b>第 6 章 采样, 通往数字世界的第一步</b>	<b>85</b>
6.1 采样保持电路	85
6.2 采样的数学表达	86
6.3 周期矩形脉冲	87
6.4 周期冲激脉冲	88
6.5 采样定理	90
6.6 用采样信号重构原信号	91
6.7 频域采样定理	92
6.8 奈奎斯特定理能够被突破吗	94
<b>第 7 章 信号的谱分析</b>	<b>97</b>
7.1 一个简单的信号	97
7.2 频率分辨率	101
7.3 泄漏效应	102
<b>第 8 章 线性空间理论</b>	<b>105</b>
8.1 数学之道	105
8.2 线性空间的定义	105
8.3 度量空间	106
8.4 赋范空间	107
8.5 内积空间	108
8.6 正交与正交基	112
8.7 再看傅里叶变换	115
<b>第 9 章 基本通信链路</b>	<b>119</b>
9.1 为什么需要调制	120
9.2 调制——频谱搬移	122
9.3 相干解调	122
9.4 非相干解调	124
9.5 载波恢复	126
9.6 锁相环	126
9.7 平方环	129
9.8 Costas 环	131
9.9 双边带信号	132
9.10 单边带信号	133
9.11 Hilbert 变换	134

9.12	单边带信号的发送与接收	137
9.13	探究竟,起怀疑	140
9.14	IQ 调制	140
9.15	IQ 信号的复数表达	142
9.16	复数基带信号与复信道	143
9.17	数字调制	146
9.18	奈奎斯特第一准则	147
9.19	脉冲成形滤波器	150
9.20	几种数字调制方式	155
9.21	连续相位调制	157
9.21.1	非连续相位频移键控	159
9.21.2	连续相位频移键控	161
9.21.3	最小频移键控	162
9.21.4	高斯滤波最小频移键控	163
9.21.5	从另外一个视角看 MSK	166
9.22	数字调制技术之华山论剑	169
<b>第 10 章</b>	<b>概率论与随机过程</b>	<b>173</b>
10.1	什么是概率	173
10.2	联合事件和联合概率	175
10.3	条件概率	175
10.4	随机变量	177
10.5	随机变量的统计量	179
10.6	两个典型的概率密度函数	180
10.6.1	平均分布	180
10.6.2	高斯分布	180
10.7	中心极限定理	181
10.8	多随机变量的联合分布	182
10.9	条件概率分布	183
10.10	联合矩	184
10.11	$n$ 维高斯分布	186
10.12	随机过程	187
10.13	平稳随机过程	187
10.14	复随机过程	189
10.15	功率密度谱	190



10.16 循环平稳过程 . . . . .	192
10.17 各态历经过程 . . . . .	193
10.18 随机信号通过线性时不变系统 . . . . .	194
10.19 随机过程的采样定理 . . . . .	196
10.20 离散随机过程和系统 . . . . .	198
10.21 典型随机过程 . . . . .	199
10.22 闲话概率论 . . . . .	201
<b>第 11 章 AWGN 信道的最佳接收机</b>	<b>203</b>
11.1 亩产估计问题 . . . . .	203
11.2 参数估计的模型 . . . . .	204
11.3 离散观测的最大似然准则 . . . . .	204
11.4 连续观测的最大似然准则 . . . . .	206
11.5 最大后验概率准则 . . . . .	208
11.6 匹配滤波器 . . . . .	209
11.7 数字解调 . . . . .	213
11.8 2PAM 的误码率 . . . . .	215
11.9 载波恢复和符号同步 . . . . .	218
11.10 符号同步 . . . . .	219
11.11 无判决反馈的符号同步算法 . . . . .	222
<b>第 12 章 无线信道</b>	<b>227</b>
12.1 慢衰落 . . . . .	227
12.2 多径效应与快衰落 . . . . .	230
12.2.1 二径模型 . . . . .	231
12.2.2 瑞利衰落 . . . . .	232
12.2.3 时间选择性衰落和频率选择性衰落 . . . . .	233
12.3 小结 . . . . .	236
<b>第 13 章 均衡</b>	<b>237</b>
13.1 横向抽头滤波器 . . . . .	237
13.2 MF、ZF 和 MMSE 滤波器 . . . . .	238
13.2.1 匹配滤波器 . . . . .	240
13.2.2 迫零算法 . . . . .	241
13.2.3 最小均方误差算法 . . . . .	243
13.2.4 MF、ZF 和 MMSE 的关系 . . . . .	244

13.2.5	ZF 和 MMSE 的快速算法 . . . . .	244
13.3	数字均衡技术 . . . . .	245
13.3.1	时域均衡 . . . . .	245
13.3.2	频域均衡 . . . . .	246
13.4	信道估计 . . . . .	249
13.4.1	信道估计的系统方程 . . . . .	250
13.4.2	导频设计问题 . . . . .	251
13.4.3	病态问题 . . . . .	252
13.4.4	优化导频和优化矩阵特性 . . . . .	254
13.5	小结 . . . . .	255
<b>第 14 章</b>	<b>多址技术</b>	<b>257</b>
14.1	FDMA 与 TDMA . . . . .	257
14.2	CDMA . . . . .	259
14.2.1	扩频增益 . . . . .	261
14.2.2	正交码 . . . . .	262
14.2.3	Rake 接收机 . . . . .	263
14.2.4	CDMA 的多用户模型和自干扰特性 . . . . .	266
14.2.5	远近效应 . . . . .	268
14.2.6	功率控制 . . . . .	268
14.2.7	CDMA 系统的特性 . . . . .	269
14.2.8	时域多用户检测 . . . . .	270
14.2.9	频域多用户检测 . . . . .	271
14.2.10	CDMA 小结 . . . . .	283
14.3	OFDMA . . . . .	284
14.3.1	OFDM 也是一种 CDMA . . . . .	284
14.3.2	OFDM 如何克服多径效应 . . . . .	286
14.3.3	OFDM 的多用户干扰 . . . . .	289
14.3.4	OFDM 的导频设计和信道估计 . . . . .	290
14.3.5	SC-FDMA . . . . .	291
14.3.6	OFDM 领域的核心专利 . . . . .	293
14.4	多址技术小结 . . . . .	299

<b>第 15 章 信息论</b>	<b>301</b>
15.1 什么是信息和比特	301
15.2 信息熵	304
15.3 复习一下条件概率	305
15.4 联合熵和条件熵	307
15.5 互信息	308
15.6 凸函数与 Jensen 不等式	310
15.7 连续随机变量的微熵	312
15.8 高斯分布的微熵	314
15.9 连续随机变量的互信息	315
15.10 离散信道容量	316
15.11 加性高斯白噪声信道容量	318
15.12 注水定理	320
15.13 信息论小结	320
<b>第 16 章 蜂窝通信</b>	<b>323</b>
16.1 频率复用	323
16.2 切换	324
16.3 避免乒乓切换	325
16.4 同频复用	326
16.5 软切换	327
16.6 分数频率复用	329
16.7 最佳复用因子	331
16.8 软频率复用	334
16.9 软频率复用的应用	336
16.10 软频率复用的局限	338
16.11 多级软频率复用	339
16.12 多级软频率复用的性能	340
16.13 蜂窝通信小结	344
<b>第 17 章 信道编码</b>	<b>347</b>
17.1 信道编码的基本概念	347
17.2 群、环、域	348
17.3 线性分组码	350
17.4 线性分组码的解码算法	353

17.5 编码增益的本质	354
17.6 哈明码	355
17.7 哈达玛码	356
17.7.1 正交码	357
17.7.2 双正交码	357
17.7.3 超正交码	357
17.8 Reed-Muller 码	358
17.9 循环码	360
17.10 卷积码	363
17.11 小结	365
<b>第 18 章 多天线技术</b>	<b>367</b>
18.1 MIMO 信息论	367
18.2 利用 SVD 解读 MIMO	370
18.3 MIMO 预编码	374
18.4 MIMO 接收机算法	375
18.5 智能天线	375
18.6 DOA 估计	378
18.7 智能天线的困难	379
18.8 Alamouti 编码	379
18.9 分集和复用	381
18.10 随机波束赋形	382
18.11 循环延时分集	388
18.12 随机波束赋形与 STBC 结合	390
18.13 MIMO 的局限	392
<b>第 19 章 关于创新的思考</b>	<b>395</b>
19.1 什么是创新	395
19.2 创新的方法	397
19.3 创新的评价方法	400
19.4 创新的驱动力	401
19.5 研究与开发的区别	402
19.6 基于信息不对称的管理不适合创新	403
19.7 创新的发展规律	404
19.8 流程是质量的基础, 人决定质量的高度	405

19.9 基于信誉的授权是创新管理机制的核心 . . . . .	406
19.10 创新的管理 . . . . .	408
19.11 识别创新价值 . . . . .	410
19.12 创新的政治环境 . . . . .	411
19.13 什么样的技术需要申请专利 . . . . .	413
<b>第 20 章 后记</b>	<b>417</b>
3G 霸主 . . . . .	417
4G 变局 . . . . .	420
展望 5G . . . . .	425

# 第1章 绪 论

## 1.1 这是一本什么样的书

我完成博士后研究工作时对通信依然一窍不通，进入华为之后才从 BPSK 开始学习通信。

没有人指导我，我的老师就是书。但是这个书真的不大容易读懂。

科技书籍的常规写法是按照内容来进行编排。这一部分是讲信号的，就会把有关信号的所有内容都罗列进去，那一部分是讲调制的，也是如法炮制。这样的写法符合作者的思维习惯，而且内容的完备性也容易得到保证。

但是对读者来说，这样的写法就造成了一定的困难。

首先知识是有连续性的。如果你要学习 OFDM 技术，就要懂数字信号处理，在此之前要懂信号与系统，再之前是高等数学、线性代数、概率论。如果要懂得深入一些，还要懂复变函数、随机过程、矩阵论、泛函分析、信息论。这些基础性的知识你可能也学过，但是在学习的时候你并不知道这些东西有什么用，大多是应付完考试就还给老师了。缺少了这些基础的知识，学习新知识的时候总是觉得很别扭，很多人也因此放弃了学习。

另外，科技书籍的作者即使不是数学专业，也一般都是有数学背景的，必然受到数学家文化的影响。数学家所追求的数学之美，讲究的是要恰好。恰好的意思就是用最少的语言把问题描述清楚，而不是更少。数学家对简洁之美的追求达到了极致，他们创造了符号语言，如“ $\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0$ , 如果  $|x - x_0| < \delta \Rightarrow |f(x) - A| < \epsilon$ , 则  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = A$ ”。科技作者受到这种文化的影响，也尽量把内容写得更简洁一些。但是这样的数学之美是很多的数学家经过历史的沉淀才凝练出来的，初学者并不一定能够欣赏得来。从心理上说，人们在阅读的时候会追求一目十行的畅快淋漓，把眼睛盯在一页书上一整天都翻不过去的体验是不怎么好的。

本书是一本严肃的介绍通信原理的书籍。与传统科技书籍不同的是，本书按照读者的认知水平的发展来行文。我是从对通信一无所知，到通过读书逐渐理解了通信技术，在这个过程中，最烦恼的事情是遇到知识断点。记得在读博士阶段，我曾经想每个月读一篇 IEEE 的论文，但是读了一篇没有读懂，换了一篇还没有读懂，半年下来一篇也没有读懂，于是就放弃了。原因就是读懂这些论文需要大量的背景知识，如

果不具备这些知识，就是知识断点。本书的内容安排结合了我的学习体验，考虑到读者的知识储备和认知水平，前后的行文有光滑的过渡和连接，让读者能够随着本书从简单的知识逐渐了解一些貌似高深的先进技术。对于某一知识内容，开始的时候只介绍一些简单的必要的知识，后续需要的时候，再补充更多的细节或者提高层次。因此某一项内容，会在本书的多个地方介绍，而每一部分可能都不是很完备。

本书的语言采用了一些口语化的因素，在行文上采用了短段落，希望这样的做法能够减少一些读者阅读的凝重感。

同时，我也放弃了对数学严密性的形式追求。如果你对论述的严密性要求比较高，则可能会发现这里不严密，那里论述不完整，但是严密性在我的心中，从宏观上看，你会发现我的整体思想是严密的。

对于公式的态度，有朋友建议我像霍金的《时间简史》那样不采用公式，我尝试了一下，但是发现这是不可能的。我阅读过《时间简史》，里面虽然没有公式，但是内容并不好懂。本书还是定位于严肃的学术书籍，如果放弃了公式，无法实现科学知识的准确表达。通信技术，说到底就是数学，因此本文还是采用了公式。

考虑到很多读者一看到公式就头疼，本书只采用那些最简单、最基本，也是最重要的公式，在推导的节奏上也考虑了读者的接受程度，并且配合详细的解释和说明，让读者能够看明白。公式其实反映了一种思维方式，希望通过本书，能够引导部分读者熟悉和热爱数学公式，进入严肃的学术领域。

本书取名为《通信之道——从微积分到5G》。道在中国有两层意思：一是路径，二是原理方法，与术相对。这里的道，把两种意思都包括了。

按照第一层意思，希望读者可以顺着本书的叙述顺序，从一些基础的概念逐步建立对通信系统的整体理解。按照我目前的设想，本书包括了数学、信号与系统、数字信号处理、通信原理以及一些实际系统的介绍。一般说来，这是一个非常庞大的工程，我现在还不知道能够走多远。

道与术是中国文化当中的两个层面，大概的意思是，道是道理、规律等“形而上”的概念，而术是具体实现的手段、方法等，属于“形而下”。从我的研究经历来看，书本上的知识虽然卷帙浩瀚，但在实际当中获得应用的只是很少的一部分，就是那些最基础、最本质的部分，这就是通信的道。本书主要在这些方面着墨，而抛弃那些比较复杂和高深的部分，这样也可以在一定程度上解决工程量的难题。

所谓大道至简，本书的道也是简单的道，一本让初学者读得懂的道。相对论是改变了人类时空观的理论，但是狭义相对论非常简单，爱因斯坦只用了一个礼拜就完成了论文。狭义相对论是大二的普通物理课程的内容，甚至连高等数学的知识都没有用到。我做了近20年的研究工作，所做出的有价值的创新成果，也都是非常简单的。

总而言之，这本书用简单的语言给你讲述貌似高深的通信之道。

## 1.2 什么是通信

通信必然发生在两个及以上的人或者物体之间，包括一个发送方和一个或者多个接收方。发送方发出承载信息的信号，接收方收到之后，解调出其中承载的信息，就实现了通信。

大家已经注意到了两个词——信号和信息。怎么理解呢？一种说法是，信号是信息的载体。意思是说，发送方想传达的意思叫信息，而承载这些信息的物理媒介叫信号。

举一个例子，大楼着火了，要告诉楼里面的人马上撤离。“着火了，赶紧走”就是信息，这个信息可以通过多种形式的信号告诉人们。比如广播是一种语音信号，警铃是另外一种声音信号，报警灯和电视用的是光信号。

那么，通信就至少包含了几个环节。首先有需要发送的信息。这个信息的产生过程五花八门，有作家写的，导演拍的，嘴巴说的，或者什么都不做，你只要在那里就是信息。这个信息在发送方那里被加工成信号，然后发送出去，这个过程叫调制。发送的信号到达接收方后并不是不变的，而往往会被扭曲和受到噪声的污染，信道是用来刻画信号是如何被扭曲和污染的。接受方把信息从信号中抽取出来，这个过程叫解调。

接收方要解调出信息，当然需要知道发送方的调制方法，要不然是没法解调的。要实现有效的通信，发送方和接收方是需要合作的。因此，研究如何调制和相应的解调方法，实现更高效的通信，是通信技术的主要部分。

如果接收方并没有获得发送方的许可，而是通过其他途径获得了发送方的调制方法从而获得了发送的信息，这就是窃听。发送方为了防止被窃听，只把调制方法告诉合法的接收方而不让窃听者得到，是保密通信研究的内容。

上面描述的是发送方和接收方直接通信的方式。无论是声、光还是电，信号的传播随着距离的增大会衰减，因此直接通信的方式有一定的距离范围。而在实际当中，如果要给美国的朋友打电话，相隔万里，怎么办呢？这就需要通信网络了。通信网络的边缘部分称作接入网。接入网包含了很多接入点，我先把信息发送到离我最近的接入点；然后通过网络传送到美国离我的朋友最近的接入点，再发送给我的朋友：这样就在网络的帮助下，克服了媒体传播距离的限制，实现了远距离通信。

## 1.3 通信的历史

前些年政府对信息产业有一个说法，即“信息化带动工业化”，这个提法很好。信息不能当饭吃，通信本身不是目的，而是应服务于某个目的。

通信是从什么时候开始的呢？可以这么说，有了生物，就有了通信。生物是有新



陈代谢的，需要发现和吸收外界的营养物质，并把废物排出体外。发现营养物质的过程，就是一个通信过程。很多植物具有向光性，这也是植物接收到太阳的光信号而做出的应激反应。猎豹捕捉羚羊，自然要知道羚羊的运动路线，这也是通信过程。人们之间使用自然语言的沟通，当然也是通信。是不是也可以说，信息化带动生物进化呢？

这些紧密伴随生物本能的通信过程，大家一般不会有意识地把它们归类于通信。烽火狼烟，旗帜号角，击鼓鸣金，驿站传输是比较古老的通信方式。在现代社会中，这些古老的通信方式仍然保留，如交警的指挥手语，特警的作战手语，股票交易员的手语，军舰的旗语，等等。

近代意义上的通信是建立在电磁理论的基础之上的。人类在公元前就发现了电现象和磁现象。长期以来，电和磁是作为两个毫无关系的学科独立发展的。直到1820年，丹麦人汉斯·奥斯特（Hans Christian Oersted）发现了电流的磁效应，建立了电与磁的联系。1831年，英国人迈克尔·法拉第（Michael Faraday）发现了电磁感应定律。1865年，英国人詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）提出了麦克斯韦方程组，建立了经典电动力学，并且预言了电磁波的存在。1888年，德国人海因里希·鲁道夫·赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）用实验证实了电磁波的存在。至此，经典电磁理论大厦构筑完成。

1837年，美国人莫尔斯（Morse, Samrel Finley, Breese）发明了莫尔斯电码和有线电报，开启了电通信的时代。1876年，出生于英国的美国人亚历山大·贝尔（Alexander Graham Bell）发明了电话，成为电话之父。1896年，意大利人伽利尔摩·马可尼（Guglielmo Marchese Marconi）发明了无线电报，开启了无线通信时代。

1948年，贝尔实验室的克劳德·艾尔伍德·香农（Claude Elwood Shannon）在 Bell System Technical Journal 上发表了论文 *A Mathematical Theory of Communication*，标志着信息论的诞生。在这篇划时代的论文当中，香农给出了信息的度量单位 bit 的定义，并且给出了高斯白噪声信道的容量界，指出在这一容量界下，可以实现无差错的信息传输，这就是信道容量定理。按照之前人们的普遍理解，通信一定会出错，即使通过重传可以降低错误率，也不可能降为零。因此，实现无差错传输的信道容量是零。然而香农告诉我们，可以实现无差错传输的通信速率可以是一个远大于零的数值。虽然香农证明了这一极限的存在，却没有给出可行的实现这一极限的方法。在香农限的指引下，全球的科学家开始了长达60多年的探索，寻找逼近极限的通信方法。

受到信息论激励的首先是信道编码技术。信道编码就是在信息比特当中加入一定的冗余比特，从而纠正在传输当中发生的错误，因此信道编码也被称作前向错误纠正（FEC）编码。人们提出了很多种编码方法，如分组码、卷积码、级联码，但是离香农限都有很大的距离。直到1993年 Berro 发明了 Turbo 码，距离香农限只有 0.7dB，才使人们第一次看到香农限的现实可达性。受到 Turbo 码的启发，1962年由 Gallager 提出的 LDPC 码被重新发现，能够实现更接近香农限的性能。