

# 大话移动通信

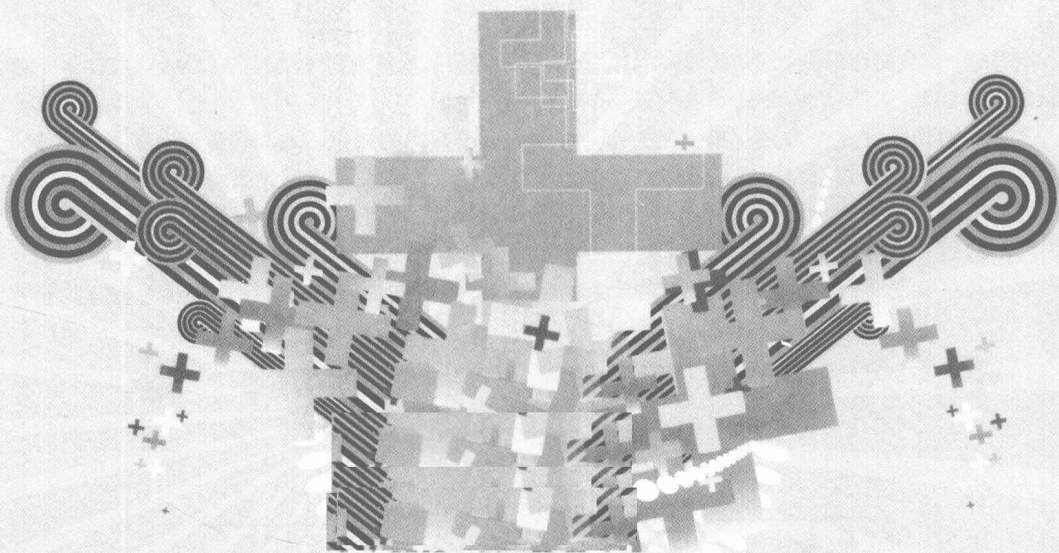
丁奇 阳桢◎著



- ◎ 畅销书《大话无线通信》作者丁奇精心编著的又一力作，为您奉上阅读盛宴
- ◎ 内容涵盖**2G、3G、LTE**和**4G**，与《大话无线通信》相比，更为浅显、全面
- ◎ 秉承《大话无线通信》一书轻松幽默的写作风格，让您真正体会“快乐学习”

# 大话移动通信

丁奇 阳桢◎著



人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

大话移动通信 / 丁奇, 阳桢著. — 北京: 人民邮电出版社, 2011.10  
ISBN 978-7-115-26206-6

I. ①大… II. ①丁… ②阳… III. ①移动通信—基本知识 IV. ①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第163300号

## 内 容 提 要

本书是一本全面介绍移动通信的通俗图书, 涵盖了从通信基本理论到 GSM、WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000、LTE、LTE-Advanced 等各种通信制式的相关知识。

本书的写作坚持 3 个原则: 第一是类比, 接触一个不熟悉的知识, 最为快捷而有效的做法就是将其类比为已经熟悉的知识; 第二是通俗, 行文力求轻松活泼, 激发读者阅读兴趣; 第三是追求“知其然还要知其所以然”, 尽量避免先摆结论后论证的传统讲述方式, 而是和读者一起去发现无线通信应用中出现的问题及解决问题的方式, 让读者通过思考和解决问题获得对知识的更深入的理解。

本书可供移动通信技术的初学者和自学者学习阅读, 也可作为移动通信行业从业人员的参考书。

## 大话移动通信

- 
- ◆ 著 丁 奇 阳 桢  
责任编辑 姚予疆  
执行编辑 刘 洋
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 19.75  
字数: 384 千字 2011 年 10 月第 1 版  
印数: 1-4 000 册 2011 年 10 月北京第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-26206-6

定价: 45.00 元

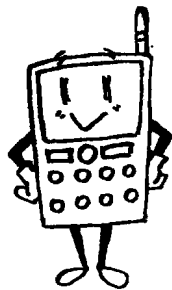
读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号

# 前言

## PREFACE



对于踏入通信行业的人而言，通信的专业知识可谓绝大多数人的苦主。在学校里，我们要被《信号与系统》、《通信原理》、《电磁场与电磁波》等课程反复蹂躏。好不容易出了学校走进社会，以为工程实践知识好对付点吧，才发现 GSM、WCDMA、LTE 也没有一盏是省油的灯。

作者本人也在通信圈子里摸爬滚打，也常常为需要学习如此之多而又艰深的通信知识而头痛不已。作者也在图书馆或者网络上读过《OHM 理工系列》、《编码的奥秘》、《笑傲江湖之三层交换》等书籍或文章，这些书籍或文章由浅入深，非常轻松活泼，很对作者胃口，于是希望通信的圈子里，也多一些这样的内容，而不都是一板一眼的写作方式。遗憾的是，这样的愿望也一直未能如愿。

于是，作者在学习和工作中也有所思有所想，在 C114（通信人家园）上以《无线通信原理通俗解读》为主题进行连载，该帖子目前点击量已过百万，反响热烈超乎作者预期。后来该帖内容经过整理，汇成《大话无线通信》一书在人民邮电出版社出版，依然颇得读者好评，成了当当网 2010 年度最畅销的通信类图书，并获得了畅销图书奖。但《大话无线通信》是以 GSM 为主体来对无线通信进行描述的，很多读者希望了解 WCDMA 是怎么回事，与 TD-SCDMA 有什么区别，为什么 LTE 又放弃了 CDMA 的多址方式，转而投向了 OFDM，这便是作者写作本书的初衷。

本书写作尽量坚持 3 个原则。第一是类比，接触一个不熟悉的知识，最为快捷而一针见血的做法就是将其类比为已经熟悉的知识；第二是通俗，尽量轻松活泼一些，晦涩生硬的文章会让读者看得打瞌睡；第三是知其然还要知其所以然，尽量避免先摆结论后论证的传统讲述方式，而是和读者一起去发现无线通信应用中都会出现哪些问题，然后我们可以采用怎样的方式来解决，这其实也是很多新技术出现的由来。

本书共分为 10 章。第 1 章用粗线条勾勒了一个通信系统的架构，主要的目的是告诉读者声音是如何变成比特流，比特流又是如何还原成声音的，这是通信最本质的东西。学习这些东西能体验到单纯学习工程技术知识所难以体会到的“美感”。应当说在第 1 章中我们告诉了大家两个对讲机是怎样工作的，但是这还不够，手机不是对讲机，它要





复杂的多，第2章就是告诉大家手机比对讲机复杂在哪里。第3章讲解的是 GSM 网络。在这一章里，我们勾勒出了移动通信网的基本形状，大家很快会发现，其他无线通信网都脱胎于这个模子。第4章介绍了 WCDMA 网络。这一章介绍了码分多址的基本概念，这很重要，是三大 3G 标准的基础，而码资源的分配是另一个重要的命题。第5章和第6章分别介绍了 TD-SCDMA 和 cdma2000。在这两章里，主要介绍了这两大标准与 WCDMA 的异同。3G 三大标准有很多相似之处，对比起来学习会事半功倍。第7章和第8章介绍的当下正热的 LTE 和 LTE-Advanced。LTE 和 LTE-Advanced 使得无线下载速率分别达到 100Mbit/s 和 1Gbit/s 的量级，使得“无线的宽带化”成为可能。第9章介绍的是 3GPP 组织。从 GPRS 到 EDGE，再从 WCDMA、TD-SCDMA 到 LTE、LTE-Advanced，这个组织都功不可没，让我们来看看通信标准背后的推动力量。第10章介绍了一些初步的网规网优知识。这部分知识对于运营商的工作人员和希望了解运营商工作的人而言，都非常重要。

读者在阅读本书的时候，可以把全书分为4部分来阅读。第1章到第3章是无线通信的基本知识，可帮助读者弄清楚无线通信的基本构架和基本流程。第4章到第6章介绍的是 3G，看起来复杂，其实核心理念就4个字母：CDMA。第7章到第8章介绍的是 LTE 及其后续演进，核心理念也是4个字母：OFDM。第9章到第10章属于全书的延伸阅读。

接下来是致谢。在这里，要感谢宁夏联通总经理彭胜军、湖南联通综合部经理肖智辉、岳阳联通副总经理刘文剑对我的关心与支持。感谢华为公司的技术专家陈爱军、王振世在技术方面给予的指点与切磋，感谢 selena 提出的一些宝贵意见。另外，也要感谢益阳联通李向东、刘鲲、蒋先遵、郑志强、廖坚强、符宾、旷亚宁、曾玲、张肯攀、罗小辉等诸位领导给予的支持。

最后要感谢我的编辑刘洋先生长期以来对我的支持和鼓励，以及对作品精益求精的态度，这使我从中获益良多。

由于作者水平有限以及时间仓促，书中错误和不当之处在所难免，敬请广大读者和同行专家批评指正。本书编辑邮箱：liuyang@ptpress.com.cn。

作者

# 目录

## Contents

<b>第 1 章 ■ 点对点的无线通信——从贝尔到莫尔斯</b>	<b>1</b>
1.1 古代通信的智慧与烦恼	2
1.2 从“贝尔电话”解剖现代通信系统架构	6
1.2.1 电话之父——贝尔	6
1.2.2 解剖固定电话——模拟通信系统架构	8
1.2.3 “0”和“1”的时代——数字通信系统架构	10
1.2.4 数字通信为何独领风骚	11
1.3 “贝尔话筒”的工作之一——接收信号	13
1.3.1 何谓信号——从狼烟到电磁波	13
1.3.2 信号的时域概念	14
1.3.3 信号的频域概念	16
1.4 “贝尔话筒”的工作之二——分析信号	17
1.4.1 始于欧拉，成于傅里叶	19
1.4.2 周而复始的信号有啥特点——傅里叶级数	20
1.4.3 用统计数据说话——傅里叶分析	22
1.5 “贝尔话筒”的工作之三——如何把模拟信号变为数字信号	24
1.5.1 声音是如何变成比特流的——奈奎斯特采样定理	25
1.5.2 从原始分到标准分——量化	27
1.5.3 从《蒹葭》和《在水一方》说起——也谈编码	30
1.5.4 高中低空各有所属——调制的意义	34
1.6 无线信道之烦恼	37
1.6.1 没有噪声的理想国——奈奎斯特带宽	38
1.6.2 有噪声的真实世界——香农容量	39
1.6.3 高山、大楼及其他——大尺度效应	40



1.6.4 波峰、波谷及其他——小尺度效应	41
<b>第2章 ■ 从电台到大哥大</b>	<b>43</b>
2.1 电台的梦想——点对点的无线通信	43
2.1.1 无线通信组网构想一：用无线电台可以构成一张无线通信网吗	44
2.1.2 资源是有限的——适于组网的无线频段	46
2.1.3 无价的战略资源——无线频谱资源的价值	49
2.1.4 无线通信组网构想二：参照广电网络的架构行不行	50
2.2 基地的困惑——点对多点的无线通信	54
2.2.1 困惑之一：基站下不止一个手机	54
2.2.2 困惑之一（续）：海蒂·拉玛的美丽与高通的魅力	56
2.2.3 困惑之二：无线环境和手机远近在不断变化	62
2.2.4 困惑之三：减少噪声，降低能耗	64
2.2.5 困惑之四：北京时间的价值	66
2.3 大哥大与模拟通信网——多点对多点的无线通信	67
2.3.1 困惑一：手机不知道它在哪个基站下面	67
2.3.2 困惑二：网络不知道手机的位置	69
2.3.3 困惑三：如何保证“移动”着打电话不会有中断	73
2.3.4 困惑四：安全性和盈利？这是个问题	74
<b>第3章 ■ 小笨设计的 GSM 网络——在云端的邮政局</b>	<b>78</b>
3.1 小笨的恼人课题——画一个 GSM 网络出来	78
3.1.1 信息如何流动与交换	79
3.1.2 用户的位置如何进行登记与管理	82
3.1.3 我也要“门牌号码”——GSM 的编号计划	85
3.1.4 街道也要标识——谈谈 GSM 里的接口	88
3.2 GSM 是怎样炼成的——空中接口的 4 个步骤	90
3.2.1 欲通信，先同步	92
3.2.2 欲接入，先申请	94



# 目录

## Contents

3.2.3	欲对话，先寻人	95
3.2.4	先寒暄，后长谈	97
3.3	从邮政到快递公司——步入信息时代的 GPRS 和 EDGE	99
<b>第 4 章</b>	<b>■ 小笨设计的 WCDMA 网络—— 在云端的物流公司</b>	<b>103</b>
4.1	小笨的恼人课题——画一个 WCDMA 网络出来	104
4.1.1	先继承，后创新——WCDMA 的网络结构	104
4.1.2	源自泰勒管理——分层服务	106
4.2	少年 WCDMA 之烦恼一——我有哪些资源	107
4.2.1	容量——移动通信的“阿喀琉斯之踵”	108
4.2.2	码分多址的胜负手——功率控制与软切换	112
4.2.3	搞通信如同做物流	119
4.2.4	组建运输大队——OVSF 码	122
4.2.5	运输大队的编号——扰码	123
4.3	少年 WCDMA 之烦恼二——资源如何分配	125
4.3.1	年年岁岁花相似——无线的标准套路	126
4.3.2	当好管家不容易——OVSF 码的分配	126
4.4	少年 WCDMA 之烦恼三——调度是个技术活	138
4.4.1	质检保证无差错进行传输	139
4.4.2	调度确保资源高效利用	141
4.5	少年 WCDMA 之烦恼四——如何应对流量飙升	144
4.5.1	“Web1.0 时代”——HSDPA	145
4.5.2	“Web2.0 时代”——HSUPA	149
4.5.3	无线宽带再提速——HSPA+	151
<b>第 5 章</b>	<b>■ TD-SCDMA，中国造</b>	<b>154</b>
5.1	从中国制造到中国创造——谈谈 TD-SCDMA 的发源	154
5.1.1	破局——TD-SCDMA 草创	156
5.1.2	移动通信标准背后的无形之手	157
5.1.3	TD-SCDMA 标准发展概述	158



5.2 似曾相识燕归来——谈谈 TD-SCDMA 与 WCDMA	159
5.3 秀秀“TD-SCDMA”	162
5.3.1 秀秀“TD”	162
5.3.2 秀秀“SCDMA”	169
5.4 秀秀 TD-SCDMA 的关键绝活	173
5.4.1 一如那舞台上的聚光灯——智能天线	173
5.4.2 先同步，后切换——接力切换技术	177
5.4.3 事不关己，不准挂起——联合检测技术	179
5.4.4 我是出色的交通指挥员——动态分配信道	181
5.4.5 看我七十二变——软件无线电	184
<b>第 6 章 ■ cdma2000，高通最后的独行</b>	<b>187</b>
6.1 CDMA，高通发现新大陆	190
6.2 IS-95 横空出世	192
6.2.1 与 GSM 同场 PK	193
6.2.2 为啥 cdma2000 也需要 GPS	195
6.2.3 蛋糕怎么切——IS-95 的信道问题	196
6.3 冤家路窄——CDMA 1X 与 GPRS	197
6.3.1 花开两朵，各表一枝	198
6.3.2 英雄所见略同——核心网的继承与变化	198
6.3.3 更快更高更强——空口的蜕变	200
6.4 迈向 3G 时代——EV-DO 与 EV-DV	202
6.4.1 机动车和自行车分道行驶——EV-DO	203
6.4.2 机动车与非机动车混合行驶——EV-DV	207
<b>第 7 章 ■ LTE 网络——更扁平，更高效</b>	<b>209</b>
7.1 LTE 动力——跟 WiMAX 争武林盟主	209
7.2 LTE 方向——移动通信的宽带化	212
7.3 先有的，后放矢——LTE 需求	214
7.4 绕开高通的壁垒——LTE 关键技术之 OFDM	214
7.4.1 这该死的码间串扰——谈谈 OFDM 中的“FDMA”	216





# 目录

Contents

7.4.2	这正交的子载波——谈谈 OFDM 的“O”	220
7.4.3	为了完美的信号而努力——保护间隔和循环前缀	223
7.5	条条大路通罗马——关键技术之 MIMO	226
7.6	纵向删减，横向拉通——LTE 的卓越之道	230
7.6.1	世界是平的——扁平化的 LTE 无线网	232
7.6.2	车同轴，路同轨——全 IP 化的 LTE 核心网	236
7.7	万变不离其宗——LTE 的物理层结构与流程	239
7.7.1	“井田制”——GSM 和 LTE 的资源划分之道	239
7.7.2	“面经”是怎样总结出来的——LTE 的物理层工作流程	243
<b>第 8 章</b>	<b>■ 迈向 4G——LTE-Advanced</b>	<b>248</b>
8.1	4G 的愿景——“我有一个梦想”升级版	248
8.2	让梦想照进现实——LTE-Advanced 关键技术	251
8.2.1	零散的资源能放到一起用么？——载波聚合	252
8.2.2	打破部门墙——CoMP	253
8.2.3	4G 时代的二传手——中继 (Relay)	256
8.2.4	家里也可以布放基站？——femto	257
8.2.5	网络可以自己规划和优化？——SON 网络	260
<b>第 9 章</b>	<b>■ 通信界的规则制定者——3GPP</b>	<b>264</b>
9.1	3GPP 组织简介	264
9.2	3GPP 的组织架构	265
9.3	在 PK 与妥协中前行——3GPP 协议	266
9.4	无线通信中的那些足迹——3GPP 各版本浅析	268
<b>第 10 章</b>	<b>■ 初识网规网优</b>	<b>275</b>
10.1	一个永恒的话题——基站能覆盖多远	277
10.2	谁让你变成了地图测绘人员——谈谈那该死的路测和 CQT 测试	281
10.3	一场网优的人民战争——MR 测量报告	285
10.4	运营商最关注的网络指标——掉话率、接通率、数据业务下载速率	288



## 大话移动通信

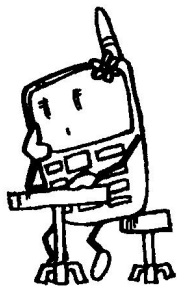
10.4.1	最糟糕的用户体验——掉话	288
10.4.2	你不能老让我找不到人——谈谈接通率	289
10.4.3	未雨绸缪，争夺未来制高点——数据业务下载速率	290
10.5	常见的几个网络问题——单通、串音、乒乓重选	291
	后记	294
	缩略语	295
	参考文献	303

# 目录

*Contents*

# 第 1 章

## Chapter 1



# 点对点的无线通信—— 从贝尔到莫尔斯

无线通信的知识有两种，一种谓之“道”，另一种谓之“术”。

“术”的层面的内容是广大工程师经常要用到的，我们敲打着冰冷的键盘，查看着 GSM 或是 WCDMA 网元的拓扑结构，处理单板故障，分析信令流程，我们手里捧着操作说明书、培训教材或是 3GPP 协议。其实在这些操作规则和通信协议的背后，都隐藏着一种叫做“道”的东西，它深刻揭露了通信的本质，展现了通信的美学。

“道”又包含了两个层面的内容。一个层面的内容叫做“通信原理”，具体一点来说可以由大学里的若干门课程组成，比如“信号与系统”、“随机过程分析”、“电磁场与电磁波”、“无线通信原理”，这些课程告诉我们一些最本质的东西，如声音如何变成比特流、比特流如何承载在电磁波上、多宽频谱的电磁波在既定信噪比的情况下最多只能承载多少信息。另一个层面的内容叫做“管理”，管理的本质就是在既定约束资源的条件上追求最大产出，而放到无线通信上，那么就是要在既定带宽（比如 200kHz 或者 5MHz）的情况下追求最多用户可以打电话或者下载东西的速率怎样做到更快。

本书的主要目的是介绍“术”，就是讲解如何快速了解一个通信系统，比如说 GSM、CDMA、WCDMA、TD-SCDMA；但是介绍“术”的同时，如有可能，也尽量去揭示一下它背后隐藏的规律和蕴涵的智慧，无论是“原理”层面的还是“管理”层面的。

具体到第 1 章，就是想先介绍一下“原理”层面的内容，也就是讲述一下声音是如何通过本端“对讲机”转换为比特流并通过电磁波传送到对端“对讲机”的。大家注意一下，“对讲机”和“手机”是有本质区别的，前者只是一个点对点的通信，而后者中间可是有一个庞大的通信网络。但前者却是后者的基础，没有点对点的通信，就不会有移动通信网。所以我们的第 1 章，就从点对点的无线通信开始，这部分内容属于大学课程



里“通信原理”的范畴，数学知识很多，非常复杂，本书为了方便读者阅读，只介绍最基础的内容，以便于读者能快速了解个梗概。

### 1.1 古代通信的智慧与烦恼

纸笺墨香的时代正在悄然离我们远去，8毛一张的邮票也渐渐变成了收藏品。所以一提起“通信”这个词，在我们大脑中首先跳出来的词大概就是手机、3G、短信这些人们日常生活中用得最多的东西。但是在进入正题之前，我们不妨先来回溯一下中国历史上的一些通信手段。这样做有两个目的：一是可以了解一下通信系统是如何随着人类的生活半径而变化的。比如元谋人时代，是没有驿站的，因为大家都在周边打转；而现在，也没有银河系通信系统，因为人类的足迹最远也就到过月球。二来古人是很聪明的，连中继、加密等现代通信手段古人也早都用到了，我们也可以从中学到不少智慧。

最早的无线通信应当就是家里人之间的对话了，春秋时期的思想家老子为我们描述了一个理想的上古时代——“鸡犬之声相闻，老死不相往来”。也就是说，你平时的日常活动就局限于那一亩三分地了，跟邻里都没什么交道。说起通信的需求，也就是跟家里人说说话就可以了，都不用很大声，离“通信基本靠吼”都还有一段距离。

细究起来，这个“无线通信系统”和我们现代的无线通信系统还真有不少相似之处。说话的人可以看作发射机，听对方说话的人可以看作接收机，人之间采用的语言（汉语、英语乃至法语）可以看作信源编码，承载的物理媒介都是空气……

不同的是，人之间传递信号是通过声波而非电磁波。声波就传递这么远，也不需要调制，即使你想进行调制，你的声带和喉咙也不会答应，因为它们可没这功能。

另外，人之间交流也很少需要信道编码，因为你一般都能听清楚对方的说话。即使偶尔你的“解码”出现问题（你没听清楚对方说话），你的大脑也比那笨笨的接收机要聪明得多，根本不需要进行循环冗余校验（CRC, Cyclic Redundancy Check）就知道你接收的信息不完全、不充分、难以理解，然后你的大脑就丢弃这个信息包，并向发信方申请一个重传——“俺没听清楚，麻烦您再说一遍”。呃，这可是收发信机在数据链路层上经典的检错和纠错机制。

如果说时间就停在这里不再向前也就省事了，人与人之间天然的通信系统已经够用了，不用费尽脑筋再去开发那么多通信系统。然而老子的理想终究没有变成现实，人们不仅要跟邻里打交道，还要跟方圆百里，方圆千里，甚至地球上任何一个角落的人打交道，于是，通信的麻烦就来了！

话说春秋不仅有老子这样无为而治的圣人，也有时刻梦想着封侯拜相、开疆辟土的



野心家，比如说吴起！他要建功立业，他要征伐四方，那他就得有军队，等他组建了军队，问题来了——他发现他嗓门不够大，想吼一嗓子让数平方千米上的几万人的军队都听到他的命令，根本就没有可能。于是，他不得不建立军队的通信系统，以保证每个人都能明白他的将令。于是乎，为了延展他的嗓门，有两种工具就被搬上历史舞台了，那就是金和鼓，大家都知道一句话“闻鼓而进，闻金而退”，这算是一种比较简单的指挥通信系统。但是这个通信系统的信息量太小（假如闻鼓而进用“1”表示的话，闻金而退就是“0”了，总共就1个比特的容量），不足以满足指挥作战的需要。假如说你要摆个八门金锁阵，根据敌军的变化来不断改变阵势，这个该怎么办？

对于这个问题，兵圣孙武同学早有见解，他在《孙子兵法》的第五篇《势篇》里有一句话——“孙子曰：凡制众如制寡，分数是也；斗众如斗寡，形名是也。”所谓“分数”，即是对部队进行编号，这样每条命令就能根据编号找到每个独立的作战小单元（这与现代通信有异曲同工之妙，移动通信中的每个通信单元，比如手机、BTS、BSC都有自己的编号）；所谓“形名”，指的就是旗语，用旗语指挥部队变阵和进行战斗，因为旗帜能往各个方向运动，排列组合无数种，信息量显然大大高于金和鼓。

将士卒整编成行伍队列，以旗语指挥队伍列阵和变阵，闻鼓则进，闻金则退，这就基本组成了一支军队指挥某次战斗的相对完善的通信系统。这个通信系统相比于人和人之间的对话，在通信距离上有了长足的进步，显而易见，无论是鼓点声、敲击金镗的声音，还是旗语，其能传播的范围比人和人之间的对话要大得多。

但是这个系统的缺点也是很明显的，那就是能覆盖的范围依然太有限了，一个再优秀的将领，即使在开阔的地形下，其有效指挥半径也很难超过5里路。这就不难理解，为什么古代大的战役几乎都发生在一个很小的区域，而不是像现代战争一样发生在一整条战线上。道理很简单，战争是需要快速做出判断和决策并根据实际情况不断变化的，战线拉长了，指挥系统受制于通信的能力够不着一线部队。所以指挥官为了有效指挥军队，其部队展开的宽度通常不会太宽。我们对比一下古代战争和现代战争就知道了。比如长平之战、巨鹿之战、昆阳之战，这些双方投入总兵力超过50万的古代著名战役都以某个地点命名，而到了现代，这个级别的战役往往以区域命名了，比如辽沈战役、淮海战役。通信的发展从某种程度上改变了战争的方式，这句话并不夸张。

这是一定空间范围内的通信，我们可以通过鼓点和旌旗，放大声音的音量和视觉标的大小，来延展我们的通信距离。可是对于更远的距离，比如长安和雁门，视觉和听觉都无能为力。于是我们在神话中构造出了“千里眼”和“顺风耳”，不过那仅仅是神话，仅仅只能代表人类的一种美好的意愿而已。

在长安和雁门这种超长距离的信息交换中，就当年而言，最要命和最要紧的信息肯定是北方游牧民族入侵的消息。为了及时传递这种信息，烽火台应运而生，通过一站一





站地燃起狼烟来完成自边关向都城的信息传递，“朔方烽火照甘泉，长安飞将出祁连”那是一幅怎样的景象啊。值得注意的是，烽火台和现代通信系统有一个共同的概念，那就是“中继”，光信号会随着距离而衰减，所以每隔一段距离就要建一个烽火台，重新燃起狼烟，相当于把衰减的信号重新放大一次，只有这样，入侵的信号才能从遥远的雁门传到西汉王朝的心脏——长安。与此类似，电磁信号在介质中的传播，无论是5类双绞线还是电缆，抑或是空气，都会有衰减和能量损失，因此隔一定的距离也同样需要中继。捣鼓过网络的人都知道，一根网线的距离不能超过100m，道理和烽火台类似，信号在网线中也是要衰减的，超过100m之后，信号衰减所带来的误码会使通信质量下降得令人难以接受。

就通信系统的健壮性和安全性而言，烽火台并不是百分之百值得信赖的。因为一连串烽火台组成的是一条单链，如果其中一个点出现问题，那么整个系统的可靠性将难以得到保障。《三国演义》都称关羽是大意失荆州，其实换个角度来说，他的情报系统（也可以理解为通信系统）是很有问题的，因为直到荆州多地失陷之后，他都并不知道，依然在前线和曹操打得不亦乐乎。情报系统的瘫痪，信息传递的不畅，这才是关羽失荆州的罪魁祸首，我们不妨来看看问题出在哪里。

关羽水淹七军之后，兵锋直指宛洛，曹操慌了，从后方调来了徐晃的援军。关羽为了与之匹敌，被迫将荆州的预备队调往前线。荆州的预备队调走之后，必须要防备东吴入侵，关羽的策略是通过烽火台来传递信息，一有入侵，及时从前线回援荆州即可。诸葛亮的隆中对砸就砸在关羽这一招上头了，因为那该死的烽火台，它居然是一条单链，居然出了问题没有任何保障！

此时的吕蒙已经是饱读诗书、诡计多端的吕蒙了，按他自己的说法，已不再是当年的愣头青“吴下阿蒙”了。这个情报系统的破绽他岂能看不出来。于是吕蒙及其士兵化妆成白衣商人，以躲雨为由进入了荆州防线的烽火台，手起刀落解决了守卫，结果荆州整个的预警系统就此失灵，吕蒙趁机攻占江陵，糜芳投降。荆州一丢，关羽进退失据，最终败走麦城。从这个例子我们不难看出，对于一个通信系统而言，出了问题能有备份措施是多么重要，所以现在光缆都提倡双路由，板件都提倡双备份，连操作人员都讲究互相备份，就是为了避免一个单点出问题，整个系统崩溃。

然而，烽火台并不是古代主流的远距离通信系统，虽然这种系统传播速度很快（光速是挺快的，点火也费不了多少时间）。不能成为主流的原因之一是其成本高昂（一是建设烽火台是件成本高昂的事情；二是到处找狼粪也不容易），路径固定且单一（烽火台可不是应急通信车，说开走就开走）。最要命的原因还是烽火台能够传递的信息量实在是太多了，就那么几堆狼粪，横竖排列组合就那么几种。虽然狼烟的原理和旗语颇有几分相似，但是你没法控制狼烟的运动，没法把狼烟搞得像旗语一样千变万化，那你就注定传



递不了更多信息。

中国古代最主流的远距离通信系统毫无疑问是以驿站为基础的“邮局”系统，我们经常古装影视剧中看到的所谓“八百里加急”就是这玩意儿。这个系统就是骑着马疯狂地赶路送信，遇着驿站就换马以保持行进的速度，看起来似乎没有什么可说的。值得注意的是，这么长的距离，你的信使是完全可能半路上被劫杀的，这就引发了通信安全的问题。这个问题早在周朝就有解决方案，一为对发送信息进行加密，称为“阴符”；另一种方法和 GSM 中的跳频加密颇为相似，即将信息分为几份，通过不同的人采用不同的路径发送出去，到目的地再合为一起，就算其中一份被截，也不会泄密。以下内容来自太公姜子牙所著《六韬》一书。



#### 《阴符第二十四》

武王问太公曰：引兵深入诸侯之地，三军猝，有缓急，或利或害。吾将以近通远，从中应外，以给三军之用。为之奈何？

太公曰：主与将，有阴符，凡八等。有大胜克敌之符，长一尺。破军杀将之符，长九寸。降城得邑之符，长八寸……

这一段就通信保密而言很经典，武王深入重地，想和大后方传递消息，就问太公咋办。姜子牙说好办啊，咱们对信源重新搞一套编码就是了，比如你杀了对方大将，就不要写“破军杀将”4个字的小纸条传给俺了，直接让信使送俺一块9寸长的木板就行了，这个加密方式只有你和俺知道，不怕泄密。

我们很快就发现，阴符和烽火台一样，面临一个致命的弱点，就是能够传递的信息量太少，或者说编码太少。阴符只能传递8种消息，而且很不详细，对于纷繁复杂的战地情况而言显然是不够的。这个时候还没有发明计算机，没有二进制，没有ASCII编码，也没有指数和对数，想对每个汉字进行加密简直是个不可能完成的任务。

聪明的周武王很快发现了阴符的弱点，心里开始打鼓，虽说将在外君命有所不受，但是这帮大将领兵在外每天不请示不汇报俺心里实在不踏实，要请示汇报的话8个符号实在不够，如之奈何？于是清清嗓子跟太公说我很思念前线的将领，如果想跟他们多说话，你有没有好的办法呢？（《阴书第二十五》武王问太公曰：引兵深入诸侯之地……其事繁多，符不能明；相去辽远，语言不通，为之奈何？）

姜子牙可是《孙子兵法》里标榜的“上智”人物，何等聪明的人啊，他马上想到了办法，就是仍然用书信，但是将一封书信分成3份，由3个不同的人通过不同的路线传递，内容分离3个人互相不知道内情，即使路上被拦截掉一份，也不会出现泄密的问题，最后这3份书信都会传到一个将领手里，这就叫阴书。（《阴书第二十五》太公曰：当用书，不用符……书皆一合再离，三发而一知，此谓阴书。敌虽圣智，莫之能识。）



我们看到，中国古代的人们因为生产生活的需要，随着活动区域的增加逐渐延展了通信系统的距离，从金、鼓、旗语到狼烟、驿站，在通信系统的及时性（烽火中继、八百里加急）、安全性（加密、跳频）、系统性（编号）等方面都有出色的表现。

这些通信系统其所展示的智慧是毋庸置疑的，但是它们也明显存在成本、及时性、传递范围、安全性等多方面的问题。人们一直希望能有一种通信方式，能传播千里，覆盖神州的每一个角落；能传播迅速，如雷鸣闪电一样快，并把这种愿望幻化成了神话，那就是“千里眼”和“顺风耳”。可惜的是，人们一直没有找到这样的通信方式，远方的亲人要通信，依然不得不走驿站或者托人转寄这种高成本的方式。高昂的成本、低效的信息传递造成音讯阻隔，亲人们相思难了，因此杜甫不禁感慨“家书抵万金”。

人们梦想中的通信方式直到 1864 年才初现端倪，在这一年里，麦克斯韦预言了世界上存在这样一种东西，它存在于广袤的天地之间，以光速传播，这种东西被命名为电磁波！麦克斯韦预言电磁波的存在，最终也遭到了学者的怀疑。毕竟电磁波是如此玄妙，无形无影，无法琢磨。

直到 1887 年，赫兹通过实验证实了麦克斯韦关于电磁波存在的预言，一个崭新的电磁世界的大门才向人们打开。但是赫兹只是一位纯粹的科学家，他没有看到这种以光速传播的电磁波所蕴涵的巨大的商业价值——作为话音远距离无线传送的载体。不过人们并没有等太久，1895 年，马可尼发明无线电报机，人类正式进入无线通信时代！

## 1.2 从“贝尔电话”解剖现代通信系统架构

虽然本书讲述的主要内容是移动通信，第 1 章的主旨也是点对点的无线通信的过程。但是在本节及接下来的章节中，作者依然打算从固定电话入手，勾勒出一个现代通信系统的整体框架。因为固定电话相对移动电话而言比较简单，其实现机理也有很多相似之处。我们首先对整体的架构有个系统的认识，接下来对于具体细节的学习才不至于迷失方向，才不至于陷入盲人摸象的尴尬。

### 1.2.1 电话之父——贝尔

通信经历了一个从模拟通信到数字通信的发展过程，说起模拟通信，就不能不先提到贝尔（如图 1.1 所示）。亚历山大·格雷厄姆·贝尔是公认的电话之父，以他的名字命名的贝尔实验室更是因为一直引领通信潮流而享誉世界。值得注意的是，贝尔原来是一个话音专业的教授，对发声原理有着深刻的认识，这对他后来发明电话或许不无裨益。有趣的是，发明电报的莫尔斯也非电磁专业的科班出身。莫尔斯 41 岁时还只是一个画家，