

军事通信系统原理

[美]唐·吉·托里埃里 著

蒋锦星 应新瑜 译

郭梯云 审校



西北电讯工程学院出版社

军事通信系统原理

[美] 唐·吉·托里埃里 著

蒋锦星 应新瑜 译

郭梯云 审校

西北电讯工程学院出版社

1985

Principles of Military Communication Systems

Don J. Torrieri

Artech House, Inc. (1981)

内 容 简 介

本书分析、研究了与军事通信系统有关的通信理论问题，对应用于无线电通信和电子对抗中的各种新技术问题都作了深入的讨论。

全书共六章。第一章介绍了功率和传播的基本问题。第二、三章研究扩展频谱通信系统，其中第二章介绍伪噪声系统，第三章介绍跳频系统。第四章讨论侦听系统在检测、频率估计和测向三方面的基本概念和实现的方法。第五章专门研究抑制干扰的自适应天线系统。第六章介绍密码在数字通信中的应用。

本书可作为通信、雷达、电子对抗专业的高年级大学生和研究生的教学参考书，也可供相应专业的工程技术人员阅读参考。

军事通信系统原理

〔美〕唐·吉·托里埃里 著

蒋锦星 应新瑜 译 郭梯云 审校

西北电讯工程学院出版社出版

西安市雁塔区双桥头印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 8 14/32 字数 202千字

1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷 印数1-6,000

书号：15322·31

定价：1.80元

译者的话

军事通信系统与民用通信系统，就其技术基础与经济基础而言是相同的，在各类军用和民用系统中，固定通信站、地面移动系统、海用系统、空用系统以及卫星系统之间的交换系统等也是相当类似的。但是，军用系统与民用系统毕竟是不同的，其本质差别用一个词来概括，就是“生存能力”。因为军用系统是在军事环境中使用的，军事环境的情况变化范围很大：可以是太平时期象民用系统所处的环境，也可能是局部战争乃至全面爆发核战争时的战场环境。军事通信系统应当在上面所说的军事环境中确保可靠通信，当然不能期望一个系统在任何军事环境中都能可靠地工作，但应当期望一个系统在某种军事环境中可靠工作。这就要求在设计每一个军事通信系统时，考虑到在什么样的具体军事环境中工作，并作出适当权衡。如果在民用系统中权衡的主要因素是通信能力与费用的关系，那么，在军用通信系统中权衡的主要因素中还应当加上一个适当反映“生存能力”的量度。

在军事环境中的“生存能力”包含两个方面的含义，一是指通信系统在物质方面的生存能力，另一个是指整个通信系统功能方面的生存能力。本书讨论的正是后一种含义。在军事环境中争取生存能力的过程，可以看成是一场通信战，其目的正是为了破坏敌方通信系统的功能而保证我方通信系统正常工作。

本书从系统功能方面系统地介绍军事通信系统的原理，及在干扰与反干扰的对抗中如何隐蔽自己、摆脱敌人干扰，如何发现敌人通信机并使之丧失通信功能等问题。有关这方面内容的单行本书籍，过去还没有见诸公开出版，因此本书也许是这方面的第一本。全书简明扼要，也比较系统完整，书中的一些例子和曲线颇有参考价值。对于书中已经发现的若干错误已作了改正而不一

一注出。

本书翻译工作由蒋锦星（前言、第一、二、三章，附录）、应新瑜（第四、五、六章）承担。郭梯云教授承担了全书的审校工作。王育民同志对第六章的翻译工作给了不少帮助。郭建屏同志对译文的校勘做了大量细致的工作，提出了不少宝贵的意见。对此，译者深表谢意。由于译者业务水平不高，加之翻译工作较为匆忙，错误一定难免，望读者不吝指教。

前 言

军用通信系统与普通通信系统不同，在设计时必须考虑到它们将在敌对环境中工作。因而在普通通信系统中也许是毫不相干、甚至是有害的特殊技术，对于要在战场中坚持工作的通信系统来说，却是必需的。本书旨在分析、研究那些跟军事系统有特别关系的通信理论问题。这些问题还没有集中在任何一本教科书中透彻地讨论过。

本书着重于原理、概念及在系统高度上的分析，对那些由于技术突飞猛进而容易变得过时的具体实现方法及硬件，则很少强调。

本书供研究生和从事实际工作的工程师阅读，他们应当具备通信理论方面的基础〔例如 Ziemer 和 Tranter 的《通信原理》(1976)所提供的基础〕。此外，对第五章的部分内容需要有基本矩阵分析方面的知识。虽然，要充分理解本书所阐述的问题需有足够的数学基础，但读者往往能跳过数学细节，把注意力集中在最终结果上，这对问题的理解不会有很大损失。

本书注意避免过多地使用那些充满于军事文献中的术语和缩略词，适量的简明术语对于想使用这些术语的人是有用的。一般来说，只列出最有用和最感兴趣的参考文献，并优先列出容易理解的教科书和文章。

第一章介绍功率和传播的基本问题，估计各种类型的人为干扰对调幅、调频、调相及频移键控系统实施干扰的效果。

第二、第三两章研究扩展频谱系统，这种系统对于侦听和人为干扰，都有潜在的抗拒能力。第二章研究了各种伪噪声系统的基本特性，导出了使伪噪声波形隐蔽起来免被发现的必要条件，

PAC 65/62

确定了存在各种类型干扰时的比特错误概率，讨论了在伪噪声系统中减少相互干扰的方法、实施干扰的策略及捕获技术。

第三章讨论跳频系统对各种类型干扰的响应。快跳频和慢跳频是依照每次跳频的符号数来定义的。本章也分析了编码、比特交织及信道选择对跳频系统遭受人为干扰敏感性的影响。确定了实施有效部分频带干扰及有效重发器干扰的条件。讨论了各种类型的数据调制、捕获问题及混合的跳频伪噪声系统。说明了跳频系统和伪噪声系统在性能上的差别，导出了某个跳频系统工作于由同类系统组成的网络中的错误概率。

不论侦听系统的最终目的如何，它几乎总要完成三种基本功能：检测、频率估计和测向。在第四章中，假定在对要侦听的信号几乎不了解的情况下，从系统的角度提出有关侦听三要素的基本概念和问题。确定了辐射计和互相关器检测的能力。描述和分析了用来估计频率的分路技术、离散傅里叶变换、声光技术、瞬时频率测量、扫频超外差接收机及微扫接收机等。本章也研究了采用能量比较系统测向和用干涉计测向的问题。整个第四章研究扩展频谱侦听的专门问题。

第五章专门研究抑制干扰的自适应天线系统。第一部分是基本原理的启发式研究。旁瓣对消器的原理是根据噪声对消、自适应波束形成及零调向加以阐述的。本章的其余部分，更多地运用高等数学来推导自适应系统的经典理论，这些结果可以应用于抽头延迟线滤波器和频域阵列处理滤波器。噪声自适应对消的一般理论，是跟旁瓣对消器、自适应单元的经典理论及自适应陷波滤波器等相联系的。自适应天线系统由受约束的最小功率准则导出，这个准则限制了对所需信号的偶然对消。并指出，自适应极化鉴别提供了一种有助于抑制干扰的补充办法。

当敌人具有侦听消息并能准确地将其破译的技术能力时，可用密码技术来确保消息的秘密。第六章就几种数字通信所用密码

的基本类型给以定义並加以比较。本章着重讨论由于通信系统中采用密码而增大的错误率。对密码数字通信中的同步和人为干扰问题也作了阐述。

编写本书所需知识及动力，得自我在美军电子研究和开发司令部 (ERADCOM) 期间的工作。本书大部分材料引自报告、备忘录以及我在工作过程中所作的笔记。

D · J · Torrieri

目 录

前 言

第一章 通信战

1.1	功率和传播	(1)
1.2	模拟通信	(6)
1.3	数字通信: 频移键控	(11)
1.4	脉冲干扰	(16)
	参考文献	(18)

第二章 伪噪声扩展频谱系统

2.1	原理	(19)
2.2	伪噪声序列	(25)
2.3	伪噪声波形的隐蔽	(30)
2.4	存在干扰时的错误概率	(34)
2.5	人为干扰	(44)
2.6	码同步	(44)
2.7	伪噪声网络	(47)
2.8	突发通信系统	(50)
	参考文献	(53)

第三章 跳频

3.1	引言	(54)
3.2	具有比特交织的快跳频和慢跳频	(59)
3.3	不用交织的慢速跳频	(62)
3.4	条件比特错误概率	(63)
3.5	编码的影响	(66)
3.6	人为部分频带干扰	(69)
3.7	重发器干扰	(72)

3.8	其它数据调制	(76)
3.9	码同步	(80)
3.10	混合系统	(82)
3.11	跳频系统和伪噪声系统的比较	(83)
3.12	跳频网络	(85)
	参考文献	(104)

第四章 侦听

4.1	引言	(106)
4.2	检测	(106)
4.3	频率估计	(125)
4.4	测向	(144)
4.5	反侦听	(162)
	参考文献	(163)

第五章 自适应天线系统

5.1	引言	(165)
5.2	旁瓣对消器	(166)
5.2.1	稳态运算	(168)
5.2.2	自适应零调向	(175)
5.3	经典理论	(177)
5.3.1	信噪比准则	(181)
5.3.2	均方误差准则	(183)
5.3.3	最陡下降	(184)
5.4	自适应噪声对消	(188)
5.5	约束最小功率准则	(190)
5.6	威得罗-哈夫算法的收敛性	(194)
5.7	自适应极化鉴别	(196)
	参考文献	(199)

第六章 密码数字通信

6.1	密码和密码译法研究	(201)
-----	-----------	-------

6.2	流密码的错误概率界和集合平均.....	(209)
6.3	分组密码的错误概率界和集合平均.....	(215)
6.4	由密码术引起的性能下降.....	(217)
6.5	错误校正.....	(219)
6.6	同步和人为干扰.....	(221)
6.7	安全性.....	(225)
	参考文献.....	(226)
附录A	频移键控时条件比特错误概率的推导.....	(228)
附录B	非中心的 χ^2 分布.....	(235)
附录C	离散傅里叶变换及信号频谱.....	(238)
附录D	矩阵分析.....	(240)
D.1	基本结果.....	(240)
D.2	埃尔米特和二次型.....	(243)
D.3	梯度.....	(246)
D.4	线性离散时间方程.....	(247)
索 引		(249)

第一章 通 信 战

1.1 功率和传播

通信战，是潜在的通信者对企图侦听和／或破坏其通信的敌人进行斗争的一个组成部分。隐蔽通信技术的发展，已经大大减小了侦听和破译的可能性，因而战场上的军事通信，将被迫在人为干扰的环境中工作，这一点看来是不可避免的。但是，为了节省功率，通常潜在的干扰机必须首先对通信进行侦听，或许还要定出接收机的位置。

为了使通信不容易遭受侦听和人为干扰，可以采用各种各样的综合措施。如果传输频率超过 30MHz，电离层反射就很弱，从而降低了远距离侦听和人为干扰的可能性。具有强方向性的激光波束或毫米波是难以侦听到的。对它们的接收机难以干扰是因为接收天线辐射方向图很窄的缘故。虽然大气衰减可能妨碍侦听和人为干扰，但是衰减和捕获问题，使光波或毫米波经由空气传输的通信，只限于象卫星通信这样的特殊应用场合。

利用金属导线、同轴电缆、波导及光导纤维进行传输的电缆通信，提供了类似于方向性波束所具有的优点，但是不存在捕获问题。电缆通信的主要问题是它在移动、急速变化的战术环境中不实用，以及它容易受到破坏。

因为光导纤维不会散发出大量的电磁能量，它们在防止敌人侦听通信方面是很有效的。光导纤维在分接方面比金属电缆更困难些。因为周围的电磁能量不会明显地影响纤维中光波的传播，所以用光导纤维进行通信几乎不会受人为干扰的破坏。光导纤维

的另一些优点是重量轻、耐火、纤维之间没有串扰以及不会发生短路等。光导纤维能载荷的消息密度，比直径大致相同的金属电缆所能载荷的要高得多，虽然这一点对许多军事通信系统来说并不是必要的。对于军事应用，光导纤维相对于金属电缆来说，主要缺点看来是难以快速地替换被损坏的纤维。

中继的使用提高了通信网络抗人为干扰的能力。然而，网络管理问题和设备费用使网络中中继站的数目受到限制。如果通信机储存、压缩并快速发送全部消息，则对其实施有效干扰就变得不大可能了。

通常，干扰机不能确定施放干扰的效果。但是有效的人为干扰会迫使通信机改变工作频率。如果干扰机能够发现这个频率变化，它就得到一个重要指示：施放的人为干扰确实正在破坏对方通信，然后干扰机可以相应地试着改变干扰信号的中心频率。

为了不给干扰机以这种确定其干扰效果的机会，可以把通信机设计得能周期地改变工作频率。另一种策略是改变遭到破坏的通信网中一部或几部通信机的位置，以建立接收机和发射机之间的直视路径，如果已知干扰机的位置，可利用地形障碍把接收机遮蔽起来。

如果能精确地测出通信频率，则可施放窄带人为干扰。这种类型的干扰，不仅能经济地使用功率，而且也容易避免干扰自己的通信。如果不用频率估计设备，或者由于频率的快速改变或其他不利条件而不能精确地测定频率，则干扰者可以采用宽带干扰。此时，干扰能量散布在很宽的频率范围，以便增加某些干扰能量干扰敌人通信的概率。

接收点的人为干扰-信号比，是评价通信系统性能时必需的基本量，为使这一功率比跟其他的量联系起来，我们来考察接收点的功率关系。

如果两部通信机相距 D_T ，则接收机输入端的发送信号平均功

率为

$$R_s = \frac{P_T G_{TR} G_{RT} \lambda^2}{(4\pi)^2 D_T^2 L_{TR}} \quad (1.1)$$

其中 P_T 为发射机平均功率, G_{TR} 为发射天线在接收机方向的增益, G_{RT} 为接收天线在发射机方向的增益, λ 为波长, 损耗因素 L_{TR} 为实际传播偏离理想自由空间传播的量度。如果通信机是机载的, 且大气衰减可以忽略不计, 则 $L_{TR} \approx 1$; 否则 L_{TR} 可能是 D_T 的函数。

如果通信机组的一方或双方设置在地面上, 则 R_s 的精确计算必须考虑地球的曲率、介电常数、天线高度、障碍物的存在、多径及其他因素的影响。许多近代的传输模型, 都是以朗利-莱斯 (Longley—Rice) ⁽¹⁾ 模型为根据的。此模型对不规则地面上的传输损耗 $L = L_{TR} D_T^2$ 给出了用计算机计算的预测值。

对于同样长度的不同路径, 由于路径之间的地貌不同, 在测量 L 或 R_s 值时常常有很大的差异。在一段长时间里对同一条路径记录的 L 或 R_s 值, 有时也表现出类似的变化范围。在某个地域内, L 的中值和标准差可用朗利-莱斯模型计算。实验结果表明, 通常 L 具有近似的对数正态分布。 L 的标准差随频率和地面不规则程度的增加而增大, 但对路径长度和天线高度的改变, 则相对来说不太敏感 ⁽²⁾。

对移动通信来说, 接收到的信号功率还显示出附加的短时期变化, 这种变化称为衰落, 是由时变多径效应引起的。

因为传播模型计算起来很复杂, 所以为便于分析, 希望有一个近似表示接收信号中值的幂次律方程。如果把式 (1.1) 中的 R_s 理解成接收信号功率的中值, 并对 D_T 的取值范围适当加以限制, 则可写出

$$L = L_{TR} D_T^2 \approx \frac{D_T^n}{K_T} \quad (1.2)$$

其中 K_T 与 D_T 无关,但它是其他参数,比如天线在地面上高度的函数。将式(1.2)代入(1.1)得到

$$R_s = \frac{K_T P_T G_{TR} G_{RT} \lambda^2}{(4\pi)^2 D_T^n} \quad (1.3)$$

欲利用这个方程来计算 R_s ,需要知道 K_T 和 n 的具体值。这些值可由实验数据或者由传播模型计算得到的数据来确定。式(1.3)表明 n 满足

$$n = \frac{\partial \log R_s}{\partial \log D_T} \quad (1.4)$$

因而,估计 n 的一贯方法是从用分贝表示的 R_s 和用分贝表示的 D_T 的关系曲线上,计算其偏导数。假如 n 是随 D_T 变化的,则必须将 D_T 的取值范围分为足够小的分段,使每一个分段对应一接近为常数的 n 值。一旦确定了 D_T 在某个区域内的 n 值,相应的 K_T 值就可按方程(1.3)计算得到。这时方程(1.3)适用于 R_s 对 D_T 曲线上在这范围内的一个点。

对甚高频(VHF)地面通信的实验数据表明,在 D_T 很宽的取值范围内, $n=4$ 常近似成立。

在光和毫米波的频率上,用式

$$R_s = \frac{K_T P_T G_{TR} G_{RT} \lambda^2}{(4\pi)^2 D_T^n} \exp(-\alpha D_T) \quad (1.5)$$

其中 $\alpha \geq 0$,来代替式(1.3),能够更精确地模拟严重的太气衰减。参数 K_T 、 n 和 α 也许最好用回归分析来估计。

进入接收机的人为干扰功率,可能因两个因素而减弱。首先是存在极化损耗,这是因干扰机可能不是以合适的极化发出辐射造成的。这一相对极化损耗可以用系数 p 来描述, p 的取值范围为 $0 \leq p \leq 1$ 。干扰功率减弱的第二个因素,可能是接收机带通滤波引起的。这种滤波作用通常可以用函数 $f(B_r, B_i)$ 来描

述, 其中 B_R 是有效的接收机带通滤波器带宽, B_I 是人为干扰信号的带宽。如果整个人为干扰的谱包含于接收机通带内, 则

$$f(B_R, B_I) = 1 \quad (1.6)$$

如果人为干扰谱包含了整个接收机通带, 则

$$f(B_R, B_I) = \frac{B_R}{B_I} \quad (1.7)$$

对接收机有影响的净人为干扰功率中值为

$$R_I = \frac{K_I P_I G_{I,R} G_{R,I} \lambda^2 p f(B_R, B_I)}{(4\pi)^2 D_I^2} \exp(-\beta D_I) \quad (1.8)$$

其中 D 是干扰机和接收机之间的距离, P_I 是干扰发射机的平均功率, $G_{I,R}$ 为干扰机天线在接收机方向上的增益, $G_{R,I}$ 是接收机天线在干扰机方向上的增益。假定干扰信号的平均波长近似等于预期要干扰的信号波长。参数 K_I 、 m 和 β 的定义分别类似于参数 K_T 、 n 和 α 的定义。

由式 (1.5) 和 (1.8) 确定的人为干扰-信号比的近似中值为

$$\frac{R_I}{R_T} = \frac{P_I K_I G_{I,R} G_{R,I} p f(B_R, B_I)}{P_T K_T G_{T,R} G_{R,T}} \cdot \frac{D_T^2}{D_I^2} \exp(\alpha D_T - \beta D_I) \quad (1.9)$$

这个式子给出了中值干扰-信号比和其他量之间的关系。即使式 (1.9) 的右边为固定值, 对于特定的通信机和干扰机位置, 由于路径的地貌不同, 会有不同的干扰-信号比。

按照信息论的观点, 通信信道中危害最大的加性噪声的类型是白高斯噪声, 因此干扰机往往希望产生一个仿带限白高斯噪声的干扰信号。但是要综合出这种类型噪声波形, 使之具有随机摆动的大电压实际上是困难的。人为干扰能够用白高斯噪声来模拟时, 它对通信的影响一般就可用众所周知的理论公式来确定。

非高斯人为干扰波形通常都借助计算机模拟来研究。在某些情况下，也可能作近似的数学分析。虽然这些分析都有一定的局限性，但对人为干扰的一般特征以及抗人为干扰对策方面的研究都是有幫助的。下面两节中要分析对模拟和数字通信系统干扰的例子。

参考文献[3]提供了军事通信系统的许多应用例子及问题。在参考文献[4]中有许多有关干扰分析的论文，其中有些论文是针对人为干扰的。

1.2 模拟通信

我们考虑一个一般的接收波形，它概括了作为它的特例的调幅(AM)、调相(PM)及调频(FM)波形。这个一般的接收波形可写为

$$s(t) = A(t) \cos[\omega_1 t + \phi_1(t)] \quad (1.10)$$

其中 $A(t)$ 为振幅调制项， ω_1 为载频， $\phi_1(t)$ 为相位调制项。接收机具有前端带通滤波器， $s(t)$ 通过它时失真可以忽略不计。干扰波形的一般形式可以写成

$$J(t) = B(t) \cos[\omega_2 t + \phi_2(t)] \quad (1.11)$$

假定 $J(t)$ 通过接收机带通滤波器时失真可以忽略不计，换句话说，我们认为可以用 $J(t)$ 来描述滤波器输出端上人为干扰的波形。

在后面整个分析中，为了简化起见，都忽略掉热噪声的影响。因而在带通滤波器输出端的信号为 $X(t) = s(t) + J(t)$ ，利用三角恒等式把式(1.1)中的余弦项展开，得到

$$X(t) = \{A(t) + B(t) \cos[\omega_3 t + \phi_3(t)]\} \cos[\omega_1 t + \phi_1(t)] - B(t) \sin[\omega_3 t + \phi_3(t)] \sin[\omega_1 t + \phi_1(t)] \quad (1.12)$$

其中 $\omega_3 = \omega_2 - \omega_1$ 和 $\phi_3 = \phi_2 - \phi_1$ ，进一步应用三角学关系可得