

Wireless Anti-Intercept
and Anti-Jamming Communication

无线电抗截获
抗干扰通信

苟彦新 主编



西安电子科技大学出版社
XIDIAN UNIVERSITY PRESS

无线电抗截获抗干扰通信

苟彦新	主 编
苟彦新 王永民	
郭建新 蒋 磊	编 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书全面、系统、深入地论述了无线电抗截获、抗干扰通信的基本理论、关键技术及其应用。

全书共 8 章, 内容包括抗截获、抗干扰通信引论, 扩展频谱通信中的伪随机序列, 扩展频谱通信系统, 自适应天线原理及应用, 抗衰落通信, MIMO-OFDM 原理与技术, 实现抗干扰、抗截获保护的通信信号和系统设计以及超宽带信号的抗截获设计等。

本书可作为通信对抗、军事通信、移动通信、通信电子等专业的本科生和研究生教材, 也可作为同类专业的教师、科研工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无线电抗截获抗干扰通信/苟彦新主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.12

ISBN 978-7-5606-2470-9

I. ①无… II. ①苟… III. ①无线电通信抗干扰 IV. ①TN973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 149871 号

策 划 臧延新

责任编辑 阎 彬 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 26

字 数 616 千字

印 数 1~3000 册

定 价 42.00 元

ISBN 978-7-5606-2470-9/TN·0572

XDUP 2762001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

随着科学技术的进步与发展,电子战逐渐成为现代战争中信息作战的主要手段。通信电子战是电子战的主要组成部分。通信对抗与反对抗之间的斗争日益尖锐和复杂,其具体表现在对抗的手段已由单纯的通信电子侦察和反侦察、干扰和反干扰的软对抗(夺取电磁权),发展到摧毁电子设备系统与反摧毁的硬对抗;由消极对抗发展到积极对抗;由单台单站对抗、多台多站对抗发展到针对系统、网络级的综合能力对抗;由单一的时域或频域、功率域对抗发展到时频域、空域甚至速度域的全面对抗;由凭借地形、地物的掩护,超低空突破发展到采用隐身术公开地突防,等等。通信电子对抗与反对抗是矛盾的双方,它们既对立又统一,并且互相转化和渗透,某种技术可以用来对抗,间接地又可以用来反对抗。例如,对抗双方都要采用通信电子侦察技术。在通信对抗中,侦察是为了实施切合实际的干扰和摧毁。在反干扰中,也需要对干扰进行侦察,以便躲过干扰,实施有目的的最佳反干扰,保护通信中心及网络免遭破坏。又如实施欺骗性干扰,可使敌干扰机无法确定真正的目标,达到“鱼目混珠”的目的。而在反摧毁中,也经常使用“诱饵”,使反辐射导弹不能击中真正的目标。

关于无线电通信侦察的文献、资料和参考书,目前国内外发表和出版得很多,来源也十分广泛。人们对通信电子战(通信对抗)的主要目的、任务、方法已经很熟悉,对通信侦察也不陌生。由于历史的原因和人们认识上的缺陷,公开发表的文献和书籍很少涉及无线电通信反侦察的问题。但近年来,通信侦察测向与定位及对信息的截获、被非法用户的利用等,不再仅仅涉及军事通信对抗,而早已扩展到公安、航海、航天、民用信息安全(例如商业情报信息)等领域。对于通信信息的安全传输,无线电通信反侦察(抗截获、反利用等)显得十分重要。在某些情况下,无线电通信抗截获、反利用比抗干扰还显得重要,但是这方面的书籍却不多。作者编写本书的初衷就是想借此书在讨论抗干扰通信的同时,向读者介绍反侦察的概念、原理和有关技术。

本书在《无线电抗干扰通信原理和应用》一书(2005年由西安电子科技大学出版社出版)基础上进行了较大幅度的补充和修改,书中增补了无线电通信抗截获等内容,并对其他各章内容也进行了不同程度的修改和完善,以适应通信对抗发展以及教学工作的新需求。

本书主要讨论了现代无线电通信抗截获、抗干扰的基本理论与技术,也讨

论了相关的若干热点问题。这些理论与技术不但适用于军事通信,也适用于公安、现代民用移动通信等。由于无线电抗截获、抗干扰通信的内容极其丰富,涉及面也很广,因此本书不可能对每个问题及各种技术都作全面、严格的分析。有些问题的详细分析可参考各章所列的参考文献。本书涉及的一些新技术和理论仅供读者参考。

全书共8章:第1章作为引论,在介绍无线电通信侦察与反侦察、干扰与反干扰概念和现状及发展的基础上,重点阐述了抗截获、抗干扰通信的理论与技术,并介绍了现代无线电通信抗截获、抗干扰通信中许多新的概念和新的途径,还提出了采用截获因子和结构概率来评估无线电信号抗截获性能的准则;第2章从伪随机序列的概念出发,介绍了抗干扰通信中几种常用的PN序列、序列的产生方法及应用,重点介绍了线性反馈移位寄存器序列的原理及性能分析;第3章讨论了各种扩展频谱通信体制及其抗干扰原理、扩展频谱通信系统同步原理、同步性能分析及扩展频谱系统的实现等,并介绍了声表面波器件及其在扩展频谱系统中的应用;第4章介绍了自适应天线原理及应用,重点讨论了自适应天线抑制干扰的原理、算法及实现,并对其应用进行了讨论;第5章介绍了抗衰落通信,重点讨论了抗衰落通信的原理、技术与实现;第6章介绍了MIMO-OFDM原理与技术,重点论述了抗干扰通信中采用的MIMO-OFDM方法与途径,对其关键技术进行了深入的分析,并给出了仿真结果;第7章从抗干扰、抗截获的角度出发,阐述了许多抗干扰通信系统设计中的问题及通信信号抗截获的设计方法与技术,并给出了仿真结果,具有一定的实用价值;第8章从抗截获的角度出发,重点论述了超宽带信号抗截获的设计原理及方法,并给出了许多有用的仿真结果。

本书中的许多内容都是作者在教学与科研实践中总结、提炼出来的,部分内容参考并借鉴了近年来一些重要的文献和著作。

本书可作为通信对抗、军事通信、移动通信、通信电子等专业的本科生和研究生教材,也可作为同类专业的教师、科学工作者的参考用书。

本书由苟彦新担任主编。第1、4、5章由苟彦新编写;第2、3章由王永民编写;第6章由郭建新编写;第7章由苟彦新、史雪瑞编写;第8章由蒋磊编写。在编写过程中,史雪瑞、田岩、孙高飞、李挺等做了大量辅助工作,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些疏漏,恳请读者批评指正。

作者

2010年7月于西安

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 引言	1
1.2 通信侦察与通信反侦察、通信干扰与通信抗干扰	1
1.2.1 通信侦察	1
1.2.2 通信反侦察	4
1.2.3 通信干扰	6
1.2.4 通信抗干扰	9
1.3 通信抗干扰的理论与技术	10
1.3.1 噪声通信理论	10
1.3.2 抗衰落通信理论	11
1.3.3 空域、时域自适应滤波	12
1.4 低截获概率信号设计的理论与技术	13
1.4.1 通信反侦察的理论和效能概率准则	13
1.4.2 电离层变态效应通信	15
1.4.3 中微子通信	16
1.4.4 蓝绿激光对潜通信及纳米激光对潜通信	17
1.4.5 量子通信	18
1.5 MIMO-OFDM 技术	19
1.5.1 MIMO	19
1.5.2 OFDM	20
1.5.3 MIMO-OFDM	21
1.5.4 MIMO-OFDM 系统中的关键技术	21
1.6 抗干扰通信系统的主要技术指标	22
参考文献	23
第 2 章 扩展频谱通信中的伪随机序列	28
2.1 伪随机序列的概念	28
2.1.1 基本概念	28
2.1.2 伪随机序列的定义及分类	30
2.1.3 扩谱通信对伪随机序列的要求	31
2.2 几种常见伪随机序列的构造	32
2.2.1 双值自相关序列	32
2.2.2 平方余数码	34
2.2.3 孪生素数码	35
2.2.4 巴克序列	35
2.3 m 序列	36
2.3.1 m 序列的定义	36
2.3.2 m 序列的随机特性	42

2.3.3 m 序列的构造	43
2.4 Gold 序列族	45
2.4.1 m 序列优选对	46
2.4.2 Gold 序列族	50
2.4.3 平衡 Gold 序列	51
2.5 截短 m 序列	54
2.6 M 序列	56
参考文献	60
第 3 章 扩展频谱通信系统	61
3.1 扩展频谱通信概述	61
3.1.1 扩展频谱技术的起源及发展	61
3.1.2 扩展频谱通信的理论基础	63
3.1.3 扩展频谱技术的特点	63
3.1.4 扩展频谱技术的分类	64
3.2 扩展频谱技术的原理	65
3.2.1 直扩系统(DS-SS)	65
3.2.2 跳频系统(FH-SS)	80
3.2.3 线性调频扩谱系统(Chirp-SS)	85
3.2.4 跳时系统(TH-SS)	88
3.2.5 混合扩谱系统	89
3.3 扩展频谱系统的同步	91
3.3.1 概述	91
3.3.2 直扩系统的同步	92
3.3.3 跳频系统的同步	98
3.3.4 捕获的判定	101
3.4 声表面波器件在扩谱系统中的应用	118
3.4.1 声表面波器件	118
3.4.2 声表面波滤波器	125
3.4.3 声表面波延迟线	126
3.4.4 其他声表面波器件	139
参考文献	140
第 4 章 自适应天线原理及应用	142
4.1 概述	142
4.1.1 采用自适应天线阵的原因	142
4.1.2 自适应天线阵的技术现状及发展	143
4.1.3 自适应天线阵的组成及重点要解决的问题	143
4.2 自适应天线中的天线阵	144
4.2.1 信号环境	144
4.2.2 天线阵列单元的配置	146
4.2.3 天线阵的性能	150
4.2.4 天线阵各种阵列效应对调零的限制作用	152
4.2.5 关于窄带与宽带信号处理的问题	154
4.3 自适应天线的基本理论	157

4.3.1	自适应天线系统的组成	157
4.3.2	自适应概念和 LMS 自适应算法的实现	158
4.4	原型自适应天线系统——旁瓣对消器	162
4.4.1	电路组成及工作原理	162
4.4.2	性能运算分析	163
4.4.3	旁瓣对消器的应用举例	167
4.5	扩谱通信系统中的自适应天线阵列	169
4.5.1	对扩谱通信系统中应用自适应天线阵列的要求	169
4.5.2	参考信号 $R(z)$ 的实现方法	169
4.5.3	扩谱通信系统中的自适应天线阵列	170
4.5.4	自适应波束形成器在跳频扩谱技术中的应用	173
4.5.5	弗罗斯特自适应波束形成器	175
4.6	频域自适应滤波	178
4.6.1	变换域自适应滤波器	179
4.6.2	基于圆卷积的频域自适应滤波器	179
4.6.3	扩谱信号多个强窄带干扰抑制算法的实现	181
4.7	自适应波束形成算法	183
4.7.1	LMS 算法	184
4.7.2	SMI 算法	184
4.7.3	RLS 算法	185
	参考文献	186
第 5 章	抗衰落通信	187
5.1	衰落信道对通信的影响	187
5.2	信号时间扩展	188
5.2.1	时延域上的信号时间扩展	188
5.2.2	时间扩展信号在频域中的特征	189
5.3	移动引起的信道时变性	192
5.3.1	在时域中分析信道的时变性	192
5.3.2	多普勒频移域中的时变性	193
5.3.3	瑞利信道慢衰落和平坦衰落的性能	198
5.4	抗衰落影响的方法	199
5.4.1	抗频率选择性失真的方法	200
5.4.2	抗快衰落失真的方法	207
5.4.3	减少衰落引起信噪比损失的方法	210
5.4.4	衰落信道的调制类型	212
5.4.5	交织器的作用	213
5.5	衰落信道的主要参数	215
5.5.1	快衰落失真(情况 1)	215
5.5.2	频率选择性衰落失真(情况 2)	216
5.5.3	快衰落和频率选择性衰落失真(情况 3)	216
5.6	抗频率选择性衰落影响的应用	218
5.6.1	GSM 系统中的维特比均衡器	218
5.6.2	直接序列扩频(DS/SS)系统中的 Rake 接收机	220

5.6.3 多径分集的优缺点	226
5.7 小结	226
参考文献	226
第 6 章 MIMO - OFDM 原理与技术	229
6.1 OFDM	229
6.1.1 OFDM 的研究历程及其现状	230
6.1.2 OFDM 的基本原理及系统组成	230
6.1.3 OFDM 系统的等效数学模型	234
6.1.4 OFDM 的优缺点及关键技术	237
6.2 MIMO	239
6.2.1 MIMO 的研究历程及其现状	239
6.2.2 MIMO 的基本原理	240
6.2.3 MIMO 的研究内容	243
6.2.4 MIMO 的关键技术	247
6.3 MIMO - OFDM	248
6.3.1 MIMO - OFDM 系统组成及数学描述	248
6.3.2 MIMO - OFDM 中的关键技术	253
6.3.3 MIMO - OFDM 研究前景展望	290
参考文献	290
第 7 章 实现抗干扰、抗截获保护的通信信号和系统设计	296
7.1 通信干扰策略	296
7.1.1 通信干扰机的目标通信子系统	297
7.1.2 相关干扰对策	298
7.1.3 非相关干扰对策	298
7.2 抗干扰保护的测度	300
7.3 扩谱通信系统的处理增益	300
7.4 干扰效果和干扰效率的计算	304
7.4.1 干扰效果的计算	304
7.4.2 干扰效率的计算	308
7.4.3 卫星上行链路的干扰	309
7.5 抗非线性接收机侦收的扩谱信号设计	312
7.5.1 非线性接收机性能概述	313
7.5.2 抗非线性检测的 FH 信号设计	321
7.5.3 抗非线性检测的 DS 信号设计	323
7.5.4 抗非线性检测的跳时 (TH) 信号设计	326
7.6 基于时频编码的 LPI/AJ 通信信号设计	330
7.6.1 时频编码分集技术存在的问题	330
7.6.2 伪噪声时频编码	335
7.6.3 伪噪声时频编码信号的性能分析	338
7.6.4 仿真结果及分析	340
参考文献	343

第 8 章 超宽带信号的抗截获设计	346
8.1 超宽带通信的基本原理	346
8.1.1 超宽带通信系统的定义	346
8.1.2 超宽带信号的基本调制方式	349
8.1.3 超宽带通信系统的优缺点与潜在应用场合分析	353
8.2 超宽带信号的功率谱分析	355
8.2.1 TH-PPM UWB 功率谱分析	356
8.2.2 TH-PAM UWB 功率谱分析	362
8.2.3 DS-UWB 功率谱分析	364
8.3 超宽带信号的抗干扰能力分析	366
8.3.1 UWB 与 DS-SS 抗干扰能力的分析比较	366
8.3.2 UWB 与 FH-SS 抗干扰能力的分析比较	372
8.3.3 UWB 系统的抗干扰技术	373
8.4 超宽带信号的抗截获设计	376
8.4.1 UWB 信号的抗截获设计原则	376
8.4.2 UWB 信号的抗截获设计方法分析	378
参考文献	399
附录 次数 $n \leq 12$ 的既约多项式表	403

第1章 引 论

1.1 引 言

现代军事通信技术是现代电子信息技术的重要组成部分，而无线电抗截获、抗干扰通信又是现代军事通信、民用通信的支柱。现代通信电子战的首要目标是通过无线电侦察，准确地干扰敌方的通信系统(指挥中心和通信网的关键节点)，确保己方无线电通信畅通。因此，通信系统和通信网是否具有良好的抗截获能力和强抗干扰能力，是能否取得电子战胜利的首要条件。

无线电通信在现代战争中的地位越来越重要，它是现代通信的主要手段，在特定的环境中，它是惟一的手段，例如空军、海军、装甲兵等部队的通信，超远程的移动通信，追击战、登陆战等情况下的作战通信等。正是由于无线电通信在某些时候是惟一的手段，因此各国都竞相投入可观的力量对无线电通信的侦察(如窃听)、干扰等技术进行研究。在战时，无线电通信对抗已成为一项重要而无形的电子斗争。

和平时期的军事无线电通信划分了频段，合理利用了频率资源及规划组网，理论上应该能和民用通信“和平共处”，但实际情况并非如此。经常出现民用移动通信对其他通信造成干扰，特别是对空军地空通信指挥、民航调度通信等造成严重干扰的情况，影响了正常的训练和飞行。因此，即使在平时时期，加强军事通信系统的抗干扰能力也是非常重要和迫切的。

民用通信，特别是现代移动通信，在电磁环境日趋复杂的条件下，其本身的抗截获、抗干扰能力也是一个非常重要的指标。

1.2 通信侦察与通信反侦察、通信干扰与通信抗干扰

通信对抗也称为通信电子战，主要涉及通信侦察、通信干扰和通信反侦察、通信反干扰(抗干扰)。为了使读者能更好地理解和掌握抗干扰、抗截获的基本理论和方法，下面先对通信侦察与反侦察以及通信干扰与反干扰作一些必要的介绍。

1.2.1 通信侦察

1. 通信侦察的基本概念

通信侦察是获取军事、外交、经济情况的一种方式。它用无线电侦察设备对敌方的无

线电电子设备和通信设备所发射的信号进行搜索、检测、识别、定位、分析和破译,以获取各种情报,供己方有关部门使用;它还能支援干扰和武器系统,对敌通信系统和通信网进行有效的干扰,甚至摧毁。

侦察的目的是获取情报以及实施干扰,所以侦察设备首先应能发现通信信号,然后能分析信号(提取信息)和测定通信电台的位置等。

发现信号即要求确实地检测到敌台发射的无线电信号,这就要求必须有良好的环境条件,并且侦察接收设备具有足够高的灵敏度。由于不能预先知道敌台的工作频率,因此还要求侦察接收机要有相当宽的频率范围,使其能跟踪到需要的频率。为了不致错过侦察时机,侦察设备必须有快速跟踪的搜索和瞄准手段。为了截取敌台的信号,己方还必须具有与敌通信设备相适应的侦察接收机和终端设备,使其检测方式与敌台的发射信号的调制方式相适应,甚至要具备自适应调制方式识别装置。

一般通信侦察设备的构成如图 1-1 所示。电台信号被侦察天线接收后,在侦察接收机中被放大和检测,并送至终端设备进行显示、分析和记录。

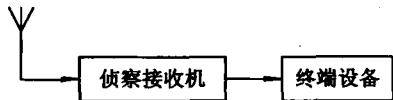


图 1-1 一般通信侦察设备的构成

近年来,计算机技术被广泛应用于侦察设备中,借助于计算机的辅助分析能力,能够比较迅速和准确地识别敌台信号。特别是当计算机技术和数字信号处理(DSP)技术被广泛应用于无线电侦察领域后,利用 DSP/FFT 技术能够进行宽频谱的快速分析,从而使侦察技术有了一个飞速的发展。

2. 通信侦察设备的种类

采用哪种类型的通信侦察设备是根据侦察任务来确定的。如果它的重要任务之一是要确定正在工作的发射台的位置,即测定其方位,就应采用定向接收设备及波形分析、信号分析等手段。为了便于读者理解,这里仅对无线电测向和测向仪稍加说明。

无线电测向的种类较多,按显示方法的不同可分为听觉测向和视觉测向,而按其使用方法的的不同可分为固定测向和战术移动测向等。测向仪的组成如图 1-2 所示。

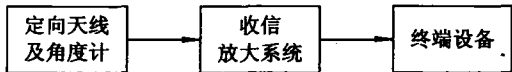


图 1-2 测向仪的组成

测向仪用来测定敌发射机的方位,这一功能是用专门的定向天线来完成的。因此,定向天线是测向仪极其重要的组成部分。

定向天线的种类很多,如环形天线、H 形天线、框形天线和 U 形天线等。现以环形天线为例来说明定向接收的原理。

如果天线以中线为轴进行旋转,那么当天线平面与电波方向同处一个平面时,在接收机的输出端有最强的信号;当天线平面与电波方向垂直时,接收机的输出端信号为零。如果将天线旋转一周,那么接收信号将有两次最大、两次为零。随着天线的旋转,在其他方

向上接收的信号也会变化，最终可以得到心字形的方向图。由于人的感觉系统对分辨零点最敏感，因此实际以测定接收信号的最小点来确定电台方向。近代测向仪是采用固定天线，通过一种角度计的转动来测定方向的。

由于接收到的无线电信号太微弱，不能推动终端设备工作，因而必须有放大设备，其种类和规格视测向仪的种类而定。

自 20 世纪 80 年代以来，先进的测向设备都采用了高速数字信号处理器和高档微处理器来进行方位数据处理与功能控制，这样既加快了测向速度，也提高了测向精度。20 世纪 90 年代以来，由于空间谱技术、小波技术与高阶统计谱估计技术应用于无线电测向，因此测向、定位的精度得到了很大的提高，测向设备的智能化、软件化程度都迈上了一个新的台阶。

3. 通信侦察的特点和任务

通信侦察不仅在战时进行，平时也在进行。随着电子技术的发展，为配合战役行动的侦察设备不必再配置在军队的战斗地域了，这使侦察设备不易受到敌方的攻击，可不间断地对敌战斗地域以及纵深的通信实施侦察，使己方随时掌握敌方的部署和行动。由于无线电侦察设备可以全天候地工作，因此它送到指挥机关的情报是源源不断的，这些情报成为指挥员掌握敌情的重要信息来源。

由于通信侦察本身不发射信号，因而它非常隐蔽，不易被敌方侦察到。

通信侦察的特点是：

(1) 侦察距离远。侦察的距离与敌台的辐射功率、电波的传播条件及己方侦察设备的灵敏度等因素有关。在短波、超短波战术通信采用地面波传播的条件下，侦察距离一般为几千米到几万里。对卫星通信而言，侦察距离可达数万千米。在远距离侦察时，侦察设备可以配置在战区以外，因而受战场态势变化的影响较小。

(2) 侦察范围广。从地域、空域上都可以在十分广阔的范围内实施侦察。频域上，凡是无线电通信工作的频率范围，都是通信侦察的频率范围。

(3) 实时性好。侦察设备可以长时间不间断地工作，只要在我方侦察设备作用的空域、地域和频域范围内，敌方通信电台或系统都能被及时侦察到，且这种侦察是实时的。

(4) 受敌方无线电通信条件的制约大。

通信侦察的主要任务是：

(1) 在时间、空间和频率上搜索，以探测敌方通信信号的活动。

(2) 确定信号类别，获取信号情报。

(3) 确定辐射源位置。

(4) 决定应采取的行动(如停止监视、连续监视、应用 ECM(电子对抗)等)。

通信侦察涉及以下四个与敌方通信系统有关的问题：

(1) 它是什么系统？

(2) 它在什么地方？

(3) 它将干什么？

(4) 如何对付它？是干扰压制还是摧毁？

4. 无线电通信侦察面临的难题与对策

在现代电子对抗条件下，随着通信技术的发展，无线电通信侦察面临以下难题：无线

电通信信号越来越密集,无线电频率的利用日趋饱和,低截获概率(LPI)信号被采用;通信频段的加宽、信号形式的复杂多变(使得通信信号对侦察接收机的不确定性大大增加)及信号功率谱密度的降低(低于背景噪声电平)等。这些问题使通信对抗侦察的复杂性增加了,困难更大了。

现代军事通信采用复杂的数字加密通信技术,即使把信号解调下来,要破译出信息内容,也需要很长的时间,且难度极大。对于抗干扰、抗截获通信系统,若采用了射频加密和数据加密双层加密技术,则侦察方更难对付,即使将检测到的信息用一定时间破译出来,通信方的信号密码也早已更换,译出的信息可能早已失去应用价值。

以上情况使从事无线电侦察的专家们意识到,侦察敌方信号内部特征的战术意义越来越小,这迫使侦察的重点不得不集中在通信信号的外部特征上,因为这样处理实时性好,可以获得大量通信对抗情报,分析出有价值的军事情报(通联特征、技术特征),可以为干扰破坏敌方通信提供依据。

随着多天线 MIMO 技术的应用,虚拟天线阵和分布式 MIMO 技术相继出现,它们在不同的网络拓扑结构下,利用空间分布的多个相互独立的通信节点间的天线来完成天线共享。结合适当的中继策略和交互设计,通过单天线的通信节点同样可获得类似于 MIMO 的性能。空域协作分集就是在上述原理的基础上建立起来的。每个移动用户(如军用移动无线电台、站)终端都有一个或多个合作伙伴(Partner),它有责任在传输自己的信息的同时,“帮助”其他伙伴传输信息。这样,每个终端在传输信息的过程中既利用了自己的又利用了合作伙伴的空间信道,获取了一定的空间分集增益。协作分集的合作伙伴共享彼此天线,从而构成了虚拟的 MIMO 多天线系统。空域协作分集及其在军事无线网络、无线局域网及无线传感器网络(战场通信组网)等多种场合的应用,使中、小型移动无线电通信台、站找到了高速率抗衰落、抗截获、抗干扰通信的新出路。例如,目前抗干扰、抗截获的方法有 DS-SS、FH-SS、DS/FH-SS、DS/TH/FH-SS 等,但这些方法都没有很好地利用空间资源,而协作分集在一定意义上讲是一种“空跳”,即用户信息在空间方位的跳变,可获得抗检测、抗截获制度增益。随着参与用户的增多以及“空跳”幅度和跳速的提高,“空跳”的增益将会更高,现有的侦察接收技术要对付这样的无线电通信信号,难度将更大。因此,协作分集将成为现代通信侦察面临的又一个新挑战。

由于对地面、空中移动通信的侦察已成为新的情报增长点,而传统的单天线移动侦察台、站已经不能满足定位精度和侦察台间通信的要求,因此,对于将传统的单/双天线、单/双站移动侦察接收推广到新的移动侦察接收网络,多站协同工作侦察技术的研究显得尤为重要和迫切。

1.2.2 通信反侦察

1. 通信反侦察的基本概念

无线电通信侦察借助于无线电通信侦察装备,对敌无线电通信电磁辐射信号进行检测、截获(分析、识别)、定位以获得有用信息。而无线电通信反侦察与其相反,它是通过通信电子反对抗(ECCM)综合技术的运用和组织实施,来降低无线电通信侦察效果的技术,例如,用无线电信号的隐蔽性、复杂性实现无线电通信反侦察的目的。换句话说,在通信电子战中,通常无线电通信侦察与无线电通信反侦察(如无线电信号的隐蔽)是相互矛盾、

相互排斥的。

无线电通信反侦察的主要任务是阻止非法方(如敌方)对己方的通信信号进行检测、测向、截获和利用等。为了达到此目的,空间传输的通信信号必须具有以下特征和能力:

无线电通信信号必须具备某种能力,以降低非法接收方(如敌方)对其成功地进行检测、频率估计、特征提取和恢复信息的概率。具有这种能力的安全传输信号被称为广义的低的利用概率(Low Probability of Exploitation, LPE)信号。

侦察接收机总是设法检测(发现)微弱的通信信号。检测概率是对侦察方检测通信信号能力的一个度量。令非法接收机难以检测的隐蔽通信信号称为具有低的检测概率(Low Probability of Detection, LPD)信号。如果一个信号能够被检测到,那么,它的一些特征参数也有可能被估算出来。利用这些特征参数,使用几部接收机就能够发现该通信发射机的位置。因此,若要隐匿一部发射机的位置,就必须要求它所发射的信号是 LPD 信号。

在现代反侦察中,有时通信方无法完全做到或没有必要防止非法接收机检测到己方的信号,但必须在通信信号被检测之后,使其信号类别不易被识别。而且,通信方还可以做到即使侦察接收方检测到了每一个信号段,但仍难以识别一个信号中各个分信号段的顺序。这类似于将多幅玩具拼图放在同一盒子里,不了解里面有几幅图,不知道每幅图的图案是什么,要把它们一块块地拼起来是不可能的或相当困难的。无线电通信信号必须具备某种能力,能阻止非法接收机获取信号特征,以降低其成功地分选、识别出信号的概率,具有这种能力的信号称为低的截获概率(Low Probability of Intercept, LPI)信号。

在现代战争的通信对抗中,通信信号有时也可能被检测、被截获,但对方无法利用这些信号来获取明码电文或加密比特信息。同样,发信人的身份和设备属性也可以被掩盖。因此,为了便于理解和应用方便,可以将信号低的利用概率狭义地定义为:能够给非法方的利用造成极大困难的信号就是低的利用概率(LPE)信号。

有时, LPE 的含意很广,它包括了前面所定义的 LPI 和 LPD 及本节狭义定义的 LPE,也就是前面所说的广义的低的利用概率(LPE)。在后面各章节中,如不加以说明,则 LPI、LPD 以及狭义 LPE 共用 LPE 表征,必要时分开使用。

从现代科学技术来看,通信信号在传输空间绝对不被发现(检测到)是不可能的,但只要信号足够复杂和随机,不被截获倒是大有可能的。从通信侦察中的抗截获出发,在 LPD、LPE、LPI 三者中,我们认为信号的 LPI 特性显得更加重要。因为,只要不被截获,非法方想利用信号获取情报几乎是不可能的。所以本书有关章节将重点研究各种通信信号的 LPI 性能及 LPI 信号的设计及实现技术,对信号的 LPD、LPE 性能在必要时也会加以分析和讨论。

保证信息安全的另一分支技术是密码和信息隐藏技术。信息加密与信息隐藏都是把对信息的保护转化为对密钥的保护。信息隐藏技术沿用了传统加密技术的一些基本思想和概念,但二者采用的保护信息的手段不同。信息加密是把有用信息加密成随机的乱码,侦听者截获到密文后若不知密钥,就无法破译获取信息;信息隐藏则是把有用的信息隐藏到另一个称为载体的信息(如图片)中,侦听者不知道这个普通信息中是否隐藏了真正的有用信息,而且即使知道,也难以提取或去除隐藏的信息。信息隐藏所用的载体可以是文字、图像、声音、视频等。为了增加攻击的难度,也可以把加密与隐藏两个技术结合起来。加密和隐藏技术不属于本书通信信号安全传输 LPE 研究的主要内容,因此不对其作详细讨论。

2. 通信反侦察的基本方法

实现通信反侦察最基本的方法是提高无线电通信电子设备及系统的隐蔽性。提高隐蔽性的方法目前主要有频率法、结构法、时间法、振幅法、空间法以及混合法等。

(1) 频率法。频率法的实质是通信设备或系统在工作过程中,自适应地改变工作频率或伪装无线电通信信号的辐射频率。例如,受伪随机序列控制的跳频通信系统,其工作频率在较宽的频段内随机快速跳变,使敌侦察接收机难以跟踪和搜索,从而实现通信设备或系统隐蔽的良好效果。

(2) 结构法。结构法的实质是反侦察方采用复杂结构的无线电通信信号,实现通信设备和系统隐蔽性。目前这种方法是伪随机信号为基础的。例如,以伪噪声码构成的扩展频谱通信系统,传输的信息隐藏在直接序列扩展频谱信号中,空中传输通信信号频谱宽、谱密度极低,使敌方侦察接收机难以检测和截获。目前采用的新的调制和调制随机跳变技术,也是通信设备或系统的信号采用结构法反侦察的又一新途径。

(3) 时间法。提高通信设备或系统隐蔽性的时间法,是以减小无线电通信信号的辐射持续时间和重复频率为基础的。目前,无线电通信信号采用时间法来提高通信设备或系统隐蔽性的技术已经比较成熟。例如突发通信和伪随机跳时扩展频谱通信都是典型的利用时间法实现通信信号抗检测、抗截获的技术途径。详细内容见本书的第3章和第8章。

(4) 振幅法。提高通信设备或系统隐蔽性的振幅法,就是预先或自动地降低无线电通信发射机的发射功率电平(在确保己方通信接收电平前提下实施幅度法),以使敌方侦察接收机的输入信号功率小于实际灵敏度,让其难以检测到无线电通信信号。振幅法通常用功率自适应技术来实现。

(5) 空间法。无线电通信设备或系统的空间隐蔽性,决定于被侦察无线电通信设备中所采用的天线系统的方向图。天线的方向图主瓣越窄,旁瓣电平越低,则隐蔽性就越高。现代通信中采用自适应天线来确保己方通信所需要的天线方向图形状和主瓣宽度,其反向辐射及旁瓣电平极低,可以实现较好的无线电通信设备或系统空间隐蔽性。

(6) 混合法。混合隐蔽方法是将以上几种方法组合使用的方法。例如,频率法与结构法、结构法与时间法、结构法与空间及时间法等混合使用,可以更好地实现无线电通信设备及系统的隐蔽性。在实际的军事反侦察无线电通信设备及系统中,大都采用混合隐蔽法。如美军的JTIDS系统就采用FH/DS/TH及自适应天线等技术实现通信信号抗截获、抗干扰功能。

提高无线电通信电子设备及系统的隐蔽性的方法,当然不仅仅是以上所提到的方法与技术,还有别的一些方法,如有源干扰隐蔽法等。

实现无线电通信电子设备及系统的隐蔽原理、技术及途径将在本书后面的章节中进行详细论述。

1.2.3 通信干扰

通信干扰分为自然干扰和人为干扰两类。因为考虑的是通信电子对抗,所以本书研究的是人为干扰,它是为了破坏敌方通信而有意识施放的干扰。通信干扰属于有源对抗措施。

1. 通信干扰的类型

通信干扰不同于雷达干扰，它没有消极干扰，只有积极干扰。通信干扰可分为压制性干扰和欺骗性干扰。压制性干扰用强大的干扰功率压制敌收信机的正常接收，使真实信号模糊不清或完全“淹没”在干扰之中。欺骗性干扰发出和敌方通信信号十分相似的干扰信号，使敌方通信人员真假难分，有时它可以起到压制性干扰难以达到的效果。

根据通信干扰在技术和战术上的不同特点，大致可以将其分为以下几种类型：

- (1) 按本身的用途与频谱成分可分为瞄准式干扰、半瞄准式干扰和阻塞式干扰。
- (2) 按调制方式可分为键控干扰，音频、杂音调制干扰，脉冲调制干扰以及综合干扰。
- (3) 按照作用强度可分为压制干扰、强干扰和弱干扰。
- (4) 按照辐射方向可分为强方向性干扰、弱方向性干扰和无方向性干扰。
- (5) 按频段可分为甚低频、低频、中频、高频、甚高频、特高频和超高频等干扰。
- (6) 按作用距离可分为本地干扰、近程干扰和远程干扰。
- (7) 按作用时间可分为短时间干扰和长时间干扰。

值得一提的是，除了用上述电磁波干扰外，对无线信道的破坏同样可以起到破坏或削弱通信信息传输的目的。由于无线信道是个开放的空间，因此对其媒介特性的破坏及扰乱，同样将阻碍信号的传输。例如，核爆炸引起的电离层剧烈变动可中断短波通信，在空中投放吸收或反射材料可中断微波通信等。但是这种方式代价较大，作用时间也有限。

2. 干扰机的工作原理及组成

通信干扰的基本工作形式是点式、阻塞式和瞄准式，这里以瞄准式干扰为例来说明其工作原理与组成。瞄准式干扰机是通信干扰机的基本类型之一，也是应用最广泛的一种干扰机。

如图 1-3 所示，对调频信号的干扰必须对准其频率，因为干扰效果的好坏首先取决于干扰信号频率重合的准确度。这样，使干扰频率与信号频率准确重合就成为这种干扰系统的关键问题。目前，解决这个问题的主要方法是时间选择法。它的原理是：在某些时间干扰发射机发射，而在很短时间里又停止干扰；在停止干扰的这段时间内要接收敌方通信信号，并且用一定的方法记忆敌台信号的频率，然后再发射干扰，这时的干扰频率应调整得与记忆频率相一致，这样就可对敌台信号进行最有效的干扰。

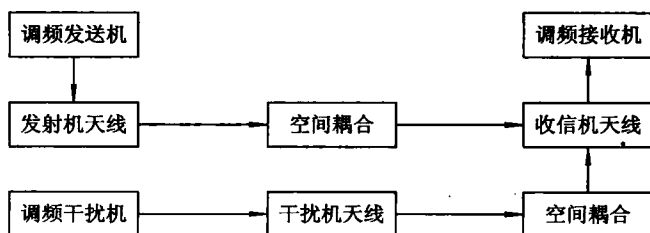


图 1-3 干扰条件下调频通信的相互关系

为了获得最佳的干扰效果，只要求在频率上对准还不够，还必须选择适合的干扰样式。这是因为通信有不同的样式，如等幅报、音频调幅报、移频报等，与此相对应的最佳干扰样式也应分别为等幅报、音频调幅报和移频报的干扰。对于复杂信号，由于信号呈现不规则的起伏状态，因此一般施放杂音干扰。总之，在具体实施干扰的过程中，应根据对方