

国防电子信息技术丛书

Introduction to Cognitive Radio and Communication Electronic Warfare

认知无线电与 通信电子战概论

吴利民 王满喜 陈 功 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

认知无线电 与通信电子战概论

Introduction to Cognitive Radio and
Communication Electronic Warfare



陈 功 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书在介绍认知无线电与现代通信电子战基本概念的基础上,着重研究论证了将认知无线电的频谱感知理念应用于复杂电磁环境下通信电子战中电子支援与电子防护系统的基本思路与技术原理。在论述复杂电磁环境对现代电子战作战性能影响的基础上,提出了具有认知无线电体系结构的战场分布式协作系统结构,并给出了相应的仿真方案及较深度的阐述。为研究现代通信新技术在现代信息战中的应用奠定了相应的理论基础。

本书既可作为有关院校的电子侦察、信息对抗等专业的指挥与工程类本科与研究生学员的教材及教学参考书,也可供有关电子战系统装备研制院所及部队作战专业人员的借鉴与军事训练参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

认知无线电与通信电子战概论 / 吴利民, 王满喜, 陈功著. —北京: 电子工业出版社, 2015.4
(国防电子信息技术丛书)

ISBN 978-7-121-24992-1

I. ①认… II. ①吴… ②王… ③陈… III. ①无线电技术 ②电子对抗 IV. ①TN014 ②E869

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 279034 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

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: 787×1092 1/16 印张: 12.25 字数: 322 千字

版 次: 2015 年 4 月第 1 版

印 次: 2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 49.00 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, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

Preface

Modern electronic communication technology and modern military communication technology always influence mutually, and promote each other. Very often, it is the demand of military fighting and operation that give rise to some new electronic information technologies, and the fast development of electronic information technology has been facilitating the modern war toward to a new times of information war. A distinctive feature of the modern information warfare is an all-around utilization of electronic information equipment, and the electronic warfare can be as the main means of the information war. Meanwhile, those various and complicated electronic equipment get together in informatization battle field to form the fifth fighting space, namely the electromagnetic space. To a great extent, whether the one side of operation can control the battlefield's electromagnetic space or not determines the outcome of the modern operation, winning or failure. As a main streaming of electromagnetic space countermeasures, the electronic warfare plays an important role in this space countermeasures. Communication electronic warfare is one of the electronic warfare that appeared in the early time and has been thriving. The main contents of the researching the electronic warfare is how to make good use of radio communication equipment to carry out a fight for the electromagnetic space. Generally, communication electronic warfare can be divided into three big parts, namely the communication electronic support, communication electronic attack and electronic protection. Essentially, however, it boils down to all those three parts for a preemption of limited electronic spectrum resources. Electromagnetic spectrums are indispensable for the effectiveness of all wireless electronic devices, which are just like land and oil, as a sort of necessary resources. Concerning for the war resources, we pay special attention to these two issues: one is an access of the resources, and the other is the management of the resources. We might look at the game of these problems as well, always expecting to obtain the highest yield under the lowest cost.

Among them both, the cost is just a payroll for seizing the electromagnetic dominance under the complex electromagnetic environment, while the income is the efficiency and effect exerted by the electromagnetic spectrum resources in the operation.

It is noted that the conventional communication electronic warfare follows usually the operation pattern relatively fixed, and also pay attention to the countermeasures between the electronic communications equipment. With the continuous improvement of the modern electronic communication technology and enhancement of the foe's operational capability of operational system, however, the electromagnetic environment in the battlefield is becoming more and more

complex, so that those traditional operational patterns of communication electronic warfare are of old and weak power.

The concept of cognitive radio (CR) was first proposed by Dr. J. Mitola in 1999, aimed at resolving the issue of spectrum resources shortage that is a bondage of the development of traditional electronic communication technology, which, in recent years, has been a hot research topic in the field of modern communications. The core of the CR is that CR has a learning ability itself, and it can detect the surrounding electromagnetic environment and interacting with information, in order to achieve the sensing properly, utilize the spectrum available in the electromagnetic space, and limit and reduce the contradiction of spectrum occupation between the primary and the secondary users.

Compared with the traditional communication spectrum and its usage pattern, cognitive radio is of a powerful capabilities including the observation and cognition, decision-making and adjustment, and learning and smart electromagnetic spectrum occupation. As the CR has enough artificial intelligence, it can also learn from the past experience, in terms of the dead zone, interference and usage patterns of the spectrum, thus making the corresponding adjustment and real-time response to the actual electromagnetic environment and situation. CR, therefore, is likely to give the functions to the wireless system in the battlefield electronic communications, which can decide for itself to take up the chosen frequency band for fulfilling its own communication based on the availability of spectrum, location, and the previous occupation. It is the CR's learning ability that allows itself to be put into use from its concepts and theories. Also, it is by means of the CR's outstanding capabilities that an EW system can be constructed that has the cognitive performance and adapts to the complex EM environment in the external battle field.

Considering the CR's internal mechanism, we find there is some correlation between the cognitive radio and communication electronic warfare. This book focuses on the application of the CR's concept of and its implementation scheme to the modern communication electronic warfare and explores to establish the train of thoughts and schemes for a cognitive type of communication electronic warfare system. In this book, we make every endeavor to think about how to allow our electronic warfare systems to own the specific cognitive performances as the CR system that is already realized and or unfinished not yet. Without a doubt, trying to make the electronic system machine having the cognitive ability is of great significance. Based on this point, we deals with specially a question on the philosophical level of war, in the first chapter of this book, that is, the status of the people and machines in the war. Dating back to the long human's history, although the technical contents of the weapon equipment are getting higher and higher, high technology content, but the operators and fighters are always in a dominant position in the war, which is an irrefutable truth for good. However, while fully affirming this point of view, we should still realize that every major changes in military technology can bring people the change of their roles. In the age of cold

arms, the humans is the direct participants of military confrontation. In the age of cold steel, is the direct participants of military confrontation, while in the modern war, the vast majority of the military struggles is carried out by operating the advanced systems and equipment, and of course, the human is changing to a controller gradually. Since the cognitive radio unlocks the doors of the cognitive era of electronic communication system machine, the human's roles will also further into the decision makers. Accordingly, each kind of work relative to the bottom level may be delivered to the machines for accomplishment, also due to the higher efficiency and better reliabilities of the machines. From the point of view of resources, the above-mentioned CR's cognitive pattern is the optimization and utilization of the human's intelligence and artificial smart resources, which are just the source of writing this book's idea and the starting point or even the end point.

The structure of this book can be divided into the preface and contents both in Chinese and English, followed by seven chapters. The main contents are, Chapter 1, which summarizes the background knowledge about the topics of this book and a few thinking points relevant to the top layers of modern information warfare, thus laying a foundation for the following expansion of details; Chapter 2 and 3 make a brief introduction to the basic ideas and contents on cognitive radio and communication electronic warfare, respectively, which are the two cornerstones of the themes in this book; Chapter 4 discusses mainly the effects of complex EM environment and the applicable advantages of cognitive radio architecture, thus drawing forth some key issues; Chapter 5 and 6 expounds the schemes of communication electronic protection and support based on CR, respectively, and explores some concrete patterns that allow the EW system and equipment to have cognitive capability; and Chapter 7 proposes and sets up an EW attack system based on CR architecture, namely, Battlefield Distributed Coordinative Cognitive Radio (BDCCR)。

The authors strive to explore a new train of thought, look for a sort of new method, and look through the operation of the modern communication electronic warfare in the complex electromagnetic environment and space with a new angle of view. These new ideas and methods, of course, involves the theories of multi-disciplinary fields. We also refer to more domestic and foreign technical literatures in the corresponding field in the writing process, and put them flexibly together, also gain a lot of beneficial enlightenment. Highlighting those new ideas, implementation schemes and some special advantages of applying the cognitive radio to the communication electronic warfare, this book focuses on the corresponding system analysis and the specific algorithm for system implementation.

In the process of this book being compiled, we get the support and help in many ways, which are specially from Nie Hao, the researcher in the 33rd Base, General Armament Department; from Wang Liandong, the director of State Key Laboratory of Complex EM Environmental Effects on Electromagnetic & Information Systems, as their base and laboratory present us a lot of relevant materials and data as well as the corresponding experimental platform, we would like to thank them

both especially for their support. Meanwhile, we also would like to thank Professor Wang Yongliang, Qing Jiangmin and Yang Ruijuan as well as associate Prof. Mei Jinjie and Cheng Wei, for their presenting a great deal of instructional advices. In addition, our colleagues Huang Meirong, Zhu Shumei Here, Bao Leilei, Gao Lu and others have also done a lot of auxiliary work for this book.

Modern electronic information theory covers both extensively and intensively, modern communication technology change with each passing day, and the modern information warfare and electronic warfare goes so fast, which can not be dealt with well, based on the authors' level. Although we cover very little contents on this vast field, we do expect some big useful functions served. Of course, there are certainly some mistakes and errors in this book, and we look also forward to all those colleague experts to make comments and correct them.

Prof. Wu Limin
Special Term Professor, State Key Laboratory of Complex EM
Environmental Effects on Electronics & Information Systems
And Air Force Early Warning Academy, the PLA

Wrote on October, 2014 in Wuhan, China

前 言

现代电子通信技术与现代军事通信技术总是彼此影响、相互推动的。往往还是军事斗争与作战的需求催生了新的电子信息技术，而电子信息技术的迅猛发展又促使现代战争迈向全新的信息化战争时代。现代信息战的一个鲜明特征就是电子信息设备的全方位使用，并以电子战为主要的信息作战手段。与此同时，这些复杂多样化的电子信息设备共同张扬弥漫而构成了信息化战场的第五个作战空间——电磁空间。在相当程度上，作战一方能否掌控战场的电磁空间，决定着整个现代作战行动的胜负与成败。作为电磁空间对抗的主体形式，电子战在其中扮演着重要的角色。通信电子战是最早出现并茁壮成长的电子战，其研究的主要内容是如何善用无线电通信系统设备来展开电磁空间斗争的问题。一般可将通信电子战分为三个部分，即通信电子支援、通信电子进攻以及通信电子防护这三大块。但从本质上来看，这三者都可以归结为对有限电子频谱资源制高点的抢占。电磁频谱是所有无线电子设备的效能所依，它与土地、原油等一样，是必不可缺的战争资源。对待战争资源，我们特别关注两方面问题：一是资源的获取；二是资源的管理。我们不妨以博弈的眼光来审视这些问题，即总希望在最低成本下获得最高的收益。其中，成本是为了夺取复杂电磁环境下的制电磁权所付出的各种代价，而收益是电磁频谱资源在作战行动中发挥出的效能与作用。

值得注意的是，常规的通信电子战一般均遵循相对固定的运作模式，也注重电子通信设备之间的对抗。然而，随着现代电子通信技术的不断改进和作战对手体系作战能力的不断增强，致使战场的电磁环境变得更加迷离复杂，从而使这种传统的通信电子战的作战模式老套与威力疲乏。认知无线电（Cognitive Radio, CR）的理念由 J. Mitola 博士于 1999 年首次提出，旨在解决束缚传统电子通信技术发展的频谱资源紧缺问题，近年来已成为现代通信领域研究的热点问题。

CR 的核心思想是 CR 自身具有学习能力，它能检测周围电磁环境并与其交互信息，以达到正确感知和利用该电磁空间的可用频谱，并且能限制与降低频谱主次用户之间占用的冲突发生。

与传统的通信频谱占用模式相比，认知无线电具有强大的观测与认知、决策与调整、学习与智能的电磁频谱占用能力。由于 CR 具有足够的人工智能，它也可能通过对频谱的死区、干扰和占用模式等来吸取以往经验，因而对实际的电磁环境与情况做出实时调整与响应。由此可见，CR 极有可能赋予战场电子通信战中无线系统设备根据频谱的可用性、位置和过去占用的经验来自主确定接入哪个频带而完成自己通信的功能。这也正是 CR 的学习能力能使它从概念及其理论迈入实际应用的真正原因。正是借助于它的这些突出的能力，可构建具有认知能力的并能够更好适应复杂多变外界战场电磁环境的电子战系统，以极大地改进

现代通信电子战的作战性能。

从内在机理来看，认知无线电与通信电子战之间存在着较大的相关之处。本书研究的核心主题就是将认知无线电理念及其实现方案应用于现代通信电子战中，探索构建认知型通信电子战系统的思路与方案。基于认知无线电和通信电子战中的概念和主题，我们在书中极力思索如何能使电子战系统设备像已实现及未实现的认知无线电系统那样具备专门的认知能力。毫无疑问，使电子系统机器具备认知能力的意义重大。基于此点，我们在本书第 1 章中专门探讨了一个有关战争的哲学层面的问题，即战争中人与机器的地位问题。在漫长的人类战争史中，尽管武器装备技术含量越来越高，但战争中处于主导地位始终是作战者。这是一条永远都颠扑不破的真理。然而，在充分肯定这一观点的同时，我们还应当清醒地意识到，每一次军事技术的重大变革都会带来人的角色的转变。在冷兵器时代，人是军事对抗活动的直接参与者。而到了现代化战争中，绝大部分的军事斗争均是通过先进系统装备的运作使用来进行的，人逐渐转变为控制者。由于认知无线电开启了系统机器认知时代的大门，人的角色也将进一步转变为决策者。相应地，相对底层的各类工作均可能交给机器来完成，这也是由于机器系统的效率更高、可靠性更好而决定的。从资源的角度来看，上述模式是对人类智能和人工智能资源的最优化利用。这正是我们撰著本书的思想源头和写作的出发点与目的。

全书结构可分为中/英文前言、目录与 7 章内容。本书主要内容有，第 1 章概述了有关本书主题的背景知识及有关现代信息战顶层的几点思考，这些内容为后续论述的展开做了铺垫；第 2 章和第 3 章分别介绍了认知无线电及通信电子战的基本概念和内容，此乃本书核心主题的两大基石；第 4 章就战场复杂电磁环境的效应与认知无线电体系应用的优势进行了讨论，从而引出我们的关键问题；第 5 章和第 6 章分别阐述了基于认知无线电的通信电子防护及通信电子支援方案，探讨了使电子战系统设备具有认知能力的具体模式；第 7 章则提出并构建了一种基于认知无线电体系化的通信电子作战进攻系统，即战场分布式协作认知无线电（Battlefield Distributed Coordinative Cognitive Radio, BDCCR）。

本书作者力求探索一种全新的思路、寻觅一种新方法，并以一种全新的视角去审视未来复杂电磁环境及空间的现代通信电子战的运作。当然，这种新思路、新方法必然要涉及多学科领域的理论知识。笔者在编著过程中也参考了相应领域内较多的国内外文献资料，将它们有机地联系在一起，并从中获得了许多有益的启示。为突出这些认知无线电应用于通信电子战中的新理念与新方案，本书写作的重点在于阐述具有认知型的通信电子战的核心思想、实现方案及其独到优势，并侧重系统分析与实现的具体算法。

本书在编著过程中得到了多方的支持和帮助，尤其是得到总装第 33 基地聂焱研究员、电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室主任汪连栋的鼎力支持与相助，该基地与实验室也给予了我们大量、翔实的相关资料与数据，并提供了相应的系统实验平台，特此鸣谢。与此同时，也感谢空军预警学院的王永良教授、秦江敏教授、杨瑞娟教授、梅进杰及陈

伟副教授对本书稿的编著与完成均提出了许多指导性的建议；黄美荣、崔晓梦、朱淑梅、鲍蕾蕾、高路等同事为本书做了大量的编写辅助工作。

现代电子信息理论涵盖之博大精深，现代通信技术发展之日新月异，现代信息战与电子战之风云变幻，远非笔者水平所能涉及与阐述。书中虽对此领域蜻蜓点水，但确期待能起抛砖引玉之功效。当然，文中难免有不妥和不足之处，殷切期待同仁和读者批评指正。

电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室特聘教授

中国人民解放军空军预警学院教授 吴利民

写于 2014 年 10 月，武汉

目 录

第 1 章 绪论	(1)	2.6.2 天线	(36)
1.1 无线电通信	(1)	2.6.3 射频前端	(37)
1.1.1 军事通信发展的基础	(1)	2.6.4 基带处理	(38)
1.1.2 通信系统基础模型	(2)	参考文献	(38)
1.1.3 无线电通信	(3)	第 3 章 通信电子战	(40)
1.1.4 软件无线电与认知无线电概述	(4)	3.1 电子战	(40)
1.2 复杂电磁空间制信息权的争夺	(5)	3.1.1 信息战	(40)
1.2.1 通信电子战	(5)	3.1.2 电子战	(43)
1.2.2 其他电子对抗类型	(6)	3.1.3 雷达电子战	(45)
1.3 人工智能技术	(7)	3.1.4 光电电子战	(47)
1.4 顶层面思考	(8)	3.1.5 通信电子战	(47)
1.4.1 人与机器	(8)	3.2 测频与截获	(47)
1.4.2 关于信息	(9)	3.2.1 测频与截获的环境	(48)
1.4.3 信息及信号传输频带宽	(11)	3.2.2 搜索接收机	(49)
1.4.4 总结	(11)	3.2.3 对 LPI 信号的截获	(52)
参考文献	(12)	3.2.4 测频的性能指标	(53)
第 2 章 认知无线电技术	(13)	3.3 测向与定位	(53)
2.1 认知无线电技术的产生背景	(13)	3.3.1 振幅法测向	(53)
2.2 认知无线电的概念	(14)	3.3.2 相位法测向	(55)
2.2.1 多种定义	(14)	3.3.3 定位技术	(58)
2.2.2 认知无线电能力	(15)	3.4 通信电子进攻	(60)
2.2.3 认知无线电中的关键技术	(17)	3.4.1 通信电子干扰	(60)
2.3 频谱感知	(19)	3.4.2 窄带干扰	(61)
2.3.1 基本感知方法	(20)	3.4.3 宽带干扰	(63)
2.3.2 联合检测	(22)	3.4.4 火力打击	(64)
2.3.3 协作感知	(23)	参考文献	(65)
2.3.4 广义感知	(25)	第 4 章 战场复杂电磁环境效应分析	(66)
2.4 频谱决策	(26)	4.1 战场电磁环境及复杂电磁环境	
2.4.1 频谱分析	(26)	效应	(66)
2.4.2 频谱决策与分配	(29)	4.1.1 战场复杂电磁环境效应分析	(66)
2.4.3 认知无线电学习	(31)	4.1.2 复杂电磁环境对电子信息	
2.5 认知无线电中的安全问题	(33)	系统的作用与效应	(68)
2.5.1 安全威胁	(33)	4.2 认知无线电在复杂电磁环境中	
2.5.2 安全对策	(34)	的应用优势	(69)
2.6 认知无线电的实现	(35)	4.2.1 感知的广度与深度	(69)
2.6.1 基本结构	(35)	4.2.2 感知的精细度	(70)

4.2.3	感知的全面性	(71)			
4.2.4	认知无线电在复杂电磁环境下的抗干扰识别	(72)			
4.2.5	结论	(72)			
第 5 章	认知无线电在通信电子防护中的应用	(73)			
5.1	认知防护通信系统	(73)			
5.1.1	认知防护通信系统的提出背景	(73)			
5.1.2	认知防护通信系统概述	(81)			
5.2	认知防护通信系统的结构及原理	(86)			
5.2.1	认知防护通信系统的总体结构	(86)			
5.2.2	认知防护通信系统感知的纯信道化结构	(87)			
5.2.3	认知防护通信系统的感知技术	(89)			
5.2.4	对随机参量干扰的感知	(94)			
5.2.5	方位的感知	(98)			
5.2.6	分析识别	(101)			
5.2.7	决策机制	(108)			
5.2.8	自适应调整	(109)			
	参考文献	(113)			
第 6 章	认知无线电在通信电子支援中的应用	(115)			
6.1	侦察性能	(115)			
6.1.1	频域侦察能力	(115)			
6.1.2	时域侦察能力	(118)			
6.1.3	空域侦察能力	(119)			
6.2	对特定目标的监视	(123)			
6.2.1	能量检测	(124)			
6.2.2	匹配滤波器检测	(124)			
6.2.3	周期谱相关检测	(124)			
6.2.4	协作监视	(127)			
6.3	智能化侦察	(129)			
6.3.1	分类	(130)			
6.3.2	聚类	(133)			
6.3.3	关联	(136)			
6.4	认知无线电在辐射源个体识别中的应用	(141)			
6.4.1	辐射源识别的特征提取	(141)			
6.4.2	认知无线电在辐射源识别中的应用潜力	(142)			
6.5	认知无线电在侦察—攻击一体化装备中的应用	(143)			
6.5.1	侦察—攻击一体化装备概述	(144)			
6.5.2	侦察—攻击一体化装备的结构	(144)			
6.5.3	认知无线电在侦察—攻击一体化装备中的应用潜力	(145)			
	参考文献	(147)			
第 7 章	战场分布式协作认知无线电	(148)			
7.1	战场分布式协作认知无线电(BDCCR)的概念	(148)			
7.1.1	BDCCR 的产生背景及定义	(148)			
7.1.2	BDCCR 的特性	(150)			
7.2	战场分布式协作认知无线电(BDCCR)的工作原理	(153)			
7.2.1	BDCCR 的组织结构	(153)			
7.2.2	BDCCR 任务阶段的划分	(154)			
7.2.3	BDCCR 部署	(154)			
7.2.4	BDCCR 感知	(157)			
7.2.5	BDCCR 决策	(161)			
7.2.6	BDCCR 执行	(162)			
7.3	情报的核心——信息融合	(162)			
7.3.1	分布式融合	(162)			
7.3.2	集中式融合	(166)			
7.3.3	目标识别、态势评估和威胁评估	(170)			
7.4	效能的关键——体系攻击	(170)			
7.4.1	攻击任务的分配	(171)			
7.4.2	攻击的方式	(174)			
7.4.3	协作攻击	(175)			
7.4.4	自主攻击	(179)			
7.5	前沿展望	(180)			
7.5.1	BDCCR 的延伸	(180)			
7.5.2	BDCCR 与网络中心战	(182)			
	参考文献	(182)			

第 1 章 绪 论

本书讨论将认知无线电与相关理念及其技术方案应用于现代通信电子战中的初步构想。现代通信技术的进步与发展产生了认知无线电，因此，通信技术的进步必然推动现代通信电子战的发展。那么，认知无线电与现代通信电子战之间又存在着什么样的内在联系？为提升通信电子战的作战效能，能否将认知无线电的主要理念应用于现代通信电子战中？如何具体实现其应用？对于这些在国内外尚属全新的课题，本书旨在尝试研究与讨论这方面的基础与一些实用性工作。

本章前三节介绍了有关本书内容的三个基础性主题的简要知识，在 1.4 节中着重阐述了本书的中心思想和主干线索，并概述性地介绍了本书的主要研究内容。

1.1 无线电通信

众所周知，现代通信技术的迅猛发展也不断地推动着社会的进步，改善了人们的生活质量，同时也大大改变了人类战争的形态。人们每天都在经历通信，简单地说，通信就是传递信息。传递信息的方法有很多，如电话、短信、微信、电子邮件等，甚至人们简单的一个手势、一个眼神等都可以用来传递相关信息，它们皆属通信的范畴。然而，我们在此更加关注那些使用现代电子技术手段的通信方式，尤其是无线电通信。为完整地描述无线电通信这一概念，本节分别就通信的历史、无线电通信及其未来发展趋势来展开介绍。

1.1.1 军事通信发展的基础

在人类发展的历史长河中，战争似乎从未远离。纵观史实记载，在世界文明史的 5000 多年来，先后一共发生了 14 450 多次大大小小的战争，那是人类已面对的残酷现实，炮火、硝烟、鲜血和眼泪……不同历史时期，战争的形态也各不相同，大为迥异。基于战争的发展史来看，古代战争依赖于火药；近代战争决胜于机械；而在现代战争则完全取胜于由电子通信获取的信息。

人类早期的通信主要依靠声、光。例如，击鼓鸣金是利用声通信实现命令传递、战术控制；举世瞩目的万里长城的烽火台则是利用光通信来实现敌情预警。随着人类文明的进步，马匹、信鸽等又慢慢成为远距通信的常用工具。然而，实践证明，这些通信方式有效性低下，可靠性较差，且很耗费人力与物力。

直到人们发明了电，并懂得了利用电能的传输以实现效率较高的电子通信方式，这一状况才得以改变。1838 年，摩尔斯（Samuel F. B. Morse）发明了实用的电报机，并采用著名的“摩尔斯电码”来传输信息，开创了人类电通信的先河。在这之后的一个多世纪中，电通信也不断取得新的发展，表 1-1 给出了电通信发展的简要年谱。

表 1-1 电通信简要年谱

时 间	进 展
1838 年	摩尔斯发明有线电报
1864 年	麦克斯韦提出电磁场理论及电磁辐射方程
1876 年	贝尔发明电话
1896 年	马可尼发明无线电报
1906 年	真空管(电子管)问世
1918 年	调幅无线广播、超外差接收机出现
1925 年	三路明线载波电话, 试用多路通信
1937 年	数字通信的脉冲编码调制(PCM)理论提出
1948 年	晶体管出现, 香农(Shannon)提出信息论, 并开始建立通信统计理论
1958 年	发射第一颗通信卫星
1960~1970 年	数字传输理论及相应的数字技术得到发展, 超高速数字计算机出现
1970~1980 年	LSI 程控交换机、光纤通信系统、微处理器得到应用
1980~1990 年	VLSI、ASIC、ISDN、ATM 得到应用
1992 年	软件无线电概念提出
1999 年	认知无线电理念提出

从表中可以看出, 通信技术经历了一个从有线到无线、从模拟到数字的发展过程。同时, 一些相应的关键理论在电子通信的发展中也至关重要。例如, 信息论的提出就是通信发展史上的一个关键性节点。此外, 现代计算机系统及其软硬件水平的提升也促成了现代通信技术一次又一次的飞跃发展。

譬如, 在冷兵器时代, 战术级指挥基本被限制在视线近距离范围之内; 在有线电话出现之后, 指挥员可以通过有线电话在较远距离上了解作战的进展, 实现远程指挥; 而在现代卫星通信技术得到长足发展的今天, 指挥官在本国境内就能获取地球另一侧战场上的实时进展信息, 并对作战行动进行精确的指挥与控制。因此可以说, 没有现代通信技术的存在与发展, 就没有现代的信息化战争。

人类通信技术的重大变革与发展多半起源于军事斗争领域的作战需求, 现代通信技术的每一次发展与进步都会给军事通信带来巨大的作用与影响。现代电子通信登上历史舞台已将近一个世纪, 它在两次世界大战和上百次的局部战争中宛如一首首无声无影, 但却扣人心弦的壮丽诗篇。

1.1.2 通信系统基础模型

信息本身无法直接传输, 只有将信息转换成信号才能被传输。简而言之, 信号就是经过

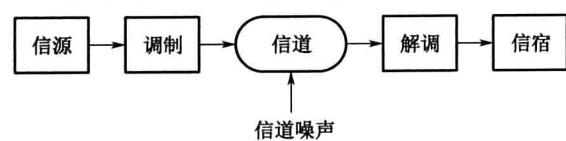


图 1-1 模拟通信系统的基本结构

变换的符号化的信息。电子通信中采用的是电信号, 无论是语音还是文本与图像等信息, 都需先转换成电信号才能发送出去。以最基本的模拟通信系统为例, 给出了通信系统的一般基础结构, 如图 1-1 所示。

在图 1-1 中, 信息传输必须要经过信源、调制、信道、解调以及信宿几个环节。信源是将信息转换成电信号的设备。发射部分调制的功能是将电信号调整转换为便于远程传输的信号送入信道, 主要包括调幅 (AM)、调频 (FM) 等基本调制及其改进方式。信道是信号的必经传输途径, 它包括有线信道、无线信道等。信道中不可避免地存在各种干扰与噪声, 这些干扰噪声将混入有用信号中, 并与其一同进入接收机系统。接收部分的解调是调制的逆过程, 目的是还原出调制前携带信息的原始电信号。信宿则将该信号转换还原成用户需要的各种信息, 最终完成上述通信系统的功能。

数字通信系统采用数字信号携带并承载信息。因此, 在调制之前, 原始数字信号还需要编码, 在解调之后也就需要解码。相比经典的模拟通信, 数字通信有许多优势, 例如信号接收的正确率更高、更利于保密等。由于电子计算机所使运行的也正是数字信号, 因此, 数字通信系统就能很好地与计算机系统进行交互, 从而具有更为强大的通信功能。

1.1.3 无线电通信

1896 年, 意大利工程师马可尼发明了无线电报。从此之后, 无线通信就翩翩登上了人类电子通信的历史舞台。相比有线通信, 无线电通信对传输介质几乎没有要求, 在空气或真空中就能完成信息信号的传递。这也使通信变得更快更灵活, 更便捷高效, 更具备较强的适应性。就在当今移动通信如此发展的今天, 无线电通信仍是一切移动通信的基础。今天人们之所以能够随时随地顺畅地与他人进行信息交流, 靠的就是传统的无线电通信方式。

在无线电通信中, 信息的传输是通过一定频率的信号的高频电磁波在空间传播来实现的。无线通信中常用的频段如表 1-2^[1]所示。要实现无线电通信, 必须通过天线将高频无线电信号发射到空中去。天线的形式有很多, 在实际中选用哪种天线取决于通信的目的和不同频段。天线的尺寸与发射电磁波的波长有关, 波长越长, 所需天线的尺寸就越大。另外, 为了有效地发射或接收电磁波, 通常要求发射或接收天线的尺寸不小于信号对应波长的 $1/10$ ^[1]。

表 1-2 无线通信用常用频段

频 段	名 称	典型通信应用
3~30Hz	极低频 (ELF)	远程导航、水下通信
30~300Hz	超低频 (SLF)	水下通信
300~3000Hz	特低频 (ULF)	远程通信
3~30kHz	甚低频 (VLF)	远程导航、水下通信、声呐
30~300kHz	低频 (LF)	导航、水下通信、无线电信标
300~3000kHz	中频 (MF)	广播、海事通信、测向、求救
3~30MHz	高频 (HF)	远程广播、电报、电话、传真、搜寻救生、空海通信、船岸通信、业余无线电
30~300MHz	甚高频 (VHF)	电视、调频广播、陆地交通、航管、导航、飞机通信
0.3~3GHz	特高频 (UHF)	电视、蜂窝网、微波链路、导航、卫星通信、GPS
3~30GHz	超高频 (SHF)	卫星通信、微波链路、公用陆地移动通信
30~300GHz	极高频 (EHF)	卫星通信、移动通信

续表

频段	名称	典型通信应用
43~430THz	红外(7~0.7 μm)	光通信
430~750THz	可见光(0.7~0.4 μm)	光通信
750~3000THz	紫外线(0.4~0.1 μm)	光通信

1.1.4 软件无线电与认知无线电概述

在过去的一个多世纪中,无线电通信系统及其技术已经获得了快速的发展与提升。伴随着现代计算机系统软硬件技术水平的发展,未来的无线电通信将朝着更高效灵活、更便捷可靠且更具适应性的方向迈进。这就是建立在一系列无线电通信新理念与新技术基础上的近年来问世的软件无线电(Software Defined Radio)和认知无线电(Cognitive Radio)体系结构。软件无线电和认知无线电这两个概念均是由美国学者 Joseph Mitola 博士分别于 1992 年和 1999 年提出的。这两者具有较强的内在联系,目前皆为现代通信技术领域研究的热点专题。

20 世纪 90 年代,计算机技术、微处理器技术、DSP 技术、VLSICs 和 ASICs 技术,以及软件技术得以迅猛发展与广泛应用。在这种较为成熟的技术背景条件下,软件无线电的概念得以出现与升华。它的基本思想可总结如下^[2]:

- **完全数字化 (fully digitization)**。软件无线电的美好思想是力图从通信系统的基带信号直至中频、射频段全部进行数字化处理。
- **完全的可编程性 (fully programmability)**。软件无线电建立在通用的硬件平台基础上,将通信系统的各种功能完全由相应的可编程软件来实现,包括宽频带内的可编程信道调制方式、可编程的射频与中频频段、可编程的信道解调方式、信源编码、解码方式等。
- **系统升级的便捷性与系统功能的可扩充性 (flexibility and extendibility)**。软件无线电中,对系统功能的更新与升级只需进行相应软件的升级,而一般无需对硬件电路进行改进。
- **系统便于实现模块化 (modularization)**。根据软件无线电的基本思想,对现行的通信系统均可实行模块化设计,模块的物理及电气接口性能指标符合统一、开放的标准。系统运行中通过更换单一模块,以及可维护或提高系统的性能,便于系统间的复用。

随着现代通信的迅猛发展,通信系统设备的扩展与普及,不同频段通信的用户和业务量也大幅上升。鉴于原本有限的无线电频谱资源日益稀缺,而现行的频谱使用方案效率较为低下,并限制了通信的进一步发展以及通信业务的进一步扩充的现状,人们迫切需要一种新的技术来解决提高现行无线频谱利用率的焦点问题,于是,认知无线电的概念应运而生。Joseph Mitola 博士在其奠基性的研究工作基础上,提出了认知无线电(Cognitive Radio, CR)的概念。CR 的核心思想是其具有较强的频谱感知、人工智能与学习能力,它能与周围环境交互信息,以感知和利用在该空间的可用空闲频谱,并限制和降低占用频谱时发生的冲突。

认知无线电构建了一种全新的无线通信系统,它的基本内涵是能够感知包括频谱在内的

多维环境信息，并能够基于不同电磁频谱环境信息动态地对发射端信号进行调整，以提升频谱利用率和通信的有效性与可靠性。在现行的 CR 研究中也有人对 CR 给出了不同的描述。美国 FCC 在 FCC-03322 中建议将任何具有感知频谱且具备自适应调整意识的无线电系统均可称为认知无线电 (CR)。FCC 对 CR 的更具体确切的定义是：CR 为基于与操作环境的交互、能自适应地、动态地改变系统中发射机主要参数的无线电设备，主要具有所处频谱环境感知和传输信号参数自适应调整修改的功能。具体而言，CR 这种新型无线电能够在较宽的频带内准确可靠地感知频谱环境，检测主用户 (已授权用户) 的频谱占用情形，从而能做出分析判断而自适应地占用即时可用的本地频谱，并能同时在整个通信过程中不给主用户造成任何妨碍与干扰。显然，由于无线电传输环境中的无线信道和干扰是随机变化的，这就预示着 CR 将具有较高的智能性、学习性与灵活性。

目前，对 CR 应用的大部分是建立在上述 FCC 定义的基础上，因此，人们也常称 CR 为频谱捷变无线电、机会频谱接入无线电等。总之，认知无线电的核心思想就是通过频谱感知 (Spectrum Sensing) 和系统的智能学习能力，实现动态频谱分配 (Dynamic Spectrum Allocation, DSA) 和频谱共享 (Spectrum Sharing)。

当然，值得强调的是：软件定义无线电 (SDR) 是实现认知无线电 (CR) 的理想平台。由于本书旨在将认知无线电的基本理念与技术应用于现代通信电子战中，因此在本书第 2 章中，我们还将针对认知无线电进行深入的探讨。

1.2 复杂电磁空间制信息权的争夺

进入当今的电子通信时代以来，在现代信息战中的复杂电磁空间已逐渐成为除陆、海、空、天之外的另一作战的时空领域。显然，复杂电磁空间的斗争与制信息权紧密相扣。如果没有占领电磁空间的优势，就不可能取得制信息权。具体而言，电磁空间的斗争首当其冲地与通信有着密切联系：其一，电子通信是现代战场的神经，是赢得制电磁权的根本保证之一；其二，由电子通信所衍生出的通信电子战是电磁空间斗争中争夺制信息权的最重要的一个组成部分。后者就是本书讨论的重点部分。此外，在电磁空间制信息权的争夺中还包括一些其他的组成部分，如雷达、遥感遥测以及光电等频段上的对抗争夺。然而，所有这些复杂电磁空间制信息权争夺的所有组成部分在系统的本质上是一脉相承的。因此，本书中所探讨的利用认知无线电实现通信电子战的新思想与方案也同样可类推于其他形式的电子战。

1.2.1 通信电子战

何谓通信电子战？现代通信技术的多元化进展催生了军事斗争中敌对双方围绕电子通信系统展开的通信技术对抗，这种对抗在军事上称为通信电子战。在战争中，敌对双方都企图破坏对方通信系统的正常功能，同时也都期望己方的通信系统能够正常可靠地工作。这就是通信电子战中的通信电子进攻和通信电子防护所需达到的目的。然而，实施有效的通信电子进攻和通信电子防护必然需要得到关于行动客体的信息支持，即每一方都需要设法获取对方电子系统的相关信息以及可能传输的信息，也就是早期的电子侦听与电子截获，现统称为所