

# 电子信息系统 复杂电磁环境效应

聂峰 汪连栋 曾勇虎 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

C14012589

TN103  
25

# 电子信息系统 复杂电磁环境效应

聂 隰 汪连栋 曾勇虎 等著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1698818

TN103  
25

## 内容简介

随着电磁辐射源数量的迅速增长,电磁环境越来越复杂,其对电子信息系统的影  
响越来越大,造成的危害越来越严重,使得人们开始逐步重视复杂电磁环境效应  
问题,并投入了大量的人力和物力进行相关研究。

复杂电磁环境效应研究内容包括复杂电磁环境特性与模拟、复杂电磁环境综  
合效应机理和电子信息系统效能评估理论与方法等研究方向。本书根据作者多年  
的研究和实践经验,提出了基于相关性的复杂电磁环境效应研究方法,从电磁环境  
与电子信息系统相关性分析、复杂电磁环境生成与评价技术、电子信息系统复杂电  
磁环境效应评估、电子信息系统复杂电磁环境效应仿真技术等方面,对复杂电磁环  
境效应研究进行了较系统分析和论述。

本书是电子信息系统复杂电磁环境效应研究领域理论和实践经验的总结,适合  
电子信息系统复杂电磁环境效应科研试验等领域的研究与工程技术人员阅读使用,  
可作为电子信息工程、信息对抗技术、系统仿真等相关专业的教学和研究参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子信息系统复杂电磁环境效应 / 聂焱等著. —北  
京:国防工业出版社, 2013. 8  
ISBN 978-7-118-09033-8

I. 电... II. ①聂... III. ①军事系统-电子系统-  
信息系统-电磁环境-磁场效应-研究 IV. ①E869

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 211205 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 18 1/4 字数 340 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 前 言

电子信息系统复杂电磁环境效应,即复杂电磁环境对电子信息系统的影响,包括多种形式,主要有能量效应、信息效应和管控效应等。所谓能量效应,即在复杂电磁环境下,电磁信号利用其电磁能量作用于电子信息系统,对电子信息系统的正常工作产生影响,甚至对电子信息系统造成物理性破坏的“硬损伤”,破坏、摧毁电子信息系统,即从物理层面影响电子信息系统;所谓信息效应,即电磁信号对电子信息系统的信息链路环节产生影响,妨碍电子信息系统产生、传输、获取和利用信息,对电子信息系统造成功能性破坏的“软损伤”,即从信息层面影响电子信息系统;所谓管控效应,即利用电磁频谱接入等信息化手段,对电子信息系统(特别是网络化信息系统)的控制协议和信息内容等进行探测、识别、欺骗和篡改等操作,实现系统的接管控制和为我所用,即从控制层面影响电子信息系统。

随着电子信息系统综合化、网络化和一体化的不断发展,以及电磁环境的日益恶化,复杂电磁环境效应问题越来越成为关系社会公共安全、国防与军队建设的重要问题。首先,随着人们使用需求的增加,电子信息系统的规模越来越大、结构越来越复杂、系统间耦合越来越紧密,电磁易损性逐步增加,受到电磁环境的影响也越来越大;同时,各种电磁设备的大量使用,导致电磁环境日趋复杂和恶化,进一步加剧了对电子信息系统正常工作的损害。

电子信息系统复杂电磁环境效应涉及电磁学、电子学,以及信息科学、复杂性科学、非线性科学等学科领域的交叉,其内部机理和外在规律均难以探寻,已成为世界性难题。电子信息系统复杂电磁环境效应包括复杂电磁环境特性与模拟、复杂电磁环境综合效应机理和电子信息系统效能评估理论与方法等研究方向。

近年来,作者及其团队从以上三个方面开展了电子信息系统复杂电磁效应的研究与应用工作。多年的实践经验发现,复杂电磁环境对电子信息系统的影响效应表现出相对性。以复杂电磁环境下的作战效能评估为例,产生一个真实的战场复杂电磁环境,需要研制和生产对抗双方大量的电子信息系统,在目前这是不可能实现的;而根据电磁环境对电子信息系统的作用机理,构建一个等效的复杂电磁环境,经实践证明是进行效能评估的有效手段。因此,本书提出了基于相关性的复杂电磁环境效应研究方法,研究内容包括面向电子信息系统的复杂电磁环境效应研



究、复杂电磁环境生成与评价、复杂电磁环境效应评估等技术和方法。本书是作者多年在相关领域深入研究与实践的总结,理论联系实际,对复杂电磁环境下电子信息系统的试验与评估具有指导作用,期望能够对电子信息系统复杂电磁环境效应的研究起到推动、引领作用。

在本书的撰写过程中,洪丽娜、蒙洁、戚宗锋、郑光勇、胡明明、李金梁、李林、韩慧、冯润明、许雄、高磊、张晓芬、王华兵等参加了部分章节的研讨和撰写工作;电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室的各位同事针对复杂电磁环境效应相关问题,通过广泛的调研与深入的研讨,对编写工作提出了许多建设性的意见;本书的编写还得到了国防工业出版社的大力支持,在此表示真诚的谢意。同时,本书参考了国内外大量的相关文献和研究成果,对这些作者和研究人员,在此一并表示感谢。

电子信息系统复杂电磁环境效应的研究还在向前发展,许多研究工作需要不断地创新与完善。尽管我们在撰写过程中做了很大努力,但囿于认识和水平,书中难免有不当和疏漏之处,敬请读者和各位同仁批评指正。

作者

2013年6月

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 电子信息系统与复杂电磁环境 .....	2
1.2.1 电子信息系统 .....	2
1.2.2 复杂电磁环境 .....	3
1.2.3 电子信息系统与复杂电磁环境的关系 .....	6
1.3 复杂电磁环境效应研究概况 .....	7
1.3.1 复杂电磁环境效应 .....	7
1.3.2 复杂电磁环境效应研究难点问题与发展趋势 .....	10
1.3.3 基于相关性的复杂电磁环境效应研究方法 .....	13
1.4 本书主要内容及结构安排 .....	14
参考文献 .....	15
第2章 复杂电磁环境与电子信息系统相关性分析 .....	17
2.1 概述 .....	17
2.2 复杂电磁环境特性及构成 .....	17
2.2.1 复杂电磁环境的复杂性分析 .....	17
2.2.2 复杂电磁环境构成 .....	21
2.2.3 复杂电磁环境信号成分 .....	32
2.3 电子信息系统复杂电磁环境效应分析 .....	38
2.3.1 电子信息系统的组成与功能 .....	38
2.3.2 电子信息系统复杂电磁环境效应产生机理 .....	54
2.3.3 电子信息系统的复杂电磁环境效应主要表现形式 .....	68
2.4 复杂电磁环境与电子信息系统的相关性计算 .....	73
2.4.1 信号与电子信息系统信号接收环节的相关性 .....	73
2.4.2 信号和电子信息系统信号/数据处理环节的相关性 .....	80

2.4.3	复杂电磁环境与电子信息系统相关性计算 .....	91
	参考文献 .....	95
<b>第3章</b>	<b>复杂电磁环境生成与评价技术 .....</b>	<b>97</b>
3.1	概述 .....	97
3.2	复杂电磁环境生成方法 .....	97
3.2.1	复杂电磁环境生成概述 .....	97
3.2.2	复杂电磁环境生成途径 .....	100
3.2.3	复杂电磁环境生成原则 .....	106
3.2.4	复杂电磁环境生成要素 .....	107
3.2.5	基于相关性的复杂电磁环境生成过程 .....	112
3.3	复杂电磁环境生成关键技术 .....	115
3.3.1	复杂电磁环境预测技术 .....	115
3.3.2	复杂电磁环境监测技术 .....	118
3.3.3	复杂电磁环境要素建模技术 .....	122
3.3.4	复杂电磁环境控制技术 .....	124
3.4	面向电子信息系统的复杂电磁环境评价技术 .....	126
3.4.1	复杂电磁环境评价方法概述 .....	126
3.4.2	复杂电磁环境复杂性评价框架 .....	127
3.4.3	基于系统信号特征的电磁环境复杂性评价模型 .....	130
3.4.4	基于信息熵的电磁环境复杂性评价模型 .....	139
3.4.5	基于作战能力影响效果的电磁环境复杂性评价模型 .....	145
3.4.6	基于信号环境特征的电磁环境复杂性评价方法 .....	148
	参考文献 .....	154
<b>第4章</b>	<b>电子信息系统复杂电磁环境效应评估方法 .....</b>	<b>156</b>
4.1	概述 .....	156
4.2	复杂电磁环境效应评估总体框架 .....	156
4.2.1	复杂电磁环境效应评估对象 .....	157
4.2.2	复杂电磁环境效应评估目的 .....	158
4.2.3	复杂电磁环境效应评估特点 .....	160
4.2.4	复杂电磁环境效应评估思路 .....	161
4.2.5	复杂电磁环境效应评估指标体系 .....	163
4.3	要素层效应评估研究 .....	167

4.3.1	要素层评估过程 .....	167
4.3.2	电子信息系统要素分解 .....	168
4.3.3	要素层评估指标分析 .....	171
4.4	功能层效应评估研究 .....	173
4.4.1	概念和内涵 .....	173
4.4.2	功能层电磁环境效应评估过程 .....	173
4.4.3	评估指标体系 .....	174
4.4.4	基于电子信息系统功能层的复杂电磁环境效应评估 指标体系 .....	178
4.5	效能层效应评估方法研究 .....	180
4.5.1	概念和内涵 .....	180
4.5.2	传统评估方法 .....	180
4.5.3	综合评估方法 .....	194
	参考文献 .....	198
<b>第5章</b>	<b>电子信息系统复杂电磁环境效应仿真技术 .....</b>	<b>200</b>
5.1	概述 .....	200
5.2	多分辨率建模技术 .....	200
5.2.1	多分辨率建模概述 .....	200
5.2.2	多分辨率建模方法 .....	205
5.2.3	HLA 中的多分辨率建模实现 .....	210
5.2.4	多分辨率建模的应用实例 .....	213
5.3	BOM 建模仿真技术 .....	219
5.3.1	BOM 建模仿真技术概述 .....	219
5.3.2	BOM 结构描述 .....	222
5.3.3	BOM 在建模与仿真中的应用 .....	228
5.3.4	BOM 建模仿真的应用实例 .....	238
5.4	并行仿真技术 .....	245
5.4.1	并行计算基础知识 .....	246
5.4.2	复杂电磁环境效应并行仿真技术 .....	250
5.4.3	合成孔径雷达成像并行计算应用实例 .....	254
5.5	复杂电磁环境效应仿真可视化技术 .....	261
5.5.1	可视化技术基础 .....	261
5.5.2	静态场景建模技术 .....	264

5.5.3 可视化仿真驱动技术 .....	267
参考文献 .....	271
缩略语 .....	275
图表索引 .....	278
279 .....	
280 .....	
281 .....	
282 .....	
283 .....	
284 .....	
285 .....	
286 .....	
287 .....	
288 .....	
289 .....	
290 .....	
291 .....	
292 .....	
293 .....	
294 .....	
295 .....	
296 .....	
297 .....	
298 .....	
299 .....	
300 .....	
301 .....	
302 .....	
303 .....	
304 .....	
305 .....	
306 .....	
307 .....	
308 .....	
309 .....	
310 .....	
311 .....	
312 .....	
313 .....	
314 .....	
315 .....	
316 .....	
317 .....	
318 .....	
319 .....	
320 .....	
321 .....	
322 .....	
323 .....	
324 .....	
325 .....	
326 .....	
327 .....	
328 .....	
329 .....	
330 .....	
331 .....	
332 .....	
333 .....	
334 .....	
335 .....	
336 .....	
337 .....	
338 .....	
339 .....	
340 .....	
341 .....	
342 .....	
343 .....	
344 .....	
345 .....	
346 .....	
347 .....	
348 .....	
349 .....	
350 .....	
351 .....	
352 .....	
353 .....	
354 .....	
355 .....	
356 .....	
357 .....	
358 .....	
359 .....	
360 .....	
361 .....	
362 .....	
363 .....	
364 .....	
365 .....	
366 .....	
367 .....	
368 .....	
369 .....	
370 .....	
371 .....	
372 .....	
373 .....	
374 .....	
375 .....	
376 .....	
377 .....	
378 .....	
379 .....	
380 .....	
381 .....	
382 .....	
383 .....	
384 .....	
385 .....	
386 .....	
387 .....	
388 .....	
389 .....	
390 .....	
391 .....	
392 .....	
393 .....	
394 .....	
395 .....	
396 .....	
397 .....	
398 .....	
399 .....	
400 .....	



# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

现代社会,随着电磁辐射源数量的迅速增长,电磁环境变得越来越复杂,使得具有电磁敏感性的电子信息系统受到复杂电磁环境的影响越来越严重,而这种影响随着电子信息系统的广泛使用以及人们对电子信息系统依赖程度的日益提高而变得越来越具有危害性。

在民用领域,各种通信系统(如移动通信、微波通信、卫星通信、因特网无线接入和传输系统等)、卫星和无线电导航系统、广播电视系统、特殊行业通信系统(如防汛指挥无线通信系统、公安武警调度系统、交通调度系统、铁路调度系统、电力调度系统等)、民航导航及航管系统、便携式近程无线通信器材、物联网等电子信息系统的广泛使用,在便利各行各业的同时,也使得各类电子信息系统面临复杂电磁环境影响的严重威胁。近年来,民航导航、陆空无线电频率受到干扰的情况已经严重危及民航、铁路和广大乘客的安全。据报道,2011年3月,黑龙江牡丹江无线电检测站对民航专用频段进行检测时,即发现113.9MHz、116.6MHz频段存在干扰信号,对民航飞行存在着严重的安全隐患。2012年11月,深圳地铁的信号系统在运行中受到干扰,导致信号系统安全保护功能启动,致使列车紧急制动。

在军事领域,现代信息化战场以电子技术和信息技术为基础在信息领域进行对抗。各种雷达、通信、导航、敌我识别、电子战装备等军用电磁辐射体的功率越来越大,数量成倍增加,频谱也越来越宽,再加上高功率微波武器等定向能武器、电磁脉冲炸弹以及超宽带、强电磁辐射干扰机的出现,使战场的电磁环境越来越复杂。复杂电磁环境反过来又会对现在电磁环境敏感度越来越高、具有电磁脆弱性的电子信息系统和武器装备的效能、安全甚至生存能力产生严重影响。例如,美国海军“福莱斯特”号航空母舰上曾因一部舰载雷达波束扫过飞行甲板,引爆了战斗机上悬挂的一枚导弹,造成大量人员伤亡和装备损伤;而美国陆军“黑鹰”直升机曾数次在飞临地面雷达或舰载雷达上空时失事,也是由于雷达发射机对直升机的飞行控制系统产生强烈电磁干扰而造成的。

综上所述,许多重大安全事故和军事训练中暴露出来的问题清晰无误地表明,复杂电磁环境对电子信息系统的严重影响已经扩大为对社会发展与公共安全、国

防与军队建设的严重威胁。以上威胁的核心问题,即复杂电磁环境对电子信息系统的影响就是本书关注的“电子信息系统复杂电磁环境效应”问题。

随着电子信息系统向体系化、网络化迅速发展,以及电磁环境的不断复杂化和网络电磁攻击技术的不断进步,电子信息系统复杂电磁环境效应越来越呈现出非线性、综合化、复杂化,以致于难以探寻其内部机理和外在规律,使得电子信息系统复杂电磁环境效应问题成为极具挑战性的难题。

针对上述问题,本书从电磁环境与电子信息系统相关性入手,对电子信息系统复杂电磁环境效应进行初步分析,以进一步认知复杂电磁环境复杂性,为揭示复杂电磁环境对电子信息系统的作用机理奠定基础。全书内容涉及效应机理、环境模拟、效能评估及效应仿真等技术和方法。期望本书能够对电子信息系统复杂电磁环境效应的研究起到推动作用,对开展复杂电磁环境下电子信息系统的试验与评估起到指导作用。

## 1.2 电子信息系统与复杂电磁环境

### 1.2.1 电子信息系统

电子信息系统是按一定应用目的和规则,实现信息产生、感知、传输、存储、处理、控制和利用等功能的电子系统,通常由信号产生设备、传感器、传输设备、处理设备、控制设备及相关的配套设备、设施等组成,如移动通信系统、导航定位系统、广播电视系统、指挥调度网络系统、计算机网络系统、物联网系统等各种民用系统等,以及预警探测系统、通信网络系统、情报侦察系统、指挥控制系统、敌我识别系统、电子战系统、飞行测控系统、军事综合电子信息系统等各种军事系统。

这些系统的信息大都是存在于以电磁波为载体的无线电磁信号中,这些无线电磁信号均可不通过任何媒介而自由地在物理空间中传播,系统的各个组成部分通过无线电波联系及构成整体。例如,典型的移动通信系统就在各个基站与通信终端之间依靠无线电波进行信息交互;现有的各种导航系统,如北斗、GPS 依靠无线电波实现各个卫星与导航终端之间的信息分发或报文进行通信;民航调度系统依靠无线电波实现各个飞机与相关机场之间的通信和位置监视等。同时,还有一类人们不太经常接触到的系统更是依赖无线电波而工作的,那便是上述的各种军事电子信息系统。为了实现对国土领空、领海的监视,人们利用雷达等预警探测系统来实现对外军飞机、舰船的警戒;为了获取各种情报,人们利用卫星搭载各类情报侦察系统来实现对外军部队的战略部署、行动意图的分析;为了战时掩护我方部队的行动,人们利用各种电子战系统来实现对外军电子信息系统侦察、干扰;为了让导弹准备命中目标,飞行测控系统、制导系统等更是与武器实现了紧密的结合,

发展成了信息化的武器装备。

总的来说,电子信息系统已成为人类社会不可或缺的一部分,它给人们的工作和生活带来了极大的便利,极大的提高了现代社会的运行效率;可以毫不夸张地说,现代社会离开了这些电子信息系统必将处于一片混乱中,难以正常运转。

随着电子技术、网络技术等技术不断发展,现代电子信息系统的规模越来越大、功能越来越全,系统明显呈现出网络化、体系化、智能化的发展趋势。以军事综合电子信息系统为例,其目前正逐步演进为信息作战武器、信息功能系统、信息基础设施三个层次。其中,信息作战武器主要包括诸军兵种的信息主战武器、信息战武器、数据链系统;信息功能系统主要包括各级各类指挥控制、情报侦察、预警探测、通信导航、电子对抗、综合保障等功能系统;信息基础设施是支持诸军兵种各种信息功能系统和信息作战武器系统综合集成的平台和技术设施,主要包括支持信息系统综合集成的网络平台、信息安全技术设施、系统共性技术设施、基础软件与基础数据、系统仿真支持平台等。各个层次之间相互交叉、融合和支持,使得军事综合电子信息系统逐步成为“空天海地”一体化的智能信息系统体系。

## 1.2.2 复杂电磁环境

### 1.2.2.1 电磁环境概念

电气和电子工程师协会(IEEE)对电磁环境定义为:一个设备、分系统或系统在完成其规定任务时可能遇到的辐射或传导电磁发射电平在不同频段内功率与时间的分布,即存在于一个给定位置的电磁现象的总和。而美国军用标准 MIL - STD - 464A《系统电磁环境效应需求》给出的电磁环境的定义是:电磁能量的空间和时间的分布,包含各种不同的频率范围,而且包括辐射和传导的电磁能量。它是电磁能量的总体(人为产生的和自然产生的),对任何暴露在其中的武器平台/系统或者分系统/设备,在何种环境(如陆地、空中、空间、海洋等),在全寿命的各个期间都会发生作用。我国相关标准对电磁环境的定义为:存在于给定场所的所有电磁现象的总和。“给定场所”,即“空间”;“所有电磁现象”包括了全部“时间”与全部“频谱”,以及所有的电场、磁场和电磁场。

虽然以上对电磁环境的定义不同,但是它们都表达出了电磁环境的基本属性,包括空间、时间、频率、能量等。电磁信号是产生电磁环境的基本元素。根据电磁信号产生来源,可以将产生电磁环境的信号分为自然信号和人为信号两大类。自然信号为各类自然界产生的电磁环境信号,包括雷电电磁辐射、静电电磁辐射、太阳系和星际电磁辐射源、地球和大气层电磁场等;人为信号为各种人为活动或人造设备器械等产生的电磁信号,包括各类民用设施、工业设施、军用设施等产生的电

磁信号,如表 1.1 所列。

表 1.1 人为电磁信号分类

人为电磁信号	民用	各种电视、广播发射台,导航系统,无线通信系统,微波接力站等辐射的电磁信号等
		各种家用电器、电动工具、汽车等所带辐射源辐射的电磁信号等
	工业	高电压送、变电系统,大电流工频设备,轻轨和干线电气化铁道等辐射的电磁信号等
		各类监控设施等辐射的电磁信号等
	军事	各种军用电磁辐射体如雷达、通信、导航、敌我识别、无线引信、测控系统等辐射的电磁信号等
		用于军事目的的强电磁脉冲源,核电磁脉冲及非核电磁脉冲源如电磁脉冲武器、高功率微波弹和各种电子对抗等辐射的电磁信号等
其他	科学、商业及其他领域应用的各种辐射源等辐射的电磁信号等	

此外,传播因素是影响电磁信号的重要因素,它对人为电磁辐射信号和自然电磁辐射信号都会发生作用,从而改变电磁环境的形态。传播因素主要包括电离层、地理环境、气象环境以及人为因素构成的各种传播媒介。

### 1.2.2.2 复杂电磁环境概念

“复杂电磁环境”概念最早出现在军事领域。由于在战场中各种电子信息装备辐射的电磁信号形成的极其复杂、动态变化的电磁环境,对战场上使用的电子信息系统能够产生难以预料的影响,使得复杂电磁环境成为各国关注和研究的热点问题。之后,随着民用电磁辐射源数量的迅速增长,民用领域也逐渐开始关注“复杂电磁环境”研究。

国军标 GJB 6130—2007《战场电磁环境术语》中给出了战场“复杂电磁环境”的定义,它指的是在一定的空域、时域、频域和功率域上,多种电磁信号同时存在,对武器装备运用和作战行动产生一定影响的电磁环境。可以认为,复杂电磁环境是由人为和自然的、民用和军用的、对抗和非对抗的多种电磁信号综合形成的一个电磁环境。上述国军标中的定义基本上给出了“复杂电磁环境”的基本特点,将其扩展到民用领域也可以适用。

复杂电磁环境的各种电磁辐射源纷繁多样,既有雷电、静电之类自然电磁危害源,又有雷达、通信、广播、电子对抗等射频频源和定向能电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP)武器、高功率微波(High Power Microwave, HPM)弹之类的人为电磁危害源。上述辐射源不仅相比与一般野外电磁环境中的辐射源更加多样,而且由于系统控制、工作场景控制以及敏感因素各异等因素的制约,使得复杂电磁环境的表现特征更加突出。

#### 1. 辐射源构成类型众多,影响各异

随着广播电视、无线通信、民用航空、指挥调度、测控、雷达、制导、声纳等电子信息系统在社会各领域越来越广泛的应用,各种辐射源数量大量增加。同时,随着



一体化、网络化程度的逐步提高,电子信息系统的规模越来越庞大,结构越来越复杂,系统间的无线链接越来越多,使得开放空间、局部工作及生活空间中电磁环境变得越来越复杂。

电子信息系统工作原理和结构构造各异,不仅产生的电磁信号样式纷繁复杂,而且受到电磁环境的影响也各有不同。某个系统的有意或无意电磁辐射在影响或制约环境中其他系统的同时,也可能会影响和干扰到自己。例如,某部雷达干扰机发射干扰信号时,不仅会影响作战对象的作战效能,同时也可能干扰己方的电子信息系统,在一定程度上降低己方相同或相邻波段系统的性能。客观上讲,只要符合一定的发射、接收条件或辐射敏感条件,干扰信号都会到达电子信息系统内部,对电子信息系统产生影响。上述影响是具有相对性的,即不同的电子信息系统对环境中的电磁信号具有特定的筛选滤波作用,只有那些具有一定相关关系的信号和系统才会发生相互作用,导致系统效能的改变。

## 2. 电磁信号实时变幻,密集交迭

在一定的空域、时域、频域上,大量电子信息系统同时集中使用,为了实现不同的工作任务,将导致工作区域内的电磁信号高度密集和不断变化。据不完全统计,目前世界上的通信信号种类多达100种以上,雷达也多采用新体制和特殊体制,如相控阵雷达、脉冲多普勒雷达、频率捷变雷达、合成孔径雷达、低截获概率雷达等,使得雷达信号种类繁多且波形复杂。对于机场、大型宾馆、高铁站等社会公共场所,由于内部用频系统的数量大、频率相对集中,在局限的空间中形成的辐射信号密度相当可观,形成电磁环境敏感区,导致机场的对空通信、导航、雷达、地面通信受干扰事件时有发生、严重影响飞行的安全、航班的正点。在军用领域,这种电磁信号的密集性更加突出。据资料统计,在海湾战争中,美军在短时间、小空域内开设了2500多个通信枢纽,电台开机1.62万部,使用频率3.5万个。可以预见,未来战争中信号密度必将更大。

## 3. 电磁频谱无限宽广,拥挤重叠

频谱是电磁信号在频域的表现形态。一方面,由于信息技术的迅猛发展和电子信息系统的大量使用,物理空间上电磁信号所占频谱越来越宽,几乎覆盖了全部电磁信号频段。另一方面,由于大气衰减、电离层反射和吸收等传播因素影响,在实际应用过程中,能够使用的电磁频谱只有有限范围。

随着电子技术和信息系统的进一步发展,毫米波及光电技术的广泛应用,各种辐射源占用频谱越来越宽,工作频率不断向更高的频段发展,并且频谱资源越来越拥挤。例如,无线电通信和雷达系统的工作频段已经从极高频(30GHz~300GHz)到至高频(300GHz~3000GHz)。据有关报道,北大西洋公约组织批准使用的军用电磁辐射装备的频带几乎覆盖了全部常用电磁波频段。



#### 4. 电磁能量密度不均,跌宕起伏

目前,随着电子信息系统功能不断升级,性能不断提高,致使电子信息系统的信号能量、携带信息等不断增加。例如,在美国的导弹防御系统中,主要的预警探测雷达、目标指示雷达的功率都在 500kW 以上,天线增益都在 38dB 以上,其中宙斯盾雷达的峰值功率高达 6MW;美国的 EA-6B、EC-130H 等电子战飞机,可以加装多种型号的雷达和通信干扰机,能够发射各种高功率的干扰信号,支援美军作战;美、俄军正在研制的电磁脉冲武器和高功率微波武器的瞬时功率达到了 GW 级,而核电磁脉冲的瞬时功率达到了 TW 级,可以直接杀伤破坏普通电子信息系统。

在电磁环境中,由于各种辐射源的随机分布,加上电磁波传播因素的影响,物理空间上的电磁信号能量在有些地方能量集中,可能很强,有些地方能量分散,可能很弱。随着辐射源的运动和辐射能量的改变,电磁环境表现出实时动态变化的特性,相同位置的电磁能量、电磁信号频率可能时刻不同。电磁能量、信号频率等又直接决定着对电子信息系统的影响程度。如在对抗环境中,雷达受到干扰,可能出现断续发现目标的情况;而无线通信收到干扰则可能出现通话时断时续、时好时坏的情况。

#### 5. 电磁环境影响具有广泛性和复杂性

随着电磁环境的辐射源数量增加、电子信息系统与电磁环境之间的关联关系复杂化,电磁环境对电子信息系统的影响效应日趋复杂化。在战场电磁环境中,电子对抗正逐步由装备对装备的单体对抗转变为系统对系统的体系对抗,电磁环境也随着装备的使用而产生着剧烈的变化,影响因素越来越多,作用机理越来越复杂,影响层次越来越高,危害效果越来越大。

如果把电磁环境中每个独立属性的因素称做电磁环境要素,复杂电磁环境对电子信息系统的影响效果不是单要素对电子信息系统作用的简单叠加,而是多种电磁环境要素同时作用于电子信息系统的“非线性叠加效应”和电磁环境要素在电子信息系统信息链路环节的“非线性传递效应”。在复杂电磁环境中,随着电磁环境要素“量”和“质”的增加,复杂电磁环境对电子信息系统作用机理和影响效果的分析变得更为复杂。

### 1.2.3 电子信息系统与复杂电磁环境的关系

复杂电磁环境是一个“开放”的环境,环境中的任何电子信息系统都是复杂电磁环境形成的基础。同时,复杂电磁环境也是电子信息系统实现信息传输、交互的基础,电子信息系统依靠复杂电磁环境实现其功能,而复杂电磁环境中的任何非合作电磁信号都可能对电子信息系统产生影响。

电子信息系统作为电磁辐射源,在复杂电磁环境的产生和存在过程中是独立

发挥作用的元素,是形成复杂电磁环境的最基本要素。当人们研究或关注某一局部环境时,小区域的电磁环境往往由附近作用比较明显的电磁辐射源所决定。按照场所和辐射源性质的不同,电磁环境可以分为许多具体的小环境,如城市电磁环境、工业区电磁环境、舰船电磁环境、战场电磁环境等。在城市电磁环境中,各种民用电子信息系统成为电磁环境的主要贡献者,如移动通信系统、指挥调度系统、广电网络、导航定位系统等,甚至大功率电器、高功率电网等都能成为辐射源;而在战场电磁环境中,各种电子信息装备、信息化武器装备等成为电磁环境的主要贡献者,如预警探测系统、通信网络系统、导航定位系统、指挥控制系统、军事综合电子信息系统等。在上述不同类型的电磁环境中,电子信息系统类型、数量和相互关联关系在一定程度上决定着电磁环境的复杂程度。因此,可以说电子信息系统是形成复杂电磁环境最重要的物理基础。

在电子信息系统产生并促进了复杂电磁环境的同时,复杂电磁环境又反过来对其中的电子信息系统产生影响。电磁环境中的电磁信号可通过多种途径进入电子信息系统,如果各类干扰信号进入了系统,而系统又无法有效地消除干扰信号,则干扰信号必将影响电子信息系统的正常工作。通常,干扰电磁信号通过接收系统、壳壁、导线、敏感接口等进入电子信息系统,通过影响到电子信息系统的部件或局部电路的特性,从而影响系统的整体性能,同时,这种影响是具有相对性的,即复杂电磁环境只对与之有关联关系的电子信息系统的性能和效能产生影响,关联关系强表示电磁环境中的信号更加容易进入系统内部,最终产生的影响效果还取决于电子信息系统的信号处理、信息处理和管控能力。

随着现代社会需求的增加,电子信息系统的功能不断升级,逐步向着网络化、体系化发展,复杂程度不断增加,致使电子信息系统的敏感环节越来越多,电磁敏感性越来越强,最终导致电子信息系统受到复杂电磁环境影响的可能性越来越高。同时,现代社会对电子信息系统的依赖程度与日俱增,以及相互间关联关系越来越多样,电磁环境的复杂程度也在不断提高。随着复杂电磁环境复杂程度的不断提高,以及对电子信息系统影响效果的不断恶化,人们越来越重视复杂电磁环境效应的研究。

## 1.3 复杂电磁环境效应研究概况

### 1.3.1 复杂电磁环境效应

复杂电磁环境效应概念是随着电磁环境的变化而不断的演变的,从最初的射频干扰到电磁干扰、电磁兼容,直到现在的复杂电磁环境效应。初期的研究主要从电子设备内部及其设备间的电磁干扰问题展开,研究的目的是确保设备及其元器

件正常工作时相互影响在容许的范围内。随着科技的发展,各种电磁辐射体,如雷达、通信等辐射源的功率越来越大,数量成倍增加,频谱越来越宽,使得电磁环境趋于复杂和恶化。电磁环境的性质发生了变化,电磁环境对电子信息系统的影响由简单干扰变成了各种综合效应,其危害日益严重,引起了各国的高度重视,使得复杂电磁环境效应成为当前研究热点。

电子信息系统复杂电磁环境效应简称复杂电磁环境效应(Complex Electromagnetic Environment Effects, CEMEE),即是复杂电磁环境对电子信息系统的影响。复杂电磁环境效应主要包括以下几种形式:能量效应、信息效应、管控效应等。

能量效应,即电磁信号利用其电磁能量作用于电子信息系统,对电子信息系统的正常工作产生影响,甚至对电子信息系统造成物理性破坏的“硬损伤”,破坏、摧毁电子信息系统,该效应从物理层面影响电子信息系统。目前,有限空间内的辐射源数量的逐步增加,电子信息系统接收到的各种电磁信号功率越来越强。同时,随着大功率的干扰源、电磁脉冲武器、高功率微波武器等的使用,电磁信号对电子信息系统产生物理损伤的情况越来越多。

信息效应,即电磁信号对电子信息系统的信息链路环节产生影响,妨碍电子信息系统产生、传输、获取和利用信息,对电子信息系统造成功能性破坏的“软损伤”,该效应从信息层面影响电子信息系统。对于“软损伤”而言,一方面,随着信息化技术的发展,电子信息系统网络化、体系化趋势越来越明显,从而呈现出电磁敏感性更强、可能遭受电磁环境影响的环节更多、受复杂电磁环境综合影响的机理更难把握的趋势;另一方面,随着各类电子信息系统应用越来越广泛和有意争夺制电磁权的斗争越来越激烈,复杂电磁环境效应呈现出欺骗、干扰和破坏能力越来越大,针对性和综合性越来越强的趋势,促进了复杂电磁环境效应研究领域的攻防对抗新概念、新原理和新技术不断发展。

管控效应,即利用电磁频谱接入等信息化手段,对电子信息系统(特别是网络化信息系统)的控制协议和信息内容等进行探测、识别、欺骗和篡改等操作,实现系统的接管控制和为我所用,即从控制层面影响电子信息系统。管控效应的研究工作目前还处于起步阶段,但是在近年来几次重大国际事件,显现出了它的巨大威力,这表面许多国家已经在这方面进行了探索性研究,并且逐步向实用化方向发展。

复杂电磁环境效应涉及电磁科学、信息科学、复杂性科学、非线性科学、系统科学等各领域。根据复杂电磁环境和电子信息系统的关联关系和作用过程,复杂电磁环境效应研究包括“复杂电磁环境特性与模拟”、“复杂电磁环境综合效应机理研究”和“电子信息系统效能评估理论与方法”等几方面的内容,如图 1.1 所示。

复杂电磁环境特性与模拟研究针对电子信息系统面临的复杂电磁环境,开展电磁环境特性、复杂电磁环境模拟和电磁环境度量等方面的研究,为复杂电磁环境