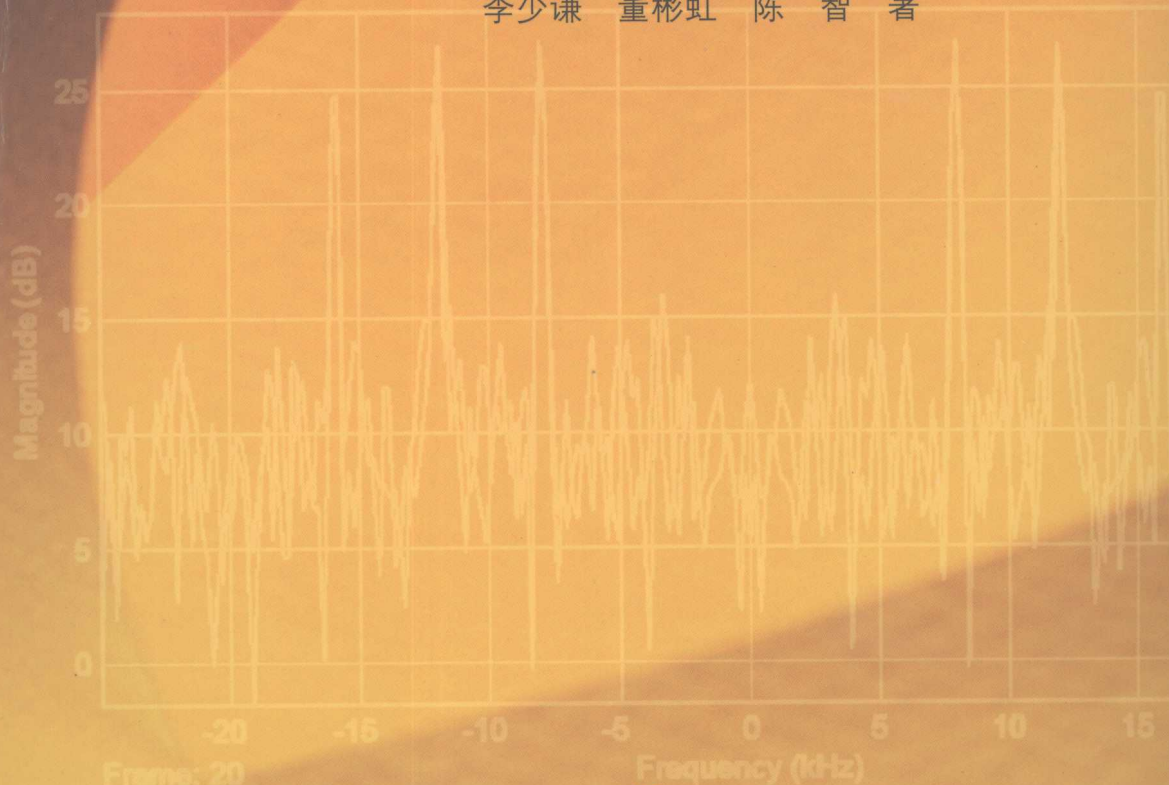


差分跳频通信 原理及应用

李少谦 董彬虹 陈 智 著



电子科技大学出版社

差分跳频通信原理及应用

李少谦 董彬虹 陈 智 著

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

差分跳频通信原理及应用 / 李少谦, 董彬虹, 陈智著.

成都: 电子科技大学出版社, 2007.3

ISBN 978-7-81114-153-5

I. 差… II. ①李…②董…③陈… III. 宽带通信系统

IV. TN914.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 020261 号

内 容 提 要

全书共分六章。第一章阐述了通信抗干扰技术和跳频通信技术的发展; 第二章阐述了差分跳频通信的基本原理和在短波通信中的应用; 第三章分析了差分跳频通信系统中的关键技术; 第四章分析了差分跳频通信系统在加性高斯白噪声信道下的抗干扰性能分析; 第五章分析了差分跳频通信系统在瑞利衰落信道条件下的抗干扰性能分析; 第六章分析了差分跳频通信系统的多用户性能。

此书是国内第一本系统地阐述差分跳频通信技术, 总结研究成果的专著。作者期望本书的出版能够抛砖引玉, 为从事跳频通信技术研究的科研人员、工程技术人员, 以及博士生、硕士生提供参考。

差分跳频通信原理及应用

李少谦 董彬虹 陈 智 著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦
邮编: 610051)

策划编辑: 陈松明

责任编辑: 张 俊 周 岚

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸: 170mm×240mm 印张 15 字数 286 千字

版 次: 2007 年 3 月第一版

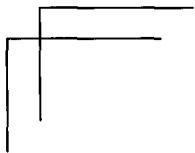
印 次: 2007 年 3 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-81114-153-5

定 价: 35.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。



前言

扩展频谱通信技术具有优良的抗干扰性能和多址组网性能，在军用通信和民用通信中取得了广泛应用。扩频通信技术中的跳频通信技术，以其更强的抗干扰能力，已成为军用抗干扰通信的主流技术，在 GSM、Bluetooth 等民用通信中也有大量的应用。

扩频技术为主体的通信抗干扰技术，以扩频通信频谱的手段来获取抗干扰的处理增益。随着信息需求的日益增长，在军用通信中不但要求通信系统具有强的抗干扰能力，还应有较高的信息传输速率。研究和具有高抗干扰和高信息传输率的扩频技术，解决和平衡抗干扰所需的扩展频谱代价与提高信息传输率所要求的频谱效率间的矛盾，是扩频通信技术发展的重要方向。

差分跳频通信技术在保持跳频技术的抗干扰性能的同时，为高速率数据传输提供了一种新的方法。近年来，差分跳频通信技术已成功地应用到短波通信中，差分跳频技术可以克服短波通信中的各种难点，如带宽受限、干扰严重、多径衰落等，可实现短波通信的高速跳频和高速数据传输。差分跳频通信技术对于提高军事通信的性能具有很大的潜力，是新一代跳频通信技术的发展方向之一。

近十年来，电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室在跳频通信技术和差分跳频通信技术领域进行了深入的研究工作。在差分跳频通信技术的抗干扰理论，抗干扰性能分析方面取得了大量的学术成就，并在差分跳频通信系统的技术实现方面也取得显著的科研成果。本书是上述研究工作的结晶，它包含了多年来实验室在该领域所取得的研究成果、体会与认识，亦是研究团队的

共同努力的结果。

本书由李少谦教授统筹和组织创作。第一章由李少谦教授执笔撰写；第二章、第三章由董彬虹博士执笔撰写；第四章、第五章、第六章由陈智博士执笔撰写。

在此我们衷心感谢所有参与差分跳频技术研究并作出了贡献的同仁，没有研究团队的长期努力和辛勤工作，没有大量的研究成果，就没有本书的出版。

由于水平限制，书中缺点和不足在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2007年3月于成都

目 录

第一章 抗干扰通信与跳频技术 1

1.1 通信抗干扰技术基础 → 1

- 1.1.1 通信的干扰和抗干扰 1
- 1.1.2 通信抗干扰技术的基本技术与方法 3
- 1.1.3 通信系统与网络的抗干扰 3
- 1.1.4 自适应和智能技术在网络综合抗干扰中的应用 4
- 1.1.5 综合抗干扰通信系统的体系结构 5

1.2 扩展频谱通信技术^{[1][2]} → 6

- 1.2.1 直接序列扩频通信技术 7
- 1.2.2 跳频通信技术 9
- 1.2.3 跳频/直扩混合扩频通信技术 16
- 1.2.4 跳时/直扩混合扩频通信技术 18
- 1.2.5 扩频技术与其他技术相结合 19
- 1.2.6 差分跳频 (DFH) 技术 23

◆ 参考文献 24

第二章 差分跳频通信系统的原理及应用 25

2.1 差分跳频通信系统的原理 → 26

- 2.1.1 频率转移函数与频率序列译码 26
- 2.1.2 频率合成器 27
- 2.1.3 宽带差分跳频信号检测 30
- 2.1.4 差分跳频同步 31

2.2 差分跳频的基本概念 —————→35

2.2.1 频率转移函数 35

2.2.2 频率序列译码 39

2.3 差分跳频通信系统在短波中的应用 —————→47

2.3.1 短波通信的现状与发展趋势 47

2.3.2 CHESS 系统 50

◆ 参考文献 56

第三章 差分跳频通信系统的关键技术 58

3.1 宽带差分跳频信号检测技术 —————→58

3.1.1 宽带差分跳频信号检测原理 58

3.1.2 宽带差分跳频信号检测性能分析 60

3.2 差分跳频同步技术 —————→70

3.2.1 差分跳频的捕获模型 71

3.2.2 差分跳频捕获性能分析 72

3.2.3 差分跳频跟踪模型 80

3.2.4 差分跳频同步跟踪性能分析 84

3.3 频率转移函数的设计 —————→106

3.3.1 频率转移函数构造原则 106

3.3.2 一种频率转移函数构造方法 108

3.3.3 频率转移函数的性能分析 110

3.3.4 频率转移函数的应用举例 111

3.4 频率序列译码技术 —————→112

3.4.1 逐符号检测接收机 112

3.4.2 序列检测线性合并接收机 113

3.4.3	序列检测乘积合并接收机	114
3.4.4	序列检测自归一化合并接收机	115
3.4.5	序列检测限幅合并接收机	116
3.5	自适应差分跳频通信技术	117
3.5.1	自适应差分跳频原理	118
3.5.2	自适应差分跳频的关键技术	119
3.6	差分跳频通信的多址技术	120
3.6.1	差分跳频与常规跳频多址方式的区别	120
3.6.2	常规跳频的多址技术	121
3.6.3	差分跳频的多址技术	122
◆	参考文献	126

第四章 差分跳频通信系统在 AWGN 信道下的抗干扰性能分析 128

4.1	AWGN 信道模型	128
4.2	差分跳频通信系统在 AWGN 下的误符号性能分析	128
4.2.1	系统模型	129
4.2.2	逐符号检测接收机性能分析	129
4.2.3	序列检测线性合并接收机的性能分析	129
4.2.4	数值计算及仿真结果	131
4.3	差分跳频通信系统抗部分频带干扰的性能	133
4.3.1	系统模型	133
4.3.2	逐符号检测接收机的性能分析	134
4.3.3	序列检测线性合并接收机性能分析	136
4.3.4	数值计算及仿真结果	139
4.4	差分跳频通信系统抗多音干扰的性能	140

4.4.1	系统模型	140
4.4.2	逐符号检测接收机的性能分析	141
4.4.3	序列检测线性合并接收机性能分析	143
4.4.4	数值计算及仿真结果	146
4.5	自适应差分跳频通信系统的抗干扰性能	147
4.5.1	系统模型	147
4.5.2	逐符号检测接收机的性能分析	148
4.5.3	序列检测线性合并接收机性能分析	150
4.5.4	数值计算及仿真结果	153
◆	参考文献	156

第五章 差分跳频通信系统在瑞利衰落信道下的 抗干扰性能分析 160

5.1	瑞利衰落信道模型	160
5.2	差分跳频通信系统在衰落信道中的性能	161
5.2.1	系统模型	161
5.2.2	逐符号检测接收机的性能分析	161
5.2.2	序列检测线性合并接收机的性能分析	162
5.2.4	数值计算及仿真结果	164
5.3	差分跳频通信系统在衰落信道中的抗部分频带干扰性能	165
5.3.1	系统模型	165
5.3.2	逐符号检测接收机的性能分析	166
5.3.3	序列检测线性合并接收机的性能分析	168
5.3.4	数值计算及仿真结果	171
5.4	乘积合并差分跳频通信系统在衰落信道中的抗部分频带干扰性能	173
5.4.1	系统模型	173

5.4.2	序列检测乘积合并接收机的性能分析	174
5.4.3	数值计算及仿真结果	177
5.5	差分跳频通信系统在衰落信道中的抗多音干扰性能	→179
5.5.1	系统模型	179
5.5.2	逐符号检测接收机的性能分析	179
5.5.3	序列检测线性合并接收机的性能分析	181
5.5.4	数值计算及仿真结果	186
5.6	乘积合并接收的差分跳频通信系统在衰落信道中的抗多音干扰性能	→187
5.6.1	系统模型	187
5.6.3	序列检测乘积合并接收机的性能分析	188
5.6.3	数值计算及仿真结果	191
◆	参考文献	193

第六章 差分跳频通信系统的多用户性能分析 196

6.1	同步多用户系统中的性能	→196
6.1.1	系统模型	196
6.1.2	逐符号检测接收机的性能分析	197
6.1.3	序列检测线性合并接收机的性能分析	199
6.1.4	数值计算及仿真结果	201
6.2	异步多用户系统中的性能	→203
6.2.1	系统模型	203
6.2.2	改进型检测接收机的异步多用户性能分析	204
6.2.3	数值计算及仿真结果	210
6.3	瑞利衰落信道下同步多用户系统中的性能	→212
6.3.1	系统模型	212
6.3.2	逐符号检测接收机的性能分析	213

6.3.3 序列检测线性合并接收机的性能分析 214

6.3.4 数值计算及仿真结果 218

6.4 瑞利衰落信道下异步多用户系统中的性能—————→ 220

6.4.1 系统模型 220

6.4.2 改进型检测接收机的异步多用户性能分析 220

6.4.3 数值计算及仿真结果 223

◆ 参考文献 226

第一章

抗干扰通信与跳频技术

现代高技术战争是敌我双方各军兵种、后勤与指挥等通过各种网络构成的庞大战争机器的对抗。未来的战争将从以武器平台为中心转为以网络为中心，其中，通信网络是保障战争顺利进行的神经网络。现代高技术战争的环境要求通信系统必须在双方激烈对抗的实战条件下，具有抗干扰、抗侦察和抗摧毁的综合能力。

无线通信机动、灵活，建立迅速，可传输语音、数据、图文和图像等多种业务，在民用和军用通信中占有十分重要的地位。特别在飞机、舰艇、坦克和野战部队等运动作战平台方面，无线通信是唯一通信方式。无线通信在空间的开放和暴露，容易被对方侦察、截获和干扰。为了使信息能安全可靠地传输，必须在军用无线通信手段中采用各种抗干扰技术。

1.1 通信抗干扰技术基础

1.1.1 通信的干扰和抗干扰

在通信对抗中，敌方有意的人为干扰通常要经过侦收、分析和施放这几个步骤。为了有效地进行干扰，敌方侦收、分析和干扰施放过程要快，干扰频率和其他干扰信号特征要准确，干扰功率要大（干扰点离被干扰者要近），即在时间、频率、距离三维空间中，干扰方要尽可能逼近被干扰方。

通常的干扰类型有窄带干扰、宽带干扰和跟踪式干扰。

窄带干扰：窄带干扰是指通信频率的少量频点与频段所受到的干扰，干扰范围是局部的。瞄准式的窄带干扰可以集中功率，实现大功率干扰。

宽带干扰：宽带干扰是指干扰带宽占据通信总带宽较大的干扰环境。多

频点的梳状干扰也是一种宽带干扰。受干扰功率的限制, 宽带干扰的带宽常是部分通信频带。当宽带干扰覆盖到通信的全频段时, 功率又足够大时, 则形成阻塞式干扰。面对阻塞式干扰, 一般的抗干扰手段都将失去作用。宽带干扰, 在一定程度上实际是功率的对抗。要达到干扰目的, 必须使干扰功率在对方信号频谱上进行全面压制, 即必须使干扰信号到达对方通信接收机后, 在频谱上能全面压制对方的信号, 使信 / 干比很低甚至为负值, 具体的干扰效果又和被干扰的信号的性质有关。通常, 对于话音, 由于可根据话音语义相关性来理解内容, 因此通常要求干扰功率应比信号高几个分贝, 才能产生好的干扰效果, 而要做到这一点, 需要宽带干扰机具有足够大的干扰功率。特别是敌我双方的距离总是比我方通信之间的距离要远, 这就使得敌方干扰信号要经更长的距离才能到达我方接收机。因此, 敌方必须发射更大的干扰功率才行。而如果敌方采用空中干扰或更远距离干扰, 则在干扰我方通信的同时, 也干扰了己方的通信。

跟踪式干扰: 跟踪式干扰是指干扰机实时地侦收通信信号, 并进行处理后在相同的中心频率上发射干扰信号, 从而破坏跳频通信的方式。一般说来, 跟踪式干扰是对跳频通信可能构成干扰威胁最为严重的一种干扰方式。跟踪式干扰的技术水平主要取决于侦收、信号分析和施放干扰三个要素的处理过程。侦收阶段要求灵敏、快捷与准确; 信号分析阶段也要求快而准, 现这两步已可做到毫秒级。这使我方通信要不受敌方干扰, 则每次跳频的时间应少于干扰的响应时间。

任何一个抗干扰系统的基本目的都是迫使敌方要想干扰我方通信, 必须付出比我方所采用的抗干扰系统要大得多的代价。一个成功的抗干扰系统的设计总是力图使干扰者在战术环境下利用现有手段难于干扰通信, 以确保在敌方干扰压制的恶劣环境条件下保障我方战场指挥控制的最低限度的通信需要。一个具体抗干扰技术体制的确定, 与战术技术要求、使用环境及成本等有着极为密切的关系。

针对上述干扰的类型, 首先, 通信信号应具有高隐蔽性、低截获率, 使对方难以从周围众多电磁信号、干扰和噪声的环境中识别出来。其次, 通信方应能自动监测战场电磁环境, 实时评估系统的性能, 分析干扰信号特征 (与侦察、情报系统相结合), 自适应地回避干扰, 并根据战场环境变化, 智能地进行通信系统参数、网络拓扑以及其他资源的优化配置, 达到最好的通信效果。显然, 这不仅要求单台通信设备具有抗干扰能力, 通信系统能动态地优化配置系统参数, 抑制当前的某些干扰, 还要求通信网络能在侦知干扰信号特征、干扰兵力配置以及考虑我方通信网络拓扑、通信效果的基础上, 实现网络的智能

管理,即通信的抗干扰性不仅表现在设备的干扰容限,还要表现在系统和网络的综合抗干扰能力上。但是,对任何复杂的抗干扰通信系统和网络,实现基础是各种抗干扰通信技术。

1.1.2 通信抗干扰技术的基本技术与方法

军用通信抗干扰技术是指无线电通信装备及系统在电子对抗中为对抗敌方利用电磁能攻击通信电磁频谱,保护己方无线电通信正常工作所采取的通信反对抗技术、方法和措施。

通信抗干扰技术的基本目的是通过对信息、信息的载体及传播方式进行特定的处理,提高通信接收端的输出信干比,使其具备较强的区分有用信号和干扰信号的能力;提高通信信号的隐蔽性,使敌方难以识别和干扰,从而正确地接收所需的信息。

通信抗干扰技术的基本技术、方法、措施可分为三类:

(1) 信号处理。如采用扩展频谱技术,利用伪随机序列对发射和接收的信号进行扩频处理,以达到对干扰信号进行抑制的目的。

(2) 空间处理。如采用自适应天线调零技术,当接收端受到干扰时,使其天线方向图的零点自动指向干扰方,以提高通信接收机的信干比。

(3) 时间处理。如猝发传输技术,由于通信信号在传输过程中暴露的时间很短暂,降低了通信信号被侦察、截获的概率,从而提高了通信系统的抗干扰能力。

扩展频谱通信技术是通信抗干扰技术的主要技术手段。扩展频谱技术是把信息频谱展宽进行传输的技术,它具有信号频谱宽、波形复杂、安全隐蔽等显著特点,大大增加了敌方对信号进行截获、监测、测向定位和干扰的难度。

纠错编码、猝发、自适应天线方向图调零与控制、自适应干扰抑制、信号交织、重复传输与多数判决处理、功率控制、信号分集接收等其他非扩频的无线通信技术措施也是通信抗干扰技术的重要组成部分。

通信抗干扰技术的发展趋势是:扩频通信技术与自适应技术、其他抗干扰技术相结合形成自适应综合抗干扰技术;时域、频域抗干扰技术与空域抗干扰技术相结合形成多维抗干扰技术,通信设备级的抗干扰技术将走向系统级、网络级通信抗干扰技术;通信抗干扰技术的理论将进一步完善和发展。

1.1.3 通信系统与网络的抗干扰

一定数量的抗干扰通信设备有机地构成抗干扰通信系统和网络。影响网络抗干扰能力的因素多种多样,设备的多种指标、参数,系统中对不同模块的配置以及参数的改变、战场环境的变化,受对方电磁、物理攻击后网络的变化

等等都会改变网络抗干能力。这种改变最终体现为在满足一定通信质量(如BER、时延等)时,网络单位时间内的平均信息通过率,它代表了网络在特定环境下通信的质和量,应该是衡量网络抗干扰能力的基本量度方法之一。我们的网络在与对方网络的对抗中要能满足通信质与量的要求。构成网络抗干扰能力的要素包括:

(1) 设备的抗干扰性能

设备能以一定的频率、方向、信号形式传输信息,并能动态地调整参数(如频率、时间、功率、扩频增益和天线方向等)适应当前战场的需要。设备的抗干扰性能是构成网络综合抗干扰能力的关键。

(2) 网络的生存性

网络完成信息传输任务的前提,是网络的生存性。网络的生存性和网络的抗毁性、网络拓扑优化及网络自动管理等网络生存技术密切相关。当然,网络的抗干扰能力强,信号隐蔽性好,也提高网络的生存能力。从减小通信网络受到的危害来看,网络不仅应具有抗干扰能力,还必须具备抗摧毁能力,这包括抗硬摧毁(物理打击)和软摧毁(干扰和病毒)。

(3) 网络的互联互通性

网络的互联互通是快捷、可靠通信的基础。网络的互联互通也有利于网络总的抗毁能力的提高。利用无线综合接入系统实现不同频段、不同工作模式电台的互联互通,为用户提供综合通信业务,必须满足频段一致,抗干扰体制一致,抗干扰技术参数的一致,以及同步方式的一致等要求。在网络互联时,应特别注意各入口节点的抗干扰性。

(4) 网络组网性能

网络组网性能包括网络初始化、组网方式、组网容量、延迟入网等要素,其中,网络的同步技术是网络抗干扰性能的重要环节。同步组网往往能使网络具有更好的通信能力和更高的抗干扰性。抗干扰通信网应注意同步保护措施,使同步信号不存在射频特征和基带信号特征,完全掩盖在业务信号中。如果同步信号有明显特征而招致有意干扰,整个网络性能会受到严重影响。

1.1.4 自适应和智能技术在网络综合抗干扰中的应用

对于抗干扰通信网而言,各种无线通信设备的抗干扰性能是网络抗干扰的基础。优化配置各种通信模块和资源,构成具有适用性好、抗干扰能力强的通信系统。通过网络拓扑结构、接入协议、路由选择等优化设计,能使网络具有更强的生存能力。现代战争瞬息万变,抗干扰通信网络需要有适应这种变化的能力。

在实际环境中,网络的节点、链路、拓扑不断受到损伤,周围电磁环境随时在改变,静态设计的优化拓扑结构、网络和系统的各种参数都不再是优化的,它们应动态地调整和改变。

(1) 无线电资源自适应管理

信道(频率、时间、空间)和功率等都是宝贵的无线通信资源。动态地分配资源,提高系统容量(信息通过率)和其他性能是资源管理的任务。抗干扰通信系统希望发射机功率自动保持在保证接收机正常接收所需的电平上,过大的功率不仅是功率资源的浪费,造成对友邻电台的干扰,而且暴露了自己。应根据信道干扰情况和接收机的接收质量(误帧率、误比特率等),自动控制发射功率。由于干扰情况的变化,调制方式、调制速率应随时调整,以便充分地利用信道资源。

(2) 自适应信号处理

为了适应战场环境的变化,通信系统的信号处理所采用的自适应技术、空间滤波(自适应调零、自适应波束形成)以及扩展频谱抗干扰技术自适应的变化,都可认为属于自适应信号处理的范畴。

(3) 网络拓扑优化和信息流优化

网络拓扑趋向均匀,有更大的抗毁性。实际优化时则往往受到多种条件限制。信息流的优化与路由选择有密切关系,在一定约束条件下,信息流优化的目标是传输时延、信息完整率、比特差错率满足要求,达到尽可能大的通信效能。

构造自适应、高抗干扰、高效率的通信网络,需要有监测、分析战场电磁环境的能力。通信系统或设备可能只具备部分的分析、监测能力,更全面的监测和分析能力需要其他系统(如侦察系统)的支持。因此,尽管侦察、通信和对抗系统各有不同的战术目标,要取得制信息权,需要在侦察、通信和对抗系统的基础上构成综合的一体化系统,以适应信息战的要求。

1.1.5 综合抗干扰通信系统的体系结构

综合抗干扰的内涵至少包括两层意思:一是指通信设备、链路能恰当地利用各种抗干扰技术和资源,增强系统的抗干扰能力;二是指借助多种不同系统、网络的综合调度和战术运用,实现抗干扰通信的目标,在最恶劣的环境下,仍能可靠地提供最低限度的通信需求。抗干扰通信系统的体系、结构应能体现这种内涵。

(1) 物理层和链路层的综合抗干扰考虑

现代通信系统和网络都是分层结构,抗干扰通信系统也不例外。为了在

恶劣的战场环境下具有抗物理摧毁和抗电磁干扰的能力,可靠地传输信息,构成系统的实体要有很好的鲁棒性、移动性、抗截获和抗干扰能力。有些技术措施是相互制约的。因此选用的各种技术措施要有大的动态范围和适应能力,随着战场环境的变化,优化地利用各种资源,提高链路接入的可靠性。

(2) 网络层的综合抗干扰考虑

网络的综合抗干扰能力是通信网络各项抗干扰要素的综合体现,其最终表现为网络的信息通过率。除了链路层的因素外,网络拓扑的静态设计和动态调整、路由选择(包括子网的选择)、组网性能等,是提高网络级抗干扰能力需特别关注的。好的顶层设计有利于实现网络的互联互通,调度多种通信系统、网络完成通信的目标。

网络拓扑的研究表明,均匀结构的网络有较好的网络吞吐率和抗干扰性,网络设计和控制应使用网络具有某种均匀性,增强网络对电磁干扰和物理损伤的抗拒力。

从通信网可靠性分析来看,战术抗干扰通信网属相关的概率网络,网络元素的不可靠因素(干扰也可视为一种不可靠因素)有一定相关性,如何配置、调度资源,实现战术抗干扰通信网抗干扰能力的优化,是一个很复杂的课题。关键是如何将各种因素归一化,建立数学模型,并基于这种模型进行仿真研究和理论分析。

1.2 扩展频谱通信技术^{[1][2]}

扩展频谱通信技术,简称扩频通信,可分为直接序列扩频、跳频、线性调频和跳时等基本技术,基本技术的两种或多种组合可构成混合技术。各种技术中,直接序列扩频和跳频是应用较为广泛的通信抗干扰技术。扩展频谱技术是把信息频谱展宽进行传输的技术,它具有信号频谱宽、波形复杂、安全隐蔽等显著特点,大大增加了敌方对信号进行截获、监测、测向定位和干扰的难度。

20 世纪 40 年代香农的信息论奠定了扩频通信的理论基础。香农的信道编码定理揭示了用增大带宽的方法就有可能在任何给定的低信噪比条件下无错误地传输信息。1956 年,美国林肯试验室为陆军研制的、用来传输 50 波特电传报的 F9C 直接序列扩频系统是最早的扩频通信系统。20 世纪 80 年代以来,以扩频通信为代表的通信抗干扰技术发展迅速,扩频技术在各种战术通信设备中得到广泛应用,使军事通信抗干扰能力有了很大的提高。