

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.04.028

引用格式:征惠玲.国外无线通信抗干扰技术研究进展[J].电讯技术,2014,54(4):524-528. [ZHENG Hui-ling. Research Progress of Anti-jamming Technology for Wireless Communications[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(4):524-528.]

国外无线通信抗干扰技术研究进展*

征惠玲**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘要:分析了当前无线通信抗干扰主要手段存在的不足,指出多维抗干扰和认知抗干扰是当前研究的主要热点。进一步介绍了非协同跳频(UFH)、消息驱动的跳频(MDFH)等国外近年提出的无线通信抗干扰新概念和技术及其研究情况,并总结了无线通信抗干扰措施的未来发展趋势,提出了发展建议。相关内容可为无线通信抗干扰技术的深入研究提供参考。

关键词:抗干扰通信;多维抗干扰;认知抗干扰;非协同跳频;消息驱动的跳频;研究进展

中图分类号:TN92 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)04-0524-05

Research Progress of Anti-jamming Technology for Wireless Communications

ZHENG Hui-ling

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The defect of existing anti-jamming methods for wireless communications is analyzed, and it is pointed out that current research is focused on multi-domain anti-jamming and cognitive anti-jamming. Furthermore, the emerging concepts and technologies for anti-jamming communications are introduced, then the future trends of anti-jamming measures for wireless communications are summarized and some suggestions are given. The related information provides reference for further research on anti-jamming techniques for wireless communications.

Key words: anti-jamming communications; multi-domain anti-jamming; cognitive anti-jamming; uncoordinated frequency hopping(UFH); message-driven frequency hopping(MDFH); research progress

1 引言

无线通信易受各种噪声和干扰信号的影响,经过近几十年的研究,目前我国军事通信领域已基本形成了以频谱扩展技术为主的无线通信抗干扰体制。然而,绝大多数方法在设计上都没有考虑到外部有意干扰和来自系统内部干扰的影响。随着军事通信在现代战争中的作用和地位不断提升以及各种新兴通信及干扰技术的应用,军事通信抗干扰问题也日益突出,传统的抗干扰手段已明显暴露出其

缺陷和不足,已然成为制约通信技术和信息网络发展的瓶颈之一。在未来战场上要保持通信畅通,必须要发展新的抗干扰技术来应对敌方的通信干扰。而与此同时,相关资料也表明,近年来国外各科研院校已经开始在政府及军方的支持下或者自行开展新兴无线通信技术及干扰和抗干扰措施的研究,其中部分研究成果已具备工程应用的条件。因此,在当今日益恶劣的电磁环境下,对无线通信抗干扰技术进行系统而深入的研究对我国军事通信的未来发展

* 收稿日期:2014-03-03;修回日期:2014-04-10 Received date:2014-03-03;Revised date:2014-04-10

** 通讯作者:hailing.zheng@163.com Corresponding author:hailing.zheng@163.com

具有非常重要的意义。鉴于此,本文对近年来国外研究团队提出的通信抗干扰新概念进行了梳理和综述,并对未来发展趋势进行了分析和总结。

2 现有的通信抗干扰手段及存在的问题

通信抗干扰就是通过一定措施和手段来提高通信质量,一般可理解为,通信装备及系统为对抗干扰方利用电磁能和定向能控制、攻击己方所用通信电磁频谱所采取的通信反对抗技术体系、方法和措施,从而提高其在通信对抗中的生存能力,而通常这些方法可被分为三类:一是频域处理,如直接序列扩频技术、跳频技术;二是空间处理,如自适应天线技术、分离技术等;三是时域处理,如猝发通信技术。在现代通信领域里扩频抗干扰技术和自适应天线技术应用最为广泛,但它们在实现上各自都有一定的局限性。

扩频抗干扰技术通常包括直扩(DS)和跳频(FH)两种方式,其抗干扰原理是将信号频谱在频域上进行扩展,降低信号功率密度,使目标信号掩藏在干扰信号和噪声中,从而避免被敌方截获来实现抗干扰。跳频则是扩频抗干扰技术中应用最为广泛的方式,其发展从最初的“盲跳”到后来的快/高速跳频、自适应跳频和综合跳频等,一度为通信系统提供了良好的抗干扰能力。但该技术的应用时,除需要扩展频谱带宽外,还要预先生成并向各通信节点分发扩频参数,并且只有在收发双方建立同步以后才能进行通信。从目前来看,这种应用方式存在其自身固有的缺陷和不足,诸如:占用大量的频带宽度且容易带来共址干扰问题;在参与节点数较多且动态建立的通信网络中,生成并预分配扩频参数的应用方式缺乏灵活性;存在同步时间过长甚至无法同步的潜在问题,降低了通信可靠性;频繁而瞬时的跳变会导致系统吞吐量的损失;更高速率的跳频将会对专用集成芯片和电路提出更高的要求等。而目前最迫切的则是频谱资源严重不足的问题,这一问题迫使业界必须对传统跳频体制进行改进或者寻求其他的解决方案。

自适应天线技术的原理是基于信号和干扰传来的方向差异,通过自动调整天线阵的内部参数(主波束对准信号方向,副波束对准干扰)以达到抗干扰的目的。后续发展出的智能天线技术就是自适应天线技术、数字信号处理技术与软件无线电技术结合的产物,在军事卫星通信中,智能天线的空间滤波特性已被作为主要的抗干扰手段之一。但在HF/VHF/UHF频段实现自适应天线尚有一定的技术难

题需要克服。目前已经证明智能天线是解决频率资源匮乏的有效途径,今后必然具备较广的军事应用前景。

总之,随着电磁环境变得日益复杂、电磁频谱日益紧张、泛在网络不断发展,对通信健壮性的需求也日益迫切,传统的通信抗干扰技术已成为制约通信技术和信息网络发展的瓶颈之一,必须要着手开展对新的抗干扰技术及应用的研究。而基于多维空间的广义抗干扰和认知抗干扰技术则是目前国内外的研究热点。

3 近年提出的新概念及研究现状

3.1 多维联合抗干扰技术

多维联合抗干扰技术的实例化就是各处理域内和域间的切换技术,包括波束切换、信道切换、频率切换以及多域协同和多域自适应切换等。下面将介绍近年出现的一些多域联合抗干扰概念和国外部分研究成果。

3.1.1 频域-速度域联合

跳频(FH)和速率自适应(RA)是消除干扰的常用手段,但目前已有研究表明这些手段在独立使用时抗干扰效率并不高^[1-2]。鉴于此,美国亚利桑那大学(University of Arizona)电子与计算机工程系M. Krutz教授带领的研究团队采用了主动扫描式干扰攻击模型对动态跳频和速率自适应相结合的无线抗干扰措施进行了研究^[3]。他们对通道数 K 、干扰成本 L 和信道切换成本 C 等参数进行了研究和仿真,并对这种最佳组合措施和最佳FH模式、最佳RA模式、随机FH 3种抗干扰技术下各参数所能达到的性能进行了对比。多次试验证明,这种组合优化措施可以有效改善系统抗干扰性能。目前研究团队正准备对波形自适应与跳频技术的联合抗干扰效果进行研究。

3.1.2 频域-功率域联合

近年来,不需要预先共享跳频参数的抗干扰技术已经受到广泛的关注^[4-5],通常是采用一种被称为非协同跳频(UFH)的技术来实现。由于这种技术需要在发送方和接收方都采用UFH手段,已经开始表现出会对系统性能造成制约的不足。尽管研究人员们对非协同跳频技术在持续进行改进,但也仅限于频域处理一个维度上。2012年,美国伊利诺理工大学(Illinois Institute of Technology)助理教授Kui Ren带领的研究团队首次提出了将UFH和功率控制手段联合使用的抗干扰方案^[6],使发送方可以在频域和功率域两个维度上实现抗干扰决策,以有效改善UFH技术

的不足之处,提升抗干扰系统的性能。

研究中采用干扰功率受限的干扰方式,利用在线学习理论,由传输通道的历史状态来确定跳频通道和传输功率。通过将发射功率分为多个等级,功率预算有限的发送方可根据自身条件选择发射通道和相应的传输功率。发送方将持续保持对信道状态的知悉,并根据接收方反馈的信息自适应的选择最合适的信道和最佳的发射功率分配。研究表明,在干扰功率受限的情况下,该方案的平均传输误差在 $2A\sqrt{2T|C_s| \ln|N_s|}$ 以内,且低于该值的概率很高。研究中将随机干扰机分为最大延时干扰机 (Type-I) 和概率干扰机 (Type-II) 2 类,大量的仿真已验证该方案也可以有效应对各种不同的干扰攻击。

3.1.3 空-时-频域联合

无线通信技术的不断发展加剧了对高速度应用和宽带业务的需求,而正交频分多址 (OFDMA) 技术则是可以满足这一需求的主要候选技术之一。它将整个信道分为多个相互正交的并行子信道,每个用户都可被分配一组子信道,是一种有效的多用户方案。并且研究表明 OFDM 技术可以缓解多径环境下导致的符号间干扰 (ISI) 问题。空时编码技术则可充分利用天线阵的空间分集特性,不需要牺牲带宽就可获得良好的分集增益。将两者结合的 STC-OFDM 技术虽然可以实现高速高质量的无线传输,但其抗干扰能力却并不强。尤其对于军事通信来说,在恶意干扰存在下依然可以保持通信健壮性至关重要。针对传统跳频抗干扰措施的效率低且对未来通信系统高速大容量的需求,美国密西根州立大学 (Michigan State University) 宽带接入无线通信实验室 (BAWC) 研究人员将 OFDM、空时编码和跳频技术有效结合,于 2008 年提出一种基于 OFDM 技术的空-时编码无冲突跳频 (STC-CFFH) 方案^[7] 和一种安全的副载波分配算法,如图 1 所示。他们对部分频段受干扰情况下的 STC-CFFH 系统、传统跳频系统、传统 OFDMA 系统、基于 CFFH 的 OFDMA 系统的性能进行了研究,不同干扰场景下的分析和仿真均证明 STC-CFFH 系统的性能优于传统的 FH、OFDMA 和 CFFH 系统。

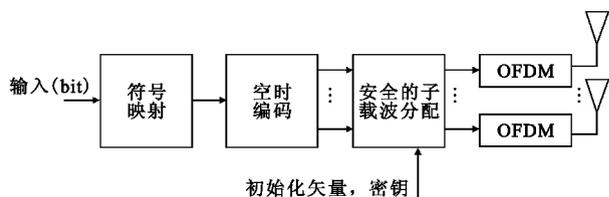


图 1 STC-CFFH 发射机框图

Fig. 1 Block diagram of STC-CFFH transmitter

试验表明,该方案克服了传统跳频系统固有的缺陷,可以有效提高频谱效率。这种方案可直接用于不友好环境下的军事通信。BAWC 实验室针对该技术形成了多项研究成果。

此外,在空-时域联合抗干扰方面空时自适应处理 (Space-Time Adaptive Processing, STAP) 技术也已经在众多领域应用。

3.1.4 非协同跳频

非协同跳频 (Uncoordinated Frequency Hopping, UFH) 是一种新的抗干扰概念。该概念最初由苏黎世联邦理工学院 (ETH Zurich) Christina Pöpper 教授带领的抗干扰研究团队在 2008 年首次提出^[5],其主要思想是发送方和接收方之间随机选择跳频信道进行信息传输,当两个节点在同一个时隙周期内跳到同一个信道上,就成功完成一次数据传输,而不像传统跳频通信那样需要节点之间预先协同跳频参数。该技术的抗干扰原理是基于在大范围频带内快速切换信道来实现抗干扰,本质上也是一种多维联合抗干扰技术。

目前这一概念在业界已经得到广泛的认可,研究人员正在继续进行更深入的研究^[8-11],找出初始概念的缺陷并提出相应的改进方案。如文献[9]在对 Ad hoc 网络的抗干扰研究中采纳了 UFH 概念里采用不同跳频序列进行通信的思路,在此基础上利用跳频序列来实现信道控制,而先前 UHF 概念中两个通信节点的跳频序列是完全随机生成的。研究表明,该方案可通过每个节点序列的唯一性识别出受到影响的节点,并将它们从网络中剔除。

而最新公开的研究成果则是文献[11]中由 P. MANJULA 提出的名为协作式协同广播技术,它以一种多信道协作的方式进行非协同跳频和非协同直接序列扩频,可以有效克服 UFH 技术传输时延较高的固有缺陷。

3.1.5 消息驱动的跳频

当两个或多个用户在同一频段上进行通信时,采用传统的跳频通信方式会发生冲突,导致频谱效率比较低。而今年提出的消息驱动的跳频 (Message-driven Frequency Hopping, MDFH) 则是一种具有频谱效率的抗干扰方式。它通过加密的信息流直接控制载波频率的选择,而不像传统跳频系统是通过伪随机序列预先确定载波频率。该方案具有很高的频谱效率,在宽带系统中可以实现更快速的跳频,而且还会解决多址跳频系统中存在的冲突问题。该技术本质上是一种多手段联合的广义抗干扰技术。

自美国密西根州立大学宽带接入无线通信实验室(BAWC)2007年提出这一概念后^[12],科研人员一直在对其做深入研究,2013年1月发表了关于该技术的系统设计和能力分析的相关研究成果^[13-14]。

3.2 认知抗干扰

认知抗干扰技术是认知通信思想在抗干扰通信领域的应用,即根据电磁干扰环境智能地产生最佳抗干扰方式,大大提高系统的抗干扰能力和频谱的利用率,实现高效可靠的抗干扰通信。认知抗干扰通信技术通过对复杂电磁干扰环境的认知,采用学习和智能决策方法,实现高效可靠的信息传输,是新一代抗干扰通信系统发展的重要方向。关于认知抗干扰的概念目前还仍处于初期的研究阶段。

3.2.1 基于马可夫决策流程(MDP)法的认知抗干扰

美国马里兰大学(University of Maryland)K. J. Ray Liu教授所带领的信号与信息研究组将认知通信网络中的次级用户和干扰方之间的对抗视作一种零和抗干扰博弈,采用马可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)方法提出一种信道跳变防御方案^[15]。建模和仿真研究表明该方法可以有效抵御攻击者的扫描式干扰。

3.2.2 MIMO-CR 技术

MIMO技术作为近年来通信领域的一个重要技术,引起了人们的广泛关注与研究兴趣,亚利桑那大学Marwan Krunz教授的研究团队对将MIMO技术引入认知无线系统进行了研究,这样使标准认知无线系统在功率控制和频率管理之外又引入了两个新的控制维度:由天线进行功率分配(空间域)和干扰管理。这样的MIMO-CR节点可以有效抑制来自外部的恶意干扰^[16]。

3.2.3 基于分布式概率协议的干扰抵消

意大利罗马大学(Sapienza University of Rome)的Roberto Di Pietro和Gabriele Oligeri 2013年提出了一种可以对抗认知干扰的创新技术,它将分布式、概率协议引入频谱配对的网络中^[17],使得每个节点可以动态的发现匹配的目标并在一个随机可用的频率上实现同步。他们认为这一概念将为认知无线网络抗干扰技术进一步研究奠定了基础。

4 抗干扰通信技术发展趋势与建议

随着人们对无线网络的依赖性越来越高,泛在的无线网络互连同时也为各种恶意干扰和攻击提供了渠道。系统安全性及抗毁能力无论在民用抑或军

用无线通信中都凸显的越来越重要。因此,开发自身具有良好安全性和抗干扰能力的新型无线系统已经成为未来通信发展的驱动力。

如前文所述,在无线通信抗干扰领域内,基于多维空间的广义抗干扰和认知抗干扰技术即是目前国内外的研究热点也将是未来的发展趋势。为了满足我国未来的通信需求,提出以下几点建议:

(1)对一些新兴的概念和技术进行深入的分析 and 研究,如非协同跳频、消息驱动的跳频和认知抗干扰技术,以及国内学者龙德浩、陈志清提出的 δ/θ 型基带相关检测/解扩方案^[18-20]等,尽快明确可适用于我国通信环境和体制的新兴抗干扰方式,以有效解决现有抗干扰手段的不足;

(2) 综合使用多种抗干扰手段,包括现有技术的组合应用以及新技术与传统技术的综合应用,使抗干扰效率最大化;

(3) 考虑网络化、体系化和智能化抗干扰的发展所需要手段和技术,实现网络级的抗干扰能力。

美国卡内基梅隆大学(Carnegie Mellon University)的健壮型无线通信系统研究团队也正着手对下一代干扰攻击及其对抗方法进行研究。团队研究人员认为,在采用多跳通信的无线 ad hoc、网状网和传感器网络中,对物理层实施干扰会引起高层协议的共鸣,比如会增加MAC层的冲突和竞争,妨碍网络层的路由发现,增加传输层的延时并会影响传输速率控制,以及导致应用层的罢工。干扰方可以针对这一特点利用任何可用信息提高干扰效果或降低干扰成本,如干扰方可以按照MAC层的协议的规律实施干扰,对特定的地理位置或来自特定应用的目标数据包实施重点干扰。而且,同样的攻击技术可以用于对抗其他威胁。而随着软件无线电技术的推广应用,可以利用新型的通过软件实现的信号处理、通信和组网技术来消除各种方式的干扰攻击。这种方法通常包括可准确诊断并修复协议栈或通过网络接口共享信息和信号的跨层设计技术。最后,研究表明,多通道通信、多径路由、自适应传输协议都可以用于实现各个层次的分集以帮助消除干扰攻击,甚至在干扰方处于移动和相对隐身状态时。

5 结 语

通信干扰与抗干扰都是电子战的一部分,面对复杂电磁环境尤其是敌方的电子进攻,通信抗干扰的作用将越来越重要。总之,当前军事科技迅猛发

展,电子通信系统是现代战争成功与否的重要部分,认真研究通信系统的抗干扰以及其他健壮通信的方式,能够大力提升通信系统的生存能力,对我国军事系统的通信、指挥控制甚至全军信息网络的建设均有至关重要的意义。

参考文献:

- [1] Firouzbakht K, Noubir G, Salehi M. On the capacity of rate-adaptive packetized wireless communication links under jamming[C]//Proceedings of the Fifth ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks. Tucson, AZ, USA:IEEE,2012:3-14.
- [2] Pelechrinis K, Koufogiannakis C, Krishnamurthy S. Gaming the jammer: Is frequency hopping effective? [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Seoul, Korea:IEEE,2009:187-196.
- [3] Hanawal M K, Abdel-Rahman M J, Nguyen D, et al. Game Theoretic Anti-jamming Dynamic Frequency Hopping and Rate Adaptation in Wireless Systems[R/OL]. 2013-11-01[2014-02-28]. www2. engr. arizona. edu/~krunz/TR/Manjesh_infocom2014. pdf.
- [4] Pöpper C, Strasser M, Capkun S. Jamming-resistant broadcast communication without shared keys[C]//Proceedings of the 18th USENIX Security Symposium. Berkeley, CA, USA:IEEE,2009:231-248.
- [5] Strasser M, Pöpper C, Capkun S, et al. Jamming-resistant Key Establishment using Uncoordinated Frequency Hopping[C]//Proceedings of 2008 IEEE Symposium on Security and Privacy. Oakland, CA:IEEE,2008:64-78.
- [6] Xu Kaihe, Wang Qian, Ren Kui. Joint UFH and Power Control for Effective Wireless Anti-Jamming Communication[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2012. Orlando, Florida:IEEE,2012:738-746.
- [7] Lightfoot L, Zhang Lei, Li Tongtong. Space-Time Coded Collision-Free Frequency Hopping in hostile jamming [C]//Proceedings of IEEE Milcom 2008. San Diego, CA:IEEE,2008:1-7.
- [8] Liu A, Ning P, Dai H, et al. Defending DSSS-based broadcast communication against insider jammers via delayed seed disclosure [C]//Proceedings of 2010 IEEE Annual Computer on Security Applications. Austin, TX:IEEE,2010:367-376.
- [9] Lazos L, Liu Sisi, Krunz M. Mitigating control-channel jamming attacks in multi-channel ad hoc networks[C]//Proceedings of the ACM WiSec 2009 Conference. [S. l.]:ACM,2009:169-180.
- [10] Wang Qian, Xu Ping, Ren Kui, et al. Towards Optimal Adaptive UFH-based Anti-jamming Wireless Communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30(1):16-30.
- [11] Manjula P, Sharmila S. Anti-jamming Broadcast Communication Using Uncoordinated Frequency Hopping

[J]. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management,2013,2(6):28-36.

- [12] Ling Qi, Li Tongtong. A Novel Concept: Message Driven Frequency Hopping (MDFH) [C]//Proceedings of 2007 International Conference on Communications. Glasgow:IEEE,2007:5496-5501.
- [13] Zhang Lei, Wang Huahui, Li Tongtong. Anti-Jamming Message-Driven Frequency Hopping: Part I-System Design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 2(1):70-79.
- [14] Zhang Lei, Li Tongtong. Anti-Jamming Message-Driven Frequency Hopping: Part II-Capacity Analysis Under Disguised Jamming[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013,12(1):80-88.
- [15] Wu Yongle, Wang Beibei, Ray K J, et al. Anti-Jamming Games in Multi-Channel Cognitive Radio Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012,30(1):1-12.
- [16] Nguyen D N, Krunz M. Spectrum Management and Power Allocation in MIMO Cognitive Networks[TR/OL]. 2013-11-01[2014-02-28]. www2. engr. arizona. edu/~krunz/TR/MIMOCognitiveTR_Aug2011. pdf.
- [17] Pietro R, Oligeri G. Jamming Mitigation in Cognitive Radio Networks[R/OL]. 2013-11-01[2014-02-28]. http://disi. unitn. it/~oligeri/documents/papers/journals/networkCR13. pdf.
- [18] 龙德浩, 陈志清. 适用于 δ 相关解扩的扩频码检验方法[J]. 电讯技术, 2012, 52(10):1577-1581. LONG De-hao, CHEN Zhi-qing. Spread-spectrum Code Test Method for δ correlation Despreading[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(10):1577-1581. (in Chinese)
- [19] 龙德浩, 陈志清. δ/θ 型基带相关检测/解扩方案[J]. 电讯技术, 2012, 52(9):1438-1442. LONG De-hao, CHEN Zhi-qing. δ/θ Base Band Correlation Detection/Despreading Scheme[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(9):1438-1442. (in Chinese)
- [20] 龙德浩, 陈志清. δ/θ 型相关解扩抑制多址干扰的能力分析[J]. 电讯技术, 2013, 53(5):553-559. LONG De-hao, CHEN Zhi-qing. Analysis of δ/θ Correlation Despreading's Ability to Suppress Multiple-access Interference [J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(5):553-559. (in Chinese)

作者简介:



征惠玲(1979—),女,宁夏平罗人,2001年获学士学位,现为工程师,主要从事通信领域科技情报研究工作。

ZHENG Hui-ling was born in Pingluo, Ningxia Hui Autonomous Region, in 1979. She received the B. S. degree in 2001. She is now an engineer. Her research concerns scientific and technical intelligence about communications.

Email:huiling.zheng@163.com