

第 1 章

绪 论

1.1 混沌理论及其发展

人类对混沌的认识经历了一个从朦胧到清晰,从感性到科学的漫长过程。

我国古代用“混沌”表示宇宙之初天地未开之时的一团模糊状态。《西游记》开篇的第一句话:“混沌未分天地乱,茫茫渺渺无人见。”就反映了古人对“混沌”的认识。据三国时东吴人徐整的《三五历纪》记载,现在的“天”和“地”是一个叫“盘古”的神从混沌状态中开出来的,这也是“盘古开天地”传说的由来。

“混沌”也被我国古人用来形容一种神兽,《庄子·应帝王》中记载了“七窍开而混沌死”的故事:“南海之帝为倏,北海之帝为忽,中央之帝为浑沌(作者注:古文中‘浑沌’与‘混沌’相通)……倏与忽谋报浑沌之德,曰:‘人皆有七窍以视听食息,此独无有,尝试凿之。’日凿一窍,七日而浑沌死。”

古代西方对混沌的理解与中国古人是完全一样的。亚里士多德(Aristotle)认为:万物之初,天地未形,称为混沌,混沌之后,才有天地万物。据古希腊诗人赫修德(Hesiod)的《神谱》(Theogony)记载,宇宙之初只有一个名为 $\chi\acute{\alpha}\omicron\varsigma$ (希腊文,音:卡奥斯)的神,卡奥斯是一个无边无际、模糊一团无性别的神,它自身诞生了大地女神 Gaia、地狱神 Tartarus、爱神 Eros 等五个神灵,由此才有了世界。混沌的英文单词 chaos 就来自卡奥斯神的希腊名称 $\chi\acute{\alpha}\omicron\varsigma$ 。

现代科学对混沌的研究是在经典力学建立之后才开始的。

1686 年,牛顿(Isaac Newton)等科学家建立起以牛顿三大定律为核心的经典力学,完美地解释了观测到的许多物理现象。当时的科学家普遍认为,用经典力学就可以描述客观世界的所有现象。1814 年,法国学者拉普拉斯(Pierre Simon de

Laplace)曾经自信地说:假设有一个具有强大计算能力的智者,如果告诉他某一时刻宇宙中所有物体的位置和之间的相互作用力,那么这位智者就可以计算出宇宙任意时刻所有物体——从最大的天体到最小的原子——的位置与状态。对这个智者而言,没有什么是不确定的,宇宙的未来就像它的过去一样,会完全浮现在他眼前。

后来对“三体问题”的研究证明,拉普拉斯的论断是完全错误的,拉普拉斯头脑中的这位智者(intellect)现在被戏称为“拉普拉斯妖”(Laplace's demon)。

所谓的三体问题,是科学家试图用牛顿的经典力学求解太阳、地球与月亮三个天体的运动规律。人类用了200多年的时间也无法解出三体运动的解析解。1873年,麦克斯韦(James Clerk Maxwell)意识到:系统初始状态的微小变化可能会演变成一个有限的偏差……这使得人们无法预测未来的事件。这实际上就是孔子在《礼记·经解》里所说的“差若毫厘,谬以千里”。但无论是2500年前中国的孔子,还是150年前英国的麦克斯韦的思想,都还只是一种哲学思想,不能称为真正的混沌研究。

1890年,法国科学家庞加莱(Jules Henri Poincaré)研究发现:三体问题不可能得到精确的定量解析解,即使给定初试条件,也无法预测无限长时间后物体运动的最终状态。庞加莱运用相图、拓扑学以及相空间截面对微分方程进行了定性分析,并提出庞加莱截面、庞加莱映射等方法。庞加莱可以称为混沌研究的第一人。

1892年,俄国数学家李雅普诺夫(Aleksandr Mikhailovich Lyapunov)在其博士论文中提出可用系统在相空间中相邻轨道间收敛的平均指数来判断系统是否存在混沌,这一指数被称为李雅普诺夫指数或李指数。1954年,苏联数学家柯尔莫哥洛夫(Andrey Nikolaevich Kolmogorov)认为保守系统在微小扰动下可能会出现混沌,十年后被他的学生Vladimir Arnold和德国学者Jürgen Moser独立给出了严格的数学证明,现在称为KAM定理。

公认的混沌理论的创立者是麻省理工学院的气象学家洛伦茨(Edward Norton Lorenz)。洛伦茨当时一直在研究“长期天气预报”的课题,1961年,洛伦茨用计算机来仿真他推导出的气象动力学方程组(现在这个方程称为洛伦茨方程或洛伦茨系统)。第一次计算,他输入的初始值是0.506127,第二次重新计算,他输入的初始值只是0.506。尽管两次输入的初始值相差很小,但计算两个月后天气预报的结果却大相径庭!在反复检查计算过程后,洛伦茨意识到:这是由于他建立的数学模型对初始条件极其敏感。1963年,洛伦茨发表了题为“Deterministic Non-periodic Flow”的论文(Lorenz,1963),他在论文中指出:初始条件的微小差异最后会演化为完全不同的结果!而在任何实际系统中,误差总是不可避免的,因此要准确预测长期(如两周之后)的天气是不可能的。这也是我们现在从智能手机上只能

查看十日内天气预报的主要原因。KAM 和洛伦茨分别揭示了保守系统和耗散系统在长期演化过程中是如何产生混沌运动状态的。

但是,洛伦茨论文发表之后的十多年内并没有引起学者们的太多重视,这篇论文平均一年只有一次引用。为引起学界的注意,1972 年,洛伦茨以题为“巴西的一只蝴蝶拍打一下翅膀,会在得克萨斯州引发一场龙卷风吗?”的演讲作为他在美国科学促进会上的学术报告。这次演讲创造了一个新词:“蝴蝶效应”(butterfly effect)。

其实,北宋诗人苏轼早在 1100 年就曾写过与“蝴蝶效应”异曲同工的“水滴潮起”:“竹中一滴曹溪水,涨起西江十八滩”(苏轼《赠龙光长老》)。与洛伦茨严谨的科学研究不同,苏轼的诗只是文人的天马行空想象。

但洛伦茨在其论文中并没有使用 chaos 一词,第一个用 chaos 描述系统对初试条件敏感性的是美籍华人学者李天岩和其导师、马里兰大学的约克(James Alan Yorke)教授。1975 年,李天岩与约克发表了一篇题为“Period Three Implies Chaos”的文章,指出对于一维离散系统,如果存在周期三的周期点,则该系统一定存在不稳定的非周期轨道(Li et al.,1975)。

1976 年,美国生态学家 Robert McCredie May 在美国《自然》杂志上发文指出,简单的一维迭代映射逻辑斯谛(Logistic)模型可以通过倍周期分岔达到混沌(May,1976)。1977 年,首届国际混沌会议在意大利召开。1978 年,费根鲍姆(Mitchell Jay Feigenbaum)发现了倍周期分岔发生时参数之间的差率是常数(后称为费根鲍姆常数),使混沌状态可以被定量计算(Feigenbaum,1978)

1983 年,加州大学伯克利分校蔡少棠(Leon Ong Chua)教授等发现简单的电路(后来被称为蔡氏电路)就可以产生诸如倍周期分岔、混沌等现象(Chua et al.,1983)。同年,Peter Grassberger 等提出重构动力系统的理论方法,从时间序列中计算其分数维(Grassberger et al.,1983)。1985 年,Alan Wolf 等提出了计算混沌时间序列李雅普诺夫指数的方法。依据计算出的李雅普诺夫指数是否大于零,就可以判断该时间序列是否为混沌(Wolf et al.,1985)。

至此,混沌的理论框架逐步形成,混沌的一些概念,如标度性、普适性、李雅普诺夫指数、分数维、吸引子等逐步被确定。1987 年,美国科普专家 James Gleick 畅销书 *Chaos: Making a New Science* 的出版,使得“蝴蝶效应”家喻户晓,也吸引了更多的研究者从事混沌研究。经检索 Web of Science(WOS)数据库,全世界以“Chaos”为主题的文章在 1985 年以前每年仅有十余篇发表,1987 年发表了 146 篇,2005 年发表的文章数量就超过 3500 篇,图 1.1.1 给出了 1980 年至 2005 年,25 年间每年发表的主题为“Chaos”的 SCI 文章的数量。1998 年发表文章数量的暴增是因为混沌保密通信技术被提出。

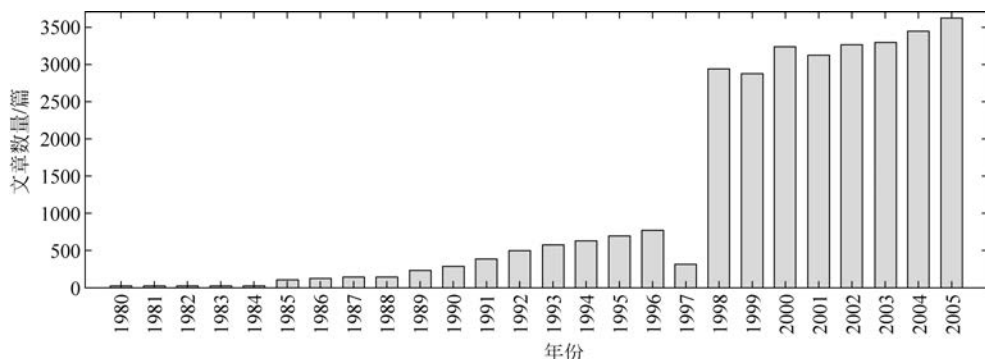


图 1.1.1 1980—2005 年 25 年间 WOS 数据库收录的主题为“Chaos”的论文数量演变

国内对混沌的研究大体上始于郝柏林院士于 1984 年出版《混沌》。近年来,国内学者在混沌研究领域已成为最重要的研究力量。特别是,2015 年中国密码学会成立了混沌保密通信专业委员会,2018 年中国电子学会电路与系统分会增设了混沌与非线性电路专业委员会,进一步推动了国内对混沌研究的关注。目前,国内在混沌电路研究方向上的代表性学者有:香港城市大学的陈关荣,北京航空航天大学的吕金虎,重庆大学的廖晓峰,湖南大学的王春华,中南大学的孙克辉,黑龙江大学的丁群,广东工业大学的禹思敏等;在混沌光通信及传感研究方向上的典型代表有:西南交通大学的潘炜、闫连山团队,上海交通大学的义理林、杨学林,电子科技大学的邱昆、江宁,苏州大学的李孝峰团队,北京大学的王兴军团队,西南大学的夏光琼、吴正茂团队,华中科技大学的刘德明团队,香港城市大学的陈仕俊,太原理工大学的张明江、王冰洁、王龙生和广东工业大学的王安帮、李璞、高震森等。

目前,尽管国际上对混沌的定义尚未完全统一,但学者普遍认为:所有的混沌系统都具有以下相同的几个特征。

(1) 对初始条件的敏感性。即前面讲过的“蝴蝶效应”。蝴蝶效应是混沌系统最明显的特征,也是最能体现混沌研究意义之处。James Gleick 认为混沌理论应该与相对论、量子力学并称为 20 世纪的三大重要发现。因为相对论打破了牛顿的绝对时空观的幻想,量子力学粉碎了测量过程可精确控制的牛顿式梦想,而混沌则消除了一切可确定性预测的拉普拉斯式的幻想。

(2) 随机性。混沌系统是一个确定性的动力系统,在初始条件确定的情况下,经过一段时间运动后,系统的运动状态呈现类随机的特点。这种随机性是由系统本身对初值的极度敏感造成的,故称为内随机性。

(3) 有界性。混沌的运动虽然是随机的,但却是在一定范围内的随机,即混沌运动的轨迹始终局限在一个确定的运动区域(混沌吸引域)。尽管混沌系统是无序、随机和不稳定的,但它的运动状态却始终局限在混沌吸引域内。整体来说,混

沌系统是稳定的。

(4) 标度性。混沌运动是无序中的有序态。只要数值或实验设备精度足够高,总可以在小尺度的混沌区内看到其中有序的运动形式。

(5) 分维性。系统运动轨道在相空间的几何形态可以用分维来描述。分维性表明混沌运动具有无限层次的自相似结构,即混沌运动是有一定规律的,这是混沌运动与随机运动的重要区别之一。

(6) 统计特征。混沌系统的统计特征主要包括正的李雅普诺夫指数和连续功率谱。正的李雅普诺夫指数表明其运动轨迹在每个局部都是非稳定的,相邻的轨道呈指数分离。当最大李雅普诺夫指数大于零时,系统就是混沌的;或者说,如果系统是混沌的,那么肯定存在大于零的李雅普诺夫指数。

由于混沌系统输出的信号是非周期的、随机的,故其功率谱与噪声信号的功率谱类似,是连续谱。

蔡少棠教授曾说:目前对混沌的探索仅处于一座险峻冰山的表面,在这座冰山的下面,蕴藏着各种极其美妙的具有无限复杂性的结构,如同一个曲折回旋没有终点的几何迷宫,或者像一幅超现实的令人神魂颠倒的内涵深邃的美景。

混沌信号可在越来越多的场景中得到应用,应该是混沌研究所展现出的“美景”中最靓丽的部分。

1.2 混沌信号应用研究历程

1990年,美国马里兰大学的 Edward Ott、Celso Grebogi 和 James Alan Yorke 发现:利用吸引子中不稳定的周期轨道具有对小参数扰动敏感的特性,如果给混沌系统施加一个小参量扰动的控制量,就可以控制混沌系统工作在一个不动点上(Ott et al., 1990)。这种控制混沌运动的方法称为 OGY 方法(Ott-Grebogi-Yorke),它为混沌应用奠定了基础。此后,混沌理论又与复杂网络、自组织、耗散结构相结合,形成若干新的研究方向。

目前,混沌在生物学、经济学、图像加密、癫痫病人的脑电波识别等方面都进入应用阶段。本书重点讲述混沌在保密通信、雷达、传感及毫米波噪声产生等领域的应用。

1.2.1 混沌信号在保密通信中的应用

在发现不同类型的混沌电路的同时,科学家发现激光器也可以产生混沌激光。在光通信领域,半导体激光器(laser diode, LD)广泛地用作光发射模块的光源,所以混沌激光的产生研究主要集中于半导体激光器上。

1975年,Hermann Haken在研究半导体激光器的速率方程时,发现激光器和混沌之间存在联系(Haken,1975)。随后,Kensuke Ikeda等提出了半导体激光器时延反馈产生混沌的数学模型(Ikeda,1979),Roy Lang和Kohroh Kobayashi发现了外部光反馈结构可以引起半导体激光器的不稳定性和混沌态(Lang et al.,1980),Carl Otto Weiss等首次观察到激光器的混沌现象(Weiss et al.,1985)。

目前已经证实的产生混沌光的技术有:光反馈法(Mork et al.,1992;Rondoni et al.,2017)、光注入法(Simpson et al.,1994)和光电反馈法(Tang et al.,2001)等。

1990年,美国海军实验室 Louis M. Pecora 和 Thomas L. Carroll 首次通过驱动-响应方法,实现了两个混沌系统的同步(Pecora et al.,1990)。1993年,基于混沌电路同步的保密通信实验得到验证(Cuomo et al.,1993)。

混沌信号具有异常复杂的运动轨迹和不可预测性,非常适合作为保密通信中隐藏信号的载体。在发现混沌电路存在混沌同步后的第四年,佐治亚理工学院的 Rajarshi Roy 团队首先证明两个光纤激光器可以实现混沌同步,并基于混沌同步完成了混沌保密通信的实验验证(Colet et al.,1994)。

激光器存在混沌同步,意味着两个具有相同混沌系统的异地通信者能够产生相同的混沌信号,并从中提取出相同的随机数,这使得长距离高速密钥分发成为可能。特别是,与其他保密通信技术相比,混沌保密通信具有以下优点:

(1) 它是一种用光收发模块结构参数作为密钥的硬件加密方案,消除了算法加密可以被计算机破解的安全隐患;

(2) 与现行的多数光纤通信技术兼容,可便利地移植现有光纤通信系统中的绝大多数技术;

(3) 在密钥生成率、传输距离等方面比量子密钥分发具有明显的优势。

1996年,西班牙学者 Claudio R. Mirasso 等提出了单向主从注入方案的半导体激光器混沌同步方案(Mirasso et al.,1996)。1998年,法国弗朗什孔泰大学(Franche-Comté)的 Jean Pierre Goedgebuer 等利用可调谐反馈半导体激光器演示了混沌保密通信(Goedgebuer et al.,1998)。

混沌保密通信技术的快速发展始于美国和欧盟资助的几个项目。1998—2003年,美国陆军研究办公室资助加州大学洛杉矶分校和圣地亚哥分校等联合承担“Digital Communication Devices Based on Nonlinear Dynamics and Chaos”国防项目。2000—2005年,在174万欧元项目经费的支持下,欧盟第五届科技框架计划项目“Optical Chaos Communications Using Laser-diode Transmitters”(OCCULT),利用雅典城的光通信网,完成了混沌保密通信历史上一个里程碑式的实验,实现了120 km、码率为1 Gbit/s、误码率为 10^{-7} 的混沌保密通信外场实

验(Argyris et al., 2005)。2006—2009年,欧盟第六届科技框架计划又支持了总经费为393万欧元的“Photonic Integrated Components Applied to Secure Chaos Encoded Optical Communications Systems”(PICASSO)项目,为混沌保密通信研究集成光收发器件,并在法国贝桑松城进行了100 km、10 Gbit/s的混沌保密通信实验验证(Lavrov et al., 2010)。

在以上项目的推动下,混沌保密通信研究得以快速发展,取得的主要研究成果如下。

在混沌同步研究上,发现了完全同步、滞后同步、广义同步、有限时间同步等同步类型。同时一些混沌同步的控制技术也先后被提出,如反馈控制同步法、自适应同步法、主动控制同步法、鲁棒控制同步法等。

在信息编码与解密研究上提出的主要方案有:混沌掩模(Chee et al., 2005; Zhu, 2009)、混沌键控(Kolumbra et al., 1997)、混沌调制(Bai et al., 2005)和开关键控(Heil et al., 2002)等技术。

由于混沌保密通信是利用混沌激光器的结构参数作为随机密钥,而光反馈半导体激光器是最简单,也是最常用的混沌通信的发射源。但激光器外部反馈腔的腔长(又称为时延特征)可以通过时间序列分析法等方法提取出来(Wang et al., 2010),这种时延特征的泄漏会减少混沌保密系统的密钥空间,降低了非合法用户仿制相同混沌激光器的难度。为此,研究者提出了多种抑制时延特征的方案,如通过调节激光器的偏置电流和反馈腔长度,利用弛豫时间来掩藏外腔时延,通过两个或多个镜面反馈增加反馈腔的复杂度,通过调制反馈光的偏振态或相位消除时延信息,利用啁啾光纤光栅等构建准连续的分布式反馈腔,或者直接用垂直腔面发射激光器(VCSEL)替代边发射半导体激光器消除时延信息。

在大密钥空间的混沌激光器研究上,研究者提出多种增加激光器结构参数及调控参数的方案(Bogris et al., 2008; Li et al., 2019),如设计集成有相位调制区和半导体放大区的光子集成混沌激光器,或增加反馈参数来增加混沌激光器的密钥空间(Rontani et al., 2016; Wang et al., 2019)。

目前,混沌保密通信的研究方向主要有:发展更安全、更鲁棒的保密技术,研发集成、便携的大密钥空间的硬件加密模块,不断提升保密通信的传输距离和传输码率。混沌保密光纤通信系统从吉比特每秒量级的通信水平发展到了如今数十吉比特每秒、百千米量级的高速长距离保密通信水平,保密信号也由最初的开关键控调制格式向高阶信号调制格式演进,研究结果从实验室演示逐渐走向城域网等现场通信系统。太原理工大学王龙生利用全光反馈混沌掩藏开关键控调制信号,实现了速率为10 Gbit/s、距离为40 km的混沌保密通信(Wang et al., 2019)。上海交通大学义理林课题组利用光电振荡混沌源,并结合双二进制及四电平16QAM

调制格式,实现了速率为 30 Gbit/s、距离为 100 km 的混沌保密通信(Ke et al., 2018)。此外,通过提升混沌载波带宽、结合高阶信号掩藏、混沌相位加密等技术实现高速混沌保密通信方案也被相继提出(Wang et al., 2020; Gao et al., 2020)。

利用宽带的混沌激光可以产生高速的随机数,其码率比现有的基于热噪声或量子噪声产生随机数的码率要高两个数量级。2007 年,王云才申请了第一个基于混沌激光产生随机码的发明专利(王云才等,2009)。2008 年 12 月,日本学者内田淳夫(Atsushi Uchida)等利用宽带混沌激光信号,首次实验产生了速率为 1.7 Gbit/s 的实时物理随机数,将物理随机数的产生速率从传统的兆比特每秒量级提升到吉比特每秒量级(Uchida et al., 2008)。此后,通过提高混沌激光的带宽或者采用更加多样化的后处理技术,提高物理随机数产生速率的技术方案被陆续提出(Reidler et al., 2009; Li et al., 2012; Sakuraba et al., 2015; Wang et al., 2017)。为突破电子 ADC 带宽的限制,李璞等提出并研制出光子物理随机数发生器(Li et al., 2016)。

保密通信的核心是密钥的安全分发。理论上,如果能实现完全随机的密钥安全分发,就可以构建出绝对安全的保密通信系统。混沌同步为高速密钥分发提供了可能性。2010 年,Ido Kanter 等理论提出基于互注入混沌同步的密钥分发方案(Kanter et al., 2010),并于 2016 年被实验验证(Porte et al., 2016)。Kazuyuki Yoshimura 等提出基于同一噪声源驱动的两个相同混沌激光器,使其同步进而实现密钥分发的方案(Yoshimura et al., 2012)。2013 年,基于噪声共驱级联半导体激光器实现了相距 120 km 的 64 kbit/s 的密钥分发(Koizumi et al., 2013)。此后,各种消除同步恢复时间限制、提升密钥分发速率的技术方案也相继被提出(Xue et al., 2015; Gao et al., 2021)。

今后基于混沌同步的密钥分发的研究,应重点聚焦于安全性分析、无误码分发技术等。

1.2.2 混沌信号在雷达中的应用

雷达已广泛应用于气象、军事、交通、航空航天、地形监测等领域。随着雷达技术的发展,出现了多种雷达体制,如连续波雷达、脉冲压缩雷达、脉冲多普勒雷达、超宽带雷达、极化雷达、合成孔径雷达和逆合成孔径雷达等。

以噪声(或随机信号调制连续波)作为探测信号的雷达称为噪声雷达(或随机信号雷达)。由于噪声具有不可预测性,噪声雷达具有低的截获概率、强的抗干扰能力和图钉型的模糊函数,具有其他体制雷达所不具备的独特优点。

Billy M. Horton 最早提出将噪声调制信号用于雷达测距,通过将回波信号与延迟后的发射信号进行互相关运算来获得目标的距离信息(Horton, 1959)。但噪

声雷达的快速发展还是在固态微波器件以及大规模集成电路发展之后,南京理工大学刘国岁教授是国际上最早研究随机信号雷达的研究者之一(Liu et al.,1997)。随后,超宽带合成孔径噪声雷达(Garmatyuk et al.,1999)、全极化随机噪声雷达(Narayanam et al.,2005)和基于正交频分多址(OFDMA)的噪声雷达网络(Surender et al.,2006)等技术相继被提出。

混沌信号具有与噪声或随机信号相似类随机特性。特别是混沌信号类噪声特性和初值敏感性,使得混沌信号雷达具有较强的隐蔽性和较低的截获概率。与噪声雷达相比,混沌雷达具有两个特殊的优点:

(1) 混沌信号更易于产生和控制,避免了噪声信号产生、复制都比较困难的缺点;

(2) 混沌系统的初值敏感性使得不同系统参数存在不同的混沌态,因此混沌雷达信号天然具有无数个正交波形,便于雷达组网及实现多输入多输出(MIMO)雷达。

1993年,美国亚利桑那大学(The University of Arizona)Wendy Tolle Walker博士提出将混沌信号应用于雷达波形设计,研究了混沌二值序列作为脉冲压缩编码的可能性(Walker,1993)。1996年,德国德累斯顿理工大学Andreas Bauer博士研究了混沌应用于雷达和声呐的可能性,讨论了混沌基带雷达的实现机理(Bauer,1996)。2005年,超宽带(UWB)混沌穿墙雷达被提出(Vijayaraghavan,2005)。同年,电气和电子工程师协会天线与传播分协会(IEEE AP-S)首次将混沌雷达列入特邀议题。2006年,第一届欧洲混沌雷达会议召开,至此,混沌信号雷达作为一种新体制雷达引起越来越多的关注。

光混沌比电混沌具有更高的带宽,可实现更高的空间分辨率。2001年,Krishna Myneni等利用光反馈半导体激光器产生混沌激光,验证了对目标的精确测距(Myneni et al.,2001)。2004年,加州大学洛杉矶分校的博士生林凡异与导师刘佳明提出混沌激光雷达的概念,构建了混沌激光测距系统,得到3 cm的距离分辨率(Lin et al.,2004)。随后,混沌激光雷达的应用与技术被不断拓展和完善,如基于混沌激光雷达实现多目标实时探测(Wang et al.,2008),实现对水下目标的探测(Rumbaugh et al.,2013),利用时分复用技术验证多输入多输出的混沌激光三维成像雷达(Chen et al.,2022)。2023年,北京大学王兴军等利用微纳光纤环产生的混沌光频梳,构建了平行混沌激光雷达,实现了毫米级的测距精度和毫米每秒的速度分辨率(Chen et al.,2023)。

将混沌同步应用于混沌雷达,是未来混沌信号雷达的主要研究方向之一。

1.2.3 混沌信号在光纤故障检测与传感中的应用

时域反射测量(TDR)本质上和雷达类似,均是在脉冲测距技术的基础上发展

出的一种远程遥感测试技术。1977年,诺基亚贝尔电话实验室提出了光时域反射仪(OTDR)概念(Personick,1977)。OTDR是通过测量入射到光纤中的脉冲光的后向瑞利散射和菲涅耳反射光,实现对光纤链路异常损耗的探测和定位,是测试光纤传输特性和检测光纤故障的主要技术手段。

传统的光时域反射仪技术成熟、结构简单,但其动态范围和空间分辨率之间存在无法调和的矛盾。2008年,王云才等提出混沌光时域反射仪(C-OTDR)技术,用宽带混沌激光信号替代OTDR的脉冲激光,实现了对光纤故障的厘米量级分辨率(Wang et al.,2008)。随后又将混沌光时域反射测量技术应用拓展至无源光网络和有源光网络线路故障的高分辨率检测和定位(Zhao et al.,2013)。同时,基于电混沌信号,对电缆故障的高精度在线检测和定位技术也被提出(Wang et al.,2011)。

此外,混沌激光也被应用于布里渊分布式光纤传感,基于其类噪声、宽带宽、相干长度可调谐等特性,可消除传统布里渊传感方案脉冲激光时空同步激励及正弦啁啾激光周期性相干光场的限制,实现长传感距离与高空间分辨率兼顾的分布式温度、应变测量。2015年,太原理工大学的张明江等提出了混沌布里渊光相关域反射技术(Ma et al.,2015),采用时延特征抑制联合时域门控方案,通过抑制旁瓣噪声与非零基底等背景噪声,在10.2 km的范围内,实现了9 cm空间分辨率的温度、应变测量(Zhang et al.,2018)。进一步,采用带宽增强混沌激光联合锁相探测方案,以10 GHz的宽带混沌激光为信号源,利用锁相探测增强测量信噪比、提升测量速度,空间分辨率最大提升至3.1 mm(Wang et al.,2019)。

1.2.4 混沌信号在太赫兹噪声产生中的应用

在特定频率范围内产生功率谱平坦的毫米波及太赫兹波段噪声有着重要的应用需要,如测量待测器件的噪声系数、检验雷达的抗干扰能力、进行消散斑噪声的成像等。

热噪声可以产生功率谱平坦的毫米波或太赫兹噪声源(Johnson,1927)。但是,热噪声源的超噪比很小,要获得15 dB的超噪比,就要求近1万开的电阻温度!而且热噪声源工作需要液氮环境,操作不便。

利用半导体的PN结在反向偏压下产生的雪崩噪声,可以制备毫米波段的噪声源。这类噪声源具有体积小、寿命长、可集成等优点,如中国电子科技集团第41研究所基于GaAs肖特基二极管,研制出10 MHz~50 GHz、超噪比为5~19 dB系列同轴噪声源。

基于GaAs肖特基二极管,美国加州理工学院产生了150~180 GHz的噪声,但在180 GHz处的超噪比很小,无法实用(Parashare et al.,2014);美国NASA戈