

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210288

超再生接收机在 ISM 频段下的混沌现象*

况昀 闵可 丁强 涂含芬 杨逸凡 徐建

(东南大学信息科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 针对超再生振荡器的传统动力学模型的工作频率过低而不具备实际参考意义的问题,本文将超再生接收机模型提升至 ISM 频段下的 433 MHz。使用软件的数值仿真方法对改进后的模型进行混沌态动力学特性研究,采用李雅普诺夫指数法对模型混沌状态进行定量检测,并研究该频率下不同状态的接收机对弱信号的检测能力。仿真结果表明 433 MHz 超再生接收机在受较低频率熄灭信号控制时能够产生混沌现象,该频段下的混沌态超再生接收机灵敏度要高于周期态约 3 dB,证明了混沌能够产生并被应用于实际 ISM 频段下的超再生接收机,为提高超再生接收机的弱信号检测能力提供了一种可行的方案。

关键词: 超再生振荡器;混沌;李雅普诺夫指数;弱信号检测

中图分类号: TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1

Chaos of super regeneration receiver in ISM band

Kuang Yun Min Ke Ding Qiang Tu Hanfen Yang Yifan Xu Jian

(School of Information Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The super regeneration receiver model is upgraded to 433 MHz in ISM band to solve the problem that the traditional dynamic model of super regeneration oscillator works at a low frequency and has no practical reference value. The chaotic dynamic characteristics of the improved model are studied by using the numerical simulation method of the software. The Lyapunov exponent method is used to quantitatively detect the chaotic state of the model, and the detection ability of receivers in different states at this frequency is studied. The simulation results show that the 433 MHz super regeneration receiver can produce chaos when controlled by a low frequency quench signal. The sensitivity of the chaotic super regeneration receiver in this frequency band is about 3 dB higher than that in the periodic state. This proves that chaos can be generated and applied to the super regeneration receiver in the actual ISM band. This provides a feasible scheme to improve the weak signal detection capability of the super regeneration receiver.

Keywords: super regenerative oscillator (SRO); chaos; the Lyapunov exponent; weak signal detection

0 引言

由美国学者 Edwin Armstrong 发明的超再生接收机诞生于 1922 年,因具有灵敏度高、功耗低等诸多优点^[1],被广泛应用于开关键控 (on-off keying, OOK) 调制无线通信中^[2]。超再生接收机在起振阶段产生杂乱波形,这曾被认为是由元器件内部噪声所引起的现象。1996 年,荷兰科学家 Domine 证明了该现象实质上是由电路的非线性所导致的混沌。Domine 通过分析从超再生接收机中提取出的二阶偏微分非线性时变方程,证明了该方程在某些情况下有产生混沌的可能性。

传统的混沌分析方法通常采用频谱法和庞加莱截面等

定性判别法,定性判别法受研究者的主观判断影响极大,容易造成误判,故本文采用李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数方法进行定量分析;在混沌态运动中,即使是很接近的一对初值,它们所衍生的运动轨道伴随着时间增加都将会依照指数的形式产生分离, Lyapunov 指数就是用于描述混沌运动中该现象强弱程度的量。

当 Lyapunov 指数小于 0 时,意味着两个初值点在运动上呈现相互靠拢的趋势,系统存在周期性运动;当 Lyapunov 指数大于 0 时,表示两个相邻的初值点最终分离,运动轨道有局部不稳定性,证明产生了混沌。尽管多维系统的 Lyapunov 指数通常不唯一,但仅需将最大 Lyapunov 指数与 0 比较,就可判定该系统是否产生混沌。

收稿日期:2022-06-12

* 基金项目:国家自然科学基金(61871116)项目资助

混沌信号有不可预测、高度复杂^[3-4]、广泛存在于各种系统中的特性^[5-6]。对于电路系统,目前已有高维的多参数超混沌系统电路被理论模型仿真所验证^[7-8],利用混沌带来的各种效应对实际电路进行结构优化和性能提升已成为可行的技术方案^[9]。

在利用混沌优化实际电路的研究中,弱信号检测是该领域的热点问题^[10],混沌状态下的动力学运动对系统初始条件非常敏感^[11],在不规则电压电流出现时,处于混沌态的超再生振荡器电路对输入信号会有极高的灵敏度,此时处于混沌状态的接收机对谐振频率信号的放大倍数极大,利用此效应即可实现对微弱信号的检测^[12]。

然而,在 Domine 的理论研究过程中,动力学方程的预设频率仅为 1 Hz。实际并不存在此频率的射频信号,即使要实现该振荡频率,所需要的电容和电感也将十分巨大。因此,Domine 的动力学方程的参数所对应的电路模型不具有现实可行性,缺乏工程应用价值。

针对上述问题,本文首次将动力学方程的理论模型的振荡频率提升至常用的工业、科学、医学(industrial scientific medical, ISM)频段的 433 MHz。该频率已被广泛应用,故该模型所使用的参数具有实际参考意义,在该振荡频率下得到的研究结果也更有实际意义。

研究的结果表明,在频率相对较低的信号的控制下,振荡频率为 433 MHz 的超再生接收机在起振阶段能产生混沌现象,此时超再生接收机对弱信号的检测能力更强,输入相同信噪比的信号,处于混沌状态下的超再生接收机具有更低的误码率,该研究揭示了利用混沌效应提高实际工作频率下的超再生接收机对弱信号检测能力的可行性。

1 433 MHz 超再生接收机的仿真模型

如图 1 所示,传统的超再生接收机系统主要由低噪声放大器、超再生振荡器、包络检波器、低通滤波器和熄灭振荡器及辅助电路构成^[13]。

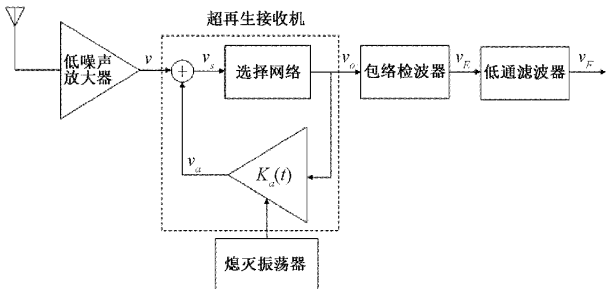


图 1 超再生接收机原理框图

工作在间歇振荡状态的超再生振荡器是超再生接收机的核心,间歇周期受熄灭信号频率控制。如图 2 所示,当没有信号输入时,振荡器靠内部噪声起振^[14],起振速率较慢;而当存在外界信号输入时,振荡器有外界能量注入,起振时间减小,振荡信号的包络面积变大,超再生接收机利用不同

情况下的起振时间差对 OOK 信号进行解调。

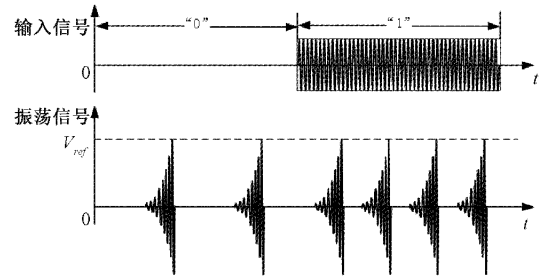


图 2 超再生振荡器原理

超再生振荡器有多种实现方式,本文的研究内容基于 Armstrong 提出的等效 LC 谐振结构,如图 3 所示。 $R_m \sin(p_0 t)$ 表示频率 p_0 的熄灭信号引起的周期性阻抗;当其减小时,电路总阻抗由 0 变负,振荡器逐渐开始起振;当其增大,电路总阻抗将由 0 变正,使振荡幅度逐渐衰减至熄灭;当阻抗维持在零状态时,电路稳幅振荡。此外, $R_i(1 - i^2/K_i)$ 表示超再生振荡器的固有阻抗 R 。

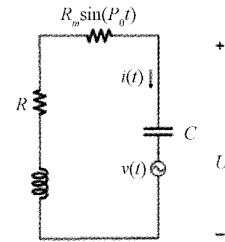


图 3 超再生振荡器串联谐振模型

由基尔霍夫定律得到电路中电流微分方程:

$$\frac{1}{L} \frac{dv(t)}{dt} - \left[\frac{1}{LC} + \frac{R_m}{L} p_0 \cos(p_0 t) \right] i = \frac{d^2 i}{dt^2} + \left[\frac{R_m}{L} \sin(p_0 t) + \frac{R_i}{L} \left(1 - \frac{3i^2}{K_i} \right) \right] \frac{di}{dt} \quad (1)$$

对应式(1)可建立图 4 所示的仿真模型,调节 LC 改变模型的振荡频率,同时需调整其他参数以改善系统输出的振荡波形。系统振荡频率与熄灭频率的比值 r 是系统能否产生混沌的重要参数;随着 r 的增大,系统将从周期态进入到混沌态。依照文献的经验值,设定 $r = 135$ 和 $r = 400$ ^[15]。

本文超再生接收机模型的参数如表 1 所示。

表 1 超再生接收机仿真模型参数

变量	参数值
电感 L	1 nH
电容 C	400/3 pF
电阻 R_m	1 Ω
电阻 R_i	-0.1 Ω
比例系数 K_i	500 A ⁻²

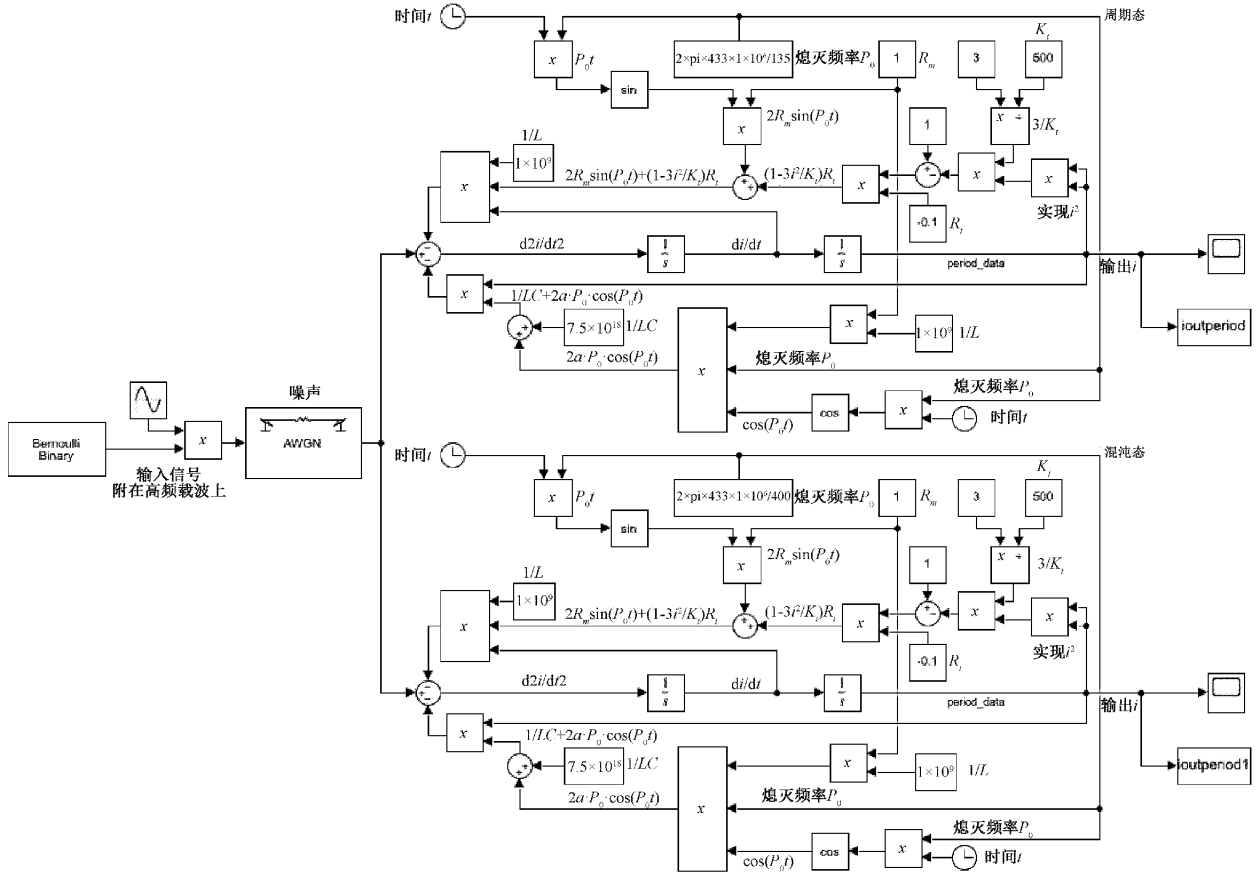


图 5 对比 $r = 135$ 和 $r = 400$ 的仿真模型

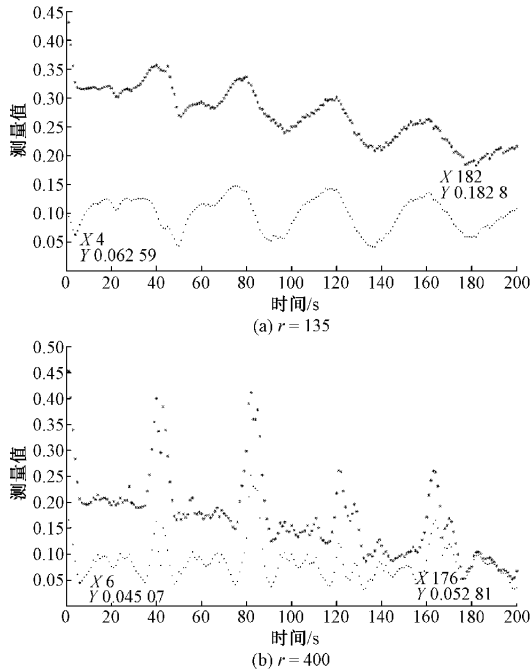
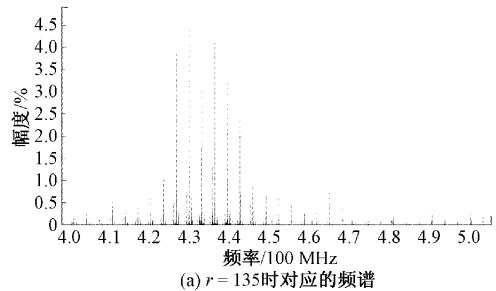


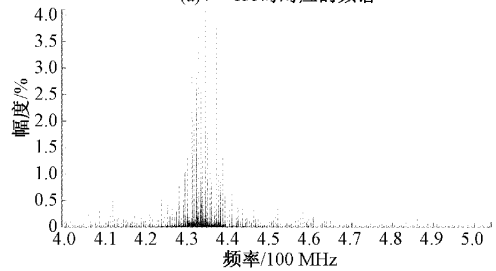
图 6 嵌入维数和延迟时间

表 2 不同熄灭频率下起振期间的 Lyapunov 指数

$r = 135$	$r = 400$
-0.003 63	0.051 45
-0.003 80	0.057 43
-0.008 48	0.037 43



(a) $r = 135$ 时对应的频谱



(b) $r = 400$ 时对应的频谱

图 7 频谱法的检测结果

热门,本文所研究的混沌态超再生接收机可为该领域提供一种新的思路。目前已有研究证明振荡频率 1 Hz 的超再

生接收机在混沌态下对弱信号的检测能力更强^[15]。对应电路性能指标,表现之一为处于混沌态的超再生接收机在相同信噪比输入下的系统误码率低于周期态超再生接收机。

沿用图 5 对比 $r=135$ 和 $r=400$ 的仿真模型检验混沌态 433 MHz 超再生接收机对弱信号的检测能力,采用包络检波方式解调,解调模块各自独立地依照对应接收机的输出波形调整至最佳参数,以保证两个系统均处于较好的解

调状态。

输入附加噪声的 OOK 信号,分别通过设定在周期态和混沌态下的超再生接收机,并最终将解调结果与输入信号进行对比以得到系统的误码率。为减少偶发因素影响,仿真重复进行 3 次,得到系统误码率的平均值,并以该值来比较工作在不同状态下的超再生接收机对微弱信号检测能力的强弱,仿真所得数据如表 3 所示。

表 3 周期态和混沌态在不同信噪比下测得的误码率

系统状态	0 dB	-1 dB	-3 dB	-5 dB	-7 dB	-9 dB	-11 dB	-13 dB	-15 dB
周期态误码率/%	0	0	0	0	1.163	2.326	4.651	11.63	20.93
	0	0	0	0	0	1.163	2.326	12.79	20.93
	0	0	0	0	2.326	0	9.302	6.977	16.28
混沌态误码率/%	0	0	0	0	0	0	0	1.163	4.651
	0	0	0	0	0	0	1.163	2.326	2.326
	0	0	0	0	0	2.326	1.163	2.326	2.326

根据 3 次仿真结果,将各个信噪比下的误码率的均值绘制成折线图,两个状态下的超再生接收机的信噪比-平均误码率仿真结果如图 8 所示。当输入信号信噪比较高时,周期态与混沌态的误码率差异不大。随着输入信号信噪比逐渐降低,周期态和混沌态超再生接收机的误码率均呈上升的趋势,处于周期态的误码率上升速率及同信噪比状态下的误码率均显著高于混沌态。

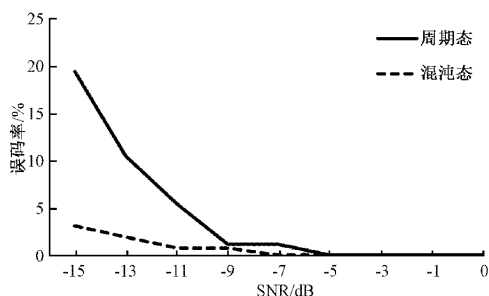


图 8 不同信噪比对应的平均误码率

进一步观察图中数据,可以发现相同的误码率下,混沌态超再生接收机比周期态超再生接收机的灵敏度提高约 3 dB,且该差值随着系统所允许最大误码率的提高而不断增大。

因此,研究表明在相同的信噪比下,混沌态 433 MHz 超再生接收机的误码率往往能够小于周期态 433 MHz 超再生接收机的误码率,则证明此时混沌态超再生接收机对弱信号的检测能力强于周期态。由于本论文中所采用的超再生接收机仿真模型工作在 ISM 频段的 433 MHz 频率下,因此本论文中的模型参数更贴近于实际电路,所得的结果更具有实际意义,具有更高的可实现性。

4 结 论

本文对超再生接收机的动力学方程进行了研究,通过

将理论模型的工作频率提升至通用的 ISM 频段的 433 MHz 频率,使得修改后的模型参数更加具有工程实际应用价值,通过数值仿真的方式证明了 433 MHz 超再生接收机在熄灭频率取值合适的条件下能够产生混沌现象,进而得以预示工作在各个振荡频率的超再生接收机都有产生混沌的可行性,同时确定了 433 MHz 混沌态超再生接收机比周期态超再生接收机有更好的弱信号检测能力。由此可见实际设计中,可以充分利用混沌带来的新特性,以提高实际超再生接收机对弱信号的检测能力。

参考文献

- [1] YUAN Y, CHEN A Y, WU C. A high-sensitivity low-power vital sign radar sensor based on super-regenerative oscillator architecture[J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2020, DOI: 10.1109/IMS30576. 2020.9223944.
- [2] 梁栋梁. 植入式超再生接收机中高性能 ASK 解调模块的设计[D]. 南京:东南大学,2016.
- [3] FU Y Q, HU M J, LI Y N. FPGA implementation for a chaotic digital receiver using duffing oscillators array[C]. 2020 4th International Conference on Digital Signal Processing Proceedings (ICDSP 2020), 2020: 342-347, DOI:10.26914/c.cnkihy.2020.046664.
- [4] 白家琛. 光电反馈激光混沌通信系统安全性增强研究[D]. 北京:北京邮电大学,2021.
- [5] 李集照,王黎明,赵英亮,等. 基于混沌相关特性的水声通信[J]. 国外电子测量技术,2019,38(9):66-70.
- [6] 孙训. 卫星相干激光混沌通信系统设计与性能研究[D]. 南京:南京大学,2021.
- [7] 方洁,姜明浩,李宗翰,等. 新超混沌及其复混沌系统设计与电路实现[J]. 大连工业大学学报,2021,40(1):57-66.

- [8] 张刚,王星宇,贺利芳. 无信号内干扰的正交多用户降噪 DCSK 混沌通信系统[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2022,42(4):7-15.
- [9] JIE J. Programmable multi-direction fully integrated chaotic oscillator[J]. Microelectronics Journal, 2018, 75:27-34.
- [10] 杨一,程为彬,汪跃龙,等. 随钻弱 SNR 信号的 Duffing 振子混沌检测与恢复[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2):235-244.
- [11] CHARLOT N, GAUTHIER D J. Sensitivity of a chaotic logic gate[J]. ArXiv Preprint, 2022, ArXiv: 2202.07617.
- [12] 张启宇. 基于混沌理论的微弱信号检测技术及研究[D]. 天津:河北工业大学, 2020.
- [13] HERNÁNDEZ S, SUÁREZ A. Analysis of super regenerative oscillators in nonlinear mode[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(6): 2247-2258.
- [14] LUCIO S, MIGUEL S. Noise analysis of super-regenerative oscillators in linear and nonlinear modes[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(12):1-11.
- [15] YANG Y F, XU J, KUANG Y, et al. Research of weak signal detection based on super-regenerative chaotic oscillator[J]. Electronics Letters,2021,58(5), DOI: 10.1049/ELL2.12402.
- [16] YANG C, WU C Q, ZHANG P. Estimation of Lyapunov exponents from a time series for n-dimensional state space using nonlinear mapping[J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 69(4):1493-1507.

作者简介

况昀,硕士研究生,主要研究方向为无线接收机、模拟集成电路。

E-mail:kuangyun1997@foxmail.com

徐建(通信作者),副教授,主要研究方向为移动通信 RF 无线接收前端集成电路和系统研究、物联网读卡器和标签射频电路和系统设计。

E-mail:xujian318@seu.edu.com