

基于混沌理论的无源互调功率预测研究

白春江 崔万照* 李 军

(中国空间技术研究院西安分院空间微波技术重点实验室 西安 710100)

摘 要: 该文以通信系统中常用的典型微波部件——同轴连接器为研究对象, 基于混沌理论对获得的同轴连接器的无源互调(PIM)功率时间序列进行分析, 验证了使用混沌理论预测无源互调的有效性。首先通过实验系统获得同轴连接器的3阶无源互调功率时间序列, 并对得到的实验数据进行相空间重构, 确定该时间序列的最佳嵌入维数 m 和延迟时间 τ 。然后, 结合最佳嵌入维数和延迟时间, 分别构建相图和使用小数据量法计算该时间序列的最大Lyapunov指数, 从而从定性和定量角度验证了该无源互调功率时间序列具有混沌特性。在此基础上, 基于获得的最大Lyapunov指数对该无源互调功率时间序列进行混沌预测, 在最大可预测尺度范围内, 理论预测值与实验值最大误差为2.61%, 表明采用混沌方法预测无源互调功率效果较好。该文提出的使用混沌理论预测通信系统中微波部件无源互调功率的方法, 为开展无源互调抑制技术研究, 提高通信系统的性能提供了新思路。

关键词: 无线通信; 无源互调; 混沌; Lyapunov指数; 相空间

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)01-0124-07

DOI: 10.11999/JEIT190977

Prediction of Passive Intermodulation Level Based on Chaos Method

BAI Chunjiang CUI Wanzhao LI Jun

(China Academy of Space Technology (Xi'an), National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an 710100, China)

Abstract: Passive InterModulation (PIM) products are spurious frequency signals which occur in microwave and radio frequency communication system. And it is noticed that PIM levels have the characteristic of changing with time. In order to find out the relationship between PIM level and time, as the typical microwave component which more often causes PIM in communication system, coaxial connector is chosen and analyzed using chaotic method. Firstly, the third order PIM level time series of coaxial connector is obtained by PIM measurement system. Based on the experimental data, the phase space is reconstructed and the optimal embedding dimension m and delay time τ are confirmed. Secondly, the largest Lyapunov exponent is calculated by the method named the small data sets with embedding dimension m and delay time τ . And from the qualitative and quantitative perspective, it is verified that the passive intermodulation level time series have the characteristic of chaos. Lastly, the prediction of PIM level with chaotic method is performed on the basis of the largest Lyapunov exponent. And the maximum error between the theoretical prediction value and the experimental value is 2.61% within the maximum predictable scale, indicating that the chaotic prediction is an effective way. The method that predicts the PIM level of microwave components in the communication system discussed in this paper provides a new way of studying the PIM mitigation technique for communication system and provides a new idea for improving the performance of the communication system.

Key words: Wireless communication; Passive InterModulation (PIM); Chaos; Lyapunov exponent; Phase space

1 引言

无源互调^[1-3](Passive InterModulation, PIM)

是指在大功率条件下, 当输入两个或者两个以上载波时, 由于微波部件的非线性导致载波信号相互调制, 产生新的载波频率落入接收通带内造成干扰的现象。正是由于微波部件的非线性, 通过微波部件的载波频率出现了多种不同的组合频率, 即不同阶数的互调。由于无源互调的功率随阶数的增加而减小, 因此较低阶互调如3阶和5阶更容易引起干扰。然而, 当通过微波部件的载波信号功率较大时, 一

收稿日期: 2019-12-05; 改回日期: 2020-10-18; 网络出版: 2020-11-19

*通信作者: 崔万照 cuiwanzhao@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(U1537211)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (U1537211)

些高阶互调的功率也会很大,足以引起严重干扰。在通信系统中,为了应对日趋紧张的频谱资源,提升系统通信容量,多载波或多系统共存现象将进一步增加。这就使得同一传输信道内会有多个不同频率的信号,这些基频信号由于各种非线性特性的影响而产生新的频率分量。如果这些互调信号恰好落在接收频段内,就会对通信系统产生干扰,进而降低传输系统的接收灵敏度,严重时导致通信系统崩溃。尤其,随着卫星通信技术的快速发展,空间通信系统对大功率发射和高灵敏度接收也提出了更高要求。因此,无论对于地面移动通信还是空间卫星通信,无源互调都是制约通信系统性能提高的亟待解决的关键问题之一。

目前,国际上普遍认为无源互调是由通信系统中无源微波部件的非线性^[4-10]特性引起的。有关无源互调的研究也多从其产生机理、预测分析、抑制方法、测量技术等方面展开。在无源互调预测分析方面,常用的方法有:等效电路法、幂级数法、MMicroscope法、Volterra级数法等。其中,代表性的研究有:西班牙的Vicente等人^[5]提出使用等效电路法分析预测矩形波导法兰连接结的无源互调。在此基础上,西安交通大学的Chen等人^[6]使用等效电路模型方法对同轴连接器的无源互调进行了预测分析。西安电子科技大学的张世全等人^[8]基于幂级数方法进行低阶无源互调功率预测高阶无源互调功率的研究,空军工程大学的王海宁等人^[9]提出使用IM Microscope方法预测无源互调功率。以上这些预测研究普遍认为,在输入条件不变的情况下,对于固定阶数的无源互调功率为一定值。然而,实际研究中发现,无源互调功率并非一个定值,而是随时间变化的。北京理工大学的田露^[10]基于Volterra级数法建立的无源互调预测模型中考虑到了时间因素,并进行了无源互调对消抑制技术研究,但Volterra级数法的准确性受到模型参数数量的影响,当参数数量增多时,计算过程也会变得极其复杂。同时,这些预测方法的共同点是,都需要通过已有数据建立相应的主观模型,并根据这些人为设定的主观模型进行预测。而混沌方法不用预先建立主观模型,只是根据数据本身的特性规律进行预测,这样就解决了由于人为主观建模导致模型的不准确,以至造成预测的误差,达到完全用客观数据预测时的可信度。

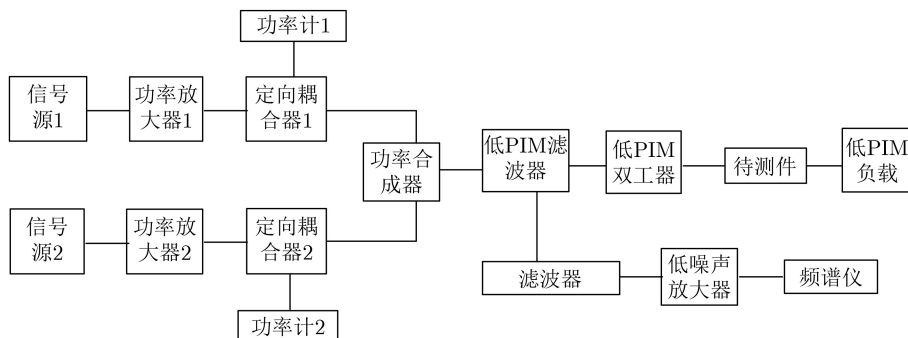
混沌^[11-13]是研究系统非线性的一种有效方法,它是指在确定性系统中出现的一种貌似无规则的、类似随机的现象,是非线性系统的一种新的存在形式,并且已在多个领域得到广泛应用。其中,混沌

电路的研究实现了对复杂非线性现象和混沌理论从数学模型到硬件电路研究的转变,为混沌通信的研究和应用奠定了基础。利用混沌信号类随机性、连续宽带功率谱特性,研究人员将混沌应用于通信系统中的多路接入技术、数据加密、编码方法、调制技术等^[14,15]多个层次,获得比传统通信更好的通信性能。由于产生无源互调的根源是微波部件的非线性,因此可以将该微波部件看作一个非线性系统来处理。基于此,本文拟从非线性系统的整体角度出发,研究无源互调功率与时间的关系。以通信系统中最常用的同轴连接器作为待研究的典型微波部件,以通信系统中最常见的3阶无源互调为分析对象,通过实验方法得到其3阶无源互调功率随时间的变化关系,获得的实验数据可以看作无源互调功率的时间序列。基于获得的无源互调功率时间序列,分别从定性和定量角度对其进行混沌特性识别。在验证了无源互调功率时间序列具有混沌特性的基础上,基于最大Lyapunov指数^[16-18]方法对无源互调功率时间序列进行预测分析研究。

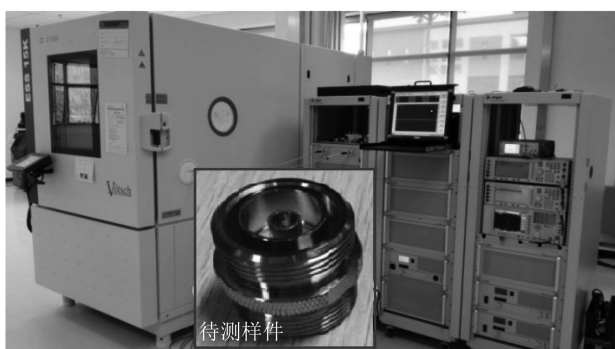
2 PIM功率时间序列

由于通过微波部件的载波信号都是随时间变化的,因此由这些载波信号经过微波部件的非线性调制而产生的不同阶数的PIM信号也是随时间变化的。研究发现,当输入条件固定时,对确定阶数的PIM信号,PIM功率并不是一个恒定值,而是随时间变化的。因此,PIM功率具有时间特性。如果将随时间变化的PIM功率看作时间序列,则该时间序列不仅包含该微波部件过去的PIM信息,还包含了PIM演化的大量信息。

为了获得PIM功率时间序列,本文搭建了一个S频段的PIM测试系统(如图1所示)。该测试系统的发射通带为2.16~2.21 GHz,灵敏度达到-160 dBm/Hz,可对3~15阶的PIM功率进行测量。待测件端口的最大功率可达200 W,可以满足不同输入功率条件下的PIM特性研究。鉴于同轴连接器是通信系统中最常用的典型微波部件,因此,本文以DIN(7/16)型同轴连接器作为产生PIM的源,以通信系统中最为关注的3阶PIM为研究对象,研究PIM功率与时间的依赖关系。实验过程中的输入信号频率分别为2.16 GHz和2.21 GHz,输入功率均为20 W,实验测试数据为3阶PIM功率。测试过程中,记录采集前5000 s的3阶PIM功率,测试结果如图2所示,该结果即为PIM功率的时间序列。从图2可以看出,PIM功率的变化具有时变性,同时也具有一定的随机性和不确定性。如果能



(a) 测试原理图



(b) 测试系统

图1 PIM测试系统及待测样件

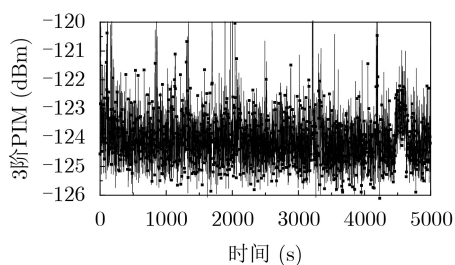


图2 3阶PIM功率时间序列

够证明该时间序列具有混沌特性，则可以运用混沌方法对PIM功率进行预测分析。

3 PIM功率时间序列混沌特性识别

使用混沌方法对PIM功率时间序列进行分析研究之前，需要先判断该时间序列是否具有混沌特性。判断一个系统的动态行为是否混沌，就是判断该系统是否具有混沌吸引子。定性分析方法主要是根据时间序列在时域或频域内表现出的特殊性质对序列的主要特征进行粗略分析。常用的有相图法、功率谱法、庞加莱截面法和代替数据法等。定量分析的方法主要是对描述混沌系统的重要特性指标包括关联维数、最大Lyapunov指数和Kolmogorov熵等特性指标定量分析，从而进行混沌识别。本文分别选用相图法和最大Lyapunov指数法，从定性和定量角度对PIM功率时间序列进行混沌识别。

3.1 确定嵌入维数和延迟时间

3.1.1 相空间重构理论

通常对于大多数实际工程问题来说，并不知道其具体的数学模型，能获得的信息也比较有限，一般只能获得1维的时间序列信号。为了从一个变量时间序列获得其他变量的信息，有研究人员提出时间延迟坐标的思想，重构出观测到的动力学系统的相空间。由于相空间重构^[19-21]的结果可以保留原系统的动力学性质和几何性质，因此，相空间重构是非线性时间序列分析的重要步骤。其具体原理如下。

假设时间序列为 $\{x(t_i), i=1, 2, \dots, N\}$ ，其采样时间间隔为 Δt 。通过时间延迟可构成 m 维的向量： $\mathbf{X}(t_i) = (x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau))$ ， $i=1, 2, \dots, M$ ，其中 m 表示嵌入维数， τ 表示时间延迟， $\mathbf{X}(t_i)$ 为 m 维相空间中的相点， M 为相点个数，且有 $M = N - (m-1)\tau$ 得到的集合 $\{\mathbf{X}(t_i), i=1, 2, \dots, M\}$ 描述了系统在相空间中的演化轨迹。只要 m, τ 选择合适，重构的相空间与原系统就具有相同的拓扑性质。因此，如何确定时间序列恰当的 m 和 τ ，对时间序列的研究至关重要。

3.1.2 C-C方法确定嵌入维数和延迟时间

关于延迟时间 τ 和最佳嵌入维数 m 的确定方法，国内外研究人员已经进行了大量的研究。本文

选用C-C方法对PIM功率时间序列进行分析。C-C方法是由Kim等人^[21]提出的，其优点在于可通过关联积分对时间延迟 τ 和延迟时间窗口 τ_W 进行同时估算。具体步骤为

依据重建的相空间中的相点，

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t) &= \{x(t), x(t+\tau), \dots, x[t+(m-1)\tau]\}, \\ t &= 1, 2, \dots, M, M=N-(m-1)\tau \end{aligned} \quad (1)$$

获得嵌入时间序列的关联积分为

$$C(m, N, r, t) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{1 \leq i < j < M} \theta(r - d_{ij}), r > 0 \quad (2)$$

其中， m 为嵌入维数， N 是时间序列的数据个数， r 为计算中所取的搜索半径， θ 为Heaviside函数

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$d_{ij} = \|x_i - x_j\|_{(\infty)}$ 表示 ∞ -范数。该关联积分表示相空间中任意两点之间距离小于 r 的概率。此处，点与点之间的距离用矢量之差的 ∞ -范数表示。

定义序列 $x = \{x_i\}$ 的检验统计量为

$$S(m, N, r, t) = C(m, N, r, t) - C^m(m, N, r, t) \quad (4)$$

将时间序列平均分成 t 个互不相交的子序列，即有

$$\left. \begin{aligned} x(1) &= \{x_1, x_{t+1}, \dots, x_{[N/t]-t+1}\} \\ x(2) &= \{x_1, x_{t+2}, \dots, x_{[N/t]-t+2}\} \\ &\vdots \\ x(t) &= \{x_t, x_{t+t}, \dots, x_{[N/t]}\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据式(4)，有

$$S_1(m, r, t) = \frac{1}{t} \sum_{s=1}^t [C_s(m, r, t) - C_s^m(1, r, t)] \quad (6)$$

$S_1(m, r, t) \sim t$ 反映了时间序列的自相关特性。选择最大和最小的两个半径 r ，并定义差量

$$\Delta S_1(m, t) = \max \{S_1(m, r_i, t)\} - \min \{S_1(m, r_i, t)\} \quad (7)$$

$\Delta S_1(m, t)$ 表示 $S_1(m, r, t) \sim t$ 对所有半径 r 的最大偏差。进而得到计算公式^[16]

$$\overline{S}_1(t) = \frac{1}{16} \sum_{m=1}^4 \sum_{i=1}^4 S_1(m, r_i, t) \quad (8)$$

$$\Delta \overline{S}_1(t) = \frac{1}{4} \sum_{m=1}^4 \Delta S_1(m, t) \quad (9)$$

因此，最优时间延迟 τ ，即为 $\overline{S}_1(t) \sim t$ 的第1个零点(见图3(a))或 $\Delta \overline{S}_1(t) \sim t$ 的第1个局部极小值点(见图3(b))，其表示重构吸引子轨道在相空间完全展开。综合考虑 $\overline{S}_1(t)$ 与 $\Delta \overline{S}_1(t)$ ，定义

$$S_{1_cor}(t) = \Delta \overline{S}_1(t) + |\overline{S}_1(t)| \quad (10)$$

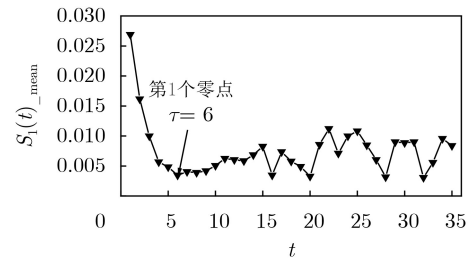
$S_{1_cor}(t) \sim t$ 的全局最小点即为最优延迟时间窗口 τ_W (见图3(c))，其表示了平均轨道周期的最优估计。

本文使用C-C方法对获得的同轴连接器的3阶PIM功率时间序列进行分析，其计算过程如图3所示。从图3(a)和图3(b)可以看出，第1个零点和第1个极小值点的位置都在时间点为 $\tau=6$ ，因此可知最佳延迟时间 τ 为6。从图3(c)可以看到，全局极小值在时间为20处取得，因此最优延迟时间窗口 τ_W 为20。根据公式 $\tau_W = (m-1)\tau$ ，可得嵌入维数 $m \approx 4$ 。

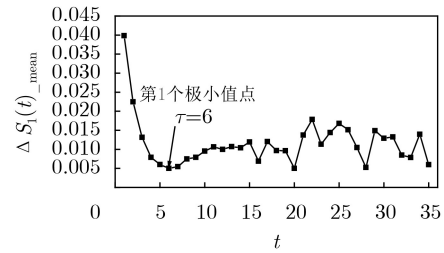
3.2 混沌特性识别

3.2.1 相图法

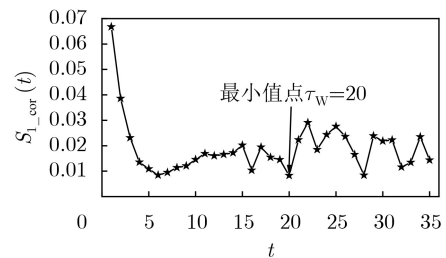
相图法将通过绘制相空间重构后点的轨迹分布规律作为混沌特性判断的依据。如果所分析的时间序列具有混沌特性，则系统的相空间轨迹通常表现为在有限空间内不断伸长和折叠形成的回复性永不相交的非周期运动，该运动不同于毫无规律的随机运动，但也不是周期函数的重复性运动，即相图出现混沌吸引子。由于该方法具有简单、直观的特性，已广泛用于系统混沌特性的识别中。图4为基于本文研究的同轴连接器的3阶PIM功率时间序列



(a) 寻找 $\overline{S}_1(t)$ 的第1个零点



(b) 寻找 $\Delta \overline{S}_1(t)$ 的第1个极小值点



(c) 寻找的 $S_{1_cor}(t)$ 最小值

图3 C-C方法计算的最优时间延迟和最优延迟时间窗口

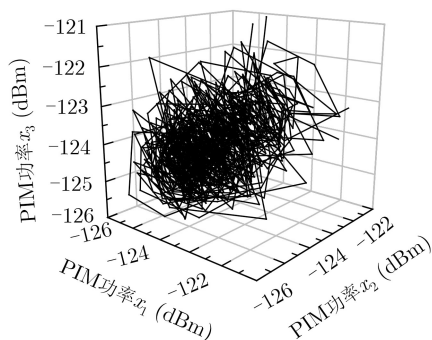


图4 PIM功率时间序列3维相空间图

而建立的相空间重构的3个分量构成的3维相图。从图中可以看出，相点的轨迹并不是杂乱无章的，存在混沌吸引子，从而表明了PIM功率时间序列具有混沌特性。

3.2.2 最大Lyapunov指数法

Lyapunov指数表征了混沌系统相空间中两条相邻轨迹之间收敛或者发散的指数率，是宏观层次上对混沌吸引子的一个表述，也是定量判断一个系统是否具有混沌特性的重要指标。如果所研究的时间序列的最大Lyapunov指数大于0，则证明该时间序列具有混沌特性。并且，Lyapunov指数越大，说明混沌特性越明显，即混沌程度越高。目前，用于计算最大Lyapunov指数的常用方法有定义法、wolf法、正交法和小数据量法。本文选用小数据量法进行求解，其计算原理如下。

假定已知混沌时间序列重构后的相空间由式(1)所示，通过欧氏距离最小值求得给定点上各个点的最相邻点

$$d_t(0) = \min_{x(\hat{t})} \|X(t) - X(\hat{t})\|, |t - \hat{t}| > T_m \quad (11)$$

其中， $\hat{t}=1, 2, \dots, M$ ，且 $t \neq \hat{t}$ ， $X(t)$ 为相空间中的任意一点， T_m 为时间序列的平均周期， $d_t(0)$ 表示一组最近邻域值在初始时的欧氏距离。

应用邻近点的发散的平均值来预估最大Lyapunov指数为

$$\lambda_1(i) = \frac{1}{i\Delta t} \frac{1}{(M-t)} \sum_{t=1}^{M-i} \ln \frac{d_t(i)}{d_t(0)} \quad (12)$$

其中， Δt 表示样本周期， i 为离散时间， $d_t(i)$ 表示在经过 i 段时间步长后两邻近点之间演化的距离值。结合Sato等人^[18]的估计式有

$$d_t(i) = C_t e^{\lambda_1(i\Delta t)}, \quad C_t = d_t(0) \quad (13)$$

对式(13)进行化简

$$\ln d_t(i) = \ln C_t + \lambda_1(i\Delta t), \quad t = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

由式(14)可得直线的斜率值就是 λ_1 的数值。采用最小平方方法，求出相应的回归直线的斜率值，即

$$y(i) = \frac{1}{\Delta t} \frac{1}{q} \sum_{t=1}^q \ln d_t(i) \quad (15)$$

其中， q 为 $d_t(i)$ 的个数。

通过对本文获得的同轴连接器的3阶PIM功率时间序列，使用小数据量法进行分析(计算结果如图5所示)，可得其最大Lyapunov指数为0.0075。根据混沌序列的判定标准，由于分析的PIM功率的时间序列的最大Lyapunov指数大于0，因此，该时间序列具有混沌特性。

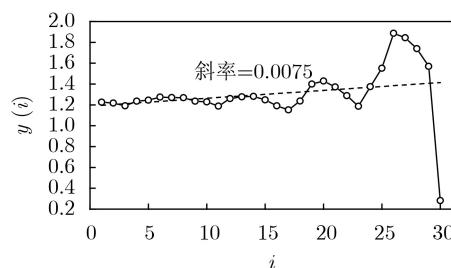


图5 小数据量法计算的最大Lyapunov指数

4 基于最大Lyapunov指数的PIM功率时间序列预测

经过前面的分析可知本文研究的同轴连接器的3阶PIM功率时间序列具有混沌特性。下面将结合获得的最大Lyapunov指数，对该时间序列进行进一步的PIM预测^[22,23]研究。

假定时间序列的最大Lyapunov指数为 λ_1 ， Y_M 为预测的中心点， Y_M 的最近临近点为 Y_K ，两者之间的欧氏距离为 $d_M(0)$ ，则有

$$d_M(0) = \min_j \|Y_M - Y_j\| = \|Y_M - Y_K\| \quad (16)$$

Y_M 和 Y_K 经一步演化后分别成为 Y_{M+1} 和 Y_{K+1} ，根据最大Lyapunov指数的物理含义，有

$$\|Y_{M+1} - Y_{K+1}\| = e^{\lambda_1} \|Y_M - Y_K\| \quad (17)$$

Y_M, Y_K, Y_{K+1} 是相空间中的点， Y_{M+1} 中只有1个要预测的PIM功率是未知的，设为 $Y_{M+1,m}$ ，令

$$M_1 = \sum_{j=1}^m [y_M(j) - y_K(j)]^2 \cdot e^{2\lambda_1} \quad (18)$$

$$M_2 = \sum_{j=1}^m [y_{M+1}(j) - y_{K+1}(j)]^2$$

则有

$$x(N+1) = y_{M+1,m} = y_{K+1,m} \pm \sqrt{M_1 - M_2} \quad (19)$$

图6为基于最大Lyapunov指数得到的PIM功率预测结果。图中对原时间序列的5000 s之后的100 s的PIM功率进行预测。从图中可以看出，理论预测值与实验值吻合很好，其最大误差为2.61%。

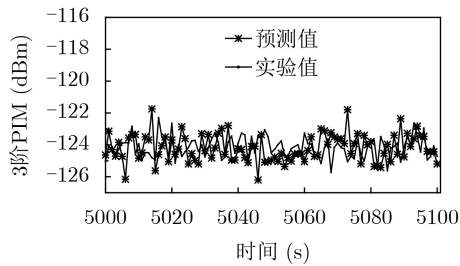


图6 前100 s的预测结果

图7为对原时间序列的5000 s之后的200 s的PIM功率的预测结果。从图中可以看出,理论预测值与实验值在前137个点吻合很好,误差较小且稳定,而在138 s之后误差变大,最大误差为6.71%。这是因为混沌时间序列分析存在最大可预测尺度,其定义为

$$T_{\max}=1/\lambda_1 \quad (20)$$

从式(20)可知, λ_1 越大,最大可预测尺度越小,即混沌特性越明显,可准确预测的点的个数就越少。通过式(20)计算得到本文分析PIM功率时间序列的最大可预测尺度为 $T_{\max}=1/0.0075=133.33$ 。也就是说,该PIM功率时间序列的预测只在前134个点具有较好的预测结果,该结论与图7的分析结果基本一致。

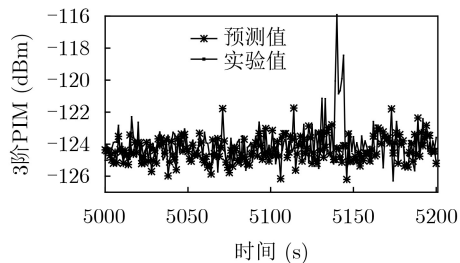


图7 前200 s的预测结果

5 结束语

无源互调是影响通信系统性能的重要因素,而微波部件自身的非线性特性是导致通信系统产生无源互调的根源。鉴于混沌是研究系统非线性的一种有效方法,并且在研究中发现,无源互调也具有混沌特征。因此,本文以通信系统中的典型微波部件——同轴连接器为对象,以通信系统中最常见的3阶无源互调为分析对象,验证微波部件无源互调的混沌特性,并基于混沌理论进行无源互调功率预测。首先,通过实验系统测试得到同轴连接器的3阶无源互调,获得无源互调功率时间序列。其次,通过相图法和最大Lyapunov指数法,分别从定性和定量角度验证了无源互调功率时间序列具有混沌特性。最后,基于最大Lyapunov指数法,对

不同时间的无源互调功率进行预测。通过实验对比可知,在最大可预测尺度范围内,预测结果与实验结果吻合较好,最大误差为2.61%。在最大可预测尺度范围外,则会产生较大误差。本文所讨论的无源互调功率预测方法,对研究无源互调功率与时间的关系,以及为开展无源互调的抑制技术研究提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] LUI P L. Passive intermodulation interference in communication systems[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1990, 2(3): 109–118.
- [2] 张世全, 傅德民, 葛德彪. 无源互调干扰对通信系统抗噪声性能的影响[J]. *电波科学学报*, 2002, 17(2): 138–142. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2002.02.009.
- [3] ZHANG Shiquan, FU Demin, and GE Debiao. The effects of passive intermodulation interference on the anti-noise property of communications systems[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2002, 17(2): 138–142. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2002.02.009.
- [4] BOYHAN J W, HENZING H F, and KODURU C. Satellite passive intermodulation: Systems considerations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(3): 1058–1064. doi: 10.1109/7.532264.
- [5] ZHAO Xiaolong, HE Yongning, YE Ming, et al. Analytic passive intermodulation model for flange connection based on metallic contact nonlinearity approximation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(7): 2279–2287. doi: 10.1109/TMTT.2017.2668402.
- [6] VICENTE C and HARTNAGEL H L. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(8): 2515–2525. doi: 10.1109/TMTT.2005.852771.
- [7] CHEN Xiong, HE Yongning, YANG Sen, et al. Analytic passive intermodulation behavior on the coaxial connector using monte carlo approximation[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(5): 1207–1214. doi: 10.1109/TEM.2018.2809449.
- [8] ZHANG Kai, LI Tuanjie, and JIANG Jie. Passive intermodulation of contact nonlinearity on microwave connectors[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(2): 513–519. doi: 10.1109/TEM.2017.2725278.
- [9] 张世全, 葛德彪. 通信系统无源非线性引起的互调干扰[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(1): 58–62. doi: 10.3321/j.issn:1672-4291.2004.01.016.
- [10] ZHANG Shiquan and GE Debiao. Intermodulation interference due to passive nonlinearity in communication

- systems[J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2004, 32(1): 58–62. doi: [10.3321/j.issn:1672-4291.2004.01.016](https://doi.org/10.3321/j.issn:1672-4291.2004.01.016).
- [9] 王海宁, 梁建刚, 王积勤, 等. 高功率微波条件下的无源互调问题综述[J]. 微波学报, 2005, 21(S1): 1–6. doi: [10.3969/j.issn.1005-6122.2005.z1.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6122.2005.z1.001).
- WANG Haining, LIANG Jiangang, WANG Jiqin, *et al.* Review of passive intermodulation in HPM condition[J]. *Journal of Microwaves*, 2005, 21(S1): 1–6. doi: [10.3969/j.issn.1005-6122.2005.z1.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-6122.2005.z1.001).
- [10] 田露. 星上无源互调干扰数字抑制技术研究[D]. [博士论文], 北京理工大学, 2017.
- TIAN Lu. Digital suppression technique of passive intermodulation interference for satellite systems[D]. [Ph. D. dissertation], Beijing Institute of Technology, 2017.
- [11] 李玲玲, 马东娟, 李志刚. 触点动态接触电阻时间序列混沌预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 187–193. doi: [10.3969/j.issn.1000-6753.2014.09.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2014.09.027).
- LI Lingling, MA Dongjuan, and LI Zhigang. Chaotic predication of dynamic contact resistance times series on contacts[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(9): 187–193. doi: [10.3969/j.issn.1000-6753.2014.09.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6753.2014.09.027).
- [12] 曾以成, 成德武, 谭其威. 简洁无电感忆阻混沌电路及其特性[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(4): 862–869. doi: [10.11999/JEIT190859](https://doi.org/10.11999/JEIT190859).
- ZENG Yicheng, CHENG Dewu, and TAN Qiwei. A simple inductor-free memristive chaotic circuit and its characteristics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(4): 862–869. doi: [10.11999/JEIT190859](https://doi.org/10.11999/JEIT190859).
- [13] 睦萍, 郭英, 李红光, 等. 基于混沌吸引子重构和Low-rank聚类的跳频信号电台分选[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(12): 2965–2971. doi: [10.11999/JEIT180947](https://doi.org/10.11999/JEIT180947).
- SUI Ping, GUO Ying, LI Hongguang, *et al.* Frequency-hopping transmitter classification based on chaotic attractor reconstruction and low-rank clustering[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(12): 2965–2971. doi: [10.11999/JEIT180947](https://doi.org/10.11999/JEIT180947).
- [14] MAZZINI G, SETTI G, and ROVATTI R. Chaotic complex spreading sequences for asynchronous DS-CDMA. I. System modeling and results[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1997, 44(10): 937–947. doi: [10.1109/81.633883](https://doi.org/10.1109/81.633883).
- [15] SCHIMMING T and HASLER M. Chaos communication in the presence of channel noise[J]. *Journal of Signal Process*, 2000, 4(1): 21–28.
- [16] ROSENSTEIN M T, COLLINS J J, and DE LUCA C J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets[J]. *Physica D*, 1993, 65(1/2): 117–134. doi: [10.1016/0167-2789\(93\)90009-P](https://doi.org/10.1016/0167-2789(93)90009-P).
- [17] WOLF A, SWIFT J B, SWINNEY H L, *et al.* Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1985, 16(3): 285–317. doi: [10.1016/0167-2789\(85\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90011-9).
- [18] SATO S, SANO M, and SAWADA Y. Practical methods of measuring the generalized dimension and the largest Lyapunov exponent in high dimensional chaotic systems[J]. *Progress of Theoretical Physics*, 1987, 77(1): 1–5. doi: [10.1143/ptp.77.1](https://doi.org/10.1143/ptp.77.1).
- [19] ZHANG Jun, LAM K C, YAN W J, *et al.* Time series prediction using Lyapunov exponents in embedding phase space[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2004, 30(1): 1–15. doi: [10.1016/S0045-7906\(03\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7906(03)00015-6).
- [20] CAO Liangyue. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1997, 110(1/2): 43–50. doi: [10.1016/S0167-2789\(97\)00118-8](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(97)00118-8).
- [21] KIM H S, EYKHOLT R, and SALAS J D. Nonlinear dynamics, delay times, and embedding windows[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1999, 127(1/2): 48–60. doi: [10.1016/S0167-2789\(98\)00240-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(98)00240-1).
- [22] 龚祝平. 混沌时间序列的平均周期计算方法[J]. 系统工程, 2010, 28(12): 111–113.
- GONG Zhuping. The calculating method of the average period of chaotic time series[J]. *Systems Engineering*, 2010, 28(12): 111–113.
- [23] 张春涛, 刘学飞, 向瑞银, 等. 基于最大互信息的混沌时间序列多步预测[J]. 控制与决策, 2012, 27(6): 941–944.
- ZHANG Chuntao, LIU Xuefei, XIANG Ruiyin, *et al.* Multi-step-prediction of chaotic time series based on maximized mutual information[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(6): 941–944.
- 白春江: 男, 1984年生, 高级工程师, 主要研究方向为空间微波特殊效应.
- 崔万照: 男, 1975年生, 研究员, 主要研究方向为空间微波特殊效应.
- 李 军: 男, 1968年生, 研究员, 主要研究方向为大功率微波无源器件.

责任编辑: 马秀强