

双频测试信号源谐波影响分析*

方泽邈^{1,2} 郭恩全^{1,2} 肖宁^{1,2} 汤兴刚² 周开基²

(1. 中国船舶重工集团第705研究所 西安 710075; 2. 陕西海泰电子有限责任公司 西安 710075)

摘要:双频自动测试技术能够快速检测与识别接收机所有的信号通道和干扰路径,获取接收机的非线性响应特性,可对无线电接收机的电磁环境适应性做全面的评估,但其测试结果会受到信号源谐波的影响,使得对接收机的评价与实际偏离。为确保测试结果可靠,需要对信号源谐波抑制制度指标提出合理要求。通过对接收机响应进行数学推导和仿真,分析了信号源谐波的影响,给出并验证了双频自动测试系统应如何对信号源谐波抑制制度进行选择,即对一般的接收机,进行双频自动测试识别接收机的信号通道和干扰路径时,保守情况下信号源谐波抑制制度应优于 -60 dBc。

关键词:双频自动测试技术;接收机;谐波;双频图识别

中图分类号: TN85 TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510

Analysis of signal source harmonic's influence to double-frequency test

Fang Zemiao^{1,2} Guo Enquan^{1,2} Xiao Ning^{1,2} Tang Xinggang² Zhou Kaiji²

(1. The 705 Research Institute of CISC, Xi'an 710075, China; 2. Shaanxi Hitech Electronic Co. Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Double-Frequency Automated Test Technique can detect and identify all receive channels and interference paths of receivers rapidly, obtain nonlinear response characteristics of receivers, and estimate electromagnetic environment adaptability of receivers thoroughly. But the test result would be influenced by harmonics of signal sources, which makes estimation to the receivers different from the truth. To ensure reliability of the test result, it is necessary to set reasonable requirement for signal sources' harmonic suppression. By mathematical deduction and simulation of receivers' responses, this paper analyzes the influence of signal sources' harmonics, proposes and verifies how to choose harmonic suppression of signal source when constructing Double-Frequency Automated Test System. That is, for general receivers, harmonic suppression of signal source should be better than -60 dBc for the worst case to identify receivers' receive channels and interference paths while using Double-Frequency Automated Test.

Keywords: double-frequency automated test technique; receiver; harmonic; double-frequency diagram identification

1 引言

接收机是一种电磁敏感设备,其作为电子信息系统的前端设备,极易在战场复杂电磁环境下产生非线性响应,导致接收系统中出现大量虚假响应,从而降低整个电子信息系统的作战效能。接收机非线性响应是由其内部器件的非线性特性在一定强度信号作用下产生的^[1],对于一台模拟接收机或一台半数字化接收机的模拟部分,由于器件本身的原因,非线性失真是不可能完全消除的。且器件之间的非线性特性各异,导致接收机的非线性响应难以通过理论解析得到^[2-3]。在实际工程应用中,需要通过测试接

收机非线性响应来评价接收机的电磁兼容特性^[4-5]。因此,对接收机非线性响应进行测试,掌握接收机非线性响应特性,是评估接收系统电磁兼容性的关键内容之一。

对于接收机非线性响应的测试,目前国内外多采用标准给定的测试方法。在 GJB1143 及 GJB151B 中,虽然规定了一些对于接收机非线性效应的敏感度测试方法,但这些测试标准一方面缺乏快速测试的手段,另一方面只能逐项测出接收机的部分非线性响应是否满足要求,无法全面快速地获取接收机的非线性响应特性。

双频自动测试技术可以获得测量频段内所有的非线性响应,检测并识别所有的信号通道和干扰路径。双频自

收稿日期:2016-09

* 基金项目:国家国际科技合作专项(2015DFR10170)资助

动测试在测试时所需信号源输出功率较高,在信号源输出大信号时,同时将不可避免地输出一定的谐波,而信号源后外加滤波器给双频自动测试系统设计、使用带来不便,因此需要对信号源谐波对双频测试的影响进行分析。本文旨在通过数学与仿真分析,获得信号源谐波对双频自动测试造成的影响。

2 双频自动测试技术

近年来,在传统的多音测量技术基础上发展起来一种新的接收机非线性响应特性测试技术——双频自动测试技术^[6]。

不同于以往的双音及多音测试,双频测试技术可以测量待测频段内所有的非线性响应,检测并识别所有的信号通道和干扰路径,可以实现对接收机非线性响应特性全面的测试和表征。执行双频自动测试的双频自动测试系统有如图1所示的基本结构^[7]。

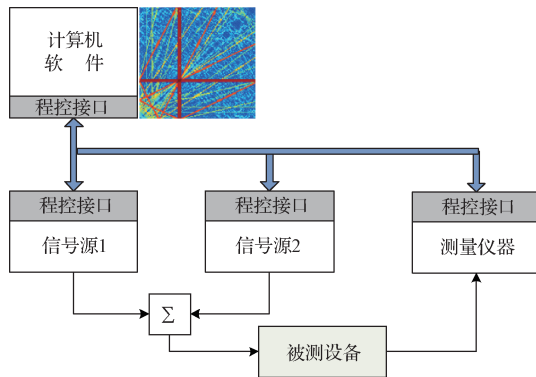


图1 双频自动测试系统基本组成

测试信号由两台信号源输出的单频信号通过功率合成器合成产生,两台信号源以不同的速率进行频率扫描。其中一台信号源为快速扫描方式,扫描的频率范围为 $f_{1min} \sim f_{1max}$;另一台信号源为慢速扫描方式,扫描的频率范围为 $f_{2min} \sim f_{2max}$ 。慢扫信号源扫描一次,快扫信号源扫描 n 次。若 f_{2step} 为慢扫描信号源的扫描步进,则^[8-9]:

$$n = \frac{f_{2max} - f_{2min}}{f_{2step}} \quad (1)$$

即,在慢扫信号源的每一个驻留频点,快扫信号源都要在 $f_{1min} \sim f_{1max}$ 之间扫描一次。两台信号源的扫描方式如图2所示。以这种扫频方式穷举了待测频段内所有双频率的组合,从而能够检测出接收机可能产生的所有非线性响应。

根据双频测试得到的结果可以生成三维或二维的双频图,其中三维双频图(DFC)是根据两个信号源的频率以及被测设备输出电平形成的三维图像,横纵轴表示输入频率 f_1 和 f_2 ,高度表示对应输入下的输出电平,如图3所示。

三维双频图表示的是被测设备的双频响应特性^[10]:

$$H(f_1, f_2) = U_{out} \left(f_1, f_2 \left| \begin{array}{l} U_{1m} = \text{const} \\ U_{2m} = \text{const} \end{array} \right. \right) \quad (2)$$

式中: U_{out} 为输出信号电平; U_{1m} 、 U_{2m} 分别为输入信号 f_1 、

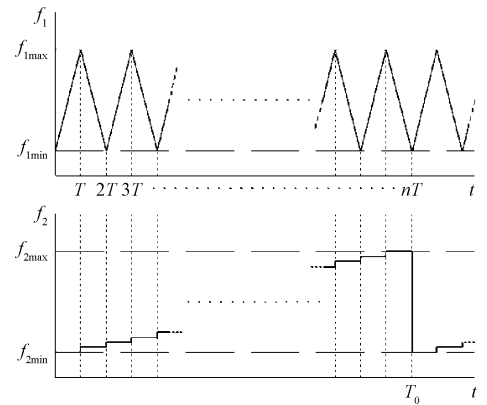
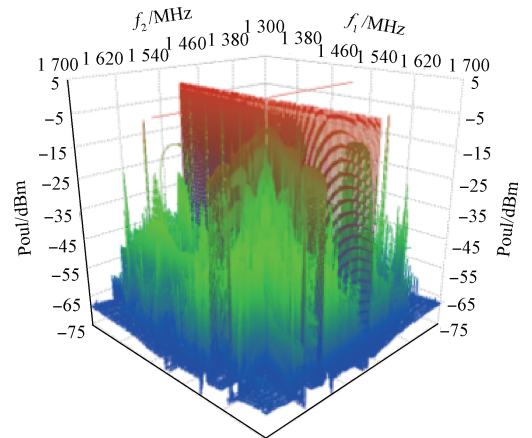
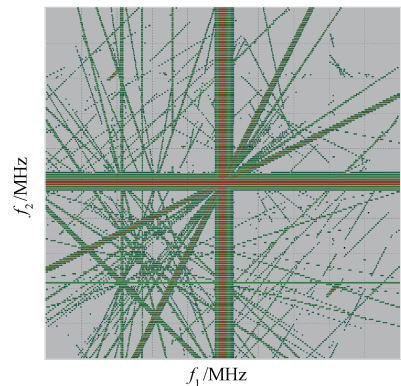


图2 双频测试两输入信号扫描速率



(a) 三维双频图



(b) 二维双频图

图3 双频测试得到的三维以及二维双频图

f_2 的电平。

二维双频图(DFD)则是用不同的输出门限对三维双频图截取,如式(3)所示,截取结果在以 $\{f_1, f_2\}$ 为坐标轴的直角坐标系中的表现如图3所示。

$$W_i(f_1, f_2 | U_{in}) = \text{sgn}(H(f_1, f_2) - U_{in}) \quad (3)$$

式中: $U_{in}, i = 1, 2, \dots$ 为指定的门限值; $\text{sgn}()$ 为符号函数。

二维双频图上呈现出的一条条直线,代表了不同阶次与类型的响应,体现了接收机各响应路径和通道。

由于接收机最终输出应在中频段内,故对于一个接收

机,其能够接收到的信号应满足的频率条件方程如式(4)所示:

$$\begin{cases} k_1 f_1 + k_2 f_2 = k_{LO1} f_{LO1} + k_{LO2} f_{LO2} + \dots + k_{LOn} f_{LOn} + k_{IF} f_{IF} \\ k_1, k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; k_{LO1}, k_{LO2}, \dots, \\ k_{LOn} = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; k_{IF} = \pm 1 \\ K = |k_1| + |k_2|; K \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_1, k_2 为两输入测试信号的谐波次数; n 为接收机变频次数; f_{IF} 为最终输出中频频率; k_{IF} 为变频类型; f_{LOi} 为第 i 级本振频率; k_{LOi} 为第 i 级本振的谐波次数; K 为响应的阶次($K=1$ 表示线性响应, $K>1$ 表示非线性响应); 等式的右边表示不同的通道, 等式左边不同 k_1, k_2 的组合表示了不同的响应路径。

各门限值下获得的二维双频图, 图中所呈现出的响应线, 都应满足(4)式, 故对二维双频图上直线进行识别可以获得接收机各响应的响应类型、响应阶次、响应路径和通道。

3 信号源谐波影响分析

3.1 接收机数学描述

由接收机组成可知, 接收机的非线性主要由其内部非线性器件(混频器、放大器)引起。于是, 接收机模型可以简化表示成滤波器-非线性单元-滤波器的结构, 如图4所示^[11-13]。

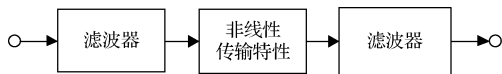


图4 接收机模型

接收机的非线性传输特性虽然无法用解析公式表述, 但其仍然是一个关于输入、输出的函数。函数可以幂级数展开, 即用幂级数和来逼近所关心的函数。于是, 接收机的非线性输入-输出特性将呈现出式(5)的幂级数形式:

$$V_{out} = f(V_{in}) = a_0 + a_1 V_{in} + a_2 V_{in}^2 + \dots + a_n V_{in}^n + \dots \quad (5)$$

该式在时域上描述了接收机的非线性传输特性, 接收机的非线性完全是由传输特性展开式的 a_n ($n=2, 3, 4, \dots$) 不为0引起的。

3.2 信号源谐波对测试的影响

理想的双频输入信号为: $V_{in} = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t)$, 则由式(5)推导得到输出为:

$$V_{out} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} q_n = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n A^n \sum_{k=0}^n \sum_{j=0}^{i \leq k/2} \binom{n-k}{j} \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1+\lfloor \frac{2j}{k} \rfloor} \times \left[\frac{2j}{n-k}\right] \cdot C_n^k C_k^j C_{n-k}^j \cos((k-2i)\omega_1 t \pm (n-k-2j)\omega_2 t) \quad (6)$$

式中: C_n^k 表示组合数; $\lfloor * \rfloor$ 表示截断取整运算。

当两个信号源输出中含有谐波时, 若只考虑到二次谐波, 则双频测试时实际输入到被测设备中的信号为 $V_{in} =$

$A_1 (\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t) + A_2 (\cos 2\omega_1 t + \cos 2\omega_2 t)$, 则由式(5)推导得到输出为:

$$V_{out} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sum_{k_1=0}^n \sum_{k_2=0}^{n-k_1} \sum_{k_3=0}^{n-k_1-k_2} \sum_{l_1=0}^{n-k_1-k_2-k_3} \sum_{l_2=0}^{n-k_1-k_2-k_3-l_1} \sum_{l_3=0}^{n-k_1-k_2-k_3-l_1-l_2} \sum_{l_4=0}^{n-k_1-k_2-k_3-l_1-l_2-l_3} \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1+\lfloor \frac{2l_1}{k_1} \rfloor} \times \left[\frac{2l_2}{k_2}\right] \times \left[\frac{2l_3}{k_3}\right] \times \left[\frac{2l_4}{k_4}\right] C_n^{k_1} C_{k_1}^{k_2} C_{k_2}^{k_3} C_{k_3}^{k_4} \cdot C_n^{k_1} C_{k_1}^{k_2} C_{k_2}^{k_3} C_{k_3}^{k_4} \cdot \cos((k_1-2l_1)\omega_1 \pm (k_2-2l_2)\omega_2 \pm 2(k_3-2l_3)\omega_1 \pm 2(k_4-2l_4)\omega_2) t \quad (7)$$

式中: $k_1 = n - k_1 - k_2 - k_3$ 。

若只考虑到3阶即 $n \leq 3$, 那么信号源无谐波和信号源有二次谐波的接收机输出及输出差异如表1所示。

表1 信号源无谐波与信号源有二次谐波接收机输出差异

频率、项目	信号源无谐波	信号源有二次谐波
0(直流分量)	$a_0 + a_2 A_1^2$	$a_0 + a_2 A_1^2 + a_2 A_2^2 + \frac{3}{2} a_3 A_1^2 A_2$
ω_1, ω_2	$a_1 A_1 + \frac{9}{4} a_3 A_1^3$	$a_1 A_1 + a_2 A_1 A_2 + \frac{9}{4} a_3 A_1^3 + 3 a_3 A_1 A_2^2$
$2\omega_1, 2\omega_2$	$\frac{1}{2} a_2 A_1^2$	$a_1 A_2 + \frac{1}{2} a_2 A_1^2 + \frac{9}{4} a_3 A_2^3 + 3 a_3 A_1^2 A_2$
$3\omega_1, 3\omega_2$	$\frac{1}{4} a_3 A_1^3$	$a_2 A_1 A_2 + \frac{1}{4} a_3 A_1^3 + \frac{3}{4} a_3 A_1 A_2^2$
$4\omega_1, 4\omega_2$	0	$\frac{1}{2} a_2 A_2^2 + \frac{3}{4} a_3 A_1^2 A_2$
$5\omega_1, 5\omega_2$	0	$\frac{3}{4} a_3 A_1 A_2^2$
$6\omega_1, 6\omega_2$	0	$\frac{1}{4} a_3 A_2^3$
$\omega_1 + \omega_2, \omega_1 - \omega_2$	$a_2 A_1^2$	$a_2 A_1^2 + 3 a_3 A_1^2 A_2$
$\omega_1 + 2\omega_2, \omega_1 - 2\omega_2, 2\omega_1 + \omega_2, 2\omega_1 - \omega_2$	$\frac{3}{4} a_3 A_1^3$	$a_2 A_1 A_2 + \frac{3}{4} a_3 A_1^3 + \frac{3}{2} a_3 A_1 A_2^2$
$2(\omega_1 + \omega_2), 2(\omega_1 - \omega_2)$	0	$a_2 A_2^2 + \frac{3}{2} a_3 A_1^2 A_2$
$\omega_1 + 3\omega_2, \omega_1 - 3\omega_2, 3\omega_1 + \omega_2, 3\omega_1 - \omega_2$	0	$\frac{3}{2} a_3 A_1^2 A_2$
$2\omega_1 + 3\omega_2, 2\omega_1 - 3\omega_2, 3\omega_1 + 2\omega_2, 3\omega_1 - 2\omega_2$	0	$\frac{3}{2} a_3 A_1 A_2^2$
$2\omega_1 + 4\omega_2, 2\omega_1 - 4\omega_2, 4\omega_1 + 2\omega_2, 4\omega_1 - 2\omega_2$	0	$\frac{3}{4} a_3 A_2^3$

对比可以知, 由于信号源谐波的存在, 一些本不该有输出的频率上出现了输出分量; 而本来应有的输出频率分量上, 会由于信号源谐波而叠加上下干扰项。

由于频率分量应满足式(4)的条件方程才能从接收机

中输出产生响应,故而信号源谐波所带来的影响本质上是将低阶次的响应映射到了更高阶次。

对于接收机双频测试来说,双频图是接收机在各输入双频率组合下输出功率的直观表达,由于信号源谐波导致接收机输出功率的变化会对响应线高造成影响,而二维双频图是三维双频图的截图,线高的变化可能对截图造成影响。故在数据处理,运用式(4)识别二维双频图时,信号源谐波带来的影响是:双频图上的每一条响应线,都会受到比其阶次低的响应的的影响,而其也会对更高阶次的响应线造成影响。如此信号源谐波的存在使双频图的准确识别变得困难,同时使接收机电磁环境适应性的评估出现偏差。

对信号源的研究表明,同一台信号源在同一频点上输出电平越大,谐波抑制制度越差,故信号源谐波在信号源输出信号大时会更明显。另外,信号源在不同频率上有不同的谐波抑制制度,信号源技术指标中所给出的谐波抑制制度指标,是在信号源最大输出情况下、所考虑频段中的最差频点对应的指标。

通过分析知,没有信号源谐波时接收机的输出分量,其幅度表达式中只涉及信号源的基波幅度 A_1^n , n 为整数;而其对应的有信号源谐波参与产生的输出分量,则是对应 A_1^n 中的部分或全部被替换成信号源谐波幅度 A_2^m , $m \leq n$ 且 m 为正整数。若信号源谐波抑制制度为 x dBc,则前述无信号源谐波时接收机的输出分量和其对应的有信号源谐波参与产生的输出分量之间将相差 mx dB,即至少相差 x dB,

且在信号源最大输出、最差频点上才有可能只相差 x dB。

对接收机的研究结果显示,大部分接收机的输出功率都有一定范围的限制,一般接收机中频输出端最大功率与最小功率的差异在 60 dB 以内。故而当信号源谐波抑制制度为 $x < -60$ dBc 时,能够使有信号源谐波参与形成的输出分量功率小于接收机最小输出功率,即掩埋在底噪之下,不会对双频图产生很大影响。而如果在截取二维双频图时,所用的功率门限比接收机最小输出功率高 U_i dB,那么对信号源谐波抑制制度的要求放宽 U_i dBc 时,也不会影响该二维双频图的识别。

综上所述,对于一般的接收机,按保守原则选择信号源谐波抑制制度优于 -60 dBc,可以满足双频自动测试需要,信号源谐波对双频图上信号通道和干扰路径等的识别不会造成影响。

4 信号源谐波影响仿真示例

对于具有典型非线性传输特性的接收机^[14],以 Key-Sight 的信号源 E8257D 为例,进行信号源谐波对双频自动测试影响的仿真分析。按照标称的技术指标,E8257D 在 10 MHz~20 GHz 频段内的谐波抑制制度为 $-25 \sim -55$ dBc;若加入谐波抑制选件,谐波抑制制度可改善至 $-45 \sim -55$ dBc。据此对仿真输入信号的谐波进行设置。仿真结果如图 5 所示。

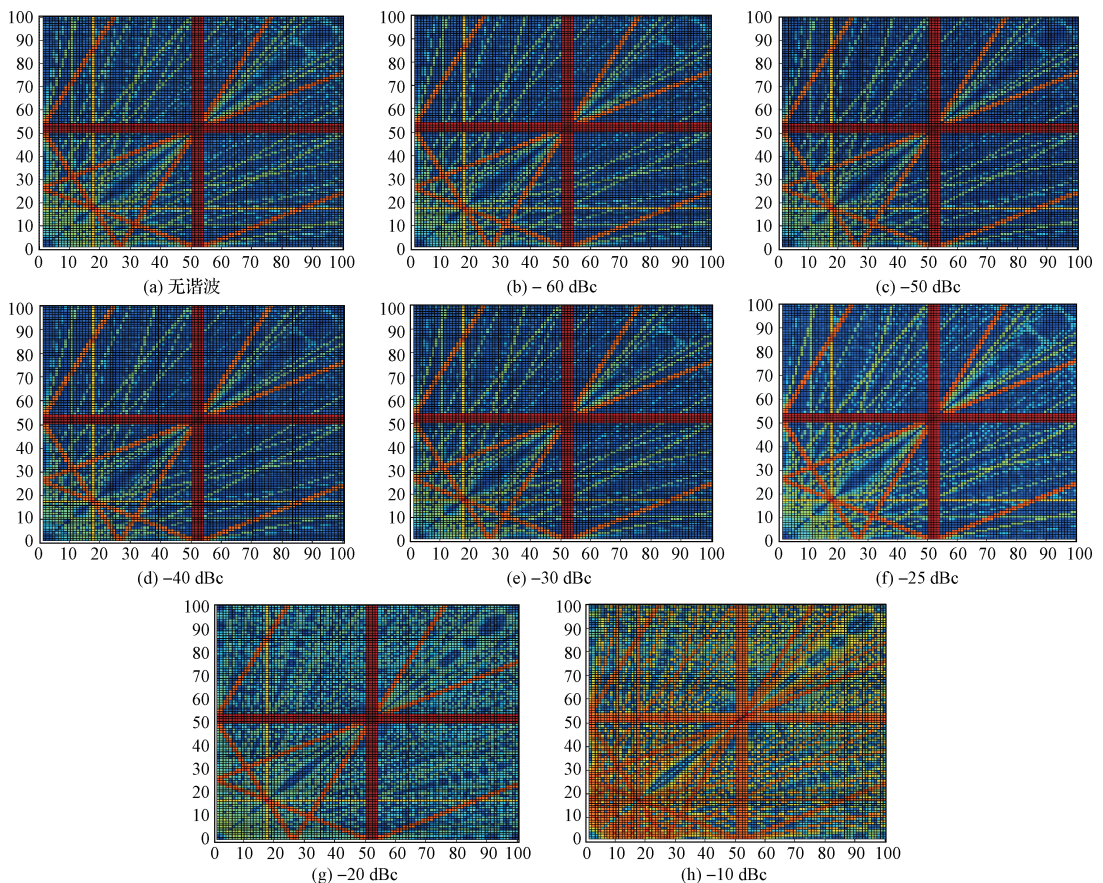


图5 信号源谐波不同时双频图的差异

对于仿真所模拟的情况,当运用式(4)对双频图上直线进行识别时发现,信号源谐波抑制制度优于 -60 dBc时,不会对双频图的识别产生影响(图5(a)、(b)的识别结果一致),与上一节理论分析的结论相符。对比该仿真实例在信号源各谐波抑制制度下获得的双频图可见,若信号源谐波抑制制度劣于 -30 dBc,信号源谐波对双频图的识别会造成较大影响(与图5(a)的识别结果有较大差异:一些图5(a)中存在的响应线从图5(f)、(g)、(h)中消失;一些图5(a)中不存在的响应线在图5(f)中出现),随着信号源谐波抑制制度的改善,信号源谐波对双频图识别的影响逐渐消失。当然,具体可接受的谐波抑制制度指标依赖于双频图识别时所关注非线性响应的强弱,双频图上的强响应线幅度高,谐波较难对其存在性造成影响,即所关注的响应强则对谐波抑制制度要求低,反之则对谐波抑制制度要求高;此外可接受的谐波抑制制度指标还将有赖于被测接收机的传输特性。由于实际面临的被测接收机性能各异,因此,为了充分发挥双频自动测试全面获取接收机非线性响应特性的优势,双频自动测试系统应按保守原则选择信号源谐波抑制制度优于 -60 dBc。后续可考虑对测试数据的处理方法进行研究,以通过数据处理来抑制信号源谐波对双频图识别造成的影响,放宽双频自动测试系统对信号源谐波抑制制度的要求。

5 结 论

双频自动测试技术利用两台信号源以特殊的方式扫描生成测试频段内全部测试频率组合,能够获得测量频段内所有的非线性响应,快速检测与识别所有的信号通道和干扰路径,获取接收机的非线性响应特性。测试结果对于评估接收系统的电磁兼容性具有重要参考价值。

但由于双频测试所需信号功率较大,信号源会不可避免地产生谐波,因此测试结果会受到信号源谐波的影响,使得对接收机的评价与实际偏离。故双频自动测试系统在组建时应当充分考虑信号源谐波问题,通过理论分析与仿真可知,保守做法可根据被测接收机中频输出动态范围和二维双频图截取门限,来选择合适的信号源谐波抑制制度,在条件允许时尽量选择谐波较小的信号源,必要时应当配置信号源谐波抑制器,并对抑制信号源谐波影响的数据处理方法进行研究。

参 考 文 献

- [1] 苟元潇,傅佳辉,林茂六,等. 基于矢量测量的射频微波器件非线性参数化行为建模技术评述[J]. 仪器仪表学报,2013,34(6):1319-1329.
- [2] WILLIAMS T, SAINI R, MATHIAS S, et al. 非线性器件的建模与测试[J]. 国外电子测量技术,2015,34(8):14-20.

- [3] 万运强,王成华,龚琳,等. 组合式无源互调自动测试系统的设计[J]. 电子测量技术,2012,35(11):36-40.
- [4] 胡向峰,张艳花. 接收机的非线性分析[J]. 信息与电子工程,2008,6(6):440-443.
- [5] 杨云升,杜广超,赵顺利. 接收机非线性测试分析[J]. 无线电工程,2011,41(10):27-29.
- [6] MORDACHEV V, SINKEVICH E. Experimental Analysis of Radio Receiver Susceptibility to Out-of-Band Interference by Means of Double-Frequency Test System[C]. Proceedings of the 10-th Int. Symp. on EMC "EMC Europe 2011", 2011: 405-411.
- [7] 邢奎,薛梦麟,王雅薇. 复杂电磁环境下无线接收机电磁兼容快速测试技术应用[J]. 宇航计测技术,2015,35(5):21-26.
- [8] 刘培国,覃宇建,卢中昊,等. 电磁兼容现场测量与分析技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013:140-141.
- [9] 马晨,周东明,刘培国. 一种快速获取接收系统非线性特性的新型测试方法[J]. 现代电子技术,2013,36(21):145-147,151.
- [10] MORDACHEV V, SINKEVICH E. "Virtual testing area" for Solving EMC problems of spatially distributed radiosystems based on automated double-frequency test system[C]. Proceedings of the 9-th Int. Symp. on EMC "EMC Europe 2010" joint with 20-th Int, 2010: 714 - 720.
- [13] 汤兴刚,郭恩全,周开基. 接收机非线性测试及分析技术[J]. 电磁环境效应学报,2015,2(1):28-31.
- [11] 孙金龙,林茂六,吴芝路. 射频器件时域非线性行为建模综述[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(11):1565-1573.
- [12] 董一伯,刘久文,邹世源. 基于 MATLAB 的功率放大器行为级建模方法研究[J]. 电子测量技术,2013,36(1):13-18.
- [14] SINKEVICH E, MORDACHEV V. Characterization of radio receiver's front-end nonlinearity by measurement of spurious-free dynamic ranges[C]. Proceedings of the 11-th Int. Symp. on EMC "EMC Europe 2012", 2012: 1-6.

作 者 简 介

方泽邈,1991年出生,中船重工第705研究所,硕士研究生,主要研究方向为水下载体测试技术。

E-mail:fzm.003@qq.com

郭恩全,1961年出生,中船重工第705研究所研究员,硕士生导师,陕西海泰电子有限责任公司总经理。主要研究方向为仪器与测试测量技术、电磁兼容技术等。

E-mail:geq@haitai.com.cn