

接收放大设备中的非线性失真·接收放大设备中的非线性失真

Б.М.波格丹诺维奇 著

陈子敏 译

程时昕 校

接收放大设备中的非线性失真



高等教育出版社

本书是根据1980年《СВЯЗЬ》出版的苏联功勋科学家、科学技术博士、明斯克无线电工程学院Б.М.Богданович教授所著《Нелинейные искажения в Приемно-усилительных устройствах》一书译出的。

本书系统地阐述接收放大设备非线性特性的问题。详尽地分析了各种类型的非线性失真和评价接收放大设备非线性特性的方法,介绍了各级电路和整个系统中的非线性失真计算方法;同时还提出了最大限度降低失真的种种措施,给出了多种低失真设备的实用电路和特性曲线。在附录中给出了弱非线性电路中各种非线性失真指标和动态范围的电子计算机计算程序。

本书所采用的理论分析方法是国际无线电通信咨询委员会于1974年推荐的沃尔泰拉级数分析法,它对于其它弱非线性系统的分析与综合同样适用。

本书理论分析严谨,密切结合实际,可作为高等院校无线电技术专业本科生和研究生的参考书,也可供从事无线电技术和通信工作的工程技术人员阅读。

责任编辑 李永和

Б. М. БОГДАНОВИЧ
НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ
В ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВАХ
МОСКВА. СВЯЗЬ. 1980

* * *

接收放大设备中的非线性失真

[苏] Б. М. 波格丹诺维奇 著
陈子敏译 程时昕 校

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京印刷一厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张11.25 字数290 000

1988年3月第一版 1988年3月第一次印刷

印数 00 001—2 750

ISBN 7-04-001041-0/TN·90

定价 2.60元

前 言

无线电接收系统和放大系统中信号的非线性失真，对无线电系统和其他设备的许多重要质量指标，如信号重现的精确性、分辨率和通过能力、以及抗干扰性等，都有极大的影响。尤其是，这个问题与无线电通信和有线通信、无线电测量、电视、科学技术等无线电电子学领域有密切关系。提高系统的线性，有助于解决无线电电子设备的电磁兼容性问题。

现时，对线性度的要求越来越高，因而必须设计和制造各种能使被传送（放大和变换）信号的失真很低的无线电接收设备和放大设备。特别是，在许多通信系统和无线电测量技术中，用等效谐波系数表示的非线性失真允许值，现在只允许为十万分之几。大家知道，实现这样高的要求会遇到很大的困难。

与接收放大设备中非线性失真有关的一些最有实际意义的基本问题，可归纳为如下三方面：一是研究非线性失真的实质与伴随发生的物理过程，二是建立一套根据非线性指标设计系统和各级电路的方法，三是确定系统构成原则以及相应的能降低非线性失真的电路技术与系统技术方案。通常，反映上述每个基本问题的许多材料，分散登载于各种期刊，或者以章节形式编入部分书籍，而且它们的科学技术水平高低不同。之所以这样是由于各种客观原因。特别是，由于不存在既简便又通用的非线性无线电电路分析步骤，迫使人们对非线性失真的研究不得不使用各种特定的方法。这些方法难以相互比较，也不可能在实践中普遍推广，而且在许多情况下保证不了良好的精确性。

近十年来，已发表了许多论文，专门讨论一种原理新颖、颇有前途的非线性失真分析方法。这种分析方法的依据是使用沃尔

泰拉 (Вольтерра)^① 泛函级数这一数学工具和求解系统非线性微分方程的算子法。由于这一新方法发展的结果, 已经建立了一些简便的方法, 以求得用显式联系输入激励和响应的系统非线性传递特征。无论是在国外还是在苏联, 应用这一新方法的经验, 都证明了这一新方法对分析与综合各种类型的弱非线性系统是有效和通用的, 这对接收放大技术有很大的实际意义。但是, 直到现在, 苏联文献中对这一新方法的阐述还很少见。

本书旨在总结分散发表于各种期刊上的文章以及作者的一些研究工作, 为广大无线电工程师、电信工程师和科技工作人员编写一本易于理解的、关于设计和研制低非线性失真接收放大设备方面的参考书。编写本书时, 作者有如下几点考虑:

1. 本书限于介绍少数几种研究接收放大设备中非线性失真最有效的方法, 其叙述范围以使读者能够独立使用这些方法解决实践中所遇到的问题为限。采用起码必不可少的几种分析方法是為了便于对最大限度降低非线性失真的各种方法进行对比。

2. 本书凡是讨论系统及其元件分析与计算的各章, 其最后部分所介绍的内容都讲究工程实用。这些内容包括简便的计算方法以及画成各种图表曲线与诺模图的计算结果、典型级与结构的广义特性曲线、各种参考资料、结论与建议、电子计算机的计算程序等。

3. 本书列举了多种低非线性失真级与系统的电路实例, 还给出了较好的工作状态与实验研究结果等。这样就有可能在很多情况下利用本书现成的结果, 而无需进行许多计算, 或者使计算量大为减少。

4. 由此可见, 读者可以利用本书的材料独立地进行如下各种工作: 研究非线性失真与按非线性指标设计系统, 以及实验研制系统与检验系统的非线性特性。

本书内容的编排顺序如下: 基本术语; 有关系统非线性的过

^① 英译名为 V. Volterra, 系意大利数学家 (1896~1940年)。——译者注

程描述及其分类；分析方法；各典型级非线性现象的研究（电路技术方面）；多级系统非线性现象的研究（系统技术方面）。

在编写本书的过程中，明斯克无线电工程学院无线电接收设备教研室的同事 Л. А. 格洛布斯 参加编写 3.2、5.1 和 5.2 节，В. П. 多罗舍夫的研究成果编入 4.2、4.3.2、4.4.2、4.4.3、5.3 和 6.1.2 节，并承蒙 В. С. 波格丹诺斯基、Э. Б. 瓦克塞尔、А. И. 沃罗诺夫、И. И. 札本科夫、В. М. 洛佐夫斯基、Н. И. 奥库利奇、С. С. 波兹尼亚克和 А. И. 沙基林，对原稿准备工作给予了帮助，作者一并对他们表示感谢。同时，作者对科学技术博士 В. А. 莱温教授在评审时所提出的许多意见和建议表示深切的谢意。

作者热忱希望读者把意见寄给《邮电》出版社：101000，莫斯科，奇斯托普鲁德（Чистопрудный）林荫路 2 号。

作 者

目 录

前言	8
第一章 接收放大设备中的非线性失真及其评价方法	1
§ 1 1 非线性失真的概念及其类型	1
§ 1 2 系统非线性特性的评价方法	6
§ 1 3 非线性失真对系统质量指标的影响	17
第二章 弱非线性无线电接收放大系统中的非线性失真分 析方法	23
§ 2 1 非线性失真分析的特点	23
§ 2 2 利用沃尔泰拉级数分析非线性失真	34
§ 2 3 系统非线性传递特性的计算	56
§ 2 4 系统元器件的非线性模型	95
第三章 强非线性无线电接收放大设备中的非线性失真分 析方法	122
§ 3 1 电阻性非线性放大级中的非线性失真分析	122
§ 3 2 变频器中的非线性失真分析	126
§ 3 3 具有幅相转换作用的放大系统中的非线性失真分析	144
第四章 弱非线性级中的非线性失真和动态范围	154
§ 4.1 概述	154
§ 4 2 用二端放大器件构成的放大级	160
§ 4.3 用四端放大器件构成的放大级	168
§ 4 4 线性负反馈放大级	192
§ 4 5 放大级中复数非线性的影响	212
§ 4 6 增益受控级中的非线性失真	231
第五章 强非线性变频级和放大级中的非线性失真	237
§ 5 1 二极管变频器	237
§ 5.2 双极型晶体管变频器和场效应管变频器	250

§ 5.3	放大级的极限动态范围	255
§ 5.4	大动态范围的放大级和变频级的实用电路	264
第六章	多级放大系统中的非线性失真	270
§ 6.1	多级放大系统的环节及其非线性特性的描述	270
§ 6.2	多级放大系统的传递特性	288
§ 6.3	多级放大系统的动态范围和信号干扰比	302
§ 6.4	放大系统中的各种非线性失真指标和动态范围的相互关系 ...	308
§ 6.5	按非线性失真指标进行放大系统的结构综合	316
附录一	弱非线性系统中的非线性失真指标和动态范围的	
	电子计算机计算程序	325
附录二	计算电抗性非线性参量电路各系数 α_i、γ_j、β_j	
	的公式	331
附录三	MAHPII-6 程序包的组织和结构	336
参考文献		338
本书俄文缩写词及下标符号俄汉对照表		342
有关苏联晶体管型号与国产管型号的置换表		347

第一章 接收放大设备中的非线性失真及其评价方法

§ 1.1 非线性失真的概念及其类型

1.1.1 非线性失真概述

当任何一种信息传输系统（简称系统）工作时，所传送的信息 $n(t)$ 与系统输出端的信息 $\tilde{n}(t)$ 之间总有一定的差异，即

$$\tilde{n}(t) = n(t) + r(t) \quad (1.1)$$

式中， $r(t)$ 表示信息的“误差”。

大家知道，系统中信息是借助于电振荡（信号）来传送的。由于系统的不完善性和干扰对系统的影响（图1.1），输出信号 $\tilde{s}(t)$ 就与真实信号 $s(t)$ 不同，在数值上相差一个“误差”信号 $e(t)$ ，即

$$\tilde{s}(t) = s(t) + e(t) \quad (1.2)$$

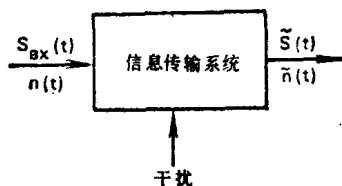


图1.1 信息传输系统中的信息失真和信号失真

凡导致被传信息〔式 (1.1)〕改变的被传信号〔式 (1.2)〕的变化，统称为广义的信号失真，而系统输出端那个信号 $\tilde{s}(t)$ 称为失真信号。由于“误差”信号的数值对应于被传信息的“误差” $r(t)$ ，因而通常要规定允许值 $\varepsilon(t)$ 或与它有关的一些参量。

根据构成系统或其各个设备（发送设备和接收设备等）的电路性质，可将失真分成线性失真和非线性失真两大类。

非线性失真产生于非线性电路或非线性参量电路。这两种电路所具有的共同性质，是在通过该两种电路的信号与干扰的频谱中产生了新的振荡分量，这使“误差”信号 $\varepsilon(t)$ 的形式及其测定方法都变得极为复杂。

在最一般的情况下，系统输入端的信号 $S_{in}(t)$ 与输出端的信号 $\tilde{S}(t)$ 之间的关系（见图1.1）可用非线性算子 L 来联系，即

$$\tilde{S}(t) = L[S_{in}(t)] \quad (1.3)$$

同时，信号在系统中传输时必需进行的一些有用变换是用局部算子 L_i 来描述的，而算子 L 与局部算子 L_i 有关：

$$L = F[L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n]$$

在接收放大系统中，信号的基本变换是：电平的比例变化（放大或衰减）、变换成所需频率范围的频率变换（变频）和检波。

由于各种有用变换的结果，系统不同级中的信号可以是不同的，但是，这种不同并不是用以判断系统产生非线性失真的充分条件。这是因为，包含在信号中的有用信息与信号的整体没有联系，而仅与信号的某种已知参量（例如，有关调制规律的参量）有关。因此，当研究无线电接收机中的已调波非线性失真时，所传送信号 $S(t)$ 应理解为有用高频振荡的包络（对调幅波而言）和有用高频振荡的瞬时频率对未调制时频率的偏移（对调频波而言）等。在这种情况下，系统的输出信号 $\tilde{S}(t)$ 是无线电接收机低频放大器输出端的信号。这样，在信号通过系统的传输过程中，并非信号 $\tilde{S}(t)$ 的一切变化（即与原始信号 $S(t)$ 有差异）都会使所传送的信息发生失真。

必须注意，有关系统中的非线性失真和干扰这两个术语，在文献中是有区别的。有时，非线性失真仅仅是指由系统非线性特

性所引起的有用信号失真^[20,82]。在参考文献[89]中,非线性失真是指使所传信息发生失真的一切确定性(非随机性)信号的非线性变换,而干扰是指与信号没有确定性函数关系的一切扰动。在参考文献[2,10]中,将干扰引起的非线性失真相应称为“非线性效应”和“非线性现象”。但是,后一种定义,同样适用于系统中一些有用非线性过程,如检波、变频和非线性放大等,此外,没有前面采用的定义那样单一和明确。对于非线性失真和干扰这两个术语的其他各种解释,虽然还可举出一些,但要注意不同作者所采用术语的条件是不同的。

下面让我们采用如下的非线性失真定义:所谓非线性失真,就是造成所传信息 $\tilde{n}(t)$ 〔式(1.1)〕失真的信号 $S(t)$ 〔式(1.2)〕的任何变化,而且它是由系统传递算子〔式(1.3)〕的非线性决定的,其中包括干扰的存在。

1.1.2 非线性失真的类型

根据系统、信号和干扰的性质不同,非线性失真可分成下列数种类型:

1. 就有用信号和干扰而言,可分成非独立源非线性失真与独立源非线性失真,以及固有非线性失真与干扰非线性失真^[58]。

非独立源非线性失真直接与有用信号有关,因此当有用信号不存在时,它也不会出现。独立源非线性失真不依赖于有用信号而产生,因此当有用信号不存在时,也能在系统中出现。

固有非线性失真是指干扰不存在时有用信号的非线性失真。干扰非线性失真是指干扰作用于系统时由系统非线性所引起的有用信号非线性失真。同时,干扰还可分成主通道干扰、邻近通道干扰、带外干扰和寄生干扰四种。

根据参考文献[106,107]的定义,主通道是指接收有用信号主要辐射的通道;邻近通道是指接近于主通道的一种通道,其频带和中心频率均与该无线电系统所采用的频率分配情况相符合;

带外通道是指在与主通道频带相毗邻的频带内接收的一种非主通道；寄生通道是指在与主通道频带相毗邻的频带内接收的另一种非主通道，但它是由变频器的非线性过程和主通道谐振回路选择性不足所引起的。

在系统的实际工作条件下，有用信号和性质不同的各种干扰（频谱集中的干扰、噪声干扰以及它们的组合干扰等）都会同时作用于系统。但是，在作系统分析和测量时，较简便的方法是分别研究下列各种类型的非线性失真：频谱集中的干扰非线性失真（简称集中干扰非线性失真）、噪声非线性失真和集中干扰加噪声的非线性失真等。这样做能够确定具体情况下起主要作用的因素，并找出相应的克服办法。

2. 按已失真信号和干扰的形式，可分成谐波或准谐波非线性失真、确定性振荡的非线性失真、非确定性振荡（随机振荡）的非线性失真以及确定性振荡与非确定性振荡的各种组合非线性失真。

3. 按“误差”信号 $\varepsilon(t)$ 的动态性质，可分成静态非线性失真和非静态（动态）非线性失真两类。前一类，过渡过程不影响所传信息的误差；后一类，过渡过程要影响所传信息的误差。

4. 按失真信号随时间变化的波形，可分成“截止”型或单向限幅型非线性失真（图1.2 a）、双向限幅或切割型非线性失真〔对称的（图1.2 b）与不对称的（图1.2 c）〕以及“台阶”型非线性失真（图1.2 d）等。

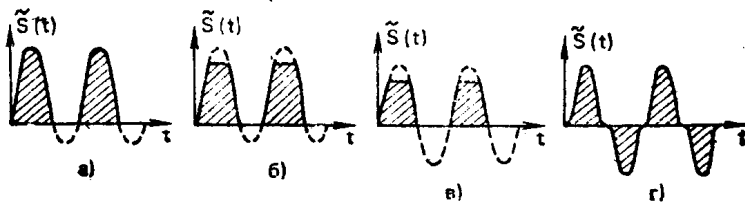


图1.2 失真信号随时间变化的波形类型

5. 按系统输出端的非线性效应, 可分成下列七种非线性失真:

谐波失真, 它反映某些落入系统通带内的输入激励信号谐波分量的出现情况;

有用信号调制规律失真 (对已调制信号而言);

交叉失真, 它反映干扰的调制分量调制有用信号的现象;

互调 (或互相调制型) 失真, 它反映两个或两个以上的信号 (或干扰) 在非线性系统中的相互作用, 使系统通带内出现新的频谱分量, 其频率等于这几个输入信号频率或它们的谐波频率之和或差;

信号振幅压缩 (或扩张) 型失真, 它反映系统输出端的信号振幅值相对于系统输入端的信号振幅值不按比例变化的情况;

阻塞型失真, 它反映系统在干扰的作用下, 有用信号的系统传输系数变化 (减小) 情况;

有用信号在干扰背景中的分离度 [即信号/干扰比 (C/I)] 恶化型失真, 它不仅反映系统在干扰作用下输出端信号减小的现象, 而且也反映系统输出端干扰电平增大的现象。

6. 按系统的幅频特性形式, 可分成窄带系统的非线性失真和宽带系统的非线性失真两大类。

7. 按系统传递算子特性的不同, 可分成下列几类非线性系统的非线性失真:

电阻性非线性系统 (在工作频率范围内可忽略不计惯性的系统) 的非线性失真;

复数性非线性系统 (在工作频率范围内必须考虑惯性的系统) 的非线性失真;

弱非线性系统 (非线性器件不是工作在“截止”、限幅或开关状态等强非线性特性区域的系统) 的非线性失真;

强非线性系统 (非线性器件工作在“截止”、限幅或开关状态等强非线性特性区域的系统) 的非线性失真。关于这几类非线性

性失真详见 2.1.2 和 2.1.3 小节。

§ 1.2 系统非线性特性的评价方法

对系统非线性特性的评价方法,可从两个角度来考虑:一是根据具体信号通过系统后的失真程度,二是根据系统的传递算子特性。

1.2.1 根据具体信号失真程度评价非线性特性

在这种情况下,于系统输入端施加预定的测试信号,根据该测试信号的失真程度来判定系统的非线性特性。测试信号的选择要能既简便又精确地提取出反映非线性失真的信息(也就是决定于测量的可能性),同时还要能使测试信号与施加于被评定系统中的实际信号相似。

根据测试信号形式的不同,可分为固有非线性失真的评价和干扰非线性失真的评价两种。为了最简便而又精确地得出任何一种非线性失真指标,已研究出一些专门的测试信号和详细拟定了分析输出信号的方法。为得到某种给定形式的评价,可以有很多方法,对它们进行比较已超出本书的范围(可参阅参考文献[19, 30])。

1. 固有非线性失真的评价

非线性失真系数 K_{nl} , 是指在输入低频信号频谱或输入高频信号调制电压频谱中不存在的某些已测定输出信号分量的均方和与给定输出信号频谱分量的均方和之比值^[66, 78]。

谐波系数(谐波失真系数) K_r , 是指输入低频信号(或高频信号的调制电压)为正弦电压时的非线性失真系数^[66, 78]

$$K_r = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

式中, A_i 为输出信号的第 i 次谐波振幅值。当 $K_r < 10\%$ 时, 式(1.4)的计算可简化为

$$K_r = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}}{A_1} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

非线性衰减量 B (以分贝为单位), 是指下式^[20]:

$$B = 20 \lg(A_1 / \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots}) \quad (1.6)$$

有时, 还可利用特定谐波的谐波系数

$$K_{rn} = (A_n / A_1) \cdot 100\% \quad (1.7)$$

并利用与上式对应的特定谐波非线性衰减量

$$B_n = 20 \lg(A_1 / A_n) = 20 \lg(1 / K_{rn}) \quad (1.8)$$

可以证明, 在非线性失真不大的范围内, 非线性衰减量和有用信号输出功率可由下式确定^[20]:

$$B_{n2} = B_{n1} - (n - 1) \Delta P \quad (1.9)$$

B_{n2} 和 B_{n1} 表示对应于输出信号电平差为 $\Delta P = 10 \lg(P_{\text{вых}1} / P_{\text{вых}2})$ 的两个非线性衰减量, n 表示决定 B_n 值的谐波序号。

因此, 当输出电平的数值增大 ΔP 时, 第 n 次谐波的衰减量就按比例减小 $(n - 1) \Delta P$ 。随着谐波序号 n 的增大, 非线性衰减量特性曲线 $B_n = f(P_{\text{вых}})$ 的斜率增大 (图1.3)。

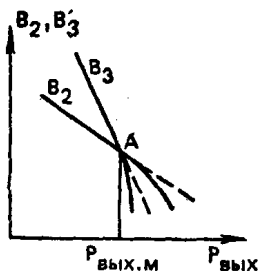


图1.3 非线性衰减量随输出信号功率而变化的关系曲线

应当指出, 式 (1.9) 只对小的 K_{rn} 和小的输出功率才是正确的。从 $P_{\text{вых}} > P_{\text{вых}, \text{н}}$ (过载功率, 见图1.3) 开始, 非线性衰减量的下降速度要比 (1.9) 式的下降规律快。

实践中, $P_{\text{вых}, \text{н}}$ 对应于某个输出电平, 将这个电平的数值增加 α 将导致 B_n 的数值增大 β [$\beta \neq (n - 1) \alpha$]^②。

① 原文误为 i 。——译者注

② 原文误为 $\beta \neq \alpha$ 。——译者注

根据参考文献〔90〕, 对于 B_3 而言, α 和 β 值为: $\alpha = 0.1N_p$, $\beta = 2.5N_p$; 或 $\alpha = 1\text{dB}$, $\beta = 20\text{dB}$; 等等。

压缩(扩张)系数, 是指有压缩时输出信号的基波振幅变化量 $\Delta I_{m\omega}$ 与无压缩时输出信号的基波振幅值 $I_{m\omega}$ 之比, 即

$$K_s = (\Delta I_{m\omega} / I_{m\omega}) \cdot 100\% \quad (1.10)$$

$I_{m\omega}$ 与输入信号振幅值之间的关系称为系统的基波振幅特性。 K_s 的模值与输入电平的大小有关, 通常随输入电平的增大而增大。

包络非线性失真系数 $K_{n\omega(\text{or})}$ 与包络谐波系数 $K_{r(\text{or})}$ 是对调制信号的调制电压而言的^{〔66〕}, 可仿照 K_n 和 K_r 下定义。对于不大的 $K_{r(\text{or})}$ 值, 计算时通常考虑信号包络的二次谐波就足够了。对于其他波形的信号, 非线性失真的评价决定于信号的形式。例如, 对于锯齿波信号, 非线性失真系数可由下式求得^{〔42〕}:

$$\nu = \frac{\text{tg}\varphi_n - \text{tg}\varphi_r}{\text{tg}\varphi_n} \cdot 100\% \quad (1.11)$$

式中, φ_n 和 φ_r 表示锯齿波输出信号在一个周期始点和终点处的倾斜角。

2. 集中干扰非线性失真的评价

阻塞系数, 是指阻塞时有用信号频率上输出振荡的振幅变化量 ΔI_{mc} 与无阻塞时有用信号频率上输出振荡的振幅值 I_{mc} 之比^{〔106〕}, 即

$$K_{\sigma n} = (\Delta I_{mc} / I_{mc}) \cdot 100\% \quad (1.12)$$

测试信号是一个双谐信号^①, 即 $u = U_{mc}\cos\omega_c t + U_{mn}\cos\omega t_n$, 其中, U_{mc} 为信号的振幅, U_{mn} 为干扰的振幅。该干扰可能是邻近通道干扰、带外干扰或寄生干扰。

调幅信号的交叉调制(交叉失真)系数, 是指由交叉调制所引起的有用信号频率上输出振荡振幅的增量 ΔI_n 与没有交叉调制

① 习惯上又称之为双音信号。——译者注。

时有用信号频率上输出振荡的振幅值 I_c 之比^[106], 即

$$K_{\text{нсп}} = (\Delta I_n / I_c) \cdot 100 \% \quad (1.13)$$

测试信号是一个双谐信号, 即 $u = U_{mc} \cos \omega_c t + U_{mn} \cos \omega_n t$, 其中, 有用信号和干扰的每一个分量是分别用频率为 Ω_c 和 Ω_n 的正弦波调制的。

对于不大的 $K_{\text{нсп}}$ 值, 在式 (1.3) 中只要考虑频率为 Ω_n 和 Ω_c 的有用包络的基波就足够了。在这种情况下

$$K_{\text{нсп}} = (\Delta I_{\text{нсп}} / I_{c0}) \cdot 100 \% \quad (1.14)$$

在无线电接收系统中, 交叉调制可由邻近通道、带外通道和寄生通道产生。对于调频系统, 双谐测试信号的每个分量都是调频的。

调频信号的交叉失真系数, 是指干扰引起的调角指数与有用信号引起的调角指数之比^[8], 即

$$K_{\text{нсп}} = (\Delta \varphi_n / \Delta \varphi_c) \cdot 100 \% \quad (1.15)$$

互相调制系数 (简称互调系数) 是对非线性系统互调过程的定量评价。

测试信号是一个多谐信号, 它所包含的各个振荡频率不成整数倍关系, 即

$$u = \sum_{i=1}^n U_{mi} \cos 2\pi f_i t$$

由参考文献[29]知道, 非线性网络输出端产生的各个互调振荡的频率为

$$f = sf_1 + lf_2 + qf_3 + \dots \quad (1.16)$$

式中, s 、 l 和 q 均为正或负的整数。

所谓互相调制产物的阶, 是指式 (1.16) 中各系数绝对值的总和, 即 $N = |s| + |l| + |q| + \dots$ 。

互调的干扰作用是随互调产物阶数的增大而减弱的。根据上述这些考虑和便于测量, 在无线电接收系统和放大系统中, 广泛利用下列两种互调频率来评价双谐信号 $u = U_{m1} \cos \omega_1 t +$

$U_{m2}\cos\omega_2 t$ 的互调作用:

$$f_1 \pm f_2 \text{ (对于二阶互调非线性失真)} \quad (1.17)$$

$$2f_1 \pm f_2 \text{ (对于三阶互调非线性失真)} \quad (1.18)$$

对于带外互调, 只要考虑那些由频率为 ω_1 和 ω_2 的两个带外干扰产生的、并沿着许多无线电接收通道中的某个通道落入系统通带内的互调分量。

带外互调振荡通常有两种:

一种是符合于放大和无线电接收主通道〔即符合于 $sf_1 + lf_2 + qf_3 + \dots = f_0 \pm (\Delta f/2)$ 〕, 其中, f_0 为无线电接收机或放大器的调谐频率, Δf 为中频系统的通频带〕的带外互调振荡;

另一种是符合于中频和镜象通道频率上的寄生接收通道〔即符合于 $sf_1 + lf_2 + qf_3 + \dots = f_n \pm (\Delta f/2)$ 〕, 其中, f_n 表示中频 f_n , 或镜象通道频率 $f_{n\pi}$ 〕的带外互调振荡。

由式 (1.17) 和 (1.18) 可见, 对于无线电接收机来说, 干扰作用最强的是频率为 $f_1 \pm f_2 = f_0 \pm (\Delta f/2)$ 、 $f_1 \pm f_2 = f_n \pm (\Delta f/2)$ 、 $2f_1 \pm f_2 = f_0 \pm (\Delta f/2)$ 和 $2f_1 \pm f_2 = f_n \pm (\Delta f/2)$ 的干扰振荡。

现在, 让我们来列举无线电接收机中产生互调振荡干扰的几个例子。图 1.4 中画出了接收系统窄带部分的特性曲线 1, 假设其中心频率为 f_0 。

对于对称于 $f_0/2$ 的两个干扰振荡频率 f_1 和 f_2 , 即 $f_1 = (f_0/2) - \Delta$ 和 $f_2 = (f_0/2) + \Delta$ (图 1.4 a) 来说, 可得 $f_1 + f_2 = [(f_0/2) - \Delta] + [(f_0/2) + \Delta] = f_0$; 对于对称于频率 Δ' 的两个干扰频率, 即 $f_2 = \Delta' - (f_0/2)$ 和 $f_1 = \Delta' + (f_0/2)$ (图 1.4 b) 来说, 可得 $f_1 - f_2 = f_0$ 。因而, 图 1.4 a, b 所示的两种情况都是二阶互调振荡。

三阶互调振荡也是可以形成的。例如, 当干扰的频率以间隔为 Δ 均匀配置, 即 $f_1 = f_0 - \Delta$ 、 $f_2 = f_0 - 2\Delta$ (图 1.4 a) 时, 就形成三阶互调振荡, 这时, $2f_1 - f_2 = 2(f_0 - \Delta) - (f_0 - 2\Delta) = f_0$ 。