

正統物理學及物理學中的計算程序

吳仁壽 謝國興 謝國興 謝國興

吳 仁 壽 謝 國 興

人 民 出 版 社

无綫电信号及电路中的瞬变現象

И. С. 高諾罗夫斯基著

馮 秉 鈐 等 譯

人 民 電 訊 出 版 社

И. С. ГОНОРОВСКИЙ
РАДИОСИГНАЛЫ
И ПЕРЕХОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ
В РАДИОЦЕПЯХ
СВЯЗЬ ИЗДАТ 1954

本书是无綫电設備中瞬变过程理論方面的專門論著，扼要的敘述了信号諧波分析的理論，綫性系統中瞬变过程的理論，电路理論綱要和无規过程的基本概念。引用了大量的例子，是无綫电工程师、研究員、广大科学工作者及无綫电专业的大学生提高理論水平，进一步掌握复杂的无綫电設備的良好讀物。参加本书翻譯的有华南工農学院馮秉銓、林为干、洪道揆、李鶴齡、潘觀海等五位同志。

无綫电信号及电路中的瞬变現象

著者：苏联 И. С. 高諾罗夫斯基
譯者：馮秉銓等
出版者：人民邮电出版社

北京东四區6條胡同13號
(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇四八號)

印刷者：人民邮电出版社南京印刷厂
南京太平路戶部街15號

發行者：新華書店

開本：850×1168 1/32

印張：11 $\frac{10}{32}$ 頁數181

印刷字數：282千字

印數：1—1,272冊

1958年1月南京第一版

1958年1月南京第一次印刷

統一書號：15045·總693-无165

定價：(11)2.40元

序 言

随着无线电工程的发展，在无线电领域中工作的工程师和科学工作者就必会碰到越来越复杂的设备。对于在这些设备中所发生的过程的理论，如果不能深刻地了解从而加以掌握，则现代无线电专家是不可能创造性的劳动的。

要提高培养无线电工程师水平的要求，只有拥有现代的有关无线电理论的文献才可能达到，所以，关于这些文献的创作就成为一件十分重要的事情了。

H.C. 高諾罗夫斯基的“无线电信号及无线电路中的瞬变现象”一书是一本供研究许多重要无线电工程技术理论问题的专门论著。

本书前四章，叙述了线性电系统理论的基本概念和方法。必须指出，第三章所述的有关电路理论的知识（二端网络和四端网络的某些重要性质，关于电抗定理等），取材是适当的，而有关振幅特性与相位特性之间的关系问题的叙述也有独到之处。

第四章介绍一种简便的方法来研究周期信号对线性系统（非周期性系统和振荡系统）的作用，并且包括为数甚多而又有实用意义的例子。

第五章以扼要简洁的方式阐述了关于无规过程理论的基本概念。

第六章提出一些新的方法来求定由无规过程所调制的振荡的频谱。这些方法在关于有着日益重大意义的电子管振荡器中的起伏问题方面，引起了特殊的兴趣。

第七章发挥了作者所独创的“缓变振幅”的方法，这一方法是严谨而又完整的。可以预料，这将列为无线电工程技术的基本理论方

法之一。

作者所創的关于調頻振盪通过選擇系統的情況的計算方法是頗饒興趣的（第九章）。这种方法無論对于无綫电通信系統中信号畸变的研究或对于利用頻率在寬广的範圍內振盪的設備的理論探討都有用处。

最后，在第十章，对长綫中各种状态建立过程的獨創性的討論，极有助于对这些过程在物理意义上的了解和澄清某些容易产生的錯誤的認識。

毫无疑义，*И.С.* 高諾罗夫斯基的书对还远未达到成熟的高等学校基本无綫电工程課本的編纂将有所影响。虽然此书的取材主要是以科学工作者为对象，但无疑地，它亦可供广大的无綫电工程专业的研究生和大学生作参考之用。

苏联科学院通訊院士

Ю. 科布扎列夫

作 者 的 話

本书是作者过去对于无线电工程設備中瞬变过程理論方面的著述的發揮与綜合。

作者力图使本书內容适合于广大的科学工作者、无线电专家、和无线电专业的大学生。为此在本书中加入了某些章节（第1，2章和第3，5章的一部分），这些章节扼要地敘述了信号諧波分析的理論，綫性系統中瞬变过程的理論，电路理論綱要和无規过程的基本概念。书中引用了大量的例子，这些例子揭露了所提方法的本质并从数字上說明了所研究的問題。

A. H. 貝尔格院士曾詳細地审閱原稿并提出意見，苏联科学通訊院士 Ю. Б. 科布扎列夫校閱本书时，曾經給作者許多宝貴的意見并蒙編写附录 II；作者認為向他們兩位表示深深的感謝是本人愉快的义务。

作者还对 H. C. 伊茲何基教授、数理科学副博士 H. H. 鉄烏民及工程师 A. H. 格依曼的評閱和改进本书的工作表示謝意。对于对本书付印工作中曾給予作者以很多帮助的所有同志們，特别是研究生 H. H. 布霍夫切娃和 Б. Л. 奥列霍夫，工程师 B. C. 布尔加宁和 Г. В. 馬尔庫斯，表示十分感謝。

作者并請讀者将对本书意見投寄下列地址：

（莫斯科中区 Чистопрудный 街 2 号）

緒 論

对任何无线电设备的主要要求之一，是在傳輸和重发信号时要保持信号的波形。在无线电发送和接收设备中，信号的畸变可能有两种原因：即由于綫性电路的慣性^①和电子器件的弯曲伏安特性（非綫性）。信号在時間上变化的速度愈大，則电路的慣性愈大，电路的慣性与信号的絕對值大小无关。在同一的伏安特性下信号的絕對值愈大，則电子器件的非綫性表現得愈强。

由于綫性电路的慣性所引起的信号畸变称为綫性畸变。如果发生綫性畸变时，可以认为信号波形的变形是由于在信号頻带中振幅和相位关系有所改变的結果。因此，有时我們將綫性畸变分为頻率畸变和相位畸变。但是，無論是怎样的变化，当信号通过具有常参数的綫性系統时，总不会产生輸入信号中原来沒有的新頻率。上述情况是从迭加原理而来的，而对于綫性系統，迭加原理完全适用。

由于电子器件非綫性特性所引起的畸变称为非綫性畸变，这种畸变呈現了輸入信号中原来沒有的新頻率。

必須指出，綫性和非綫性元件对信号波形的影响的分界，在一定的程度上是假定的。为了找出信号的真實波形，就必须將器件的綫性及非綫性元件相互之間的影响考慮进去。此外，在任何一种純綫性系統中所发生的綫性畸变，也由于以后非綫性演变的結果而呈現为非綫性畸变的形式。例如，当接收机的回路不是很准确地調諧于发射机的載頻时，两个調制旁頻的不对称性将使振幅檢波器輸入电压的包跡产生波形畸变，因而造成輸出信号的非綫性畸变。此外，調頻振盪依次通过发射机、接收机和頻率檢波器的各个振盪回

① 此处及以后，凡提到綫性系統（电路）时，指的就是具有常参数的綫性系統。

路时所发生的情况，也是畸变由一种形式变为另一种的更典型的例子。在这样的情况下；因回路的影响而引起的不可避免的綫性畸变，由于頻率檢波的结果而变为非綫性畸变。

尽管有上述情况，在研究元件对信号波形的影响时，将元件分为綫性的和非綫性的两种在大多数情况下是有好处的。

当研究在接收放大器的設備中弱信号的放大时，这种分法是完全正确的。至于在無線电发送設備中，則电子管照例是运用在极端“非綫性”的工作状态，因此就完全是另一种情况。但是，就是在这些設備中，也还有许多对于近代無線电技术來說是很重要的应用領域，而在这些領域中，非綫性对发送信号波形的影响是不重要的。例如，我們可以看一看利用发送电子管（电子管工作于乙类或丙类放大状态）来放大高频脈冲的問題。放大器振盪电路的慣性是信号畸变的直接原因。此种畸变表现为輸出振盪的包迹在形状上有所改变。在这种情况下，电子管的非綫性表现为：电子管的等效阻抗（这一阻抗与回路并联，因而会影响到回路的等效品質因数）将視电子管工作状态之不同而異，因而，亦将視回路电压振幅之不同而異。当研究这种系統中的瞬变过程时，要获得精确的解答，就必须将在振盪幅度增长的过程中回路衰减量的变化考虑进去。但是，如果电子管的分路作用很不显著，即振盪系統的等效衰减量（品質因数）基本上取决于回路参数而与振盪的幅度无关，則衰减量的变化显然可以忽略不計。

在研究瞬变过程时，这样的非綫性放大器可以当作是一个等效的綫性系統来研究，其中的衰减量为恆量，实际上与振盪的幅度无关。

这种情况是多极管放大器的特征。

因此可以認為，在用脈冲調幅的選擇性系統中，电子管特性的非綫性对信号波形的影响，一般是无关重要的^①，振盪系統的慣性起

① 当在非周期性系統中形成原始脈冲时，脈冲波形自然是决定于电子管的特性。

着基本的作用。

这个結論也可以推广到調頻系統，因为在調頻系統中，振盪振幅是不变的，所以电子管特性的非綫性也就无关重要了。

因此，在应用无綫电的許多重要領域中，如无綫电报、雷达、脈冲无綫电通信，以及应用調頻的无綫电通信和广播，无綫电設備的綫性元件所引起的畸变有着基本的意义。无綫电傳真及电视中，非綫性畸变也有着次要的意义。

因此，在研討選擇性系統时，研究电子管所引起的非綫性畸变，主要是对于无綫电报和調幅的无綫电广播才有迫切的需要。

在本书中，我們將討論在某些无綫电設備（主要是脈冲調制和頻率調制的設備）由于綫性元件而引起的信号畸变的若干理論問題。

研究在脈冲信号作用下綫性的反应，實質上也就是研究电路中的瞬变过程。我們也知道，关于其他許多复杂信号（例如电视信号）畸变的問題，最好是根据矩形脈冲通过放大器时所受到的畸变来判断。这个方法，比考虑器件的頻率特性的不均匀度或相位特性的非綫性时，使我們对于輸出信号的波形可以得到更明显、更直接的概念。对于許多用調頻发射的信号（移频电报，超高频电视），也是如此。甚至在声頻（語言及乐音）調制时，根据瞬变过程的理論来研究畸变的方法，从頻譜分析的观点来看，也是很有效的方法。

本书的基本内容包括无綫电設備綫性元件中瞬变过程的理論，这种理論对于研究瞬变过程对无綫电信号波形畸变的影响是必要的。

綫性系統中瞬变过程的理論問題，广見諸文献。綫性系統中瞬变过程的近代理論，創始于富氏变换和拉普拉斯变换的采用而在运算微积的基础上发展起来，这种理論的发展史，可一直追溯到我們的同胞M. E. 瓦先科——札哈尔錢科的著作。

根据 *B. A.* 第特金及 *П. H.* 庫茲涅佐夫 [32] 所进行的研究, 在 1862 年, 瓦先科——札哈尔錢科发表的文章中提供了符号运算法的詳尽說明并指出了如何用此法来解常系数与变系数的綫性微分方程和偏微分方程。

自从亥維塞用运算微积分解决了一系列的电工問題后, 这种方法便获得了盛譽。由前一世紀之末到本世紀初叶, 亥維塞的工作, 并未含有运算微积分的严格的理論根据。

在 *K. A.* 克魯格 [20], *M. Ю.* 尤列夫 [10], *A. M.* 埃伏罗斯和 *A. M.* 单尼列夫斯基 [7], *A. A.* 哈尔奇維奇 [15], *A. H.* 魯利耶 [27], *M. H.* 康托羅維奇 [25] 和其他苏联及外国学者的著作中, 这个方法应用于各技术部門中并获得了相应的发展。

这些著作闡明了运算微积分的严格的理論基础并建立了符号运算与拉氏变换函数之間的关系。以后, 运算微积分的发展趋向于采用圍綫积分, 因而我們的算子的概念在很大的程度上就失掉了它本来的意义。

包跡作“緩慢”变化的高頻信号, 其特性的計算以及振盪电路选择性的計算, 是無線电技术中瞬变过程理論发展的特征。

这些特征可以使我們采用“緩变振幅”的方法来研究綫性系統中的瞬变过程。*B.* 范德波在研究非綫性系統中的过程时, 曾采用过这个方法的一种形式。此方法亦曾为 *Л. H.* 曼介里士坦院士及 *H. A.* 巴巴利克西院士 [3] 所論証与发展。第一个采用緩变振幅的方法来研究綫性諧振放大器中瞬变过程的, 是 *A. B.* 阿吉叶夫和 *Ю. Б.* 科布札列夫 [4]。在研究諧振系統中稳定过程时曾为作者 [14] 所采用的賽亞箠尔包跡积分法, 實質上是基于緩变振幅的假定。

提出 *A. H.* 叔金的論文 [17] 是非常有益的, 在这篇論文中提出了一个簡單的方法来解决关于在諧振帶通放大器中瞬变过程的問題。

C. H. 耶夫洽諾夫 [22] 利用了近似符号方程式进一步更詳尽地发展了緩变振幅法，同时也解决了選擇性系統中瞬变过程的許多問題。

有关无綫电电路中瞬变过程的理論問題，在 H. H. 克雷洛夫 [28]，H. C. 伊茲何基 [26] 的專門論著以及其他苏联学者的著作中均有所闡述。必需特別提及 $\Phi. B.$ 魯金 [29] 和 H. H. 鉄烏民 [39] 的著作。在魯金的論文中运用了逐次圍綫积分的方法来研究无綫电设备的綫性元件中的瞬变現象；鉄烏民的书中載有丰富的、利用运算微积分来解决无綫电工程問題的材料。

本书的内容按以下次序安排。

第一、二章討論信号通过非周期性电路的傳輸問題，順便也敘述了关于瞬变过程的一些基本理論（根据圍綫积分的应用）。这里所討論的是具有有限能量的非周期信号，換言之，信号是絕對可积的时间函数。此信号在時間 $0 < t < \infty$ 的某一定片段內可表为已知函数的形式。对于这样的函数进行頻譜分析时，应采用富氏变换；而为了求定綫性四端网络的輸出信号，則应采用圍綫积分法，这一积分可由拉普拉斯反变换获得。第一、二章中所用的敘述方法以及所引用的例題，有助于理解当单个脈冲通过无綫电设备的非周期电路时所受到的波形畸变的問題。

第三章敘述了电路理論的基本原理。这些理論对于研究无綫电設備中的瞬变过程是很重要的。本章也特別注意到綫性电路中頻率特性与相位特性之間的关系，并闡明了当頻率由 0 到 ∞ 的範圍內变化时，相位特性的本質。这些問題对于揭露信号波形的畸变与确定电路中信号的延迟是有一定的意义的。由此，我們就找出了一個一般性的条件，就是說，一个实际电路的相位特性曲綫，在怎样的条件下它的斜度才可能改变符号，那怕只是在整個頻帶中的一些个别段落。

以下的問題是研究脈冲串对于綫性系統的作用和周期性的脈冲串对于綫性系統的作用。周期性的脈冲串在数学上是最簡單的，同時在实际运用上也是很重要的。這個問題在第四章中敘述。但是，即便是这种最簡單的脈冲串，也比单独的非周期性信号較难于研究（特别是以緩慢收斂的富氏級数来表示的周期性信号）。非周期函数的連續頻譜的积分問題（单一信号）比周期函数的綫狀頻譜的求和問題要簡單得多，周期函数是由非周期函数的周期的重复而成的。

显然，如果电路的时间常数小于信号迭更的周期的話，則利用信号的周期性而把它展成富氏級数的作法就沒有意义了。在此情況下，更方便的方法是把周期性脈冲串中的每一个脈冲当作与前一个和后一个脈冲无关，从而利用富氏积分或圍綫积分来进行研究。在相反的情況下，当电路的时间常数接近于或較大于脈冲重复的周期时必须采用富氏級数的求和法。如果將瞬变过程的理論方法应用于周期性的电动势，則問題就会大大地簡化。这个方法的好处在第四章中有一系列的例子来証明，其中之一是脈冲串对振盪电路的影响。这个例子虽然不是信号畸变的典型例子，却指出了在解决許多無線电工程問題时在第四章中所敘述的方法的效用，其中包括了倍頻的問題和自激振盪器如何工作的問題。

第五章是研究不規則的脈冲串，这些脈冲形成所謂无規过程或混沌过程。

*B. H. 西佛罗夫, B. A. 科切里尼科夫及 B. H. 布尼莫維奇*和其他苏联学者广泛采用无規过程的理論于無線电工程技术中。过去曾制造过一种方便的仪器来研究起伏式的干扰及有效信号的影响。例如在研究发送語言或音乐的信号时，几率的（統計的）方法特別有用。*A. H. 科尔莫高罗夫, A. H. 賀因勤, C. H. 別尔士金*及另外一些苏联数学家所制訂的相关函数的方法，为研究在不規則信号的頻譜中功率的分佈開闢了一條道路，同时也奠定了无規过程的理論基础。

第五章所介紹的关于无規过程理論的某些內容，对于判断統計方法运用于許多現代无綫电工程問題的可能性，是不够的，而且这些內容是片断而不完整的。如对这些問題感到兴趣，可參閱本章末所載的基本参考文献。

第六章利用了相关函数的方法来研究調頻振盪頻譜中功率的分佈，在討論时假定了信号傳輸中功率的分配是接近于正态分佈情况的。在同一章中研討了傳輸信号的結構（調制函数）与已調振盪的頻譜中功率的分配之間的关系。我們証明了，在調頻頻譜中功率的分配，在某些情况下与已調电压的功率分配是一样的，当我们用复杂的信号作为調制电压时，通常的頻譜分析法不能采用。当我们研究这一类問題时上述的情况就显得尤其重要。

第七章研討了調幅振盪通过選擇性系統的問題。

我們采用的方法是根據拉普拉斯變換而來的。但是，所寫的形式要能够直接从已知的輸入振盪的包跡來求出共振系統輸出端的振盪包跡。我們广泛地采用了通解的簡化形式，这样的簡化是由电路的复数傳輸系数近似式得來的，这些近似式在頻率接近于电路的諧振頻率或信号的載波頻率时是正确的。

为了研究調頻振盪通过綫性系統的問題，利用按失諧程度將傳輸系数分解为多項式的方法是方便的。此方法我們称为“分析延拓法”。在第八章中将首先以一般的形式来敘述，然后再針對任意已調振盪的包跡來闡明。在第九章提出了把这个方法应用于調頻振盪對綫性系統的作用的問題，主要是对選擇性系統的作用的問題。我們分两方面来进行討論：第一項是研究頻率瞬間变化規律的畸变，第二是求定輸出振盪包跡的变化。第一个問題是和利用調頻來发送信号的問題有关的。第二个是和利用頻率摆动的方法來作“全景示波器”的問題有关的（直接用視覺來觀察頻率特性的儀器，頻譜分析器以及其他類似的儀器均可称为全景示波器）。

第十章簡括地討論了傳輸高頻脈冲在长綫中所發生的瞬变过程。

书末附录中載有应用圍綫积分及留数定理所必需的复变函数理論的簡單知識。

在第4, 7, 8, 9, 各章以及第3章第8节中所述关于調幅和調頻时在無線电电路中所發生的瞬变过程理論的基本問題, 作者在定期刊物中已发表过[14, 18, 34, 37, 40, 41]。第六章的主要內容及第九章一部分內容是以前未发表过的。

目 錄

序 言

作者的話

緒 論

第 一 章 非周期性过程。頻譜

- § 1.1 富氏积分变换 (1)
- § 1.2 富氏变换的某些特性 (7)
- § 1.3 几种通用函数的頻譜 (9)
- § 1.4 在已給定的時間間隔內的諧和振盪 (16)
- § 1.5 等距离脈冲組的頻譜 (20)
- § 1.6 頻譜中的能量分佈 (23)

第 二 章 非周期性信号在綫性系統中通过的情况

- § 2.1 富氏积分在复变数中的推广, 拉氏变换 (33)
- § 2.2 积分閉围綫的构成, 留数理論的应用 (36)
- § 2.3 在集总常数的綫性系統中的建立过程 (45)
- § 2.4 脈冲在非周期放大器中通过的情况 (48)
- § 2.5 补偿放大器 (57)
- § 2.6 微分电路和积分电路 (61)
- § 2.7 振盪的冲击激发 (66)
- § 2.8 在振盪回路中接入正弦电动势 (71)

第 三 章 綫性电路的傳輸系数

- § 3.1 引言 (77)
- § 3.2 无源电路中的綫性方程系 (78)
- § 3.3 能量函数 (82)
- § 3.4 二端网络、电抗定理 (85)
- § 3.5 四端网络的傳輸系数 (96)

§ 3.6	傳輸系数的实数部分与虛数部分之間的关系	(104)
§ 3.7	傳輸系数的模和幅角之間的关系	(110)
§ 3.8	相位特性的斜度	(115)

第 四 章 复杂的周期性电动势对綫性系統的影响

§ 4.1	通論	(125)
§ 4.2	圍綫积分解法	(127)
§ 4.3	如何求某些周期性函数的像函数	(134)
§ 4.4	复杂的周期性电动势作用于綫性系統的例子	(139)
§ 4.5	周期性脈冲串对振盪回路的影响	(149)

第 五 章 不規則信号

§ 5.1	不規則信号的基本特性	(162)
§ 5.2	具有随机相位的譜波振盪的綜合	(166)
§ 5.3	渾沌脈冲串	(170)
§ 5.4	不規則信号用三角級数形式表示的条件	(173)
§ 5.5	不規則信号的相关函数	(175)
§ 5.6	不規則信号通过綫性系統时的情况	(181)
§ 5.7	不規則电报信号通过狭帶濾波器时的分佈函数	(186)
§ 5.8	正态分佈信号通过綫性系統时的情况	(188)

第 六 章 已調振盪

§ 6.1	概述	(192)
§ 6.2	調幅时調制函数和已調振盪的頻譜之間的关系	(193)
§ 6.3	包跡具有单位阶跃函数形式的振盪頻譜	(198)
§ 6.4	調相时振盪的特点	(200)
§ 6.5	用相关函数法求調相时的頻譜	(203)
§ 6.6	相关函数法运用于緩慢譜和調相的极限情况	(206)
§ 6.7	無線電話調頻时頻譜中功率的分佈	(211)
§ 6.8	無線電話的調頻. 通解的研究	(215)

第 七 章 調幅振盪通过諧振系統的情况

§ 7.1	通論	(222)
-------	----	---------

§7.2	調幅振盪通过单个振盪回路的情况	(226)
§7.3	多級諧振式放大器	(232)
§7.4	对称失諧的回路	(235)
§7.5	帶通濾波器	(239)
§7.6	迭加定理在求定包跡上的应用	(241)
第 八 章	求定綫性系統中信号畸变的拟稳状态法	
§8.1	將傳輸系数分解为冪級数的求解法	(248)
§8.2	諧和电动势的情况	(251)
§8.3	將通解应用于单位阶跃的电动势	(257)
§8.4	將通解推广于已調振盪	(259)
§8.5	求定 $Y(i(\omega_0 + \Omega))$ 分解为冪級数时的各个系数	(262)
第 九 章	調頻振盪通过綫性系統的情形	
§9.1	通論	(265)
§9.2	通解	(268)
§9.3	瞬时频率法在計算諧和調頻的畸变时的应用	(273)
§9.4	求定当电动势频率擺动时調諧系統輸出端振幅的包跡	(280)
§9.5	具有擺动频率的电动势对于“极限”傳輸系数的选择 性 系統的作用	(288)
§9.6	脈冲式調頻	(291)
第 十 章	高頻傳輸綫的瞬变現象	
§10.1	概述	(299)
§10.2	接入任意电压时的入射波	(303)
§10.3	波在綫終端的反射	(306)
§10.4	电波在有限长度綫上的多次反射	(311)
§10.5	終端短路綫的建立状态	(313)
§10.6	开路綫的建立状态	(318)
§10.7	以短路綫作为負載的饋綫的建立状态	(319)

附录 I 附录 II

参考文献