潜在抗干扰性理论

柯捷里尼可夫著

科学出版社

譯 者 序

苏联科学院院士、苏联科学院无綫电与电子学研究所所長符拉基米尔·亞历克塞多罗維奇·柯捷里尼可夫（Владимир Александрович Котельников）在通信理論方面的貢献是世界知名的。

約在 30 年之前，随着无綫电技术的发展，无綫电台的数目大大增加，为了避免电台間的相互干扰，曾严重地产生过所謂“节省以太”即要求經济地使用帶寬的技术問題，而通信理論也就在解决这些实际問題的基础上产生和发展起来。

1933 年，柯捷里尼可夫在其著作“論电气通信中以太及导綫的傳信率”一文中，首先提出將信号分为离散的和連續的二类，并証明了，存在于时間 T 内的連續函数 $f(t)$，假如不包含高于 F 赫芝的頻率分量，那么，这函数完全由 $2FT$ 个相互正交的离散值来决定。后面这一原理称为柯捷里尼可夫定理，是現代通信理論的基础；它实际上建立了連續消息和离散消息統一的观点，奠定了至今还被广泛使用的离散化原則的基础。在同一著作中，柯捷里尼可夫还确定了，通信波道帶寬和功率可以互換这一重要关系。假如按照这种思想发展下去，就可以得到和这类似的交換关系，建立現代通信理論中功率、持續期和帶寬可以相互替換的原理。

1935 年之后，大約在 10 年前左右的时間里，随着超短波无綫电技术的发展，各种寬頻帶的調制形式都被提了出来。調制形式的繁多，使人們难于弄清楚，到底哪种調制方法才算最好？而且，又是否还有更好的調制方法呢？为了解决这些問題，就要求創立新的理論。

1946 年，柯捷里尼可夫的博士論文“起伏干扰下的潛在抗干扰性理論”，1947 年发表的“无綫电通信中的抗干扰問題”，以及 1956 年重新发表的“潛在抗干扰性理論”（即本書）等著作中，作者首先提出了潛在抗干扰性这一概念，并系統地奠定了潛在抗干扰

性的理論。

通信系統的抗干扰性，一般是指它对干扰这一有害作用的抵抗能力，即在自然或人为干扰存在时，接收机保証正常接收有益信号的能力。显然，在干扰的种类及消息的統計特性已經給定时，这种能力决定于系統的傳輸方法和接收机的結構，即实質上决定于系統的調制和接收方法。潛在抗干扰性是接收設备能够得到的、可能中最大的抗干扰性。能够保証获得潛在抗干扰性的接收机称为理想接收机。显然，調制方法相同时，不同的接收机具有不同的抗干扰性，而理想接收机所获得的抗干扰性則是这些数值中最大的一个，因此，潛在抗干扰性代表着这种調制方法的特性。另外，調制方法不同，傳輸系統所具有的潛在抗干扰性的数值也就不同。因此，利用潛在抗干扰性这一理論，我們可以对各种調制和接收方法在理論上进行評价，比較它的优缺点，指出它在实际上还存在的潛力。利用这一理論，我們还可以寻找出，影响潛在抗干扰性的基本因素，并拟定出提高通信系統的潛在抗干扰性的方法。

潛在抗干扰性这一理論的制定，是通信理論、特別是抗干扰性理論的重要发展。我們知道，在現今的通信技术和理論中，存在着二个相互矛盾的基本問題，即效率和可靠性亦即抗干扰性的問題。“潛在抗干扰性理論”一書的意义，就在于書中所奠定的理論可用来衡量各种通信系統的可靠性。并且，从原理上說来，当波道輸入端的信息量給定时，这理論可以求出接收机輸出端可能得到的最大信息量，換句話說，利用这一理論可以求出已知的通信系統的效率。因此，潛在抗干扰性理論成为通信理論的重要組成部分，而本書在通信理論的发展上也具有巨大的意义。

“潛在抗干扰性理論”一書，运用了一系列具有实际意义的例子来闡明这一原理。但正如作者所指出的，書中所发揮的研究抗干扰性的方法，还沒有运用到一切可以运用的场合中去。另外，还应当指出，作者在書中所导出的、表征起伏干扰和它的其他特性的关系式，对于理論研究和实际运用都极为方便；書中采用多維空間矢量来对无綫电現象进行几何解释的方法，对通信理論也很重要。

因此研究和推广書中所发揮了的方法,具有巨大的实际意义。

由于通信理論方面的許多术語,中文中还沒有統一起来,因此,本翻譯本中的某些專門名詞是譯者所杜撰的。显然,这些名詞的翻譯不見得都很恰当。为了便于大家对这方面的名詞进行討論,并使讀者閱讀原文容易起見,特在書后編一华俄术語对照表。

最后譯者对本書翻譯过程中曾鼓励和帮助过我的同志們,特別是作者本人对本書翻譯的热心支持,表示衷心的感謝。由于譯者才疏学淺,錯誤之处,敬請讀者批評指正。

譯　者　1958年春节于西安。

原　　序

本著作是作者的博士論文，它在1947年1月为莫斯科动力学院学术委員会所审閱。

尽管从本論文发表以来，已有很多討論抗干扰性的論著，但并非論文中所提到的全部問題，都已在現今的刊物中得到闡述。考慮到对这些問題的巨大兴趣以及刊物中經常提到本著作，作者認为不加任何补充地发表本著作是恰当的。整理手稿付印的时候，只因去掉了次要材料而使本文略有压縮。此外，为了容易閱讀起見，第二章的輔助材料也作了某些修改，并把一部分材料放在附录里。

作　者

目　录

第三篇　参数独立值的傳輸

第四篇　振盪的傳輸

第一篇　輔助材料

第一章　緒　　論

1-1. 抗干扰的方法

通常作用于接收机，除了来自发射机的被接收振盪(信号)外，还有来自各种不同来源的振盪(干扰)。干扰迭在信号上使它发生畸变，在通报时产生錯誤接收，通話时产生噪声、嘯声等等。和干扰相比，信号显得太弱时，接收就变为不可能。

下列抗干扰的方法可以利用：

1. 用直接影响干扰来源的方法，来减低干扰强度；

2. 用增加发射机功率及采用定向天綫的方法，来提高信号对干扰的比值；

3. 改善接收机；

4. 为了容易和接收机中的干扰作斗争起見，在功率不变的情况下，改变信号的形式。

前二种方法本書不作研究，它討論后二种方法。它的目的是闡明：在現有的信号形式下，改善接收机是否可能减輕干扰的影响？和干扰作斗爭时，改变信号的形式能得到些什么？而怎样的信号才是最佳的？

1-2. 干扰的分类

无綫电接收机的干扰可以分为下列几类：

A. 正弦波干扰是一个或有限个但一般数目不多的正弦波振盪。屬于这类干扰的有来自无綫电台的寄生輻射，或来自工作于接收頻率鄰近的无綫电台的干扰。

B. 脈冲干扰是一連串單独的脈冲，二个脈冲的时間間隔很

大，致使后一脈冲到来时，前一脈冲在接收机中引起的非稳定現象，实际上已完全停息。应列入这类干扰的有某些类型的天电干扰和电气仪器干扰。

C. 正态起伏干扰[1]或者有时称为平滑干扰，它也是由單独的脈冲組成的。但一个脈冲跟随另一个脈冲經过随机的时間間隔頻繁地发生，使得大批單独脈冲在接收机中引起的非稳定現象相互迭加，以致概率論中的大多数定律对它們都适用。列入这类干扰的有眞空管噪声，由于电子在迴路中的热騷动而引起的噪声，某些类型的天电干扰及电气仪器干扰。在超短波波段内，几乎无例外地会遇到这类干扰。

D. 中間类型的脈冲干扰是由單独脈冲在接收机中所引起的非稳定現象虽然相互迭加，但沒有达到这样大的数目，以致对它們使用大多数定律都具有足够的准确度。这种干扰的情形是介乎B、C二种情形之間。

正弦波和脈冲干扰对无綫电接收机的作用的研究方法，現在已經很好的被拟制出来了。

当中間类型的脈冲干扰发生时，由各單独脈冲所引起的非稳定現象，开始相互迭加，而研究就极端困难起来。另外，这时不仅需要知道各單独脈冲的形狀，而且还需知道时間上作这样或那样分布的各种不同形狀脈冲的組合概率。在大多数场合，我們沒有关于这些干扰的数据，而要获得它們經常都相当困难。

根据这个原因，且由于C类干扰經常遇到，我們在以后將只研究这类干扰，并常常把正态起伏干扰簡称为干扰。

1-3. 消息与信号

我們指的消息是需要被傳輸的东西。

我們將研究的消息分为三类：

---

1) 我們用“正态”一詞在于强调这种情况，但在这里我們只討論各种可能中的一种起伏振盪。

A. 离散消息.

B. 消息是(参数的)独立量的形式，它可以在某一极限內取任意值.

C. 消息是振盪形式它可以是連續变化的各种形式的无数个量.

屬于离散消息这一类的，有通电报时傳輸的消息。这时它由个别字母、数字、符号所組成，而它們可以取有限个离散值。在好些情况下，列入这类消息的还有遙远控制时被傳輸的消息：

借助遙远測量而傳輸独立的測量結果时，消息是某些参数的数量，例如經一定时間間隔而測量出来的温度、压力等等。这些数量通常可以在某一极限內取任意值。因此这时不能把各种可能的离散消息局限于有限个数目里。这种消息应归入B类。

在通話时，消息是声音振盪或来自微音器的电振盪，它們可能是各种形式的无限数集。这种消息將归入C类。

傳送电視时，进入无綫电发射机的振盪可以作为消息。这种消息也归入最后一类。

我們將認为，作用于接收机輸入端的是某一个由于发射机工作而产生的电压振盪。这种电压振盪我們曾称之为**信号**。显然，被傳輸消息的每一个可能值都將和自己的信号一一对应。而接收机必須根据这个电压振盪(信号)复制出与这信号相对应的消息来。

1-4. 本書內容

我們在本書中研究正态起伏干扰对消息傳輸的影响。

我們給自己提出的任务可归述如下：

設在信号上不迭上干扰振盪时，接收机便准确地复制已被傳輸的消息。假如干扰迭加在信号上，那么，作用于接收机輸入端的將是合成电压，等于信号电压加干扰电压。这时，接收机根据合成电压复制出某种消息，但現在它可能和已被傳輸的消息有所不同。

显然，每一个作用于接收机的合成电压都將对应一个确定的消息，同时这消息將被复制出来。

这种对应在各种不同的接收机可能是不同的。依据这种对应的不同，在給定的傳輸形式下，接收机將程度不同地受到干扰的影响。我們將求出，为了使消息的畸变最小，这种对应应当是怎样的？我們將把在其中，这种最好的对应已經实現的接收机，称为**理想接收机。**

其次，我們要确定，用理想接收机接收时，由于干扰迭在信号上而产生的消息畸变。

在給定的条件下，这时所得到的畸变將是**可能中最小的。**

实际的接收机，在同样条件下，畸变不可能更小。

我們把代表这种可能中最小畸变特性的抗干扰性称为**潛在抗干扰性。**当接收机近乎理想时，可以达到这种抗干扰性，但不可能超过它。

把某些实际的接收机能够保証的抗干扰性与潛在抗干扰性相比較，就可以判断这接收机能完善到什么程度。改善了它，抗干扰性还能提高多少，卽是說，在給定的傳輸方法下致力于提高抗干扰性，到底合理到什么程度。

知道了潛在抗干扰性，就容易发現并拋棄那些和别的方法相比，它們的这种抗干扰性很低的傳輸方法。完全不用涉及接收方法就可以这样做，因为实际接收机能保証的抗干扰性，不会比潛在的还大。

我們在后面將会看到，比較各种傳輸方法的潛在抗干扰性，就能很容易弄清楚，潛在抗干扰性和哪些基本因素有关，并可以寻找出提高它的途徑。

書中用一系列具有实际意义的例子来闡述这些原理。但是，被研究的那些例子，还沒有把書中所发揮的研究抗干扰性的方法，运用到一切可能运用的场合中去。

为了明显起見，書中的全部問題都运用无綫电接收机来加以研究。但是，全部講述的内容可以直接运用于其他領域，如有綫通信，声学的和水声学的通信等等。

为了明显和确定起見，書中还把信号和干扰振蕩看作是电压

振盪来加以研究。但是，假如用电流振盪声压或任何其他作用于接收机的振盪来代替电压振盪，情况將毫不改变。

本書沒有考虑不規則的信号畸变，而它們可能极厉害地影响无綫电接收机的工作及其抗干扰性。可以归入这类畸变的有衰落現象，回波現象等等。不应当忘記，为了簡單起見，本書今后把“干扰”一詞了解为正态起伏干扰，而且也只研究这种干扰。

第二章　数学輔助材料

2-1. 若干定义

为了簡化今后敍述，我們將引入若干定义。

我們使被研究的一切振盪都在区間 $-\frac{T}{2}$、$+\frac{T}{2}$ 内，很明显，只要把 T 取得足够的大，这点总是可以做到的。

我們用

$$\overline{A(t)}=\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}}A(t)dt \tag{2-1}$$

表示振盪 $A(t)$ 在区間 T 内的**平均值**。

我們把函数 $A(t)$ 和 $B(t)$ 在区間 $-\frac{T}{2}$、$+\frac{T}{2}$ 内的乘积的平均值叫做这二函数的**数积**。因此，数积等于：

$$\overline{A(t)B(t)}=\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}}A(t)B(t)dt. \tag{2-2}$$

显然，从定义得：

$$\overline{A(t)B(t)}=\overline{B(t)A(t)}. \tag{2-3}$$

其次有

$$\overline{A(t)[B(t)+C(t)]}=\overline{A(t)B(t)}+\overline{A(t)C(t)} \tag{2-4}$$

和

$$\overline{[aA(t)][bB(t)]}=ab\overline{A(t)}\ \overline{B(t)}, \tag{2-5}$$

这里 a 和 b 是某些常数。

所以函数数积和矢量数积具有完全一样的特性。这时常数代替了数量，函数代替了矢量。

我們采用符号：

$$\overline{A^2(t)}=\overline{A(t)A(t)}=\frac{1}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}}A^2(t)dt. \qquad (2\text{-}6)$$

以后常常遇到表达式

$$T\overline{A^2(t)}=\int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}}A^2(t)dt. \qquad (2\text{-}7)$$

我們把这个数量叫做振盪 $A(t)$ 的**能量密度**。它等于作用在 1 欧姆电阻上的电压为 $A(t)$ 伏特时所消耗的能量。

我們把量

$$\sqrt{\overline{A^2(t)}} \qquad (2\text{-}8)$$

称为振盪 $A(t)$ 的**有效值**。

有效值等于 1 的函数称为**單位函数**。

若二函数只是常数因子不同，那么我們把它們叫做**同向的**。

显然，和函数 $A(t)$ 同向的單位函数等于：

$$\frac{A(t)}{\sqrt{\overline{A^2(t)}}}. \qquad (2\text{-}9)$$

若除 $i=l$ 外，$i=1, 2,\cdots, n$ 及 $l=1, 2,\cdots, n$ 时有

$$\overline{A_i(t)A_l(t)}=0 \qquad (2\text{-}10)$$

那么，我們說，函数 $A_1(t)$，$A_2(t),\cdots,A_n(t)$ 相互**正交**。

2-2. 函数的單位正交函数綫性表达式

若函数組

$$C_1(t), C_2(t), \cdots, C_n(t) \qquad (2\text{-}11)$$

满足方程式

$$\overline{C_k^2(t)}=1,\tag{2-12}$$

$$\overline{C_k(t)C_l(t)}=0,\tag{2-13}$$

其中 $k=1, 2, \cdots, n$; $l=1, 2, \cdots, n$; $k\neq l$, 那么我們把它叫做**单位正交函数組**。

$$\left.\begin{aligned}
I_0(t)&=1,\\
I_1(t)&=\sqrt{2}\sin\frac{2\pi}{T}t,\\
I_2(t)&=\sqrt{2}\cos\frac{2\pi}{T}t,\\
I_3(t)&=\sqrt{2}\sin 2\frac{2\pi}{T}t,\\
I_4(t)&=\sqrt{2}\cos 2\frac{2\pi}{T}t,\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
I_{2m-1}(t)&=\sqrt{2}\sin m\frac{2\pi}{T}t,\\
I_{m}(t)&=\sqrt{2}\cos m\frac{2\pi}{T}t,
\end{aligned}\right\}\tag{2-14}$$

就是这种函数組的例子，因为对于这个函数組，当 $k\neq l$ 时，关系式

$$\overline{I_k^2(t)}=1,\tag{2-15}$$

$$\overline{I_k(t)I_l(t)}=0$$

成立。

我們称函数 $A(t)$ 可以用函数組

$$C_1(t), C_2(t), \cdots, C_n(t)\tag{2-16}$$

綫性表示出来，假如可以写成

$$A(t)=\sum_{k=1}^{n}a_kC_k(t),\tag{2-17}$$

且某些 a_k 可以等于零。

設函数(2-16)是單位正交函数，那么，用 $C_l(t)$ 和 (2-17) 等式二端作数积，根据方程式(2-12)和(2-13)幷去掉括号，我們得：

$$\overline{A(t)C_l(t)}=a_l. \tag{2-18}$$

系数 a_k 叫做函数 $A(t)$ 在函数組(2-16)中的坐标。显然，函数組(2-16)給定时，函数 $A(t)$ 完全由 n 个坐标 $a_1, \cdots, a_n$ 所确定。

在个别情况下，若取函数組(2-14)为單位正交函数，則得：

$$A(t)=\sum_{l=0}^{\infty}a_l I_l(t), \tag{2-19}$$

这里

$$a_l=\overline{A(t)I_l(t)}. \tag{2-20}$$

級数(2-19)是函数 $A(t)$ 在区間 $-\frac{T}{2}$、$+\frac{T}{2}$ 内的富里埃級数一般展开式。同时根据(2-14)頻率为 $\frac{m}{T}$ 的余弦振幅是 $\sqrt{2}\,a_m$，而正弦振幅是 $\sqrt{2}\,a_{m-1}$。

假如振盪 $A(t)$ 是信号，那么，和(2-19)通常可以只取有限个項，比如从号碼 l_1 取到 l_2，因为在某一頻率范圍外的信号分量，照例將小到被工作于鄰近頻率的信号和干扰所掩盖。

这时

$$A(t)=\sum_{l=l_1}^{l_2}a_l I_l(t). \tag{2-21}$$

設函数 $A(t)$ 在函数組(2-16)中的坐标是 $a_1, \cdots, a_n$，函数 $B(t)$ 在同一組中的坐标是 $b_1, \cdots, b_n$，那么，利用方程式(2-12)和(2-13)并拆去括号，我們不难得到：

$$\overline{A(t)B(t)}=\overline{\left[\sum_{k=1}^{n}a_k C_k(t)\right]\left[\sum_{k=1}^{n}b_k C_k(t)\right]}=\sum_{k=1}^{n}a_k b_k. \tag{2-22}$$

由此，在个别情况下得：

$$\overline{A^2(t)}=\overline{A(t)A(t)}=\sum_{k=1}^{n}A_k^2. \tag{2-23}$$

若 $C(t)$ 是某一坐标为 $c_1, \cdots, c_n$ 的單位函数，那么

$$\sum_{k=1}^{n}c_k^2=1. \tag{2-24}$$