

頻率分析、調制和噪聲

S. 格德曼

科學出版社

頻率分析、調制和噪聲

S. 格德曼 著

杜連耀 譯

科學出版社

1962

STANFORD GOLDMAN
FREQUENCY ANALYSIS,
MODULATION AND NOISE

McGRAW-HILL

1948

內 容 簡 介

本书分三部分順序地討論了无綫电工程中的几个重要問題——頻率分析、調制和噪声，著者从傅立叶級数和傅立叶积分开始推导了重要的公式并討論了它們在頻率分析中的应用，最重要的如迭加原理，傅立叶能量积分定理、稳定相位原理、視頻和脉冲放大器的帶寬与細致性、冲量函数、交互分散、及对称边带和反对称边带等。然后又討論調制問題的基本原理，并比較各种不同的調制中的噪声数量，还討論了共用信道及相邻信道中的干扰等。最后从实际出发分四段討論了噪声問題，第一段介绍了各类型的噪声、它們在电路中的影响、噪声评价和噪声因数等。第二段简单地介绍了概率理論、各类型的分布及其迭加、及无規噪声等。第三段討論二极管、三极管、及多极管中的顆粒噪声，第四段从热力学的基本定律出发討論热噪声并推导乃氏的热噪声公式。

本书适宜于作为高等学校的教学参考用书并可供研究人員和工程师做参考之用。

頻 率 分 析、調 制 和 噪 声

S. 格 德 曼 著

杜 連 耀 譯

*

科 学 出 版 社 出 版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1962 年 8 月 第 一 版

1962 年 8 月 第一次印刷

(京) 0001—6,500

书号: 2566 字数: 348,000

开本: 850×1168 1/32

印张: 13 3/8

定价: 2.00 元

引 言

数学现象 人們都知道有物理现象、生物现象和許多其他自然现象。然而比較少的人认为数学也有它的现象。大部分的人想数学只是表达思想的一个簡洁和确切的方法,即一个縮簡的語言。更具体些,用数学語言表达思想是把思想系統化的速写法、它肯定不鼓励不严密的思想而鼓励定量的工作。然而,如果数学只限于用做語言,它将永远不会脱离幼稚状态而成为科学的工具。数学的主要重要性在于某些数学现象的存在和它的用处。

对于数学现象这一观点的一个簡短的討論是需要的。例如考虑傅立叶級数展开,任何任意的周期函数可以証明它含有一个簡單的正弦波和具有适当相角的諧波。这是数学现象的事实。虽然它的真理能被証明,但它必須被发现。它不是把数学当做縮簡的語言的結果。我們將有許多机会証明这个特殊的数学现象在无线电工程中非常有用。

遵守实数量的代数定律的复数量的存在是另一个数学现象。它們在无线电工程中的应用虽不如傅立叶分析明显,但一旦成立,它們的重要并无逊色,如阻抗概念的广泛应用所給予的佐証。

学生可能問微分和积分处理数学现象到如何广而不是用一般的邏輯。要澄清这一情况可以指出导数和积分的存在一般来自单独的邏輯思考;但是簡單函数的微分和积分也是簡單的函数这一事实,是微积分有用性的基础。很明显地它是一数学现象。

在未来的年代里,无疑地将发现在无线电中应用的新数学现象,同样也将出現已知的数学现象的新应用。然而可以应用于无线电中的一个数学宝藏已經知道了,其中的某些部分将首先是本书的题材然后是工具。

数学中的严格性和能动性 近代数学建立在邏輯基础之上，其深度是巨大的。这一类的彻底的分析叫做严格的数学。

在人类的思维中，严格的数学有它可贵的正确的位置。然而曾明智地指出普通人使用数学时能动性比严格性更重要。特别在这一卷内，所用严格性的多少取决于一个无线电工程师为彻底了解手中的问题时需要。但是当严格性对于一个工程师显得是混乱而不是澄清一个问题时，我们将信任纯粹数学家用严格的方法所得结果的正确性，而不管严格性证明的背景。

无线电欠数学的债 虽然无线电工程师通常不体会，但无线电的存在有赖于数学。1866年，英国科学家馬克司威尔証明电磁场的微分方程要符合时，在空間必須存在着所謂“位移电流”。因而得到用他的名字命名的一组微分方程。解这些方程式他能預知应该有电磁辐射存在。馬克司威尔的这些推論是其後20年中很多科学的爭論的題目。在1886—1888年赫茲从事一个精密的實驗方案来証明馬克司威尔的数学推論，在历史上那是第一次产生了并收到了无线电波。

本书的目的 虽然这本书的語言和方法是数学的，但它的根本目的不是教数学而是要說明并澄清无线电中的某些領域。数学只用做达到这个目的的工具。然而巧遇的是对于手中的問題，数学是一个如此有力的工具，值得用几章来发展学生的数学知識和技巧。

目 录

引 言	iii
第一章 傅立叶级数	1
1.1 引言	1
1.2 傅立叶系数的值	3
1.3 傅立叶展开的一些例题	5
1.4 周期函数的傅立叶展开	8
1.5 奇函数与偶函数	9
1.6 展开中只含奇数或只含偶数谐波的函数——对称性	11
1.7 一函数的对称分析	14
1.8 展开式区间的改变	15
1.9 傅立叶级数的复数形式	19
1.10 例	21
a. 方形波	21
b. 任意长的脉冲	22
1.11 用两个函数的傅立叶常数表示它们乘积的平均值	25
1.12 傅立叶级数的收敛——微分与积分	27
1.13 谐波分析——吉布斯现象	28
1.14 进一步的讨论	30
第一章的基本公式	31
第二章 傅立叶级数在无线电中的应用	33
2.1 全波整流器	33
2.2 饱和的放大器	35
2.3 二次方及高次畸变项所产生的谐波——和音与差音	40
2.4 推挽放大器	42
2.5 用谐波含量表示电流与功率耗损的有效值	44
2.6 关于畸变的一些普通的考虑	45

第三章 傅立叶积分	49
3.1 傅立叶积分公式的起源	49
3.2 频率分布的例	51
3.3 傅立叶积分的复数形式——傅立叶偶对	54
3.4 矩形脉冲的频率分布	56
3.5 奇函数与偶函数	58
3.6 傅立叶偶对的表	61
基本公式	62
第四章 傅立叶积分分析在无线电中的应用及其物理意义	64
4.1 引言	64
4.2 频率分布与选择线路——畸变	64
4.3 无畸变的传输	65
4.4 一个系统的传输特性的负频率及对称性	67
4.5 视频及脉冲放大器的带宽和精细性	68
4.6 傅立叶积分分析的迭加原理	77
4.7 视频和脉冲放大器的带宽和精细性——带宽的要求	80
4.8 中频放大器中的带宽和精细性——对称边带的情形	83
4.9 中频放大器中的带宽和精细性——非对称边带的情形, 90 度分量	87
4.10 无信号时载波电平不为零的情形	94
4.11 获得最好信号噪声比的脉冲接收机的最佳传输频带	95
4.12 畸变理解为成对的回声	98
情形 I 一次振幅畸变	99
情形 II 一次相角畸变	101
情形 III 混合的, 一次振幅和相角畸变	103
一般情形的讨论	104
4.13 能量的傅立叶积分定理	105
4.14 稳定相位原理	107
4.15 稳定相位原理的应用的实例	109
a. 信号的位置	109
b. 无畸变传输	110
c. 畸变的偶对回声	110
d. 频率分量的谱的分布	111

4.16	以群速度行进的信号	112
4.17	视频与脉冲放大器相位特性的标准	114
a.	精细性的标准	114
b.	边缘清晰的标准	117
4.18	阶梯和冲量函数	119
a.	阶梯函数	120
b.	一般的冲量函数	121
c.	高次冲量	126
4.19	傅立叶偶对的进一步讨论	127
a.	锐截止的影响	128
b.	交互分散	130
c.	能量存贮与选择性	131
4.20	结论	135
4.21	传记註解	135
第五章	调制	137
5.0	引言	137
5.1	调幅	137
a.	基本定义	137
b.	谱及能量分布	139
c.	振幅调制的信号的生命史	141
5.2	角调制——调频与调相	141
a.	基本定义	141
b.	谱及能量分布	144
c.	FM 和 PM 信号的生命史	148
5.3	两个或多个频率分量同时调制	150
a.	边带	150
b.	调制度	151
5.4	调谐振动的迭加	152
a.	同频率振动的迭加	152
b.	不同频率振动的迭加——和的振幅及相角调制	155
c.	稳定状态中周期的持久性	156
5.5	FM 和 AM 中共用信道干扰的比较	157
5.6	对称和非对称边带的分布	161

a. 引言	161
b. 对称及反对称边带 同相及 90 度分量	162
c. 任意一个非对称边带分布可表示为对称与反对称偶对的和	165
d. 干扰理解为非对称边带分布	169
e. 非对称边带分布和电视传输	170
5.7 用矢量理解调制	176
5.8 用矢量讨论一般的干扰问题	178
5.9 FM 中相邻信道的干扰	180
5.10 AM 中相邻信道的干扰	182
a. 载波的拍及猴语	182
b. 强信号对弱信号的掩盖	183
5.11 对于调制的畸变的一些普通的考虑	185
a. 调幅中的畸变	186
b. 调频中的畸变	188
c. 选择性的衰落(多路接收)	189
5.12 亚载波及脉冲调制	192
5.13 通論	193
第六章 噪声 I: 一般的与实用的讨论和噪声问题的解	196
6.0 引言	196
6.1 无规噪声的一般特性	196
6.2 噪声的类型	197
a. 引言	197
b. 闪烁效应	198
c. 接触和击穿噪声	199
d. 污垢噪声和颗粒大小噪声	199
e. 真空中起源于原子的意外的噪声	199
f. 大气噪声, 星际干扰等	200
g. 非无规噪声	201
6.3 热噪声	202
a. 基本公式	202
b. 第一个例	203
c. 第二个例	204

d. 无規噪声对一个載波的振幅和頻率調制	205
e. 热噪声电压的迭加——不同的計算方法	206
f. 在同溫度时从电阻到电阻間沒有功率傳輸	209
g. 具有不同溫度的元件的电路	210
6.4 等效电流-和电压-发生器的表示法	211
6.5 顆粒效应	213
a. 引言	213
b. 溫度限制情形中的顆粒效应	213
c. 电流发生器的表示法和板极阻抗的旁路作用	214
d. 运用于空間电荷控制区	214
e. 变换为等效輸入电阻值	215
f. 多极电子管中的顆粒效应	216
g. 变频管內的顆粒效应	219
h. 等效柵极噪声电阻公式	221
6.6 磁起伏噪声	224
6.7 接收机噪声	224
a. 第一电子管是变频管	224
b. 具有射頻放大器的超外插	225
c. 天綫噪声及天綫与第一电子管的輸入的最佳耦合	228
6.8 噪声与噪声加信号的測量及輸出特性	232
a. 通論	232
b. 噪声和噪声加载波的包綫	233
c. 綫性检波內的整流輸出及低頻輸出	235
d. 平方傳輸系統, 特別是平方定律检波器	239
6.9 噪声的計量和噪声因数	239
a. 引言	239
b. 信号的噪声的計量	240
c. 等效噪声边帶輸入	241
d. 一些初步的定义	242
1. 可得信号功率	242
2. 可得功率增益	242
3. 有效帶寬	243
4. 可得噪声功率	243

e. 一个网路的噪声因数	244
f. 噪声因数的测量	244
g. 噪声发生器	245
h. 两个或更多电路串联的噪声因数	246
i. 用串联网路测量噪声因数	248
j. 噪声因数做为噪声品质的衡量	249
k. 一接收设备的“绝对灵敏度”或“场强灵敏度”	250
l. 传输系统的噪声评价	252
6.10 使输入电导可察觉时的频率的噪声	253
a. 引言	253
b. 线性整流器的转换电导	254
c. 超高频变频管	255
d. 因为阴极导线电感所生的输入负载	257
6.11 频率调制中噪声的减低	258
a. 引言	258
b. 无规噪声的降低	260
c. 冲量噪声的降低	262
d. 改进阈和 FM 致静	267
e. 脉冲调制系统中的噪声降低	269
f. 关于改进阈的一些一般事实	272
第七章 噪声 II: 基本数学现象	274
7.0 引言	274
7.1 排列和组合——二项式系数	274
7.2 概率	276
7.3 概率理论的数学推导	277
7.4 柏努利分布定律	278
a. 推导	278
b. 柏努利分布的平均值	280
7.5 柏松分布	281
a. 推导	281
b. 柏松分布的第一个例——投掷文钱	282
c. 柏松分布的第二个例——热电子发射	283
7.6 高斯分布	284

7.7 分布公式的討論	287
a. 产生峯值的原因	287
b. $P_m(n)$ 的简单的意义	288
7.8 起伏的第一个討論	290
7.9 两个或更多的概率分布的迭加	294
7.10 大数和連續分布的通用迭加定理	297
7.11 等同函数的概率分布	299
a. 引言	299
b. 低頻范围中的平方含量	300
c. 高頻范围中的平方含量	305
d. 总的綫性和平方含量	306
7.12 不同类型的函数的概率分布的迭加	308
7.13 正常分布	310
7.14 无規噪声	312
a. I_q 的分布函数	312
b. 无規噪声的定义	314
c. 无規噪声振幅的分布函数	315
d. 低頻組合原理	315
e. 証明无規噪声振幅的組分布也是一个時間分布	316
f. 人为的无規噪声	318
g. 迭加定律	318
7.15 在正常分布中当維次增多时总和的值圍繞平均值的拥挤	319
7.16 同源性	320
7.17 噪声信号和噪声加载波信号的包綫	323
a. 噪声	324
b. 噪声加载波	325
7.18 噪声和噪声加载波信号整流后包綫的綫性和低頻平方含量 (綫性检波)	327
7.19 平方傳輸系統对无規噪声和噪声加载波的包綫的作用 (平方定律检波)	332
7.20 有限长久的信号中傅立叶諧波与頻率組成間的关系	334
7.21 总論	339
第八章 噪声 III: 顆粒效应	340

8.1	引言	340
8.2	热电子发射和空間电荷效应	340
8.3	二极管內温度控制时的顆粒效应	343
8.4	空間电荷对顆粒噪声的降低	345
8.5	电流发生器的表示法和內部阻抗的旁路效应	348
8.6	三极管內的顆粒效应	349
8.7	多收集电极电子管內的顆粒效应	350
8.8	越渡時間重要时的頻率的顆粒效应	356
a.	引言——温度控制的二极管	356
b.	空間电荷控制的二极管	357
c.	負栅极三极管內板流起伏所感应的栅流起伏	358
d.	电子越渡時間对栅极阻抗的影响	360
e.	栅极感应顆粒效应	362
8.9	磁起伏噪声	364
第九章	噪声 IV: 热噪声	368
9.1	热力学的两个定律	368
9.2	热力学的結果的統計的理解	369
9.3	均分定理	370
9.4	热噪声——引言	371
9.5	奈奎斯特热噪声公式的推导	374
9.6	热噪声是导电电子的起伏噪声	380
9.7	热噪声的进一步的討論	383
a.	复杂网络中奈奎斯特公式的一致性	383
b.	电抗不产生热噪声	384
c.	热噪声上迭加直流或信号	385
d.	綫路中不同的温度部分	386
9.8	热噪声与輻射电阻	386
附录		389
A.	主要符号, 标志及縮写表	389
B.	积分式簡表	394
C.	三角函数等式表	399
D.	傅立叶偶对例样表	402
E.	拜赛尔函数	403
F.	第一类常积分宗数变积分次数的拜赛尔函数表	408

第一章

傅立叶級数

1.1 引言 有一数学现象或許比其它数学现象更广泛地用于无线电工程中,即傅立叶級数展开现象.它的重要是如此基本甚至許多人从未听说过傅立叶級数,然而却知道它的最突出的特性——諧波的存在.在这一章和下一章內,我們將推导傅立叶級数的理論并学习如何用它去解无线电中各样的問題.

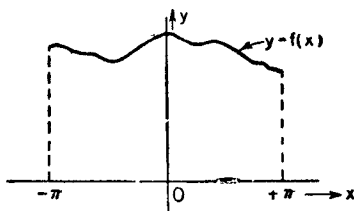


图1 确定在 $-\pi$ 至 $+\pi$ 区間的函数

引用傅立叶級数所根据的最基本的事实是确定在 $-\pi$ 至 $+\pi$ 区間的任何¹⁾函数 $f(x)$ (见图1)可展开为一三角函数的級数如

$$\begin{aligned} f(x) = & \frac{a_0}{2} + (a_1 \cos x + b_1 \sin x) + (a_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x) + \\ & + (a_3 \cos 3x + b_3 \sin 3x) + \cdots + \\ & + (a_n \cos nx + b_n \sin nx) + \cdots \end{aligned} \quad (1)$$

或写成比較簡縮的形式

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (1a)$$

級数中的一些 a 和 b 是常数,我們即将决定它們的数值.方程(1)及(1a)右方的正弦和余弦級数就是傅立叶級数.

虽然在这里我們不証²⁾,但可以証明只要 $f(x)$ 在 $-\pi$ 至 $+\pi$ 的

1) 除非在工程中不重要.

2) 在許多函数論的教課书中都有証明,例如卡尔斯劳(H. S. Carslaw)著的“Theory of Fourier Series and Integrals”中第七章,或惠特克和瓦特森(Whittaker 和 Watson)著的“Modern Analysis”中第9.42节.

区間有有限个間断和有限个最大及最小,同时

$$\int_{-\pi}^{+\pi} |f(x)| dx$$

为有限,則傅立叶展开永远是可能的。此函数在这区間内不一定用一个单一的方程表示出来。因此图 2 所示的函数即从 $-\pi$ 到 0

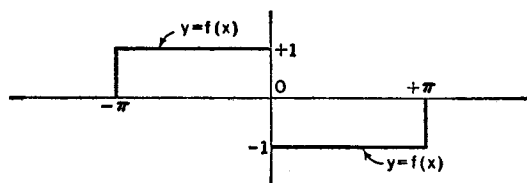


图 2 一个方形波函数

时 $f(x) = 1$, 从 0 到 $+\pi$ 时 $f(x) = -1$, 极易用傅立叶級数表示之。与泰勒(Taylor)級数展开相比, 有較广泛的函数可能展开为傅立叶級数, 因为函数的泰勒級数展开要求函数及函数的各次微商为連續的。

應該指出, 若是只有一个不連續点, 如图 3 中所示的 B , 則傅

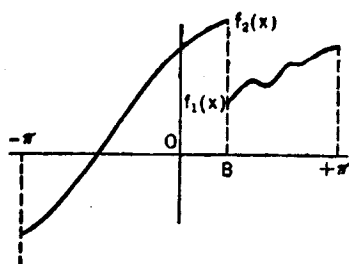


图 3 在 $x=B$ 处有一不連續点的函数

立叶級数将收敛为

$$\frac{1}{2} [f_1(x) + f_2(x)]$$

$f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 是从正的方向与負的方向趋近于 B 时, 函数的两个不同的数值。此外, 当 $x = +\pi$ 和 $x = -\pi$ 时, 傅立叶級数收敛为

$$\frac{1}{2} [f(+\pi) + f(-\pi)]$$

若 $f(\pi) = f(-\pi)$, 它們和一般的点无任何差別。

引用相角, 則級数(1)可表示为正弦或余弦的級数。因此它可以写成

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + A_1(\cos x + \phi_1) + A_2(\cos 2x + \phi_2) + \cdots \\ + A_n(\cos nx + \phi_n) + \cdots \quad (2)$$

式中之

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{-b_n}{a_n} \right) \quad (4)$$

1.2 傅立叶系数的值 为了使方程式(1)的级数展开有用, 我们必须能够决定这些 a 和 b 的值.

求 a_0 时, 我们将方程式(1)乘以 dx , 并从 $-\pi$ 到 $+\pi$ 积分, 故

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx = \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dx + \int_{-\pi}^{+\pi} a_1 \cos x dx + \\ + \int_{-\pi}^{+\pi} b_1 \sin x dx + \cdots + \int_{-\pi}^{+\pi} a_n \cos nx dx + \\ + \int_{-\pi}^{+\pi} b_n \sin nx dx + \cdots = \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} dx = a_0 \pi \quad (5)$$

因为级数其他各项的积分为零. 故

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) dx \quad (6)$$

求其它系数 a , 例如 a_n , 我们将方程式(1)各项乘以 $\cos nx dx$, 然后从 $-\pi$ 到 $+\pi$ 积分.

则

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx dx = \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{a_0}{2} \cos nx dx + \int_{-\pi}^{+\pi} a_1 \cos x \cos nx dx + \\ + \int_{-\pi}^{+\pi} b_1 \sin x \cos nx dx + \cdots \quad (7)$$

现在如果 p 和 q 是任何整数, 并且 p 不等于 q , 则

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin px \cos qx dx = 0 \quad (8)$$

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos px \cos qx dx = 0 \quad (9)$$

若 $p = q$, 則

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \cos^2 px \, dx = \pi \quad (10)$$

因此, 方程式(7)右端除去一个以外, 其它各积分均为零。結果我們有

$$\int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx \, dx = \int_{-\pi}^{+\pi} a_n \cos^2 nx \, dx = a_n \pi \quad (11)$$

或

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \cos nx \, dx \quad (12)$$

如欲求 b_n , 用同样方法我們將方程式(1)用 $\sin nx \, dx$ 乘, 并从 $-\pi$ 到 $+\pi$ 积分。我們求出

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(x) \sin nx \, dx \quad (13)$$

借助于方程

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin px \sin qx \, dx = 0 \quad (14)$$

若 $p \neq q$, 和

$$\int_{-\pi}^{+\pi} \sin^2 px \, dx = \pi \quad (15)$$

則方程式(6), (12)和(13)將給予我們傅立叶系数的值¹⁾。

用完全相似的手續可以說明确定在 0 到 2π 区間的函数可以展成与(1)式同形式的傅立叶級数, 不过它的系数决定于下列公式

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx \, dx \quad (16)$$

-
- 1) 观察(6)式的推导并与(1)式比較, 我們看出 $a_0/2$ 正是 $f(x)$ 的平均值。方程式(1)中每一正弦和余弦項在 $-\pi$ 到 $+\pi$ 区間的平均值为零, 这些項遂被消除, 因为方程式(5)的积分过程实质上即是平均过程。

为 a_n 及 b_n 推导的公式(12)及(13)是采用了所谓的“計权”平均法。方程式(1)右端每一項被正弦或余弦函数之一相乘时, 它在 $-\pi$ 到 $+\pi$ 区間的平均值为零, 除非个别的正弦或余弦函数也是这項的一个因子。这样除了包含問題中个别的正弦或余弦函数的項, 其它各項均被消掉。因此, 方程式(8)到(10), (14)和(15)提供一个方法, 可以从方程式(1)中选择任意一个需要特殊考虑的項。一个类似的现象也出現于把任一种如众所周知的正交函数的級数展开中。