

微波系统工程原理

S. J. 赖夫 著

北京工业学院无线电系 译

国防工业出版社

微波系统工程原理

〔美〕 S. J. 赖夫 著
北京工业学院无线电系 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书着重于概念上阐述微波系统工程中关于热噪声、统计学及其应用、信号处理与检测、天线、传播和传输线、反射和折射以及系统特性等方面的一些理论问题。

本书可供大专学校无线电类专业师生和有关工程人员参考。

Microwave System Engineering Principles

Samuel J. Raff

Pergamon Press 1977

*

微波系统工程原理

〔美〕 S.J. 赖夫 著

北京工业学院无线电系 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 $4\frac{3}{4}$ 116千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数：0,001—5,000册

统一书号：15034·2286 定价：0.61元

译者前言

随着电子科学技术的迅速发展，新的学科不断形成，对这些新学科中的理论与技术的研究，往往要求科技工作者不仅必须精通自己所从事的学科，而且还应了解和熟悉其它有关学科领域的内容。目前有关电子学各领域的专著和文献虽然很多，但包含多种学科的系统工程方面的书籍尚不多见。

《微波系统工程原理》正是一本包含多种学科专题的著作，有热噪声、统计学、信号处理与检测、天线、传播及传输线、反射及折射以及雷达、卫星通讯等方面的内容。全书篇幅不大，内容精练，理论分析颇有独到之处。我们认为此书对从事电子工程的科技人员及大专院校师生、研究生将会有所裨益。

参加本书翻译和互校的同志有刁育才（一章、七章），吴祈耀（二章、三章），李鸿妃（四章、六章），高本庆（五章），最后全书由楼仁海同志进行了总的审校。

由于水平所限，译校不妥之处在所难免，请读者批评指正。

前 言

这是一本专题性、纲要性的理论书。从事微波工作的大多数科学家、工程师在信息论、天线、电路、传播、检测理论、可靠性或其它类似的某个学科方面是专家。他们熟悉的专长比这本书里所涉及的有关内容要深得多。专门知识对他们来说是首要的。本书包括了那些学科之外的题材，以开阔他们的眼界，并提出指导相互有关课题的主要理论和联系。然而，涉及专门知识的那些段落可能仍然是有用的。因为，一般地说，这里所用的方法不同于寻常的方法。由于观点的不同可以提供新颖的见解。

设想读者对微积分、微分方程与变换是熟悉的，虽然本书内容与后二者关系并非密切。我尽量多用直观上明确的概念来叙述主要的公式和理论，而少用数学推导。当必须在严格性与概念二者之间作取舍时，我选取后者。

为了便于记忆和参考，对重要的数据、公式、方程式，在其右边用符号“m”标明之[●]，并列于附录A中。读者一定会发现自己已熟悉其中的许多内容。

本书是根据自己在八年里讲授本课研究生课程的笔记编辑而成，并曾作过教本，因此，它曾在教学上试用过。学生应该具有一定程度的科学和工程知识，以便掌握广泛的材料。尤其通过已学过的专门课程，学生应该熟悉本课中的一些内容。然而，书中有许多内容对每个学生来说是新的，他必须在这些内容上花更大的工夫。考虑到本书作教科书用，编写了习题，如附录F。它不仅对学生，而且对专家都可能是有用的。

我相信，读者会发现这本书的大多数内容在帮助他们进一步

● 全书译文不采用m的符号。——译者

理解与牢固地掌握他们所熟悉的课题是有用的。显然，有一些内容对读者来说是新的，而另一些内容是很熟悉的。为了力求文体明白，我可能对某些课题的阐述是比较基本的。因此，对熟悉该课题的读者表示歉意，谢谢。

S. J. 赖夫

目 录

第一章 热噪声	1
§1.1 基本性质及可以从它导出的原理	1
§1.2 噪声带宽、噪声系数及噪声温度	9
§1.3 衰减器的噪声温度及噪声系数	12
§1.4 级联	14
第二章 统计学及其应用	16
§2.1 统计的概念, 二项式分布	16
§2.2 散弹噪声	23
§2.3 高斯分布	26
§2.4 检波器输出的统计特性	27
§2.5 检波器和输出类型的选择	32
§2.6 贝叶斯准则与似然函数	35
§2.7 可靠性理论	36
§2.8 电话信道的应用	41
第三章 信号处理与检测	44
§3.1 检测与虚警机会	44
§3.2 非相干信号处理	45
§3.3 相干信号处理	46
§3.4 ROC 曲线和错误率的计算	48
§3.5 近似的虚警概率	50
§3.6 奇偶检验	52
第四章 天线	54
§4.1 定义	54
§4.2 基本性能	55
§4.3 功率传输	58
§4.4 天线的噪声温度	59
§4.5 天线的损耗	61

§4.6	天线方向图的性质	62
§4.7	波瓣宽度和一些有用的近似公式	64
第五章	传播和传输线	67
§5.1	传播的基础	67
§5.2	拉普拉斯方程和传输线 (TEM) 波	69
§5.3	平面波	74
§5.4	趋肤深度和导体损耗	75
§5.5	有限导电率的衰减	77
§5.6	波导传播	79
§5.7	电离层传播	81
§5.8	外层空间传播	86
第六章	反射、折射和散射	88
§6.1	均匀媒质间的分界面	88
§6.2	非均匀媒质的折射	91
§6.3	计算微波反射和散射的一些有用的定律	95
§6.4	空气中的水分	98
第七章	一些系统特性	100
§7.1	调制、带宽及噪声	100
§7.2	多路传输	104
§7.3	话音通信的处理	105
§7.4	通信卫星	106
§7.5	地面线路 (TL) 无线电中继系统	112
§7.6	雷达	114
参考文献		120
附录 A	重要公式、数据及概念	122
附录 B	符号表	126
附录 C	二端口无耗网络互易性质的一种证明	131
附录 D	二项式分布的均值与方差的计算	133
附录 E	高斯分布推导	134
附录 F	习题	137

第一章 热 噪 声

§ 1.1 基本性质及可以从它导出的原理

微波系统主要受限于热噪声。热噪声有时也按照这一领域内两个主要学者的名字称为约翰逊噪声或奈奎斯特噪声。约翰逊和奈奎斯特在 1928 年发表了有关这个课题的两篇权威性的文章(见参考文献 1, 2)。很令人意外的是我们对于热噪声的了解是如此的晚。考虑到麦克斯韦在 1870 年发展了电磁场理论, 以及从 1900 年早期发展了的量子论及相对论。热噪声和其它现象一样, 是一个相当基本的现象, 并且很容易理解。在参考文献 1 和 2 中指出热噪声与布朗运动密切相关, 并且它的大小是由热力学导出的, 这时把导体中的电子看成质点, 像任何其它质点一样每个自由度具有 $-\frac{1}{2}kT$ 的动能 [k 是波兹曼常数。见式(1.1)]。事实上, 热噪声是一种黑体分布曲线尾部的修正形式。然而在下文中我们将较多地采用经验方法。

假定我们把一个电阻放入理想的屏蔽室内, 并且用输入端接有通带为 B 的、边缘很陡的滤波器的高阻抗电压表, 去测量其两端的平均电压。热噪声理论预言, 测量将给出均方根电压。

$$V_{r.m.s.} = \sqrt{4RkTB} \quad (1.1)$$

式中 $V_{r.m.s.}$ ——测得的均方根电压 (伏);

R ——电阻(欧);

k ——波兹曼常数 (1.38×10^{-23} 瓦-秒/度);

T ——绝对温度 (K);

B ——边缘很陡的滤波器的带宽 (赫)。

注意到, 单位带宽内的噪声与频率无关。这是白噪声的一个

特性。然而实际上没有一个真实的电阻能在很大的带宽内产生白噪声，因为在高频时，电阻自感及其两端之间的电容会降低它的输出。

为了给出该电压的量值概念，假设 R 为 1000 欧， T 为 290 K（这是正常的室温）， B 为 1 兆赫。代入这些值，得到均方根电压为 4 微伏，它虽然很小但却是很意义的。

我们还可以从资用噪声功率的观点来研究热噪声。考虑一个负载并接在电阻上。式 (1.1) 的电压将使电流流过负载，从而将给出一些功率。容易证明，如果负载不存在电抗而是一个纯电阻，且其阻值等于产生热噪声的电阻，则导致最大功率的传送。在这种情况下，负载上的电压等于前面已算出的电压的一半（由于产生热噪声的电阻上的压降），于是可以很容易地证明传送的功率将为 kTB 。

因此，来自任意电阻上的资用热噪声功率为 kTB 。在室温下，其值为 4×10^{-21} 瓦/赫或 -204 分贝瓦。这是一个非常简单的表示式，并且我们可以把它看作某种虚构的或想像的资用功率。然而，此非事情的真相，而是存在着有效功率的传送。显然，如果两个电阻处于同一温度，则有等量的功率向另一方向传输，所以净功率传送为零。然而，如果两个电阻的温度不同，则净功率传送不为零，于是较冷的电阻将由较热的电阻传送过来的功率加热。这与沿着连接两个电阻的导线的任何热传导或与它们之间的任何辐射热交换完全无关。

如果在产生热噪声电压的电阻中存在电感或电容，则在任意选定的频率上资用噪声功率也不受影响，因为匹配负载只要求在负载中存在等效电容或电感（相等且反号的电抗）以达到谐振并传送同样的功率。这是匹配于电抗性发生器的负载的标准定义。

还要指出，资用噪声功率与制造电阻的材料类型无关。这是一个基本的特性，如果我们没有违背热力学第二定律的话。这可以做如下的解释。假设对于不同的材料 k 值不等，并设铜的 k

值比石墨的 k 值大。这就意味着在同一温度下，一个铜电阻和一个石墨电阻将具有不同的资用噪声功率。让我们取具有相同阻值并在同一温度下的一个铜电阻和一个石墨电阻，把它们联在一起。如果它们具有不同的资用噪声功率，则一个电阻向另一个电阻传送的电功率将多于反向传送的功率。由于接收的功率多于发送的功率，其净效果将是石墨电阻得到加热。当石墨电阻的温度稍高于铜电阻时，这套装置将稳定下来。通常用熵的变化的形式来表示的热力学第二定律可以用语言解释为：在两个物体之间的净能流（如果对这些物体没有做功）是从较热的物体流向较冷的物体；换句话说，如果两个物体温度相同，没有受到任何第三个物体或功或化学能的作用，将维持在同一温度。如果我们原来的假设是正确的，将违反这个定律。因此，如果两个电阻最初温度相同，只是由于连接在一起而在它们之间出现了温度差，这是违反热力学第二定律的。

这也可以用永动机来解释。热力学告诉我们，不论何时如果我们有二个温度不同的物体，我们可以利用较热的物体作为高温热容器及利用较冷的物体作为低温热容器，在它们之间可以开动一个热发动机并且做功。若有某种方法维持热容器之间的温度差，我们可以无限期地开动这个热发动机。若我们有两种可以制造电阻的材料，它们制成的电阻在同一温度下具有不同的资用噪声功率，我们可以把它们联在一起，于是在它们之间将出现温度差。现在我们可以在它们之间开动一个热发动机，由于热噪声功率的不同，将不断地维持其温差。于是我们得到了一个永动机。虽然其输出是很小的，可是我们永恒地产生功率或运动。然而永动机是不可能的。因此，显然资用噪声功率必定与材料无关，并且是一个普遍的性质。

按照这种想法，我们可以再进而研究当负载与产生噪声的电阻不匹配时的情况。我们假设负载与发生器是纯电阻性的（推广到电抗性元件也是一样的）。在这种情况下，负载电阻上的电压由

式 (1.2) 给出, 而输送到它上面的功率由式 (1.3) 给出。

$$V_L = V_n \frac{R_L}{R_L + R} \quad (1.2)$$

$$P_L = V_n^2 \frac{R_L}{(R_L + R)^2} = 4kTB \frac{RR_L}{(R + R_L)^2} \quad (1.3)$$

式中 V_n ——均方根噪声电压 (由式 1.1 得出);

R_L ——负载电阻;

R ——产生噪声的电阻。

由式 (1.3) 的对称性我们可以很容易地看出: 由负载输送到产生噪声的电阻上的功率也将由同一表示式准确地给出, 只是其温度应为负载的温度。因此, 如果它们二者在同一温度, 不管其电阻值如何, 其净功率交换将为零。我们可以把这视为热力学第二定律的必然结果, 否则, 如果两个电阻阻值不同, 则在它们之间可以开动永动机。换句话说, 热力学第二定律是不能违反的, 而且如此简洁地导出这个关系式的事实表明: 对于噪声电压我们有一个适当形式的方程式。具体地说, 就是均方根噪声电压必须与电阻的平方根成正比。

下面, 我们来研究带宽 B 。我们已假设在两个电阻之间有一个某种形式的滤波器。我们还已进一步假设, 虽然我们没有提到过它, 实际上这是一个无耗滤波器。不能通过它传输的能量全部被反射。然而我们怎样才能知道这种滤波器的通带从一端看入与从另一端看入是相同的呢? 当然知道它的最容易的方法是相信热力学第二定律。如果这个滤波器从一个方向看入的通带不等于从另一个方向看入的通带, 则在同一温度下, 在两个电阻之间将存在有净功率交换。因为这是不可能的, 事实上我们已经导出了无耗滤波器的性质, 即在两个方向上的传输带宽必须相等。

当你可以假设滤波器边缘陡峭的要求不是必不可少时, 无耗滤波器的性质可以用式 (1.4) 的更一般的方法来表示。

$$\int_0^\infty |H_{12}(f)|^2 df = \int_0^\infty |H_{21}(f)|^2 df \quad (1.4)$$

式中 f —— 频率;

$H_{12}(f)$ —— 从 1 端到 2 端的滤波器转移导纳, 即输出电流与输入电压之比;

$H_{21}(f)$ —— 从 2 端到 1 端的滤波器转移导纳;

两条竖线里面代表的是量的幅度。

至少在原则上可以进而运用这概念, 设想我们可在这个电路中插入一个附加的无耗滤波器, 它的频带如所希望的那样窄。这一附加滤波器的作用是在每个方向上都不能通过通带以外的频率上的信号。如果式 (1.4) 不能保证这个新的特别限定的频带, 则热力学第二定律现在将被破坏。在附加滤波器的窄带范围内, 热力学第二定律要求

$$|H_{12}(f)| = |H_{21}(f)| \quad (1.5)$$

于是对任何具有相等的输入及输出阻抗的无耗滤波器, 热力学第二定律要求在任意频率上其正向和反向转移导纳的幅度相等。注意, 虽然这个结果是从热噪声的概念导出的, 如果电路是线性的, 这是关于无耗滤波器特性的一个非常普遍的结果。

按照完全相同的思路, 我们还可以导出另外一个关于传输线中失配的一般结果。这就是在一个特定频率下, 当从一个方向看入时, 任意无耗传输线和电路组合的反射系数必须等于相反方向看入时的反射系数。或者让我们来研究任意一个具有输入端子及输出端子的二端口网络, 如果这个电路是无耗的, 在一个特定频率下从输入端口看进去的反射系数必须等于在同一频率下从输出端口看进去的反射系数。这也是一个关于电路及传输线的普遍结果, 它是所有无耗电路的一个必然性质, 如果热力学第二定律不被同一温度下两个电阻之间的噪声功率交换不相等所破坏的话。

这似乎意味着所有无耗电路及网络必须是互易的。即如果从 A 到 B 存在一个低的反射系数, 则从 B 到 A 必须存在一个相同的反射系数。这只对无耗网络才是正确的。当含有损耗时, 情况复杂得多, 因为我们必须考虑网络中电阻性元件产生的热噪声功率,

在这种情况下,从噪声及热力学难以得出关于网络性质的有用结论。虽然如此,我们已经得到的结论对于无耗网络是完全正确的,并且它们适用于在任意频率上可能进入网络的任意功率电平[●]。

还有一个可以从热噪声基本概念及热力学第二定律直接导出的定律。这就是戴维宁定理或互易定理。研究一个电路中的两个点 A 和 B 。我们在 A 点把电路断开,插入一个零阻抗发生器,并在 B 点测量由它产生的电流。我们把这个电流记为 $I_B(\langle V_A \rangle)$ 。对于线性电路,存在某一个值 Q_1 ,使得

$$I_B(\langle V_A \rangle) = Q_1 V_A \quad (1.6)$$

下一步我们在 B 点断开电路,并且在这一点插入一个零阻抗发生器,则由 B 点的电压在 A 点产生的电流可以类似地记为

$$I_A(\langle V_B \rangle) = Q_2 V_B \quad (1.7)$$

戴维宁互易定理说明:这两个比例常数是相等的,即 $Q_1 = Q_2 = Q$ 。它表示在一个电路中任意两点间的一种具体形式的互易关系,并且表明这就是我们称为转移导纳的电流与电压之间关系的一般形式。它是式(1.5)的推广。

让我们从噪声功率传送的观点来看看戴维宁定理意味着什么。如果在 A 点和 B 点有电阻,并且把它们当做各含有一个噪声发生器,则由于 A 点的噪声发生器电压输送给 B 点电阻的功率为

$$P_B(\langle V_A \rangle) = Q^2 V_A^2 R_B = 4kT_A B Q^2 R_A R_B \quad (1.8)$$

类似地有

$$P_A(\langle V_B \rangle) = Q^2 V_B^2 R_A = 4kT_B B Q^2 R_A R_B \quad (1.9)$$

如果温度相同,式(1.8)和(1.9)必相等。于是戴维宁定理保证:在无源电路中,任意位置上的同温度的两个电阻之间不存在热噪声功率的净传送。

可以写出另外一些类似戴维宁定理的定律,它们不保证净功率传送为零。这些定律是错误的。例如参照式(1.6)有

● 对于附录C中的无耗接头,这个结果是由二端口散射矩阵的么正性导出的。

$$V_B(\langle V_A \rangle) = K_1 V_A \quad (1.10)$$

利用这个方程式, 从 A 点电阻传输到 B 点电阻的功率可以写为

$$P_B(\langle V_A \rangle) = K_1^2 V_A^2 / R_B = 4kT_A B K_1^2 R_A / R_B \quad (1.11)$$

类似地有

$$V_A(\langle V_B \rangle) = K_2 V_B$$

及

$$P_A(\langle V_B \rangle) = K_2^2 V_B^2 / R_A = 4kT_B B K_2^2 R_B / R_A \quad (1.12)$$

如果 K_1 总是等于 K_2 , 则当两个电阻在同一温度时

$$P_A(\langle V_B \rangle) \neq P_B(\langle V_A \rangle) \quad \text{当 } R_A \neq R_B \quad (1.13)$$

于是热力学第二定律被破坏, 因为大电阻输送到小电阻上的功率比小电阻输送到大电阻上的功率要多。因此如果全部电路元件在同一温度开始, 较小的电阻将被加热, 而较大的电阻将被冷却, 直到建立平衡, 这时各个电阻处于不同温度。在无源电路中这显然是不可能的, 因此 $K_1 \neq K_2$, 看来像似等效的互易定理是错误的。

另一方面, 我们可以通过类似式 (1.6) 到式 (1.9) 的步骤, 用转移阻抗代替转移导纳, 发现与热力学第二定律不相矛盾。事实上, 对于转移导纳或转移阻抗戴维宁互易定理同样是正确的, 但对于电压之间或电流之间的关系则是不正确的。

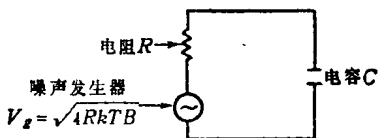


图 1.1 计算电容器两端噪声电压的电路图

一个附加的计算可以用来证明热噪声的基本性质。这就是计算与一个电阻联接的电容器中的储能。一般电路示于图 1.1。

如果我们用下标 g 表示图 1.1 中所示发生器两端的电压, 而电容器两端的电压用下标 c 表示, 我们可以写出

$$|I(f)| = \frac{|V_g(f)|}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \quad (1.14)$$

式中 $I(f)$ 是电路中流动的电流, 并且 $\omega = 2\pi f$

$$|V_e(f)| = \frac{|I(f)|}{\omega C} \quad (1.15)$$

由于两个不同频率的正弦函数乘积的时间平均值为零, 储存在电容器中的平均能量可以表示为

$$\bar{E} = \frac{1}{2} C V_e^2 = \frac{1}{2} C \int_0^\infty |V_e(f)|^2 df \quad (1.16)$$

式中 $|V_e(f)|^2$ 是每赫带宽的均方电压。(说明: 即使 V_e 是电压的均方根均值, 系数 $\frac{1}{2}$ 也是正确的) 把式 (1.15) 及 (1.1) 代入式 (1.16) 得到

$$\bar{E} = \frac{1}{2} C \int_0^\infty \left| \frac{I(f)}{\omega C} \right|^2 df = \frac{1}{2} C \int_0^\infty \frac{4RkTdf}{1 + R^2\omega^2 C^2} \quad (1.17)$$

如果我们把 df 写成 $d\omega/2\pi$, 则

$$\bar{E} = \frac{kT}{\pi} \int_0^\infty \frac{RCd\omega}{1 + R^2\omega^2 C^2} = \frac{kT}{\pi} \int_0^\infty \frac{dX}{1 + X^2} \quad (1.18)$$

式中 $X = RC\omega$ 。其积分为反正切函数, 有

$$\bar{E} = \frac{kT}{\pi} \arctg X \Big|_0^\infty = \frac{1}{2} kT \quad (1.19)$$

式 (1.19) 中给出的结果与近代物理学中的结果类似。它说明电容器中储能的平均值是 $kT/2$, 式中 k 是波兹曼常数。由近代物理学我们知道任何形式的能够储存能量的振动或振荡, 对于零点具有平均储能 $kT/2$ 。因此这个结果是很基本的。还要指出, 电容器中的平均储能与和它联接的电阻完全无关, 因此即使电阻是无穷大或零, 其值也相同。

可是在这里还有一个要解决的小问题。我们从电阻的热噪声特性出发, 证明了当一个电阻与电容器联接时, 电容器中的平均储能能 $kT/2$ 。然而如果电容器的温度和电阻的温度不同时会怎么样呢? 电阻热噪声输出中的 T 显然是电阻的温度, 而在电容器储能 $kT/2$ 中的 T (从近代物理学得到的) 看来应该是电容器的

温度。实际做一个实验，这个问题可以很容易地解决，在这个实验中电阻和电容是分开的，并且保持在不同的温度上。如果做了这个实验，我们会发现，倘若电阻是小值，两者中的 T 应该是电阻的温度。然而，倘若电容器两端没有联接电阻或阻值很大以至电容器中的介质损耗占主导地位，则显然是电容器的温度决定它的储能。

§ 1.2 噪声带宽、噪声系数及噪声温度

在着手处理我们的主要课题之前，必须给出噪声带宽的确切定义，该量在前面的式(1.1)中已用 B 来表示。在上一节中，提到矩形的和具有很陡峭边缘的滤波器时我们回避了这个问题，对于那种情况带宽就是两个截止频率之差。在更一般的情况下，噪声带宽，有时也称为放大器或滤波器的有效噪声带宽，由式(1.20)给出

$$B_n = \frac{\int_0^\infty |H(f)|^2 df}{|H(f_0)|^2} \quad (1.20)$$

式中 $H(f)$ ——滤波器、放大器或传输线中其它器件的频率响应特性（转移阻抗，或转移导纳，或电压或电流转移函数）；

f_0 ——测量增益的频率（一般是最大响应频率）。

这个定义的逻辑性是清楚的，如果我们用一个适当的常数乘其分子，它将表示从一个白噪声源通过放大器传输的噪声。分母表示放大器的功率增益。例如，我们把式(1.20)用于一个平顶、陡边、功率增益为 G ，带宽为 B 及相同输入和输出阻抗的放大器。分子中的积分简单地为 GB ，而分母为 G 。因此该情况中， B_n 与式(1.1)中所用的带宽 B 相同。

噪声系数概念是一个简单的概念，但是有时它被不恰当地过分简化了。它是在特定情况下联系放大器、混频器、衰减器、滤波器或其它部件的输出噪声与输入噪声的一种特性。例如为了