

噪声电路理论发展现状综述

罗 涛 何振亚

(东南大学无线电系, 南京 210018)

摘要 本文对低噪声电子学的研究意义及其历史作一简明回顾, 详细综述了噪声电路理论的发展现状, 指出了问题所在, 并给出了解决的方法。

关键词 低噪声电子学; 噪声电路理论

一、引 言

众所周知, 通信、雷达、测量技术、图象处理及电视、地质勘探、天文等等诸多领域里, 都要用到检测仪器及接收装置。它们是电子整机中最关键的部分。在微弱信号检测、接收及放大处理过程中, 存在的共同问题就是要尽量排除信号源及电子系统内部的噪声, 从而提高信噪比。随着电子整机水平及精度要求的不断提高, 电子系统内部的噪声越来越受到人们重视, 已成为提高整机水平的关键问题之一。因为其它影响整机误差的因素总归可以得到控制, 而噪声却难于消除。它限制了检测仪器及接收装置的最小可检测信号及最低限, 也就是说, 测量的极限精度归根到底由测量系统的噪声性能来决定^[1]。

在测量技术中, 信噪比的提高将受到信号源及放大器内部固有噪声的限制, 任何高灵敏度的测量都必须对电路中的噪声现象进行深入的研究^[2]。近代通信技术中, 随着短波通信的应用, 特别是微波通信, 外部干扰明显减小, 机内噪声上升为限制通信设备检测微弱信号能力的主要因素^[3]。在雷达技术中, 噪声系数同雷达发射机功率成反比^[4]。在其它许多领域, 噪声作为一种障碍, 限制着这些领域的进一步发展。噪声的研究是具有普遍意义的重要课题。当然, 实现低噪声接收设备及测量装置的前提是发展噪声电路理论及设计低噪声电路及器件, 目前, 已逐步地发展成一门新兴学科——低噪声电子学^[5]。

如果从1918年 W. Schottky^[6] 最早研究散粒噪声, 1927—1928年 J.B. Johnson^[7,8] 和 H. Nyquist^[9] 最早研究热噪声开始算起, 其历史虽有数十年之长, 但这门学科的发展还是近二十年来的事^[10]。这二十年来, 由于人们已逐步清楚地认识到, 随着科学技术的发展, 噪声已成为许多技术领域里进一步发展的重要制约因素之一^[11], 促使人们在抑制噪声方面作了很多努力。这些工作包括很宽的领域: 噪声源及噪声机理; 设计低噪声电路; 研制低噪声器件; 探讨检测微弱信号的新方法等四个方面。这些构成了低噪声电子学的基本内容。

1991.11.15收到, 1992.09.09定稿。

罗 涛 男, 1961年出生, 博士后研究生, 现从事微弱信号检测理论与技术、数字信号处理及应用、神经网络及其在随机数字信号处理中应用等研究工作。

何振亚 男, 1922年生, 教授, 博士导师, 现主要从事神经网络、自适应信号处理、多维数字信号处理等研究工作。

噪声电路理论是了解器件和电路的噪声性能、研制低噪声器件、合理设计低噪声电路的基础^[11]。目前,随着集成电路一类器件的发展及应用,对于复杂电路噪声的分析计算以及设计已越来越具有重要性。然而迄今为止,还未见到一本专门论述噪声电路理论的书,对噪声电路理论的研究都只是散见在文献中,有关噪声方面的书也只是涉及到单管 E_n 、 I_n 模型参数的计算,以及级联网络噪声系数的讨论等问题。

二、噪声电路理论发展现状综述

概括目前所见到的有关噪声电路理论的文献资料,有下面几种具有代表性的理论。

1. 一般噪声分析法

这是大量文献及噪声计算程序中采用的噪声分析法,在此称其为一般噪声分析法。这种噪声分析法来自推导单管放大电路的噪声计算公式。实际上主要是管子的 E_n 、 I_n 噪声模型参数计算问题,有了 E_n 、 I_n ,就可得到总噪声及噪声系数。由于单管放大器或单管电路中只有一个半导体元件,噪声源数量有限,虽然推导比较复杂,但经一定简化总还能够得到总噪声与各个噪声源之间的关系式,可以定性地对单管放大器进行噪声分析并可定量地进行一定的计算^[3]。但是,这种方法具有自身的缺点:首先采用这种方法依靠推导,对于稍稍复杂一点的电路将无能为力。其次就是即使对于简单的单管放大电路噪声分析,也必经一定的简化,使得分析有一定的局限性及误差。因而,出现了一些噪声计算程序,典型的有 SPICE^[12], ECAP 程序^[13], NOISE 程序^[3]及文献[14]给出的程序等等。这些程序中的噪声分析采用的方法都是交流小信号分析法。实际上,交流小信号分析是用来分析电子线路交流信号的算法,现在被借用来分析噪声。这种方法用于信号源具有同样频率的交流信号是相当有效的。但众所周知,噪声的频率、幅值及相位都是随机时间函数,因而,交流小信号分析法的噪声分析必须对每个噪声源进行单独分析。具体是^[12,13]:首先分别单独计算出电路中各噪声源在输出端的噪声贡献,然后,将这些贡献求平方,再开方得输出端总噪声;其次计算输入端到输出端之间的功率增益;最后,总等效输入噪声为总输出噪声除以功率增益而得。一般噪声分析法利用计算机能够对复杂电路进行噪声分析,并能给出一些有意义的结果,但是,有如下缺点^[15-17]:(1)由于对每个噪声源进行单独的分析,而每个半导体器件(如 BJT, FET)中有多个噪声源,一个复杂一些的电路(如集成运放)将有大量的噪声源存在于电路中,其噪声分析的计算量是相当大的,程序运行时间冗长而乏味。(2)对每个噪声源独立的分析,无法考虑噪声之间的相关性,这不符合半导体的噪声物理过程。噪声机理及噪声相关理论研究表明^[18],半导体器件中的噪声源与噪声源之间,噪声与噪声之间存在相关性,BJT 及 FET 在低频及高频时, E_n 、 I_n 之间相关系数绝对值趋于 1^[19]。更重要的是会造成最大达 40% 的误差,以至有时严重影响噪声分析及低噪声设计^[20]。

2. 级联网络的 Friis 公式

最早出现的网络噪声理论方面的成果是在 1944 年 H. T. Friis 提出的 Friis 公式^[21]。这是在研究无线电接收机中的噪声时被提出来的。其内容是:对于 n 级级联网络,总体的噪声系数 F 与各级之间的噪声系数之间具有如下关系

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 K_2} + \dots + \frac{F_n - 1}{K_1 \dots K_{n-1}} \quad (1)$$

其中 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 分别是第 1 级, 第 2 级, $\dots$, 第 n 级的自身噪声系数; $K_1, K_2, \dots, K_n$ 分别是第 1 级, 第 2 级, $\dots$, 第 n 级的额定功率增益. $F_1, F_2, \dots, F_n$ 必须是在噪声带宽相同条件下的噪声系数.

如果各级噪声系数及额定功率增益已知, 则利用 Friis 公式立即得到总噪声系数. 但详细分析可知其缺点: (1) Friis 公式只用于级联网络噪声计算, 不能用于其它方式联接的网络, 具有局限性. Friis 公式是由于当时研究早期无线电接收装置 (级联电路) 中的噪声而产生, 现在电路设计更常用有源反馈电路或并联等等复杂的电路^[22]. 因此, Friis 公式无法适用于这些复杂电路的噪声分析. (2) 即使对于级联网络, 也必须是各级电路噪声系数已知. 当然如果每级电路都是很简单的电路, 可以计算得到; 如果每级电路稍稍复杂一些, 无论是测量还是计算, 现有方法只能采用前面介绍的交流小信号模型分析法. (3) 根据噪声系数定义, 噪声系数与源电阻有密切的关系, 每一级的源电阻就是前级输出端的等效电阻. 这个等效源电阻应该是多少呢? 这个问题在计算或测试每一级噪声系数时也是一个麻烦问题.

3. 噪声二端口网络理论^[23]

噪声二端口网络理论的建立, 是网络噪声理论的一个突破, 它充分地考虑了噪声之间的相关性, 避免了忽略相关性造成的 40% 的计算误差, 理论上讲也更加完善. 该理论给出了二端口网络噪声模型的完整计算公式和五种不同二端口网络噪声模型之间的相互转换方法, 以适合于复杂网络的噪声性能分析及低噪声设计, 并适合于宽带放大器的噪声分析及低噪声设计.

从文献[23]知, 这种理论确实充分地考虑了噪声相关性, 这是其它文献没有考虑的因素. 但应用这种理论来分析较复杂网络时, 无非用两种方法. 一种方法就是把整个被分析的网络看成是一个二端口网络, 那么就要计算所有噪声源到输出端的各种传输函数. 这项工作对于稍稍复杂一点的网络就将是复杂而又繁琐的, 须研究专门的方法来适合于计算机辅助分析, 将占用大量的计算量. 另一种方法就是将整个网络分划成多个子二端口网络, 各个子二端口网络都是由一些简单元器件的各自统一噪声模型来描述其噪声特性. 为了计算整个网络的噪声性能, 还必须把每个子二端口网络的噪声模型参数折算到整个网络的输出端或输入端. 这个过程需要做两部分工作: (a) 需要获得每个子二端口网络的小信号二端口网络参数. (b) 由于网络结构不同, 需要进行二端口网络参数之间的相互转换及二端口网络噪声模型之间的相互转换. 并且无论是第一种方法还是第二种方法, 为分析复杂电路的噪声性能, 须借助于计算机, 但噪声二端口网络理论在编制计算机程序时是很不方便的. 从计算量来讲, 不适当; 从方法上来讲 (二端口网络的划分, 参数及模型转换, 连接方式类型的判别), 也是繁琐的. 如果上述问题能得到解决, 这种理论将建立一种优良的噪声分析方法, 但避免这些问题并不是容易的.

4. 对偶网络噪声理论^[14]

对偶网络噪声理论解决了一般噪声分析法中对每个噪声源独立分析的缺点, 使噪声分析有了很大的改进. 其基本思想是源于电路理论中的互易定理, 在此称其为对偶网络噪

声理论。基本步骤是:首先,将被分析电路(原电路)变换成对偶电路,这个电路中不包含任何噪声源。其次,在对偶电路中的输出端加入一个零相位的单位电流源,当然是在感兴趣的频率点上,则在各节点间产生结果电压。对于那些处于原电路具有独立噪声电流源的节点间电压,根据互易定理,这些电压值就是由独立噪声源到输出端的传输阻抗,如用 Z_l 表示,则第 l 个独立噪声源 I_l 与输出端的噪声电压量为

$$V_{\text{noise}}^l = |Z_l I_l|, (l = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中 I_l 是第 l 个独立噪声源的值。

最后,所有噪声源在输出端的总噪声电压为

$$V_{\text{noise}}^l = \sqrt{\sum_{l=1}^n |Z_l I_l|^2} \quad (3)$$

这种方法尽管仍然用到所有响应的平方和的方根计算问题,但其所有噪声源分析是由输出端的一个源来完成的,求得了每个噪声源的组合贡献,噪声分析的效率是很高的。但是,由于这种方法是基于互易定理推导来的,也就是说这种噪声网络理论只能用于具有互易性的网络。互易性适用的网络可以具有电阻、电感、电容、耦合电感及变压器,而回转器、非独立电源及独立电源要排除在外。正如文献[24]所提到的那样,尽管此方法分析噪声很有效,但感兴趣的大部分电路都不具有互易性,因此,它的实用性受到了很大限制,不能称为一种完善的噪声理论或噪声分析方法。其次,这种方法仍然无法考虑噪声的相关性,因而无法提高它的分析计算精度。

5. 相关矩阵噪声理论^[24-26]

这种噪声分析方法是建立在对网络的二端口描述上及对二端口噪声用相关矩阵来表达的基础上的。这是国外在噪声电路理论中近几年的成果及研究热点,并出现了相应的程序。但由于它基于二端口网络,具有与噪声二端口网络理论同样的缺点。

从前面的综述可见,尽管已有一些理论去解决电子线路的噪声分析计算问题,但所有的这些方法的任何一种都不能称为一种完善的噪声分析方法,每一种方法都有着比较重大的欠缺,以至于目前尚没有一种实用价值的电子线路噪声模拟程序。因此,研究一种完善的噪声电路理论对发展低噪声电子学来讲是非常必要而且紧迫的。当然,我们希望噪声电路理论具有下列两个优点:(1)所建立的噪声电路理论必须使所有的噪声源同时参加运算。(2)充分考虑噪声之间的相关性,以提高分析的精度及效率。

三、噪声电路谱理论及其优点^[15-17]

噪声机理研究已表明,噪声是一种幅值及相位都是随机的时间函数,是广义平稳随机过程。因此,在噪声网络理论的建立及噪声计算的过程中,被分析的量——噪声,如果用谱来描述,是否可以避免目前噪声分析方法中对每个噪声源独立分析的缺点呢?而且互谱又可以用来表示相关性,是否可用来充分地考虑到噪声相关性呢?众所周知,功率谱密度可用来表示随机变量的各次谐波分量,并且可以把各次谐波分量统一地表示在一个表达式中。不同信号的谱密度可以直接相加,没有 RMS 和的计算过程。

本着这个基本思想,作者在文献[15-17]中,首先对噪声进行了谱分解,然后,提出了

噪声网络谱理论, 推导了四种噪声网络谱方程: (1) 节点电压噪声谱方程; (2) 回路电流噪声谱方程; (3) 割集电压噪声谱方程; (4) 岔集电压噪声谱方程。这四个基本方程的每一种都具有: (1) 所有的噪声源同时参与运算。 (2) 相关性得到了充分地考虑。所以, 整个电子线路的噪声分析只相当于一次一般电路的模拟。这里提出的噪声网络理论用于电子线路噪声分析计算时, 无论从计算量方面还是精度方面以及电路的规模上, 其效率的提高是非常显著的。应用上面提出的噪声网络方程, 理论上可根据相应要求, 计算任何复杂、包含任意多个噪声源的电子线路的噪声, 还可给出不常见的电路噪声性能指标形式。这些指标包含下列各项: (1) 等效输入噪声动压 E_n , 等效输入噪声电流 I_n , 及其之间的谱相关系数 r 。 (2) 给定源阻抗下整个电路的噪声系数(NF)随频率 f 的关系曲线, 即 NF- f 曲线。 (3) 最佳源阻抗 Z_{so} 。(包含最佳源电阻 R_{so} 及最佳源电抗 X_{so}), 最佳工作频率 f_{so} 及相应的最小噪声系数 NE_{min} 。 (4) NF 图。

这些噪声指标, 目前的噪声分析计算程序尚无法直接给出。此外, 本方法还具有下列优点: (1) 噪声谱相关系数在这里是首次计算得到。 (2) 噪声系数可根据要求在感兴趣的频段内直接计算出来。 (3) 给出了最佳源电抗的设计。这是非常重要的, 因为目前广泛采用具有电抗性质的传感器, 源阻抗的大小对电路噪声影响最敏感。 (4) NF 图。尽管它应用起来非常方便, 但由于其测量及计算的困难, 尚无法获得。这里可方便地计算得到。

四、结 论

本文首先指出了低噪声电子学的意义及噪声电路理论在低噪声电子学中的重要地位。然后, 阐明了目前已有的噪声电路理论, 无法解决电路中实际存在的大量噪声源及噪声相关性的问题, 而严重的影响着复杂电路(如集成运放等)的噪声分析精度及效率。为此, 本文提出了四种噪声网络谱方程。这四种噪声网络谱方程的每一种都使所有的噪声源同时参加运算, 以及都使噪声相关性得到了充分地考虑。整个电路的噪声分析只相当于一次完整的电路分析, 因而, 从理论上讲是趋于完善的。噪声分析的精度及效率也有明显的提高。基于这种理论, 给出了噪声性能指标计算方法, 其中有些性能指标(如谱相关系数, NF 图)是目前其它文献中不易获得的。这些都为快速、准确地分析电子线路噪声性能及快速低噪声优化设计奠定了恰当的理论基础。

参 考 文 献

- [1] C. Erdi, *IEEE J. of SC*, SC-16(1981)6, 653—661.
- [2] C. D. Motchenbacher, F. C. Fitchen, *Low-Noise Electronic Design*, John Wiley and Sons, Inc. (1973), Chapter 8—10.
- [3] 方志豪, 晶体管低噪声电路, 科学出版社, 北京, 1984 年, 第三章。
- [4] A. Foord, *Wireless world*, 87(1981)4, 71—73. 9, 1068—1082.
- [5] S. Okwit, *IEEE Trans. on MTT*, MTT-32(1984)9, 1068—2082.
- [6] W. Schottky, *Ann. Physik*, 57(1918)12, 541—567.
- [7] J. B. Johnson, *Phys. Rev.*, 32(1928)7, 97—109.
- [8] J. B. Johnson, *Bell. Lab. Rec.*, 3(1927)2, 185—187.
- [9] H. Nyquist, *Phys. Rev.*, 32(1928)7, 110—113.
- [10] J. A. Dobrowolski, *IEEE Trans. on MTT*, MTT-37(1989)1, 15—20.

- [11] Von Dietmar Schroder, *Frequenz*, 39(1985)6, 170—174.
- [12] N. Laurence, SPICE-2: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits, Memorandum No. ERL M520 College of Engineering University of California, Berkeley, (1975).
- [13] 602 Electronic Circuit Analysis Program (ECAP), User's Manual, Application Program No. 1620-EE-02X, IBM, white plains, N. Y., 1970 ed.
- [14] Rohrer et al., *IEEE J. of SC*, SC-6(1971)4, 204—213.
- [15] 罗 涛,戴逸松,噪声电路理论及集成电路噪声计算,电子学报, 18(1990)6, 79—76.
- [16] 罗 涛,戴逸松,电子线路噪声的割集谱分析法,科学通报, 35(1990)1, 28—31.
- [17] Luo Tao, Dai Yisong, *Chinese Science Bulletin*, 35(1990)13, 1134—1135.
- [18] Aldert Van Der Ziel, Noise Sources, Characterization, Measurement, Prentice-Hall, Inc., (1970), Chapter II.
- [19] 罗 涛,戴逸松,电子测量与仪器学报, 3(1989)4, 1—9.
- [20] 罗 涛,戴逸松,吉林工业大学学报, 1982年,第4期,第52—58页.
- [21] H. T. Friis, *Proc. IRE*, 32(1944)7, 419—422.
- [22] A. V. Khevrolin, *Tele. Rad. Eng.*, 37—38(1983)1—6, 73—76.
- [23] 戴逸松,电子科学学刊, 2(1980)4, 158—168.
- [24] V. Rizzoli, A. Lipparini, *IEEE Trans. on MTT*, MTT-33(1985)12, 1507—1511.
- [25] U. L. Rohde, *Microwave J.*, 29(1986)10, 154—160.
- [26] G. I. Vasilescu, *Electron. Lett.*, 23(1987)7, 351—353.

A REVIEW OF NOISE CIRCUIT THEORY

Luo Tao He Zhenya

(Southeast University, Nanjing 210018)

Abstract The field of low-noise electronics and noise circuit theory are described synthetically. Some imperfections of the current noise circuit theories are pointed out. And the research direction and the methods of development of noise circuit theory and noise performances are also presented.

Key words Low-noise electronics; Noise circuit theory