射频接收机系统级建模中的噪声谱分析

王 琼 苏东林 谢树果 戴 飞

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 提出了一种在有限的系统参数下进行射频接收机系统建模时,各子电路噪声参数的分析和计算方法. 从噪声功率谱的等效计算出发,给出了加性高斯白噪声通过有噪线性电路的分析方法. 以一通信电台为例进行了分析计算,在给定有限的系统参数(信噪比,灵敏度,增益等)下分析出合理的各子电路的噪声参数,并进行建模仿真验证,理论结果与仿真结果较好吻合,表明了分析方法的有效性. 该噪声功率谱的等效分析计算方法对射频系统建模有很好的指导作用.

关 键 词: 噪声功率谱; 加性高斯白噪声; 射频接收机; 系统建模; 误码率

中图分类号: TN 850; TN 911.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0395-04

Noise density research in the system-modeling of RF receivers

Wang Qiong Su Donglin Xie Shuguo Dai Fei

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new method of noise analysis in RF (radio frequency) receivers is provided when the system modeling is required while only some limited parameters of the whole RF system are known. The analysis procedure of AWGN (additive white Gaussian noise) through noisy linear circuits is given in detail using the theory of equivalent computation of noise power density. Take a communication station as an example for noise computation and system modeling. Noise parameters of each component such as noise figure in the RF receiver are derived in the condition of limited system parameters of the receiver including SNR (signal noise ratio), sensitivity, RF gain etc. Modeling and simulation are carried out to validate the analysis method and fair agreement between the theoretical and simulated results is obtained. This equivalent computation method of noise power density has a good instructional meaning to noise analysis and proper system modeling of RF receivers.

Key words: noise power density; additive white Gaussian noise; radio frequency receiver; system modeling; bit error rate

使用建模仿真的方法来研究电子系统的性能在电子系统的研究中正发挥着越来越重要的作用,这一领域对卫星通信、数字移动通信、电子对抗的发展有着重要的指导作用. 系统级建模是电子系统仿真分析的基础,模型的精度与系统给定参数及分析目标同时相关. 射频接收机整机的系统级建模只提取各子系统的顶层参数而不涉及电路的内部特性. 通常在射频系统建模进行信噪比(或信干比)和误码率分析时,给定的系统参数往往只局限于各子系统的频率、带宽、增益等数据,而没有给定各子电路的精确的噪声特性参数. 然而,系统性能(例如数字通信系统的误码性能)不仅与这些顶层参数有关,而且与子系统的噪声特性紧密相关. 如果不考虑系统的噪声特性,那系统模型就过于理想,导致仿真分析不能达到预期目标. 因此,为了进行系统性能分析而对所研究系统进行系统建模时内部噪声的考虑就成了一个比较突出也不可回避的问题.

本文就如何在未给定系统各子电路噪声参数的前提下建立精确合理的子电路模型展开研究.

收稿日期: 2005-01-17

作者简介: 王 琼(1981 -),女,山西吕梁人,博士生, wangqiongbuaa @ee.buaa.edu.cn.

现有的噪声电路理论和系统建模的文献大部分是在已知各子电路的噪声特性的前提下对系统进行建模和整体噪声性能分析,而较少有涉及在未给定各子电路噪声参数的前提下从系统总体指标(如信噪比,误码率等)来分析和计算各子电路噪声参数(如噪声系数,噪声温度).本文首先从等效计算的角度推出了加性高斯白噪声通过有噪线性电路的功率谱密度的计算方法,然后以一抗干扰通信电台射频接收机为例,在有限的系统条件下分析出合理的各单元电路的噪声参数,最后进行了指标和性能验证.理论计算结果与仿真结果较好吻合,表明了分析方法的有效性和正确性.这样的研究和分析在只给定有限的系统顶层参数和指标进行系统建模时有很好的指导作用.

本文所论述的射频接收机及给出的实例均是基于典型的超外差式接收机射频前端结构,即信号经天线、低噪放,再到混频器的级联结构.

1 有噪线性电路的噪声功率谱计算

从随机过程的角度而言,根据维纳-欣钦定理可得到输入输出的噪声功率谱密度之间的关系为[1]

$$N_o(\omega) = K^2(\omega) N_i(\omega) \tag{1}$$

式中 $N_i(\omega)$,$N_o(\omega)$ 分别为输入输出的噪声功率谱密度;$K(\omega)$ 为电路的幅频特性;$K^2(\omega)$ 为功率增益特性.在系统工作带宽内,如果噪声功率谱及幅频特性均为恒定值,则有

$$N_o = GN_i \tag{2}$$

式中 G 为增益.

从电子系统内部噪声分析的角度而言,系统内部的噪声对输出噪声功率谱也有较大的影响.奈奎斯特(H.Nyquist)证明(1928年),电阻 R 在带宽 B 上的热噪声电动势的均方值为[2]

$$v_{rms}^2 = 4kTRB \tag{3}$$

式中 v_{rms} 为噪声电压的有效值;k 为玻尔兹曼常数;T 为电阻的温度.

噪声通过有噪线性电路后噪声功率谱的计算是一个结合随机过程信号处理和电子系统噪声分析的过程.为了进行系统建模时噪声功率谱的计算,下面给出有噪线性电路输出噪声功率谱严格解的推导过程.

接收机前端的放大器一般输入信号很弱,通常认为是线性的.接收机输入噪声为源电阻(工业信号检测系统的纯电抗源的传感器除外)产生的高斯白噪声.如果接收机前端的源电阻与接收机第1级(前置放大器)的输入电阻相匹配,则由式(3)得到放大器的最大资用噪声功率为

$$P_{avl} = \frac{v_{rms}^2}{4R} = kTB \tag{4}$$

如果假定放大器的输入阻抗匹配到非电抗性天线电路的输出阻抗,则对于前端放大器内部的噪声,可用一个前置电阻的热噪声来等效[2].设等效噪声温度为 T_e,则由式(4)得到等效的输入噪声功率为

$$P_{equ} = kT_eB \tag{5}$$

又高斯白噪声在 B 上的噪声功率可写为 $2B\frac{N_i}{2} = BN_i$,$\frac{N_i}{2}$ 为高斯白噪声的双边功率谱密度.

根据上述分析及功率关系可得出:N_o 与 N_i 以及 T_e 之间的关系满足

$$N_oB = (N_iB + kT_eB)G \tag{6}$$

从而得到

$$N_o = (N_i + kT_e)G \tag{7}$$

对比式(2)与式(7)可见,有噪线性系统输出噪声由输入噪声和内部噪声共同引起.式(7)给出了有噪线性电路 N_o 的严格解.通常,在射频接收机的末端,N_i 较 kT_e 值大几个数量级,因此,N_o 就可近似为 N_i 的线性放大.这与噪声系数理论中"级联电路的总噪声系数关键取决于前几级[2]"相吻合.式(7)为下面进行系统建模时各子电路噪声参数计算的理论依据.

2 噪声谱计算在系统建模中的应用

以一直接序列扩频抗干扰电台通信系统的系统建模为例,说明噪声谱计算在射频系统建模中的应用.通信电台接收机的原理组成图见图1.

系统的噪声主要在接收机的射频部分产生,但给定的系统参数往往只局限于射频部分各级的频点、带宽、增益等数值,而未包含各部分的噪声

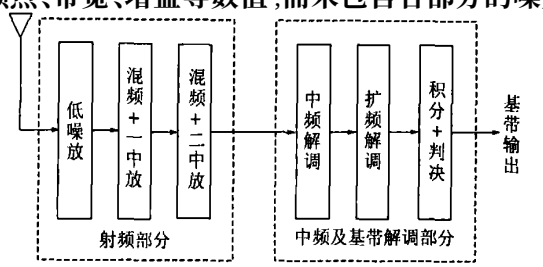

图1 直扩电台接收机原理框图

参数.数字通信系统要求得到较精确的噪声特性,从而判断代表系统质量的误码率特性.因此,需要根据系统给定的有限的指标去估计出比较合理的各子电路的噪声特性参数[3].下面从系统给定的输出信噪比和接收灵敏度指标推算出中频处的噪声功率谱,然后利用式(7)来估计出合理的各子电路的噪声系数.

在此系统中,要求输出信噪比 $(S/N)_{out} \geq 9.5$ dB.根据 Q 函数与误差函数的关系 $Q(x) = \frac{1}{2}\left(1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right)$ [4] 得到误码率为

$$P_e = Q\left(\frac{S}{N}_{out}\right) = \frac{1}{2}\left(1 - \mathrm{erf}\left(\frac{S}{N}_{out}\right)^{2}\right) \tag{8}$$

当 $(S/N)_{out} = 9.5$ dB 时,可得 $P_e = 0.001$.

又扩频通信的输出信噪比[5]:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \frac{2PT}{N_{oI}} \tag{9}$$

即要求 $\frac{2PT}{N_{oI}} \geq 9.5$ dB

式中 P 为中频解调处的有用信号功率;T 为信息数据脉码宽度;N_{oI} 为中频处的输出噪声功率谱密度.根据系统给定的接收灵敏度和前端射频电路总增益可得到 $P = 0.462$ dBm,系统参数已知 $T = 31.25\ \mu$s,则可推得中频处 N_{oI} 需满足

$$N_{oI} \leq -51.58 \text{ dBm/Hz}$$

接收机射频链路组成框图简化如图 2 所示.

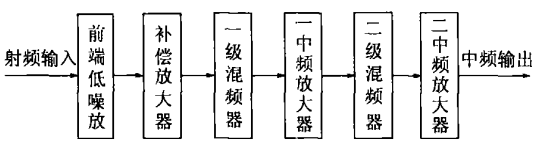

图 2　射频链路简化组成框图(省却了各级滤波器)

前端天线输入的噪声经图 2 所示的各子电路作用后,噪声谱密度值增大.天线输入的噪声功率谱密度为

$$N_i = kT_o = 1.38 \times 10^{-23} \times 290 = 4.002 \times 10^{-21} \text{ W/Hz} = -173.977 \text{ dBm/Hz}$$

T_o 为室温 290 K.如何来确定各级合理的噪声参数从而使 $N_{oI} \leq -51.58$ dBm/Hz 是研究的重点.依据表 1 所示的常用放大器的增益及噪声参数对前端低噪放进行参数设定:增益 $G = 10$ dB,噪声系数 $NF = 3.8$ dB.

根据无量纲噪声系数 F(NF/dB = 10 ×log F)与 T_e 之间的关系式

$$F - 1 = \frac{T_e}{T_o} \tag{10}$$

得到:　$T_e = T_o(F - 1) = 405.7$ K

所以由式(7)得到低噪放输出端的噪声谱密度为

$$N_o = (N_i + kT_e)G = (4.002 \times 10^{-21} + 1.38 \times 10^{-23} \times 405.7) \times 10 = 9.602 \times 10^{-20} \text{ W/Hz} = -160.176 \text{ dBm/Hz}$$

表 1　常用放大器的增益及噪声参数[2]

器件	G/dB	T_e/K	NF/dB
通用晶体管低噪声放大器	10	400	3.8
通用中频放大器(芯片)	50	1150	7.0

为了产生较高的信号电平,在低噪放之后接高噪声高增益的补偿放大器.前端低噪放输出的噪声作为下一级电路的噪声输入.设定

$$G = 15 \text{ dB} \qquad NF = 4.5 \text{ dB}$$

中频放大两级级联,各放大 40 dB.根据表 1 设定 G 为 40 dB,NF 为 7.0 dB.

这样,射频增益为 25 dB,中频增益为 80 dB,满足系统增益指标.且因为设定输入信号为灵敏度值 -110 dBm,所以可以认为各放大器处于小信号即线性工作状态.

对于混频器,把其与噪声特性相关的线性定义为对接收机射频输入小信号的线性放大或压缩,而不是指与输入输出信号频率产生变化相关的非线性[6,7],即从信号幅度角度而言,混频器仍可认为是线性器件.所以,对于混频器噪声输出功率谱密度的计算仍可采用前面所述的噪声通过有噪线性电路的计算方法进行计算.混频器转换增益 G_c 为 5 dB,NF 为 4 dB.根据上面的分析方法得出的各元件的 NF 及各元件输出端的 N_o 见表 2.

表 2　射频接收机各子电路的 NF 及 N_o

元件	NF/dB	N_o/(dBm·Hz^{-1})
前端	0.0	-173.989
LNA	3.8	-160.175
AMP1	4.5	-144.868
MIXER1	4.0	-141.344
AMP2	7.0	-101.335
MIXER2	4.0	-92.344
AMP3	7.0	-52.503

根据计算结果得到的中频处的 $N_{oI} = -52.503$ dBm/Hz,满足指标要求,即上述选定的射频系统模型,能保证在接收最低可检测输入电平时仍能正常解调话音信号.

3 建模仿真验证

按照前节设计的射频模型,建立整个电台系统从基带到射频的收发链路模型并进行高斯白噪声信道下的误码率仿真分析. 采用 Monte Carlo 统计分析,取 100 000 个采样点. 扫描信噪比,得到的误码率仿真值与理论值的对比如图 3 所示,其中, $E_b/N_{oI} = PT/N_{oI}$, E_b 为每码元单位上的信号能量. 从结果可看出,仿真值与理论值很好吻合,验证了系统模型的正确性.

图 3 P_e 仿真结果与理论值的对比

在信号仿真链路中,设接收机输入信号为最低可检测输入电平,在最弱接收情况下进行系统仿真及验证. 基带误码率与灵敏度值、射频系统增益及输出噪声谱密度相关,最终得到的 P_e 仿真结果见图 4.

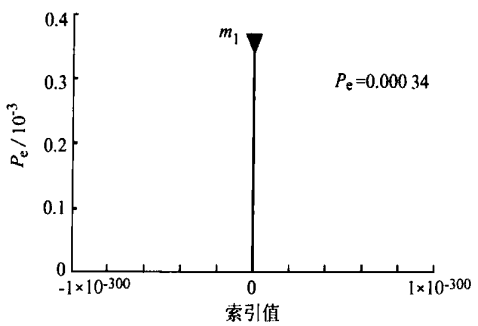

图 4 最低可检测情况下的 P_e 仿真结果

从图 4 仿真结果可以看到, P_e 为0.000 34,即 100 000 个采样点里有 34 个点产生误码.

在相同的输入条件及总体指标即接收信号为最小信号,中频处 N_{oI}为 - 52.503 dBm/Hz 的条件下,根据 $(S/N)_{out}$ = 10.9 dB 及式(8)得到系统基带误码率的理论值为 P_e = 0.000 47,即理论计算结果为 100 000 个点有近似 47 个点有误码. 误码率仿真结果与理论值之间的误差[7]为 27 %,此值在误码率的工程误差范围内.

通过对系统的计算及建模分析,验证了噪声谱计算和分析方法在系统指标分配及系统建模中的有效性.

4 结 论

本文就如何在未给定系统各子电路噪声参数而只给定系统总体指标的前提下估计出合理的子电路噪声参数展开研究,提出了一种在有限的系统参数下进行射频接收机各子电路噪声参数的分析和计算方法. 对信道中的加性高斯白噪声通过有噪线性电路后的功率谱计算进行了详细的分析,并把这种等效计算的方法应用在一通信电台射频接收机的建模中. 在有限的系统参数(信噪比,灵敏度,增益等)下分析出了各子电路合理的噪声系数,并通过基带的误码率得到了验证. 理论值和仿真结果较好吻合,说明了分析方法的有效性. 这种方法对于系统有限参数前提下的各子电路合理建模给出了很好的理论依据,不论对于射频系统设计前期的原理设计还是对系统后期验证及性能分析均有很好的指导作用.

参考文献 (References)

[1] 戴逸松. 电子系统噪声及低噪声设计方法[M]. 吉林:吉林人民出版社, 1984. 12～15, 66～70, 127～132
Dai yisong. Electro-system noise and method of low-noise design [M]. Jilin: Jilin Renming Press, 1984. 12～15, 66～70, 127～132 (in Chinese)

[2] Anderson J B. Digital transmission engineering [M]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1999. 229～234

[3] Jeruchim M C, Balaban P, Shanmuga K S. Simulation of communication systems: methodology, modeling, and techniques[M]. Second Edition. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000. 2～22, 352～361, 371～373

[4] Proakis J G. Salehi M. Communication systems engineering[M]. United States: Prentice Hall, 1994. 638～639

[5] 朱近康. 扩展频谱通信及其应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1991. 31～36
Zhu Jinkang. Spread spectrum communication and its application [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1991, 31～36 (in Chinese)

[6] Hutchison J A IV, Yona Eli, Graham S. Control of receiver immunity to interference by controlling linearity [P]. American Parent: WO0213402 A, 2002-02-14

[7] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社, 1979. 879～885
Mathematics Manual Editors. Mathematics manual [M]. Beijing: Higher Education Press, 1979. 879～885 (in Chinese)