幅度噪声与相位噪声测量的词汇、物理量和单位

Enrico Rubiola[1,2], Jacques Millo[1,2], Nora Meyne[3],Joseph Achkar[4],Filippo Levi[5],Archita Hati[6]1贝桑松时间与频率实验室 (LNE-LTFB)，法国2玛丽与路易·巴斯德大学、SUPMICROTECH、法国国家科学研究中心、FEMTO-ST研究所，贝桑松，法国3德国联邦物理技术研究院 (PTB)，不伦瑞克，德国4CCTF国际计量委员会互认协议工作组（国际计量局）主席，以及 LTE，巴黎，法国5意大利国家计量研究院 (INRiM)，都灵，意大利6(6) 美国国家标准与技术研究院，博尔德，科罗拉多州，美国

通讯作者：Enrico Rubiola，邮箱 enrico.rubiola@femto-st.fr，个人主页 https://rubiola.org

arXiv:2603.08238v1 [physics.ins-det] 9 Mar 2026

摘要——**非国际单位制物理量和单位的广泛使用，以及不恰当且容易引起误解的术语，造成了相位噪声和幅度噪声领域的混乱。本文讨论这些物理量、单位和术语，旨在促进各实验室之间的讨论，并推动全面采用国际单位制（SI）以及清晰、明确的术语。**

索引词——**相位噪声、幅度噪声、国际单位制（SI）、计量学、振荡器、谱分析、频率稳定度。**

I. 引言

“相位噪声”和“幅度噪声”这两个术语分别指影响幅度为 V_0 、频率为 f 的纯净周期信号的随机过程 $\varphi(t)$和 $\alpha(t)$，例如

$$v(t) = V_0\big[1 + \alpha(t)\big]\cos\big[2\pi f t + \varphi(t)\big]. \tag{1}$$

相位噪声、相位调制噪声和相位噪声（PN）通常被互换使用，幅度噪声、幅度调制噪声和幅度噪声（AN）也同样如此。相位噪声测量通常以频谱域表示，但由于历史原因（可追溯至1964年IEEE—美国国家航空航天局研讨会 [1],），人们更倾向于采用物理量 $\mathscr{L}(f)$，而非相位 $\varphi(t)$的功率谱密度（PSD） $S_\varphi(f)$。所有相位噪声分析仪和射频/微波振荡器制造商均采用以dBc/Hz为单位的物理量 $\mathscr{L}(f)$，迄今未发现例外，而且该量在文献中也得到广泛使用。奇怪的是，幅度噪声也使用 $\mathscr{L}(f)$和dBc/Hz，尽管有时会用 $\mathscr{M}(f)$替代 $\mathscr{L}(f)$。建议读者参阅文献 [2], [3]以了解相关综述。

调相噪声和调幅噪声领域存在许多困惑，这与不恰当且容易引起误解的词汇被广泛使用，以及非国际单位制物理量 $\mathscr{L}(f)$ 和单位 dBc/Hz 的使用有关。在国际计量局的协调下，相位噪声归属「电学与磁学」，但大多数科学进展都与「时间与频率」相关。

继 2019 年国际单位制进行重大修订后，随着国际单位制秒的重新定义工作正在推进 [4], ，本文提议启动对物理量、单位和术语的修订，使其与国际单位制保持一致。我们鼓励其他计量机构响应这一倡议。

II. 与国际单位制一致的物理量和单位

在所有相位噪声分析仪中，测量都从测量随机相位 $\varphi(t)$ 开始，并使用 Welch算法评估单边功率谱密度（PSD）：

$$S_\varphi(f) = \frac{2}{T}\Big\langle \big|\Phi_T\big|^2 \Big\rangle_m, \qquad f > 0 \tag{2}$$

其中， $\Phi_T(f)$ 是对 $\varphi(t)$ 在适当测量时间 T 内截断后进行离散傅里叶变换所得的结果，括号 $\langle \ldots \rangle_m$表示对适当数量 m次采集取平均，因子 2 则用于在删除负频率后保持能量守恒。角度的物理量纲为 1，其对应的国际单位制单位是弧度，符号为 rad。因此， $S_\varphi(f)$ 的物理量纲是时间，其对应的国际单位制单位为 $\mathrm{rad^2 s}$，或等价地写作 $\mathrm{rad^2/Hz}$。分贝（符号 dB）是允许与国际单位制单位搭配使用的非国际单位制单位；它对我们尤其有用，因为 $\mathscr{L}(f)$ 的取值范围往往跨越多个数量级。总之，物理量 $S_\varphi(f)$ 及其对应单位 $\mathrm{rad^2/Hz}$ 或 $\mathrm{dB\ rad^2/Hz}$ 是显而易见的选择，因为它们与测量过程相符，且与国际单位制一致。相对振幅 $\alpha(t)$ 的量纲为 1，没有对应的测量单位。因此，$S_\alpha(f)$ 及其对应单位 $\mathrm{dB\ 1/Hz}$（或 dB/Hz）似乎是自然的选择，但在电气工程中也可以考虑使用 $\mathrm{dB\ (V/V)^2/Hz}$。

III. 奇怪的量 $\mathscr{L}(f)$

量 $\mathscr{L}(f)$ 被不恰当地称为“单边带噪声”（图 1），而这一定义

$$\mathscr{L}(f) = \frac{\text{noise power in 1 Hz bandwidth at the offset } f}{\text{carrier power}} \tag{3}$$

仍见于许多文献中。 $\mathscr{L}(f)$ 以 dBc/Hz 表示，采用 $10\log_{10}$ dB，其中“c”表示“相对于载波功率”。

首先，单边带噪声并未说明噪声是调幅噪声还是调相噪声，或是两者的任意组合。事实上，调制与上边带和下边带（LSB 和 USB）之间的特定关系相对应，但单个边带并不能说明这种关系。“偏移频率”一词进一步强化了

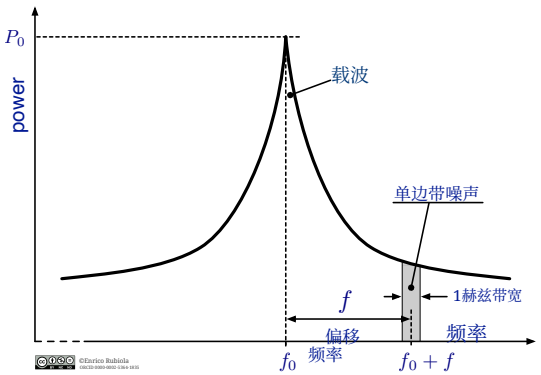


图1. 将 $\mathscr{L}(f)$ 解读为 1赫兹噪声与载波比的做法被广泛采用，但具有误导性。Enrico Rubiola。

一种错误的看法，即单个边带足以定义相位噪声。

第二个问题是，普遍认可的定义

$$\mathscr{L}(f) = \tfrac{1}{2}\, S_\varphi(f) \tag{4}$$

意味着 $\mathscr{L}(f)$ 和 $S_\varphi(f)$ 是同一回事，但测量单位不同（相差因子 1/2），这与图1不一致。从通常的分贝表达式出发

$$\mathrm{unit}\{10\log_{10}[\mathscr{L}(f)]\} = \mathrm{dBc/Hz} \tag{5}$$

$$\mathrm{unit}\{10\log_{10}[S_\varphi(f)]\} = \mathrm{dB\,rad^2Hz} \tag{6}$$

去掉“dB”和“Hz”单位后，我们会发现 $\mathscr{L}(f)$ 是一个角度的平方

$$1\mathrm{c} = 2\mathrm{rad}^2 \tag{7}$$

因此， $\mathscr{L}(f)$ 中所用角度的单位是

$$\sqrt{1\mathrm{c}} = \sqrt{2}\mathrm{rad} \simeq 81^\circ\ . \tag{8}$$

第三个问题是，单边带噪声只能用于描述较小的相位噪声。事实上，角度调制受能量守恒支配，因此边带功率的增加是以载波功率为代价的。当边带功率不可忽略时，式（3）便不再成立。实际振荡器中总能发现这类噪声过程，其中 $\varphi(t)$ 会随着时间推移而发散（见图2）。

词汇及其他问题

除了物理量和单位之外，我们还发现有些术语需要澄清或更改，主要包括：

- 参数噪声可能是个过于生僻的术语，不容易让人联想到随机调制
- 加性噪声和随机噪声在与参数噪声一同讨论时，常常引起混淆
- 附加噪声（双端口器件的）。这是器件本身的噪声，没有理由称之为“附加”
- 偏移频率不适合用来描述调制

不确定性和零不确定性也是其他相关问题，但涉及范围太广，将另行探讨。

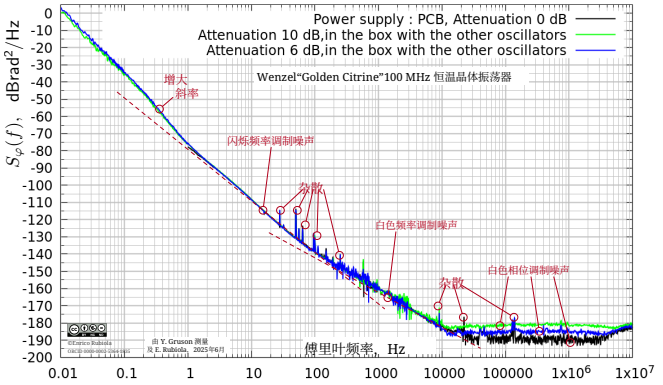


图 2. 在不同实验条件下对振荡器（100 MHz 恒温晶体振荡器）进行相位噪声测量的示例。Enrico Rubiola。

相关工作

首个振荡器相位噪声国际比对正在 LNE-LTFB 的领导下进行 [5]，。我们在此提出的问题，必然会在此次比对过程中得到探讨。相位噪声测量与国际单位制及计量实践的一致性问题，也正在 EURAMET TC-TF [6] 讨论。PTB 已启动相位噪声测量溯源与比对 Transmet 项目[7]。

校准与测量能力

LNE 是 BIPM 关键比对数据库（KCDB）中唯一具备相位噪声校准与测量能力（CMC）的实验室，目前还没有实验室具备幅度调制噪声 CMC。这类 CMC 使用量 $mathscrL$ 和单位 dBc/Hz，与国际单位制（SI）不一致（尽管审查过程中并未提出异议），因此需要从头重写。我们指出这一错误，希望引起其他对相位噪声感兴趣的实验室的关注，并推动科学讨论。

致谢

本项目由 LNE（https://www.lne.fr/en）、法国 FIRST-TF 网络（https://first-tf.com/）、EIPHI 研究生院（资助编号 ANR-17-EURE-0002）以及 Oscillator IMP 平台的内部资金资助。

参考文献

[1] A. R. Chi，短期频率稳定度。美国国家航空航天局，1965年，卷 SP-80。[ ] 19660001092 在线。可查阅：[2] *1139* 2022 https://ntrs.nasa.gov/citations/ E. Donley，等，*IEEE* 标准。IEEE，12月。[3] E. Rubiola 和 F. Vernotte，“Enrico 相位噪声与双样本方差图表的配套文献”，*IEEE* 微波理论与技术汇刊，第 71 卷，第 7 期，第 2996–3025 页，2023 年 7 月。[4] N. Dimarcq、M. Gertsvolf 等，“迈向重新定义秒的路线图”，《计量学》，第 61 卷，第 1 期，012001 页，2024 年 1 月。[5] “试点研究：相位噪声测量国际比对（EURAMET 注册号 1589）”，https://bit.ly/4dCFzD0。[6] E. Rubiola 和 J. Millo，“ 相位噪声的物理量、单位和术语 ”，EURAMET 技术委员会 TC-TF 会议，瑞士伯尔尼，2026年3月26日至27日。[7]“相位噪声测量溯源与比对 Transmet 项目”，https:// www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt2/fb- 22/ag-224.html。