

随机信号分析

随机信号的时域分析

主讲: 赵国亮

内蒙古大学电子信息工程学院

November 9, 2020

目录

- 1 随机过程的联合平稳
 - 希尔伯特变换的性质
 - 举例
- 2 高频窄带信号的复指数形式
 - 高频窄带信号通过窄带系统
 - 随机过程的解析形式及其性质
 - 窄带随机过程的统计分析
- 4 窄带高斯过程包络与相位的分布
 - 包络和相位各自的二维概率分布
 - 随相余弦信号与窄带高斯噪声之和的包络及相位的概率分布

第二次教案下载二维码

Github 下载



第 2 章 随机信号的时域分析

智慧树课堂二维码和项目地址



图 1:《随机信号分析》课程号:k213654



Github 项目地址

下载地址:

<https://github.com/zggl/random-signal-processing2020-autumn>

目录

1 随机过程的联合平稳

- 希尔伯特变换的性质
- 举例

2 高频窄带信号的复指数形式

- 高频窄带信号通过窄带系统
- 随机过程的解析形式及其性质
- 窄带随机过程的统计分析

4 窄带高斯过程包络与相位的分布

- 包络和相位各自的二维概率分布
- 随相余弦信号与窄带高斯噪声之和的包络及相位的概率分布

(1) 单边谱信号在时域是复信号

设单边谱信号的傅里叶变换为

$$f(t) \xrightleftharpoons[F^{-1}]{F} F(\omega), \omega > 0 \quad (1)$$

由于

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2)$$

则

$$f^*(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} F^*(\omega) e^{-j\omega t} d\omega \quad (3)$$

因为 $f^*(t) \neq f(t)$, 所以单边谱信号在时域是个复信号。

(2) 从实信号中分解出单边谱信号
设 $s(t)$ 为具有连续频谱的实信号

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (4)$$

式中 $S(\omega)$ 为信号 $s(t)$ 的频谱。由傅里叶变换可以证明, 当 $s'(t) = s(t)$ 时, 有

$$S^*(\omega) = S(-\omega) \quad (5)$$

所以实信号的频谱 $S(\omega)$ 是 ω 的复函数

若将 $S(\omega)$ 傅里叶逆变换分解成正负两频域部分积分之和

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^0 S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \\
 &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right] + \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(-\omega') e^{-j\omega' t} d\omega' \right] \\
 &= \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right] + \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(\omega') e^{j\omega' t} d\omega' \right]^* \\
 &= \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} 2S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right] = \operatorname{Re}[\tilde{s}(t)]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

其中

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} 2S(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (7)$$

具有单边频谱

$$\tilde{S}(\omega) = 2S(\omega)U(\omega) = \begin{cases} 2S(\omega), & \omega > 0 \\ 0, & \omega < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$s(t)$ 被称为实信号 $s(t)$ 的解析信号, 或 $s(t)$ 的预包络。
所以, 实信号 $s(t)$ 可用一个仅含其正频率成分的解析信号的实部来表示, 即 $s(t) = \text{Re}[\tilde{s}(t)]$ 。

2. 解析信号的表示方法

$$\tilde{s}(t) = \text{Re}[\tilde{s}(t)] + j \text{Im}[\tilde{s}(t)] \quad (9)$$

由于单边谱信号在时域是个复信号, 所以根据复数的性质, $s(t)$ 的解析信号可以表示为

$$\text{Im}[s(t)] = \hat{s}(t). \quad (10)$$

由 $\text{Re}[\tilde{s}(t)] = s(t)$, 再令

$$\text{Im}[s(t)] = \hat{s}(t). \quad (11)$$

即解析信号 $s(t)$ 的虚部用符号 $\hat{s}(t)$ 表示, 则

$$\tilde{s}(t) = s(t) + j\hat{s}(t). \quad (12)$$

上式是解析信号 $s(t)$ 的一般表达式, 然而式中的虚部 $s(t)$ 又如何求得呢? 从频域关系出发, 解析信号 $\tilde{s}(t)$ 的频谱 $\tilde{S}(\omega)$ 满足 $\tilde{S}(\omega) = 2S(\omega)U(\omega)$, 对等式两边进行傅里叶逆变换。由于

$$U(\omega) \xrightarrow[\mathcal{F}]{\mathcal{F}^{-1}} \frac{1}{2} \left[\delta(t) - \frac{1}{j\pi t} \right]. \quad (13)$$

则解析信号的时域表达式为

$$\bar{s}(t) = s(t) * \left[\delta(t) - \frac{1}{j\pi t} \right] = s(t) + j \left[s(t) * \frac{1}{\pi t} \right]. \quad (14)$$

实信号 $s(t)$ 的希尔伯特 (Hilbert) 变换

不难得到

$$\begin{aligned}\hat{s}(t) &= s(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t - \tau)}{\tau} d\tau.\end{aligned}\quad (15)$$

上式称为实信号 $s(t)$ 的希尔伯特 (Hilbert) 变换, 记作 $\hat{s}(t) = H[s(t)]$ 。

结论: 对于任何一个实信号 $s(t)$, 都可以分解出一个单边谱的解析信号 $\tilde{s}(t)$ 与其对应。此解析信号是个复信号, 其实部为原信号 $s(t)$, 虚部为原信号 $s(t)$ 的希尔伯特变换 $\hat{s}(t)$ 。

解析信号是最常用的复信号之一, 它在分析窄带随机信号中起着重要作用.

希尔伯特变换是应用解析信号时必不可少的数学工具.

因此有时也用解析形式表示复信号的方法称为希尔伯特表示法.

希尔伯特变换的几个重要性质

1. 希尔伯特变换相当于一个正交滤波器

希尔伯特变换是 $s(t)$ 和 $1/\pi t$ 的卷积, 根据线性系统的输出特征, 可以将 $\hat{s}(t)$ 看成是 $s(t)$ 通过一个具有冲激响应的线性滤波器, 如图 2 所示

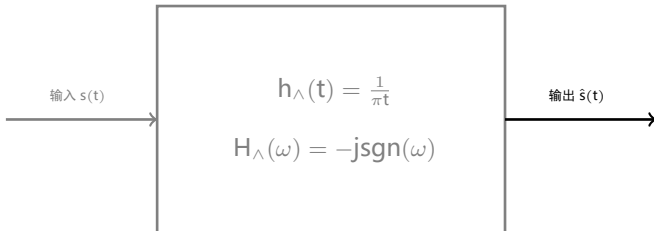


图 2: 希尔伯特变换

由于

$$j \frac{1}{\pi t} \xrightarrow[F^{-1}]{F} \text{sgn}(\omega) \quad (16)$$

式中 $\text{sgn}(a)$ 为符号函数, 满足

$$\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega > 0 \\ -1, & \omega < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\frac{1}{\pi t} \xrightarrow[F^{-1}]{F} -j \text{sgn}. \quad (18)$$

则此线性滤波器的传递函数 (频率响应) 为

$$H_{\wedge}(\omega) = -j\text{sgn}(\omega). \quad (19)$$

其幅频特性和相频特性分别为

$$|H_{\wedge}(\omega)| = 1, \quad \theta_{H_{\wedge}(\omega)} = \begin{cases} -\pi/2, & \omega > 0 \\ +\pi/2, & \omega < 0 \end{cases}. \quad (20)$$

滤波器输出信号 $\hat{s}(t)$ 相应的频谱为

$$S(\omega) = H_{\Lambda}(\omega)S(\omega) = -j\text{sgn}(\omega)S(\omega) = \begin{cases} -jS(\omega), & \omega > 0 \\ jS(\omega), & \omega < 0 \end{cases} \quad (21)$$

由式 (21) 可见, 通过此滤波器的信号, 其所有频率分量的幅度响应为 1. 而在相位上, 所有正频率分量移相 $-\pi/2$, 所有负频率分量移相 $+\pi/2$. 因此说, 希尔伯特变换是一种正交变换, 它的作用相当于一个正交滤波器, 如图 25 中所示的次变换。

3. 希尔伯特逆变换等于负的希尔伯特正变换
定义希尔伯特逆变换为

$$s(t) = H^{-1}[\hat{s}(t)]. \quad (25)$$

由式 (24) 可得

$$s(t) = -H[\hat{s}(t)]. \quad (26)$$

对比式 (25) 和式 (26) 可知

$$s(t) = -H[\hat{s}(t)]. \quad (27)$$

即希尔伯特逆变换等于负的希尔伯特正变换

$$H^{-1}[\cdot] = -H[\cdot]. \quad (28)$$

因此, 希尔伯特逆变换的公式为

$$\begin{aligned} s(t) &= H^{-1}[\hat{s}(t)] = -H[\hat{s}(t)] \\ &= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{s}(t-\tau)}{\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{s}(t+\tau)}{\tau} d\tau. \end{aligned} \quad (29)$$

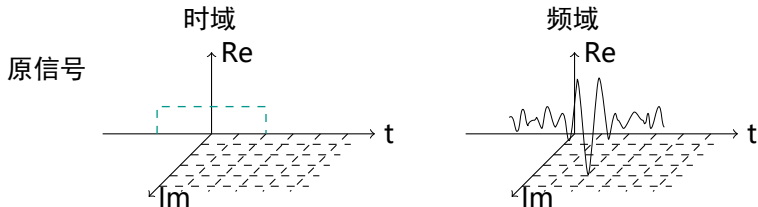
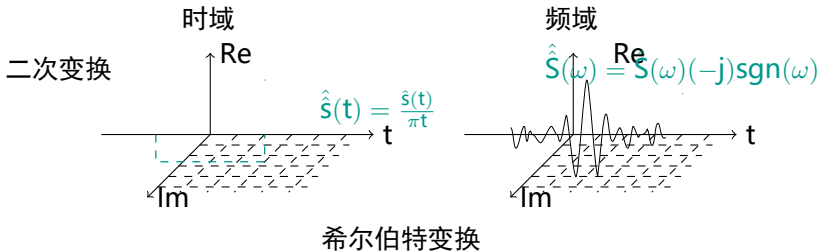


图 3: 希尔伯特变换



例 .1

求 $\cos \Omega t, \sin \Omega t$ 的希尔伯特变换。



解:

①

$$\begin{aligned}
 H[\cos \Omega t] &= \cos \Omega t * \frac{1}{\pi t} \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos[\Omega(t - \tau)]}{\tau} d\tau.
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
 H[\cos \Omega t] &= \cos \Omega t * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos[\omega(t - \tau)]}{\tau} d\tau \\
 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{\tau} \cos \Omega \cos \Omega \tau + \frac{1}{\tau} \sin \Omega t \sin \Omega \tau \right] d\tau \\
 &= \frac{1}{\pi} \left[\cos \Omega t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos \Omega \tau}{\tau} d\tau + \sin \Omega t \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin \Omega \tau}{\tau} d\tau \right].
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

由于 $\frac{\cos \Omega \tau}{\tau}$ 是 τ 的奇函数, 所以第一项积分为 0, 而 $\frac{\sin \Omega \tau}{\tau}$ 是 τ 的偶函数, 所以

$$H[\cos \Omega t] = \frac{2}{\pi} \sin \Omega t \int_0^{\infty} \frac{\sin \Omega \tau}{\tau} d\tau. \quad (32)$$

其中

$$\int_0^{\infty} \frac{\sin \Omega \tau}{\tau} d\tau = \frac{\pi}{2} \operatorname{sgn}(\Omega) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & \Omega > 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & \Omega < 0 \end{cases}. \quad (33)$$

所以

$$H[\cos \Omega t] = \operatorname{sgn}(\Omega) \sin \Omega t = \begin{cases} \sin \Omega t, & \Omega > 0 \\ -\sin \Omega t, & \Omega < 0 \end{cases}. \quad (34)$$

② 对上式两端再求一次 Hilbert 变换, 有

$$H\{H[\cos \Omega t]\} = H[\operatorname{sgn}(\Omega) \sin \Omega t] = \operatorname{sgn}(\Omega) H[\sin \Omega t]. \quad (35)$$

利用性质 2 可知, 两次希尔伯特变换相当于倒相器, 则

$$H\{H[\cos \Omega t]\} = -\cos \Omega t. \quad (36)$$

由上述两式综合可得

$$\text{sgn}(\Omega)H[\sin \Omega t] = H\{H[\cos \Omega t]\} = -\cos \Omega t. \quad (37)$$

则有

$$H[\sin \Omega t] = -\text{sgn}(\Omega) \cos \Omega t = \begin{cases} -\cos \Omega t, & \Omega > 0 \\ \cos \Omega t, & \Omega < 0 \end{cases} \quad (38)$$

例 .2

设限带信号

$$\begin{cases} s_1(t) = a(t) \cos \omega_0 t \\ s_2(t) = a(t) \sin \omega_0 t \end{cases} \quad (39)$$

其中 $a(t)$ 为低频限带信号, 其频谱为

$$A(\omega), \quad |\omega| < \frac{\Delta\omega}{2} < \omega_0 \quad (40)$$

求 $s(t)$, $s^2(t)$ 的 Hilbert 变换。

解: ① 利用傅里叶变换的相乘性质, 有

$$a(t) \cos \omega_0 t \xrightleftharpoons[F^{-1}]{F} \frac{1}{2\pi} A(\omega) * \pi [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] \quad (41)$$

$$S_1(\omega) = \frac{1}{2} [A(\omega - \omega_0) + A(\omega + \omega_0)]$$

如图 4 所示, 由于 $\frac{\Delta\omega}{2} < \omega_0$, 可得

$$S_1(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{2} A(\omega - \omega_0), & \omega > 0 \\ \frac{1}{2} A(\omega + \omega_0), & \omega < 0 \end{cases} \quad (42)$$

所以其希尔伯特变换的频谱为

$$\hat{S}_1(\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) S_1(\omega) = \begin{cases} -\frac{j}{2} A(\omega - \omega_0), & \omega > 0 \\ \frac{j}{2} A(\omega + \omega_0), & \omega < 0 \end{cases} \quad (43)$$

取 $\hat{S}_1(\omega)$ 的傅里叶逆变换可得

$$\begin{aligned} \hat{s}_1(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} -j \operatorname{sgn}(\omega) S_1(\omega) e^{j\omega t} d\omega \\ &= -\frac{j}{2} \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} A(\omega - \omega_0) e^{j\omega t} d\omega \right] + \frac{j}{2} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^0 A(\omega + \omega_0) e^{j\omega t} d\omega \right] \\ &= -\frac{j}{2} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega - \omega_0) e^{j\omega t} d\omega \right] + \frac{j}{2} \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\omega + \omega_0) e^{j\omega t} d\omega \right] \end{aligned} \quad (44)$$

利用傅里叶变换频移性质

$$\begin{aligned}\hat{s}_1(t) &= H[a(t) \cos \omega_0 t] = -\frac{j}{2}a(t)e^{j\omega_0 t} + \frac{j}{2}a(t)e^{-j\omega_0 t} \\ &= \frac{j}{2} \left(e^{-j\omega_0 t} - e^{j\omega_0 t} \right) a(t) = a(t) \sin \omega_0 t.\end{aligned}\quad (45)$$

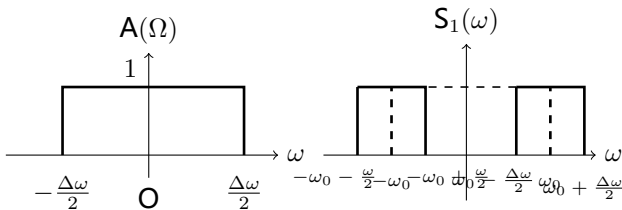
$$\hat{s}_2(t) = H[a(t) \sin \omega_0 t] = H\{H[a(t) \cos \omega_0 t]\} = -a(t) \cos \omega_0 t. \quad (46)$$


图 4: 例 6.2 图

目录

- 1 随机过程的联合平稳
 - 希尔伯特变换的性质
 - 举例
- 2 高频窄带信号的复指数形式
 - 高频窄带信号通过窄带系统
 - 随机过程的解析形式及其性质
 - 窄带随机过程的统计分析
- 4 窄带高斯过程包络与相位的分布
 - 包络和相位各自的二维概率分布
 - 随相余弦信号与窄带高斯噪声之和的包络及相位的概率分布

1. 频窄带信号

所谓高频窄带信号是指信号的中心频率 ω_0 位于高频段的窄带信号。这类信号的频带 $\Delta\omega$ 远远小于其中心频率 ω_0 , 即 $\Delta\omega \ll \omega_0$ 。诸如雷达、通信等电子系统中的一些高频信号大多可以近似认为是高频窄带信号。这类信号的典型频谱如图 5(a) 所示。如果在示波器上观察这类窄带信号, 它的波形或多或少地有点像正弦波, 如图 5(b) 所示。但它的振幅、相位不是常数, 而是随 t 变化的函数这类窄带信号 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = a(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)], \quad (47)$$

式中 $a(t)$ 是信号 $s(t)$ 的振幅调制, 称为包络函数。 $\phi(t)$ 是信号 $s(t)$ 的相位调制, 称为相位函数, 相对载波 $\cos \omega t$ 来讲, $a(t)$ 与 $\phi(t)$ 都是慢变化的时间函数。

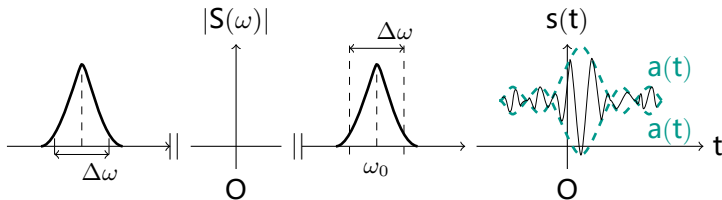


图 5: 高频窄带信号

2. 高频窄带信号的复指数形式 $s(t)$ 的希尔伯特变换为

$$\begin{aligned}\hat{s}(t) &= H [m_c(t) \cos \omega_0 t - m_s(t) \sin \omega_0 t] \\ &= H [m_c(t) \cos \omega_0 t] - H [m_s(t) \sin \omega_0 t].\end{aligned}\quad (50)$$

如果 $m_c(t), m_s(t)$ 均为低频限带信号, 即满足

$$\begin{aligned}m_c(t) &\xrightarrow{F} M_c(\omega), \quad |\omega| < \frac{\Delta\omega_c}{2} < \omega_0 \quad (\text{低频限带}) \\ m_s(t) &\xrightarrow{F} M_s(\omega), \quad |\omega| < \frac{\Delta\omega_s}{2} < \omega_0 \quad (\text{低频限带}).\end{aligned}\quad (51)$$

由例 25 的结论可得 $s(t)$ 的希尔伯特变换

$$\begin{aligned}
 \hat{s}(t) &= H[m_c(t) \cos \omega_0 t] - H[m_s(t) \sin \omega_0 t] \\
 &= m_c(t) \sin \omega_0 t + m_s(t) \cos \omega_0 t \\
 &= a(t) \cos \varphi(t) \sin \omega_0 t + a(t) \sin \varphi(t) \cos \omega_0 t \\
 &= a(t) \sin [\omega_0 t + \varphi(t)] .
 \end{aligned} \tag{52}$$

$s(t)$ 的解析形式可以用复指数表示形式

$$\begin{aligned}\tilde{s}(t) &= s(t) + j\hat{s}(t) = a(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)] + ja(t) \sin [\omega_0 t + \varphi(t)] \\ &= a(t)e^{j[\omega_0 t + \varphi(t)]} = m(t)e^{j\omega_0 t} = \tilde{s}_e(t).\end{aligned}\quad (53)$$

式中

$$m(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}, \quad (54)$$

通常, 将 $m(t)$ 称为信号 $s(t)$ 的复包络, 而将 $e^{j\omega_0 t}$ 称为复载频。
 $a(t)$ 称为包络, 解析信号 $\tilde{s}(t)$ 称为预包络。复包络可展开为

$$m(t) = a(t) \cos \varphi(t) + ja(t) \sin \varphi(t) = m_c(t) + jm_s(t). \quad (55)$$

可见, 包络 $a(t)$, 复包络 $m(t)$ 相对 $\cos \omega_0 t$ 来讲, 都是低频限带信号。

误差分析

(1) 误差产生的原因

从复指数形式的推导过程可以看出, 尽管解析信号 $\tilde{s}(t)$ 是复信号, 但要将它表示成复指数形式, 还必须满足 $m_c(t), m_s(t)$ 均为低频限带信号的条件。如果不满足此条件, 就不能由解析信号推出复指数表示。即不满足 $m_c(t), m_s(t)$ 低频限带信号的条件, 其解析信号表示与复指数表示仍存在一定的误差。

(2) 误差的计算

下面举例, 在频域上对解析信号与复指数信号进行比较, 计算它们之间的误差。

设一实信号 $s(t) = a(t) \cos \omega_0 t$, 其复包络 $m(t) = a(t)$, 复包络的频谱 $M(\omega)$ 不满足低频限带条件, 如图 ?? 所示

$$m(t) \xrightleftharpoons[F^{-1}]{F} M(\omega), \quad |\omega| < \Delta\omega \not\ll \omega_0. \quad (56)$$

实信号 $s(t)$ 频谱

$$S(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_0) + M(\omega - \omega_0)]. \quad (57)$$

① $s(t)$ 的解析信号

$$\bar{s}(t) = s(t) + j\hat{s}(t). \quad (58)$$

解析信号的频谱

$$\tilde{S}(\omega) = 2S(\omega)U(\omega) = [M(\omega + \omega_0) + M(\omega - \omega_0)] U(\omega). \quad (59)$$

② $s(t)$ 的复指数表示为

$$\bar{s}_{\text{复}}(t) = m(t)e^{j\omega_0 t}. \quad (60)$$

复信号频谱

$$\bar{S}_{\text{复}}(t)(\omega) = M(\omega - \omega_0). \quad (61)$$

比较复信号频谱与解析信号频谱间的误差, 如图 ?? 所示, 有带

$$\begin{aligned} \varepsilon(\omega) &= S_{\text{复}}(\omega) - S(\omega) \\ &= M(\omega - \omega_0) [1 - U(\omega)] - M(\omega + \omega_0) U(\omega). \end{aligned} \quad (62)$$

这个误差在时域的表达式为

$$\epsilon(\mathbf{x}) = \frac{1}{\pi} \text{Im} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{M}(\omega) \mathbf{e}^{i(\omega + \omega_0)\mathbf{t}} d\omega \right]. \quad (63)$$

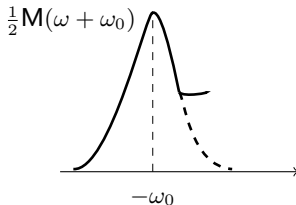
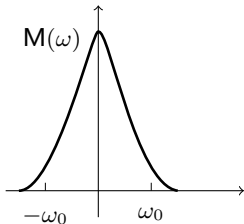
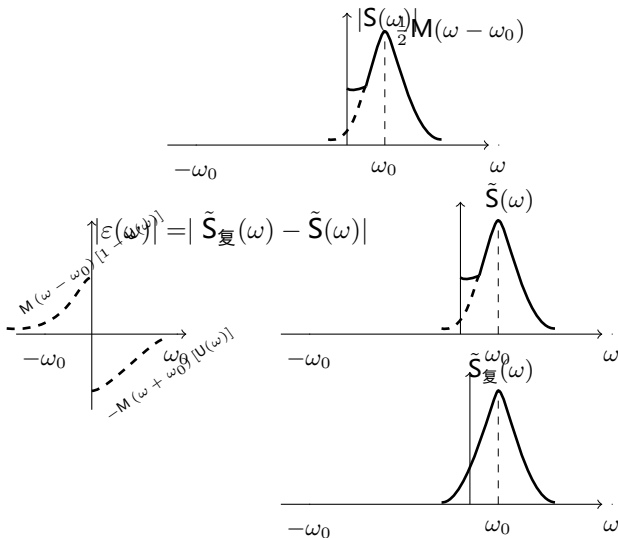


图 6: 误差分析



◀ ◻ ▶ ◀ ◻ ▶ ◀ ≡ ▶ ◀ ≡ ▶ ≡ ≡ ↺ 🔍 ↻

若已知高频窄带信号复包络的频谱 $M(\omega)$, 有

$$\tilde{s}_{\text{复}}(t) = m(t)e^{j\omega_0 t} \xrightleftharpoons[F^{-1}]{F} \tilde{S}_{\text{复}}(\omega) = M(\omega - \omega_0), \quad (65)$$

则

$$\tilde{s}_{\text{复}}^*(t) \rightarrow S_{\text{复}}^*(-\omega) = M^*(-\omega - \omega_0) \quad (66)$$

由于可以用复指数形式代替其解析形式 $\tilde{s}(t) = \tilde{s}_{\text{复}}(t)$, 则

$$s(t) = \text{Re}[\tilde{s}(t)] = \text{Re}[\tilde{s}_{\text{复}}(t)] = \frac{1}{2} [\tilde{s}_{\text{复}}(t) + \tilde{s}_{\text{复}}^*(t)] \quad (67)$$

则高频窄带信号的频谱可以表示为

$$S(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega - \omega_0) + M^*(-\omega - \omega_0)] \quad (68)$$

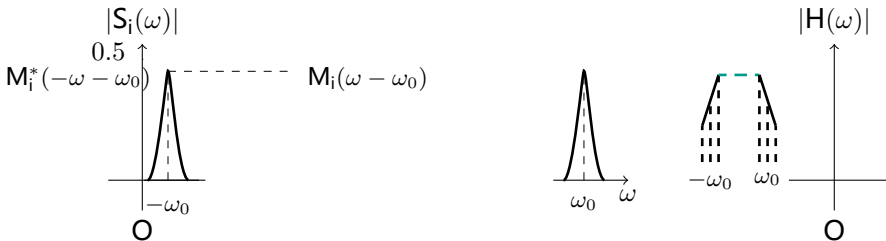


图 8: 高频窄带信号通过窄带系统

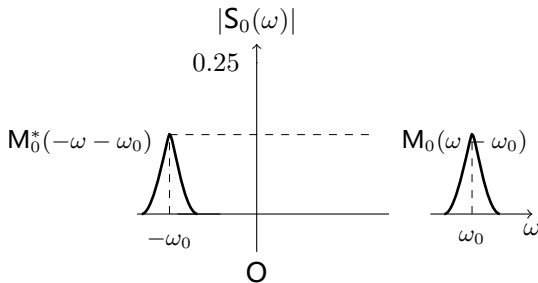


图 9: 高频窄带信号通过窄带系统

窄带信号的复数表示方法同样可以应用到窄带系统上, 以简化对系统的分析当复包络 $m(t)$ 是低频限带信号时, 无论是高频窄带信号还是高频窄带系统, 都可以直接用指数形式替代其解析形式。下面就讨论高频窄带信号通过相同中心频率的高频窄带系统的一种简便分析方法。

设输入的高频窄带信号为

$$s_i(t) = \text{Re} [s_i(t)] = \text{Re} [m_i(t)e^{iv}], \quad (69)$$

则其频谱可表示为

$$S_i(\omega) = \frac{1}{2} [M_i(\omega - \omega_0) + M_i^*(-\omega - \omega_0)]. \quad (70)$$

高频窄带系统的冲激响应和传递函数为

$$\begin{aligned} h(t) &= \text{Re}[\tilde{h}(t)] = \text{Re} [h_m(t)e^{j\omega_0 t}] \\ H(\omega) &= \frac{1}{2} [H_m(\omega - \omega_0) + H_m^*(-\omega - \omega_0)], \end{aligned} \quad (71)$$

其中 $h_m(t)$, $H_m(a)$ 分别为窄带系统的复包络及其频谱。

系统的输出

$$\begin{aligned} s_0(t) &= s_i(t) * h(t) \\ S_0(\omega) &= S_i(\omega)H(\omega). \end{aligned} \quad (72)$$

将输入窄带信号和窄带系统的频谱代入上式, 得

$$\begin{aligned}
 S_0(\omega) &= \frac{1}{4} [M_i(\omega - \omega_0) + M_i^*(-\omega - \omega_0)] [H_m(\omega - \omega_0) + H_m^*(-\omega - \omega_0)] \\
 &= \frac{1}{4} [M_i(\omega - \omega_0) H_m(\omega - \omega_0) + M_i(\omega - \omega_0) H_m^*(-\omega - \omega_0) \\
 &\quad + M_i^*(-\omega - \omega_0) H_m(\omega - \omega_0) \\
 &\quad + M_i^*(-\omega - \omega_0) H_m^*(-\omega - \omega_0)]
 \end{aligned}
 \tag{73}$$

由于 $s(t)$ 的复包络 $m_i(t)$ 是低频限带信号, 其频谱 $M_i(\omega)$ 如图 ?? 所示

$$\begin{cases} M_i^*(-\omega - \omega_0) H_m(\omega - \omega_0) = 0 \\ M_i(\omega - \omega_0) H_m^*(-\omega - \omega_0) = 0 \end{cases} \quad (74)$$

由图可知, 式 (74) 显然成立。所以

$$S_0(\omega) = \frac{1}{4} [M_i(\omega - \omega_0) H_m(\omega - \omega_0) + M_i^*(-\omega - \omega_0) H_m^*(-\omega - \omega_0)] . \quad (75)$$

相应的输出信号为

$$s_0(t) = \frac{1}{4} [m_i(t) * h_m(t)] e^{j\omega_0 t} + \frac{1}{4} [m_i(t) * h_m(t)]^* e^{-j\omega_0 t} \quad (76)$$

又因为

$$s_o(t) = \text{Re} [\tilde{s}_o(t)] = \frac{1}{2} [\tilde{s}_o(t) + \tilde{s}_o^*(t)] . \quad (77)$$

可得

$$\tilde{s}_o(t) = \frac{1}{2} [m_i(t) * h_m(t)] e^{j\omega_0 t} . \quad (78)$$

即输出的复包络 $m_0(t)$ 仅由输入信号的复包络 $m_i(t)$ 与系统冲激响应的复包络 $h_m(t)/2$ 卷积而成。

这种处理方法使我们对高频窄带信号通过高频窄带系统这类问题的分析与运算大为简化, 避免了高频信号与高频冲激响应卷积时的麻烦的高频项处理。

$$s_i(t) = \text{Re}[m_i(t)e^{j\omega_0 t}]$$

$$m_i(t)$$

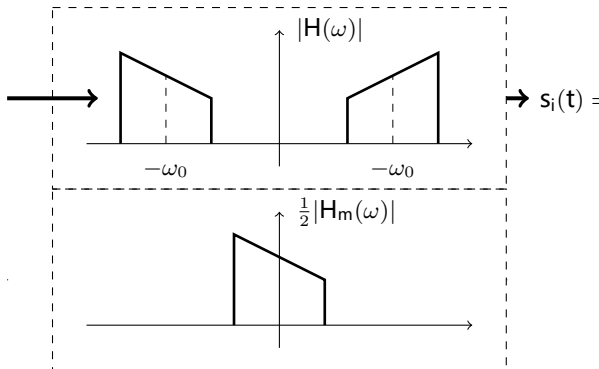


图 10: 运算的简化

实随机过程的解析形式 (或解析过程) 为

$$\hat{X}(t) = X(t) + j\hat{X}(t). \quad (81)$$

称为 $X(t)$ 的希尔伯特变换其中

$$\hat{X}(t) = X(t) * \frac{1}{\pi t}. \quad (82)$$

由于希尔伯特变换的线性性质, $1/\pi t$ 可以看成一线性系统的冲激响应。因此, $\dot{X}(t)$ 可以看成是在输入 $X(t)$ 的情况下线性系统 $h_\lambda(t)$ 的输出, 即

$$Y(t) = X(t) * \frac{1}{\pi t} = \hat{X}(t). \quad (83)$$

如图 11 所示。正是利用这一等效, 使得在下一节中应用解析过程来分析窄带随机后号变得是十分方便。

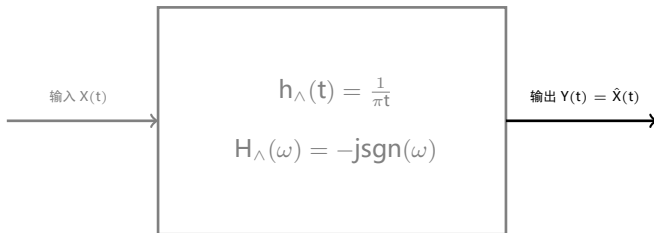


图 11: 解析过程

既然希尔伯特变换是一种线性变换, 那么随机信号通过线性系统的结论在此解析过程的性质可应用。

若 $X(t)$ 为宽平稳 (实) 过程, 则 $\hat{X}(t)$ 也是宽平 (实) 过程且 $X(t)$ 与 $\hat{X}(t)$ 联合宽平稳。

2° 实随机过程

证: 从图 11 不难看出

$$\begin{aligned} G_X(\omega) &= G_X(\omega) |H_\Lambda(\omega)|^2 \\ |H_\Lambda(\omega)| &= |-j\operatorname{sgn}(\omega)| = 1. \end{aligned} \quad (84)$$

因此

$$G_{\hat{X}}(\omega) = G_X(\omega) \Rightarrow R_X(\tau) = R_X(\tau). \quad (85)$$

$X(t)$ 与 $\hat{X}(t)$ 的互相关函数等于 $X(t)$ 自相关函数的希尔伯特变换。

为了与统计意义上的“正交”有所区别, 今后我们把几何意义上的“正交”改称为“垂直”, 称 $A_c(t), A_s(t)$ 为一对垂直分量。经过以上分析可知, $A_c(t), A_s(t)$ 包含了窄带随机过程 $X(t)$ 的所有随机因素。因此, 下面讨论窄带随机过程 $X(t)$ 的统计特性, 主要就是讨论这一对垂直分量 $A_c(t), A_s(t)$ 的统计特性及它们与过程 $X(t)$ 之间的统计关系

在讨论统计特性之前, 先导出 $X(t)$, $A_c(t)$, $A_s(t)$ 之间的函数关系如下

$$\begin{cases} X(t) = A_c(t) \cos \omega_0(t) - A_s(t) \sin \omega_0 t \\ \hat{X}(t) = A_c(t) \sin \omega_0(t) + A_s(t) \cos \omega_0 t \\ A_c(t) = X(t) \cos \omega_0(t) + \hat{X}(t) \sin \omega_0 t \\ A_s(t) = \hat{X}(t) \cos \omega_0(t) - X(t) \sin \omega_0 t \end{cases} \quad (109)$$

若窄带随机过程 $X(t)$ 是零均值平稳的实过程, 且功率谱密度如图 12 所示满足

$$G_X(\omega) = \begin{cases} G_X(\omega), & \left(\begin{array}{l} \Omega < \omega - \omega_0 < \Delta\omega - \Omega \\ -\Delta\omega + \Omega < \omega + \omega_0 < \Omega \end{array} \right) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (110)$$

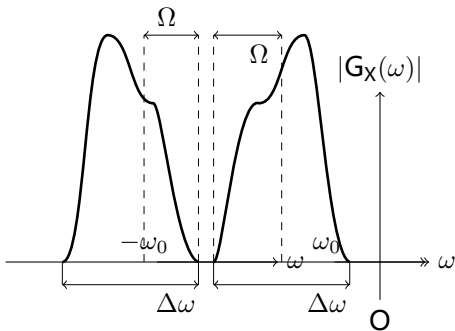


图 12: 零均值平稳窄带实随机过程的频谱

这里 Ω 和 $\Delta\omega$ 皆为正实常数, $\Delta\omega \ll \omega_0$ 。则 $A_c(t), A_s(t)$ 这对垂直分量有下面的性质

1. $A_c(t), A_s(t)$ 均为实随机过程。
2. $A_c(t), A_s(t)$ 的期望 $A(t), A(t)$ 的期望均为 0, 即满足

$$E[A_c(t)] = E[A_s(t)] = 0. \quad (111)$$

3. $A_c(t), A_s(t)$ 的自相关函数
- ① $A_c(t), A_s(t)$ 各自平稳, 它们的自相关函数为

$$R_{A_c}(\tau) = R_{A_s}(\tau) = R_X(\tau) \cos \omega_0 \tau + \hat{R}_X(\tau) \sin \omega_0 \tau. \quad (112)$$

② 当 $\tau = 0$ 时, 有

$$R_{A_c}(0) = R_{A_s}(0) = R_X(0). \quad (113)$$

即

$$E[A_c^2(t)] = E[A_s^2(t)] = E[X^2(t)]. \quad (114)$$

表示 $X(t)$, $A_c(t)$, $A_s(t)$ 三者的平均功率皆相等由于都是零均值, 因此三者的方差相同, 即

$$\sigma_{A_c}^2 = \sigma_{A_s}^2 = \sigma_X^2. \quad (115)$$

4. $A_c(t), A_s(t)$ 的功率谱密度

$$G_{A_c}(\omega) = G_{A_s}(\omega) = L_p [G_X(\omega - \omega_0) + G_X(\omega + \omega_0)] . \quad (116)$$

其中 $L_p[\cdot]$ 表示一低通滤波器。

证: 由于

$$\begin{aligned} R_{A_c}(\tau) &= R_X(\tau) \cos \omega_0 \tau + \hat{R}_X(\tau) \sin \omega_0 \tau \\ &= \frac{1}{2} R_X(\tau) [e^{j\omega_0 \tau} + e^{-j\omega_0 \tau}] + \frac{1}{2j} \hat{R}_X(\tau) [e^{j\omega_0 \tau} - e^{-j\omega_0 \tau}] . \end{aligned} \quad (117)$$

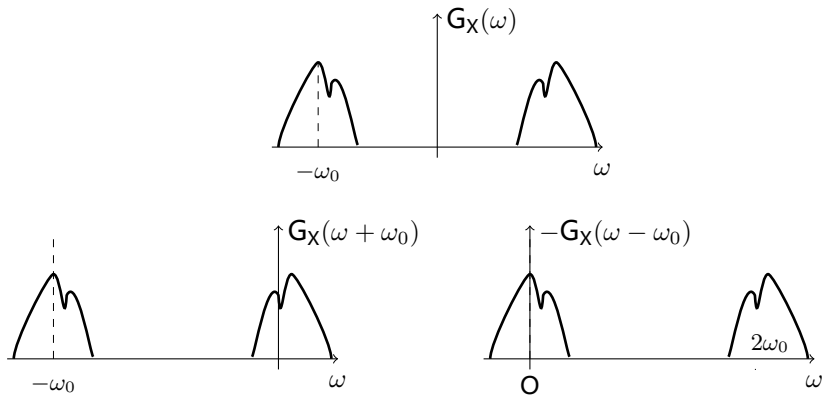


图 13: 垂直分量的功率谱密度

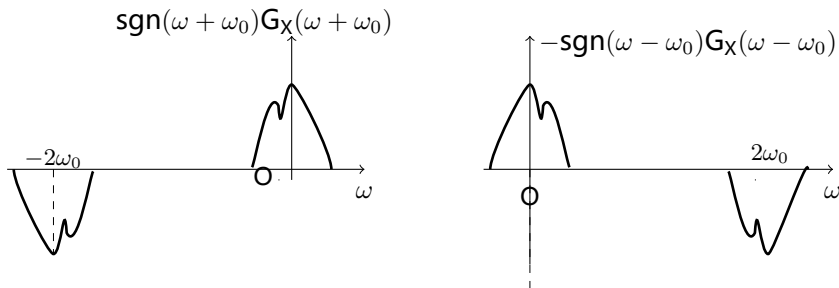


图 14: 垂直分量的功率谱密度

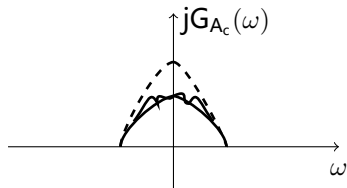


图 15: 垂直分量的功率谱密度

上式各项所对应的功率谱密度图形如图 15 所示。从图形中可以直接得出。

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{A_c}(\omega) = & \frac{1}{2} [\mathbf{G}_X(\omega - \omega_0) + \mathbf{G}_X(\omega + \omega_0)] \\ & + \frac{1}{2} [-\text{sgn}(\omega - \omega_0) \mathbf{G}_X(\omega - \omega_0) \\ & + \text{sgn}(\omega + \omega_0) \mathbf{G}_X(\omega + \omega_0)]. \end{aligned} \quad (118)$$

同理可得

$$G_{A_s}(\omega) = L_p [G_X(\omega - \omega_0) + G_X(\omega + \omega_0)] . \quad (119)$$

这说明, $A_c(t), A_s(t)$ 都是低频限带过程。

5. $A_c(t), A_s(t)$ 的互相关函数

① $A_c(t), A_s(t)$ 联合平稳, 它们的互相关函数为

$$\begin{cases} R_{A_c A_s}(\tau) = -R_X(\tau) \sin \omega_0 \tau + \hat{R}_X(\tau) \cos \omega_0 \tau \\ R_{A_s A_c}(\tau) = R_X(\tau) \sin \omega_0 \tau - \hat{R}_X(\tau) \cos \omega_0 \tau \\ R_{A_s A_s}(\tau) = -R_{A_c A_s}(\tau) \end{cases} \quad (120)$$

② 互相关函数 $R_{A_c A_s}(\tau), R_{A_s A_c}(\tau)$ 均是 τ 的奇函数。

$$\begin{cases} R_{A_c A_s}(\tau) = -R_{A_c A_s}(-\tau) \\ R_{A_s A_c}(\tau) = -R_{A_s A_c}(-\tau) \end{cases} \quad (121)$$

③ 当 $\tau = 0$ 时, 有

$$R_{A_c A_s}(0) = 0 \quad (122)$$

说明随机过程 $A_c(t), A_s(t)$ 在同一时刻的两个状态 (随机变量) 之间是相互正交的。

因为 $A_c(t), A_s(t)$ 的均值皆为 0, 所以当 $\tau = 0$ 时, 也有

$$C_{A_c A_s}(0) = 0. \quad (123)$$

说明随机过程 $A_c(t), A_s(t)$ 在同一时刻的两个状态 (随机变量) 之间是不相关的。

6. $A_c(t), A_s(t)$ 的互谱密度

① 功率谱密度 $G_X(\omega)$ 相对于中心频率 ω_0 非偶对称时, 如图 17(a) 所示

$$\begin{aligned} G_{A_c A_s}(\omega) &= -jL_p [G_X(\omega + \omega_0) - G_X(\omega - \omega_0)] \\ &= -G_{A_s A_c}(\omega). \end{aligned} \quad (124)$$

证: 由 $A_c(t), A_s(t)$ 的互相关函数

$$\begin{aligned} R_{A_c A_s}(\tau) &= -R_X(\tau) \sin \omega_0 \tau + \hat{R}_X(\tau) \cos \omega_0 \tau \\ &= -\frac{1}{2j} R_X(\tau) [e^{j\omega_0 \tau} - e^{-j\omega_0 \tau}] + \frac{1}{2} \hat{R}_X(\tau) [e^{j\omega_0 \tau} + e^{-j\omega_0 \tau}]. \end{aligned} \quad (125)$$

两边取傅里叶变换, 并利用 $F[\hat{R}_X(\tau)] = -j \operatorname{sgn}(\omega) G_X(\omega)$, 可得

$$\begin{aligned} G_{A_c A_s}(\omega) = & -\frac{1}{2j} [G_X(\omega - \omega_0) - G_X(\omega + \omega_0)] \\ & + \frac{1}{2} [-j \operatorname{sgn}(\omega - \omega_0) G_X(\omega - \omega_0) \\ & - j \operatorname{sgn}(\omega + \omega_0) G_X(\omega + \omega_0)]. \end{aligned} \quad (126)$$

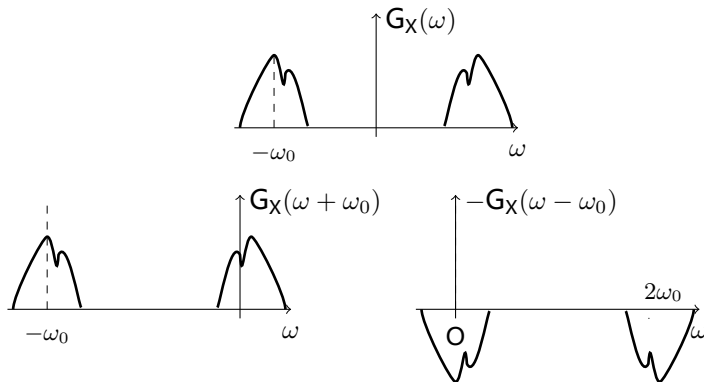


图 16: 垂直分量的互谱密度

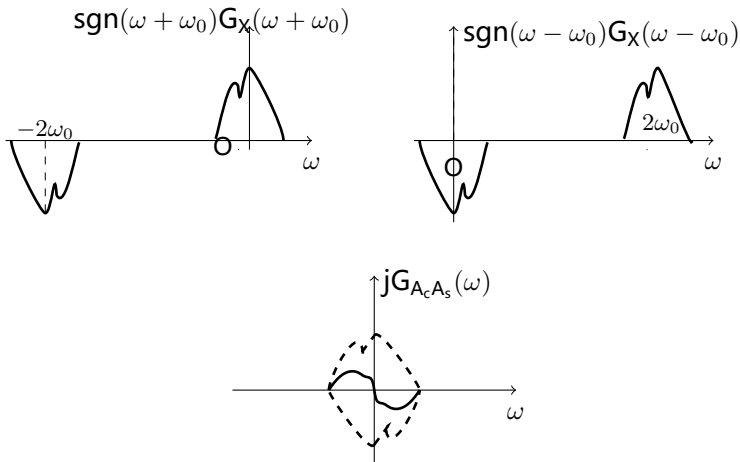


图 17: 垂直分量的互谱密度

$$\begin{aligned} jG_{A_c A_n}(\omega) = & -\frac{1}{2} [G_X(\omega - \omega_0) - G_X(\omega + \omega_0)] \\ & + \frac{1}{2} [\operatorname{sgn}(\omega - \omega_0) G_X(\omega - \omega_0) + \operatorname{sgn}(\omega + \omega_0) G_X(\omega + \omega_0)] \end{aligned} \quad (127)$$

上式各项所对应的功率谱密度图形如图 17 所示。从图上易证

$$jG_{A_c A_s}(\omega) = L_p [G_X(\omega + \omega_0) - G_X(\omega - \omega_0)]. \quad (128)$$

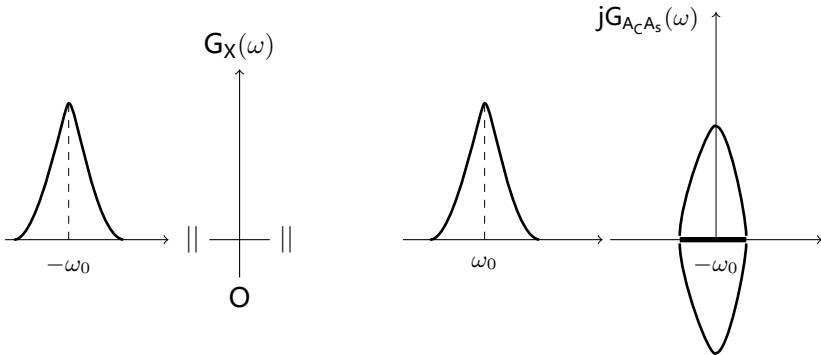
即有

$$G_{A_e A_s}(\omega) = -jL_p [G_X(\omega + \omega_0) - G_X(\omega - \omega_0)]. \quad (129)$$

同理可

$$G_{A_s A_c}(\omega) = jL_p [G_X(\omega + \omega_0) - G_X(\omega - \omega_0)] . \quad (130)$$

② $G_X(\omega)$ 相对于中心频率 ω 偶对称时, 如图 18(a) 所示。从图中可以看出, 各项叠加后恰好互相抵消, 如图 18(b) 所示。所以有



$$G_{A_r A_n}(\omega) = 0. \quad (131)$$

由上式可推出, 对任意 τ 值

$$R_{A_{A_k}}(\tau) = 0. \quad (132)$$

说明当 $X(t)$ 具有对称于的功率谱密度时, 随机过程 $A_c(t), A_s(t)$ 正交, 此处正交是指随机过程正交, 当然可以推出 $A_c(t), A_s(t)$ 在同一时刻也是正交的。

由于 $A_c(t), A_s(t)$ 的均值皆为 0, 同样可以证明: 当 $X(t)$ 具有对称于 m 的功率谱密度时, 两个随机过程 $A_c(t), A_s(t)$ 互不相关窄带随机过程 $X(t)$ 的自相关函数仿照上述性质的证明方法, 可以证明 (过程略)

$$R_X(\tau) = R_{A_e}(\tau) \cos \omega_0 \tau - R_{A_e A_s}(\tau) \sin \omega_0 \tau. \quad (133)$$

目录

- 1 随机过程的联合平稳
 - 希尔伯特变换的性质
 - 举例
- 2 高频窄带信号的复指数形式
 - 高频窄带信号通过窄带系统
 - 随机过程的解析形式及其性质
 - 窄带随机过程的统计分析
- 4 窄带高斯过程包络与相位的分布
 - 包络和相位各自的二维概率分布
 - 随相余弦信号与窄带高斯噪声之和的包络及相位的概率分布

在许多电子系统或电路中, 经常遇到用一个宽带随机过程 $N(t)$ 激励一个高频窄带系统 (或简称窄带滤波器) 的情况, 如图 20 所示。

由第四章的结论可知, 该情况下系统输出的随机过程都可以认为是一个窄带高斯过程。

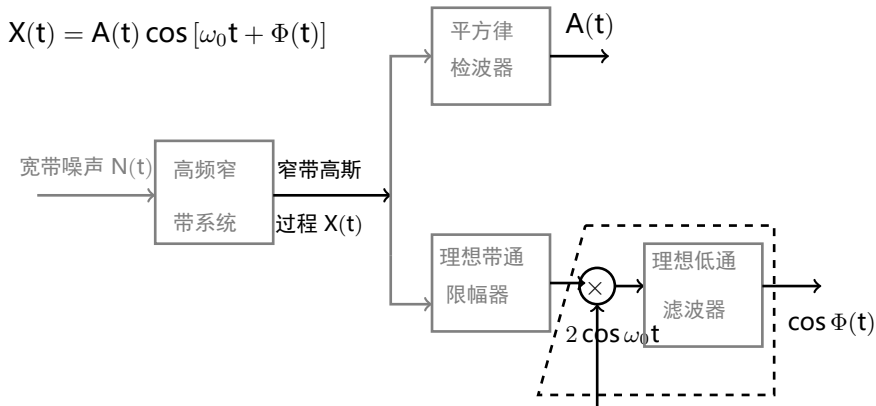


图 19: 窄带高斯过程的包络与相位

窄带高斯过程是通信和电子系统中最常遇到的随机信号模型, 研究窄带高斯过程具有实际意义。

根据上一节分析, 可将任一平稳窄带高斯过程 $X(t)$ 表示为准正弦振荡的形式

$$X(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \Phi(t)]. \quad (134)$$

其中 $A(t)$ 和 $\Phi(t)$ 分别是 $X(t)$ 的包络和相位, 它们都是低频限带过程; ω_0 是 $X(t)$ 的载波频率。

许多实际应用中, 常常需要检测出包络 $A(t)$ 或相位 $\Phi(t)$ 的信息。

若将窄带随机信号 $X(t)$ 送入一个包络检波器, 则在检波器输出端可得到包络 $A(t)$;

若将 $X(t)$ 送入一个相位检波器, 便可检测出 $X(t)$ 的相位信息, 如图 20 所示。

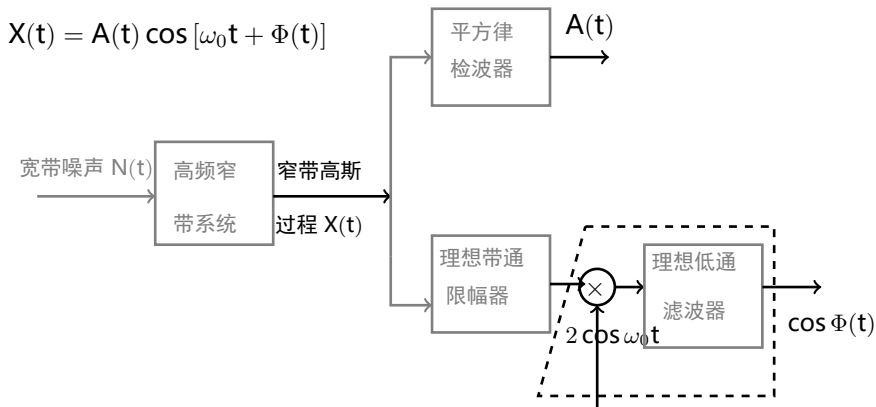


图 20: 窄带高斯过程的包络与相位

由于 $A(t)$ 和 $\Phi(t)$ 都是 $X(t)$ 的非线性变换, 推导它们的多维概率密度函数十分困难。

《随机信号分析》将只限于推导它们的一维和二维概率密度函数。

包络和相位的一维概率分布

设 $X(t)$ 是一个窄带平稳高斯实过程, 具有零均值和方差 2。现求其包络 $A(t)$ 和 $\Phi(t)$ 的一维概率密度。任一给定的时刻, 对 $A(t)$ 和 $\Phi(t)$ 采样, 便可得到随机变量 A_t 和 Φ_t 。求 $X(t)$ 包络 $A(t)$ 和 $\Phi(t)$ 的一维概率密度就是求 A_t 和 Φ_t 的概率密度 $f_A(a_i)$ 和 $f_\varphi(\varphi)$ 。

由窄带过程的垂直分解, $X(t)$ 可以表示成

$$X(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \Phi(t)] = A_c(t) \cos \omega_0 t - A_0(t) \sin \omega_0 t. \quad (135)$$

由上节内容, $A(t)$, $\Phi(t)$ 和 $A_c(t)$, $A_s(t)$ 具有如下关系

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{A_c^2(t) + A_s^2(t)} \\ \Phi(t) = \tan^{-1} \frac{A_s(t)}{A_c(t)} = \arctan \frac{A_s(t)}{A_c(t)} \end{cases} \quad (136)$$

则 A_t , Φ_t 和 A_{ct} , A_{st} 满足

$$\begin{cases} A_t = g_1(A_{ct}, A_{st}) = \sqrt{A_{ct}^2 + A_{st}^2} \\ \Phi_t = g_2(A_{ct}, A_{st}) = \arctan \frac{A_{st}}{A_{ct}} \end{cases} \quad (137)$$

其中 A_{ct} , A_{st} 为垂直分量 $A_c(t)$, $A_s(t)$ 在固定时刻的采样, 也都是随机变量。

则反变换关系为

$$\begin{cases} A_{ct} = h_1(A_t, \Phi_t) = A_t \cos \Phi_t \\ A_{st} = h_2(A_t, \Phi_t) = A_t \sin \Phi_t \end{cases} \quad (138)$$

求解思路

① 首先根据已知的窄带高斯过程垂直分量 $A_c(t)$, $A_s(t)$ 的统计特性, 来研究 A_{ct} , A_{st} 的统计特性, 从而得到 $A_{ct}A_{st}$ 的联合概率密度 $f_{A_c A_s}(a_{ct}, a_{st})$ 。

② 从 $f_{A_c A_s}(a_{ct}, a_{st})$ 出发, 利用雅可比变换得到 A_t, Φ_t 的联合概率密度 $f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t)$ 。

③ 最后对联合概率密度 $f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t)$ 积分, 求边缘概率密度 $f_A(a_t)$ 和 $f_\Phi(\varphi_i)$ 。

1. 求 $f_{A_c A_s}(a_{ct}, a_{st})$

首先根据已知的窄带高斯过程垂直分量 $A_c(t), A_s(t)$ 的统计特性, 来研究 A_{ct}, A_{st} 以下的统计特性, 从而得到 A_{ct}, A_{st} 的联合概率密度 $f_{A_c A_s}(a_{ct}, a_{st})$ 。

1° A_{ct}, A_{st} 都是高斯随机变量

已知 $X(t)$ 是一个平稳高斯过程, 由于 $X(t)$ 是 $\hat{X}(t)$ 的线性变换, 所以 $X(t)$ 也是平稳高斯过程。 $A_c(t), A_s(t)$ 均为 $X(t), \hat{X}(t)$ 的线性组合, 故 $A_c(t), A_s(t)$ 也是平稳高斯过程, 所以 A_{ct}, A_{st} 均为高斯变量。

2° A_{ct} 和 A_{st} 的均值皆为零

根据 $A_c(t), A_s(t)$ 的性质, 有 $E[A_c(t)] = E[A_s(t)] = 0$, 所以

$$E[A_{ct}] = E[A_{st}] = 0 \quad (139)$$

3° A_{ct} 和 A_{st} 具有相同的方差且等于 $X(t)$ 的方差 σ^2

根据 $A_c(t), A_s(t)$ 的性质, 有 $\sigma_{A_c}^2 = \sigma_{A_s}^2 = \sigma_X^2$, 所以

$$\sigma_{A_c}^2 = \sigma_{A_s}^2 = \sigma_X^2 = \sigma^2. \quad (140)$$

4° $A_{ct}A_{st}$ 相互独立

根据 $A_c(t), A_s(t)$ 的性质可知, 同一时刻的两个状态互不相关, 满足 $C_{A_c A_s}(0) = 0$ 。即 A_{ct}, A_{st} 互不相关。而对于高斯随机变量来说, 互不相关与统计独立等价, A_{ct}, A_{st} 相互独立

根据以上的性质可知, A_{ct}, A_{st} 是均值皆为零, 方差皆为 σ^2 的高斯变量, 且相互独立。

其联合概率密度

$$\begin{aligned} f_{A_c A_s}(a_{ct}, a_{st}) &= f_{A_c}(a_{ct}) f_{A_s}(a_{st}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{a_{ct}^2}{2\sigma^2}\right] \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{a_{st}^2}{2\sigma^2}\right] \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{a_{ct}^2 + a_{st}^2}{2\sigma^2}\right]. \end{aligned} \quad (141)$$

2. 求 $f_{A\Phi}$

从 $f_{A_c A_s}(a_{ct}, a_{st})$ 出发, 利用雅可比变换得 A_t, Φ_t 的联合概率密度 $f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t)$ 。

雅可比变换结果

$$f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t) = |J| f_{A_c A_s}(a_t \cos \varphi_t, a_t \sin \varphi_t), \quad (142)$$

其中, 雅可比行列式为

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial a_t} & \frac{\partial h_1}{\partial \varphi_t} \\ \frac{\partial h_2}{\partial a_t} & \frac{\partial h_2}{\partial \varphi_t} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \varphi_t & -a_t \sin \varphi_t \\ \sin \varphi_t & a_t \cos \varphi_t \end{vmatrix} = a_t \geq 0. \quad (143)$$

则 A_t, Φ_t 的联合概率密度为

$$f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t) = \begin{cases} \frac{a_t}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{a_t^2}{2\sigma^2}\right\}, & a_t \geq 0, 0 \leq \varphi_t \leq 2\pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (144)$$

由上式可见, A_t, Φ_t 的联合概率密度 $f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t)$ 与 Φ_t 无关。

③ 求 $f_A(a_t)$ 和 $f_\Phi(\varphi_i)$

最后对 A_t, Φ_t 的联合概率密度 $f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t)$ 积分, 求边缘概率密度 $f_A(a_i)$ 和 $f_\Phi(\varphi_i)$ 。

① A_t 的概率密度

$$\begin{aligned} f_A(a_t) &= \int_0^{2\pi} f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t) d\varphi_t \\ &= f_{A\Phi}(a_t, \varphi_t) \int_0^{2\pi} 1 \cdot d\varphi_t \\ &= \frac{a_t}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{a_t^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad a_t \geq 0. \end{aligned} \quad (145)$$

上式给出了包络 $A(t)$ 的一维概率密度表达式通常称它为瑞利概率密度或简称瑞利分布。

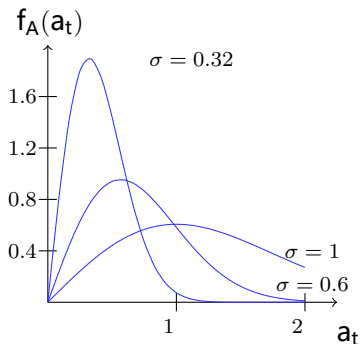


图 21: 瑞利分布

若平稳高斯过程 $X(t)$ 在 t_1, t_2 时刻采样为

$$\left\{ \begin{array}{l} X(t_1) \\ = A(t_1) \cos[\omega_0 t_1 + \Phi(t_1)] \\ \\ = A_c(t_1) \cos \omega_0 t_1 - A_s(t_1) \sin \omega_0 t_1 \\ X(t_2) \\ = A(t_2) \cos[\omega_0 t_2 + \Phi(t_2)] \\ \\ = A_c(t_2) \cos \omega_0 t_2 - A_s(t_2) \sin \omega_0 t_2 \end{array} \right. \quad (148)$$

为了便于表示, 把包络 $A(t)$ 在 t_1, t_2 时刻采样的随机变量 $A(t_1), A(t_2)$ 简记为 A_1, A_2 。

把相位 $\Phi(t)$ 在 t_1, t_2 时刻采样的随机变量 $\Phi(t_1), \Phi(t_2)$ 简记为中 Φ_1, Φ_2 ;

把垂直分量 $A_c(t)$ 在 t_1, t_2 时刻采样的随机变量 $A_c(t_1), A_c(t_2)$ 简记为 A_{c1}, A_{c2} ;

垂直分量 $A_s(t)$ 在 t_1, t_2 时刻采样的随机变量 $A_s(t_1), A_s(t_2)$ 简记为 A_{s1}, A_{s2} 。

现在求随机过程 $A(t) \Leftrightarrow \Phi(t)$ 各自的二维概率密度 $f_A(a_1, a_2)$ 和 $f_\Phi(\varphi_1, \varphi_2)$ 。

1. 求 $f_{A_c A_s}$

由上已知 $A_c(t), A_s(t)$ 都是平稳高斯过程, 具有零均值和相同的方差 σ^2 。因此, 可得 $A_{c1}, A_{s1}, A_{c2}, A_{s2}$ 为同分布的高斯变量, 具有相同的零均值和相同的方差 σ^2 。现在, 我们讨论一种最简单, 也是实际中最常见的情况, 即假定窄带随机过程 $X(t)$ 的功率谱密度 $G_X(\omega)$ 关于载波频率偶对称, 如图 18 所示。

根据 2 节的分析可知, 两个随机过程 $A_c(t), A_s(t)$ 正交且互不相关, 满足 $R_{A_c A_s}(\tau) = 0$, 皆为高斯过程, 则两个过程 $A_c(t), A_s(t)$ 是统计独立的。所以四维高斯变量 $(A_{c1}, A_{s1}, A_{c2}, A_{s2})$ 的联合概率密度。

因为二维高斯变量 (X, Y) 的联合概率密度形式为

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{2\pi \sqrt{\sigma_X^2 \sigma_Y^2 - C_{XY}^2}} \times \exp \left[-\frac{\sigma_Y^2 (x - m_X)^2 - 2C_{XY} (x - m_X) (y - m_Y)}{2 (\sigma_X^2 \sigma_Y^2 - C_{XY}^2)} + \frac{\sigma_X^2 (y - m_Y)^2}{2 (\sigma_X^2 \sigma_Y^2 - C_{XY}^2)} \right] \quad (150)$$

所以二维高斯变量 (A_{c1}, A_{c2}) 的联合概率密度为

$$f_{A_c}(a_{c1}, a_{c2}) = \frac{1}{2\pi\sqrt{\sigma^4 - R_{A_c}^2(\tau)}} \exp \left[-\frac{\sigma^2 a_{c1}^2}{2[\sigma^4 - R_{A_c}^2(\tau)]} - \frac{2R_{A_c}(\tau)a_{c1}a_{c2} + \sigma^2 a_{c2}^2}{2[\sigma^4 - R_{A_c}^2(\tau)]} \right]. \quad (151)$$

二维高斯变量 (A_{s1} 和 A_{s2} 的联合概率密度

应用性质 $R_{A_c}(\tau) = R_A(\tau)$, 可得四维高斯变量 $(A_{c1}, A_{c2}, A_{s1}, A_{sz})$ 的联合概率密度为

$$\begin{aligned} f_{A_c A_s}(a_{c1}, a_{s1}, a_{c2}, a_{s2}) &= f_{A_c}(a_{c1}, a_{c2}) f_{A_s}(a_{s1}, a_{s2}) \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2 [\sigma^4 - R_{A_s}^2(\tau)]} \exp \left[-\frac{\sigma^2 (a_{c1}^2 + a_{c2}^2 + a_{s1}^2 + a_{s2}^2)}{2 [\sigma^4 - R_{A_s}^2(\tau)]} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2R_{A_c}(\tau) (a_{c1}a_{c2} + a_{s1}a_{s2})}{2 [\sigma^4 - R_{A_s}^2(\tau)]} \right]. \end{aligned} \quad (152)$$

2. 求 $f_{A\Phi}$

$A_{c1}, A_{s1}, A_{c2}, A_{s2}$ 和 A_1, Φ_1, A_2, Φ_2 的关系为

$$\begin{cases} A_{c1} = h_1(A_1, \Phi_1) = A_1 \cos \Phi_1 \\ A_{s1} = h_2(A_1, \Phi_1) = A_1 \sin \Phi_1 \\ A_{c2} = h_3(A_2, \Phi_2) = A_2 \cos \Phi_2 \\ A_{s2} = h_4(A_2, \Phi_2) = A_2 \sin \Phi_2 \end{cases} \quad (153)$$

雅可比行列式为

$$J = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & -A_1 \sin \varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi_1 & A_1 \cos \varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi_2 & -A_2 \sin \varphi_2 \\ 0 & 0 & \sin \varphi_2 & A_2 \cos \varphi_2 \end{bmatrix} = a_1 a_2 \geq 0.$$

四维随机变量 $(A_1, \Phi_1, A_2, \Phi_2)$ 的联合概率密度为

$$f_{A\Phi}(a_1, \varphi_1, a_2, \varphi_2) = |J| f_{A_c A_s}(a_{c1}, a_{s1}, a_{c2}, a_{s2})$$

$$= \begin{cases} \frac{a_1 a_2}{(2\pi)^2 [\sigma^4 - R_{A_s}^2(\tau)]} \exp \left[-\frac{\sigma^2 (a_1^2 + a_2^2) - 2R_{A_c}(\tau) a_1 a_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}{2 [\sigma^4 - R_{A_s}^2(\tau)]} \right] & a_1, a_2 \geq 0; 0 \leq \varphi_1, \varphi_2 \leq 2\pi \\ 0, & \text{其他} \end{cases}.$$

(154)

3. 求 $A(t)$ 和 $\Phi(t)$ 各自的二维联合概率密度 f_A 和 f_Φ

$$f_A(a_1, a_2) = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} f_{A\Phi}(a_1, \varphi_1, a_2, \varphi_2) d\varphi_1 d\varphi_2$$

$$= \begin{cases} \frac{a_1 a_2}{[\sigma^4 - R_{A_S}^2(\tau)]} I_0 \left\{ \frac{a_1 a_2 R_{A_C}(\tau)}{[\sigma^4 - R_{A_S}^2(\tau)]} \right\} \exp \\ \left\{ -\frac{\sigma^2(a_1^2 + a_2^2)}{2[\sigma^4 - R_{A_S}^2(\tau)]} \right\}, a_1, a_2 \geq 0 \end{cases} \quad (155)$$

式 $I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[x \cos \varphi] d\varphi$, 是第一类零阶修正贝塞尔

对四维联合概率密度积分, 可得边缘概率密度

$$f_{\Phi}(\varphi_1, \varphi_2) = \left\{ \frac{[\sigma^4 - R_{A_s}^2(\tau)]}{4\pi\sigma^2} \left[\frac{(1-\beta)^{\frac{1}{2}} + \beta(\pi - \arccos \beta)}{(1-\beta^2)^{\frac{3}{2}}} \right], 0 \leq \varphi_1, \varphi_2 \leq 2\pi \right. . \quad (156)$$

其中

$$\beta = \frac{R_{A_c}(\tau)}{\sigma^2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (157)$$

若令 $q = \varphi_2$, 不难看出

$$f_{A\Phi}(a_1, \varphi_1, a_2, \varphi_2) \neq f_A(a_1, a_2) f_{\Phi}(\varphi_1, \varphi_2) . \quad (158)$$

这一特例说明, 窄带随机过程的包络 $A(t)$ 和相位更 $\Phi(t)$ 彼此不是独立的。

假设条件

$$X(t) = s(t) + N(t), \quad (159)$$

其中信号 $s(t)$ 为随相余弦信号

$$s(t) = a \cos(\omega_0 t + \theta), \quad (160)$$

式中 a, ω_0 . 随机变量 θ 服从 $(0, 2\pi)$ 区间上的均匀分布。其中噪声 $N(t)$ 为功率谱密度关于中心频率偶对称、零均值、方差为 σ^2 的平稳窄带高斯实过程。

显然这里 $X(t)$ 是一个窄带随机过程。若要求 $X(t)$ 的包络及相位的概率密度函数, 则可以仿照前面的方法, 将窄带高斯噪声 $N(t)$ 表示为

$$N(t) = A_c(t) \cos \omega_0 t - A_2(t) \sin \omega_0 t. \quad (161)$$

将随相余弦信号 $s(t)$ 表示为

$$s(t) = a \cos \theta \cos \omega_0 t - a \sin \theta \sin \omega_0 t. \quad (162)$$

令

$$\begin{cases} A'_e(t) = a \cos \theta + A_c(t) \\ A'_s(t) = a \sin \theta + A_s(t) \end{cases} \quad (163)$$

则

$$X(t) = A'_e(t) \cos \omega_0 t - A'_s(t) \sin \omega_0 t. \quad (164)$$

由前面的结论可知, $A'_c(t), A'_s(t)$ 都是低频限带过程, 它们随时间的变化 $\cos \omega_0 t$ 要缓慢得多。

若将 $X(t)$ 表示为准正弦振荡的形式

$$X(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \Phi(t)] \quad (165)$$

则 $X(t)$ 的包络和相位 $A(t), \Phi(t)$ 为

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{[A'_c(t)]^2 + [A'_s(t)]^2} \\ \Phi(t) = \arctan [A'_s(t)/A'_c(t)] \end{cases}. \quad (166)$$

易知 $A(t), \Phi(t)$ 也都是慢变化随机过程。

1° A'_u/θ 和 A'_v/θ 都是高斯变量且相互独立

由 $A'_c(t)$, $A'_s(t)$ 和 $A_c(t)$, $A_s(t)$ 的关系, 可得

$$\begin{cases} A'_{ct} = a \cos \theta + A_{ct} \\ A'_{st} = a \sin \theta + A_{st} \end{cases} \quad (167)$$

因为 A_a, A_{st} 是独立高斯变量, 从上式便可推出 $A'_{ct}/\theta, A'_{st}/\theta$ 也是独立高斯变量。

2° 求 A_{ct} 的均值

由 A_{ct}, A_{stt} 的均值皆为零, 可得

3° A'_{ct}/θ 和 A'_{st}/θ 的方差

由 A_{ct}, A_{st} 的均值皆为 σ^2 , 可得

$$D[A'_{ct}/\theta] = D[A'_{st}/\theta] = \sigma^2 \quad (168)$$

由上述三个结论可得 $A'_c(t), A'_s(t)$ 在给定条件下的二维条件概率密度为

$$f(a'_a/\theta, a'_{st}/\theta) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \left[(a'_{ct} - a \cos \theta)^2 + (a'_{st} - a \sin \theta)^2 \right] \right\}. \quad (169)$$

利用雅可比变换, $J = a \geq 0$, 便可得 A_i 在给定条件下的二维条件概率密度。

3. 求包络 $A(t)$ 的一维概率密度 $f_A(a_t)$

对二维条件概率密度积分, 得到边缘条件概率密度为

$$\begin{aligned} f(a_t/\theta) &= \int_0^{2\pi} f(a_t/\theta, \varphi_i/\theta) d\varphi_t \\ &= \frac{a_t}{\sigma^2} I_0\left(\frac{aa_t}{\sigma^2}\right) \exp\left\{-\frac{a_t^2 + a^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad a_t \geq 0. \end{aligned} \quad (171)$$

式中 $I_0(\cdot)$ 是第一类零阶修正贝塞尔函数。

在不同的信噪比 r 条件下包络的一维概率密度

将第一类零阶修正贝塞尔函数 $I_0(x)$ 展开成无穷级数为

① 由于 $x \ll 1$ 时

$$I_0(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{2^{2n}(n!)^2}. \quad (173)$$

② 当 $r \geq 1$ 时

$$f_A(a_t) \approx \frac{a_t}{\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{a_t^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad a_t \geq 0. \quad (174)$$

这就是说, 当信噪比很小时, 包络 $A(t)$ 的一维概率密度趋近于瑞利分布

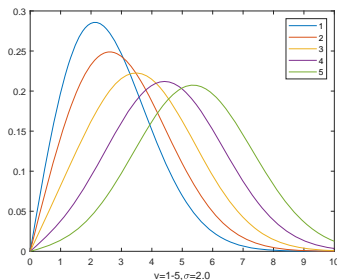


图 22: 莱斯分布在不同 ν 下的密度函数

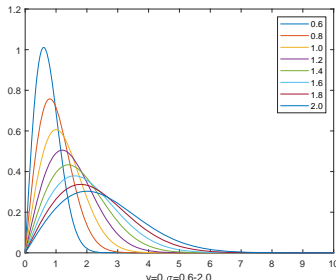


图 23: 莱斯分布在不同 σ 下的密度函数

4. 求相位 $\Phi(t)$ 的一维概率密度 $f_{\Phi}(\varphi/\theta)$

对二维条件概率密度积分, 得到边缘条件概率密度为

$$\begin{aligned}
 f_{\Phi}(\varphi_t/\theta) &= \int_0^{\infty} f(a_t/\theta, \varphi_t/\theta) da_t \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{a_t}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [a_t^2 + a^2 - 2aa_t \cos(\theta - \varphi_t)]\right\} a_t da_t \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{a_t}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [a_t^2 - 2aa_t \cos(\theta - \varphi_t) \right. \\
 &\quad \left. + (a \cos(\theta - \varphi_t))^2 - (a \cos(\theta - \varphi_t))^2 + a^2]\right\} da_t \\
 &= \frac{1}{2\pi} \exp\left\{-\frac{a^2 - [a \cos(\theta - \varphi_t)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (178)
 \end{aligned}$$

在不同信噪比条件下 Φ_t 的概率密度形式

不存在信号的情况下 Φ_t 的概率密度形式

① 当信噪比 $r = 0$ 时,

$$f_{\Phi}(\varphi_t/\theta) = f_{\Phi}(\varphi_t) = \frac{1}{2\pi}. \quad (180)$$

这时, 随机相位为均匀分布。

② 当 $\theta - \varphi \ll 1$ 时, 即信噪比很大时

$$\begin{cases} \sin(\theta - \varphi_t) \approx \theta - \varphi_t \\ \cos(\theta - \varphi_t) \approx 1 \end{cases}. \quad (181)$$

可以看出, $f_{\Phi}(\varphi/\theta)$ 的图形关于对称, 并在 $\varphi_t = \theta$ 处取得最大值。

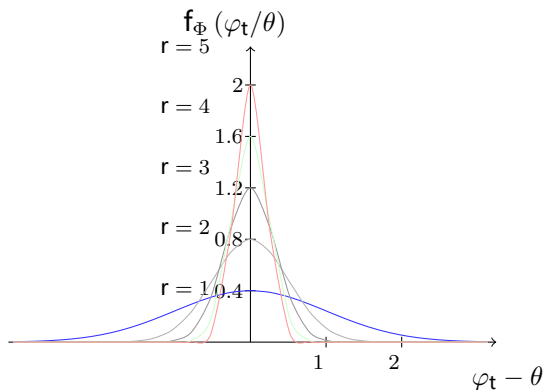


图 24: $f_{\Phi}(\varphi_2/\theta)$ 的分布