

通信系统中的IQ失配

皮诺曹 射频通信链 2025年10月29日 15:36 江苏



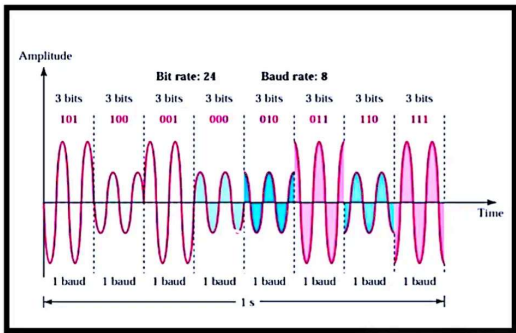
射频通信链

让射频学习不再困难，学射频，学通信，就看射频通信链。

390篇原创内容

公众号

在现代通信系统中，正交幅度调制（QAM）和正交相移键控（QPSK）被广泛用于高速数据传输。这些方案依赖于精确的同相（I）和正交（Q）信号分量来编码信息。然而，实际中的不完美常常导致 I-Q 失配，这是一个严重降低系统性能的问题。



公众号 · 射频通信链

I-Q 失配是由于调制器、解调器或混频器硬件实现的缺陷而产生的。本文深入探讨了 I-Q 失配的两种主要类型：幅度失配和相位失配，它们的成因及其对系统性能的影响。

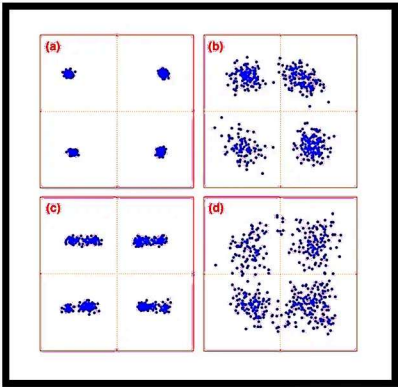
什么是 I-Q 失配？

理想的 I-Q 调制器产生两个正交分量：

分量 与 $\cos(\omega t)$ 成正比

分量 与 $\sin(\omega t)$ 成正比

在理想情况下，这些分量在幅度上完全平衡且在相位上正交（相差90°）。任何偏离这种理想行为都会导致：



公众号 · 射频通信链

幅度失配：I 分量和 Q 分量的幅度不相等。

相位失配：I 和 Q 分量之间的相位差偏离 90°。

这些失配主要是由发射器或接收器链中的电路非线性、制造缺陷或元件公差引起的。

幅度失配

起源和数学表示

幅度失配发生在应用于 I 和 Q 分量的增益不同时。设 I 和 Q 分量的幅度分别被因子 $1-\epsilon$ 和 $1+\epsilon$ 缩放，其中 ϵ 是幅度失配因子。广义的 I-Q 信号可以表示为：

$$X_I = a(1 - \epsilon) \cos(\omega t - \theta),$$

$$X_Q = b(1 + \epsilon) \sin(\omega t + \theta),$$

其中 a 和 b 是理想的幅度缩放因子， θ 表示相位偏移（在纯幅度失配时假设为零）。当 $\theta=0$ 时，I 和 Q 分量的幅度变为：

$$X_{\text{Amp,I}} = a(1 - \epsilon) \cos(\omega t),$$

$$X_{\text{Amp,Q}} = b(1 + \epsilon) \sin(\omega t).$$

可视化幅度失配

幅度失配扭曲了理想的星座图。例如：

在 QPSK 中，理想的星座点形成完美的正方形，但在 I 和 Q 维度上被不等比例缩放，导致形成矩形或倾斜的图案。这种扭曲影响了传输符号的检测，并增加了比特错误率（BER）。幅度失配通常通过硬件或软件领域的校准技术来缓解。

相位失配

起源与数学表示

当 I 和 Q 信号不再正交时会发生相位失配，即它们之间的相位差偏离 90°。这种偏差用 ϕ 表示，称为相位误差。调制信号可以表示为：

$$x(t) = a_1 A_c \cos(\omega t + \phi) + a_2 A_c \sin(\omega t).$$

Using trigonometric identities, this expands to:

$$x(t) = a_1 A_c \cos \phi \cos(\omega t) + (a_2 A_c - a_1 A_c \sin \phi) \sin(\omega t).$$

在此表示中：

分量 (I) 和 Q 分量 (Q) 不再与原始坐标轴完全对齐。这会导致传输信号产生**幅度和角失真**。

可视化相位失配

相位失配会使星座图旋转。例如：

在 QPSK 中，相邻星座点之间的 90° 分离减小，导致符号重叠或误读。失配引入了符号间干扰（ISI），并降低了系统性能。

主要观察结果

对于小的相位误差（ $\phi \approx 0$ ），失真微小的，但仍会影响误差向量幅度（EVM）。对于较大的误差，系统的正交性会失效，导致恢复传输信号变得显著困难。

幅度和相位失配的综合结果

当幅度和相位失配同时发生时，信号失真会更加明显：

星座图表现出缩放和旋转。传输功率利用效率低下，导致更高的错误率。考虑幅度失配（ ϵ ）和相位失配（ ϕ ）的通用表示为：

$$x(t) = (1 - \epsilon) \cos(\omega t - \phi) + (1 + \epsilon) \sin(\omega t + \phi)$$

综合影响可以可视化为一个倾斜和旋转的星座图。

缓解技术

硬件校准：

- 使用精密组件以最小化变化。
- 实现自动增益控制（AGC）电路以均衡幅度。

数字信号处理（DSP）：

- 应用自适应算法实时估计和校正 I-Q 失配。
- 盲源分离（BSS）或最小均方（LMS）滤波器等技术可以有效地补偿失配。

纠错码：

- 使用先进的编码方案以容忍增加的噪声和失真。

定期测试和校准：

对通信链路进行周期性测试，以确保性能保持在可接受范围内。

[阅读原文](#)