

# 数字相干光通信调制器和解调器 基本原理

陶振宁

富士通研发中心通信技术部 副部长

北京邮电大学兼职教授

2018/11/28

taozn@cn.fujitsu.com

## ■ 调制器是做什么的？

- 把希望发送的数据调制到光信号上
- 发送的数据一般表示为一个复数 $I+jQ$ ，比如QPSK

## ■ 什么样的调制器是好的？

- 成本、体积、功耗 – 几乎是永恒的话题
- 具体的技术要求：带宽、光衰减、驱动电压、失真和噪声

## ■ 有哪些技术路线？

- 目前基本都集中到MZM结构
- 差异是电光调相的材料，有 $\text{LiNbO}_3$ ，InP，Silicon，Polymer，Plasmonic。

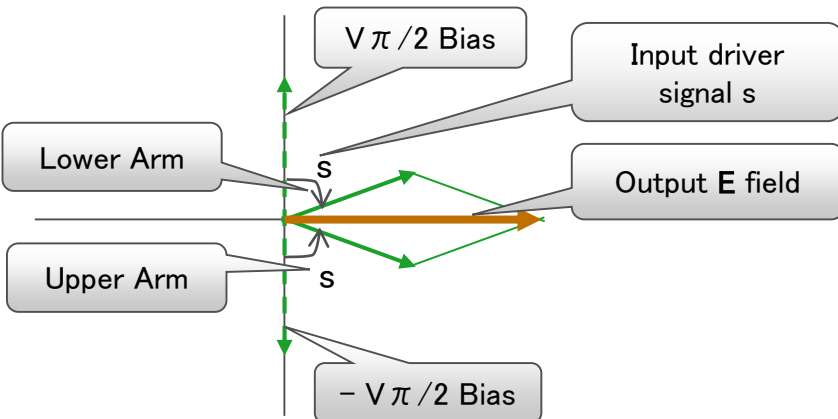
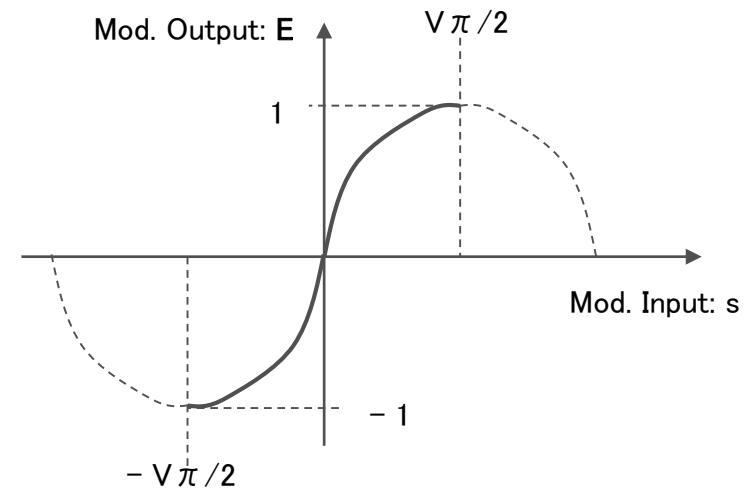
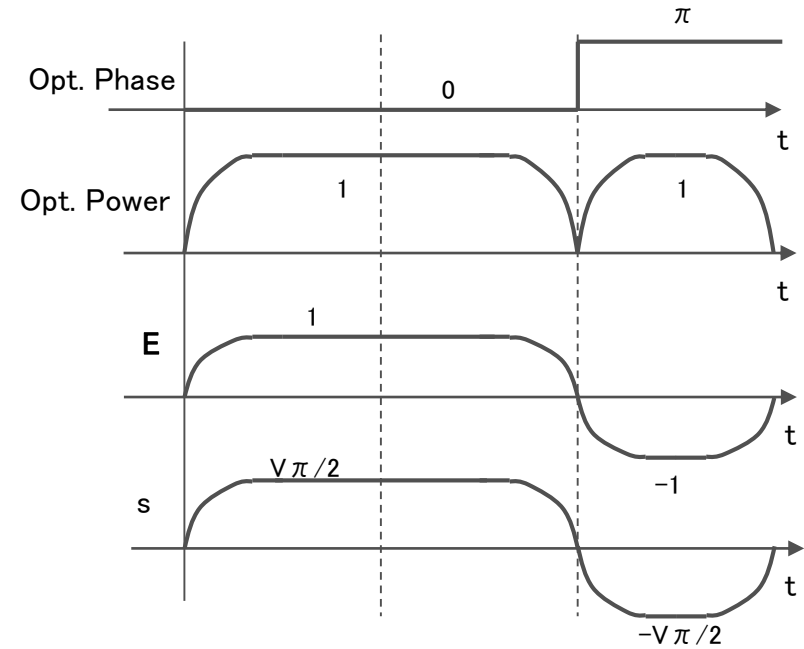
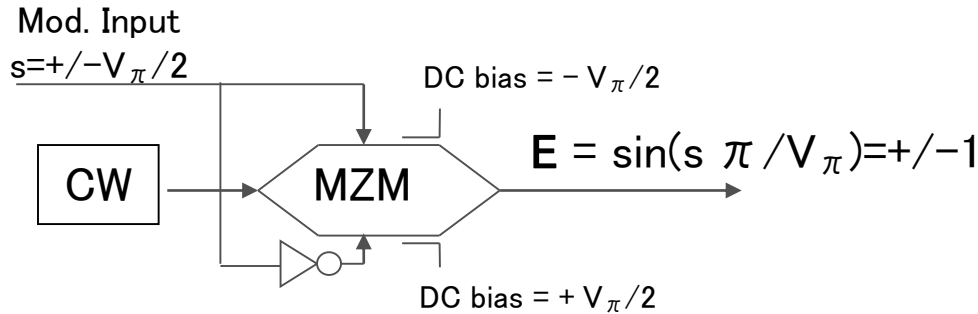
## ■ 实际选择时需要考虑哪些因素？

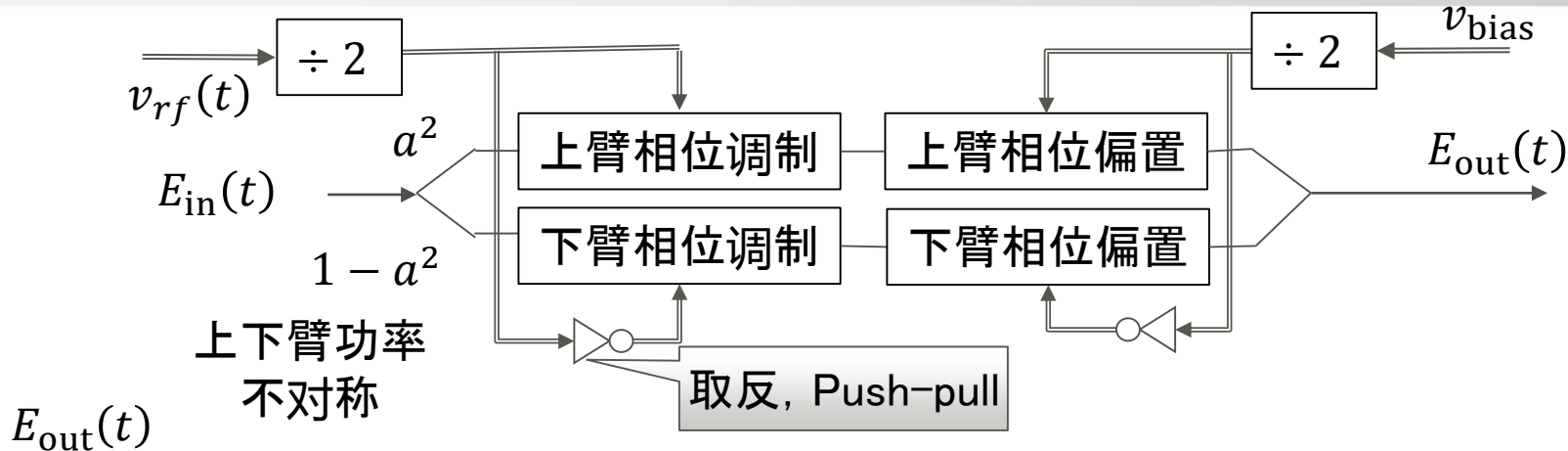
- 技术上：成本、体积、功耗
- 学校实验：预算约束下的最稳定的、然后是最佳性能
- 产品中选合适的、而不是最佳性能的；
- 非技术考虑：后期支持、量产供货能力、第二供应商...

# 推挽式马赫-曾德尔调制器

## ■ Push – Pull Mach-Zehnder modulator

- Convert bi-polar electrical signal to bi-polar optical signal
- BPSK modulator
- Nonlinear (exp. multi-level)





$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ a \exp \left( j \frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}} \pi + j \frac{v_{bias}}{2V_{\pi,DC}} \pi \right) + \sqrt{1-a^2} \exp \left( -j \frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}} \pi - j \frac{v_{bias}}{2V_{\pi,DC}} \pi \right) \right]$$

$$a = \sqrt{0.5 + \varepsilon} \quad extinction \ ratio \ (ER) = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{|a + \sqrt{1-a^2}|^2}{|a - \sqrt{1-a^2}|^2} \approx \frac{1}{\varepsilon^2}$$

- 假设电压和相位成线性关系，斜率是 $V_{\pi}$ 
  - Bias的调相器和RF信号的调相器通常不是一个，所以 $V_{\pi} \neq V_{\pi,DC}$
- $v_{bias}$ 通常选 $-V_{\pi,DC}$ ，叫消光点（NULL）。物理上 $v_{rf} = 0$ 时，输出消光
- 消光比ER， $ER_{dB} = 10 * \log_{10}(ER_{linear}) = -10 \log_{10}(\varepsilon^2) = -20 \log_{10}(\varepsilon)$ 
  - 35 dB 对应 0.518 : 0.482 = 0.5+ $\varepsilon$  : 0.5- $\varepsilon$ ， $\varepsilon = 0.018$
- 射频信号 $v_{rf}(t)$ 是单端表示的

## 理想指:

- 等分光比,  $a = \sqrt{1 - a^2} = \sqrt{0.5}$ ; 也就是ER无穷大
- 偏置设定为消光,  $v_{bias} = -V_{\pi,DC}$

## 数学表达式:

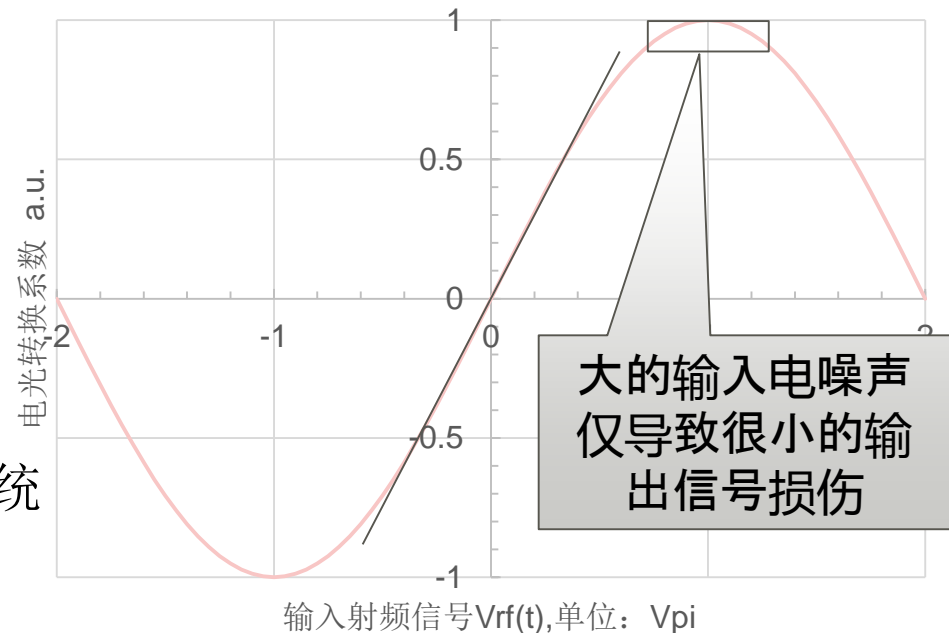
$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \sin\left(\frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}} \pi\right)$$

## 调制曲线是非线性的

- 线性调制要求小信号输入,
- 这个是调制信号峰峰值受限的系统  
对DMT, OFDM很不利

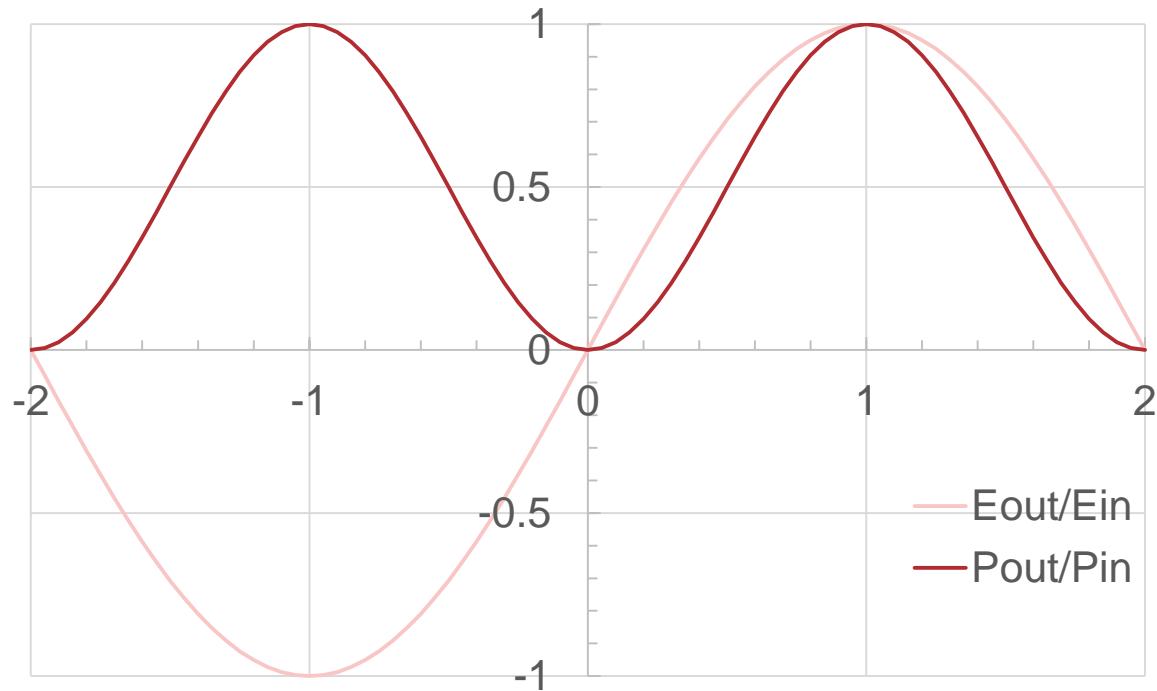
## 但非线性也有好处

- BPSK调制本身只要求2值, 可以容忍很多偏差;
- 而且有天然的噪声压缩功能, ISI压缩功能
- BPSK可以采用大的电驱动信号, 产生大的输出光功率



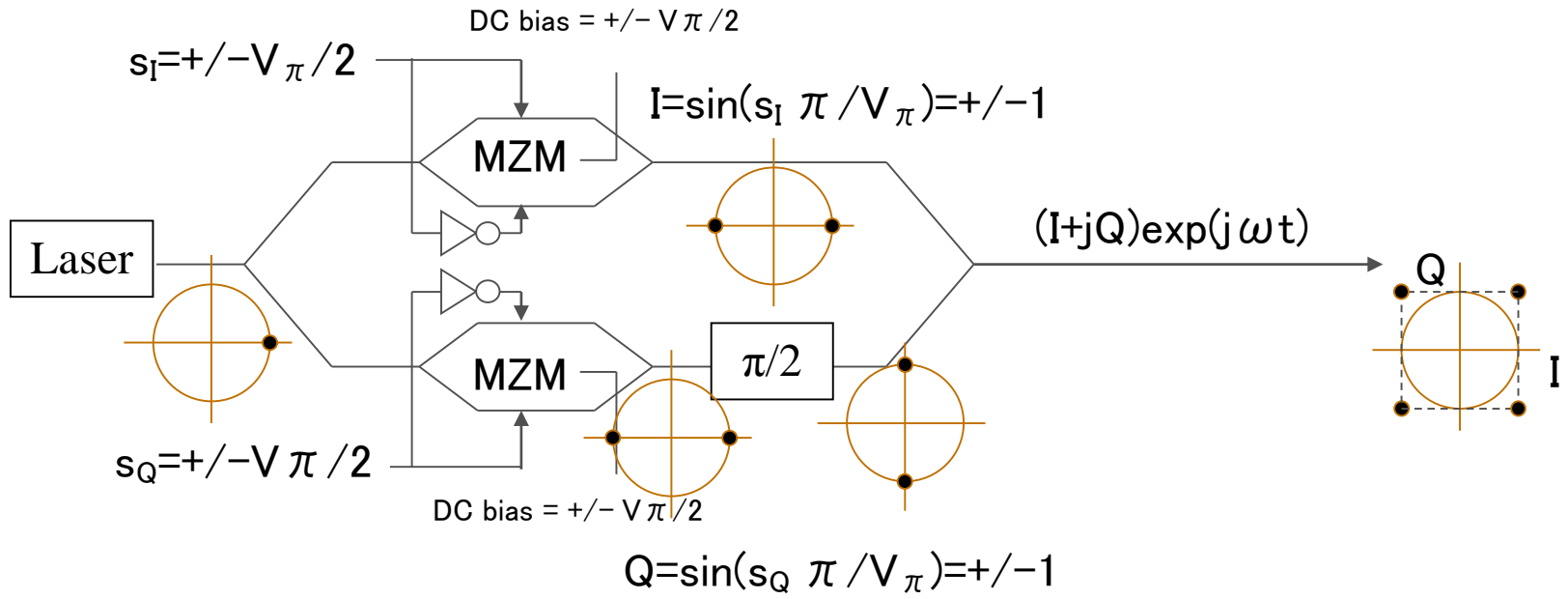
光场:  $\sin\left(\frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}}\pi\right)$

光强  $\left|\sin\left(\frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}}\pi\right)\right|^2$



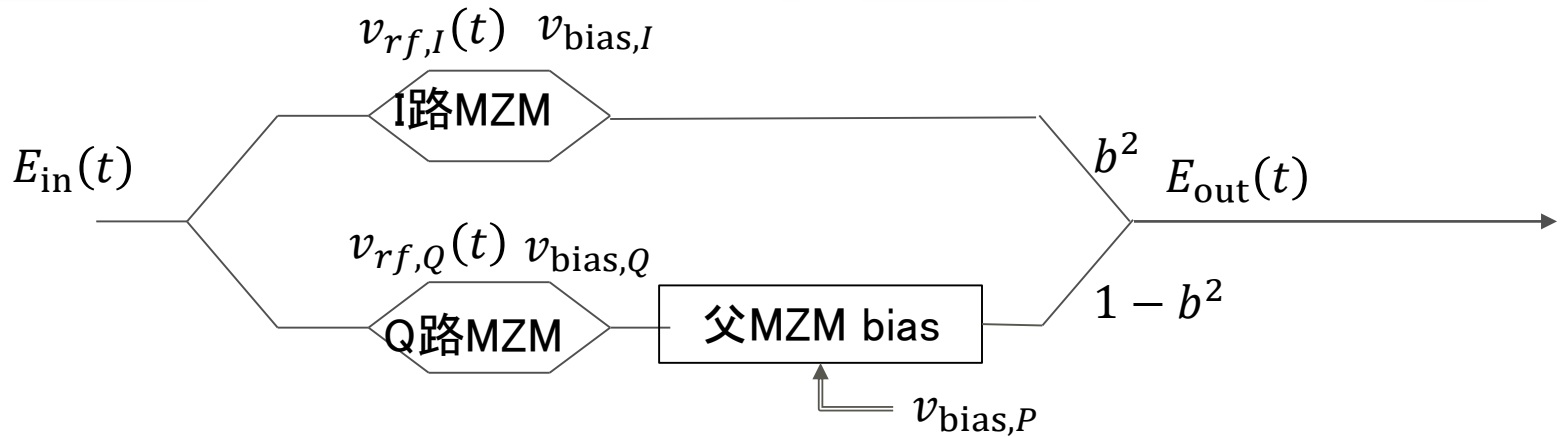
输入射频信号 $V_{rf}(t)$ ,单位:  $V_{\pi}$

- 输出光平均功率和输入射频信号的平均功率或幅度有关
- 在符号过渡的时候, 有功率的过零
  - 这个对clock recovery有用
- 对光相位而言, 理想的 $\pi$ 、 $-\pi$ 跳变, 无chirp啁啾



## ■ I/Q 正交调制

# 理想小信号正交调制器的数学模型



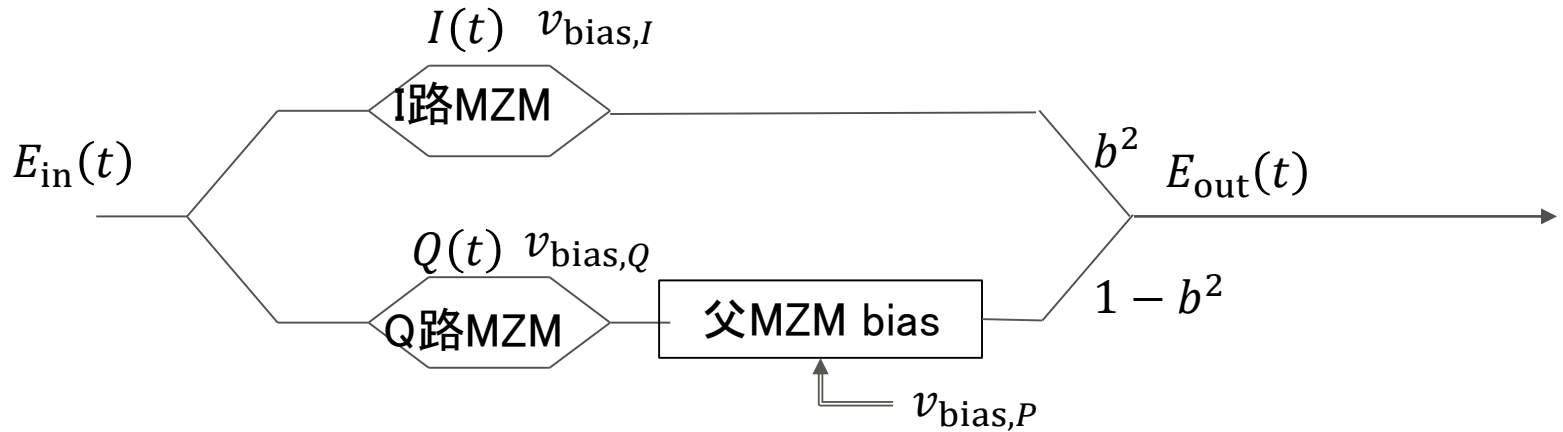
$$E_{out}(t) = \sqrt{0.5} \left[ b E_{out,I}(t) + \sqrt{1-b^2} \exp\left(j \frac{v_{bias,P}}{V_{\pi,DC}} \pi\right) E_{out,Q}(t) \right] \quad b = \sqrt{0.5 + \varepsilon_P}$$

- $b$ 或 $\varepsilon_P$ 表示父MZM的消光比，理想情况下： $b = \sqrt{0.5}$ ,
- $v_{bias,P}$ 是父MZM的相位偏置，理想情况下 $v_{bias,P} = \frac{V_{\pi,DC}}{2}$
- 如果I和Q臂的MZM也理想，并且是小信号调制，那么输出

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \frac{1}{4} \frac{\pi}{V_{\pi}} \left[ v_{rf,I}(t) + j v_{rf,Q}(t) \right]$$



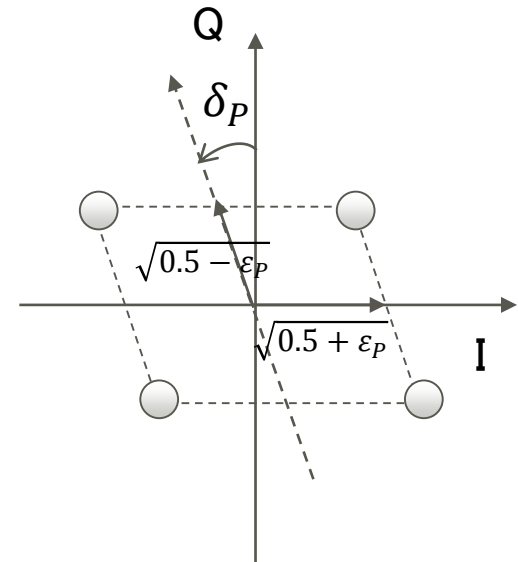
# 父MZM不理想，子MZM理想，小信号



$$E_{out}(t) = \sqrt{0.5} [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} E_{out,I}(t) + \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P} j E_{out,Q}(t)]$$

- $\varepsilon_P$  表示分光比的不理想
- $\delta_P$  表示bias偏离理想的 $\pi/2$ 的大小
- $E_{out,I/Q}(t)$  认为是理想的小信号调制。

$$E_{out,I/Q}(t) = \frac{1}{2} \frac{v_{rf,I/Q}(t)}{V_\pi} \pi E_{in}(t)$$

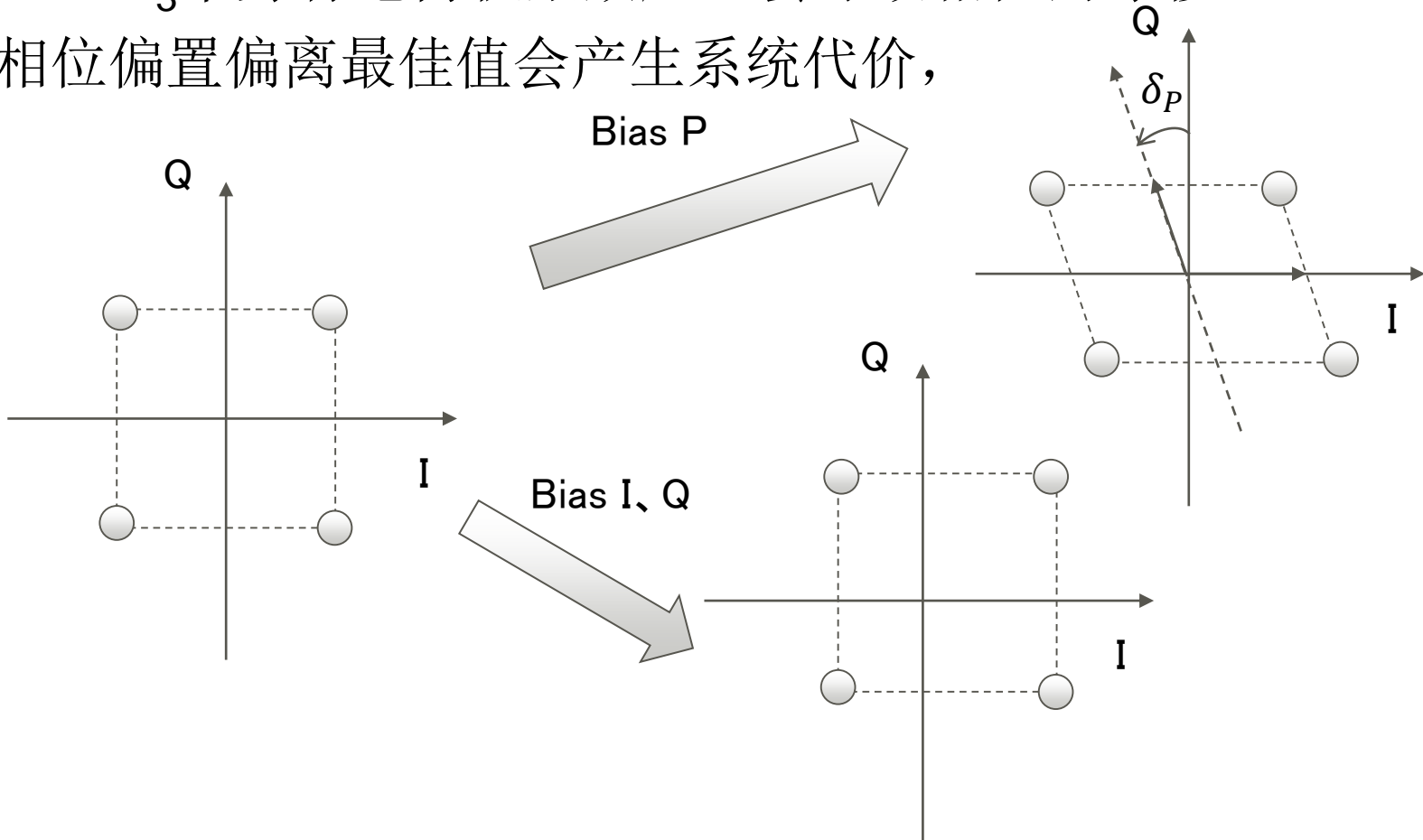


由理想的正方形变成了任意的平行四边形

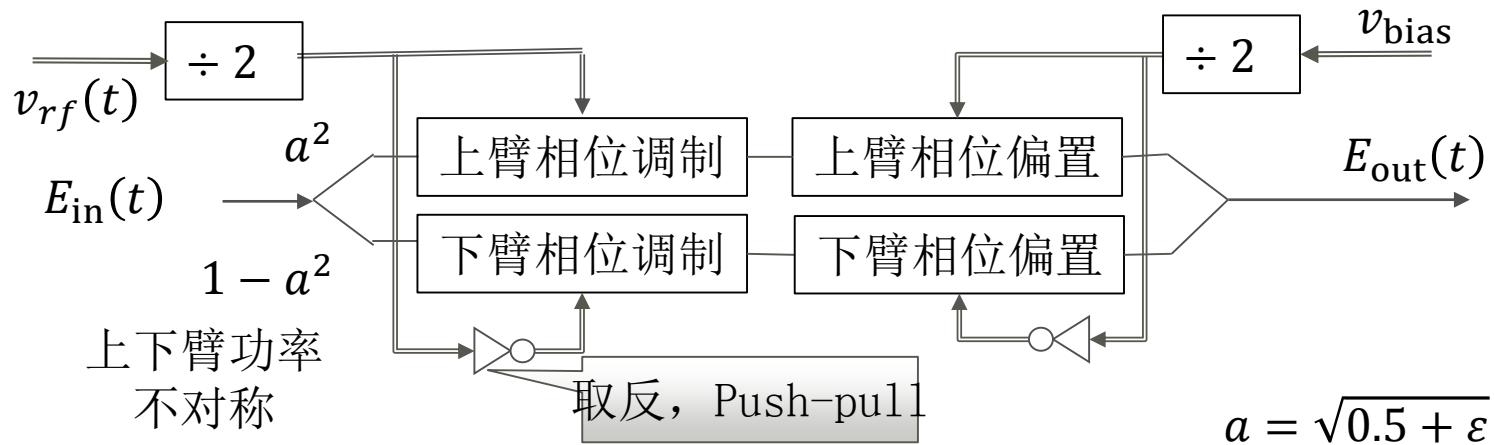
# IQ Modulator Bias Control – manual

# 为什么要调整bias

- 需要调整的量: Bias I, Q, P
- 光相位本身是很敏感的东西、环境变化导致相位不稳定
- $\text{LiNbO}_3$ 本身有电荷积累效应, 会导致相位的漂移
- 相位偏置偏离最佳值会产生系统代价,



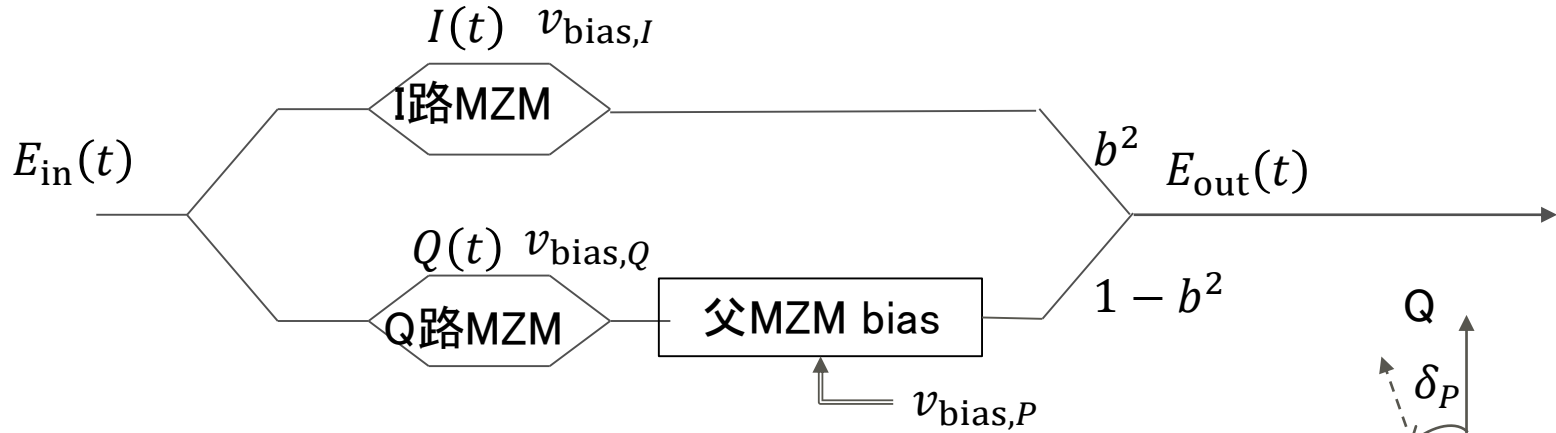
- 问题：控制什么量？观察什么量？如何根据观察量来调整控制量？如何判断已经达到最佳偏置点了？



$$\underbrace{\exp\left(j \frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}} \pi\right) - \exp\left(-j \frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}} \pi\right)}_{\text{理想调制}} + \underbrace{\exp\left(-j \frac{v_{rf}(t)}{2V_{\pi}} \pi\right) \left[1 - \frac{\sqrt{0.5 - \epsilon}}{\sqrt{0.5 + \epsilon}} \exp(j\delta)\right]}_{\text{不理想偏差}}$$

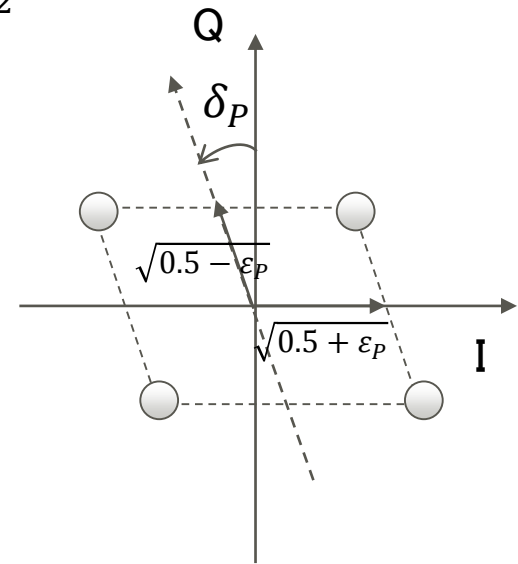
# Bias P的调整原理

- 问题：控制什么量？观察什么量？如何根据观察量来调整控制量？如何判断已经达到最佳偏置点了？



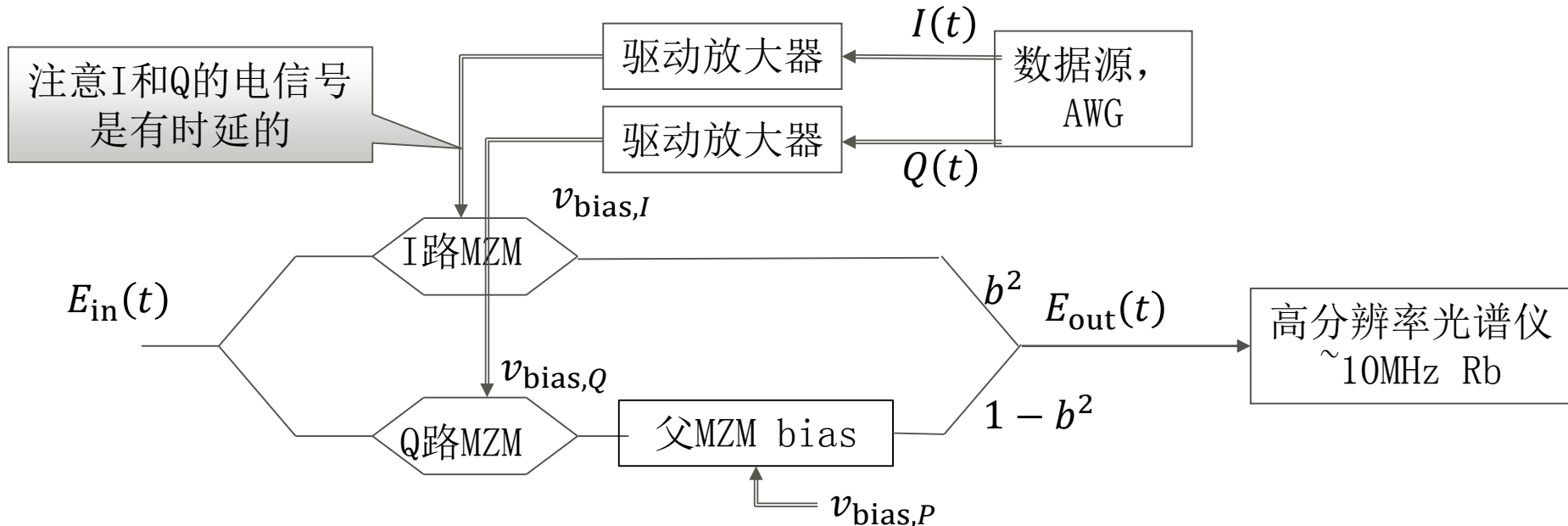
$$E_{out}(t) = \sqrt{0.5} [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} E_{out,I}(t) + \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P} j E_{out,Q}(t)]$$

$$E_{out,I/Q}(t) = \frac{v_{rf,I/Q}(t)}{2V_\pi} \pi E_{in}(t)$$



由理想的正方形变成了任意的平行四边形

## ■ 利用IQ信号来精确控制bias P



$$I(t) = \cos(\Omega t); Q(t) = \sin(\Omega t) \quad \text{忽略公共的常数项 } 0.5\sqrt{0.5}$$

$$\exp(j\Omega t) [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} + \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P - j\Omega\tau}] + \exp(-j\Omega t) [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} - \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P + j\Omega\tau}]$$

■ 假设时延为0, 当 $\delta_P = 0$ 时,  $\exp(-j\Omega t)$ 项最小, 这个在光谱仪上可见

$$\exp(-j\Omega t) [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} - \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P}]$$

# I和Q的时延和biasP的联合控制

## ■ 重写biasP的控制

$$\begin{aligned} I(t) &= \cos(\Omega t); \\ Q(t) &= \sin(\Omega t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \exp(j\Omega t) [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} + \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P - j\Omega\tau}] \\ & + \exp(-j\Omega t) [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} - \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P + j\Omega\tau}] \end{aligned}$$

- 如果时延不为0,  $\delta_P + \Omega\tau = 0$ 时,  $\exp(-j\Omega t)$ 项最小。BiasP控制方案失败。

- 改进: 再做一次实验, 互换I和Q

$$\begin{aligned} I(t) &= \sin(\Omega t) \\ Q(t) &= \cos(\Omega t - \Omega\tau) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & j \exp(j\Omega t) [-\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} + \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P - j\Omega\tau}] \\ & + j \exp(-j\Omega t) [\sqrt{0.5 + \varepsilon_P} + \sqrt{0.5 - \varepsilon_P} e^{j\delta_P + j\Omega\tau}] \end{aligned}$$

- $\delta_P - \Omega\tau = 0$ 时,  $\exp(-j\Omega t)$ 项最小。调整BiasP和时延, 让两次实验下的镜像频率分量最小

- 最后, 可以设定不同的 $\Omega$ , 再次建议时延和biasP的调整

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/408121131101006026>