

在 BPL 高频控制系统中反射对 相位测量和相位控制的影响

丁 义 赖 德 清

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文描述了 BPL 的 RF 系统中出现的反射对相位测量和相位控制的影响, 得出了关于这些影响的某些数学表达式, 提出了减少反射影响的一种具体方法.

在北京质子直线加速器(简称 BPL)的高频控制系统中, 相位控制系统和频率控制系统都是用双平衡混频器(简称 DBM)作为相位测量元件. 见图 1 DBM 的方程为:

$$V_X = A_1 \cos[(\omega_{LO} - \omega_{RF})t - (\phi_{LO} - \phi_{RF})] + A_2 \cos[(\omega_{LO} + \omega_{RF})t + (\phi_{LO} + \phi_{RF})] + \dots \quad (1)$$

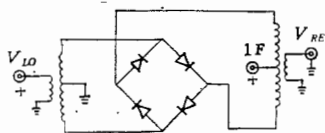


图 1 DBM 原理图

DBM 作为相位检波器用时, $\omega_{LO} = \omega_{RF}$, 再将二次以上的谐波滤掉就可得鉴相器的方程.

$$V_X = A \cos(\phi_{RF} - \phi_{LO}) \quad (2)$$

式中

$$A_1 = K' V_{LO} V_{RF} \quad (3)$$

ϕ_{RF} 为高频信号相位,

ϕ_{LO} 为本振信号的相位,

V_X 为鉴相器中频输出.

由式(2)、(3)可见, 中频输出(X端) V_X 和两个高频信号(即 V_{RF} 和 V_{LO}) 的相位差在一定范围内成正比. 当 $(\phi_{RF} - \phi_{LO})$ 一定时, 中频输出随 V_{RF} 和 V_{LO} 而变. 在相位测量过程中, V_{RF} 和 V_{LO} 变化都会引进相位测量误差. 为保证相位测量的准确性, 我们必须保证 DBM 的两路输入高频信号的幅度不变. DBM 的 R 端和 L 端如果有较大反射, 对鉴相输出是有影响的. 这主要是由于当反射较强时, 使得实际用来鉴相的信号变得小了,

根据式(2)和式(3)可以看出,在 ϕ_{RF} 和 ϕ_{LO} 都保持不变情况下, DBM 的 X 端输出信号 V_X 也会变小. 很显然, R 端和 L 端的反射越厉害, V_X 变小得也越厉害. 我们在测试不同鉴相器的鉴相曲线时发现,由于 R 端和 L 端的反射大小的差异,其鉴相灵敏度也有所不同.

DBM 在制造工艺上很讲究,要求 R 端和 L 端的变压器绕制和安装等都是尽量对称的,四个二极管也要经过认真挑选,其特性基本相同. 这样, R 端和 L 端反射信号的相位分别对其入射信号的相位所产生的影响就完全相同. 因为 X 端的输出 V_X 只反映 R 和 L 两路信号的相位差,所以 R 端和 L 端反射信号的相位使各自的人射信号相位都改变同一数值时, V_X 的值不会变化.

下面我们研究 DBM 外部反射对相位测量和相位控制的影响. 由于晶体二极管 DBM 的高频输入电阻不为 50Ω ,故在 L 端和 R 端存在反射,经实际测量 DBM-2-200,其反射损耗达 -7dB ,折合成反射系数约为 0.4. 这将在高频传输线上引起较强的反射. 设在距 DBM 为 l 的地方放置一部件 P [见图 2].

如果 P 和传输线匹配,从 DBM 反射回来的波就不再被 P 所反射;如果 P 和传输线不匹配,被 DBM 所反射的波又会被部件 P 再次反射.

设最初从部件 P 输出的射频信号为 V_P ,

$$V_P = E_P e^{j(\omega t + \phi_P)} \quad (4)$$

此信号到达 DBM 的 R 端后为

$$\begin{aligned} V_P' &= E_P e^{j(\omega t + \phi_P)} \cdot e^{-j\beta l} \\ &= E_P e^{j[\omega t + \phi_P - \beta l]} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 l 为从 P 到 DBM R 端的传输线长度

β 为相移常数

由于 R 端不匹配,从 P 传输到 R 端的高频信号被反射. 据无损耗传输线理论可得

$$\begin{aligned} V_r &= \Gamma_D V_P' \\ &= \Gamma_D E_P e^{j(\omega t + \phi_P - \beta l)} \\ &= |\Gamma_D| E_P e^{j(\omega t + \phi_P + \phi_{D_r} - \beta l)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 Γ_D ——鉴相器 (DBM) R 端的反射系数,

ϕ_{D_r} ——高频信号在鉴相器 DBM 的 R 端的反射系数的相位

ϕ_P ——P 输出端 RF 信号的初始相位.

V_r 经过长为 l 的传输线后,又重新到达 P 的输出端. 以 $V_{r,p}$ 表示反射信号 V_r 到达 P 输出端时的电压信号.

$$\begin{aligned} V_{r,p} &= V_r e^{-j\beta l} \\ &= \Gamma_D E_P e^{j(\omega t + \phi_P + \phi_{D_r} - 2\beta l)} \end{aligned} \quad (7)$$

设 V_{rr} 为 $V_{r,p}$ 被 P 的输出端反射电压, P 的输出端反射系数为 Γ_P , 则

$$\begin{aligned} V_{rr} &= \Gamma_P V_{r,p} \\ &= |\Gamma_P| |\Gamma_D| E_P e^{j(\omega t + \phi_P + \phi_{D_r} + \phi_{P_r} - 2\beta l)} \end{aligned} \quad (8)$$

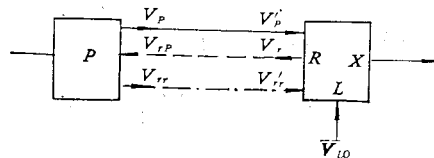


图 2

将式(4)和(8)取虚部,利用迭加原理,可得到P输出端的总电压信号V为

$$\begin{aligned} V &= E_P \sin(\omega t + \phi_P) + |\Gamma_P| |\Gamma_D| E_P \sin(\omega t + \phi_P + \phi_{Dr} + \phi_{Pr} - 2\beta l) \\ &= E_P \sin(\omega t + \phi_P) + E_{rr} \sin(\omega t + \phi_{rr}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad E_{rr} &= |\Gamma_P| |\Gamma_D| E_P \\ \phi_{rr} &= \phi_P + \phi_{Dr} + \phi_{Pr} - 2\beta l \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{进一步整理后得:} \quad V &= E_P (\sin \omega t \cos \phi_P + \sin \phi_P \cos \omega t) \\ &\quad + E_{rr} (\sin \omega t \cos \phi_{rr} + \sin \phi_{rr} \cos \omega t) \\ &= A_{RF} \sin(\omega t + \phi_{RF}) \end{aligned} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_{RF} &= [E_P^2 + E_{rr}^2 + 2E_P E_{rr} (\cos \phi_P \cos \phi_{rr} + \sin \phi_P \sin \phi_{rr})]^{\frac{1}{2}} \\ &= E_P [1 + |\Gamma_P|^2 |\Gamma_D|^2 + 2|\Gamma_P| |\Gamma_D| (\cos \phi_P \cos \phi_{rr} + \sin \phi_P \sin \phi_{rr})]^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\phi_{RF} = \text{tg}^{-1} \frac{\sin \phi_P + |\Gamma_P| |\Gamma_D| \sin \phi_{rr}}{\cos \phi_P + |\Gamma_P| |\Gamma_D| \cos \phi_{rr}} \quad (12)$$

由式(11)可得:

$$\begin{aligned} A_{RF} &\doteq E_P \left\{ 1 + \frac{1}{2} (|\Gamma_P|^2 |\Gamma_D|^2 + 2|\Gamma_P| |\Gamma_D| (\cos \phi_P \cos \phi_{rr} \right. \\ &\quad \left. + \sin \phi_P \sin \phi_{rr})) \right\} = E_P (1 + K). \end{aligned} \quad (13)$$

RF 信号幅度的变化为 ΔA .

$$\Delta A = A_{RF} - E_P = K E_P \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{其中,} \quad K &= \frac{1}{2} [|\Gamma_P|^2 |\Gamma_D|^2 + 2|\Gamma_P| |\Gamma_D| (\cos \phi_P \cos \phi_{rr} \\ &\quad + \sin \phi_P \sin \phi_{rr})]. \end{aligned} \quad (15)$$

因为原来从部件P输出的信号初相位为 ϕ_P , 经过反射后, 从部件P输出的信号初相变为 ϕ_{RF} , 若取 $\phi_P = 0$, 则因反射所造成的相位变化为 $\Delta\phi$,

$$\Delta\phi = \text{tg}^{-1} \frac{|\Gamma_P| |\Gamma_D| \sin \phi_{rr}}{1 + |\Gamma_P| |\Gamma_D| \cos \phi_{rr}} \quad (16)$$

$$\text{其中,} \quad \phi_{rr} = \phi_P + \phi_{Dr} + \phi_{Pr} - 2\beta l = \phi_{Dr} + \phi_{Pr} - 2\beta l \quad (17)$$

由式(11)、(12)可知, 由于 DBM 的反射和P的再次反射, 使得P的输出端的高频信号的幅度发生变化。这导致下面两个后果:

第一, 当 DBM 的L端和R端的高频信号之间的相位差维持不变, 由于P的输出幅度发生变化, X端的输出电压也发生变化。这个变化值就是P的输出幅度变化引起的相位误差。

第二, 高频信号幅度变化还会使 DBM 的零点产生小小的移动。这是由于 DBM 中的四个混频二极管特性不完全对称, 当通过二极管电平不同时, 其不对称程度也不同, 进而引起 V_X 发生变化。产生相位测量误差。

由(12)式可见, 当有反射存在时, 高频相位也发生变化, 由 ϕ_P 变为 ϕ_{RF} , ϕ_{RF} 不仅和 ϕ_P 有关, 而且和反射系数的模与 ϕ_{rr} 有关。

由式(11)和(13)可见, 即使 $|\Gamma_D|$ 较大, 如果使 $|\Gamma_P| = 0$, 仍然有 $A_{RF} = E_P = V_{RF}$,

$\phi = \phi_{RF}$. 因此我们必须设法减小 $|\Gamma_P|$.

以上仅考虑了 P 输出端的一次反射情况. 实际上, 反射电压波从 P 到达 DBM 后, 又会再被反射. 反射如前反复进行. 但反射电压波很快变得可以忽略. 对相位测量影响最大的是第一轮反射波. 如 (11) 和 (13) 所示.

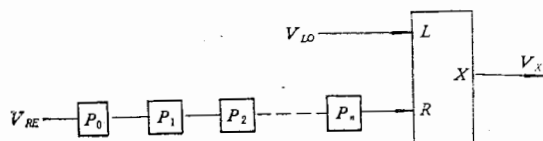


图 3

多个部件串接时, 见图 (3). 如果没有反射, 高频信号从 P_0 到达 DBM 的相位 ϕ_D 等于 P_0 输出端处的相位 ϕ_0 和 P_0 到 DBM 的等效电缆长度 l , 所延迟的相位之和. 即:

$$\phi_D = \phi_0 - \beta l,$$

如果线路中有反射, 如在 $P_0, P_1, P_2 \cdots P_n$ 处都有反射, 则从各部件输出端的反射波皆与原来相应的正向波叠加, 都会引起幅度和相位变化.

上述论断, 同样适用于鉴相器 (DBM) L 端.

为了清除或减弱反射信号对高频信号的相位和幅度的影响, 保证相位测量的准确性, 在 DBM 的 R 和 L 端各加一个环形器 (或隔离器). 如图 4 所示.

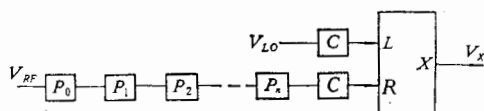


图 4

由于隔离器输出端与传输线匹配较好, 且反射信号不会传输到输入端. 所以在两个隔离器的输出端, 高频信号的幅度和相位不会受到 DBM 的 R 端和 L 端的反射信号的影响. 从而保证了 DBM 鉴相的准确性. 如果不用环形器或隔离器, 用别的方法加以匹配, 也是有可能的. 但除满足阻抗匹配这一点以外, 还不能让这种较强的反射信号通过部件 P 而传输到前面的一个部件去, 以免又引起反射.

以上从 DBM 外部研究了, 由于我们所用的 DBM 反射较厉害, 与其 R 端和 L 端相连接的部件的输出端必须匹配, 才能使 R 端和 L 端较强的反射信号所引起的相位误差减少到可略去的程度这样的情况.

参 考 文 献

- [1] 北京邮电学院编,《微波技术基础》.
- [2] 高能所十一室高频控制组,“在 3MeV 腔上相控模拟实验报告”,内部资料.

THE REFLECTION EFFECTS ON PHASE MEASUREMENT AND PHASE CONTROL IN RF SYSTEM OF BPL

DING YI LAI DE-QING

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In this paper the reflection effects which appeared in *RF* system of BPL on the phase measurement and phase control are described. Some mathematical expressions about the effects are obtained. A concret method reducing the reflection effects is presented.