

级联线性化光调制器

王 强 黄肇明

(上海大学通信工程系, 上海 201800)

摘 要 阐述了级联线性化光调制器的线性化原理, 详细给出了调制器参数的选择方法, 与预畸变线性化的调制器相比, 级联线性化调制器具有性能稳定、调节方便等优点, 具有推广的价值。

关键词 光调制器, 级联, 线性化。

1 引 言

光纤通信以其损耗低、容量大、干扰小等优点在通信领域得到了迅速的发展, 在有线电视中也有广泛的应用。将电信号调制到光载波的方式有内调制和外调制两种。由于外调制具有谱线窄、啁啾小、输出功率高、调制带宽大等优点, 是 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的最佳调制方式, 因此外调制方式最近得到了广泛的重视。

以马赫-陈德尔(Mach-Zehnder)干涉仪为基础的电光外调制器的调制特性为正弦形式, 其调制的线性范围有限, 在传输有线电视信号时, 由于非线性畸变会带来交叉调制, 且交叉调制的幅度随光调制深度的增大而增大, 为保证调制的线性, 只能使光调制深度限制在很小的范围内。但光调制深度小会使整个通信系统的信噪比降低, 因此只有扩展外调制器的线性范围, 才能将马赫-陈德尔调制器实用化。

2 单级马赫-陈德尔调制器

众所周知, 单级马赫-陈德尔调制器的传输特性为正弦形式, 其传输函数为:

$$T = \frac{1}{2} [1 + \sin(\frac{\pi}{V_{\pi}} V)] \quad (1)$$

将此传输函数作泰勒展开:

$$T = \frac{1}{2} [1 + \frac{\pi}{V_{\pi}} V - \frac{1}{3!} (\frac{\pi}{V_{\pi}} V)^3 + \frac{1}{5!} (\frac{\pi}{V_{\pi}} V)^5 \dots] \quad (2)$$

可见经过调制以后, 只产生奇次高阶分量, 因此仅产生奇次交叉调制失真。其中影响最显著的是三次分量, 因此马赫-陈德尔调制器的线性化一般为消除泰勒展开式中的三次项。

扩展线性调制范围的方法有预畸变、前馈补偿和多级马赫-陈德尔调制器级联等方法。外调制方式一般采用预畸变和级联线性化方法。预畸变方法对应于单级调制器, 它是通过预畸变电路使调制信号产生与调制器非线性相反的非线性畸变, 从而抵消调制器的非线性。通常

采用二极管作为非线性器件, 以消除三阶畸变^[1]。

3 级联调制器线性化原理

本文具体讨论级联线性化调制器, 如图 1 所示。两级相同的马赫-陈德尔调制器用直接耦合器隔离, 通过改变耦合器的耦合系数(实际上是功率传递系数)和加在各级调制器上的射频电压比, 可以消除三阶或更高阶畸变(多级级联)。

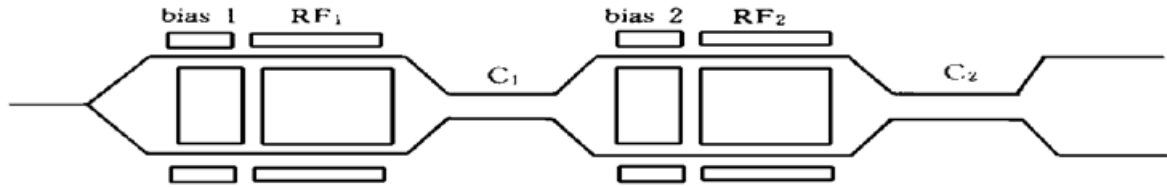


Fig. 1 Structure of two part cascade

级联线性化调制器可利用后级产生的非线性畸变抵消第一级调制器产生的高阶非线性畸变。下面将讨论级联调制器的线性化原理。

如图 1, 假设两调制器的半波电压 V_{π} 相同, 且调制器两臂的传输特性完全一致(两臂传输常数或长度的轻微差别带来的影响可通过调整偏压消除), 两级耦合器的功率传递系数分别为:

$$c_1 = \sin k_1 z_1, \quad c_2 = \sin k_2 z_2$$

其中 k_1 、 k_2 和 z_1 、 z_2 为两耦合器的耦合系数和耦合长度。

定义加在两级调制器上的射频电压比为 $R(V_{RF_2}/V_{RF_1} = R)$, 调制器两臂上的平均光强都为 $P_0(P_0 = P_m/2)$, 则在入射端一个臂上的光场可写为:

$$\psi_i = \sqrt{P_0} \exp(j\omega t) \quad (3)$$

由波导耦合器的性质^[2]可得在输出端一个臂上的输出光场:

$$\begin{aligned} \psi_0 = \sqrt{P_0} \exp(j\omega t) & \left(\sqrt{1-c_2} \left\{ \sqrt{1-c_1} \exp[j\frac{\beta(t)}{2}] + j\sqrt{c_1} \exp[-j\frac{\beta(t)}{2}] \right\} \exp[jR\frac{\beta(t)}{2}] + \right. \\ & \left. j\sqrt{c_2} \left\{ \sqrt{1-c_1} \exp[-j\frac{\beta(t)}{2}] + j\sqrt{c_1} \exp[j\frac{\beta(t)}{2}] \right\} \exp[-jR\frac{\beta(t)}{2}] \right) \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $\beta(t) = \pi V_1/V_{\pi}$, V_1 为加在第一级调制器上的电压, 经过化简可得:

$$\begin{aligned} \psi_0 = \sqrt{P_0} \exp(j\omega t) & \left[\sqrt{(1-c_1)(1-c_2)} \cos \alpha - \sqrt{c_1} \sqrt{1-c_2} \sin \beta + \right. \\ & \left. \sqrt{1-c_1} \sqrt{c_2} \sin \alpha - \sqrt{c_1 c_2} \cos \beta \right] + \\ & j \left[\sqrt{(1-c_1)(1-c_2)} \sin \alpha + \sqrt{c_1} \sqrt{1-c_2} \cos \beta + \right. \\ & \left. \sqrt{1-c_1} \sqrt{c_2} \cos \alpha + \sqrt{c_1 c_2} \sin \beta \right] \quad (5) \end{aligned}$$

其中

$$\alpha = (R+1)\beta(t)/2, \quad \beta = (R-1)\beta(t)/2$$

则输出光强度为:

$$P = |\psi_0|^2 = P_0 [1 + k_1 \sin d_1 \beta(t) + k_2 \sin d_2 \beta(t) + k_3 \sin d_3 \beta(t)] \quad (6)$$

其中

$$d_1 = 1, \quad d_2 = R+1, \quad d_3 = R-1$$

$$k_1 = 2 \sqrt{c_1} \sqrt{1-c_1(1-2c_2)},$$

$$k_2 = 2 \sqrt{c_2} \sqrt{1 - c_2(1 - c_1)}$$

$$k_3 = 2c_1 \sqrt{c_2} \sqrt{1 - c_2}$$

将(6)式作泰勒展开, 并化简合并同阶项可得其传输函数 T :

$$T = \frac{1}{2} [1 + (k_1d_1 + k_2d_2 + k_3d_3) \beta(t) - \frac{1}{3!} (k_1d_1^3 + k_2d_2^3 + k_3d_3^3) \beta^3(t) + \frac{1}{5!} (k_1d_1^5 + k_2d_2^5 + k_3d_3^5) \beta^5(t) - \dots] \quad (7)$$

可见消除三阶项只需令:

$$\frac{1}{3!} (k_1d_1^3 + k_2d_2^3 + k_3d_3^3) = 0$$

化简此方程可得:

$$(1 - 2c_2) \sqrt{c_1} \sqrt{1 - c_1} + \sqrt{c_2} \sqrt{1 - c_2} [R^3 + (3 - 6c_1)R^2 + 3R + 1 - 2c_1] = 0 \quad (8)$$

从(8)式可知, 无论 c_1 、 c_2 取何值, 只要满足一定的条件, 总能找到合适的 R , 从而消除三阶项, 这就使得在器件的制造中具有一定的灵活性。在实际应用中, 一般考虑使调制效率尽量提高(也就是使传输函数中的基波幅度尽量增大)。已作出基波幅度最大的情况下, 基波幅度 A_1 、功率传递系数 c_1 、 c_2 与调制电压比 R 的关系曲线(见图 2)。可见, R 在 $(-1, 1)$ 变化时, c_1 、 c_2 关于 0.5 反对称, A_1 关于 0 反对称, 就是说无论 c_1 、 c_2 取大于或小于 0.5, 其效果(线性化能力和调制效率)是一样的, 通过改变 R 的相位和幅度, 总可以消除三阶畸变。实际中可以取 c_1 、 c_2 小于 0.5, 从而缩短耦合器的耦合长度, 使制造方便。

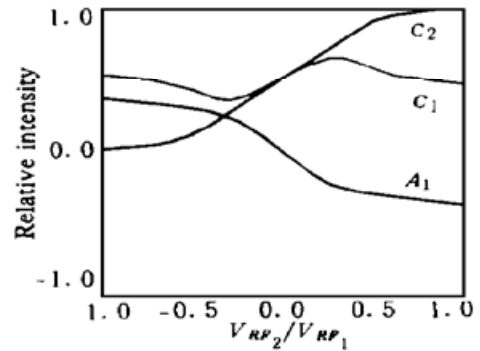


Fig. 2 Amplitude (A_1), power transfer coefficients (c_1, c_2)

现考虑两级直接耦合器的功率传递系数相同的情况, 即:

$$c_1 = \sin k_1z_1 = c_2 = \sin k_2z_2 = c$$

将其代入(8)式并化简可得

$$c = \frac{2 + 3R + 3R^2 + R^3}{4 + 6R^2} \quad (9)$$

由于 c 为耦合器的功率传递函数, 所以 $0 < c < 1$, 经计算可得 $-2 < R < 2$ 。因此, 只要 c 和 R 的关系符合(9)式, 就可以消除三阶畸变, 此时基波幅度变为:

$$A_1 = \sqrt{c} \sqrt{1 - c(2 - 4c + R)} \quad (10)$$

考虑到调制效率, A_1 应尽量大, 据此可求出在 $R = \pm 0.5$ 时, A_1 具有最大值, $A_{1max} = \pm 0.275$, 取 $R = -0.5$, 计算得耦合系数 $c = 0.2$ 。此时的传输函数为:

$$T = 1 + A_1\beta(t) + A_5\beta^5(t) + A_7\beta^7(t) + \dots \quad (11)$$

其中 $A_1 = 0.55$, $A_5 = -0.0063$, $A_7 = 0.00046$ 忽略九次以上高阶项, 在一定范围内画出其调制特性曲线, 见图 3。与正弦函数比较, 可见其线性范围展宽了, 但调制效率下降, 单频道光调制深度变为:

$$D_{\text{OMD}} = 2A_1 m$$

m 为单频道调制系数, $m = \pi V/V_\pi$, V 为单频道电平幅值。由图3可见通过调制器级联, 可以有效地进行调制器的线性化。

在实际制造时, 由于制造精度, 使 c_1 、 c_2 不能精确达到预定值。由上面的讨论可知, 调整 R 即可以保持三阶畸变项为零, 因此, 它只对调制效率有影响。图4示出 c_1 固定($c_1 = 0.2$), c_2 有误差以及 c_2 固定($c_2 = 0.2$), c_1 有误差时的 A_1 的变化情况。可见 c_1 、 c_2 的误差对 A_1 影响很小, c_1 在 $0.2 \sim 0.3$ 之间变化, c_2 在 $0.1 \sim 0.2$ 之间变化时, A_1 的变化小于 2%, 而且 A_1 略有增大。因此, 实际是可以取 c_1 为 $0.2 \sim 0.25$, 取 c_2 为 $0.15 \sim 0.2$, 从而使制造方便。

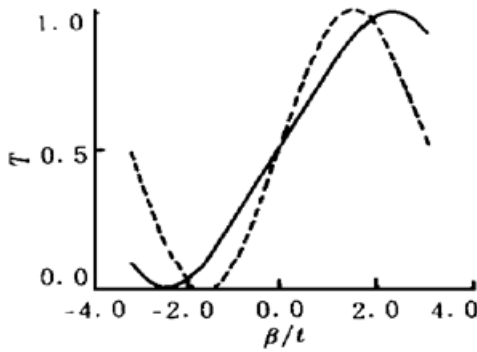


Fig. 3 Transfer function of optic modulator. solid-line: linearized modulator, dash-line: M-Z interferometer

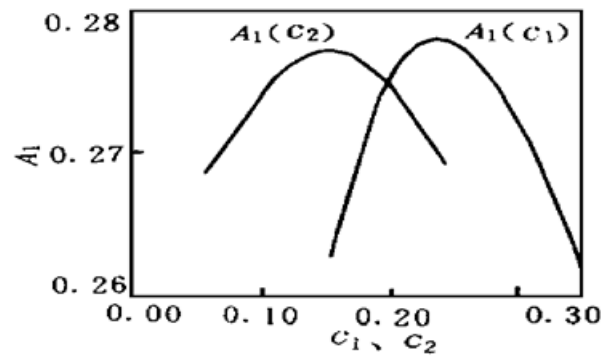


Fig. 4 Influence curve on A_1 due to variation of c_1 、 c_2

4 应 用

将图 1 所示调制器加以扩展, 再加一级马赫-陈德尔干涉仪和耦合器, 加在三级干涉仪上的射频电压比为 $1 \sim 1 \cdot 1$, 通过调整三级耦合器的耦合系数即可以消除三阶和五阶畸变, 进一步扩展了线性范围^[3]。利用多级调制器级联进行线性化还有多种结构^[4], Brooks 等人还提出一种并联线性化调制器结构^[5], 其原理都是利用一级调制器的畸变抵消另一级的畸变。

与采用预畸变线性化的单级调制器相比, 级联线性化调制器由于采用后级调制器的非线性

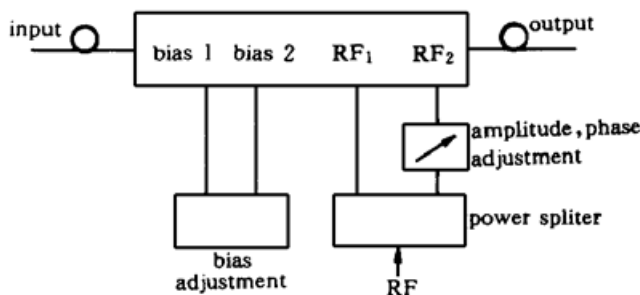


Fig. 5 System structure

性抵消前级调制器的非线性, 因此性能稳定、调节方便、对调制信号的特性限制不大; 而预畸变由于是利用电路产生的畸变抵消调制器的非线性, 因此对调制信号的大小要求严格, 而且电路调整较困难。级联线性化调制器仅对加在各级调制器上的调制电压比以及相位有要求, 而且通过调制电压比的调整, 可以消除由于制造精度不够带来的耦合器的功率传递系数以及各级调制器半

波电压的差异, 如图 5 所示。由波导耦合器的性质可知, 若调制器两臂特性一致, 两级调制器偏压都应为零。但由于制造的差异, 调制器两臂不可能完全一致, 因此需要一定的偏压调整。

结 论 从以上分析可见, 级联线性化调制器性能稳定、调节方便, 是一种很有前途的外调

制器。国外已有两级级联线性化调制器的产品, 国内尚无此类调制器生产的消息, 相信国内也很快会有此类调制器生产。

参 考 文 献

- [1] M. Nazarathy, J. Berger, A. J. Ley *et al.*, Progress in externally modulated AM CATV transmission systems. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(1) : 82~ 105
- [2] 蔡伯飞等, 集成光学, 成都: 成都电子科技大学出版社, 1990.
- [3] W. K. Burns, Linearized optical modulator with fifth order correction. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(8) : 1724~ 1727
- [4] H. Skeie, R. V. Johnson, Linearization of electro-optic modulators by a cascaded coupling of phase modulating electrodes, *Proc. SPIE*, 1991, **1583** : 153~ 164
- [5] J. L. Brooks, G. S. Maurer, R. A. Becker *et al.*, Implementation and evaluation of a dual parallel linearization system for AMSCM video transmission. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(1) : 34~ 41

Cascade Linearized Optical Modulator

Wang Qiang Huang Zhaoming

(Department of Communication Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800)

(Received 17 June 1997; revised 4 November 1997)

Abstract The principle of cascade linearized optical modulator is discussed. The method of selecting modulator parameters is given out in detail. Compared with predistortion linearized modulator, cascade linearized optical modulator shows much advantages, such as stable character and convenient adjustment, so it is worthy of being used widely.

Key words optical modulator, cascade, linearized.