

## 用于时钟提取的 F-P 光滤波器的特性

王耀天, 张爱旭, 王文睿, 张艳冬, 于晋龙, 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室(天津大学))

**摘要:** 光 F-P 腔用途极为广泛, 作为光滤波器用, 具有稳定性高、通带窄的优点。我们将 F-P 光滤波器用于 40 Gb/s 光通信系统的时钟提取单元中。滤波器的参数决定着提出的时钟脉冲的质量。为确定 F-P 光滤波器的参数以适合时钟提取单元的要求, 我们对滤波器的特性进行计算机模拟分析, 得出两点结论: 1) 波器输出脉冲串的波峰值及波谷值按指数形式下降, 下降指数正比于 F-P 光滤波器传输窗口的带宽, 与输入脉冲宽度无关; 2) 滤波器输出脉冲串的波谷值与波峰值之比为输入脉冲占空比平方的函数, 与滤波器的参数无关。

**关键词:** 光滤波器; F-P 腔; 时钟提取; 40 Gb/s 光通信系统

### Characteristics of F-P Optical Filter Used in Clock Recovery Unit

Wang Yue-Tian, Zhang Ai-xu, Wang Wen-zui, Zhang Yan-dong, Yu Jin-long, Yang En-ze

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science(Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The usage of optical F-P cavity as an optical filter is very wide. When it is used as the optical filter, it features high stability and narrow bandwidth. We use the F-P optical filter in the clock recovery unit of 40 Gb/s optical fiber communications system. The quality of the extracted pulse depends on the parameters of the filter. In order to determine the proper parameters of the F-P optical filter so as to fit the requirements of the recovery unit, we study the characteristics of the filter using mathematical analysis, and get the following conclusions: 1) The peak points, as well as the minimum points, of the output pulses of the filter decrease according to the exponential law, and the decreasing index is directly proportional to the bandwidth of the pass band of the filter, and independent to the pulse width; 2) The ratio of the pulse peak point value and its nearby minimum point value is the function of the square of the pulse duty cycle, and independent to the parameters of the filter.

**Keywords:** optical filter; F-P cavity; clock recovery; 40 Gb/s optical communications system

## 1 引言

光 F-P 腔具有储能及周期性释放能量的功能, 可以做各种功能器件, 用途极为广泛。建立在 F-P 腔基础上的 F-P 滤波器具有均匀的梳状透过窗口, 可用在全光时钟提取系统中。我们用自由光谱区为 40 GHz 的 F-P 滤波器对 40 Gb/s 光脉冲进行时钟提取。使用时必须对准透过窗口中心波长及信号中心波长, 且滤波器的自由光谱区必须与信号的码率相等。由于 40 Gb/s 的 RZ(归零)码在光谱上含有明显的 40 GHz 的频率分量, 当数据脉冲输入到 F-P 滤波器后, 其输出成为连续的

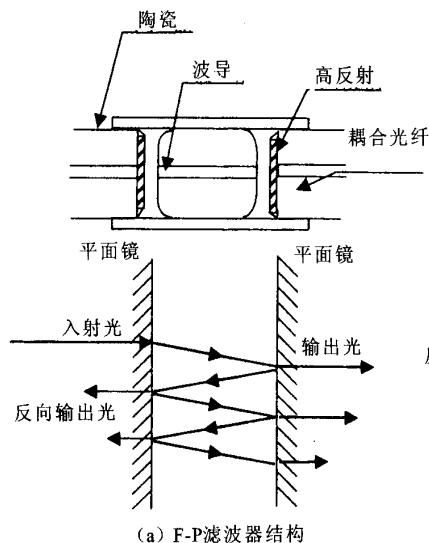
40 GHz 的脉冲串, 这样实现了时钟提取。

在时钟的提取过程中, 最恶劣的情况是输入脉冲为长连“0”的情况, 如果在此最恶劣的情况下, 提取的时钟脉冲能符合要求, 则在非长连“0”的情况下必不成问题, 故我们的分析着重于长连“0”的情况。

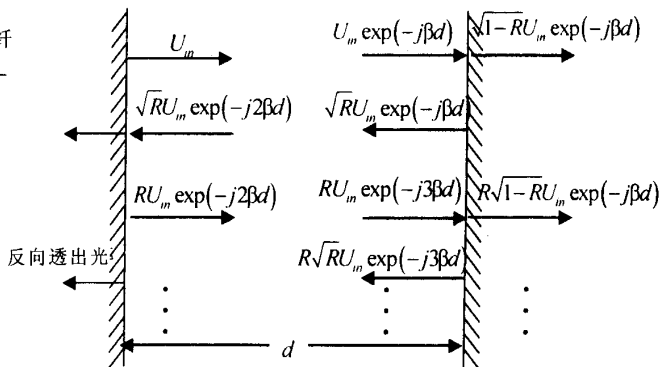
本文对利用 F-P 滤波器实现时钟提取的过程进行模拟计算, 分析了当输入信号出现长连“0”时, F-P 光滤波器输出时钟脉冲的特性, 主要是幅度的下降度, 及波谷值与波峰值之比。在用 F-P 滤波器的情况下, 输出时钟脉冲的抖动及幅度的起伏较小, 所以以上两个指标就成为关键的指标。

## 2 F-P光滤波器的结构及工作原理

F-P光滤波器由两个具有高反射系数的平行镜面所形成。常见的F-P滤波器结构<sup>[1]</sup>及原理如图1所示。其结构如同在普通的光纤连接器中加进一段短光纤,而在两耦合光纤的端面上镀以高反射膜。



(a) F-P滤波器结构



(b) F-P滤波器的滤波原理

图1 F-P光滤波器原理和结构示意图

当随机码光脉冲信号入射时,光滤波器积累光信号能量,在信号停止时(即出现长连零时),光滤波器周期性地释放光信号能量,其周期  $T$  非常稳定,  $T$  为光波在腔内来回反射一周所需时间。频移为  $kf$  ( $k = \pm 0, 1, 2, \dots$ ) 的光波在时刻  $t = nT$  ( $n = \pm 0, 1, 2, \dots$ ) 的相位为  $2\pi kfnT$ , 当频移  $f = F$  ( $F = 1/T$ ) 时,  $2\pi kfnT = 2\pi kn$ , 等效于 0 度, 即频移为  $kF$  的光波分量在时刻  $t = nT$  都同相位, 相加后其总强度为最大。而频移不等于  $kF$  的分量的相位却不为 0, 因此对于总光强的贡献较小, 甚至于在离开  $t = nT$  较远的时刻产生抵消作用。结果在  $kF$  ( $k = \pm 0, 1, 2, \dots$ ) 处形成透过峰, 如图 2 所示。而在时域特性上, 由于滤波器周期性地释放光信号能量, 使输出光波形成周期为  $T$  的脉冲串。另外由于光 F-P 腔内部的损耗, 即光在 F-P 腔内部来回反射时, 每反射一次一小部分光向后透射出去, 形成损耗, 使在没有信号输入的情况下, 释放的能量将随时间而下降, 因而输出的脉冲串幅度也随时间而下降。

输出脉冲串的质量决定于 F-P 光滤波器的参数。为选择及确定 F-P 光滤波器的参数以适合时钟提取单元的要求, 我们对滤波器的特性进行了计

其中,  $d$  为 F-P 滤波器腔长,  $U_m$  为入射光电场,  $\beta d$  为光波相位,  $\sqrt{R}$  为腔面的反射率。

光束在两个平行镜间多次反射, 每反射一次释放到腔外一小部分能量, 输出到腔外的光波, 同波长则相干, 不同波长则相拍。下面我们将分析长连零的情况。

算机模拟分析。

## 3 F-P 滤波器时钟提取的模拟计算

计算步骤: 从单输入脉冲的分析入手, 然后再分析随机码的情况。

在单脉冲情况下, 首先通过建立输入光脉冲电场的谱函数和 F-P 滤波器传输函数, 然后计算出时钟脉冲电场的谱函数, 之后再用离散分析法求电场的时域表达式。

计算的前提: 输入随机码光脉冲的中心波长与 F-P 滤波器的中心波长相等。传输码率的数值与 F-P 滤波器自由光谱区 (FSR) 的数值相等。

### 3.1 F-P 光滤波器传输函数为<sup>[2]</sup>

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2\sqrt{R}\sin\theta}{1-R} \right)^2}} \exp(-j\phi) \quad (1)$$

式中  $f$  为相对于滤波器中心频率的频移,  $\tau$  为光波在腔内单程的传输时间;  $\theta = 2\pi f\tau$ ,  $R$  为腔内表面的电场反射系数,  $\phi = \text{Arctan} \left[ \frac{(1+R)\sin\theta}{(1-R)\cos\theta} \right]$ ;

传输函数  $H(f)$  如图 2 所示

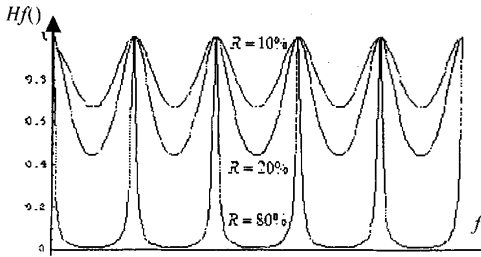


图2 F-P光滤波器传输函数

### 3.2 单脉冲输入模型

设输入光脉冲为高斯形, 电场表示式为

$$U_{in}(t) = \text{Exp}\left(-\frac{t^2}{2t_0^2}\right) \quad (2)$$

对应光谱表达式也为高斯形

$$U_{in}(f) = \text{Exp}\left(-\frac{f^2}{2f_0^2}\right) \quad (3)$$

其中  $t_0$  为高斯脉冲在峰值  $1/e$  高度处的半宽,  $f_0 = \frac{1}{2\pi t_0}$  为脉冲谱函数在峰值  $1/e$  高度处的半宽。

### 3.3 单脉冲输入时的输出结果

单脉冲输入时输出脉冲的谱函数为

$$U_{out}(t) = U_m(f)H(f) \quad (4)$$

考虑到  $U_{out}(f)$  在  $f = \pm 2F$  ( $F = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{T}$ ) 以外的值很小, 可以忽略(图3)故只考虑在此范围内的值, 因此输出脉冲的谱函数为

$$U_{out}(f) = \sum_{m=-1}^1 U_m(mF + f)H(mF + f) \quad (5)$$

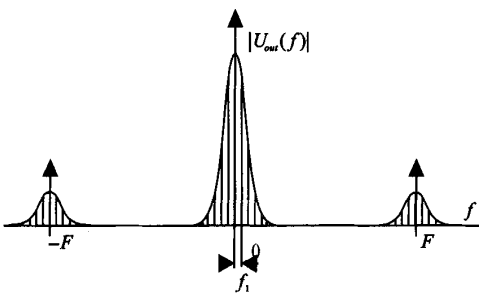


图3 离散法求输出脉冲

用离散法求输出脉冲的时域方程, 取频率间隔为  $f_1$  ( $\ll$  透过窗带宽), 得输出脉冲时域方程:

$$U_{out}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-1}^1 [f_1 U_m(mF + nf_1)H(mF + nf_1)] \cdot \cos[2\pi(mF + nf_1)t - \phi] \quad (6)$$

其中

$$U_m(mF + nf_1) = \text{Exp}\left[-\frac{(mF + nf_1)^2}{2f_0^2}\right],$$

$$|H(mF + nf_1)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\sqrt{R}\sin\theta}{1-R}\right)^2}},$$

$$\theta = 2\pi(mF + nf_1)\tau$$

### 3.4 随机码脉冲串输入时, 输出脉冲的情况

设输入脉冲为伪随机码脉冲串, 其重复频率为  $F$ , 其周期为  $T = 1/F$ ,  $a_k$  是随机数: "1" 或 "0"。为简单起见, 取有限位输入脉冲,  $p$  为输入脉冲的位数, 则输入脉冲串为:

$$U_m(t) = \sum_{k=0}^p a_k \text{Exp}\left[-\frac{(t + kT)^2}{2t_0^2}\right] \quad (7)$$

采用上面单脉冲同样的处理方法, 在随机码输入时, 得 F-P 光滤波器的输出脉冲为

$$U_{out}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=1}^p \sum_{k=0}^p [a_k f_1 U_m(mF + nf_1)H(mF + nf_1)] \cdot \cos[2\pi(mF + nf_1)(t + kT) - \phi] \quad (8)$$

## 4 模拟计算结果的分析

我们借助上面得到的数学模型和计算方法对 F-P 滤波器时钟提取过程进行模拟计算, 以研究输入脉冲为长连零时输出脉冲幅度的相对下降度, 及时钟脉冲谷值与峰值之比。在分析过程中我们发现码组的组成只影响输出脉冲的幅度, 而不影响脉冲幅度的相对下降度及时钟脉冲谷值与峰值之比。为了计算的方便, 输入为短随机码之后接以长连零的光脉冲码组。

下面是模拟计算中采用的滤波器及信号的各种参数值:

1) 输入脉冲码速: 2.5 Gb/s, 10 GB/s, 40 Gb/s。因为 F-P 滤波器都用在较高速率的时钟提取上, 没有必要计算 2.5 Gb/s 以下的低速率情况。

2) 输入脉冲相对宽度(占空比)  $r$ : 0.3, 0.4, 0.5, 0.6。因为占空比小于 0.3 时脉冲谷峰比接近于 0, 故不必分析。并且在实际应用中, 进入时钟提取单元的输入信号脉冲的占空比都小于 0.6, 所以占空比选择上面各值。

3) F-P 光滤波器的精细度为: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000。以上参数基本上包括所有实际情况。为得到具有普遍性的结果, 我们对所有这些参数的各种组合进行模拟计算, 并

对结果进行分析,得出了如下结论。

1) 输入脉冲停止后(长连零时),输出脉冲如图4所示。输出脉冲的峰值包络和谷值包络都按指数式下降,输出脉冲峰值包络及谷值包络满足如下方程:

$$Env = Env_0 \exp(-at) \quad (9)$$

$$a = 2\pi\Delta f = 2\pi \frac{FSR}{Fin} \quad (10)$$

其中:  $Env$  为峰值包络或谷值包络,  $Env_0$  为包络的初值,  $\Delta f$  为滤波器透过窗口带宽,  $FSR$  为滤波器自由光谱区,  $Fin$  为滤波器精细度。

脉冲下降指数  $a$  与 F-P 滤波器精细度及自由光谱区(或信号速率)有关,而与脉冲宽度无关,并且同样适用于脉冲峰值包络及谷值包络。

由计算及图可知,在输入脉冲停止后,输出仍有脉冲,而且幅度下降不大,适合于作为时钟用。

2) 输出脉冲谷值与峰值之比:

$$rat = 6 \times (r - 0.3)^2 \quad (0.6 \geq r \geq 0.3) \quad (11)$$

此比值与输入脉冲的占空比有关,与滤波器精细度及自由光谱区(或信号速率)无关。如下图所示。

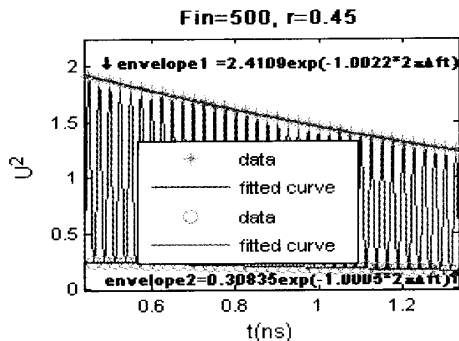


图4 长连"0"情况下的输出时钟脉冲

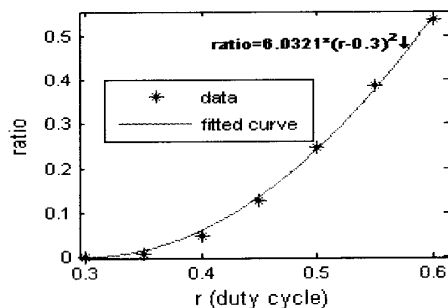


图5 谷峰值比与占空比  $r$  的关系

此外,我们还得出了以下推论。

1) 相隔  $k$  个脉冲的幅度相对下降度为:  $d = 1 - \exp(-akT)$ 。因  $akT = 2\pi k/Fin$ , 故当

$2\pi k/Fin = 1$  时,  $d = 2\pi k/Fin$ 。

如果精细度  $Fin=1000$ , 当有 30 个连"0"码出现在输入码组时(在实验中采用最高阶的伪随机码为 31 阶码,有 30 个连"0"码。可以认为这是一种最恶劣的长连"0"情况,通信信号中一般不会出现这么长的连"0"),在输出的时钟脉冲中第 30 个脉冲较第 1 个脉冲的相对下降值为 18.8%。

2) 精细度  $Fin$  的选择

脉冲幅度的相对下降值  $d$  与  $Fin$  的关系曲线如下

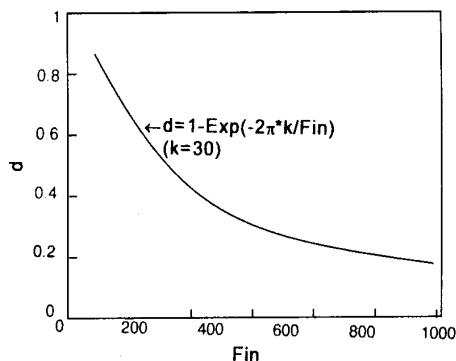


图6 脉冲幅度相对下降值与  $Fin$  关系

由图中曲线可知提高精细度可降低谷峰比,但当精细度  $Fin$  到达 600 以后,继续增长将对脉冲幅度相对下降值改善不大。故一般可取  $Fin$  在 600 以下。降低精细度可以降低对激光器光源波长稳定度的要求。

3) 占空比的确定。由脉冲谷峰值比图(图5)可知,占空比  $r$  下降到 0.4 后,再继续下降,则谷峰比的改善不大,故没有必要将占空比降至 0.4 以下。但当占空比  $r$  增大到 0.6 以后,消光比却迅速恶化,故应尽量取  $r < 0.6$ 。

## 5 F-P 光滤波器用于时钟提取单元的实验

在上述理论分析的基础上,我们进行了 40 Gb/s 信号时钟提取实验。所用 F-P 光滤波器的精细度为 1000,实验结果如图7所示。所得实验结果,在一定程度上说明我们得出的结论的合理性。从图中可以看到输出脉冲幅度的起伏较输入脉冲的小得多,说明在滤波器精细度较高的条件下,可以克服长连零对时钟提取的恶化。

实验中我们采用的滤波器的精细度为 1000,高精细度虽然有利于降低输出脉冲幅度的起伏,但高

精细度对光源波长稳定度的要求过高。实际上可取精细度为 600 以降低对光源稳定性的要求。

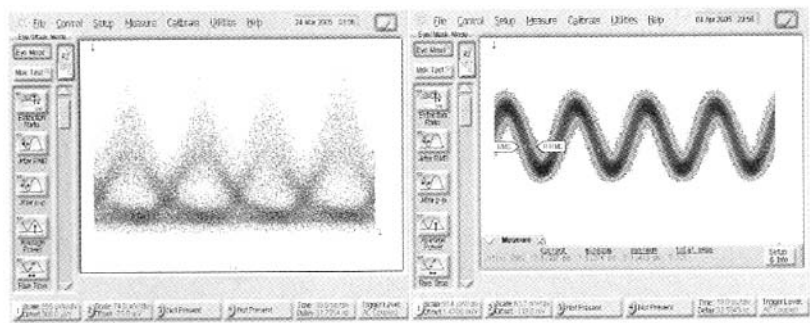


图 7 40 Gb/s 信号的时钟提取

6 结 论

通过对采用 F-P 滤波器提取时钟脉冲的过程进行模拟分析,我们得出在长连"0"码的恶劣情况下输出时钟脉冲的特性,幅度的下降规律,谷值与峰值比的变化规律。输出脉冲的峰值包络和谷值包络都按指数形式下降,该指数与滤波器的精细度及自由光谱区有关,而与脉冲宽度无关。输出脉冲的谷值峰值比与输入脉冲占空比有关,而与 F-P 滤波器参数无关。

根据上述结论我们进行了 40 Gb/s 时钟提取

实验。采用较高精细度的 F-P 滤波器,得到了波形稳定、幅度起伏和时间抖动很小的 40 GHz 时钟脉冲。

由于实验条件的限制,我们没有 40 Gb/s 误码仪,不能直接作出验证 F-P 光滤波器特性的试验,欢迎对此课题有兴趣的专家合作进行实验,

参考文献:

[1] 廖延彪 光线光学 清华大学出版社。  
[2] H. Franz, V. K. Jain 光通信器件与系统 F-P 干涉仪。212-219.

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>