

文章编号 1004-924X(2007)03-0417-05

基于单模光纤耦合器的 Haar 小波滤波器系数的实现

印 勇, 谭 勇, 田逢春

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要:给出了光波导式小波滤波器的设计方案, 该方案采用单模光纤耦合器作为系数实现载体, 通过控制特性参数实现了具有不同分光比的耦合器基本单元, 然后组合和级联基本单元实现特定的小波滤波器系数, 具有精确度高, 集成度好, 稳定性强的优势。分析了与系数实现相关的熔锥型单模光纤耦合器的形状特性, 横截面沿纵向变化的锥形区和横截面近似不变的耦合区内的耦合特性, 根据理论推导, 用仿真手段设计 3 dB 单模光纤耦合器, 实现了 Haar 小波的滤波器系数, 误差在 3% 以内, 证明了光波导式小波滤波器设计方案的正确性和有效性。

关键词: 光纤耦合器; 光学小波; Haar 小波

中图分类号: TH253; TN713 **文献标识码:** A

Implementation of coefficient of Haar wavelet filter by single-mode-fiber coupler

YIN Yong, TAN Yong, TIAN Feng-chun

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A design of wavelet filter of waveguide is given using single-mode-fiber coupler as a basic unit to implement a coefficient. The couplers with various power divisions are designed, then, these couplers are combined appropriately. Their solutions are proved to be accurate, integrated easily and parameter-stable. The geometry features relevant to coefficient implementation of fused single-mode-fiber coupler, the coupling behavior of the taper region with gradually changing cross section and the uniform coupling region are discussed. Finally, a 3 dB coupler is given to implement the coefficient of Haar wavelet transform filter successfully by simulation with an error less than 3%. This result verifies the correction and the effectiveness of the design.

Key words: optical fiber coupler; optical wavelet; Haar wavelet

1 引 言

使用小波进行图像压缩具有巨大的优越性,

通过多年的发展, 小波变换已经成为了 JPEG2000、MPEG4 等标准中的标准算法。在该领域使用小波变换最大的障碍是处理速度问题。随着现代数字信号处理朝着高速实时的方向发

收稿日期: 2006-12-14; 修订日期: 2007-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60472037)

展,传统纯软件式实现方案越来越不能满足实际应用的需求,因此人们积极探索实现它的其他方法,其中一个特别有前景的方案是利用光学方法,通过小波理论与光学信息处理理论与方法的结合,利用光信息处理系统并行、快速的优点克服速度瓶颈。在所研究的光学图像压缩系统中,对图象进行小波变换的关键是使用光学方式实现小波滤波器系数。单模光纤耦合器由于其本身的优良特性成为了实现小波滤波器系数的理想载体。

光纤耦合器是一种关键的导波光基本单元,通常是熔锥式结构。通过将两根或多根单模光纤纤维扭绞在一起,用微火炬对耦合部分加热,在熔融过程中拉伸光纤,纤芯变细靠近,根据纤芯靠近的程度形成弱耦合与强耦合。本文首先应用耦合模理论讨论了光纤耦合器的场耦合问题,之后研究了 Haar 小波的高、低频滤波器系数的实现原理,最后根据理论推导,仿真设计了一个 3 dB 的光纤耦合器,从而实现了 Haar 小波的高、低频滤波器系数。

2 熔锥型单模光纤耦合器的几何模型

根据制作工艺,熔锥型单模光纤耦合器可分成耦合区和锥形区两部分。在耦合区,复合波导由两平行熔锥光纤相互重叠组成,其横截面尺寸可视为恒定,如图 1 所示。锥形区是缓变复合波导,各处半径是 z 的函数。但是对于通常的熔锥型单模光纤耦合器,锥度角在 $0.1 \sim 0.3^\circ$ ^[1],所以可简化为两段对称平行排列的圆柱形纤芯相互接触但不重叠的模型,如图 2 所示。两个部分都会产生耦合,整个耦合器的输出是这两部分的输出迭加。所不同的是,在耦合区由于两纤芯之间距离近,形成了强耦合,在锥形区域,两熔锥纤芯虽然靠的很近,但仍有微米级的间隙,属于弱耦合。

2.1 耦合区域的传播常数

耦合模理论把两熔锥光纤之间的功率耦合视为复合波导内两基模场(也称最低次模)之间干涉的结果,两最低次模为叠加的同相模和叠加的反相模,即

$$\phi_{\pm} = \phi_1 \pm \phi_2, \quad (1)$$

式中, ϕ_1 和 ϕ_2 是构成复合波导的两独立光纤各自的基模场,“+”、“-”号分别对应着同相模和反相模,当传导模进入耦合区域以后,由于纤芯已经很

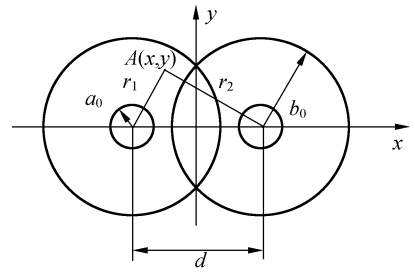


图 1 耦合区横截面

Fig. 1 Cross section of the coupling region

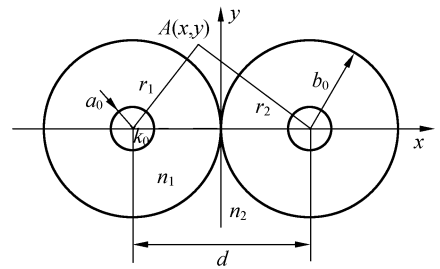


图 2 锥形区横截面

Fig. 2 Cross section of the taper region

细,大部分光功率渗入光纤包层中,原来在独立光纤中传输的零阶贝塞耳函数分布基模场变为在由包层作为芯、纤外介质作为新的包层的复合波导中传输,由于细芯折射率的影响,两光纤中的模场可近似为三角型分布^[2-11],所以两模式场的分布数学表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= 1 - r_1/b_0 \\ \phi_2 &= 1 - r_2/b_0 \\ r_1^2 &= (x+d/2)^2 + y^2 \\ r_2^2 &= (x-d/2)^2 + y^2 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

所以复合波导中场分布为

$$\phi_{\pm}(x,y) = (1 - r_1/b_0) \pm (1 - r_2/b_0), \quad (3)$$

结合亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 \phi + n^2(r) k_0^2 \phi = 0, \quad (4)$$

其中

$k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, $n(r)$ 为复合波导折射率分布。结合式(1)、(2)(3)解式(4)得同相模和反相模的传播常数表达式为

$$\beta_{\pm}^2 = \frac{\iint [n^2(r)k_0^2\phi_{\pm} - \left(\frac{\partial\phi_{\pm}}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial\phi_{\pm}}{\partial y}\right)^2] dx dy}{\iint [\phi_{\pm}^2] dx dy}, \quad (5)$$

可以近似认为场分布 ϕ_1 在 $r_1 > b_0$ 处为 0, 而 ϕ_2 在 $r_2 > b_0$ 处为 0, 在整个复合波导的横截面上积分, 即得到耦合区域两最低次模的传播常数 β_{\pm} 。由于耦合区中各参量都是恒定的, 所以在整个耦合区 β_{\pm} 具有相同值。

2.2 锥形区域的传播常数

锥形区域是缓变的复合波导, 与前段不同的是, 在锥形区域两独立光纤中传输的是三层折射率分布(将填充介质看作光纤的第二包层)的基模场, 同时各处半径是 z 的函数, 所以直接求解式(4)是十分困难的。但是由耦合模理论, 场分布一定是贝塞耳函数形式, 由于高斯函数与贝塞耳函数很类似, 因此, 可用拟合得到的高斯函数来近似表示实际单模光纤中的场分布。设两独立双包层光纤的基模场分别为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r_1}{2r_0}\right)^2\right] \\ \phi_2 &= \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r_2}{r_0}\right)^2\right] \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

其中 $2r_0$ 为光纤中基模场的模场直径, 用变分法可得相应的传播常数为

$$\beta^2 = k_0^2 n_0^2 - k_0^2 (n_0^2 - n_1^2) \exp\left[-\frac{a^2}{r_0^2}\right] - k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \exp\left[-\frac{b^2}{r_0^2}\right] - \frac{1}{r_0^2}, \quad (7)$$

n_2 为填充介质的折射率, a 为纤芯半径, b 为包层半径, a, b 沿纵向渐变。又 $d = 2b$, 将式(7)代入

$\frac{d\beta^2}{dr_0} = 0$ 。可以得到 r_0 需要满足的方程为

$$\begin{aligned} k_0^2 a^2 (n_0^2 - n_1^2) \exp\left[-\frac{a^2}{r_0^2}\right] + \\ k_0^2 b^2 (n_1^2 - n_2^2) \exp\left[-\frac{b^2}{r_0^2}\right] = 1, \end{aligned} \quad (8)$$

在两熔锥光纤是弱导情况下, 复合波导内两基模场 ϕ_{\pm} 仍满足式(1), 而相应的传播常数 β_{\pm} 是复合波导折射率分布 $n(r)$ 以及两独立光纤折射率 $n_1(r), n_2(r)$ 和基模场 ϕ_1, ϕ_2 及其传播常数 β 的如下函数^[3]

$$\beta_{\pm}^2 = \beta^2 + k_0^2 \frac{\int_{A_{\infty}} [n(r)^2 - n_1(r)^2] \phi_{\pm} \phi_1 dA}{\int_{A_{\infty}} \phi_{\pm} \phi_1 dA}, \quad (9)$$

将前面各式代入式(9)可得到锥形区域的 β_{\pm} 。

3 Haar 小波滤波器系数的实现

令 $C(z)$ 为耦合器任一横截面处的耦合系数, 根据耦合模理论, 其可由复合波导中两最低次模 ϕ_{\pm} 的传播常数 β_{\pm} 来表示

$$C(z) = (\beta_+ - \beta_-) / 2, \quad (10)$$

由前面分析可知, C 与芯层折射率、包层折射率、环境折射率和工作波长有关。在通常情况下, 对于给定波长的耦合器, 其芯层折射率和包层折射率是相对稳定的, 所以特别是在使用光纤耦合器进行信号处理时, 要注意使用环境的影响。耦合器的应用通常是实现功率的分配, 由耦合波方程

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = iC_{21}A_2(z)\exp[i(\beta_1 - \beta_2)L] \\ \frac{dA_2(z)}{dz} = iC_{12}A_1(z)\exp[i(\beta_1 - \beta_2)L] \end{cases}, \quad (11)$$

其中

A_1, A_2 : 两根光纤的模场振幅

β_1, β_2 : 两根光纤在独立状态下的传播常数

C_{21}, C_{12} : 耦合系数(通常取 $C_{21} = C_{12} = C$)

L : 有效耦合长度, 令 $A_1(0) \neq 0, A_2(0) = 0$,

并且 $\beta_1 = \beta_2$

解得

$$\begin{cases} A_1(z) = A_1(0) \cos(CL) \\ A_2(z) = iA_1(0) \sin(CL) \end{cases}, \quad (12)$$

同理当 $A_1(0) = 0, A_2(0) \neq 0$ 时解为

$$\begin{cases} A_2(z) = A_2(0) \cos(CL) \\ A_1(z) = iA_2(0) \sin(CL) \end{cases}, \quad (13)$$

令 s 为两输出端口对两输入端口的幅值传递函数, 当两输出端口中光振幅相等时, 结合式(12)、(13)可得

$$s = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

显然, s 与 Haar 小波的高、低滤波器系数除了一

个常量系数 i 以外是相同的,而满足上述条件的恰好是 3 dB 耦合器。所以只要能够设计一个精确的 3 dB 耦合器,就能够准确实现 Haar 小波的滤波器系数。

4 仿真与讨论

根据以上理论分析,使用 APSS 软件仿真设计了一种 3 dB 耦合器,其中端口①④、②③是两直通臂(如图 3),信号输入端口是①,输出端口是③④。取 $b_0=2.25 \mu\text{m}$, $d=2.2625 \mu\text{m}$, $L=260 \mu\text{m}$, $n_0=1.460822$, $n_1=n_2=1.44024$ (n_0, n_1, n_2 都是光波长 $\lambda=1.550 \mu\text{m}$ 下的值),结果如下。

图 4、图 5 分别是在不同波长情况下,端口③④对端口①功率的功率响应曲线,图 6 是串扰值曲线。当 $\lambda=1.550 \mu\text{m}$ 标准波长时,结果为 3.005 dB、3.16 dB,串扰为 0.145 dB,实现了 Haar 小波滤波器系数,误差小于 3%。此外,图 7、图 8,图 9 演示了该耦合器不同位置处的能量耦合,图 7 反映了能量集中于信号输入端口处的情况,图 8,图 9 中的两个峰分别是③④两臂中的能量值,图 8 是在耦合区末端的情况,图 9 是锥型

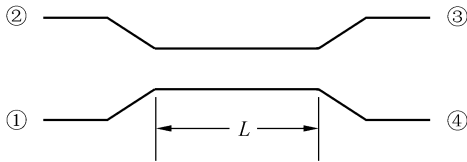


图 3 耦合器端口示意图
Fig. 3 Ports of the coupler

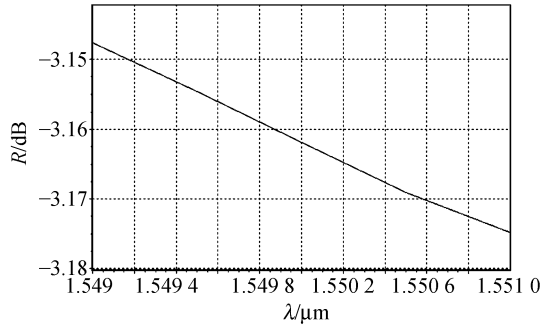


图 5 直通臂功率响应曲线

Fig. 5 Power response curve of directional arm

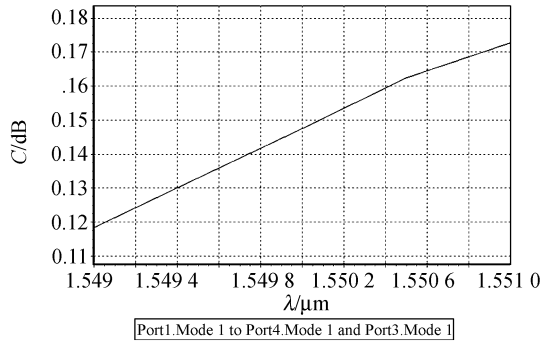


图 6 串扰曲线

Fig. 6 Crosstalk between two arms

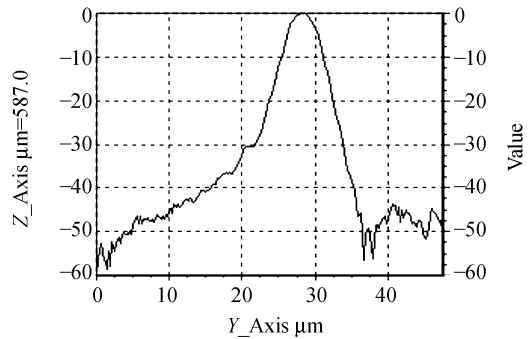


图 7 ①端口处能量分布
Fig. 7 Power at port ①

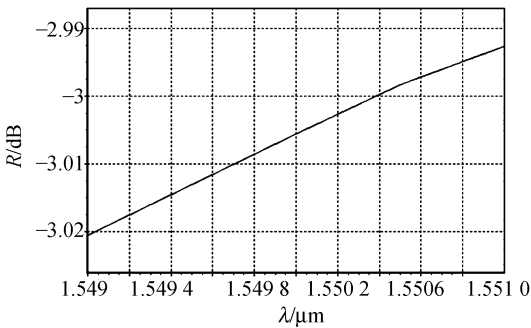


图 4 耦合臂功率响应曲线

Fig. 4 Power response curve of coupling arm

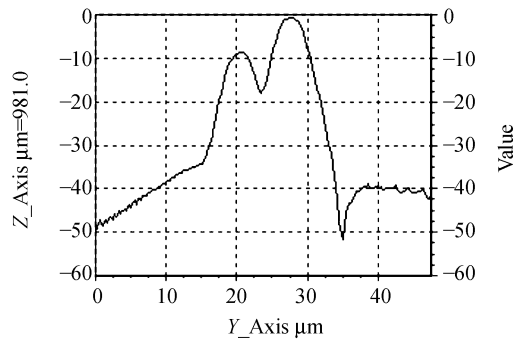


图 8 耦合区末端两臂能量分布

Fig. 8 Power distribution of two arms at the end of coupling region

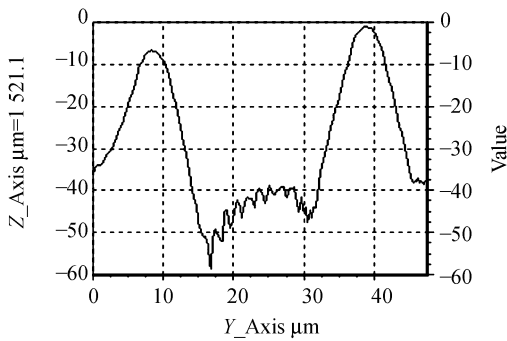


图9 锥形区末端两臂能量分布

Fig. 9 Power distribution of two arms at the end of taper region

区末端的情况,可见在熔锥型单模光纤耦合器中99%的能量耦合发生在耦合区,锥形区的能量耦合很少,但是仍然具有一定的耦合作用,符合前面理论分析中的结论。

5 结 论

理论推导和仿真结果表明,采用光纤耦合器实现光学小波变换中的小波滤波器是可行的。光纤耦合器具有设计灵活,可准确实现任意分光比的特点,所以可通过灵活的组合准确地实现任意的小波滤波器系数,并且在同一结构上能够同时实现高通和低通滤波器,故使用光纤耦合器实现光学小波变换具有极大的优势。

参考文献:

- [1] PAYNE F P, HUSSEY C D, YATAKI M S. Modeling fused single-mode-fiber couplers[J]. *Electron. Lett.*, 1985, 21(11): 461-462.
- [2] WRIGHT J V. Variational analysis of fused tapered couplers[J]. *Electron. Lett.*, 1985, 21(23): 1064-1065.
- [3] A. W. 斯奈德. 光波导理论[M]. 北京:人民邮电出版社, 1991.
SNYDER A W. *Theory of Optical Waveguide*[M]. Beijing: Posts&Telecom Press, 1991. (in Chinese)
- [4] 柳春郁,余有龙,高应俊. 耦合器分光比的精确控制[J]. *光学技术*, 2004, 30(6): 743-744.
LIU CH Y, YU Y L, GAO Y J. Precise control of power division of a coupler[J]. *Opt. Tech.*, 2004, 30(6): 743-744. (in Chinese)
- [5] 帅词俊,段吉安,苗健宇,等. 熔锥型光纤耦合器的光学性能[J]. *半导体光电*, 2005, 26(4):287-290.
SHUAI C J, DUAN J A, MIAO J Y, et al.. Optical performance of fused fiber coupler[J]. *Semicon. Optoelectron.*, 2005, 26(4):287-290. (in Chinese)
- [6] 李玉权,崔敏. 光波导理论与技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2002.
LI Y Q, CUI M. *Theory and Technology of Optical Waveguide*[M]. Beijing: Posts&Telecom Press, 2002. (in Chinese)
- [7] 闫丽,袁家虎,刘江. 光子波与图像处理[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(3):225-230.
YAN L, YUAN J H, LIU J. Optical wavelet transform application in image processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 225-230. (in Chinese)
- [8] 帅词俊,段吉安,钟振. 熔锥型光纤耦合器流变成形的工艺敏感性研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1): 40-46.
SHUAI C Q, DUAN J A, ZHONG J. Technical sensitiveness in the rheological manufacture progress of fused taper coupler[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 40-46. (in Chinese)
- [9] 于志辉,余重秀,王葵如,等. 直流切趾对光纤光栅特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):935-939.
YU ZH H, YU CH X, WANG K R, et al.. Effect of direct current apodization on fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):935-939. (in Chinese)
- [10] 鲁怀伟,章宝歌,李敏芝,等. 基于双耦合器的平坦型全光纤波长交错滤波器[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 145-150.
LU H W, ZHANG B G, LI M ZH, et al.. All fiber flat top interleaver based on double single mode couplers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):145-150. (in Chinese)
- [11] LIU ZH F, MA J, SUN D G, et al.. Waveguide electro-optic modulators based on self-assembled material systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5):554-560.

作者简介:印 勇(1963—),男,重庆人,重庆大学副教授,博士,研究方向为图像信息处理和光学小波变换。E-mail: yy@cceec.cqu.edu.cn

谭 勇(1981—),男,四川人,重庆大学硕士研究生,研究方向为图像信息处理和光学小波变换。