

A Study of Dispersion Measurement for Optical Fiber by Phase-Modulation Method

Xi Zhang^{1,2}, Xiaoying Liu^{1,2}, Zhenhui Zhou^{1,2}

¹National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System (HUST), Wuhan

²School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

Email: liuxy@mail.hust.edu.cn

Received: Mar. 7th, 2012; revised: Mar. 15th, 2012; accepted: Apr. 23rd, 2012

Abstract: Optical fiber communication is the mainstream of communication development at present. However, with the development of optical fiber communication system which trending towards ultra-long length, ultra-large capacity and ultra-high speed, fiber dispersion turned to be a great obstacle. How to control the dispersion created in the optical communication system effectively while force optical signal to reach the receiving end in high-capacity, high-rate and error-free long-distance transmission has increasingly become a research focus of optical fiber communication systems. It is a great significance to research about monitor and dynamic compensate dispersion in the optical communication systems, so that the ultra-large capacity, ultra-long length and ultra-high speed optical fiber communication systems would not be impossible, all-optical intelligent network with automatic switching functions would come true. Among the varieties of methods to measure fiber dispersion, the phase-modulation shift method is the unique one, which has the advantages of simple structure, high reliability. In this paper, we make a research and simulate to use the phase-modulation shift method, meanwhile we also discuss about the factors which affect the accuracy of the results in the different fiber lengths and modulation frequencies. By the means that selecting appropriate modulation frequency, we can use modulation phase shift method to measure the exact value of dispersion comes out from different lengths of fiber. Moreover, this paper also proves that the phase-modulation shift method is able to measure the optical fiber with arbitrary dispersion-wavelength curve, which is already verified by our simulation. Therefore, the phase-modulation shift method is well to be applied to take practice in the high-precision fiber dispersion measurement.

Keywords: Optical Fiber Communication; Fiber Dispersion; Modulation Phase Shift Method; Modulation Frequency

使用调制相移法测量光纤色散的研究

张曦^{1,2}, 刘小英^{1,2}, 周镇辉^{1,2}

¹华中科技大学下一代互联网接入系统国家工程实验室, 武汉

²华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉

Email: liuxy@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2012年3月7日; 修回日期: 2012年3月15日; 录用日期: 2012年4月23日

摘要: 光纤通信已经成为目前通信网络发展的主流方向。但是随着光纤通信系统向着超远距离、超大容量、超高速率的方向发展, 光纤色散已经成为其巨大的阻碍。如何有效地控制光通信系统中产生的色散, 使光信号在大容量、高速率、长距离传输中无误码地到达接收端, 已经成为人们迫切需要解决的问题。对光通信系统中的色散进行监测并进行动态补偿的研究, 使得超大容量、超长距离、超高速率的光纤通信系统成为可能, 有助于最终实现全光智能自动交换网络。在众多测量光纤色散的方法中, 调制相移法具有结构简单, 可靠性强等优点。本文中, 我们对使用调制相移法测量光纤色散进行了研究和仿真, 讨论了在不同光纤长度和不同调制频率下, 影响调制相移法测量结果精度的因素。通过适当地选取调制频率, 我们可以使用调制相移法测得不同光纤长度下色散的精确值。另外在本文中, 我们通过仿真验证了调制相移法可以测量具有任意色散-波长曲线的光纤。因此在实际应用中, 调制相移法是可以应用于高精度光纤色散的测量。

关键词： 光纤通信； 光纤色散； 调制相移法； 调制频率

1. 引言

光纤通信作为众多通信系统中的佼佼者具有速率高，传输容量大，传输距离远，抗干扰能力强，保密性好等优点，已经成为通信发展的主流方向^[1]。随着光纤通信系统传输容量和传输距离的增加，光纤中色散所导致的负面影响越来越突出^[2-4]，因此光纤通信系统中的色散必须得到控制并减小。为了控制色散，我们需要了解色散的成因。首先，光纤中传播的光信号不是单一波长的。这主要由两方面原因引起：一、光源发出的激光不是单色光；二、由于信号调制，激光频谱会发生展宽。其次，这种由不同频率构成的光波在光纤中传输，由于不同波长的光波在光纤中传播的速率不同，因此产生了色散。由于光纤放大器是一种模拟器件，不能对光信号进行再生(缺少对光信号的再生修复能力)，因此在传输过程中，色散会不断积累。积累的色散会引起脉冲发生展宽从而导致严重的码间串扰，会使传输容量和传输距离受到极大的限制。实际上，在各种光通信网络中，光纤通信系统的色散补偿都是维护光通信传输质量的重要一环。对光通信系统中的色散进行监测并进行动态补偿的研究，使得超大容量、超长距离、超高速率的光纤通信系统成为可能，有助于最终实现全光智能自动交换网络。本文分析了调制相移法测量光纤色散的测量原理^[5]，并使用这种方法测量了不同长度的光纤和具有任意色散-波长曲线的光纤。我们分析了测量结果，通过改进调制频率使其应用于光纤色散的高精度测量中。

2. 调制相移法测量光纤色散原理

图 1 为调制相移法测量光纤色散的原理图。将两种不同波长的光波(λ_1, λ_2) 输入到待测光纤中。由于光纤折射率的原因，这两种光波在光纤中传播时的速度是不一样的，因此经过光纤传输后，其到达终端的时间也是不一样的。假设这两种光波到达终端的时间差为 $\Delta\tau$ 。如果使用高频率振荡器产生的正弦波信号(频率为 ω)，并且使用调制器，来对这两束不同波长的光脉冲进行调制。然后将调制后的光波输入到光纤中进行传输，并且将传输后的光波利用光电转换器转换为电信号。将产生的两种电信号传输给鉴相器，便可得

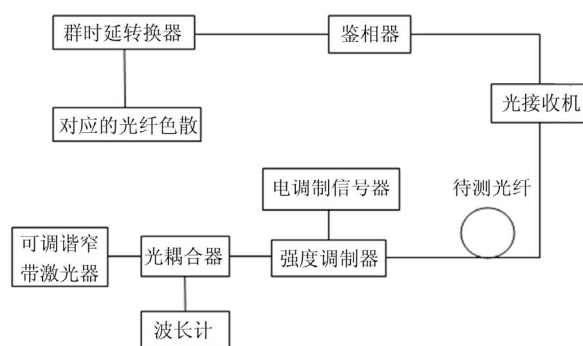


Figure 1. Schematic diagram of phase-modulation measurement of fiber dispersion

图 1. 调制相移法测量光纤色散原理图

到两束光波在光纤传输后产生的相位差：

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (1)$$

由于调制器的调制频率为 ω ，因此可以求得两束光波在光纤传输后的相对群时延差：

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\Phi}{\omega} \quad (2)$$

由于群时延差与光纤色散的关系为：

$$\Delta\tau = DL\Delta\lambda \quad (3)$$

式中， L 为待测光纤的长度， $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ 。

因此如果知道光纤长度 L 和两束光脉冲的波长差 $\Delta\lambda$ ，便可求得待测光纤色散，并且可以由下式表达：

$$D = \frac{\Delta\tau}{L\Delta\lambda} = \frac{\Delta\Phi}{\omega L\Delta\lambda} \quad (4)$$

3. 仿真软件和系统简介

3.1. VPI 软件介绍

VPI 是目前世界范围内最有优秀的光子自动化设计软件。它们的应用主要有：光发射机设计，色散分布图设计，光分插复用器设计，掺饵光纤放大器与激光器设计，SONET/SDH 环网设计，光交叉连接设计，长程光网络设计，接收机设计以及模拟光纤通信系统设计等。在本文中，我们利用 VPI 软件对调制相移法测量光纤色散进行了仿真和研究工作。

3.2. 仿真系统介绍

按照图 1 所示的测量原理图，在 VPI 软件平台上

搭建了调制相移法测量光纤色散系统，如图 2 所示。其基本结构与原理图相似，由于添加了具体的转换器件和测量仪器，因此仿真系统图略显复杂。

图中 Optical Frequency 和 LD 两个模块构成了整个仿真系统的光信号产生部分。Optical Frequency 模块用于产生一个斜坡信号，在系统中用于逐步递增光信号频率，同时可以通过调整其参数来控制光信号的初始频率，频率递增间隔以及光信号频率递增次数。斜坡信号由 Optical Frequency 模块输出后进入被分成两束。一束输入给 LD 模块，另一束输入给 Phase to Dispersion Calculator 模块。LD 收到 Optical Frequency 模块的信号后进行频率初始化以及逐步递增 LD 产生的光信号频率。光信号由 LD 模块输出后，进入 Modulator 调制器中。在 Modulator 调制器中，调制信号对光信号进行调制。经过调制的光信号由调制器 Modulator 输出后，便进入待测光纤中。携带有相位信息的光信号由待测光纤输出后进入 OE converter 模块。OE converter 模块是光电转换器，用于将接收到的光信号转化为电信号。光信号在 OE converter 模块中转换为电信号后，输入 Phase Detector 模块。Phase Detector 用于测量信号的相位信息。光信号的相位信息由 Phase Detector 模块输出后进入 Phase to Dispersion Calculator 模块。Phase to Dispersion Calculator 模块的作用是将相位信息转换为色散参数值。

上述各模块构成了调制相移法测色散仿真系统的主要结构。除了这些模块，仿真系统还添加了一些参数测量仪器。其中 Phase-frequency curve 模块用于生成光信号相位与频率的函数坐标图，Dispersion-wavelength curve 模块用于生成光纤色散与光信号波

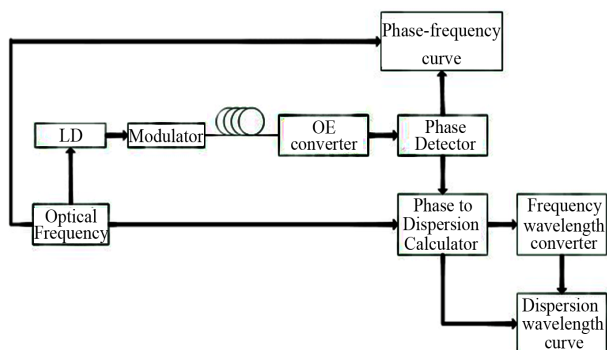


Figure 2. Schematic diagram of simulation system of phase-modulation measurement
图 2. 调制相移法测光纤色散的仿真系统图

长的函数坐标图。

4. 仿真结果与分析

本文利用调制相移法仿真测量了不同长度的光纤色散。表 1 展示了待测光纤的基本参数。

4.1. 待测光纤长度为 10 m 时

表 2 为仿真系统参数。

观察色散 - 波长，相位 - 频率仿真坐标图(图 3)，可以发现色散与光波长成线性关系，相位与光频率成线性关系。通过对比仿真结果与光纤预设参数，可以发现两者是一致的。

4.2. 待测光纤长度为 100 m 时

表 3 为仿真系统参数。

观察图 4，可以发现色散与光波长成线性关系，但是存在抖动，相位与光频率成线性关系。此时测得的光纤色散与光纤预设值有较大出入，因此不能运用于长度为 100 m 时光纤的高精度色散测量。

测量 100 m 长的待测光纤时，由于待测光纤长度变长而调制频率不变，因此调制后的光信号在从光纤中输出时会造成时域上的展宽形变。由于光信号发生展宽形变，会对接收端测量的光波相位产生影响，使测得的频率相邻的光信号相位误差变大。所以 100 m 待测光纤测得的色散曲线抖动可能是由于光波之间测得的相位差存在较大的误差造成的。因此如果我们想要得到正确的仿真结果，需要减少调制频率。

调整后的仿真系统参数如表 4 所示。

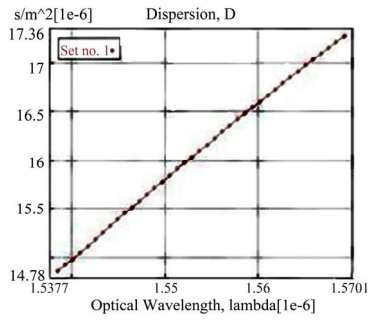
图 5 展示了当调制频率由 1778 Hz 减少到 1000 Hz 时，测得的色散 - 波长曲线和相位 - 频率曲线。从仿真结果可以看出测量结果与光纤预设参数一致。

Table 1. The parameters of the fiber under test
表 1. 待测光纤的基本参数

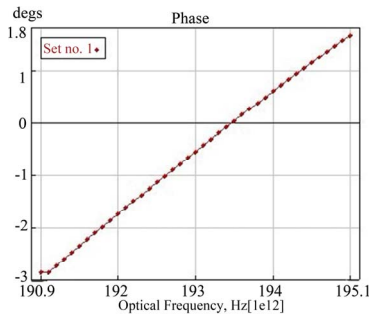
参考频率 (Hz)	光纤长度 (m)	色散 (s/m^2)	色散斜率 (s/m^3)	非线性指数 (m^2/w)	纤芯面积 (m^2)
$1.931e-12$	10/100/1000	$1.6e-5$	$0.8e-2$	0	$8e-11$

Table 2. Simulation system parameters
表 2. 仿真系统参数

调制频率(Hz)	光频率递增间隔 (Hz)	光波初始频率 (Hz)	光纤长度(m)
1778	$10e-10$	$1.91e-14$	10

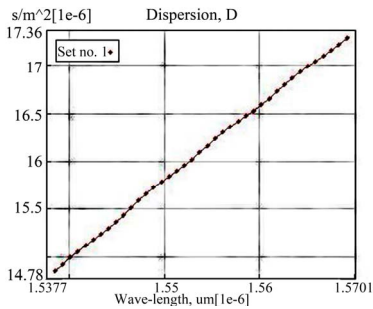


(a)

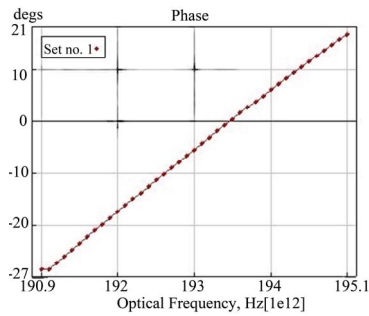


(b)

Figure 3. Measured dispersion-wavelength curve and phase-frequency curve when the fiber length is 10 m and modulation frequency is 1778 Hz
图 3. 待测光纤长度为 10 m, 调制频率为 1778 Hz 时, 测得的色散 - 波长曲线和相位 - 频率曲线



(a)



(b)

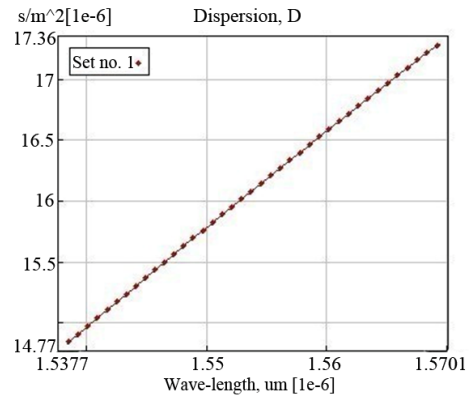
Figure 4. Measured dispersion-wavelength curve and phase-frequency curve when the fiber length is 100 m and modulation frequency is 1778 Hz
图 4. 待测光纤长度为 100 m, 调制频率为 1778 Hz 时, 测得的色散 - 波长曲线和相位 - 频率曲线

Table 3. Simulation system parameters
表 3. 仿真系统参数

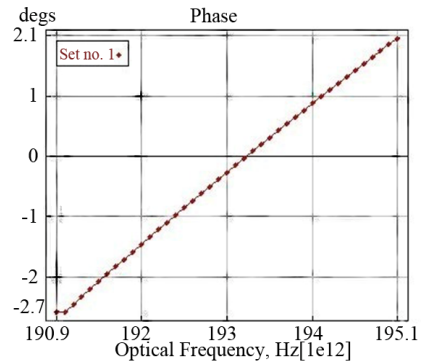
调制频率(Hz)	光频率递增间隔(Hz)	初始光频率(Hz)	光纤长度(m)
1778	10e-10	1.91e-14	100

Table 4. Simulation system parameters
表 4. 仿真系统参数

调制频率(Hz)	光频率递增间隔(Hz)	光波初始频率(Hz)	光纤长度(m)
1000	10e-10	1.91e-14	100



(a)



(b)

Figure 5. Measured dispersion-wavelength curve and phase-frequency curve when the fiber length is 100 m and modulation frequency is 1000 Hz
图 5. 待测光纤长度为 100 m, 调制频率为 1000 Hz 时, 测得的色散 - 波长曲线和相位 - 频率曲线

4.3. 待测光纤长度为 1000 m 时

表 5 为仿真系统参数。

观察图 6, 可以发现光纤色散与光波长不成线性关系, 相位与光频率成锯齿状。光纤预设参数与仿真结果完全不符。

观察相位 - 频率曲线坐标图可以发现, 相位曲线成周期锯齿状。其中, 最大相位与最小相位相差大约

Table 5. Simulation system parameters
表 5. 仿真系统参数

调制频率(Hz)	光频率递增 间隔(Hz)	光波初始 频率(Hz)	光纤长度(m)
1778	10e-10	1.91e-14	1000

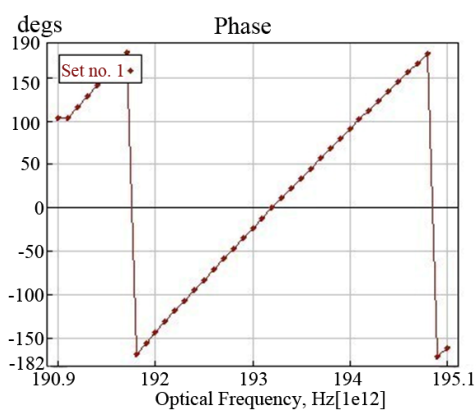
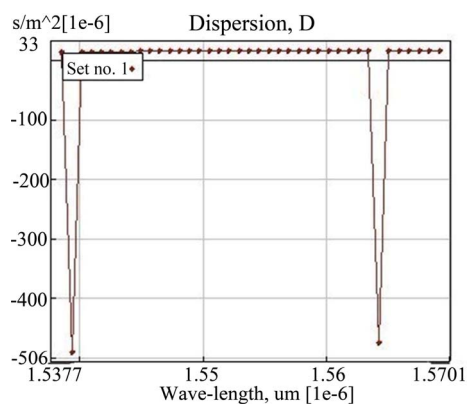


Figure 6. Measured dispersion-wavelength curve and phase-frequency curve when the fiber length is 1000 m and modulation frequency is 1778 Hz

图 6. 待测光纤为 1000 m, 调制频率为 1778 Hz 时, 测得的色散 - 波长曲线和相位 - 频率曲线

360°。因此可以看出锯齿的产生是由于最大光频率与最小光频率的相位差超过 360°造成的。从色散 - 波长图中可以发现, 由于相位 - 频率图中锯齿的存在, 使得测得的光纤色散曲线出现两个向下的脉冲, 因此测得的光纤色散与光纤预设参数是完全不符的。

要使最大光频率与最小光频率的相位差控制在 360°以内, 可以通过降低调制器调制频率完成。因为光信号在光纤中的传输时间不变, 而光信号的振动频率减小, 因此频率相邻的光信号在光纤中传输后产生的相位差也会减小, 从而使最大光频率与最小光频率的相位差控制在 360°以内。

调整后的仿真系统参数如表 6 所示。

图 7 展示了当调制频率由 1778 Hz 减少到 562 Hz 时, 测得的色散 - 波长曲线和相位 - 频率曲线。从仿真结果可以看出测量结果与光纤预设参数一致。

4.4. 待测光纤具有任意色散 - 波长曲线时

表 7 为仿真系统参数。

图 8 为待测光纤预设色散值。

图 9 为待测光纤仿真测量数据图。

观察图 8, 可以发现色散 - 波长曲线成开口向下的抛物线型, 相位 - 频率曲线成正弦波型。对比测量值和预设值, 可以发现两者基本一致。测量值和预设值微

Table 6. Simulation system parameters
表 6. 仿真系统参数

调制频率(Hz)	光频率递增 间隔(Hz)	光波初始 频率(Hz)	光纤长度(m)
562	10e-10	1.91e-14	1000

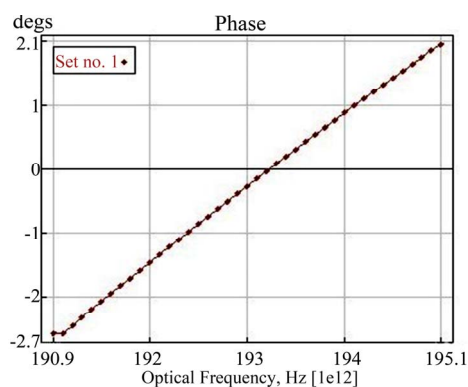
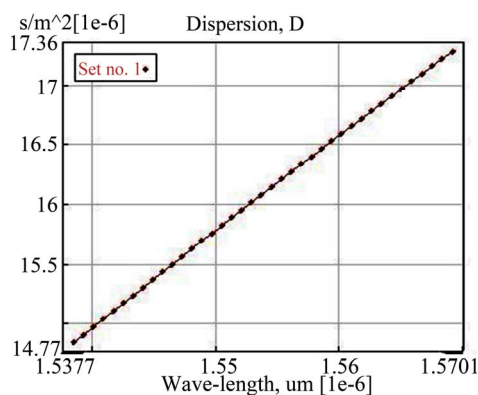


Figure 7. Measured dispersion-wavelength curve and phase-frequency curve when the fiber length is 1000 m and modulation frequency is 562 Hz

图 7. 待测光纤为 1000 m, 调制频率为 562 Hz 时, 测得的色散 - 波长曲线和相位 - 频率曲线

Table 7. Simulation system parameters
表 7. 仿真系统参数

调制频率(Hz)	光频率递增间隔(Hz)	光波初始频率(Hz)	光纤长度(m)
1778	5e-11	1.81e-14	10

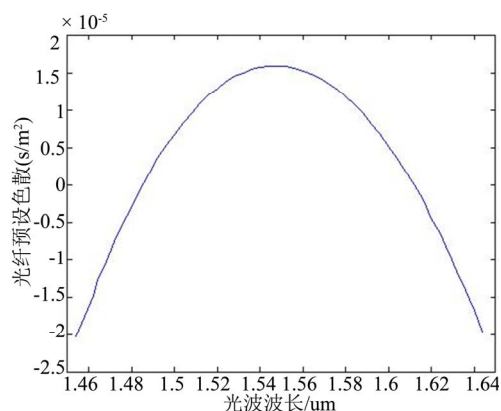
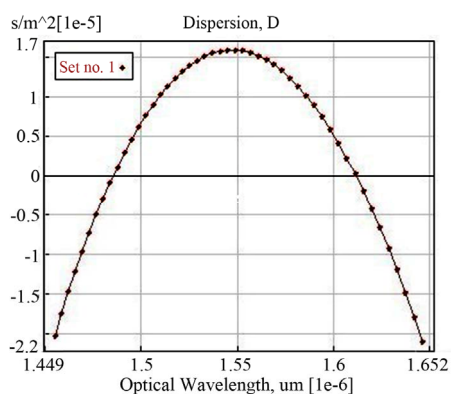
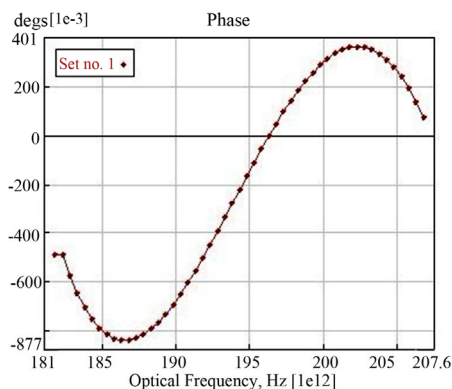


Figure 8. Default dispersion-wavelength curve of the fiber under test

图 8. 待测光纤预设色散 - 波长曲线



(a)



(b)

Figure 9. Measured dispersion-wavelength curve and phase-frequency curve when the fiber has arbitrary dispersion-wavelength curve

图 9. 待测光纤具有任意色散 - 波长曲线时, 测得的色散-波长曲线和相位 - 频率曲线

小的差异可能是由于光信号被调制器调制造成光信号频谱展宽而产生的。频谱展宽后的光信号经过待测光纤传输后, 会在时域上发生展宽, 从而使系统接收端测得的光信号相位产生差错, 导致测量的色散值与预设值有较小的差异。

5. 结论

本文主要介绍了使用调制相移法测量光纤色散的方法, 这种方法具有结构简单, 可靠性强等优点。本文讨论了影响调制相移法测量光纤色散精度的因素并加以改善, 使其满足高精度光纤色散的测量要求。

我们使用调制相移法对不同长度的光纤进行了测量。我们发现随着待测光纤长的增加, 但最大光频率与最小光频率相位差小于 360° 时, 色散曲线开始出现抖动, 测得的色散发生误差。经过分析可以知道这种现象是由于光信号调制产生的新频谱使光波在光纤传输后产生形变展宽造成的。由于光信号时域上的展宽形变, 使得测量的相位产生了误差, 因此测得的色散也变得不精确。此时可以通过降低调制频率来降低相位误差, 进而测得光纤色散的精确值。

随着光纤长度进一步增加, 最大光频率与最小光频率相位差大于 360° 时, 相位 - 频率坐标图会出现锯齿, 从而使光纤色散的测量产生错误。此时可以通过降低调制频率, 将最大光频率与最小光频率相位差控制在 360° 内, 从而可以测得精确的光纤色散值。

从上述仿真结果和分析结论可以知道对不同长度的光纤进行色散测量, 调制频率是相当重要的。调制频率应小于待测光纤的基带带宽, 并且适当的减小调制频率可以减小由于接收端相位测量系统测得的相位误差。但是调制频率不能过小, 过小的调制频率会使得光纤色散测量精度不高。在实际应用中, 因为过小的调制频率会使光信号最大频率与最小频率相位差也过小, 从而使得光信号接收端鉴相器接收的信号信噪比过小, 无法得到精确的相位值。因此测得的光纤色散精度不高。

另外本文利用调制相移法对具有任意色散 - 波长曲线的光纤进行了测量。从测量结果, 我们验证了调制相移法可以测量具有任意色散 - 波长曲线的光纤, 并可以得到光纤色散的精确值。

参考文献 (References)

- [1] Z. Q. Pan, C. Y. Yu and A. E. Willner. Optical performance monitoring for the next generation optical communication networks. *Optical Fiber Technology*, 2010, 16(1): 20-45.
- [2] S. Wielandy, M. Fishteyn, T. Her, et al. Real-time measurement of accumulated chromatic dispersion for automatic dispersion compensation. *Electronics Letters*, 2002, 38(20): 1198-1199.
- [3] S. Wielandy, P. S. Westbrook, M. Fishteyn, et al. Demonstration of automatic dispersion control for 160G bit/s transmission over 275 km of deployed fibre. *Electronics Letters*, 2004, 40(11).
- [4] S. Wielandy, L. Nelson and M. Fishteyn. Simultaneous optical performance monitoring of chromatic dispersion and PMD for 40G b/s data transmission. *OSA/FIO*, 2004.
- [5] Virtual Photonics Inc. *VPTransmissionMake GUI Manual*. Berlin: VP Inc., 1996-2000.