

基于啁啾光纤光栅的色散补偿器在超长距离密集波分复用系统中的应用*

谭中伟[†] 郑 凯 刘 艳 傅永军 陈 勇 曹继红 宁提纲 董小伟 马丽娜 简水生

(北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

(2005 年 2 月 28 日收到,2005 年 4 月 19 日收到修改稿)

对啁啾光纤光栅在超长距离多波长传输系统中应用时所存在的问题进行了研究,主要分析了多波长级联的啁啾光纤光栅之间的串扰,并提出了利用相干长度法来抑制不同信道间啁啾光纤光栅串扰的方法.在此基础上实现了基于光纤光栅色散补偿的 $8 \times 10 \text{Gbit/s}$, 1500km G.652 光纤上的传输系统.

关键词:光纤通信,色散补偿,啁啾光纤光栅

PACC: 4280F, 4280S, 4281D

1. 引 言

随着信息技术的发展,人们对通信网容量需求也在不断的增加,作为通信网骨干的光纤通信系统向着长距离、多信道的方向发展.色散补偿是光纤通信中的一项关键技术,人们提出了多种色散补偿的方法^[1].啁啾光纤光栅色散补偿是一种行之有效的色散补偿方案,它具有成本低、结构简单、插入损耗小、性能可靠等优点^[2].早在 1997 年就有利用光纤光栅色散补偿传输色散管理孤子超过 1000km 的报道^[3],但光纤光栅在波分复用系统中的应用却存在着一些困难.

与单信道色散补偿的传输系统相比,在超长距离密集波分复用系统中,由于信道数多、波长间隔小,对光纤光栅的波长一致性、带宽、稳定性以及光纤光栅的级联等特性的要求更为严格.近年来,人们对取样光纤光栅进行了许多研究,也在多信道的色散补偿中取得了一定的成功^[4].然而,由于取样光纤光栅具有复杂的折射率调制以及由折射率调制的饱和效应所引起的折射率调制的幅度和相位的误差,导致光纤光栅的特性有不同程度的恶化^[5].曾经有人制作宽带啁啾光纤光栅来进行多信道的色散补偿^[6],但是,由于宽带啁啾光纤光栅的制作难度大,

容易受到各种环境因素的影响,其特性必然受到影响,而且,其封装的问题也很难解决.目前,没有发现用光纤光栅进行色散补偿的波分复用系统传输超过 1000km 的报道.我们采用窄带的啁啾光纤光栅进行色散补偿,针对每个信道的色散量分别进行补偿,在光纤光栅的制作、封装和光纤光栅色散补偿方面进行了多年的研究和实验^[7,8],实现了基于啁啾光纤光栅色散补偿的 $8 \times 10 \text{Gbit/s}$, 1500km G.652 光纤上的最小波长间隔 0.8nm 的传输系统.

2. 啁啾光纤光栅的制备

我们采用相位掩模法写入光栅,使用的光纤是标准的普通单模光纤(Combing SMF28)经高纯氢处理后得到的.写入的紫外光源是 KrF 准分子激光器,波长为 248nm ,脉冲功率为 20mJ ,脉冲持续时间为 15ns ,脉冲频率选 100Hz .写入光栅的 3dB 带宽约为 0.3nm .超长距离密集波分复用系统对光纤光栅的波长一致性和稳定性都有严格的要求,因为系统中需要使用大量的光纤光栅,如果波长一致性和稳定性不好,多个光纤光栅级联就会使总的带宽严重变窄,严重时会有部分光信号落到光纤光栅的有效带宽外.因为在光敏光纤中掺杂会引起光纤双折射增大,用光敏光纤制作的光纤光栅偏振模色散较大,所

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2001AA120201)和北京交通大学人才基金(批准号 2005RC031)资助的课题.

[†]E-mail: tanzw@vip.sina.com

以我们使用氢载光纤来制作光纤光栅, 而光纤光栅的波长和光纤的氢载、退火以及写入机构都有关系, 我们对光纤的氢载处理的气压、时间和退火的温度和时间进行严格的控制, 并且改进了光纤光栅的写入机构, 使同一路光纤光栅在写入时受到恒定的拉力, 这样可以使得制作的光纤光栅的波长尽可能一致, 光纤光栅的时延量大于 2600ps, 时延纹波小于

表 1 一路十根光纤光栅的光谱和时延

色散量 (@ 1550nm) (ps/nm)	≥2600								
各信道波长/nm	1549.32	1550.12	1550.92	1554.13	1554.94	1555.75	1556.55	1557.36	
群时延纹波/ps	22.5	28.4	22.5	26.4	23.8	19.3	26.0	15.1	
啁啾量	0.386	0.386	0.386	0.380	0.379	0.378	0.378	0.378	0.378
色散量误差/%	< 5								
插入损耗/dB	< 3.5								
插入损耗波动/dB	< ±0.25								
各信道损耗差/dB	< 1								

更为重要的光纤光栅的封装技术, 因为在超长距离密集波分复用系统中, 需要大量的光纤光栅, 而光纤光栅对温度和应力都是非常敏感的, 光纤光栅的中心波长随温度的变化约为 $0.014\text{nm}/^\circ\text{C}$. 如果不对光纤光栅进行温度补偿封装的话, 是不能用在系统中的, 所以, 温度补偿封装是制约着光纤光栅在色散补偿领域应用的一个关键技术. 我们经过多年的研究, 发现了一种负温度系数的材料, 用它来封装的光纤光栅达到了小于 $0.0005\text{nm}/^\circ\text{C}$ 的温度稳定性, 如图 1 所示.

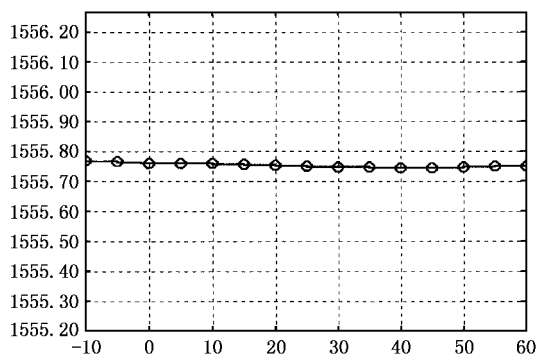


图 1 不同温度下光纤光栅的波长

3. 多波长啁啾光纤光栅的串扰

由于我们采用的是窄带的啁啾光纤光栅, 在多个光纤光栅连接时就必须考虑光纤光栅之间的串

扰. 由于光纤光栅的反射谱并不理想, 不同波长的啁啾光纤光栅的级联就会引起光纤光栅之间的串扰, 使系统的性能恶化^[9]. 把波长间隔 0.8nm 的光纤光栅串联起来, 如图 2 所示.

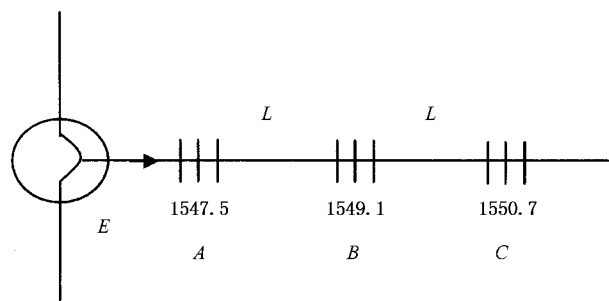


图 2 光纤光栅的串联

扰. 由于光纤光栅的反射谱并不理想, 不同波长的啁啾光纤光栅的级联就会引起光纤光栅之间的串扰, 使系统的性能恶化^[9]. 把波长间隔 0.8nm 的光纤光栅串联起来, 如图 2 所示.

光纤光栅之间的光纤长度为 40cm , 用 EG&G 公司的 CD400 色散测试仪测得的光纤光栅串联前后的群时延纹波如图 3 所示. 测试使用的是标准相移法, 扫描步长是 0.001nm , 光源的调制频率是 70MHz .

可以看到, 串联后光纤光栅的群时延明显恶化, 有很多高频纹波叠加到光纤光栅的群时延曲线上. 光纤光栅群时延特性的恶化主要是由于光纤光栅与其他信道的光纤光栅的带外反射发生干涉引起的, 这种带外反射就是光纤光栅的串扰. 光纤光栅的带外反射主要包括由于边缘效应引起的光纤光栅的两个端面的宽带反射^[10]、写入的随机误差引起的带外

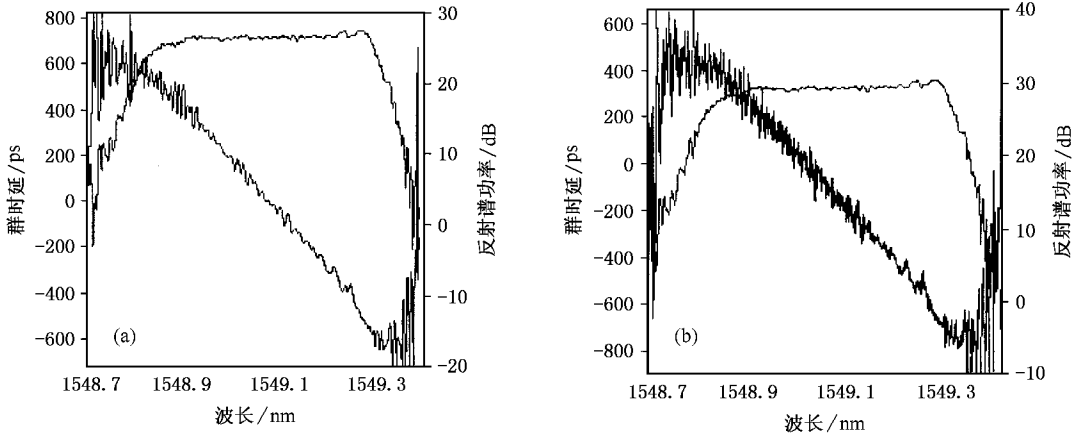


图 3 光纤光栅的时延纹波测试结果 (a)单个光纤光栅,(b)串联后光纤光栅

反射和边瓣.为了减小啁啾光纤光栅的群时延纹波,在制作啁啾光纤光栅的时候我们采用了切趾技术,而切趾能减小光纤光栅的端面反射^[11].

光纤光栅的群时延纹波可以看成是由光的干涉引起的^[12],文献[13,14]分别建模对光纤光栅的端面反射产生的纹波和随机相位误差产生的纹波进行了分析.这里我们把相干度引入干涉模型中,来分析光纤光栅之间的串扰.如图2所示, B 是中间光纤光栅的反射系数,其反射率为 B^2 , A 和 C 分别是相邻两个光纤光栅在1549.1nm处的反射系数.光纤光栅之间的距离为 L ,光在其中反射一个来回的时间为 $\tau = 2nL/c$.光纤光栅之间形成反射腔,设入射场为 E ,则最后的输出为

$$E_r(k, t) = e^{i\varphi} (AE_0(t - \tau) + BE_0(t) + (-AB^2 + \alpha(1 - B^2))E_0(t + \tau) + \alpha(A^2, B^2, AB) \dots), \quad (1)$$

其中 φ 是只有 B 光纤光栅存在时出射场的相位,由于实际的光源是部分相干光,其相关度为

$$R(t, \tau) = \frac{E(t + \tau)E^*(t)}{I}. \quad (2)$$

一般说来,激光器输出功率谱密度函数具有洛伦兹型分布^[15]

$$R(\tau) = e^{-\pi\Delta\nu|\tau|} e^{-i2\pi\nu_0\tau}. \quad (3)$$

由于边瓣反射很微弱, $A, C \ll 1$,输出功率可以近似表示为

$$I = E_r^* E_r \approx (B^2 + 2B(A + C)(1 - B^2) \times \text{Re}(R(\tau)))E_0^2, \quad (4)$$

输出光场的相位

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(E_r)}{\text{Re}(E_r)} \approx \varphi - (1 + B^2) \frac{A}{B} \ln(R(\tau))$$

$$- (1 - B^2) \frac{C}{B} \ln(R(\tau)), \quad (5)$$

其中 φ 是经过单个光纤光栅后的相位.

由其他波长的串扰而引入的光纤光栅的纹波可以用 $c^{-1}(\partial\alpha/\partial k)$ 与光纤光栅的纹波 $c^{-1}(\partial\varphi/\partial k)$ 的偏差来计算^[14]

$$\Delta\tau = \left(-(1 + B^2) \frac{A}{B} \right) + \left((1 - B^2) \frac{C}{B} \right) \times \frac{\partial \ln(R(\tau))}{\partial k}. \quad (6)$$

由(3)和(6)式可以得到

$$\Delta\tau = M \left(-(1 + B^2) \frac{A}{B} \right) + \left((1 - B^2) \frac{C}{B} \right) \cos(2knL), \quad (7)$$

$$\text{其中 } M = \frac{2nL}{c} e^{-2\pi\Delta\nu \frac{1nL}{c}}.$$

由(7)式可知,由串扰引入的群时延纹波是和光纤光栅的串扰成正比的,而且由于 $(1 + B^2) > (1 - B^2)$,光纤光栅 A 对 B 的影响要大于 C 对 B 的影响,当光纤光栅的反射率接近于1时, C 对 B 的影响可以忽略不计.显然,当光纤光栅的反射率较大时,大部分光功率被该光纤光栅反射回去,透过的光很弱, C 的反射也就更微弱了.

由(7)式可以发现,由串扰引入的群时延纹波和不同信道间光纤光栅的连接距离 L 之间的关系比较复杂,(7)式的最后一个因子表示光纤光栅时延纹波的周期是由 L 决定的. L 相当于谐振腔的长度, L 越大,时延纹波的周期越小.而单个光纤光栅的时延纹波的最小周期由光纤光栅的长度决定^[12],而光纤光栅之间的距离要大于光纤光栅的长度.这就解释了为什么图3(b)测试得到的由串扰引起的光纤光

栅的时延纹波是一种高频纹波, 不仅产生的时延纹波的周期与距离 L 有关, 其幅度也与 L 相关. 可以用数值计算得到在不同 L 时的 M 的值, 纹波的幅度与 M 成正比.

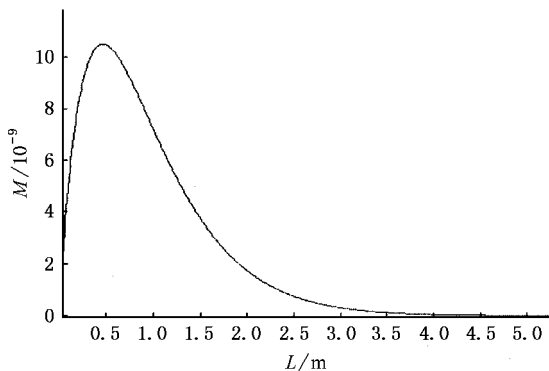


图4 在不同距离时对应的 M 数值

通过图4, 可以发现, 当 L 很小时, 群时延纹波随着距离 L 的增大而增大, 在 $L=0.5\text{m}$ 时达到最大值, L 继续增大群时延纹波逐渐减小, 当长度增大到一定程度后群时延纹波接近于零. 这是由于光源的部分相干性, 不同光纤光栅之间的反射光之间的光程差越大, 其相干性就越弱, 产生的群时延纹波就越小. 当长度 L 增大到一定长度以后, 相干涉产生的群时延纹波就可以忽略不计了, 这时, 光纤光栅的相干串扰退化为非相干串扰, 对系统的影响减弱了. 我们把连接光纤光栅之间的距离增大到 3m 时测量得

到的光纤光栅的群时延纹波如图5所示.

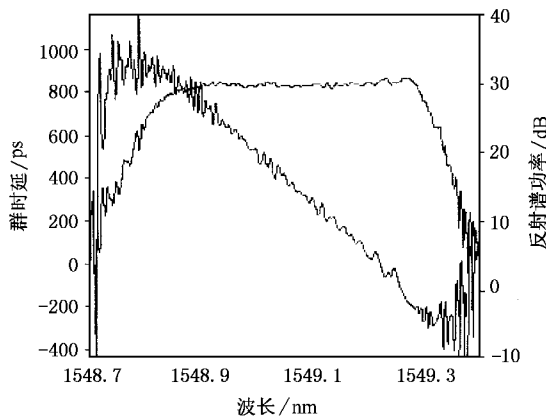


图5 增大光纤光栅间距离后群时延纹波的测量结果

延长不同波长光纤光栅之间的距离后光纤光栅的群时延纹波与单独一个光纤光栅的群时延纹波基本一致, 高频分量被有效抑制了, 光纤光栅间的干涉现象消除了.

4. 实 验

我们用光纤光栅对 G.652 光纤进行色散补偿, 实现了 $10\text{Gbit/s} \times 8$ 的 1500km 的传输系统. 使用的光纤色散量约为 16.5ps/km , 光纤光栅的色散量 $>2600\text{ps}$, 每个光纤光栅能够补偿 160km 的光纤. 系统的结构如图6所示.

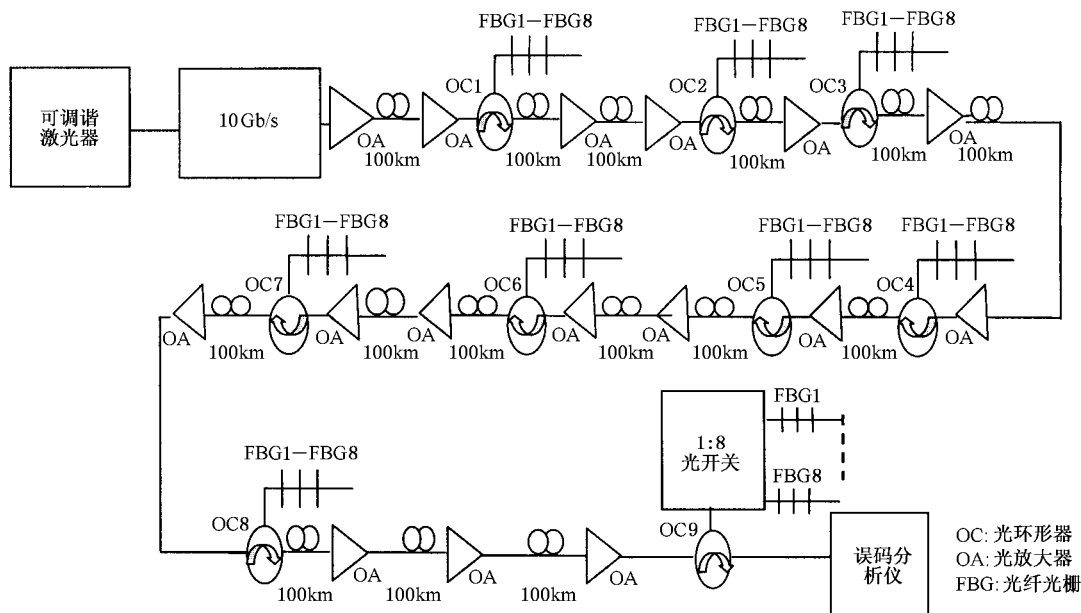


图6 光纤光栅色散补偿 $10\text{Gbit/s} \times 8$ 的 1500km 的密集波分复用系统结构图

用铈酸锂调制器把 10Gbit/s 不归零伪随机(PN-23)码加载在可调谐激光器产生的激光上. 光纤光栅波长分别如表 1 所示, 最小波长间隔 0.8nm. 光纤的中继距离为 100km, 而每个光纤光栅色散补偿量为 160km, 所以每 100km 或 200km 分布一个光纤光栅, 使整个线路中累积的色散量尽可能小, 以减小非线性的影响^[6]. 光纤和环形器的差损小于 5 个 dB,

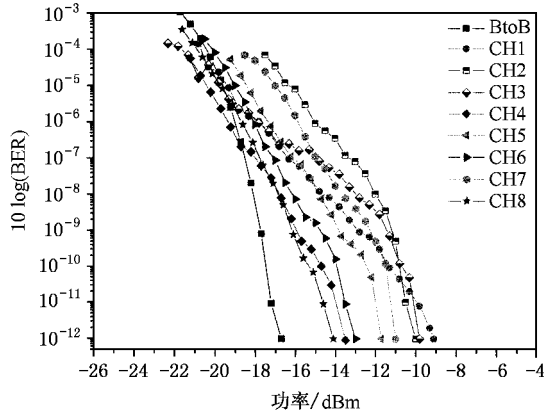


图 7 传输 1500km 得到的误码率曲线

因此不需要单独放大. 由于光纤光栅的非线性效应很小, 所以把它直接放在光纤放大器之后, 不仅补偿色散, 还起到了滤除光纤放大器噪声的作用. 光纤的入纤功率保持在 3—5dBm, 每段光纤的损耗在 20—22dB. 由于传输距离较长, 经过 1500km 后, 其他信道的 ASE 噪声累积严重, 因此, 在接收机之前要进行滤波. 用一个 1×8 的光开关接在环形器之后, 8 路光纤光栅并联连接在光开关之后, 用来滤除带外的噪声. 传输 1500km 测得的误码率曲线如图 7 所示.

5. 结 论

本文分析了多波长级联的啁啾光纤光栅之间的串扰, 并提出了利用相干长度法来抑制不同信道间啁啾光纤光栅串扰的方法. 在此基础之上实现了基于光纤光栅色散补偿的 $8 \times 10\text{Gbit/s}$ 在 1500km 的 G.652 光纤上的传输系统. 这种基于 G.652 和光纤光栅色散补偿的系统成本较低, 一旦得到广泛应用, 具有极大的经济效益和社会效益.

- [1] Wu J, Lou C Y, Li Y H and Gao Y Z 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 619 (in Chinese) [伍 剑、娄采云、李玉华、高以智 1998 物理学报 **47** 619]
- [2] Hill K O and Meltz G 1997 *Lightwave Technology* **15** 1263
- [3] Grudinin A B, Durkin M, Ibsen M, Laming R I, Schiffrin A, Franco P, Grandi E and Romagnoli M 1997 *Electronics Letters* **33** 1572
- [4] Garrett L D, Gnauck A H, Forghieri F, Gusmeroli V and Scarano D 1999 *Photonics Technology Letters, IEEE* **11** 484
- [5] Kolossovski K Y and Sammut R A 2003, *Optics Express* **11** 1029
- [6] Brennan J, OFC2003, FC1.
- [7] Jian S H, Yan F P, Li T J, Jian W, Pei L and Ning T G 2002 *Science in China E* **32** 350 (in Chinese) [简水生、延凤平、李唐军、简 伟、裴 丽、宁提纲 2002 中国科学 E **32** 350]
- [8] Pei L, Jian S H, Yan F P, Ning T G, Jian W and Li T J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 615 (in Chinese) [裴 丽、简水生、延凤平、宁

提纲、简 伟、李唐军 2003 物理学报 **52** 615]

- [9] Ning T G, Pei L, Tan Z W *et al* APOC2003 5279-25 p135
- [10] Kashyap R 1999 *Fibre Bragg Gratings* (Academic Press) p324.
- [11] Eggleton B J, Lenz G, Litchinitser N, Patterson D B and Slusher R E 1997 *IEEE Photonics Technology Letters*, **9** 1403
- [12] Sumetsky M, Eggleton B J, de Sterke C M 2002 *Opt. Express* **10** 332
- [13] Tan Z W, Liu Y, Ning T G, Jian S S 2004 *Chinese Optics Letters*. **2** 18
- [14] Matthews M R, Porque J, Hoyle C D, Vos M J and Smith T L 2004 *Opt. Express* **12** 189
- [15] Zhao J L 2002 *Advanced Optics* (Published by National Defense Industry Press) p128 (in Chinese) [赵建林 2002 高等光学(国防工业出版社) p128]
- [16] Agrawal G P 2002 *Fiber-Optic Communication Systems* (3rd edition) p305

Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-hual DWDM system^{*}

Tan Zhong-Wei Zheng Kai Liu Yan Fu Yong-Jun Chen Yong Cao Ji-Hong

Ning Ti-Gang Dong Xiao-Wei Ma Li-Na Jian Shui-Sheng

(*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(Received 28 February 2005 ; revised manuscript received 19 April 2005)

Abstract

An application of chirped fiber grating in an ultra long-hual DWDM system is presented in the paper. The interaction between the chirped fiber gratings at different wavelengths are analyzed for the first time. A method of prolonging the distance between gratings to surpass the coherent length of the light source is proposed to suppress the interaction between the gratings. By using chirped fiber gratings, we realized a transmission system of $8 \times 10\text{Gbit/s}$ signal on G.652 fiber over 1500km.

Keywords : optical communication , dispersion compensation , chirped fiber grating

PACC : 4280F , 4280S , 4281D

^{*} Project supported by the National 863 Project (Grant No. 2001AA120201) , and the Scientific Research Foundation of Beijing Jiaotong University , China (Grant No. 2005RC031) .