

# 低串扰的多波长光纤光栅色散补偿器<sup>\*</sup>

谭中伟<sup>†</sup> 曹继红 陈 勇 刘 艳 宁提纲 简水生

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2006 年 4 月 14 日收到, 2006 年 5 月 31 日收到修改稿)

分析了光纤光栅色散补偿系统中的串扰, 并比较了几种常用的多波长光纤光栅色散补偿器的串扰特性, 结合串联的窄带光纤光栅和取样光纤光栅的优点, 提出一种抑制光纤光栅色散补偿系统串扰的方法. 它通过在邻近信道间引入随机时延差, 既能改善取样光纤光栅的线性串扰特性, 又能抑制交叉相位调制效应和四波混频等非线性串扰. 使用该方法可以得到具有低串扰的多波长光纤光栅色散补偿器.

关键词: 光纤通信, 光纤光栅, 色散补偿, 串扰

PACC: 4280F, 4281D, 4280S

## 1. 引 言

近年来, 随着光纤通信的迅速发展, 多通道的色散补偿技术成为促进光纤通信发展的一项关键技术. 由于色散补偿光纤(DCF)损耗大, 光纤的非线性强, 而且用 DCF 很难实现大范围的色散斜率的补偿. 为此, 人们发明了多种色散补偿器, 其中, 用啁啾(chirp)光纤光栅对常规光纤的色散进行补偿, 具有成本低、结构简单、插入损耗小和性能可靠等多方面的优点, 因此成为一种很有前景色散补偿方案<sup>[1]</sup>.

在光纤光栅对多信道光纤通信系统进行色散补偿时, 由于光纤光栅存在带外反射, 会引入线性串扰. 多信道的色散补偿可以采用串联的窄带光纤光栅、宽带光纤光栅、多信道光纤光栅(如超叠加光纤光栅、强度取样光栅和相位取样光纤光栅)等多种方式来进行. 然而, 不论采用任何一种方法来制作 chirp 光纤光栅, 光纤光栅的带外反射总是存在的, 因此会产生线性串扰. 本文对这几种常见的多波长光纤光栅色散补偿器的串扰特性进行了比较.

在密集波分复用(DWDM)系统中, 当信道数很多, 尤其是信道间的间隔很小时, 会产生强烈的非线性串扰. 目前, 一般是采用复杂的色散管理来抑制交叉相位调制作用<sup>[2]</sup>. 但是, 对于基于 DCF 色散补偿的系统, 其最优的色散补偿率范围和残余色散的容

限都非常小<sup>[3]</sup>, 实际上很难运用到超长距离的 DWDM 系统中. 非线性串扰(交叉相位调制和四波混频效应)主要是由邻近信道引起的<sup>[4]</sup>, 因此, 本文提出的色散补偿器, 通过在邻近信道间引入时延差, 能够有效地抑制交叉相位调制和四波混频效应, 该色散补偿器同时具有较好的线性串扰特性.

## 2. 对光纤光栅色散补偿系统串扰的分析

一个典型的啁啾光纤光栅的反射谱如图 1 所示<sup>[5]</sup>. 由于写入的光纤光栅不可能是理想的带通或带阻, 端面会产生宽带的反射<sup>[6]</sup>, 随机相位误差更会产生边瓣<sup>[7]</sup>. 在进行了有效切趾后, 端面反射得到有效抑制, 写入的随机误差引起的边瓣成为光纤光栅串扰的主要因素. 串扰会使其他级联光栅的时延纹波变大, 引起被补偿信号波形劣化, 使系统的功率代价增大. 不论使用哪种光纤光栅进行色散补偿, 这种线性串扰都是存在的.

这里, 首先以串联的窄带光纤光栅为例, 来分析光纤光栅色散补偿系统的串扰, 如图 2 所示.

考虑到通信中实际使用激光器和传输的信号都有一定的带宽, 因此, 不能把它简单的当成是单色的. 这是一种部分相干光. 它在相干空间的范围内是相干的. 当带外反射和相邻信道的光纤光栅反射的

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60607001)和北京交通大学专项研究员基金(批准号: 48105)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: tanzwei@126.com

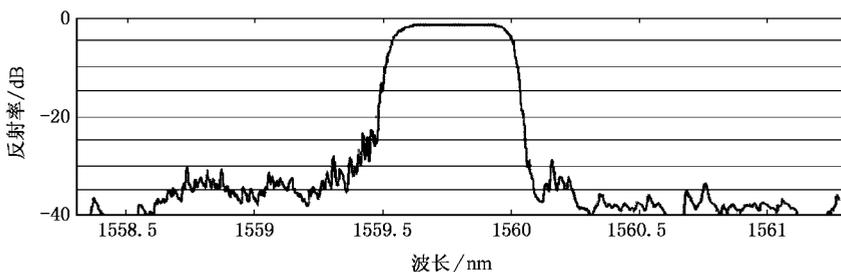


图1 啁啾光纤光栅的反射谱

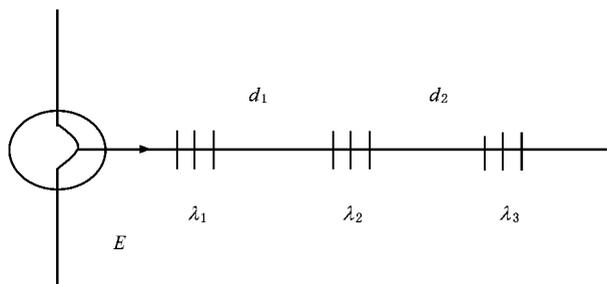


图2 串联的窄带光纤光栅

光信号处在相干空间之内,那么两束光会发生干涉.光纤光栅的群时延纹波会发生恶化,光脉冲的波形会发生一定的畸变,这对光信号的传输是非常不利的.但是,如果当带外反射和相邻信道的光纤光栅反射的光信号处在相干空间之外,两束光就不会发生干涉,这样,相邻信道的光纤光栅的串扰就由相干串扰退化为非相干串扰<sup>[8]</sup>.对于部分相干光来说,互相关函数为<sup>[9]</sup>

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)|, \quad (1)$$

而准单色光波的时间相干度是

$$|\gamma(\tau)| = 1 - \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (0 < \tau < \tau_0). \quad (2)$$

可见,时间相干度的绝对值随两个光波的相隔时间 $\tau$ 呈线性变化.时间间隔越大,相干度越小.而时间间隔就是光束通过两个相邻光纤光栅之间的时间,所以,增大两个相邻光纤光栅的间隔,就能增大时间间隔,使两束光的相干性减弱,当时间间隔大于相干时间时,这两束光可以认为是不相干的.这个长度叫做相干长度

$$L = c\Delta t = c/\Delta\nu. \quad (3)$$

因此,当光纤光栅之间的距离 $d$ 大于相干长度 $L$ 时就可以把光纤光栅之间的串扰当作非相干串扰.把光纤光栅之间的串扰对系统的作用可以用串扰噪声来计算<sup>[10]</sup>.设串扰噪声的归一化功率为 $\varepsilon_k =$

$\frac{A^2 k}{B^2}$ , 则检测器检测到的光信号为

$$E = E_s + E_x = \sqrt{b_s} \exp[j\omega t + j\phi_s(t)] + \sum_{k=1}^N \sqrt{\varepsilon_k b_k} \exp(j\omega t + j\phi_s(t)), \quad (4)$$

$a_k$  和  $b_k$  是信号对应的“0”、“1”码,则检测器检测到的光功率是

$$P = |E_s(t) + E_x(t)|^2 = \left[ b_s + \sum_{k=1}^M b_k \varepsilon_k + 2 \sum_{k=1}^M \sqrt{\varepsilon_k b_s b_k} \times R(\tau) \right]. \quad (5)$$

根据文献<sup>[11]</sup>可知,对应最佳接收机,相干串扰源引起的功率代价可以表示为

$$PP = -10 \log \left( 1 - \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{1 - \sqrt{\rho}} \right), \quad (6)$$

其中, $\rho = P_0/P_1$ 表示信号的消光比,取值范围在0—1之间(理想情况下为0).可以看出信号的消光比对光纤光栅的性能也是有一定的影响的,这是因为当消光比接近0时,仅有“1”码光信号与噪声发生拍频现象,而当消光比较差时,“0”码信号也会与噪声发生拍频现象.而一个非相干的串扰所引入的功率代价可以用下式来计算<sup>[11]</sup>:

$$PP = -10 \log(1 - \varepsilon). \quad (7)$$

用经过多次写入的相位掩模板制作的光纤光栅的典型旁瓣强度与主瓣的差为28 dB,把该数值代入以上两式进行计算分别得到相干和不相干条件下,两光纤光栅的串扰引入功率代价分别为0.36 dB和0.015 dB,与相干串扰相比,非相干串扰对系统的影响几乎可以忽略不计.用该方法同样可以计算单个光纤光栅的纹波.而对单个光纤光栅来说,-28 dB的边带对应的反射系数与主带的比值为0.04,功率代价为0.36 dB,再考虑光信号的消光比为0.1时(“0”码功率为“1”码功率的1%),功率代价为0.4 dB.与用相位纹波计算得到的结果基本一致<sup>[7]</sup>.

这也说明了,当串扰是完全相干时,对系统的影响是不可忽略的,因此,必须尽可能地减小相干串扰的作用。

在 DWDM 系统中,当信道数很多,尤其是信道间的间隔很小时,会产生强烈的非线性串扰,其中,交叉相位调制效应是最严重的非线性效应之一。在一段较长的带色散的光纤中,由邻近信道产生的交叉相位调制效应产生的相位差可以表示为<sup>[41]</sup>

$$\Delta\phi \approx \frac{2\gamma P\alpha L_{\text{eff}}}{\omega D\Delta\lambda}, \quad (8)$$

其中, $\gamma$ 是光纤的非线性系数, $P$ 是邻近信道的光功率, $\alpha$ 是光纤的衰减系数, $L_{\text{eff}}=(1-e^{-\alpha L})/\alpha$ 是光纤的有效长度, $\omega$ 是调制频率, $D$ 是色散系数, $\Delta\lambda$ 是信道间隔。这里需要强调的是,由于色散走离的作用,在其他条件一定的情况下,交叉相位调制效应产生的相位差 $\Delta\phi$ 与信道间隔 $\Delta\lambda$ 是成反比的。也就是说,交叉相位调制效应主要是由邻近信道产生的。

基于 G.652 光纤的系统,由于光纤的色散较大,系统的色散补偿率要接近 1,否则脉冲将发生严重展宽,信道内的码间串扰将比较严重,而系统的色散补偿率接近 1 时,又会引起交叉相位调制的谐振<sup>[12]</sup>。对基于 DCF + G.652 光纤系统来说,抑制其自相位调制和交叉相位调制的要求是相互矛盾的,因此,它的色散补偿率范围和残余色散的容限都非常小。

在信道间引入时延差会减弱交叉相位调制的影响,人们有用复用/解复用器加光纤延迟线<sup>[13]</sup>和串联的均匀光纤光栅<sup>[14]</sup>来做交叉相位调制抑制器。但是,由于其结构复杂、增大系统的损耗和增加系统的成本等不利因素,制约了它的应用。我们发现,利用串联的窄带光纤光栅来补偿多波长系统的色散时,色散补偿器在信道间引入了时延差, $\tau_i = 2n_{\text{eff}}d_i/c$ ,其中 $n_{\text{eff}}$ 是光纤的有效折射率, $c$ 是真空中光速。信道间的时延差是由光纤光栅之间的距离 $d_i$ 决定的。信道间引入时延差之后,交叉相位调制效应和四波混频效应都会得到明显的抑制<sup>[14]</sup>。因此,串联的窄带光纤光栅在进行色散补偿器的同时起到了抑制非线性效应的作用。

### 3. 多波长光纤光栅色散补偿器

多信道的色散补偿可以采用串联的窄带光纤光栅、宽带光纤光栅、超叠加光纤光栅、强度取样光栅

和相位取样光纤光栅等多种方式来进行。

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,而且不利于大量生产。相对而言,串联的窄带光纤光栅具有制作工艺成熟、群时延纹波小和反射谱特性好,可以对各个信道的色散分别进行补偿、能够对信道功率进行均衡和抑制四波混频和交叉相位调制效应等优点,在信道数不是很多时,用窄带光纤光栅进行色散补偿仍是一种较好的选择。但是,多波长色散补偿需要多个相位掩模板、需要封装的光纤光栅的数量较多,因此成本会增加,色散补偿器的体积也很难做得很小,由于背景损耗<sup>[15]</sup>和熔接损耗等问题的影响,插损也会增大,受到这些因素的限制,当信道数很多时,需要使用多波长光纤光栅。

在相同的工艺条件下,取样光纤光栅和超叠加光纤光栅的写入误差要大于窄带光纤光栅。这是由于取样光纤光栅和超叠加光纤光栅具有复杂的折射率调制,折射率调制的幅度和相位误差对光纤光栅的影响更为严重,导致光纤光栅的特性有不同程度的恶化。此外,考虑到光致折射率调制的饱和效应,当信道数增大时光纤光栅的相位和幅度都会产生畸变,这就大大限制了更多信道光纤光栅的制作。因此,人们又发明了相位取样光纤光栅。它的取样函数通过制作相位掩模板实现,其写入过程和写入普通光纤光栅一样简单,适于进行批量生产,是一种很有应用前景的技术<sup>[5]</sup>。但是,它的性能还是要比窄带光纤光栅差一些,除了受到复杂的折射率调制的限制以外,它的串扰特性也不如串联的窄带光纤光栅。

由于窄带光纤光栅之间的距离可变,通过延长不同信道间光纤光栅的距离可以使串扰变成非相干串扰,降低其对系统的影响,而取样光纤光栅所有信道的光纤光栅重叠在一起,相互之间的串扰必然是相干串扰,它对系统的影响较大,宽带啁啾光纤光栅在整个相干长度之内的相位误差引起的旁瓣都会引起干涉,因此其串扰也更大。虽然光纤光栅的旁瓣很微弱,但是,由于它是相干的,对系统的影响不可忽视。而对于非线性串扰来说,由于取样光纤光栅所有信道的光纤光栅重叠在一起,它也起不到抑制非线性的作用,宽带啁啾光纤光栅虽然在信道间引入了时延差,但是,这个时延差是由光纤光栅的色散量和光纤光栅的长度决定的,不能随意调节,因此,它对非线性的作用是不确定的。

通过比较可知,使用串联的窄带光纤光栅补偿

色散的系统的串扰较小,而使用取样光纤光栅的系统的串扰较大。

### 4. 具有低串扰的光纤光栅色散补偿器

结合窄带光纤光栅和取样光纤光栅的优点,本文提出了一种光纤光栅色散补偿器,其结构如图 3 所示,色散补偿器由几个波长交错的多波长光纤光栅组成,它对线性串扰和非线性串扰都具有一定的抑制能力,其结构简单,系统成本增加很少,而且没有额外的插损。

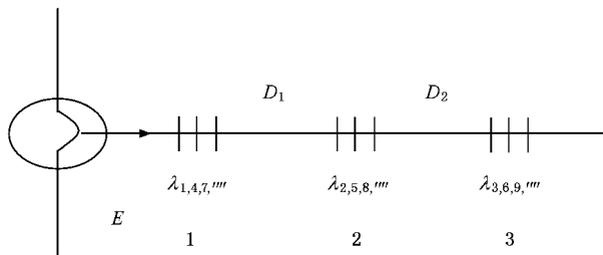


图 3 具有低串扰的光纤光栅色散补偿器的结构示意图

由于非线性串扰(交叉相位调制和四波混频效应)主要是由邻近信道引起的,因此,实际上不需要对每一个信道间都引入随机时延差,而只要在邻近信道间引入随机时延差就可以了,所以,图 3 所示的这种色散补偿器,只在邻近信道间引入随机时延差来抑制交叉相位调制和四波混频效应。

对任何一个普通的光纤光栅来说,不论它的旁瓣是由系统性的误差还是随机性的误差引起的,它的旁瓣总的来说都是在离光纤光栅的主瓣较远的地方反射率较强,而在离主瓣较远的地方反射较弱,如

图 1 所示,尤其是对波长间隔为 0.4 nm 的 DWDM 系统来说,光纤光栅在波长这么近的位置的旁瓣反射总会是比较大的,目前一般能够达到的指标为 -28 dB,但是,对取样光纤光栅来说,由于各个波长的光纤光栅叠加在一起,这种旁瓣是属于相干串扰,对系统的影响是不容忽略的,因此,只需把邻近信道的光纤光栅分开,把 N 个波长间隔较大的多波长光纤光栅串联起来进行色散补偿,一般 N 不需要太大,取 2—4 就能有效减小串扰。

下面以 N=3 的情况为例来说明这种色散补偿器,如果在制作波长间隔为 0.4 nm 的取样光纤光栅时,不同组波长的光纤光栅用较长的光纤 D1, D2 连接起来,同组波长的光纤光栅 1, 2, 3 可以用已有的超叠加光纤光栅、强度取样光纤光栅或相位取样光纤光栅等任何一种制作方法来制作,一个取样光纤光栅的波长间隔将变成 3×0.4 nm,邻近波长光纤光栅的旁瓣产生的串扰会退化为非相干串扰,而波长邻近的 3 个信道间的交叉相位调制也可以得到有效抑制,对于非线性串扰来说,由于邻近信道的交叉相位调制效应是影响系统性能的主要因素,因此,整个系统的性能会得到较大的提高。

把一个取样光纤光栅分成 N 个以后,其线性串扰有所减小,但在光谱上与普通取样光纤光栅基本是一致的,然而,由于邻近信道间引入了时延差,其群时延曲线是不同的,该色散补偿器与常用的色散补偿器的主要区别体现在群时延曲线上,计算得到一个普通的取样光纤光栅色散补偿器和具有串扰抑制特性的色散补偿器的群时延曲线如图 4 所示,按图 3 制作的色散补偿器的群时延曲线应该如图 4 (b)所示,与图 4(a)相比,相邻信道间分别引入了不

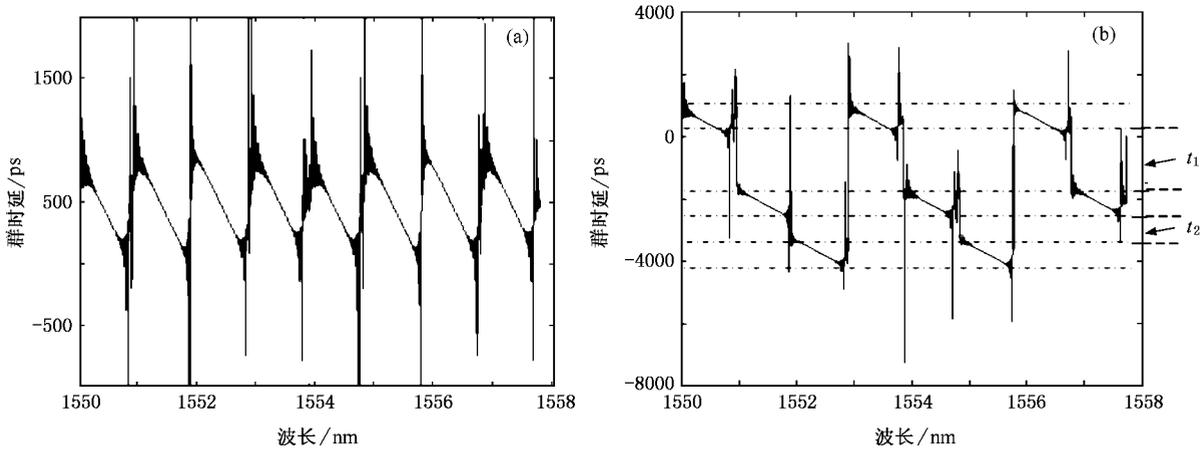


图 4 (a) 普通取样光纤光栅的群时延曲线示意图 (b) 具有抑制串扰功能的取样光纤光栅的群时延曲线示意图

同的时延差  $t_1$  和  $t_2$ , 其数值由光纤光栅之间的距离  $D_1$  和  $D_2$  决定. 而每隔两个信道, 第三个信道与开始的那个信道的群时延的初值是一致的. 由于信道间的时延差很大, 实际测得的邻近信道间的群时延的初值的差是随机的.

## 5. 结 论

本文根据对光纤光栅色散补偿系统的串扰的分

析, 提出了一种具有低串扰的光纤光栅色散补偿器, 它同时具有了串联的窄带光纤光栅和取样光纤光栅的优点, 与窄带光纤光栅相比, 它所用的光纤光栅的数量大为减少, 不会受到背景损耗的限制. 需要封装的光纤光栅的数量少, 而且色散补偿器的体积也很小; 另一方面, 它的串扰性能会优于单个的取样光纤光栅, 而且, 在不给系统带来额外的成本和损耗的条件下, 还能够有效地抑制系统的交叉相位调制和四波混频效应, 因此, 能获得更好的性价比.

- [ 1 ] Pei L, Jian S S, Yan F P, Ning T G, Jian W, 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** 651 ]
- [ 2 ] Suzuki M, Edagawa N 2003 *Journal of Lightwave Technology* **21** 916
- [ 3 ] Wu M, Way W I 2004 *Journal of Lightwave Technology* **22** 1483
- [ 4 ] Chiang T K, Kagi N, Marhic M E, Kazovsky L G 1996 *Journal of Lightwave Technology* **14** 249
- [ 5 ] Guy M, Painchaud Y <http://www.teraxion.com/mutation-files/257131564200f577a1908.pdf>
- [ 6 ] Kashyap R 1999 *Fibre Bragg Gratings* ( Academic press ) p324—330
- [ 7 ] Albert J, Theriau H S, Bilodeau F, Johnson D C, Hill K O, Sixt P, Rooks M J 1999 *IEEE Photonics Technology Letters* **8** 1334
- [ 8 ] Tan Z W, Zheng K, Liu Y, Fu Y J, Chen Y, Cao J R, Ning T G, Dong X W, Ma L N, Jian S S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5223 ( in Chinese ) [ 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 2005 物理学报 **54** 5223 ]
- [ 9 ] 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 ) 第 128 页 ]
- [ 10 ] Minzioni P, Tormen M 2005 *IEEE Photonics Technology Letters* **17** 1896
- [ 11 ] Idelforso T M, Eduward T 2002 *Crosstalk in WDM communication networks* ( Kluwer Academic Publishers )
- [ 12 ] Nelson L E, Jopson R M, Gnauck A H, Chraplyvy A R 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 907
- [ 13 ] Inoue K 1993 *Journal of Lightwave Technology* **11** 455
- [ 14 ] Bellotti G, Bigo S, Cortes P, Gauchard S, Larochelle S 2000 *Photonics Technology Letters IEEE* **12** 1403
- [ 15 ] Vittoria F, Zervas M N 2002 *Applied Optics* **41** 2240

# Multi-wavelength dispersion compensator based on fiber gratings with low crosstalk<sup>\*</sup>

Tan Zhong-Wei<sup>†</sup> Cao Ji-Hong Chen Yong Liu Yan Ning Ti-Gang Jian Shui-Sheng

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

( Received 14 April 2006 ; revised manuscript received 31 May 2006 )

## Abstract

A novel method is proposed to suppress the crosstalk of the DWDM system with dispersion compensated by fiber gratings , combining the merits of both concatenated narrowband fiber gratings and sampled fiber gratings . Random time delay is induced only between the adjacent channels to improve the characteristics of fiber gratings ' linear crosstalk , with the cross modulation effects and the four wave mixing effects being suppressed simultaneously . Using this method ,we can realize the low crosstalk multi-wavelength dispersion compensators based on fiber gratings .

**Keywords** : optical communication , fiber grating , dispersion compensation , crosstalk

**PACC** : 4280F , 4281D , 4280S

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60607001 ) and Beijing Jiaotong University Special Researcher Foundation( Grant No. 48105 ).

<sup>†</sup> E-mail : tanzwei@126.com