

# 窄带滤波损伤正交相移键控光信号的质量估计新算法

朱宇鹏 杨彦甫 颜丙阳 钟杰昌 曹剑超 姚勇

(哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘要** 理论上提出了窄带损伤条件下的误差向量幅度的新算法,该修正算法可有效去除滤波引起的码间干扰因素,从而能利用计算的误差向量幅度更准确地估计系统光信噪比与误码率。通过数值仿真发现,新的算法能够有效地估计接收光信噪比,在加入码间串扰修正后的误差向量幅度对误码率的估计也有提高。同时,论文讨论了干扰码元个数的优化问题,以获得在计算复杂度与性能之间的最佳平衡,还分析在不同系统参数包括信噪比与滤波带宽下的估计性能表现。

**关键词** 光通信;误差向量幅度;窄带滤波;码间干扰;光性能监控;正交相移键控

**中图分类号** TN929 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105005

## Novel Performance Estimation for QPSK Signals Impaired by Narrow Filtering

Zhu Yupeng Yang Yanfu Yan Bingyang Zhong Jiechang Cao Jianchao Yao Yong

(Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

**Abstract** A new algorithm of error vector magnitude (EVM) for quadrature phase shift keying (QPSK) signals impaired by narrow filtering is proposed theoretically in this paper. The new algorithm can remove the influence of intersymbol interference (ISI) induced by filtering, so the calculated EVM can be utilized for accurate estimation on optical signal to noise ratio and bit error rate. The numerical results also confirmed that the proposed scheme has better estimation accuracy on optical signal to noise ratio, and the modified algorithm taking into account the ISI-induced distortion can improve the estimation accuracy of bit error rate. Meanwhile, the interference-related symbol number is discussed for trade-off between computation efficiency and estimation performance, and the estimation performance is analyzed under different system conditions, including optical signal to noise and filter bandwidth.

**Key words** optical communications; error vector magnitude; tight filter; intersymbol interference; optical performance monitoring; quadrature phase shift keying

**OCIS codes** 060.2330; 060.4080; 060.4510

## 1 引言

未来光网络朝着更大容量更高速率发展的同时,还将最优网络效率作为重要目标。在灵活可重构的光网络中,其调制格式<sup>[1]</sup>、码元波特率、波长频率间隔以及调制器驱动信号<sup>[2]</sup>都能集中控制来适应动态变化的网络环境<sup>[3]</sup>。这种光网络的监测技术引起了人们的极大关注,特别是在链路当中存在窄带

宽滤波效应,引入码间干扰 (ISI) 影响系统性能<sup>[4]</sup>。窄带宽滤波的存在使得 ISI 变得不可忽略,由此带来的系统代价随经历光器件例如波长选择器和可重构光分插复用器 (ROADM) 的增多而变大<sup>[5]</sup>。因此光网络信号质量的可靠评价成为一种需求。衡量光信号质量的最佳指标为误码率 (BER), 在仿真及实验当中,常规做法是对相干接收的信号做线下数字

**收稿日期**: 2013-09-30; **收到修改稿日期**: 2013-11-02

**基金项目**: 国家自然科学基金 (61205046)、深圳市战略性新兴产业发展专项资金 (JCYJ20120613150130014)、哈尔滨工业大学科研创新基金 (HIT. NSFIR. 2011131)、哈尔滨工业大学深圳研究生院重点实验室课程建设项目

**作者简介**: 朱宇鹏 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信网络监测与控制方面的研究。

E-mail: yup.zhu@gmail.com

**导师简介**: 杨彦甫 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高速光通信系统及网络等方面的研究。

E-mail: yangyanfu@hotmail.com (通信联系人)

信号处理(DSP)处理,但这种做法对 BER 的估计,特别是在信号质量很高的情况下耗时严重,因此需要一种更快且同样可靠的性能监测方法。误差向量幅度(EVM)作为无线通信领域标准性能监测指标,已被引入光通信领域<sup>[6]</sup>,EVM 方法在仅有加性高斯白噪声(AWGN)的链路内能够对多种调制格式编码信号的接收光信噪比(OSNR)和 BER 进行可靠的估计,从而替代 Q 因子对高阶调制格式信号参数进行监测<sup>[7]</sup>。

在高阶调制格式光信号接收端,通常在时域描绘信号的做法是在平行相位(in-phase)I 平面和垂直相位(quadrature phase)Q 平面上绘制星座图。不同的信号畸变将会影响 I/Q 星座图,对星座图形状影响的理解有助于掌握系统畸变情况,通过对星座图模式的辨别能够判断损伤类型及大小<sup>[8]</sup>,因此星座图可视为一种监测高级调制格式光纤传输系统重要的时域技术。EVM 描述在星座图上接收到的复码元相对理想位置的有效距离。在光场仅由 AWGN 影响时,EVM 与接收 OSNR、BER 存在对应关系,在不存在窄带宽滤波时,即 ISI 效应很小情况下 EVM 的有效性得到了充分的验证<sup>[7]</sup>。传统 EVM 计算当中码元的理想位置不受其前后码元的影响,而窄带光滤波引入的 ISI 效应使得每个码元的理想位置都应考虑其前后码元。如果将信号的畸变完全看作是由噪声引起,将会得到较大的 EVM 进而低估接收 OSNR,高估系统 BER。但是,对包含窄带滤波情形下 EVM 的计算进行研究却几乎没有报道。因此有必要对这种条件下 EVM 估算进行准确的分析。

本文在基于对接收信号星座图计算 EVM 技术估计接收 OSNR 以及 BER 估计的基础上,对考虑 ISI 效应影响下 EVM 的计算进行详细分析,仿真包含窄带光滤波情况下背靠背正交相移键控(QPSK)

光传输系统模型,对比两种 EVM 算法计算结果对 OSNR 以及 BER 估计的效果。在窄带光滤波器小于 1 倍波特率情况下,传统 EVM 计算方法失效,不能可靠估测接收 OSNR 大小,而考虑 ISI 效应的 EVM 计算能够可靠估计出 OSNR 大小。在 BER 估计方面,传统 EVM 计算方法仍能保证一定的有效性,但是整体估计偏高。考虑 ISI 效应的 EVM 计算在加入 ISI 误差修正后对 BER 的估计优于传统 EVM。

## 2 理论分析及仿真结构

### 2.1 考虑 ISI 效应的 EVM 计算

针对高阶调制格式(如 M-QAM)在光电场幅度和相位进行数据信号编码,其 EVM 计算方法是将接收到的信号码元与理想信号码元进行向量相减,再将所有的误差量进行求和平均,具体计算公式已有详细的报道<sup>[6]</sup>:

$$A_{\text{EVM}}^a = \left[ \frac{S_2 \sum_{i=1}^{S_1} |E_{r,i} - E_{t,i}|^2}{S_1 \sum_{i=1}^{S_2} |E_{t,i}|^2} \right]^{1/2},$$

$$A_{\text{EVM}}^a = k A_{\text{EVM}}^m, \quad (1)$$

式中  $E_t$  为理想信号向量, $E_r$  为实际接收信号向量, $S_1$  为接收到码元个数, $S_2$  为计算理想电场向量  $E_t$  平均功率所用到的理想码元个数。一般  $S_1$  与  $S_2$  相等。 $A_{\text{EVM}}^m$  是利用星座图中理想电场最大向量计算的结果, $A_{\text{EVM}}^a$  是平均向量计算结果, $k$  参数可在文献<sup>[6]</sup>中获得。

在考虑 ISI 效应的 EVM 计算中,首先要将接收到的信号序列按照码元串的类型进行分类,如图 1 所示。然后对每种类型的码元串分别计算相应的 EVM 大小,最后进行整体 EVM 的求和平均。码元串除考虑当前码元类型外还要考虑其前后码元的类型。

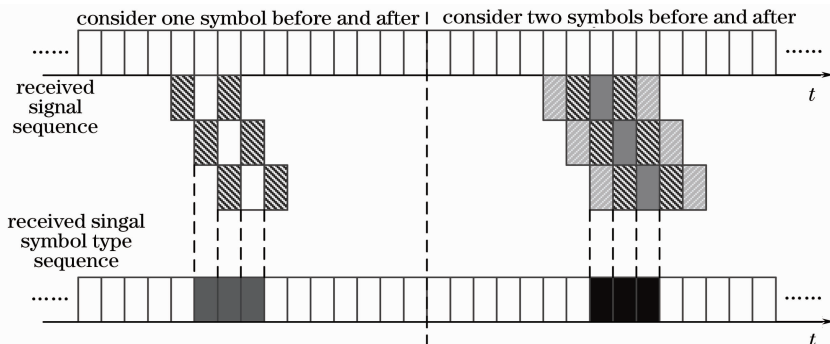


图 1 接收信号码元分类示意图

Fig. 1 Received signal symbol classification schematic

例如 QPSK 系统当中,每个码元携带 2 bit 信息,码元类型有 4 种 {00 01 10 11},如果考虑前后各 1 个码元,总计 6 bit,总共为 64 种码元类型,考虑前后 2 个码元,总计 10 比特,总共 1024 种码元类型。假设传输的码元序列有  $S$  个码元,调制格式为 M-QAM,考虑、前后码元各  $n$  个,则有:

$$S = \sum_{i=1}^{M^{2n+1}} S_i, \quad (2)$$

式中  $S_i$  表示  $i$  类码元串的码元个数。用  $j$  表示  $i$  类码元串中间码元在  $S$  个码元序列中所在的位置,则  $i$  类码元串的理想电场向量可表达为:

$$E_{t,i} = \frac{1}{S_i} \sum_j E_{r,j}. \quad (3)$$

$i$  类码元串的整体均方误差为:

$$\sigma_{\text{err},i}^2 = \sum_j |E_{r,j} - E_{t,i}|^2, \quad (4)$$

该类型码元的 EVM 值为:

$$A_{\text{EVM}}^i = \frac{S_i}{S} \left[ \frac{\sigma_{\text{err},i}^2}{S_i |E_{t,i}|^2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

整体 EVM 为:

$$A_{\text{EVM}}^n = \sum_{i=1}^{M^{2n+1}} A_{\text{EVM}}^i, \quad (6)$$

对应的码型效应误差计算公式:

$$Q_{\text{ISI}} = \sum_{i=1}^{M^{2n+1}} \left\{ \frac{S_i}{S} \left[ \frac{|E_{t,i} - \bar{E}_{t,i}|^2}{|E_{t,i}|^2} \right]^{1/2} \right\}, \quad (7)$$

式中  $\bar{E}_{t,i}$  表示  $i$  类码元在理想信号上的光电场。

接下来对比两种 EVM 计算方法在数值仿真中的差异。

## 2.2 仿真系统结构

为了分析星座图上 ISI 效应影响,采用图 2 当

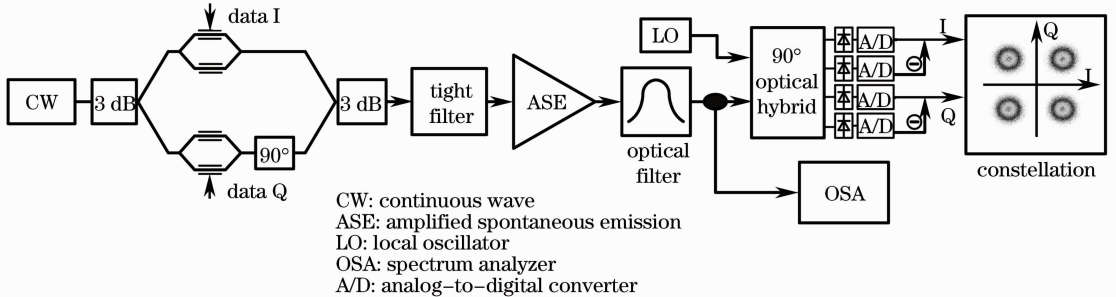


图 2 含有窄带滤波的 QPSK 相干传输系统仿真系统图

Fig. 2 QPSK with tight filter coherent transmission system simulation diagram

## 3 结果与讨论

如图 3 所示,滤波条件分别为 0.8, 1.0, 1.2 倍波特率,考虑前后 2 个码元计算 EVM 的效果相比考虑前后 1 个码元 EVM 的效果在光滤波器带宽大

中的 QPSK 系统。连续波(CW)激光器的输出通过平行双臂 I/Q 调制器,由两列  $2^{19} - 1$  伪随机二进制序列分别以 20 Gbit/s 速率加载到 I/Q 调制器生成 QPSK 信号,窄带光滤波情况用光带宽为 0.8 到 1.2 倍传输链路波特率的二阶高斯带通光滤波器进行模拟。接收 OSNR 由自发辐射噪声(ASE)源控制在 6 dB~40 dB 之间。常规光滤波器滤波后一路光信号由光谱分析仪测量接收 OSNR,另一路相干接收,对接收电信号模数转换并采样后构建星座图。整个系统由 VPItransmissionMaker 软件进行仿真,星座图数据由 Matlab 软件进行线下处理。处理包括计算传统  $\text{EVM}_0$ ,理想星座点由数据辅助方式加入并计算 BER,计算考虑 ISI 效应下的  $\text{EVM}_n$ 。根据两种 EVM 计算结果和理论公式找到对应的  $\text{OSNR}_0$ ,  $\text{OSNR}_n$ ;  $\text{BER}_0$ ,  $\text{BER}_n$ 。在窄带光滤波情形下,所产生的 ISI 效应分离星座点,将每个星座团分裂为几团。分裂的星座团距离理想位置随光滤波器带宽降低而变大。此效应在一定程度上被 EDFA 放大器噪声所掩盖,并不能通过观察星座图直观发现,因此有必要将此效应从星座图中分离出来,通过研究发现,分离 ISI 效应计算的 EVM 相比未分离 ISI 效应计算的 EVM 能更准确估计接收 OSNR 大小;BER 估计方面,传统的 EVM 计算方法能够在一定程度上估计 BER 大小,分离 ISI 效应的 EVM 计算结果需要加入 ISI 带来的误差修正,估计 BER 的能力得到有效提高。因此,在利用 EVM 对光性能监测的方法当中,特别是在光传输存在多个起到光滤波效应的器件的链路当中,应当使用新的 EVM 计算方案进行有效的 OSNR 估计以及 BER 估计。

于 1 倍波特率情况下提升并不明显,小于 1 倍波特率情况在 OSNR 大于 20 dB 以后有一定的提升。因此,为减少计算的复杂量,提高计算效率,实际使用考虑 ISI 效应的 EVM 计算当中,仅考虑前后一

个码元就能达到很好的效果。

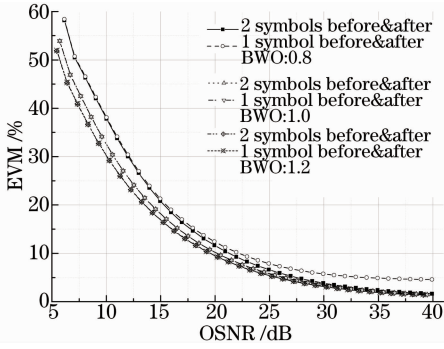


图 3 考虑 ISI 效应情况 EVM 随 OSNR 变化曲线。

BWO: 光滤波带宽

Fig. 3 EVM with OSNR curves consider ISI effect.

BWO: optical filter bandwidth

图 4 展示了不同 OSNR 值下的 EVM 大小。从图中可以发现,考虑 ISI 效应下的 EVM 算法在存在窄带宽滤波情况下整体低于传统 EVM 大小,与理论曲线更加吻合。在 OSNR 高于 25 dB 时,码型效应为主要损伤因素,传统 EVM 计算得到的 EVM 不会明显变化,这对根据 EVM 大小估计接收 OSNR 会产生不利影响。

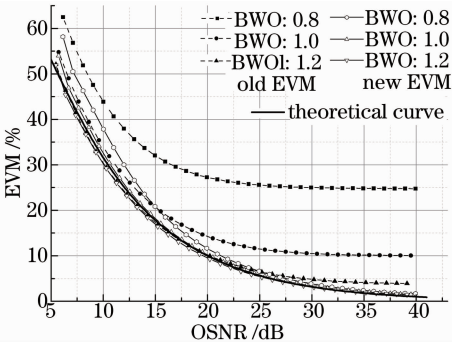


图 4 EVM 随 OSNR 变化曲线

Fig. 4 EVM with OSNR curve

图 5 为接收 OSNR 随 EVM 变化曲线。通过 (5) 式可由 OSNR 计算 EVM 的大小,因此通过 EVM 能够估计接收 OSNR 的大小。改变传输加入噪声,记录接收 OSNR 大小,计算两种 EVM 以及估计的 OSNR 大小,可用于检验 EVM 算法对接收 OSNR 的估计能力。当光滤波器带宽大于 1 倍波特率,考虑 ISI 效应的 EVM 算法能够很好估计接收 OSNR,理论估计与仿真测量吻合。而 BWO 在 0.8 倍波特率情况下,传统 EVM 在低于 30% 条件下与理论公式失配,无法进行可靠的接收 OSNR 估计,此时考虑 ISI 效应的 EVM 计算在大于 10% 情况下仍能保持一定的估计可靠性,整体估计与理论值相差 2 dB 左右。M-QAM 的星座图只有在 OSNR 大

于 12 的情况下才能恢复。同样,如果窄带宽滤波贡献变小,传统 EVM 估计的接收 OSNR 对高于 5% 情况下的 EVM 能进行可靠的 OSNR 估计。

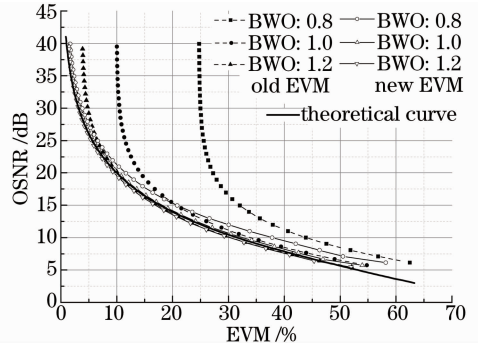


图 5 接收 OSNR 随 EVM 变化曲线

Fig. 5 Received OSNR curves with EVM

图 6 展示了 BER 随 EVM 变化曲线。从图中可以明显看到,不论光滤波器带宽为多少,传统 EVM 都比考虑 ISI 效应的 EVM 计算对 BER 的估计效果好。因为考虑 ISI 效应的 EVM 计算是将 ISI 效应从 EVM 计算当中分离出来,这对判断 BER 不利。但重新考虑 ISI 向量误差,加入由 (7) 式结果的 30% 修正后的曲线可以发现,新的 EVM 对 BER 的估计略优于传统 EVM 算法,因此更加可靠。此外,在光滤波带宽低于 1 倍波特率情况,传统 EVM 算法失效,与理论曲线不吻合,而加入修正的新 EVM 算法仍能保证较好的 BER 估计。

图 7 展示了码型效应向量误差随 OSNR 变化曲线。OSNR 大于 10 dB,码型效应误差趋于稳定,与光滤波带宽大小成反比。因此,在 OSNR 大于 10 dB 情况下,码型效应向量误差可以用来衡量光网络当中码型效应带来的信号畸变。并可以用于修正考虑 ISI 效应 EVM 对 BER 的估计效果。OSNR 等于 40 dB 时,不同光滤波带宽的接收星座图嵌入图 7 内,可以观察到噪声影响小的情况下,码型效应在星座图上的影响,并可以用于修正考虑 ISI 效应 EVM 对 BER 的估计效果。

## 4 结 论

提出了在窄带滤波损伤条件下的 QPSK 信号的 EVM 估计算法,该算法可有效去除 ISI 效应造成的星座图畸变因素。系统仿真结果表明,本文提出的新型 EVM 计算方法相比传统 EVM 计算,能更准确地估计接收端 OSNR,同时,加入 ISI 误差修正的 EVM 计算同样可以进行有效的 BER 估计。值得指出的是本论文提出的新型 EVM 计算方法进



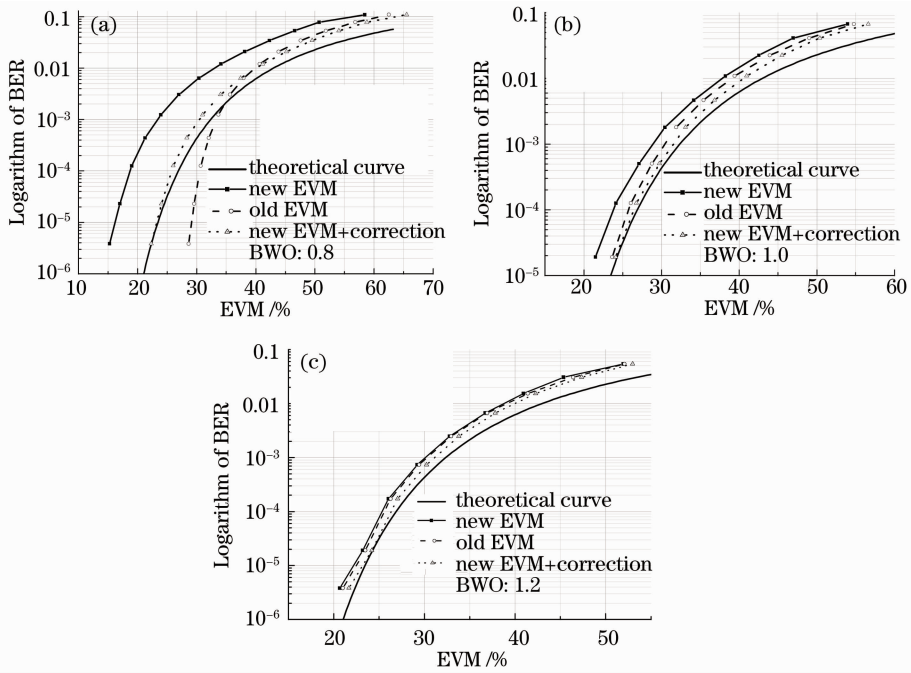


图 6 BER 随 EVM 变化曲线

Fig. 6 BER curve with EVM

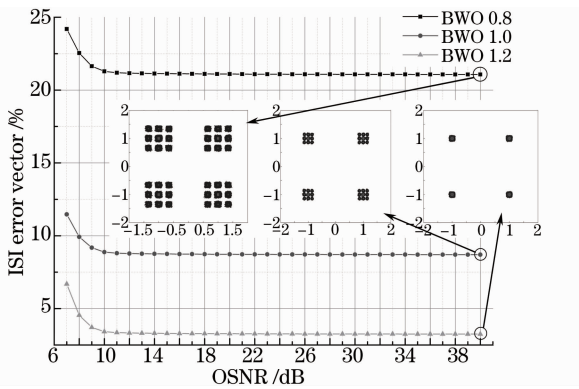


图 7 码型效应向量误差随 OSNR 变化曲线

Fig. 7 ISI error vector curve with OSNR

一步优化后还能适用于其他高阶调制格式在传输过程中的窄带滤波条件下的 OSNR 和 BER 估计。

### 参 考 文 献

1 Y Yang, L Cheng, Z Li, *et al.*. An optical differential 8-PSK modulator using cascaded QPSK modulators[C]. 35th European Conference on Optical Communication, ECOC'09, 2009. 1-2.

2 Y Yang, C Lu, A P T Lau, *et al.*. A robust and dither-free technique for controlling driver signal amplitude for stable and arbitrary optical phase modulation[J]. Optics Express, 2011, 19 (27): 26353-26358.

3 T Zami, Physical impairment aware planning of next generation WDM backbone networks [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2012.

4 Y Yang, L Cheng, Z Li, *et al.*. Strong optical filtering on direct detection NRZ differential 8-PSK (D8PSK) systems[C]. Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 2010 15th, 2010. 288-289.

5 A Ghazisaeidi, P Tran, P Brindel, *et al.*. Impact of tight optical filtering on the performance of 28 Gbaud Nyquist-WDM PDM-8QAM over 37.5 GHz grid[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013.

6 R Schmogrow, B Nebendahl, M Winter, *et al.*. Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2012, 24(1): 61-63.

7 W Freude, R Schmogrow, B Nebendahl, *et al.*. Quality metrics for optical signals: eye diagram, Q-factor, OSNR, EVM and BER[C]. 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2012. 1-4.

8 V R Arbab, P Saghari, Effects of fiber impairments on constellation diagrams of optical phase modulated signals[J]. Opt Eng, 2012, 51(4): 045008.

栏目编辑:殷建芳