

# 骨干光网络工程系统性能指标分析

## Analysis of System Performance Indexes in Backbone Optical Network Engineering

叶胤<sup>1</sup>,汪令全<sup>2</sup>(1. 广东省电信规划设计院有限公司,浙江 广州 510630;2. 中国电信集团有限公司,北京 100032)  
Ye Yin<sup>1</sup>,Wang Lingquan<sup>2</sup>(1. Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunication Co.,Ltd., Guangzhou 510630, China; 2. China Telecom(Group) Corporation Limited, Beijing 100032, China)

### 摘要:

现有光网络工程主要采用OSNR指标对系统性能进行衡量或评估,分析了OSNR指标主要存在的问题,通过研究非线性效应及其影响,指出开放海缆标准的GSNR指标目前难以适用于陆地骨干系统。最后建议骨干光网络工程设计及验收阶段增加光通道代价指标,并给出了实施建议。

### 关键词:

骨干光网络;光信噪比;非线性效应;验收测试  
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2022.11.012  
文章编号:1007-3043(2022)11-0065-05  
中图分类号:TN915  
文献标识码:A  
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

Existing optical network projects mainly use OSNR to measure or evaluate system performance. It analyzes the main problems of the OSNR, and points out that the GSNR of the open submarine cable standard is currently difficult to apply to terrestrial backbone systems by studying the nonlinear effect and its impact. Finally, it is recommended to add the OSNR penalty index in the backbone optical network engineering design and acceptance stage, and the implementation suggestions are given.

### Keywords:

Backbone optical network; OSNR; Nonlinear effect; Acceptance test

引用格式:叶胤,汪令全. 骨干光网络工程系统性能指标分析[J]. 邮电设计技术,2022(11):65-69.

## 0 引言

目前 100 Gbit/s 是骨干波分网络的主流速率,部分新建系统开始采用双载波 400 Gbit/s 速率,即单波速率提升到 200 Gbit/s。骨干波分网络频谱效率从 100 Gbit/s 系统的 2 bit/s/Hz,提升到双载波 400 Gbit/s 系统 2.67 bit/s/Hz(PM-QPSK)或 4 bit/s/Hz(PM-16QAM),未来网络的速率还将进一步提升,频谱效率也将继续增加。根据香农公式,正交偏振复用系统的频谱效率  $C/B=2\log_2(1+SNR)$ ,其中 SNR 是信噪比,可以看出随着

网络频谱效率的提升,系统所要求的信噪比也要相应提高。光纤信道中存在多种因素可产生噪声使得信号劣化,单纯提升信号功率并不一定能提升信噪比,且提高信号功率的同时系统非线性噪声可能成倍增加。现有光网络工程对系统性能进行衡量或评估时主要采用光信噪比(OSNR)指标,本文首先分析 OSNR 指标及存在的主要问题,并探讨借鉴开放海缆标准中广义信噪比(GSNR)指标的可能性。

## 1 骨干网 OSNR 指标及存在的问题

现有 100 Gbit/s 及以上速率的波分系统技术标准<sup>[1]</sup>对性能的要求是基于背靠背寿命终止(EOL)

收稿日期:2022-09-22

OSNR 值取裕量的方式:系统跨段小于或等于  $12 \times 22$  dB 的取 4.5 dB;系统跨段大于  $12 \times 22$  dB 且小于等于  $20 \times 22$  dB 的取 5.0 dB;系统跨段大于  $20 \times 22$  dB 且小于等于  $28 \times 22$  dB 的取 5.5 dB;系统跨段大于  $28 \times 22$  dB 的取 6.0 dB。标准还要求系统的光通道 OSNR 代价小于 2 dB。标准模型采用的是等效 22 dB 的均匀跨段,在超长距 100 Gbit/s WDM 标准<sup>[2]</sup>中:针对某个非均匀跨段,假设其跨段损耗为  $L$ ,其等效 22 dB 跨段数的计算方法如下:若  $L \leq 22$  dB,则其等效 22 dB 跨段数量为 1;若  $L > 22$  dB,则其等效 22 dB 跨段数量为  $1 + (L - 22) \times 0.2$ ;将该系统所有光放段的等效 22 dB 跨段数相加,得到该系统的等效 22 dB 跨段数,然后将  $N \times 22$  dB 均匀跨段系统的 OSNR 裕量指标,作为该非均匀跨的 OSNR 裕量参考指标。实际网络绝大多数是非均匀跨段系统,不同光放段损耗差异较大,难以直接参照均匀跨段系统入纤功率指标,在超长距标准中针对不同跨段损耗和光纤类型给出了入纤功率参考区间。

系统中每个掺铒光纤放大器产生的自发辐射 (ASE) 噪声会经后续的放大器积累,系统光信噪比会逐渐下降,对于经过掺铒光纤放大器级联的光传输系统,OSNR 可用式(1)计算。

$$\text{OSNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{ASE}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{\text{NF}_i \times h\nu\nu_i}{P_{\text{in},i}}} \quad (1)$$

式中:

- $P_{\text{in}}$ ——放大器输入单波光功率
- $\text{NF}_i$ ——放大器的噪声系数
- $N$ ——跨段数
- $h$ ——普朗克常数,取  $6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$
- $\nu$ ——光频率,取 1 550 nm 窗口频率
- $\nu_i$ ——参考带宽,取 12.5 GHz

当每个跨段衰耗是均匀的并由同样的放大器补偿,ASE 功率远低于信号光功率时,式(1)可以简化为式(2)。

$$\text{OSNR}(\text{dB}) = 58 + P_{\text{out}} - L - \text{NF} - 10 \lg(N) \quad (2)$$

式中:

- $P_{\text{out}}$ ——入纤单波光功率
- $L$ ——跨段衰耗

衡量通信系统性能的指标  $Q$  因子可视为误码率 (BER) 的定性指示,  $Q(\text{dB}) = 20 \lg[\sqrt{2} \text{erfc}^{-1}(2 \times \text{BER})]$ , 其中  $\text{erfc}$  是互补误差函数。对于 100 Gbit/s 及以上的光传输系统,  $Q$  值已难以直接通过仪表测试获得。从

式(2)可以看出,通过增加系统入纤光功率  $P_{\text{out}}$  可提高光信噪比数值,但对于实际光通信系统,如果信号光功率不断增大且超过一定数值后,进一步加大光功率将造成  $Q$  值性能的降低,可参考图 1 曲线示意。需要说明的是,不同系统的跨段距离及衰耗、光放性能及功率、码型及光收发器性能等参数不同,对应曲线均会有差异。

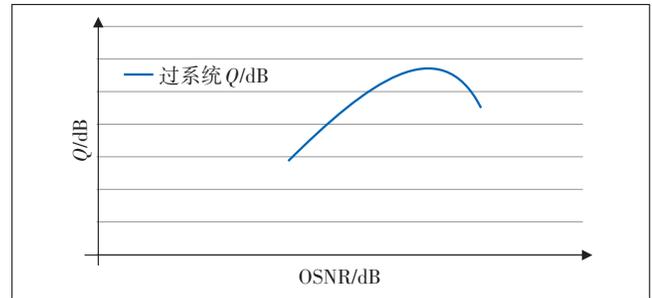


图 1 系统 OSNR 与  $Q$  值性能的关系示意

只考虑 ASE 噪声的 OSNR 指标对于系统性能的评价是全面的,实际骨干光传输线路的跨段距离和衰耗不仅各不相同,并且差异还很大,即使每个段落可以有光功率参考区间进行指引,也难以评估整个系统受到非线性的劣化程度。骨干光网络项目承建方为满足合同 OSNR 指标,可能通过增加光功率掩盖系统非线性等损伤,导致系统在运行一段时间后出现误码或瞬断的情况,这类问题在工程实践中已出现过。波分系统的技术标准中均有要求光通道 OSNR 代价小于 2 dB,但光通道代价指标在光网络工程实践中并未得到应用,项目建设阶段没有针对拟建系统的光通道代价提出指标数值,后续验收未要求测试,波分传输系统工程设计规范<sup>[3]</sup>及验收规范<sup>[4]</sup>对此也没有具体要求。

对此问题的探讨借鉴 ITU-T 开放海缆标准<sup>[7]</sup>的处理方式,G.977.1 为海底光缆系统的光电层开放解耦增加了广义信噪比 (GSNR) 指标。GSNR 指标除了考虑 ASE 噪声还要考虑非线性效应 (NLI) 噪声及声导波布里渊散射 (GAWBS) 等噪声带来的影响,相对式(1)广义信噪比指标更加接近系统光层的真实性能情况,其物理含义可由式(3)来表达。

$$\text{GSNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{ASE}} + P_{\text{NLI}} + P_{\text{GAWBS}}} \quad (3)$$

在热平衡的条件下,GAWBS 产生光与光纤材料横向振动声学支声子的相互作用,有研究<sup>[9]</sup>表明,  $\text{SNR}_{\text{GAWBS}}$  与系统长度和光纤结构相关,与入纤光功率

不相关。随着系统速率的提升,系统信噪比要求提高,GAWBS的影响在长距离海缆系统中受到重视。声导波布里渊散射噪声功率相对较小,且与传输距离线性相关,在对陆地传输系统性能的比较与分析中这部分噪声暂且可以忽略,下面将重点分析非线性的影响。

## 2 系统非线性效应及其影响

光纤中的非线性效应包括非弹性散射效应与折射率扰动效应两大类。光场经过非弹性散射将高能光子散射成低能的光子,同时产生能量为2光子能量差的另一个能量子,其中受激拉曼散射(SRS)参与的能量子为光学支声子,受激布里渊散射(SBS)参与的能量子为声学支声子。如果光功率超过阈值,散射光强将指数增长,一般光传输系统设计都会避免入纤功率接近阈值。根据光纤中拉曼增益频谱特性,高频段泵浦光功率会将部分能量转移到低频段信号,增益效率随着两者频差的增加而逐步增加,在10~15 THz范围将达到最大,例如C波段的拉曼放大系统泵浦光波长在1450 nm附近。因此在超宽谱宽的波分系统中SRS将不可被忽视,例如对于C+L的系统,信号谱宽已超过10 THz,C波段信号的能量可能会通过SRS迁移到L波段信号。

折射率扰动效应是由于光纤中光场强度的变化引起光纤折射率的变化,产生了包括自相位调制、交叉相位调制、四波混频效应、交叉极化调制等效应。考虑了非线性部分的光纤的折射率 $n$ 可以表达为式(4)。

$$n = n_0 + \frac{n_2}{A_{\text{eff}}} P \quad (4)$$

式中:

- $n_0$ ——线性折射率系数
- $n_2$ ——非线性折射率系数
- $A_{\text{eff}}$ ——光纤的有效面积
- $P$ ——入纤光功率

无色散补偿的相干系统 $\text{SNR}_{\text{NLI}}$ 的计算可参考高斯噪声非线性传播模型公式(GNRF)<sup>[10]</sup>,GNRF把非线性干扰项作为加性高斯白噪声(AWGN),功率叠加在自发辐射噪声上。 $G_{\text{NLI}}$ 是非线性噪声功率谱密度,对其进行积分得到非线性噪声功率 $P_{\text{NLI}}$ 。当信号谱宽与系统波道间隔接近,可等效为奈奎斯特波分复用系统时,假定跨段损耗是均匀的,且波道间隔和功率一致, $P_{\text{NLI}}$ 进行近似处理后如式(5)所示。

$$P_{\text{NLI}} \approx \frac{16}{27} \gamma^2 P_s^3 L_{\text{eff}}^2 \alpha \frac{a \sinh\left(\frac{\pi^2}{4\alpha} \beta_2 B_{\text{WDM}}^2\right)}{B_n^2 \cdot \pi \beta_2} \cdot N_s^{1+\varepsilon} \quad (5)$$

式中:

$\varepsilon$ ——段落间相干指数,如果是0,则认为各段落产生的非线性效应之间不相干,其计算方法近似为

$$\varepsilon \approx \frac{3}{10} \ln \left[ 1 + \frac{3}{L_s \cdot \alpha \cdot a \sinh\left(\frac{\pi^2}{4\alpha} \beta_2 B_{\text{WDM}}^2\right)} \right]$$

$L_s$ ——跨段长度

$\alpha$ ——光纤衰减系数

$L_{\text{eff}}$ ——光纤有效长度,  $L_{\text{eff}} = \frac{1 - \exp(-2\alpha L_s)}{2\alpha}$

$N_s$ ——跨段数量

$\beta_2$ ——光纤二阶色散系数

$\gamma$ ——光纤的非线性系数, $\gamma$ 与式(4)系数的关系

$$\text{为 } \gamma = \frac{2\pi\nu}{C} \frac{n_2}{A_{\text{eff}}}$$

$B_{\text{WDM}}$ ——信号光总带宽

$P_s$ ——信号光在 $B_n$ (取12.5GHz带宽)的等效功率

对于满配的WDM系统, $\varepsilon$ 的典型数值会在0.03~0.08。将式(5)换取工程常用的参数形式,并进一步简化,可表达为式(6)。

$$P_{\text{NLI}} \propto P_s^3 \frac{\alpha_{\text{dB}} \cdot \gamma^2 L_{\text{eff}}^2}{B_n^2 \cdot D} \cdot N_s^{1+\varepsilon} \quad (6)$$

式中:

$\alpha_{\text{dB}}$ ——衰耗系数,  $\alpha_{\text{dB}} = 4.343\alpha$

$D$ ——色散系数,  $D = -\frac{2\pi C \beta_2}{\lambda^2}$

从式(6)可以看出,非线性效应随着跨段数量的增加而增加;对于C波段光纤非线性系数 $\gamma$ ,G.654E的 $\gamma$ 值(约0.7/km/W)相对于普通G.652的 $\gamma$ 值(约1.3/km/W)更小,因此非线性性能也更好; $P_{\text{NLI}}$ 最重要的关系是与入纤信号光功率 $P_s$ 的立方成正比,因此 $1/\text{SNR}_{\text{NLI}} = P_{\text{NLI}}/P_s$ 与入纤光功率 $P_s$ 的平方成正比,所以入纤光功率达到一定数值后,非线性效应对整体系统性能的影响会急剧增大。

数字信号处理(DSP)技术已成熟应用于线性效应的补偿,但非线性效应补偿技术相对更为复杂。为进行非线性补偿首先要建立非线性传播理论模型,以理论模型为基础,对实际传输系统进行精确建模,再对系统非线性效应进行一定的补偿。光波在单模光纤

中受到非线性影响的传播规律可通过非线性薛定谔方程(NLSE)表达,但此方程没有显式的输入输出关系,可通过分布式傅里叶算法对NLSE进行数值计算,并通过一定的假设降低计算复杂度,非线性模型有前述的高斯噪声模型,还有增强高斯噪声(EGN)模型、码间串扰(ISI)模型等。非线性补偿方法是近年光通信研究的热点<sup>[11]</sup>,包括数字反向传输(DBT)、VoLTErra级数(VNLE)、扰动补偿、载波间串扰消除(INIC)等,部分研究还将以上补偿方法与深度神经网络等机器学习技术结合,希望综合提高准确度及运算效率。

非线性补偿技术的商业部署需要平衡技术成本的增加与补偿的提升效果,该技术在现有100G的网络系统中应用程度还不高。近年星座整形编码(PCS)技术成为研究的热点,其通过改变星座出现概率或者位置的方式降低单位信息的功率,提升系统非线性效应容限<sup>[12]</sup>。当400G及更高速的系统采用高阶调制后对信噪比要求更高,预计提升非线性效应容限及进行非线性补偿的技术在高速骨干光网络会逐步被广泛采用。

### 3 对骨干光网络工程的建议

骨干光网络工程验收时采用光谱分析仪来测量OSNR,首先在信号带宽内测量待测信号与噪声总功率 $P_1$ ,然后关闭待测波道,测量信号带宽的噪声功率 $P_2$ ,再测得0.1 nm带宽内噪声功率 $P_3$ , $OSNR=(P_1-P_2)/P_3$ ;也可以只测一次噪声功率,然后基于噪声是平坦的这一假设直接按比例换求得噪声和信号的功率。从第2章可知,非线性效应可以进行一定程度的补偿,今后高速系统预计会采用非线性补偿技术,如果按照式(3)将非线性效应全部视为噪声,对具备非线性补偿技术设备系统的性能评估会产生偏差。参照G.977.1标准虽然可以得出光层的信噪比性能,但是陆地骨干传输系统与开放海缆系统模式不同,其光电层仍然是采用同一厂商的设备进行建设,这样的好处是可在光/电层之间做协同的优化和匹配,充分发挥光电2个层面的能力。另外,陆缆系统与海缆系统的线路功率均衡方式存在不同,陆地ROADM系统会存在较多的波长选择开关(WSS)进行波道穿通及上下,因此陆地系统还要考虑WSS穿通代价。即使通过GSNR指标评估出线路光层的性能,由于不同系统不同厂商设备非线性补偿能力存在不同,并且电层CD及PMD补偿代价、FEC纠错能力等都有所不同,难以独立评估出

系统整体的性能。

由于OSNR和GSNR对于衡量系统真实性能均存在局限性,建议骨干光网络工程在设计及设备招投标阶段增加系统光通道OSNR代价评估指标,并在工程竣工验收阶段进行测试。系统光通道OSNR代价是业务波道在同样误码性能时,过系统OSNR值与背靠背OSNR值之差,OSNR<sub>代价</sub>的物理含义如图2所示。图2中假设系统设备的Q值极限为 $Q_L$ ,示例中可以看出如果系统工作在A点,其光通道OSNR代价为 $S_A-S_L$ ,约为1.5 dB,如果系统工作在B点其代价 $S_B-S_L$ 约为2.5 dB,B点虽然比A点OSNR大了约1.5 dB,但增量的大部分可视为非线性噪声贡献的。对于网络建设或运营方来说,系统OSNR-OSNR<sub>代价</sub>才是更能体现系统真实性能的参数。

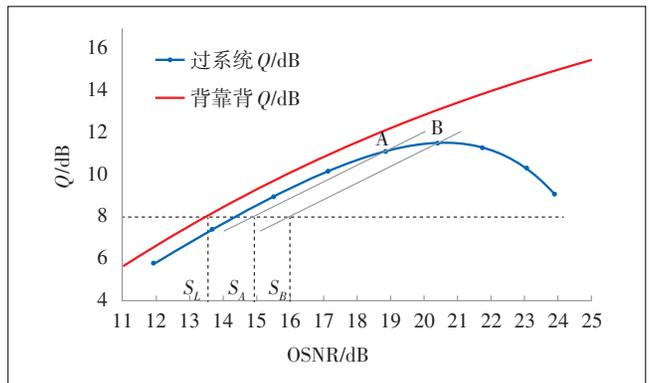


图2 系统OSNR代价含义示意

背靠背OSNR容限可以在厂验阶段测试,考虑到厂验阶段一般仅抽测OTU背靠背OSNR容限,如果难以保证厂验已测OTU与工程局站拟测OTU物料的一致性,则建议在工程验收中进行背靠背OSNR容限的测试,测试配置如图3所示,图3中OTU均按单向进行测试,光通道OSNR代价在工程中的测试配置如图4所示,测得的过系统OSNR容限与相同OTU测得的背靠背OSNR容限之差即为该波道的通道OSNR代价,具体测试方法和步骤可以参照测试标准<sup>[5]</sup>。相对于测试标准里的环回测试方法,OSNR代价指标在工程测试时需要在双端都配置业务分析仪,ASE噪声源或假波可以通过光放大器加WSS实现,因此测试仪表和现有工程验收所需基本一致。

对于骨干光网络工程光通道OSNR代价验收测试的建议为:第一,系统建设初期波道数量一般不多,测试时应增加假波来弥补剩余频谱的光功率缺失,模拟满配时的光功率环境;第二,每次通道代价测试至少

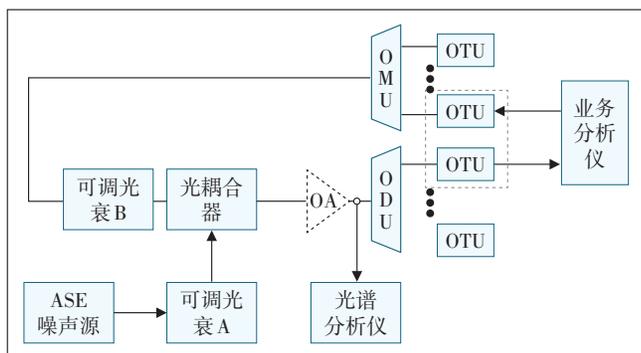


图3 背靠背 OSNR 容限测试配置

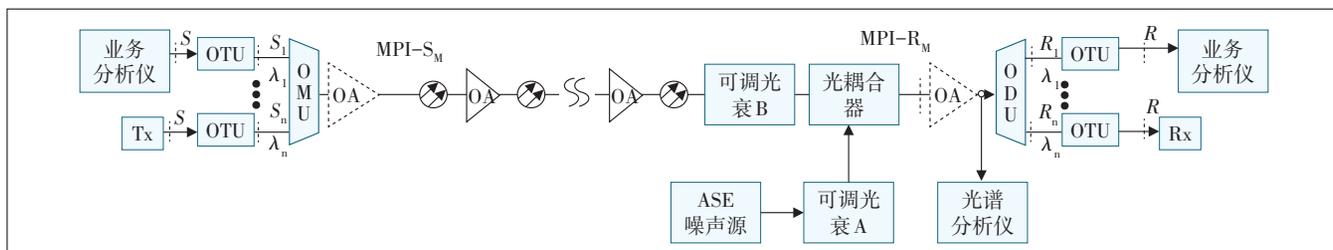


图4 光通道 OSNR 代价工程测试配置

本文建议骨干光网络工程在设计及设备招投标阶段增加系统光通道 OSNR 代价评估指标,并在工程竣工验收阶段进行测试。目前单通路 100 Gbit/s、200 Gbit/s 已成为干线光网络的主流速率,基于单通路 400 Gbit/s 的 WDM 系统将逐步在区域干线、城域、数据中心互连等场景商用,以 800 Gbit/s 为典型速率的超高速系统已开始受到业界关注。今后骨干光网络的速率将进一步提升,对信噪比数值及精度的要求也还会提高,希望有更合适的技术手段来评估系统性能,并保障和提升骨干光网络工程质量。

#### 参考文献:

[1] 中华人民共和国工业和信息化部. N×400 Gbit/s 光波分复用(WDM)系统技术要求:YD/T 3783-2020[S].北京:人民邮电出版社,2020.

[2] 中华人民共和国工业和信息化部. N×100Gbit/s 超长距离光波分复用(WDM)系统技术要求:YD/T 3070-2016[S].北京:人民邮电出版社,2016.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 波分复用(WDM)光纤传输系统工程设计规范:GB/T 51152-2015[S].北京:中国计划出版社,2016.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 波分复用(WDM)光纤传输系统工程验收规范:GB/T 51126-2015[S].北京:中国计划出版社,2016.

[5] 中华人民共和国工业和信息化部. N×400 Gbit/s 光波分复用(WDM)系统测试方法:YD/T 3786-2020[S].北京:人民邮电出版社,2020.

选取低中高3个频段的波道,减少由于系统不均衡带来的误差;第三,在ROADM网状网络环境下,由于对所有可能的光通道进行OSNR代价测试数量巨大,可以挑选重点通道进行测试,如工程设计中OSNR指标值较小的、距离较长的或跨段较多的若干光通道。

#### 4 结束语

OSNR 指标无法评估传输系统受到非线性影响的程度,开放海缆标准的 GSNR 指标虽然能解决这一问题,但不适合评估光电未解耦的陆地骨干传输系统。

[6] 高军诗. 100 Gbit/s/超 100 Gbit/s 波分复用(WDM)传输系统光链路性能[J]. 电信科学,2019,35(S1):113-118.

[7] ITU. Transverse compatible dense wavelength division multiplexing applications for repeatered optical fibre submarine cable systems: ITU-T G.977.1[S]. Geneva:ITU,2021.

[8] HARTLING E R, PILIPETSKII A, EVANS D, et al. Design, acceptance and capacity of subsea open cables[J]. Journal of Lightwave Technology,2021,39(3):742-756.

[9] BLOSHTYANKSY M A, CAI J X, DAVIDSON C R. Impact of spontaneous guided acoustic-wave brillouin scattering on long-haul transmission[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition(OFC). San Diego,CA,USA:IEEE,2018:1-3.

[10] POGGIOLINI P, BOSCO G, CARENA A, et al. The GN-model of fiber non-linear propagation and its applications[J]. Journal of Lightwave Technology,2014,32(4):694-721.

[11] AMARI A, DOBRE O A, VENKATESAN R, et al. A survey on fiber nonlinearity compensation for 400 Gbit/s and beyond optical communication systems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017,19(4):3097-3113.

#### 作者简介:

叶胤,高级工程师,长期从事光网络的规划和设计工作;汪令全,高级工程师,主要负责中国电信骨干传输网的规划建设及项目管理工作。

