



XXXX

400G 骨干网光放段设站方案的快速评估及误判规避方法

王晓媛, 袁伟, 夏芸, 徐阿强, 吴宝瑜

(华信咨询设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310025)

摘 要: 为解决 400G 骨干网设计阶段精确光信噪比 (OSNR) 仿真参数多、计算复杂, 不便于设站方案快速评估的问题, 从标准 OSNR 估算模型 (58 模型) 出发, 推导了光放段长度与等效跨段数 $\sum E_{eq}$ 的显式关系, 并提出精准计算与工程简化两套评估模型。简化模型将标准段落归一化处理, 使设计人员仅凭段落长度即可手算完成初筛。以五条现网干线数据验证, 精准模型与 OSNR 精确计算结论一致; 简化模型在全部样本中均呈现系统性过度保守, 其 $\sum E_{eq}$ 比精准值虚高约 8~21 个等效跨段, 导致多条本可无中继开通的线路被误判为不可行。基于误差标定结果, 建立了“绿区直接放行、黄区启动复核、红区直接否决”的三级判据 (G.652.D 简化 $\sum E_{eq}$: ≤ 22 放行、22~30 复核、 >30 否决; G.654.E: ≤ 26 放行、26~30 复核、 >30 否决), 其中黄红分界 30 系基于现网样本的工程归纳值。设计人员仅需计算简化 $\sum E_{eq}$ 即可快速定位方案风险, 避免误判造成的投资浪费。该方法参数少、计算简便, 适用于 400G PM-QPSK 系统 G.652.D 和 G.654.E 光纤干线可研及初步设计阶段的方案快速比选。

关键词: 400G 骨干网; 光放段设站方案; 快速评估; 等效跨段数; 误判规避; 三级判据

中图分类号: TN913.7

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.

Fast Assessment and Misjudgment Avoidance Method for Optical Amplifier Site Placement Schemes in 400G Backbone Networks

WANG Xiaoyuan, YUAN Wei, XIA Yun, XU Aqiang, WU Baoyu

Huaxin Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310025, China

Abstract: To address the issue that precise OSNR simulation in the design phase of 400G backbone networks involves numerous parameters and complex calculations, which hinders rapid evaluation of site placement schemes, this paper derives the explicit relationship between optical amplifier span length and the cumulative equivalent span count $\sum E_{eq}$ based on the standard OSNR estimation model (58-model), and proposes two evaluation models: a precise calculation model and an engineering simplified model. The simplified model normalizes standard spans, enabling designers to perform preliminary screening through manual calculation using only span lengths. Validation with field

收稿日期: 2026-08-21; 修回日期: 2026-09-04

通信作者: 王晓媛, E-mail: wxy.hx@chinaccs.cn

基金项目: 无



data from five existing trunk lines shows that the precise model is fully consistent with exact OSNR calculations; the simplified model exhibits systematic over-conservatism across all samples, with $\sum E_{eq}$ overestimated by approximately 8 – 21 equivalent spans compared to the precise model, causing multiple lines that could actually operate without regeneration to be misjudged as infeasible. Based on the error calibration results, a three-level criterion is established: "green zone for direct approval, yellow zone for initiating precise verification, and red zone for direct rejection" (for G.652.D: simplified $\sum E_{eq} \leq 22$ for approval, 22 – 30 for verification, >30 for rejection; for G.654.E: ≤ 26 for approval, 26 – 30 for verification, >30 for rejection), with the yellow-red boundary value of 30 empirically derived from field samples. Designers can quickly identify scheme risks by calculating only the simplified $\sum E_{eq}$, avoiding investment waste caused by misjudgment. The method requires few parameters and is easy to calculate, making it suitable for rapid scheme comparison of G.652.D/G.654.E fiber-based 400G PM-QPSK backbone projects in the feasibility study and preliminary design stages.

Key words: 400G backbone networks, optical amplifier site placement schemes, rapid assessment, equivalent span count, misjudgment avoidance, three-level criterion

0 引言

400G 骨干网设计中, 工程人员需在光纤选型的同时确定光放段设站方案。目前工程上主要依赖精确 OSNR 仿真——将各光放段长度换算为衰耗后, 逐段代入放大器噪声系数、入纤功率等参数按 58 模型累加计算, 参数多、计算复杂, 不便于方案快速迭代。YD/T 6437-2025^[1]定义了以 22 dB 标准跨段损耗为基准的传输模型, 并给出了 G.652.D 和 G.654.E 光纤在该模型下可支持的段落数参考值 (22 段和 26 段), 但这些参考值基于均匀 22 dB 标准跨段的理想假设, 在非均匀段落组合下缺乏现网验证。

近年来, 业界围绕 400G 高速光传输系统已开展了大量研究。在技术发展方面, 文献^[2-4]分别从全光网架构、G.654.E 现网试验及传输性能优化等角度开展了研究。在码型调制方面, 文献^[5-6]分别从 400G/800G 系统 OSNR 建模及 PM-16QAM 双载波传输仿真等角度开展了研究。在新型光纤应用与现网验证方面, 文献^[7]报道了基于 G.654.E 光纤的 3820 km 400G DWDM 现网试验结果。在 OSNR 评估与系统性能方面, 文献^[8]研究了多跨段 OSNR 与 GSNR 的快速预测方法, 文献^[9-10]分别探讨了 400G OTN 技术在干线网中

的应用实践和 C+L 波段 400G 传输系统的实验验证。上述研究均聚焦于系统传输性能和光纤特性, 但未解决设计阶段的快速评估问题——设计人员仍缺乏参数少、计算简便的筛查工具。

针对上述问题, 本文从 58 模型出发, 推导了等效跨段数 $\sum E_{eq}$ 与光放段长度 L 的显式关系, 提出了精准计算和工程简化两套评估模型; 基于现网干线数据对简化模型的偏差进行系统标定, 发现其存在单向过度保守特征; 据此建立了三级判据, 使设计人员仅需计算简化 $\sum E_{eq}$ 即可快速定位方案风险等级。本文给出的阈值和判据基于 400G PM-QPSK 系统参数标定, 主要适用于 G.652.D 和 G.654.E 光纤类型。

1 光放段设站方案的 OSNR 评估模型

1.1 OSNR 累积模型

工程中常用标准 58 模型进行端到端 OSNR 链路仿真:

$$OSNR_{total} = 58 - 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N N_i \right) \quad (1)$$

式中: N 为光放段总数, N_i 为各段落噪声因子。该式表明, 端到端 OSNR 由各段落噪声因子 N_i 的线性累加决定, 其中第 i 段线性噪声因子 N_i 定义为:

$$N_i = 10^{\frac{A_i + NF - P_{in}}{10}} \quad (2)$$

式中： A_i 为第 i 段光放段衰减 (dB)， NF 为光放大器噪声系数 (NF, Noise Figure) (dB)， P_{in} 为单波入纤功率 (dBm)。式 (2) 的物理含义是将光放段衰减 A_i 和放大器噪声 NF 从对数域转换到线性域，以表征各段噪声贡献的相对大小。对于 400G PM-QPSK 系统，400G QPSK 是干线长距传输的主要码型^[11]，其 P_{in} 和 NF 按国内主流运营商设备技术规范取值^[12]，为固定值。各项参数的具体取值见 3.1 节。

400G 系统中， A_i 由光放段设计衰减 $A_{span,i}$ 与设备固定插损组成。设备插损 (含 SRS 补偿、可调光衰减器插损及合分波插损) 在确定设备厂商和光缆类型后为固定值，记为 A_{fix} ，则：

$$A_i = A_{span,i} + A_{fix} \quad (3)$$

A_{fix} 在 OSNR 计算中为常数，后续等效跨段数推导中该项在比值中抵消，不影响最终结果。 A_{fix} 中各类插损取值可查阅国内主流运营商设备技术规范^[12]。

1.2 标准光放段与标准段落长度

光放段设计衰减 A_{span} 由光缆线路衰减、衰减余量和连接器插损三部分构成。其中，衰减余量按 GB/T 51152-2015^[13]： $L \leq 75$ km 取 3 dB；当 $75 < L < 125$ km 按 0.04 dB/km 计取； $L \geq 125$ km 取 5 dB。叠加连接器引入插损典型值 2 dB 后， A_{span} 计算公式为：

$$A_{span,i} = f(L_i) = \begin{cases} \alpha L + 5 & L \leq 75 \\ \alpha L + 0.04L + 2 & 75 < L < 125 \\ \alpha L + 7 & L \geq 125 \end{cases} \quad (4)$$

式中 α 为光缆线路衰减系数， L 为光放段长度 (km)。依据 YD/T 6437-2025 标准^[1]，400G 系统标准光放段衰减值为 22 dB。凡 $A_{span} \leq 22$ dB，称为标准段落； $A_{span} > 22$ dB，称为非标准段落。

将上述定义与式 (4) 联立，可反推出标准段落对应的长度上限。代入两类光纤的典型衰耗

系数^[14] (G.652.D 为 0.23 dB/km，G.654.E 为 0.196 dB/km)，得到 G.652.D 标准段落长度约为 74 km，G.654.E 约为 87 km——即光放段长度不超过上述值时，该段落属于标准段落。两类光纤标准段落长度的差异可直接由其衰耗系数的倒数关系解释：衰耗系数越小 (G.654.E)，在相同衰耗预算下允许的段落长度越长^[15-16]。

1.3 等效跨段数与两套评估模型

定义标准跨段的噪声因子为 N_{std} 。对于任意第 i 段，其等效跨段数 $E_{eq,i}$ 定义为该段噪声因子 N_i 与标准跨段噪声因子 N_{std} 的比值：

$$E_{eq,i} = \frac{N_i}{N_{std}} \quad (5)$$

其物理含义是：一个非标准段落的 OSNR 劣化相当于多少个标准跨段。将式 (5) 代入式 (1) 可得：

$$OSNR_{total} = 58 - 10\lg(N_{std}) - 10\lg\left(\sum_{i=1}^N E_{eq,i}\right) = C - 10\lg\left(\sum_{i=1}^N E_{eq,i}\right) \quad (6)$$

由于 N_{std} 为对应于标准跨段 ($A_{span}=22$ dB) 的噪声因子，在确定系统制式和光缆类型后为常数，其中 $C = 58 - 10\lg(N_{std})$ ， $OSNR_{total}$ 与 $\sum E_{eq}$ 呈单调递减关系——累计等效跨段数越大，OSNR 越低。

由式 (2) 和式 (5)：

$$E_{eq,i} = \frac{10^{(A_i + NF + P_{in})/10}}{10^{(A_{std} + NF + P_{in})/10}} = 10^{(A_i - A_{std})/10} = 10^{(A_{span,i} - 22)/10} \quad (7)$$

由式 (4) 和式 (7) 联立，严格模型下 E_{eq} 与段落长度 L 的显式关系为：

$$E_{eq,i} = 10^{(f(L_i) - 22)/10} \quad (8)$$

其中 $f(L_i)$ 由式 (4) 分段定义。该式给出了任意段落长度 L_i 到等效跨段数 $E_{eq,i}$ 的严格映射——这是**精准模型**的核心公式。该模型的核心物理含义是：每个光放段的噪声贡献以 22 dB 标准衰耗为



基准，通过指数关系折算为等效跨段数，累加后反映整条线路的相对噪声水平。

在此基础上，将式（7）在 $A_{span}=22$ dB 处做一阶泰勒展开，得到线性近似公式：

$$E_{eq,i} \approx 1 + 0.23 \times (A_{span,i} - 22) \quad (9)$$

注：严格泰勒系数为 $\ln 10/10 \approx 0.23026$ ，保留两位小数为 0.23。

工程上进一步约定：标准段落（ $A_{span} \leq 22$ dB）统一按 $E_{eq}=1$ 计取，非标准段落按式（9）线性近似计算。这一归一化约定与泰勒近似结合，称为**工程简化模型**。需要指出的是，归一化处理使标准段落的等效跨段数从精准值（小于 1）变为 1，而式（9）的线性近似在高损耗段落（ A_{span} 显著偏离 22 dB 时）忽略了二阶及以上高阶项——这两类误差均为单段正偏差，逐段累加后导致整条线路的简化 $\sum E_{eq}$ 始终大于精准 $\sum E_{eq}$ 。这是简化模型偏严特性的理论根源，其偏差的量级和分布特征将在第 3 章通过现网数据定量标定。

由式（4）和式（9）联立，可得**简化模型**下两种光纤 E_{eq} 与段落长度 L 的分段表达式如下。

G.652.D（按典型值 $\alpha=0.23$ dB/km）：

$$E_{eq} = \begin{cases} 1, & L \leq 75 \\ 0.0621L - 3.6, & 75 < L < 125 \\ 0.0529L - 2.45, & L \geq 125 \end{cases} \quad (10)$$

注：G.652.D 标准段落长度为 74 km（见 1.2 节），此处以 75 km 为分段边界，与 GB/T 51152-2015 中工程余量计取规则的边界一致。74~75 km 区间内 A_{span} 的变化量仅为 0.23 dB，以 75 km 为边界对最终判断结论的影响可忽略。

G.654.E（按典型值 $\alpha=0.196$ dB/km）：

$$E_{eq} = \begin{cases} 1, & L \leq 87 \\ 0.0543L - 3.6, & 87 < L < 125 \\ 0.0451L - 2.45, & L \geq 125 \end{cases} \quad (11)$$

两套模型的关系如下：

精准模型： $E_{eq,i} = 10^{(f(L_i)-22)/10}$ ，累加得到 $\sum E_{eq}$ ——精度高，需电脑辅助，适用于方案最终

确认。

简化模型：按式（10）、式（11）线性折算——可手算，适用于方案初筛。

2 阈值体系与判断准则

2.1 精准模型的阈值体系

由 1.3 节可知，OSNR 与 $\sum E_{eq}$ 呈单调递减关系—— $\sum E_{eq}$ 越大，OSNR 越低。因此，OSNR 容限判断可等价转换为 $\sum E_{eq}$ 与阈值的比较。

由式（6）反推，当 $OSNR_{total} = OSNR_{容限}$ 时，对应的累计等效跨段数即为阈值：

$$\sum E_{eq, 阈值} = 10^{(C - OSNR_{阈值})/10} \quad (12)$$

其中 $C = 58 - 10 \lg(N_{std})$ 为常数， N_{std} 为标准跨段（ $A_{span}=22$ dB）的噪声因子，由设备技术规范中的典型参数按式（2）计算得到^[12]。代入典型参数值，G.652.D 的 N_{std} 取 $10^{2.35}$ ，G.654.E 取 $10^{2.25}$ 。

根据国内主流运营商 400G 设备技术规范^[12]，400G PM-QPSK 系统主光通道参考点（MPI-RM, Main Optical Path Reference Point）最小 OSNR 容限随等效跨段数分档取值： $\sum E_{eq} \leq 12$ 时为 21.5 dB， $12 < \sum E_{eq} \leq 20$ 时为 22.0 dB， $20 < \sum E_{eq} \leq 28$ 时为 22.5 dB， $\sum E_{eq} > 28$ 时为 23.0 dB。将各档 OSNR 容限代入式（12）得到不同光纤类型在各容限档位下对应的 $\sum E_{eq}$ 阈值，如表 1 所示。

表 1 各 OSNR 容限档位对应的精准模型 $\sum E_{eq}$ 阈值
Table 1 Precise model $\sum E_{eq}$ thresholds corresponding to each OSNR tolerance range

分类	OSNR 容限 (dB)	$\sum E_{eq}$ 阈值 (G.652.D)	$\sum E_{eq}$ 阈值 (G.654.E)
$\sum E_{eq} \leq 12$	21.5	19.95	25.12
$12 < \sum E_{eq} \leq 20$	22	17.78	22.39
$20 < \sum E_{eq} \leq 28$	22.5	15.85	19.95
$\sum E_{eq} > 28$	23	14.13	17.78

使用精准模型时，将逐段累加得到的 $\sum E_{eq}$ 与表 1 中对应光纤类型、对应分档的阈值比较： $\sum E_{eq} \leq$ 阈值，判为可行；反之为不可行。

2.2 简化模型的阈值

由 1.3 节的归一化约定可知，在简化模型中标准段落按 1 计取，因此整条线路的简化 $\sum E_{eq}$ 等于各段落计数值的累加。YD/T 6437-2025 标准^[1]定义了以 22 dB 标准跨段损耗为基准的传输模型，并给出了 G.652.D 和 G.654.E 光纤在均匀 22 dB 标准跨段假设下可支持的段落数参考值，分别为 22 段和 26 段。简化模型本质上是对同一标准传输模型的线性近似表达，因此上述参考值可直接作为简化 $\sum E_{eq}$ 的判断阈值：

G.652.D: 简化 $\sum E_{eq} \leq 22$ 判为可行， >22 判为不可行

G.654.E: 简化 $\sum E_{eq} \leq 26$ 判为可行， >26 判为不可行

2.3 阈值体系与三区判据框架

精准阈值的计算方式是逐段累加 $10^{(f(L_i)-22)/10}$ ，物理含义为噪声等效值的精确累加，阈值由 OSNR 容限反推得到。简化阈值则采用标准段落取 1、非标准段落线性折算的方式，物理含义为归一化后的计数值，阈值直接由 YD/T 6437-2025 标准^[1]建议值引用。两套阈值各对应其模型，不宜混用。

对于任意一条线路，简化模型与精准模型各产生一个判断结果，其组合关系可归纳为三种情形：

情形一（绿区）：简化模型判为可行，且精准模型亦判为可行，两套模型判断一致。

情形二（黄区）：简化模型判为不可行，而精准模型判为可行，两套模型判断不一致。

情形三（红区）：简化模型判为不可行，且精准模型亦判为不可行，两套模型判断一致。

三区的划分明确了简化模型与精准模型在判断结论上的三种组合关系。各区域的具体边界阈值通过第 3 章现网数据标定确定。

3 现网验证与三区边界标定

本章采用国内某电信运营商五条现网干线的光放段长度数据作为验证样本，涵盖 G.654.E 和 G.652.D 两种光纤类型。

验证分为三步：（1）验证精准模型与 OSNR 精确计算的一致性，确立精准模型作为参考基准；（2）标定简化模型相对于精准模型的偏差规律；（3）在偏差标定揭示的规律基础上，通过估算与数据标定相结合，确定三区判据的边界阈值。

3.1 基础参数与计算条件

本节所有参数均来自国内主流运营商设备技术规范^[12]及光纤光缆技术规范^[14]。

（1）设备参数

光放大器噪声系数 NF 取 4.5 dB^[12]，单波入纤功率 P_{in} 按光放段设计衰耗 A_{span} 分档取值^[12]： $A_{span} \leq 25$ dB 时，G.652.D 取 6.5 dBm、G.654.E 取 7.5 dBm； $25 \text{ dB} < A_{span} \leq 32$ dB 时，G.652.D 取 7.5 dBm、G.654.E 取 9 dBm； $A_{span} > 32$ dB 时，两种光纤均取 10 dBm。SRS 功率转移量按光纤类型取值^[12]：G.652.D 为 1.7 dB，G.654.E 为 1.4 dB。

（2）光纤参数

G.652.D 光纤的衰耗系数取 0.23 dB/km，G.654.E 光纤取 0.196 dB/km^[14]。

（3）OSNR 容限分档

如 2.1 节所述，400G PM-QPSK 系统 MPI-RM 点最小 OSNR 容限按 $\sum E_{eq}$ 分档取值^[12]： $\sum E_{eq} \leq 12$ 时为 21.5 dB， $12 < \sum E_{eq} \leq 20$ 时为 22.0 dB， $20 < \sum E_{eq} \leq 28$ 时为 22.5 dB， $\sum E_{eq} > 28$ 时为 23.0 dB。该分档对应的精准 $\sum E_{eq}$ 阈值见表 1。

（4）计算工具

各线段落长度源自现网工程设计文件，按式（8）和式（10）~（11）逐段累加计算。

3.2 精准模型一致性验证

按 1.2 节式（4）的分段规则和两类光纤的典



型衰耗系数，将各线段落长度代入式（8），逐段计算精准 E_{eq} 并累加，得到各线的精准 ΣE_{eq} 。同时按58模型逐段累加计算OSNR。将精准模型判决结果与OSNR判决结果进行对比（如表2所示），验证精准模型作为参考基准的可靠性。

五条干线中，沪穗处于边界状态， ΣE_{eq} 与阈值差值仅0.09。按边界处理原则（差值 <0.1 时以OSNR为准），其OSNR为23.71 dB满足容限，判为可行，后续标注“边界”以提示风险。其余四条线精准模型判决与OSNR计算判决完全一致。总体而言，精准模型与OSNR精确计算具有良好的一致性，可作为后续标定的参考基准。

3.3 简化模型偏差标定

按第1.3节式（10）或（11）逐段折算并累加，得到各线的简化 ΣE_{eq} 。将五条干线的简化模型计算结果与精准模型计算结果进行对比，如表3所示。

标定结果表明：

（1）简化模型较精准模型均呈正偏差，偏差幅度8.01~21.42个等效跨段，验证了简化模型单向偏严的规律。

（2）偏差幅度与段落数及段落长度分布相关——沪穗贵（45段）偏差21.42最大，京九（35段）偏差14.55次之，沪穗（27段）偏差10.18。段落数越多，归一化处理累积的误差越大。此外，段落长度越短（远低于标准段落长度），精准模型贡献越小，归一化带来的虚高越显著。

（3）京汉线是典型的“误判”案例——简化模型判为不可行，但精准模型判为可行。若设计人员仅依赖简化模型，该方案将被误判为不可行，造成投资浪费。

上述标定表明简化模型存在误判风险，需进一步标定三区的具体边界阈值。

3.4 三区边界标定

在第2章绿、黄、红三区的分类框架下，本节选取四条典型干线，通过现网数据标定各区的具体边界阈值。

三区边界由两个阈值决定：绿区上限（即黄区起点）和黄区上限（即红区起点）。

（1）绿区上限

绿区上限来源于2.2节简化 ΣE_{eq} 阈值（G.652.D为22，G.654.E为26）。简化 ΣE_{eq} 不超

表2 五条现网干线的基本情况与精准模型验证结果

Table 2 Basic information and precise model validation results of five existing trunk lines

线路	光纤	段落数	累计长度 (km)	精准 ΣE_{eq}	精准阈值	精准判决	OSNR 计算值 (dB)	OSNR 判决
鹰潭—汕头	G.654.E	24	1529	11.54	25.12	可行	25.57	可行
沪穗	G.654.E	27	1915	20.04	19.95	边界可行	23.71	可行
沪穗贵	G.654.E	45	3024	27.43	19.95	不可行	22.15	不可行
京汉	G.652.D	23	1429	17.05	17.78	可行	22.38	可行
京九	G.652.D	35	2108	22.28	15.85	不可行	22.04	不可行

表3 五条干线简化模型与精准模型偏差标定

Table 3 Deviation calibration between simplified model and precise model for five trunk lines

线路	光纤	简化 ΣE_{eq}	简化阈值	简化判决	精准 ΣE_{eq}	精准阈值	精准判决	偏差	偏差性质
鹰潭—汕头	G.654.E	25.04	26	可行	11.54	25.12	可行	+13.5	一致（绿区）
沪穗	G.654.E	30.22	26	不可行	20.04	19.95	边界可行	+10.18	边界（红区边缘）
沪穗贵	G.654.E	48.85	26	不可行	27.43	19.95	不可行	+21.42	一致（红区）
京汉	G.652.D	25.06	22	不可行	17.05	17.78	可行	+8.01	误判（黄区）
京九	G.652.D	36.83	22	不可行	22.28	15.85	不可行	+14.55	一致（红区）

过该阈值时简化模型判为可行, 由 1.3 节理论分析及 3.3 节标定可知其单向偏严, 此时精准模型必为可行。鹰潭—汕头线 (G.654.E) 简化 $\Sigma E_{eq} \approx 25.04$ 小于阈值 26, 精准 $\Sigma E_{eq} \approx 11.54$ (阈值 25.12), 即为绿区的典型样本。

(2) 黄区上限

根据 1.3 节的理论分析, 简化 ΣE_{eq} 与精准 ΣE_{eq} 之间的差值随段落累加单调递增。当简化 ΣE_{eq} 达到 22 (G.652.D) 或 26 (G.654.E) 时, 系统进入黄区, 此时精准 ΣE_{eq} 通常远低于其阈值 (G.652.D 为 17.78, G.654.E 为 19.95)。此后每经过一个段落, 简化 ΣE_{eq} 与精准 ΣE_{eq} 的差值持续扩大, 精准 ΣE_{eq} 逐步逼近其阈值。当差值累积到足够大时, 精准 ΣE_{eq} 越过阈值, 系统进入红区。

G.652.D 从绿区终点 (简化 $\Sigma E_{eq}=22$) 到红区起点, 精准 ΣE_{eq} 需从约 15 (G.652.D 和 G.654.E 在绿区终点时精准 ΣE_{eq} 均在约 14~16 范围内, 典型值取 15) 增加至阈值 17.78, 增幅约 2.78; G.654.E 从绿区终点 (简化 $\Sigma E_{eq}=26$) 到红区起点, 精准 ΣE_{eq} 需从约 15 增加至阈值 19.95, 增幅约 4.95。

基于四条现网干线全部段落的逐段统计, G.652.D 每段简化 ΣE_{eq} 增量与精准 ΣE_{eq} 增量的比值中位数约为 1.8, G.654.E 约为 1.1。据此估算: G.652.D 所需简化 ΣE_{eq} 增量约为 $2.78 \times 1.8 \approx 5.0$, 分界值约为 $22 + 5.0 = 27.0$; G.654.E 所需简化 ΣE_{eq} 增量约为 $4.95 \times 1.1 \approx 5.4$, 分界值约为 $26 + 5.4 = 31.4$ 。两种光纤的估算结果分别约为 27.0 和 31.4, 均落在 30 附近, 初步判定临界点位于简化 ΣE_{eq} 约 27~32 区间。

上述估算仅用于判断临界点的大致范围 (约 30 附近), 其精度不足以确定具体取值。以下通过四条现网干线的逐段数据对标定区间进行精确定位。

G.652.D 光纤中, 京汉线终点 (简化 $\Sigma E_{eq} \approx$

25.06, 精准 $\Sigma E_{eq} \approx 17.05$) 精准可行。京九线第 27 段 (简化 $\Sigma E_{eq} \approx 28.72$, 精准 $\Sigma E_{eq} \approx 17.01$) 精准可行, 第 28 段 (简化 $\Sigma E_{eq} \approx 29.72$, 精准 $\Sigma E_{eq} \approx 17.83$) 超过阈值 0.05 转为边界状态。G.652.D 的分界区间约为 28.72~29.72。

G.654.E 光纤中, 鹰潭—汕头线终点 (简化 $\Sigma E_{eq} \approx 25.04$, 精准 $\Sigma E_{eq} \approx 11.54$) 精准可行。沪穗线第 26 段 (简化 $\Sigma E_{eq} \approx 28.52$, 精准 $\Sigma E_{eq} \approx 18.02$) 精准可行, 第 27 段 (简化 $\Sigma E_{eq} \approx 30.22$, 精准 $\Sigma E_{eq} \approx 20.04$) 超过阈值 0.09 转为边界状态。G.654.E 的分界区间约为 28.52~30.22。

两种光纤独立标定后, 黄区与红区的分界均指向简化 $\Sigma E_{eq} \approx 30$ 。需要说明的是, 该值是综合两条光纤各自的分界区间 (28.72~29.72 和 28.52~30.22) 取整并适当放宽后统一取定的工程归纳值, 而非理论推导的物理常数; 由于黄区及红区边界方案均需经精准复核确认, 该取值不会导致误放行。为直观展示上述分布特征, 绘制四条干线的简化 ΣE_{eq} 与精准 ΣE_{eq} 累计关系曲线, 如图 1 所示。

由图 1 可见, 京汉终点 (25.06, 17.05)、京九第 27 段 (28.72, 17.01) 和沪穗第 26 段 (28.52, 18.02) 均位于 $\Sigma E_{eq}=30$ 黄红分区线左侧, 精准可行; 京九第 28 段 (29.72, 17.83) 已越过黄红分区线转为不可行, 沪穗第 27 段 (30.22, 20.04) 跨至黄红分区线右侧。 $\Sigma E_{eq}=30$ 线将四条曲线的关键转化点自然分隔为左侧 (精准可行) 和右侧 (精准不可行或边界) 两组。两种光纤独立标定均指向同一分界值, 估算与标定的方向一致, 共同确定了 $\Sigma E_{eq} \approx 30$ 为黄区与红区的分界。

基于上述标定结果, 三区判据的完整定义如表 4 所示。

需要说明的是, 黄区上限简化 $\Sigma E_{eq} \approx 30$ 系基于四条现网样本的工程归纳值, 而非理论推导的物理常数。在积累更多验证数据前, 建议工程上

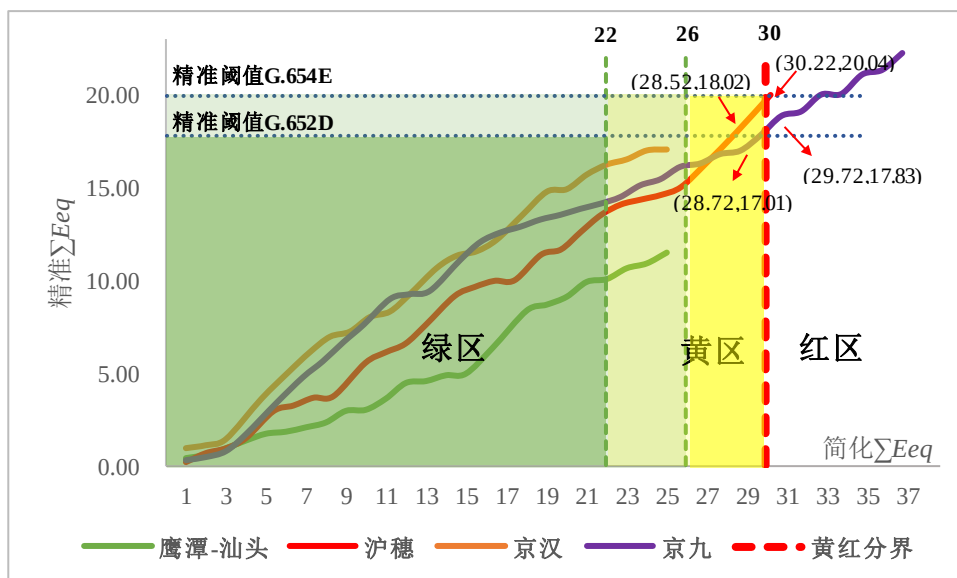
图1 四条现网干线简化 ΣE_{eq} 与精准 ΣE_{eq} 累计关系曲线Fig. 1 Cumulative relationship curves of simplified ΣE_{eq} and precise ΣE_{eq} for four existing trunk lines

表4 三区判据完整定义

Table 4 Complete definition of the three-level criterion

区域	G.652.D (简化 ΣE_{eq})	G.654.E (简化 ΣE_{eq})	含义	操作建议
绿区	≤ 22	≤ 26	简化模型与精准模型均判为可行	直接放行, 无需进一步分析
黄区	$22 < \text{简化} \Sigma E_{eq} \leq 30$	$26 < \text{简化} \Sigma E_{eq} \leq 30$	简化模型判为不可行, 但精准模型仍可能判为可行	启动精准模型复核, 以精准复核结果为准
红区	> 30	> 30	精准模型判为不可行	直接否决, 需调整设站方案

当 $30 < \text{简化} \Sigma E_{eq} < 31$ 时, 属红区边界, 建议启动精准复核确认后再做最终判断。

采用保守操作: 落入黄区的方案一律启动精准复核, 以精准复核结果作为最终判据。

将五条样本代入表4进行一致性检查, 结果如表5所示。

五条样本在三区判据中的分区结果与精准判决相匹配——绿区样本鹰潭—汕头精准可行; 黄区样本京汉精准可行 (需复核确认); 红区样本

沪穗贵、京九精准不可行 (直接否决); 沪穗处于红区边界 (简化 $\Sigma E_{eq} \approx 30.22$, 仅略超30), 经精准复核后判为边界可行, 建议此类红区边界方案启动精准复核确认后再做最终判断。

表5 五条样本在三区判据中的分布

Table 5 Distribution of five samples in the three-level criterion

线路	光纤	简化 ΣE_{eq}	分区	精准 ΣE_{eq}	精准判决	OSNR判决
鹰潭—汕头	G.654.E	25.04	绿区	11.54	可行	可行
沪穗	G.654.E	30.22	红区 (边界)	20.04	边界可行	可行
沪穗贵	G.654.E	48.85	红区	27.43	不可行	不可行
京汉	G.652.D	25.06	黄区	17.05	可行	可行
京九	G.652.D	36.83	红区	22.28	不可行	不可行

4 工程应用建议

4.1 操作流程

设计人员在实际工程中使用本方法时，按以下步骤操作。

步骤 1：确定光纤类型与获取段落长度。从设计文件中读取各光放段长度，确定光纤类型（G.652.D 或 G.654.E）。

步骤 2：计算简化 ΣE_{eq} 。按第 1.3 节式（10）或（11），将各光放段长度逐段折算为简化等效跨段数并累加，得到整条线路的简化 ΣE_{eq} 。

步骤 3：查表 4 确定分区。根据光纤类型和简化 ΣE_{eq} 值，对照表 4 判断方案属于绿区、黄区还是红区。

步骤 4：执行对应操作。

- 若为绿区，直接放行，无需进一步分析。
- 若为黄区，启动精准模型复核，将各段长度代入式（8）计算精准 ΣE_{eq} ，与表 1 中对应分档的阈值比较。若精准 ΣE_{eq} 不超过阈值，则判为可行；否则判为不可行，需调整设站方案后返回步骤 1 重新评估。

- 若为红区，需调整设站方案后返回步骤 1 重新评估。若 $30 < \text{简化 } \Sigma E_{eq} < 31$ ，建议启动精准模型复核，经精准复核后判为可行的方案可予以放行。

4.2 应用示例与注意事项

以京汉线为例：该线为 G.652.D 光纤，简化 $\Sigma E_{eq} \approx 25.06$ ，落入黄区。经式（8）精准复核，精准 $\Sigma E_{eq} \approx 17.05$ ，低于 G.652.D 阈值 17.78，判为可行。该案例展示了“黄区启动复核”的工程价值——简化模型判为不可行，经精准复核后判为可行，避免因误判造成投资浪费。

使用本方法时，需注意以下几点：

（1）简化模型仅适用于方案初筛，其判断结论并非最终结果。当方案落入黄区时，必须启动精准模型复核，以精准复核结果作为最终判据。

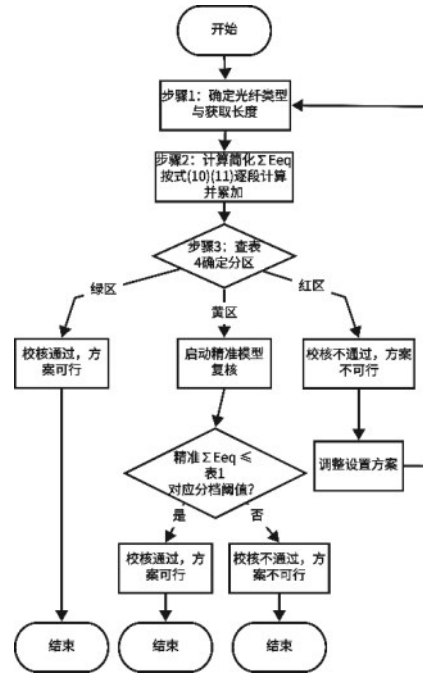


图2 设站方案快速评估流程图

Fig. 2 Flowchart of rapid site placement scheme assessment

（2）边界状态的处理原则：当精准 ΣE_{eq} 与表 1 阈值的差值小于 0.1 时，建议以 OSNR 精确计算结果为准。若 OSNR 计算结果满足容限要求，可按可行处理；否则按不可行处理。

（3）适用范围：本方法给出的阈值和判据基于 400G PM-QPSK 系统参数标定，适用于 G.652.D 和 G.654.E 光纤。对于其他光纤类型或更高速率系统，需重新标定相关参数和阈值。

（4）数据基础：本文基于五条现网样本——分界值由其中四条标定，五条样本均通过三区判据的一致性检查。边界值（尤其是简化 $\Sigma E_{eq} \approx 30$ ）尚需更多线路数据进一步验证和优化。在实际工程中，落入黄区的方案应一律启动精准复核。

5 结束语

本文针对 400G 骨干网设计阶段设站方案快速评估的需求，从标准 OSNR 估算模型（58 模型）出发，完成了以下工作并得出相应结论：

（1）推导了等效跨段数 ΣE_{eq} 与光放段长度 L



的显式关系,提出了精准计算和工程简化两套评估模型。精准模型将各段衰耗按指数关系折算为相对于 22 dB 标准跨段的噪声贡献并累加,适用于方案最终确认;简化模型将标准段落归一化处理,使设计人员仅凭段落长度即可手算完成初筛,适用于方案快速评估。

(2) 基于五条现网干线数据,对简化模型相对于精准模型的偏差进行了系统标定。结果表明,简化模型在所有样本中均呈单向偏严特征,其 ΣE_{eq} 比精准值虚高约 8~21 个等效跨段,且偏差幅度随段落数增加而增大。京汉线的案例表明,若设计人员仅依据简化模型判断,该本可无中继开通的线路将被误判为不可行。

(3) 基于偏差标定结果,建立了“绿区直接判为可行、黄区启动精准复核、红区直接判为不可行”的三级判据(表 5)。五条现网样本的验证结果表明,三级判据的分区结果与精准模型判决及 OSNR 计算结果均一致。如 3.4 节所述,黄区上限简化 $\Sigma E_{eq} \approx 30$ 为基于四条现网样本的工程归纳值,需更多线路数据进一步验证。

本文给出的阈值和判据基于 400G PM-QPSK 系统参数标定,主要适用于 G.652.D 和 G.654.E 光纤的 400G 系统。对于 800G 及更高速率系统^[17],OSNR 容限将进一步提升,相同光放段长度下的 ΣE_{eq} 分界值可能需要向更小的方向重新标定;同时,800G 系统入纤功率更高,非线性效应(自相位调制、交叉相位调制、四波混频等)对 OSNR 的影响权重将显著增加。本文提出的两套评估模型和三区判据框架本身具有良好的扩展性,在 800G 场景下,将非线性损伤折算入 OSNR 容限预算后,重新代入系统参数并标定分界值,两套评估模型和三区判据框架即可沿用。

本文方法参数少、计算简便,适用于 400G 干线可研及初步设计阶段的光放段设站方案快速比选,可有效减少设计人员对仿真工具的依赖,降低因简化模型误判带来的投资风险。后续研究

可向 800G 及更高速率系统、新型光纤类型拓展,并在现有框架下引入更完备的非线性效应模型。

参考文献:

- [1] YD/T 6437-2025. N×400Gbit/s 超长距离光波分复用(WDM)系统技术要求[S]. 2025.
YD/T 6437-2025. Technical requirements for N×400Gbit/s ultra-long-haul optical wavelength division multiplexing (WDM) systems[S]. 2025.
- [2] 李晗,邹洪强,刘卓,等. 400G 新型全光网技术发展[J]. 通信世界, 2023(20): 13-14.
LI H, ZOU H Q, LIU Z, et al. Development of 400G new all-optical network technology[J]. Communications World, 2023 (20): 13-14.
- [3] 长飞光纤光缆股份有限公司. 长飞助力中国电信建成全球首条全 G.654.E 陆地干线光缆 完成首次 400Gb/s 超长距现网传输试验[J]. 现代传输, 2021(5).
Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company. YOFC helps China Telecom build the world's first all-G.654.E land trunk optical cable and complete the first 400Gb/s ultra-long-haul field transmission test[J]. Modern Transmission, 2021(5).
- [4] 廖江,李炎强,薛强. 400G 传输网络现网测试性能优化研究[J]. 邮电设计技术, 2025(11): 77-81.
LIAO J, LI Y Q, XUE Q. Research on performance optimization of 400G transmission network field test[J]. Posts and Telecommunications Design Technology, 2025(11): 77-81.
- [5] Tang R, Zhao W Y, Chen H, et al. Experimental validation of modified EGN model in real-time 400G/800G transmission with PCS and digital sub-carrier multiplexing[C]// SPIE Proceedings, 2022.
- [6] 黄誉,丁明吉,肖经. 基于 PM-16QAM 双载波 400G 光传输链路仿真分析[J]. 广东通信技术, 2020(4): 60-63.
HUANG Y, DING M J, XIAO J. Simulation analysis of 400G optical transmission link based on PM-16QAM dual-carrier[J]. Guangdong Communication Technology, 2020(4): 60-63.
- [7] Zhang C L, Zhang A X, Fan Z W, et al. 400 Gb/s DWDM field trial over a record distance of 3820 km G.654.E fiber link with 107 GBaud transceivers and C-band EDFAs[C]//2023 Optical Fiber Communication Conference (OFC). San Diego, CA: IEEE, 2023.
- [8] Wang Z H, D'Amico A, Borracini G, et al. Scalable ML models and cascaded learning for efficient multi-span OSNR and GSNR prediction[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2026, 18(1): A88-A99.

- [9] 习建华, 郭艳春, 康帅, 等. 400Gbit/s OTN 技术及在干线网中的应用实践[J]. 电信工程技术与标准化, 2024(S2).
XI J H, GUO Y C, KANG S, et al. 400Gbit/s OTN technology and application practice in backbone network[J]. Telecommunications Engineering Technology and Standardization, 2024(S2).
- [10] LATO A D, MAO B M. Experimental demonstration of a 400G optical transmission system based on C+L spectrum using G.652.D fiber and G.654.E fiber[C]// 2024 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC). Beijing, China: IEEE, 2024: 1-3.
- [11] 闫飞. 面向下一代骨干光传送的 400G 技术及应用研究[J]. 邮电设计技术, 2023(12).
YAN F. Research on 400G technology and application for next-generation backbone optical transmission[J]. Posts and Telecommunications Design Technology, 2023(12).
- [12] 中国电信. N×400G 光波分复用设备技术规范(2024 版)[S]. 2024.
China Telecom. Technical Specification for N×400G Optical Wavelength Division Multiplexing Equipment (2024 Edition) [S]. 2024.
- [13] GB/T 51152-2015. 波分复用(WDM)光纤传输系统工程设计规范[S]. 2015.
GB/T 51152-2015. Code for design of wavelength division multiplexing (WDM) optical fiber transmission system engineering [S]. 2015.
- [14] 中国电信. 一级干线光缆及接头盒技术规范书(2025 版)[S]. 2025.
China Telecom. Technical Specification for First-Class Trunk Optical Cables and Joint Boxes (2025 Edition)[S]. 2025.
- [15] 丁为民, 黄梅荪. G.654.E 光纤应用场景研究[J]. 电信工程技

术与标准化, 2024, 37(2).

DING W M, HUANG M S. Research on application scenarios of G.654.E fiber[J]. Telecommunications Engineering Technology and Standardization, 2024, 37(2).

- [16] Maeda H, Saito K, Sasai T, et al. Real-time 400 Gbps/carrier WDM transmission over 2,000 km of field-installed G.654.E fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1640-1646.

- [17] 张德朝, 葛大伟, 张玉乾, 等. 超 800G 高速光传输技术探讨[J]. 通信世界, 2024(19).

ZHANG D C, GE D W, ZHANG Y Q, et al. Discussion on ultra-800G high-speed optical transmission technology[J]. Communications World, 2024(19).

[作者简介]



王晓媛(1981—), 女, 硕士, 华信咨询设计研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为光传输网络规划、工程设计、技术研究及设计标准化。;

袁伟(1983—), 男, 硕士, 华信咨询设计研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为光传输网络应用研究、干线传输网规划与优化。

夏芸(1983—), 女, 硕士, 华信咨询设计研究院有限公司正高级工程师, 主要研究方向为光传输网络规划方法研究。;

徐阿强(1992—), 男, 硕士, 华信咨询设计研究院有限公司工程师, 主要研究方向为光传输系统设计与应用、工程设计与技术支撑。;

吴宝瑜(1994—), 男, 硕士, 华信咨询设计研究院有限公司工程师, 主要研究方向为光通信网络规划、传输系统方案设计。