

# 超高速超长距光波分复用系统通道 代价计算模型研究

## Study on Channel Cost Calculation Model for Ultra-High Speed and Ultra-Long Distance WDM System

焦明涛, 乔月强, 刘烽博(中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450007)

Jiao Mingtao, Qiao Yueqiang, Liu Fengbo (China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Zhengzhou Branch, Zhengzhou 450007, China)

### 摘要:

在光波分复用系统从 100 Gbit/s 单波速率向 200 Gbit/s 及更高速率过渡之际, 提出基于 OSNR 进行传输系统通道代价计算的参考模型, 针对模型涉及的线性噪声影响、非线性噪声影响和通道光谱响应均衡影响进行了全面解析和量化研究, 明确了各影响因素的计算表达方式。并综合解析、量化和计算表达, 给出了传输系统性能及通道代价的计算模型, 为系统性能仿真及工程精准预测提供了坚实的理论支撑。

### 关键词:

光信噪比; 通道代价; 计算模型

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2021.06.005

文章编号: 1007-3043(2021)06-0024-05

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

As the WDM system transits from 100 Gbit/s single wave rate to 200 Gbit/s and higher, a reference model for channel cost calculation of transmission system based on OSNR is proposed. The effects of linear noise, non-linear noise and channel spectral response equalization involved in the model are comprehensively analyzed and quantified, and the expression of each factor is clarified. The calculation model of transmission system performance and channel cost is given by comprehensive analysis, quantification and calculation expression, which provides a solid theoretical support for system performance simulation and engineering accuracy prediction.

### Keywords:

OSNR; Channel cost; Calculation model

引用格式: 焦明涛, 乔月强, 刘烽博. 超高速超长距光波分复用系统通道代价计算模型研究[J]. 邮电设计技术, 2021(6): 24-28.

## 0 引言

单波传输速率和无电中继传输距离是目前基于 WDM 技术的骨干传输系统两大关键指标。单波传输速率决定了固定频谱宽度下的传输系统容量, 而无电中继传输距离决定了工程的建维成本和系统性价比。

从 1995 年贝尔实验室提出基于光纤的波分复用技术及第 1 套 8×2.5 Gbit/s 的 WDM 系统上线, 骨干传输系统从 SDH 时代迈向 WDM 时代。就单波传输速率而言, 从 1995 年的 8×2.5 Gbit/s 波分复用系统上线, 到

2012 年的 80/96×100 Gbit/s 波分复用系统开始规模部署, 18 年间, 基于波分复用技术的骨干传输技术经历了快速的发展, 单系统传输容量增长了 480 倍, 并保持着每年翻一番的增长速度。

但 2012 年后, 单 WDM 系统的传输容量增长放缓, 系统单波传输速率相对停滞在 100 Gbit/s。在此之后业界分别从增加调制阶数、提升波特率、扩展可用频谱带宽等途径提升系统容量, 目前单波 200 Gbit/s 的 WDM 系统技术基本成熟, 三家运营商均开展了相应的试点业务, 但是因为 200 Gbit/s 波分系统部署成本较高, 相对于现有 100 Gbit/s 波分系统性价比提升不明显, 运营商规模部署 200 Gbit/s 波分系统的意愿并不强

收稿日期: 2021-05-06

烈。对于既定的光缆路由,影响WDM系统部署成本的主要因素是传输系统中中继的数量。基于目前的市场情况,满配100G传输系统每增加1个电中继,将增加1 000万元以上建设成本和每年40万kWh耗电。就无电中继传输距离而言,现网100 Gbit/s系统的复用段长度集中在500~600 km,而试点200 Gbit/s传输系统的复原段距离则在300 km左右。上述复用段距离与通信行业标准中的参考模型复用段长度存在着巨大差距,提升现网无电中继距离,降低系统部署成本的空间巨大,且需求迫切。

在WDM系统从100 Gbit/s单波速率向200 Gbit/s及更高速率过渡时期,研究超100 Gbit/s波分复用(WDM)系统通道代价计算模型和超长距无电中继关键技术的需求极其迫切。本文旨在研究影响波分系统传输通道代价的关键因素,并提供准确预测的计算模型,辅助超高速超长距光波分复用系统的工程建设。

## 1 WDM系统通道代价理论研究

WDM系统的传输质量以误码率(BER)指标衡量,在常用的PDM-QPSK相干调制和高斯白噪声的结构中,误码率和信噪比SNR的关系可以表述为:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{SNR}{2}} \right) \quad (1)$$

OSNR和SNR的关系可以表述为:

$$OSNR = \frac{R_s}{B_{opt}} SNR \quad (2)$$

式(2)中 $R_s$ 表示波特率, $B_{opt}$ 表示光带宽。由式(1)、式(2)可知:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{OSNR \times B_{opt}}{2 \times R_s}} \right) \quad (3)$$

式(3)反映了传输系统的质量与系统OSNR存在的直接对应关系。

在通信行业标准 YD/T 3783-2020《N×400 Gbit/s

光波分复用(WDM)系统技术要求》中,如图1系统参考配置图所示,针对ODU前面OA接口之前光纤连接处的参考点OSNR指标要求如下:调制格式为偏振复用16阶正交幅度调制(PM-16QAM)的2×200 Gbit/s WDM系统,跨段设置小于或等于12×22 dB时,最小OSNR指标为21 dB;跨段设置大于12×22 dB且小于等于20×22 dB时,最小OSNR指标为21.5 dB;跨段设置大于20×22 dB且小于等于28×22 dB时,最小OSNR指标为22 dB;跨段设置大于28×22 dB时,最小OSNR指标为22.5 dB。

调制格式为偏振复用正交相移键控(PM-QPSK)的2×200 Gbit/s WDM系统,跨段设置小于或等于12×22 dB时,最小OSNR指标为19 dB;跨段设置大于12×22 dB且小于等于20×22 dB时,最小OSNR指标为19.5 dB;跨段设置大于20×22 dB且小于等于28×22 dB时,最小OSNR指标为20 dB;跨段设置大于28×22 dB时,最小OSNR指标为20.5 dB。

基于直接的传输质量对应关系以及通信行业标准的明确要求,本文将以OSNR作为通道代价计算模型的关键参考指标。

## 2 通道代价OSNR计算模型

在WDM传输系统中,给定带宽的情况下,某一参考点的OSNR可以表述为:

$$OSNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (4)$$

其中, $P_s$ 表示信号功率, $P_n$ 表示噪声功率。

本文重点关注图1中ODU前面OA接口之前光纤连接处的参考点OSNR指标,即经过WDM系统放大器链路噪声累积后的OSNR指标。传输系统通道中影响OSNR的因素有放大器、增益均衡器及其他光器件引入的噪声,光纤衰减、色散、非线性效应等引起的传输损伤,波长容限、不均匀光谱响应等引起的OSNR劣化。

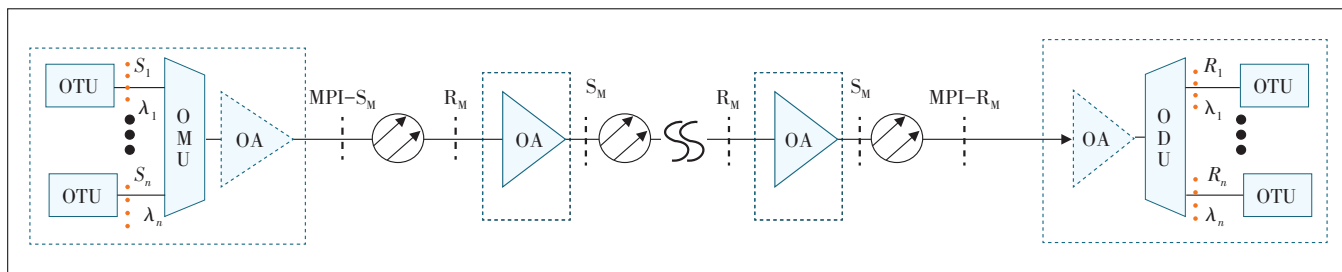


图1 WDM系统参考配置图

上述的影响因素之间彼此关联,如放大器产生的增益用于抵消光纤产生的衰减,增益均衡用以修正不均匀光谱响应引起的光谱功率偏差、色散存在非线性效应抑制作用等。本文将 OSNR 的影响因素划分为线性噪声影响、非线性噪声影响和加权干扰影响 3 个类别。

线性噪声影响包括由光放大器引入的自发辐射噪声和光纤引入的衰减介质噪声,因为光纤作为纯衰减介质,在信道内噪声水平远高于最小量子噪声限值的时候,会同时衰减信号和噪声,所以单纯经过光纤后 OSNR 几乎不变,在线性噪声领域,对 OSNR 产生实质影响的是放大自发辐射引入的噪声和经过放大链路的累积效应。

文中参考非线性噪声传播呈现高斯分布的研究成果,即非线性效应引入的噪声为加性高斯白噪声,可以与线性噪声进行累加来表示噪声的总量,同时考虑加权干扰影响,则相关 OSNR 的公式可以表达为:

$$OSNR = \frac{P_s}{a_L \times P_{ASE总} + a_{NL} \times P_{NLI总}} \quad (5)$$

其中,  $P_s$  表示信号功率,  $P_{ASE总}$  表示经过传输链路累积的总放大器自发辐射噪声功率,  $a_L$  表示通道引入的线性噪声加权系数,  $P_{NLI总}$  表示经过传输链路累积的总非线性效应引入的噪声功率,  $a_{NL}$  表示光器件通道引入的非线性噪声加权系数。

### 2.1 光放大器级联噪声累积解析

光放大器的噪声源自亚稳态能级  $^4I_{13/2}$  的自发辐射跃迁,生成的光子波长、相位和偏振态在相应的范围内随意取值,耦合进光纤成为噪声光子,并在传输链路系统中进行传播和累积,形成自发辐射噪声。

光放大器的平均自发辐射单边功率谱密度可以表示为:

$$S_{ASE} = n_{sp}(G - 1)hv \quad (6)$$

其中,  $n_{sp}$  表示激发粒子数的反转因子,也称自发辐射因子,  $n_{sp}$  的取值通常为 1.5~2。  $h$  为普朗克常量,  $v$  表示载波频率。

对于具备较大增益值  $G$  的光放大器,除自发辐射噪声外,还需要考虑真空起伏引入的附加散粒噪声,附加噪声能量为每个等效无噪声光放大器输入端光子能量的一半,即最小附加噪声功率谱密度为  $\frac{hv}{2}$ ,考虑附加噪声,则光放大器噪声的最小功率谱密度可以表示为:

$$S_N = S_{ASE} + \frac{hv}{2} = (2n_{sp}(G - 1) + 1) \frac{hv}{2} \quad (7)$$

从 OSNR 劣化的角度,光放大器的噪声系数 NF 可以表示为:

$$NF = \frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}} = \frac{P_{N-out}}{G \times P_{N-in}} = \frac{G \times P_{N-in} + P_{ASE}}{G \times P_{N-in}} = \frac{(2n_{sp}(G - 1) + 1)}{G} \quad (8)$$

考虑光的偏振模数量  $m$  和噪声的检测带宽  $B$ ,则单级的光放大器的噪声功率可以表示为:

$$P_{ASE单} = mS_N B = m \times NF \times G \times \frac{hv}{2} \times B \quad (9)$$

假设放大器级联的传输链路如图 2 所示。

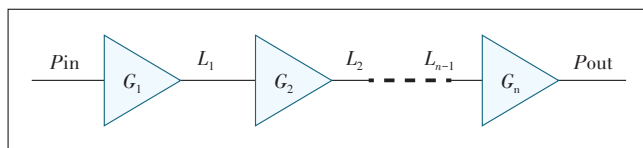


图2 级联放大器链路示意图

图 2 中的  $n$  个放大器级联,每个放大器的增益分别为  $G_1, G_2 \dots G_n$ ,放大器间光纤衰减分别为  $L_1, L_2 \dots L_{n-1}$ ,则经过传输链路后的总的放大器噪声可以表示为:

$$P_{ASE总} = P_{ASE_n} + P_{ASE_{n-1}} \times L_{n-1} \times G_n + \dots + P_{ASE_1} \times L_1 \times G_2 \times L_2 \times G_3 \times \dots \times L_{n-1} \times G_n \quad (10)$$

式中  $P_{ASE_n}$  表示第  $n$  个单级放大器的噪声功率。将单级放大器噪声功率计算公式引入式(10),可以计算出放大器链路总的自发辐射噪声功率。

### 2.2 非线性噪声累积解析

WDM 系统中单波光功率通常在毫瓦级,传输过程中,毫瓦级的光场被限制在有效截面积  $A_{eff}$  在  $30 \mu m^2$  至  $150 \mu m^2$  的狭小光纤通道内,会引发非线性效应。非线性效应会引起信号的附加损耗、载波相移、信道之间的串扰等,导致传输性能劣化。非线性效应根据产生的机理分为 2 类:受激散射效应和折射率扰动效应。

受激散射效应是光纤中信号光与分子振动相互作用导致的能量从入射光波长向低频率转移的效应,转移能量以分子振动或者光子的形式释放。受激散射效应使入射光能量降低,形成信号能量损耗。当入射光功率较低时,受激散射效应可以忽略不计,当入射光功率超过某个阈值时,受激散射效应引发的能量转移随入射光功率成指数增加。根据受激散射效应

转化的对象不同, 受激散射效应可以分为受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)。

受激布里渊散射效应使散射波长相对于原始波长发生小的频率偏移, 同时产生向后向传输的斯托克斯波, 从而导致入射光频移叠加能量衰减, 而后向传输的斯托克斯波也会导致激光器工作不稳定, 从而限制入射光的光功率。发生受激布里渊散射的阈值和光纤有效面积正相关, 和光源激光器的光谱线宽成正比, 与WDM的信道数量无关。在单模光纤中, 发生受激布里渊散射的阈值光功率 $P_{th}$ 估算公式可以表述为:

$$P_{th} \approx 0.03\Delta\lambda \quad (11)$$

其中,  $\Delta\lambda$  表示激光器光谱线宽, 单位为 MHz, 0.03 是单模光纤 SBS 阈值经验系数, 单位是 mW/MHz。通常 G.652 单模光纤中, 单波 3 mW 的入射光功率就能够引发布里渊散射, 布里渊散射效应是限制单波光功率的重要因素。

受激拉曼散射效应是光纤中分子结构振动状态, 吸收入射光, 将泵浦光子转化为一个同向传输的低频率光子的过程。受激拉曼散射的阈值相对较高, 一般在百毫瓦量级。拉曼激光放大器就是利用该原理, 将短波长高功率的泵浦光能量转移至长波长低功率的信号光, 实现光放大的。但是受激拉曼散射会引起波道间的串扰, 在波分系统中, 受激拉曼散射最终将会成为限制波道数量的重要因素。

折射率扰动效应是光纤的折射率随着入射光强而变化的非线性现象, 折射率扰动下光纤的非线性折射率 $n$ 可以表述为:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}} \quad (12)$$

其中,  $n_0$  表示折射率中的线性部分,  $n_2$  表示非线性折射率系数,  $P$  表示入射光功率,  $A_{eff}$  表示光纤的有效截面积。

折射率扰动与入射光功率正相关, 与光纤有效截面积负相关。折射率扰动在信号光传输的过程中会拓宽信道频谱, 从而与光纤的色度色散相互作用, 并导致脉冲失真和脉冲展宽, 引起自相位调制、交叉相位调制和四波混频等。在长距离传输系统中, 即使二氧化硅的非线性系数 $n_2$ 非常小( $2.7 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ), 这种扰动引起的变化还是会降低信号的质量。

自相位调制和交叉相位调制是将信号的能量波动转化为本信道或其他信道的相位波动, 对信噪比的

影响相对有限。而四波混频通过三阶互调会产生新的波长( $f_1 + f_2 - f$ ), 由于WDM系统中信道间隔均匀, 新的波长会和信号波长一致, 将部分信道的功率直接转化为相邻信道的噪声, 从而降低信噪比, 损伤传输性能。

文中参考非线性噪声在系统链路传播过程呈现高斯分布的研究成果, 在计算过程中将非线性噪声作为高斯噪声进行处理, 非线性噪声的功率可以表示为非线性噪声功率谱密度在噪声检测带宽 $B_n$ 内的积分, 公式表述为:

$$P_{NLI} = \int_{B_n} G_{NLI}(f) df \quad (13)$$

考虑各种非线性效应, 功率谱密度的计算公式如下:

$$G_{NLI}(f) = \frac{16\gamma^2}{27} \int_{\frac{B_n-f}{2}}^{\frac{B_n+f}{2}} \int_{\frac{B_n-f}{2}}^{\frac{B_n+f}{2}} \frac{\sin^2(2N_s \pi^2 |\beta_2| L_s f_1 f_2)}{\sin^2(2\pi^2 |\beta_2| L_s f_1 f_2)} \cdot \left| \frac{1 - e^{-2\alpha L} e^{j4\pi^2 |\beta_2| L_s f_1 f_2}}{2\alpha - j4\pi^2 |\beta_2| L_s f_1 f_2} \right|^2 \cdot G_{Tx}(f_1 + f_2 + f) \cdot G_{Tx}(f_1 + f) \cdot G_{Tx}(f_2 + f) df_1 df_2 \quad (14)$$

其中,  $\gamma$  表示光纤非线性系数,  $\alpha$  表示光纤衰减系数,  $\beta_2$  表示光纤色散系数,  $L_s$  表示跨段长度,  $N_s$  表示跨段数量,  $B_n$  表示信号光总带宽。

在奈奎斯特 WDM 系统中, 经过式(14)解析计算的 nonlinear noise power 的可以近似表达为:

$$P_{NLI} \approx \frac{8}{27} N_s^{1+\epsilon} \gamma^2 P_{Tx}^3 L_{eff}^2 \frac{\sinh^{-1}\left(\frac{\pi^2}{2} |\beta_2| L_{eff,a} B_n^2\right)}{\pi |\beta_2| L_{eff,a} B_n^3} B_n \quad (15)$$

其中,  $P_{Tx}$  表示信号光功率,  $L_{eff} = (1 - e^{-2\alpha L}) / (2\alpha)$  表示光纤有效长度,  $L_{eff,a} = 1 / (2\alpha)$  表示近似有效长度。

### 2.3 光谱均衡引入的噪声影响解析

光纤放大器链路的不均匀光谱响应会导致传输系统的 OSNR 劣化。在波分系统中放大器对不同信道的光谱响应由放大器的平均粒子数反转率直接决定。增益谱函数可以表达为:

$$G_{db}(\lambda) = \Gamma(\lambda) [\sigma_e(\lambda) N_2 - \sigma_a(\lambda) N_1] n_l L \quad (16)$$

其中,  $G_{db}(\lambda)$  是以 dB 表示的增益谱,  $\Gamma(\lambda)$  为掺杂纤芯区域光场函数,  $\sigma_e$  为受激辐射横截面,  $\sigma_a$  为吸收横截面,  $N_2$  为截面辐射反转粒子密度率,  $N_1$  为截面吸

收反转粒子密度率,  $n_i$  为铷粒子浓度,  $L$  为掺铷光纤长度。

$\Gamma(\lambda)$  在 C 波段波长范围内是一个相对稳定数字, 可以作为常数处理。光放大器不同波长的增益系数取决于掺铷光纤中对应该波长的粒子反转率。因为不同波长的粒子反转度不同, 在给定的波长范围内, 不同信道的增益值  $G(\lambda)$  随波长不同而变化。为保证信号传递, 放大器链路的平均增益  $\bar{G}$  等于链路区间的损耗, 即  $\bar{G} = \bar{L}$ 。本文中以  $m = G(\lambda)/\bar{G}$  表示某一信道的增益质量。在等跨距的模型中, 光谱增益质量为  $m$  的信道经过  $N$  级放大器链路的 OSNR 可以表述为:

$$\text{OSNR}_N = \frac{P_s G(\lambda) m^{N-1}}{P_{\text{ASE}} (1 + m + \dots + m^{N-1})} = \frac{P_s \bar{G} m^N}{P_{\text{ASE}} (1 + m + \dots + m^{N-1})} = \frac{P_s}{P_{\text{ASE}} \frac{1}{\bar{G} m} \left( \frac{1 - \frac{1}{m^N}}{1 - \frac{1}{m}} \right)} \quad (17)$$

针对放大器自发辐射线性噪声, 信道增益质量给 OSNR 带来的影响可以表述为:

$$a_m = \frac{1}{\bar{G} m} \left( \frac{1 - \frac{1}{m^N}}{1 - \frac{1}{m}} \right) \quad (18)$$

式中随着  $m$  值的减小, OSNR 的劣化将快速增大。所以在跨段较多的波分系统链路中, 必须严格控制增益平坦度, 才能将 OSNR 劣化控制在 0.5 dB 以下。目前可以采用 2 种技术手段进行增益平坦控制, 首先是发射端进行功率预加重, 将各波道的功率调整到合理值。其次是在传输链路中周期性地插入增益平坦滤波器和增益均衡器, 以保持各波道的增益质量。

增益平坦滤波器可以集成在光放大器之内, 用以减小增益波动, 但这还不足以保证多跨段链路的传输质量, 传递过程中还须要插入增益形状均衡器, 用以补偿放大器链路产生的不均匀光谱响应, 插入增益倾斜均衡器, 用以补偿链路增益倾斜失真。

增益均衡器在起到滤波及信道均衡作用进而改善信道增益质量的同时, 也会因为引入插入损耗而导致噪声恶化。鉴于引入增益均衡器的位置、数量对传输系统影响主要体现为信道增益调整和插损, 计算模型中参考公式(18)所表达的信道增益质量对 OSNR 带来影响的形式, 本文中将信道均衡对 OSNR 带来的影响作为线性噪声和非线性噪声的权重因子形式体现,

权重因子的取值区间将在进一步的研究和测试中给定。

### 3 结束语

作为可以快速测量, 并和通道误码率存在直接对应关系的物理量, OSNR 是计量传输系统通道代价的合理指标。该指标作为工程研究阶段的计算值、工程设计阶段的仿真值、核工程实施阶段的测量值, 可以在工程全流程起到预测及监测的作用, 在 WDM 系统从单波 100 Gbit/s 向单波 200 Gbit/s 及更高速率演化的过程中, 在降低建维成本, 实现超长复用段传输系统的部署的过程中, 进一步优化 OSNR 计算模型将对传输技术及工程部署演进起到推动作用。

本文基于 OSNR 的传输系统通道代价计算模型, 同时考虑了线性噪声影响、非线性噪声影响以及光谱均衡引入的影响, 是业界首先将光谱均衡影响作为权重因子纳入计算的模型, 是目前考虑因素最为全面的计算模型。后续笔者团队将在计算模型框架下继续开展传输系统参数配置对 OSNR 影响的研究和测试验证工作, 以完成理论研究到工程仿真工具的落地, 并通过仿真准确预测波分链路系统通道性能。

### 参考文献:

- [1] 郑波. 超高速 WDM 系统光信噪比(OSNR)计算方法及软件实现[J]. 邮电设计技术, 2014(1): 60-67.
- [2] CARENA A. Modeling of the Impact of Nonlinear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(10): 1524-1539.
- [3] 余少华, 胡先志. 超高速超大容量超长距离光纤传输系统前沿研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [4] 约瑟·切斯尼(José Chesnoy). 海底光缆通信系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [5] POGGIOLINI P. A Detailed Analytical Derivation of the GN Model of Non-Linear Interference in Coherent Optical Transmission Systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012(12): 57-79.
- [6] 杨宁, 杨铸, 漆启年, 等. DWDM 系统中级联 EDFA 光信噪比计算[J]. 通信学报, 2003(1): 75-82.

### 作者简介:

焦明涛, 高级工程师, 主要从事有线传输专业研究、咨询、设计工作; 乔月强, 高级工程师, 中讯邮电咨询设计院有限公司有线传输专业设计部总工程师, 主要从事有线传输专业研究、咨询及技术管理工作; 刘烽博, 工程师, 主要从事有线传输专业研究、咨询、设计工作。