

# 海底通信空分复用光缆系统传输容量研究

康宁光通信 陈皓 编译

## 前言

为解决日益增长的流量需求问题，近年来人们对光纤的空间复用（Space Division Multiplexing, SDM）技术进行了大量的研究，长距离海底通信是该技术最有前景的应用场景之一。在跨洋海底通信系统中，由于两端馈电系统的功率限制，无法通过增加海底系统的放大器功率和数量来提高系统容量，需要考虑其他技术来实现海底光缆容量最大化。研究证明，在线性放大区域，降低信道功率和信噪比，增加光缆内光纤数，可以显著增加海底光缆的容量，采用空分复用技术的海缆系统可以实现最低的单位比特功耗。

空分复用技术的“空”通常是指在单根光纤这个空间范围有多个纤芯，而海缆系统中的空分复用的“空”是指在海缆这个空间范围内，包含两种实现方式，一种是增加单芯光纤的光纤对数量，另一种是每根光纤内包含多个纤芯（Multi Core Fiber, MCF）或每根光纤使用多个空间模式（Few Mode Fiber, FMF）。此外，使用C+L波段传输代替C波段传输也是提高传输容量的一种有效方法。

本文中我们定量地分析几种了提高海底光缆系统容量的技术，比较这几种技术在放大器功率受限的情况下能实现最大的传输容量。该分析主要基于以下三种不同的系统配置：1）单芯光纤C波段传输；2）单芯光纤C+L波段传输；3）多芯光纤C波段传输。我们在系统信噪比（SNR）值相同的条件下，分析了这三种方式可以支持的最大光纤对数和的光纤芯数（MCF）。为更好地估计每种方式支持的最大容量，我们详细地计算了这每种方式的系统损耗。结果表明，由于引入了额外的损耗，海底系统中单芯光纤C+L波段和多芯C波段的传输容量比单芯光纤C波段传输的容量小。如果与多芯可实现的相同容量，单芯光纤C波段和C+L波系统可以使用比多芯系统的需要的电压和功耗更低。

## 系统模型

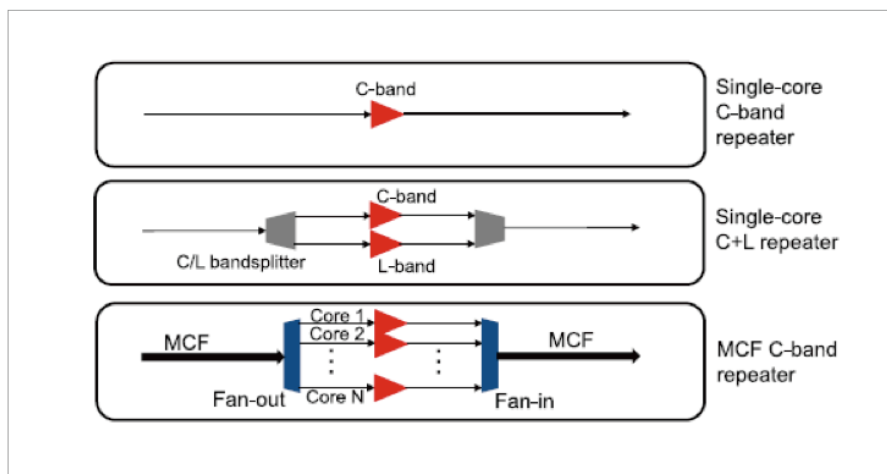


图1. 三种模型的光路图

图1是三种模型的系统光路图。单芯C波段的中继器中只配有EDFA放大器，C+L波段需要对两路信号进行分波后用两个放大器进行独立放大，多芯光纤的中继器最为复杂，需要对每个纤芯扇出（Fan Out, FO）后输入到独立的放大器，放大后信号再扇入（Fan In, FI）到多芯光纤中。根据香农定理，光缆的最大容量理论上可以达到：

$$C_{cable} = 2N_{FP}N_{ch}B_{sym} \log_2 [1 + SNR(P_{ch}, L)]$$

是传输系统的符号速率。信噪比是信道功率和跨段长度L的函数，假设信噪比在线性工作区域，且范围足够高，基本上不存在“非线性衰减”。为海缆系统供电的直流。基于以上假设，中继器的最大功率可以表示为：

$$P_{rep,max} = \frac{(V_{PFE})^2}{4N_{sp}LR_0N_{rep}}$$

是链路中的跨段数，是链路中继器的数量-1,  $R_0$ 是海缆中导体的阻抗。所需光纤的对数由以下因素决定：信道功率、跨度长度，光电（E/O）功率转换效率  $\eta$ ，以及中继器控制部分的开销系数  $\epsilon$ 。

$$N_{FP} = \text{floor} \left[ \frac{(1 - \epsilon)\eta P_{rep,max}}{2N_{ch}P_{ch}} \right]$$

根据方程1可以评估出光缆的总容量，总容量首先和基于高斯噪声模型的信噪比有关（信噪比与跨段长度，通道功率相关），另外总容量还与链路长度，光纤芯数和传输系统的参数等相关。

本分析中使用的光纤和系统参数如表1所示。对于C+L波段系统，比单芯C波段系统有额外的跨段损耗（包括L波段衰减更高、EDFA噪声系数更高以及中继器中的C/L分光的损耗）。对于MCF系统，额外的损耗来多芯光纤扇入/扇出（FI/FO）器件的损耗，因为MCF的内每个纤芯需要通过扇入扇出的方式连接到的独立的EDFA进行放大（这是目前阶段最简单且可行的方案），另外MCF的熔接损耗更高，并且光纤衰减也稍高。分析中我们使用的几种光纤的有效面积为112 $\mu\text{m}^2$ ，1550nm处的色散值为21 ps/nm/km。C波段为1525-1565nm，L波段为1570-1610nm。每间隔10公里有一个熔接点。

Parameter	Single-core C-band	Single-core C+L-band	MCF C-band
Ave. C-band atten. (dB/km)	0.154	0.154	0.158
Ave. L-band atten. (dB/km)		0.156	
C/L bandsplitter loss (dB)		0.5	
MCF fan-in/fan-out loss (dB)			1.0
Intra-span splice loss (dB/splice)	0.02	0.02	0.1

表1 三种模型的光纤参数

Parameter	System value
Link length (km)	6,600
Symbol rate (Gbaud)	32
# of channels per band	130
E/O conversion eff. (%)	1.5
Control overhead (%)	10
Cable resistance (W/km)	1
PFE voltage (kV)	15
EDFA NF, C/L (dB)	5.0/5.5

表2 传输系统参数

图2显示传输系统信噪比为9.5dB时的分析结果。不同跨段长度设置下光缆容量如图2a所示，可支持的光纤芯数如图2b所示。单芯C波段传输可提供最高的光缆容量，但需要37对光纤来承载才能实现。用多芯光纤技术的光缆的最大容量约为常规纤芯容量的54%，需要19-20芯对纤芯（光纤数量根据多芯光纤的结构不同有差异，如采用7芯光纤的话，4对多芯光纤即可用满足）。具有C+L传输的光纤的最大容量约为只用C波段光纤的70%，但只需要13对光纤。为了比较衰减对多芯光纤的影响，我们在图1中用红色实线表示多芯光纤的衰减采用的是表1的数据，用红色虚线的表示多芯光纤的衰减与单纤芯光纤完全同时的光缆容量。

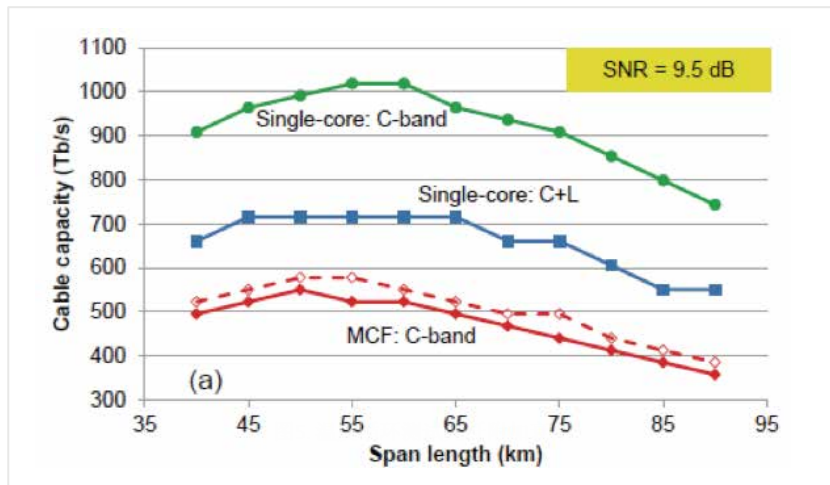


图2a, 三种模型在不同跨段长度时的光缆容量

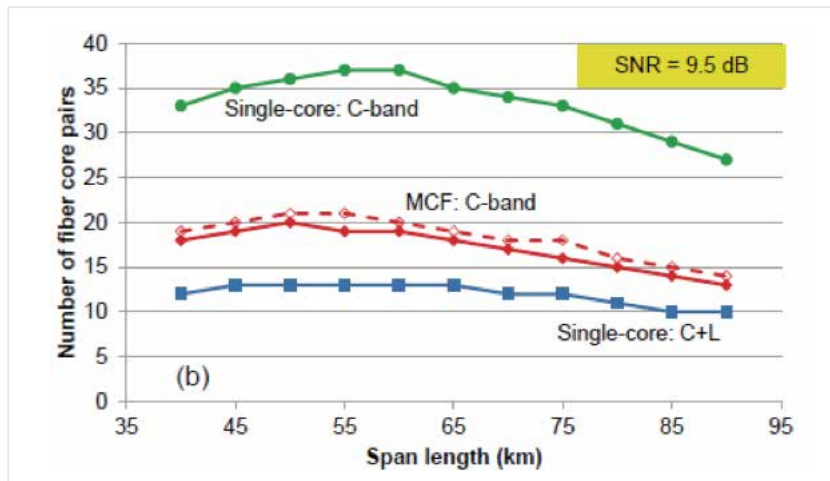


图2b 三种模型的最大容量时光纤所需的纤芯对数

图3a分析了三种系统在不同信噪比值时最大光缆容量。每种系统使用的最大电压是15千伏。通过最低功率成本分析进行分析，如果三种系统类型都设计成相同的容量（按照多芯系统的最大容量设计），在每个跨段长度都是60km 情况下，图3b中给出每种系统所需的电压。可以看出，单芯光纤C波段和C+L系统需要较低的电压。与MCF多芯光纤系统相比，相同容量时它们的电压分别降低了为25%和13%。由于多芯光纤系统额外损耗的最大来源是中继器中的FI/FO设备，我们也对该损耗的变化进行了建模。如图3所示。将FI/FO损耗降低到0.4 dB，多芯系统可以和C+L系统提供相同的容量。

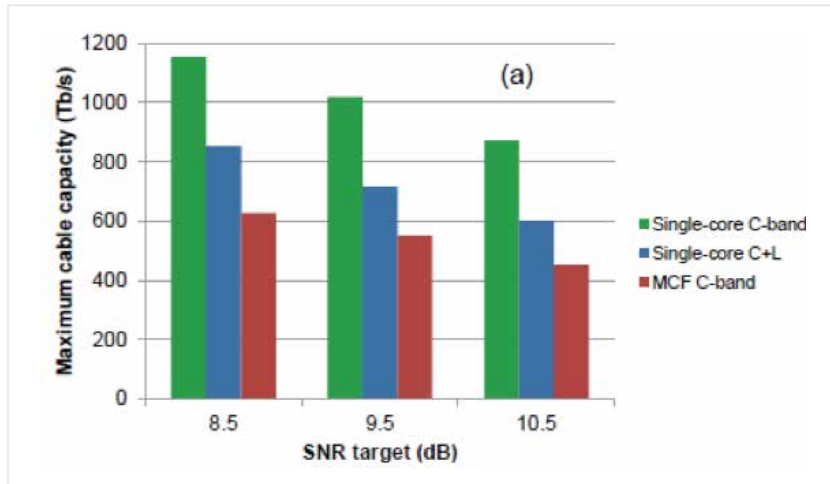


图3a 最大供电电源15kV，系统不同信噪比时最大的光缆容量

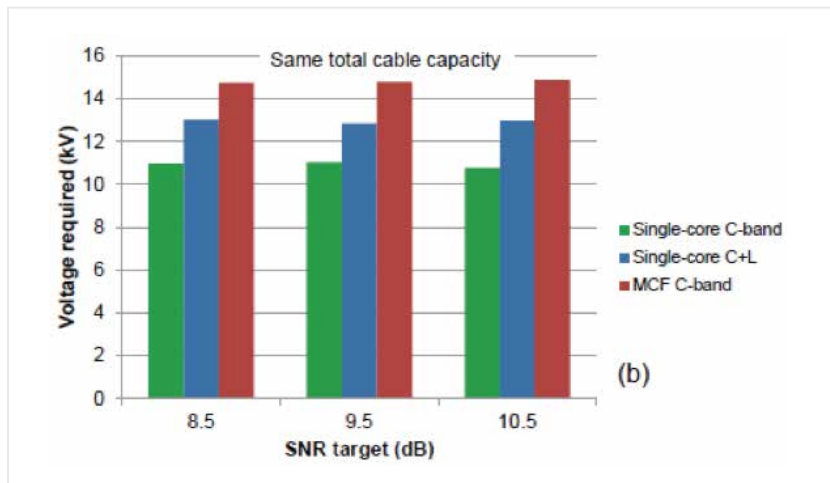


图3b 相同光缆容量下，三种模型需要的电压

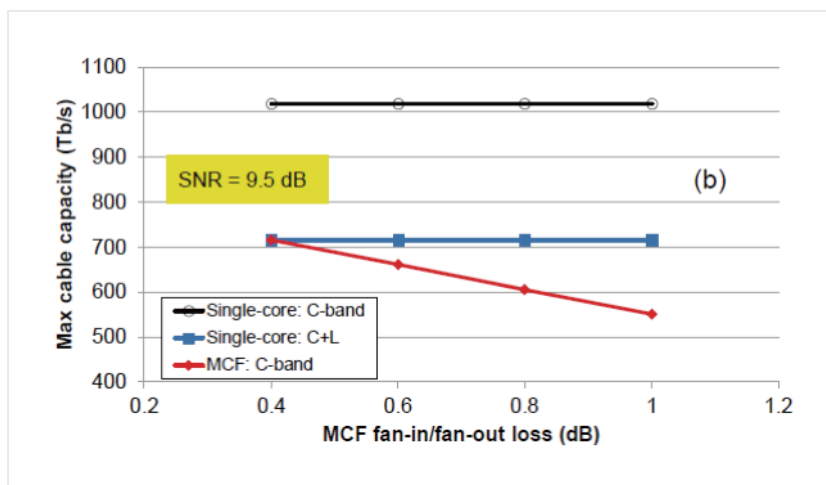


图4 多芯光纤扇入扇出损耗对系统最大容量的影响

本文的分析是在给定信噪比的框架内，比较分析了实现最大光缆容量的方式。也可以按照类似方式进行分析，以找到最低单位比特功耗成本。在对相同范围（线性工作区域）的信噪比的初步分析中，我们发现单芯C波段系统与单芯C+L和多芯C波段相比，具有显著的容量优势和较低的单位比特功耗。在非线性工作区域的信噪比，需要进行更广泛的研究。

## 结论

我们研究在海底馈电系统电压固定的条件下，采用较为成熟的每个纤芯独立放大的方式，单芯和多芯光纤可达到的最大海底光缆容量。与C波段传输的单芯光纤的最佳情况相比，单芯C+L提供约70%的电缆容量，多芯C波段提供约54%的容量。如果光缆容量与多芯解决方案相等，那么单芯C波段和C+L波段系统需要大约电压水平分别降低25%和13%。C+L或多芯提供的总容量水平降低系统主要是由于C/L分光系统、FI/FO设备和熔接中产生的额外损耗。

## 康宁光通信中国

上海市漕河泾高科技开发区桂箐路 111 号立明大厦 3 楼  
 电话: 86 21 5450 4888  
 传真: 86 21 5427 7898  
[www.corning.com](http://www.corning.com)