

大气信道中空间光通信的性能预算

Performance Budget of Space Optical Communication in Atmospheric Channel

刘大畅^{1,2}, 曾晶², 孙石峰², 谢寅亮², 吴绍华¹(1. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518055; 2. 广东南方电信规划咨询设计院有限公司, 广东 深圳 518038)

Liu Dachang^{1,2}, Zeng Jing², Sun Shifeng², Xie Yinliang², Wu Shaohua¹(1. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Southern Planning & Designing Institute of Telecom Co., Ltd., Shenzhen 518038, China)

摘要:

针对应用于大气信道的空间光通信系统, 首先介绍了5种常见传输光的类型及特性。然后根据推导的光束尺寸和相前曲率半径表达式, 模拟了发射光束尺寸为2 cm的1550 nm激光束, 在不同相干性状态下接收端光束传输扩散特性经3 km传输后的变化趋势。最后针对整体链路推导了链路余量和链路可靠性表达式, 为空间光通信系统选择最佳光束类型、系统设计参数以及链路预算分析提供理论依据。

关键词:

空间光通信; 大气信道; 激光特性; 链路预算

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2020.10.013

文章编号: 1007-3043(2020)10-0063-05

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Firstly, for space optical communication system applied in atmospheric channel, the types and characteristics of five kinds of common transmission light are introduced. Then according to the deduced expressions of beam size and phase front radius of curvature, the propagation and diffusion characteristics of 1550 nm laser beam with a beam size of 2 cm at the receiving end after 3 km transmission are simulated under different coherence conditions. Finally, the expressions of link margin and link reliability for whole communication link are derived. It provides a theoretical basis for selecting the best beam type, system design parameters and link budget analysis of space optical communication system.

Keywords:

Space optical communication; Atmospheric channel; Laser characteristics; Link budget

引用格式: 刘大畅, 曾晶, 孙石峰, 等. 大气信道中空间光通信的性能预算[J]. 邮电设计技术, 2020(10): 63-67.

0 引言

空间光通信中的光波随机特性相较于射频通信和光纤通信, 会受到大气信道中光湍流的影响, 需要充分理解激光在大气信道中的传播理论特性, 进而分析光湍流对空间光通信系统性能的影响机理。早在上世纪六十年代, 国内外学者就展开了针对空间光通信系统大气信道理论的研究, 经过数十年的研究积累和技术发展, 逐渐形成了光湍流对空间光通信系统影

响的分析理论^[1-2]。

光波在大气湍流中传输的基础理论是由 Chernov L A 和 Tatarskii V I 通过理论与实验的一致性验证的, 在 1960 年和 1961 年分别提出了大气湍流中平面波和球面波的传输波动方程^[3-4]。直至 2004 年, Andrews L C 提出的理论打破了经典理论的局限性, 提出了在弱湍流和强湍流 2 种情况下, 接收端强度起伏的二阶和四阶统计模型, 从而得到光强起伏方差计算模型, 进一步推导出平面波和球面的闪烁指数模型^[5]。2008 年 Wu B 等分析了在烟尘以及沙粒环境中传输的光信号的色散变换, 并推导了接收光信号空间色散与角色散

收稿日期: 2020-09-03

的关系^[6]。

目前国内的科研院校等研究团队在激光大气传输方面也取得了一些研究进展。比如中科院安徽光机所在2008年研究了部分相干光在大气湍流中的传输特性。哈尔滨工业大学研究团队针对不同调制方案通信系统,分析并比较了光波在大气信道中的性能。2009年长春理工大学团队系统地总结了各种大气湍流效应对光通信的影响形式^[7-8]。

本文首先阐述空间光通信的不同传输光类型经过大气湍流的传输特性区别,然后从光场表达式出发,推导了描述光束经过湍流的2个重要参数光束尺寸和相前曲率半径的表达式,并模拟了接收端光束传输扩散特性在不同相干性状态下随距离的变化趋势,最后针对空间光通信系统整体链路,根据接收端的信号功率以及数据速率的表达式,从多个方面推导了链路余量和链路可靠性的表达式。

1 空间光通信的传输光类型

在空间光通信系统中,经过大气湍流的信号到达探测器端时,信号强度会产生波动,从而影响整个通信系统的性能。为了减少空间光通信链路中大气湍

流对光信号的影响,需要研究不同类型传输光的变化特征(见图1),如平面波、球面波、高斯光束、贝塞尔光束等,选择应用在空间光通信系统中的最佳光束类型^[9]。

a) 平面波是指其相位面是平行的电磁波,当平面波经过随机介质传播到达探测器表面时,其振幅和相位都发生了波动。

b) 球面波是指相位面是球面的电磁波,当空间光通信的源被认为是点光源的时候可以假定为球面波。

c) 高斯光束是一种横向电磁场和强度接近高斯方程的电磁波,最重要的特点是高斯光束经过透镜后依然是另一个高斯光束。大多数激光器的基横模和激光器光学谐振腔出射的基模都是一种近似高斯光束。

d) 非衍射光束是指完全消除衍射的理想光场,这种光束通过大气湍流受到的影响比其他光束要小,适合于长远距离的空间光通信系统。在实际中,只能实现接近理想的非衍射光束,其光束强度取决于传播坐标,但在定义区域长度的传播区域内,光束轮廓几乎保持不变。

e) 贝塞尔光束是一种非衍射的自愈型光束,如果

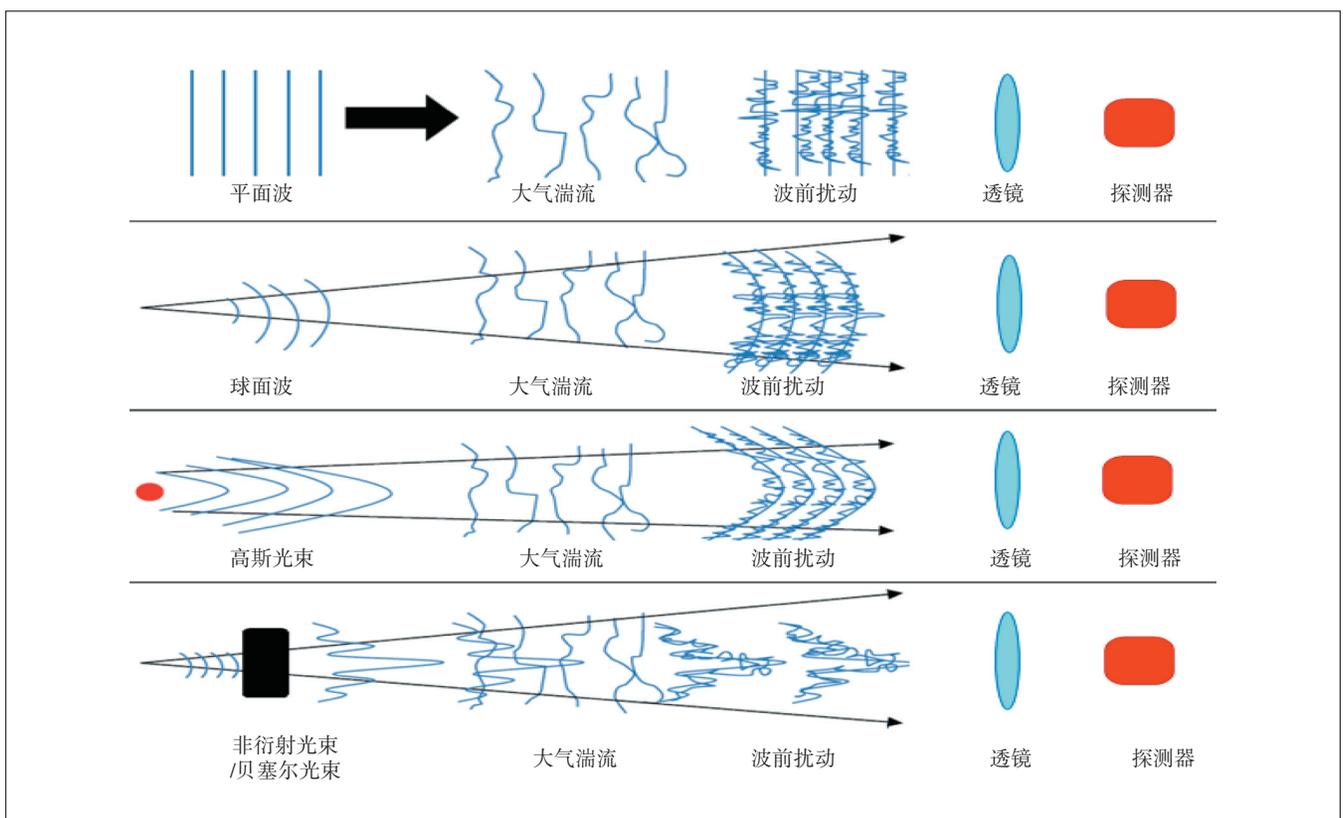


图1 空间光通信常见光束类型及其经过大气湍流的情况

一部分光束在一点被遮挡了, 沿着光轴方向的下一点会重新形成光束, 这一点特性在空间光通信领域将非常有应用价值。在实际中, 可以用轴棱锥或圆锥透镜聚焦高斯光束来产生近似的贝塞尔光束。

2 大气信道中激光传输特性

对于空间光通信系统来说, 当激光束与大气湍流相互作用时, 路径中大气的随机波动导致激光束功率在时间和空间上发生随机的起伏, 从而增加了通信系统的误码率。一方面, 光湍流模型可以估算特定地理位置和特定时间下的光湍流水平, 另一方面, 基于激光束在大气信道的传输理论框架来讨论激光束在光湍流传输过程中的真实情况, 从而可以充分描述光湍流对空间光通信的影响, 推算在各种应用场景下, 激光束在大气信道的各方面性能变化, 最优系统性能条件下, 研发人员可以很好地权衡各种设计细节参数, 并更好地选择通信系统的站点位置。

首先考虑激光束在大气空间的传输情况, 设激光束是一个简单的抛物线波前相位包络的高斯光束模型, 该模型广泛应用于激光束在随机介质中传播状况的研究, 可以完全表征聚焦或发散的激光束^[10]。那么沿 z 轴传播的单位振幅、低阶轴旁高斯光束在 $z=0$ 处的大气空间电磁场表达式为:

$$U(r, 0) = \exp\left[-\left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{jk}{2R_0}\right)r^2\right] \quad (1)$$

式中:

ω_0 ——发射光束半径

R_0 ——相前曲率半径

k ——光波数, $k=2\pi/\lambda$

r ——发射面光束中心的横向距离, $r=(x^2+y^2)^{1/2}$

光束传输了距离 z 之后的光场表达式变为:

$$U(\rho, z) = \frac{\exp(jkz)}{\hat{r} + j\hat{z}} \exp\left[-\frac{1}{\hat{r} + i\hat{z}} \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{jk}{2R_0}\right)\rho^2\right] \quad (2)$$

式中:

ρ ——接收面光束光轴的横向距离, $\rho=(x'^2+y'^2)^{1/2}$

式(2)中描述发射光束的2个关键参数表达式分别为:

$$\begin{cases} \hat{r}(z) = \frac{R_0 - z}{R_0} \\ \hat{z} = \frac{z}{z_d} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

\hat{r} ——归一化聚焦参数, 表征最佳聚焦条件 $R_0=z$ 时波前曲率偏离光束的聚焦特性

\hat{z} ——归一化距离

z_d ——衍射距离, $z_d = k\omega_0^2/2$

在这个表达式中, 会聚光束用正 R_0 表示, 离焦光束用负 R_0 表示。在束腰位置 R_0 是无穷的, 光束尺寸取最小值。根据聚焦参数的大小分类, $\hat{r} < 1$ 时称为会聚光束, $\hat{r} = 1$ 时称为准直光束, $\hat{r} > 1$ 时称为离焦光束。另外 \hat{r} 和 \hat{z} 都是关于传播距离 z 的函数。那么大气空间激光束在接收端的特性表达式为:

$$\begin{cases} \hat{r}_{rec}(z) = \frac{R(z) - z}{R(z)} \\ \hat{z}_{rec}(z) = \frac{z}{0.5k\omega^2(z)} \end{cases} \quad (4)$$

和发射光束参数一样, \hat{r}_{rec} 和 \hat{z}_{rec} 也是关于 z 的函数。在接收平面的光束尺寸 $\omega(z)$ 和相前半径曲率 $R(z)$ 关于发射光束参数的表达式分别为:

$$\begin{cases} \omega(z) = \omega_0 \sqrt{\hat{r}^2 + \hat{z}^2} \\ R(z) = \frac{z(\hat{r}^2 + \hat{z}^2)}{\hat{r}(1 - \hat{r}) - \hat{z}^2} \end{cases} \quad (5)$$

根据波数尺寸 $\omega(z)$ 得到接收端的平均强度表达式为:

$$I(\rho, z) = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \exp\left(\frac{-2\rho^2}{\omega^2(z)}\right) \quad (6)$$

当光束经过存在光湍流的大气传输时, 经过 z 距离传输后的光束尺寸表达式变为:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{\hat{r}^2 + \xi\hat{z}^2} \quad (7)$$

式中:

ξ ——总相干参数, $\xi = \xi_s + 2\omega_0^2/\rho_0^2$, 其中 $\rho_0(z) = (0.55C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$ 是在光湍流下传播的球面波相干长度

ξ_s ——携带信号的激光束在发射端的空间相干性, $\xi_s=1$ 代表相干光束, $\xi_s>1$ 代表部分相干光束

基于式(7)可以计算得到在中湍流 $C_n^2 = 10^{-14} m^{-2/3}$ 条件下, 假设激光光束波长为1550 nm, 发射光束尺寸 ω_0 为2 cm, 空间相干性 ξ_s 分别取1、100、200、300、400、500这6个不同数值代表不同的相干性状态, 接收端获得最佳光束占比的理想的传输扩散特性如图2所示。

由图2可知波长为1550 nm的聚焦光束经过中湍流传输3 km后, 发射光束尺寸从2 cm变成7.67 cm, 但理想的相干光束条件很难实现, 一旦 ξ_s 增加到100、

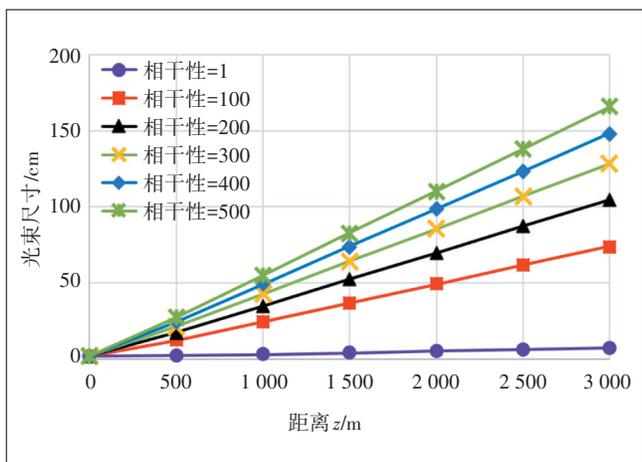


图2 接收端光束传输扩散特性随距离的变化趋势

200、300、400、500, 对应的光束尺寸分别为 74.07 cm, 104.73 cm, 128.26 cm, 148.10 cm, 165.58 cm。通过在发射孔径前直接放置一个相位扩散器, 可以增加接收端的波数, 但同时也会减少入射功率, 所以不能一味地增加接收光尺寸, 要通过适当的接收光束尺寸来平衡波数和功率^{[7][11]}。

3 大气信道中空间光通信链路预算分析

评价空间光通信系统的性能还可以参考很多参数, 比如功耗、发射功率有效性、大气通道可用带宽、系统信噪比、数字通信系统的误码率等。空间光通信系统的整体性能还可以通过链路预算公式来量化表示, 包括链路余量和链路可靠性, 该公式利用各种通信系统的参数, 包括发射功率、传输损耗、接收灵敏度等在不同通信场景下进行链路计算。在空间光通信大气信道中, 总体的路径损失一部分是几何损失, 另一部分是大气衰减造成^[12]。几何损失是由于激光光束的发散性, 导致只有一部分光功率能够进入探测器, 如图3所示。

下面研究计算光通信链路性能的几项必要参数, 考虑两点之间的大气空间光通信, 假设激光发射机天线的增益是 $G_T = 16/\theta_T^2$, 其中 θ_T 是发射机发散角, 传输

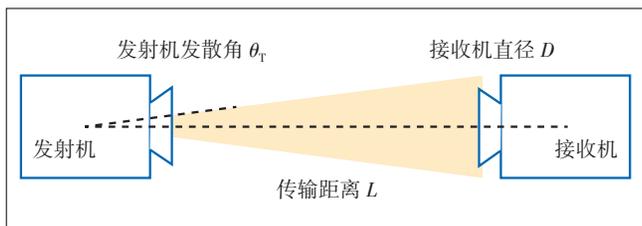


图3 通信链路几何损失示意图

总功率是 P_T , 发射机光效率是 τ_T , 在通信系统探测端接收到的信号功率表达式为^[13]:

$$P_R = P_T G_T \tau_T \tau_{ATM} S G_R \tau_R \quad (8)$$

式中:

τ_{ATM} ——在激光发射波长处的大气传输值, 在波长 λ 处与大气衰减参数 α 的关系为 $\alpha = -10 \ln(\tau_{ATM})/L$

S ——大气空间损耗, $S = (\lambda/4\pi L)^2$, 其中 L 是传输距离

G_R ——接收天线增益, $G_R = (\pi D/\lambda)^2$, 其中 D 是接收机直径

τ_R ——接收机光效率

那么接收信号的表达式可以推导为:

$$P_R = \frac{P_T \tau_T \tau_R D^2 10^{-\alpha L/10}}{\theta_T^2 L^2} \quad (9)$$

链路余量也是光通信链路的一个重要参数, 表示在一定速率下可接收功率与达到特定 BER 接收功率的比。已知实际接收到的光功率 P'_R 与速率 R 和接收灵敏度 N_b 的关系为 $P'_R = N_b R E_p$, 数据速率表达式为:

$$R = \frac{4 P_T \tau_{opt} \tau_{ATM} A}{\pi \theta_T^2 L^2 E_p N_b} \quad (10)$$

式中:

τ_{opt} ——发射机和接收机的光效率

A ——接收机孔径面积

E_p ——光子能量

那么链路余量 M 的表达式为:

$$M = \frac{P_R}{P'_R} = \frac{\pi \tau_T \tau_R D^2 10^{-\alpha L/10}}{4 \tau_{opt} \tau_{ATM} A} \quad (11)$$

另外一个链路参数是光链路可靠性, 它表示在一定 BER 下保证链路的功能, 用可接受的功率范围来定义其动态范围。假设用传输损耗 L_p 代表所有平均损失, dBm 为单位, 可以得到光链路可靠性 LM 表达式:

$$LM = P_T - L_p - N_b \quad (12)$$

设定一个饱和值 P_s , 当接收功率 $P_R > P_s$ 时接收机是饱和的, 如果 $P_R < N_b$ 就是没有达到信噪比。另外链路可靠性可以通过数据速率超过需要值的时间百分比 $T_{av}(\%)$ 来量化表示, 也可以用由大气效应引起的额外功率损耗 $L_A < LM$ 的概率来表示, 假设衰减系数 α_A (dB/km) 的概率密度用 $p(\alpha_A)$ 来表示:

$$T_{av} = 100\% \int_0^{\alpha_{A,lim}} p(\alpha_A) d\alpha_A \quad (13)$$

其中 $\alpha_{A,lim}$ 是衰减系数的极限值, 对于距离 L , $p(\alpha_A)$ 的概率分布可以通过长时间测量实际链路接收

到的信号电平或在同地点之前测量的数据来确定^[14]。如果知道通信系统所处大气信道 α_A 的概率分布,通过衰减系数极限就可以得到链路可靠性。由此可以根据链路余量和链路可靠性为空间光通信链路预算分析提供理论依据。

4 结论

本文首先详细介绍了常应用于空间光通信的不同传输光类型,包括平面波、球面波、高斯光束、贝塞尔光束等经过大气湍流的传输特性区别,为应用在空间光通信系统中的最佳光束类型提供选择依据;紧接着,基于光场表达式推导了描述光束经过湍流的2个重要参数表达式,一个是光束尺寸,另一个是相前曲率半径,并在中湍流条件下,模拟了发射光束尺寸为2 cm的1 550 nm激光束,在不同相干性状态下接收端光束传输扩散特性经3 km传输的变化趋势,为今后设计接收端细节参数以及选择通信系统的站点位置提供理论分析方法;最后针对空间光通信系统整体链路,根据发射功率、传输损耗、接收灵敏度、接收端信号功率以及数据速率的表达式,从多个角度推导了链路余量和链路可靠性的表达式,为空间光通信链路预算分析提供理论依据。

另外,大气信道中空间光通信的性能研究还可以从其他几个方面入手,比如信道编码和信道建模,对空间光通信信道模型及信道容量进行分析,研究光在大气信道的衰落和随机变化特性,为进一步改善大气湍流对传输光的影响提供理论支持。

参考文献:

[1] 王芳芳. 大气对相干光通信探测方式的影响[D]. 西安:西安电子科技大学, 2016.
[2] TRISNO S. Design and Analysis of Advanced Free Space Optical Communication Systems[D]. Maryland: University of Maryland, College Park.
[3] CHERNOV L A, SILVERMAN R A, SANDERS J L. Wave propagation in a random medium[M]. MCGRAW-HILL, 1960.
[4] TATARSKI V I, SILVERMAN R A, CHAKO N. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. MCGRAW-HILL, 1961.
[5] KIRIAZES J J, PHILLIPS R L, ANDREWS L C. Analysis of fading for a free-space optical communication link subject to atmospheric scintillation[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2004: 253-264.
[6] WU B, MARCHANT B, KAVEHRAD M. Channel modeling of light signals propagating through a battlefield environment: analysis of

channel spatial, angular, and temporal dispersion[J]. Applied Optics, 2007, 46(25): 6442.
[7] 李菲. 晴空大气湍流对自由空间光通信影响及校正研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.
[8] 冯剑锋. 陆地自由空间光通信系统性能分析[D]. 吉林:吉林大学, 2017.
[9] MAJUMDAR A K. Advanced Free Space Optics (FSO)[M]. Springer New York, 2015.
[10] 武云云. 自适应光学技术在大气光通信中的应用研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2013.
[11] RICKLIN J C, HAMMEL S M, EATON F D, et al. Atmospheric channel effects on free-space laser communication [M]//Free-Space Laser Communications. Springer New York, 2006: 111-158.
[12] 王萍萍. 空间光通信系统的研究与设计[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
[13] MAJUMDAR A K. Free-space laser communication performance in the atmospheric channel [M]//Free-Space Laser Communications. Springer New York, 2005: 57-108.
[14] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
[15] 詹伟达, 李洪祚, 王志坚, 等. 深空光通信链路特性分析及功率预算[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011(5): 55-60.
[16] 韩天愈. 自由空间光通信(FSO)大气信道传输关键技术的研究[D]. 广东工业大学.
[17] 张文涛, 朱保华, 李贤, 等. 空间光通信APT系统中大气信道对激光信号传输影响的分析和研究[J]. 激光杂志, 2004(01): 56-58.
[18] 李晓芳. 自由空间光通信大气信道自适应补偿及接收技术研究[D]. 济南:山东大学, 2019.
[19] 霍泽人. 自由空间光通信系统设计及大气信道模型分析[D]. 北京:北京邮电大学, 2004.
[20] 韩睿. 浅谈自由空间光通信技术及其应用[J]. 中国新通信, 2018, 20(17): 120.
[21] 樊雅琴. 自由空间光通信信道编码与调制的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2014.
[22] 吴君鹏, 宋路. 强湍流信道中含有瞄准误差的空间光通信中断概率分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 103-108.

作者简介:

刘大畅, 毕业于中国科学院大学, 工程师, 博士, 主要从事电子信息与光通信专业技术工作; 曾晶, 毕业于湖南大学, 广东南方电信规划咨询设计院有限公司咨询院院长, 高级工程师, 硕士, 主要从事通信与信息化规划、咨询工作; 孙石峰, 毕业于长春邮电学院, 广东南方电信规划咨询设计院有限公司副总工程师, 教授级高级工程师, 学士, 主要从事数据通信网络的规划、咨询、设计及技术管理工作; 谢寅亮, 毕业于南京邮电学院, 广东南方电信规划咨询设计院有限公司总工程师, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事物联网、移动通信、数据与通信等领域的工作; 吴绍华, 毕业于哈尔滨工业大学, 哈尔滨工业大学(深圳)通信工程研究中心副教授, 博士, 主要从事空天通信、5G通信、深空通信、车联网等领域的研究工作。