

星地链路激光通信地面站址选择及大气影响研究

娄岩^{1,2} 赵义武^{1,2*} 陈纯毅^{1,2}

¹长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022

²长春理工大学空地激光通信技术重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 综合考虑我国方量的地理分布和气候特点, 提出了一项星地激光通信的地面多址布站方案, 仿真分析了大气散射引起的衰减及大气湍流对星地链路的影响。利用卫星工具包(STK)软件分析了地球静止轨道(GEO)卫星与5个地面站的链路特性。结果表明, 西藏的阿里站同时具有最理想的经度和纬度, 地平角为 52° , 最有利于开展星地激光通信。在一定天气条件下, 随着波长的增加, 对应的散射引起的功率衰减减小; 随着能见度的降低, 大气散射引起的光功率平均衰减增加; 随着地平角的升高, 大气引起的功率平均衰减减小; 波长越长, 闪烁指数越小; 随着接收孔径直径的增大, 闪烁指数快速减小; 随着海拔高度的增加, 闪烁方差减小。该研究为星地激光通信外场实验提供了一定的理论依据。

关键词 光通信; 星地激光通信; 多址布站; STK; 大气湍流; 闪烁指数

中图分类号 TN391.9 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP51.120602

Atmosphere Impact and Ground Station Selection for Satellite-to-Ground Laser Communication

Lou Yan^{1,2} Zhao Yiwu^{1,2} Chen Chunyi²

¹*NUERC of Space and Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

²*Fundamental Laboratory on Space-Ground Laser Communication Technology, Changchun University of
Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A multiple ground stations scheme satellite-to-ground laser communication is proposed with the geographical distribution of cloud cover and climatic features considered. The effect of attenuation caused by atmospheric scattering and atmospheric turbulence is analyzed for different paths from geosynchronous earth orbit (GEO) satellites to five ground stations. Link characteristics between the GEO satellite and the five ground stations are simulated using the satellite tool kit (STK) software. The results show that Ali region in Tibet has the best longitude and latitude conditions with a horizontal angle of 52° , which is most beneficial to laser satellite-to-ground communications. The power attenuation shows a decreasing trend as the wavelength increases due to scattering under the same weather conditions. The optical power attenuation is intensified as visibility falls. The average power attenuation caused by atmosphere decreases along with the rise of horizontal angle. The longer the wavelength λ , the smaller the scintillation index; the scintillation index decreases rapidly when the diameter of receiving aperture increases; the scintillation variance is improved as altitude increases. The analysis is helpful with field experiments of satellite-to-ground laser communication.

Key words optical communications; satellite-ground laser communication; multiple ground stations; STK; atmospheric turbulence; scintillation index

OCIS codes 060.2605; 060.3510; 060.4510

收稿日期: 2014-07-22; 收到修改稿日期: 2014-09-03; 网络出版日期: 2014-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(61275080)、吉林省科技发展计划(20140520115JH)

作者简介: 娄岩(1981—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事空间激光通信技术方面的研究。

E-mail: louyan2008@126.com

* 通信联系人。E-mail: 719731551@qq.com

1 引言

由于星地链路自然环境复杂多变,空地光通信通过大气信道进行传输会受到背景光以及大气湍流效应的影响,必须考虑激光同大气之间的相互作用。大气内的云覆盖、雾、霾和其他降水使激光传输信号严重衰减,其中大气分子和气溶胶及湍流等随机介质对激光信号的吸收和散射会导致卫星接收信息误码或通信中断。因此进行空地激光通信链路通信时必须考虑大气效应影响的问题。

本文提出了一种星地链路激光通信的地面多址布站方案,并用卫星工具包(STK)软件仿真分析了地球静止轨道(GEO)卫星与5个地面站的链路特性以及大气散射和大气湍流对星地链路激光通信的影响。

2 星地链路激光通信地面站选址

2.1 地面多址布站

星地通信链路是整个天基信息系统最重要的链路,通常需要保持整条链路的畅通。由于受到云层和恶劣天气的影响,单站的星地链路无法实现全天候工作,需要将激光通信与射频通信结合,共同构建高速、全天候的数据传输系统。提高星地可通率,首先应该避开云层的遮挡问题,主要技术措施之一就是地面多址布站。使用 N 站分集时的可通率为 $P_0 = 1 - \prod_{i=1}^N p_i$,其中 p_i 为第 i 站的不可通概率^[9]。

2.2 我国 GEO 卫星的轨道规划

假设未来 GEO 中继卫星分布在东经 10.5°、东经 77°和东经 176.8°的赤道轨道平面上,通过 STK 仿真,仅有东经 77°中继卫星可实现中国领土的全覆盖,而且信道的天顶角普遍较小,最适合开展星地通信。

2.3 我国地面站的选取

- 1) 吉林长春站:北纬 43°48'52.54",东经 125°19'38.68",海拔高度为 211 m;
- 2) 云南昆明站:北纬 25°02'03.80",东经 102°43'16.62",海拔高度为 1899 m;
- 3) 海南站:北纬 20°04'48.18",东经 110°17'21.48",海拔高度为 20 m;
- 4) 新疆乌鲁木齐站:北纬 43°49'23.92",东经 87°36'44.64",海拔高度为 846 m;
- 5) 西藏阿里站:北纬 32°27'15.63",东经 81°11'50.41",海拔高度为 5022 m。

其中西藏阿里站为国家天文台新选地址,具有得天独厚的海拔优势。海拔高度可达 5000 m 以上,年平均云层覆盖率很低,非常适合开展光学观测和实验。同时该地面站在经度和纬度上也非常适合位于东经 77°的 GEO 卫星建立链路。

2.4 星地链路特性仿真结果

中国境内 5 站与东经 77°的 GEO 卫星链路特性如表 1 所示。从表中可以看出,5 个地面站中,纬度越低,对应通信视轴的地平角越高;经度越靠近中继星的经度(东经 77°),对应的视轴地平角越高。为了减小大气影响,尽量提高信道的地平角。5 个地面站中,长春站在经度和纬度方面都不理想,对应的地平角仅有 21°,最为不利;乌鲁木齐站经度比较理想、纬度偏高,地平角为 39°;海南站的纬度比较理想、经度偏高,地平角为 46°;昆明站则同时具有较理想的经度和纬度,地平角为 49°,比较有利;西藏的阿里同时具有最理想的经度和纬度,地平角为 52°,最有利于开展星地链路激光通信。

表 1 东经 77°的 GEO 卫星与 5 个地面站链路特性 STK 仿真结果

Table 1 Simulation results of GEO satellite with east longitude of 77° to five ground stations by STK

Index	GEO-Changchun	GEO-Urumqi	GEO-Kunming	GEO-Hainan	GEO-Ali
Visual rate /%	100	100	100	100	100
Duration/s	86400	86400	86400	86400	86400
Horizontal angle/(°)	21	39°	49	46	52
Com distance /km	39471	37869	37121	37356	36935

3 大气信道对星地链路的影响分析

3.1 大气吸收和散射效应

大气对光波的吸收和散射的共同影响表现为激光传输的大气衰减,可用大气透射率来度量大气衰减的程度。单色波的斜程路径传输大气透射率 $T_{\text{atm}}(\lambda)$ 可表示为^[4]

$$T_{\text{atm}}(\lambda) = \exp\left[-\sec\phi \int_0^H k_c(\lambda, h) dh\right], \quad (1)$$

式中 λ 为激光波长, $k_c = k_s + k_a$ 为大气消光系数, H 为斜程路径的垂直高度, h 为海拔高度, ϕ 为斜程路径的天顶角。用 Mordertran 软件对东经 77° 的 GEO 卫星对 5 个不同地面站的斜程大气散射引起的衰减进行仿真,结果如图 1 所示。所有情况下观测者同太阳之间的方位角为 0°, 并假定气溶胶模型为城市能见度 5 km 模型。

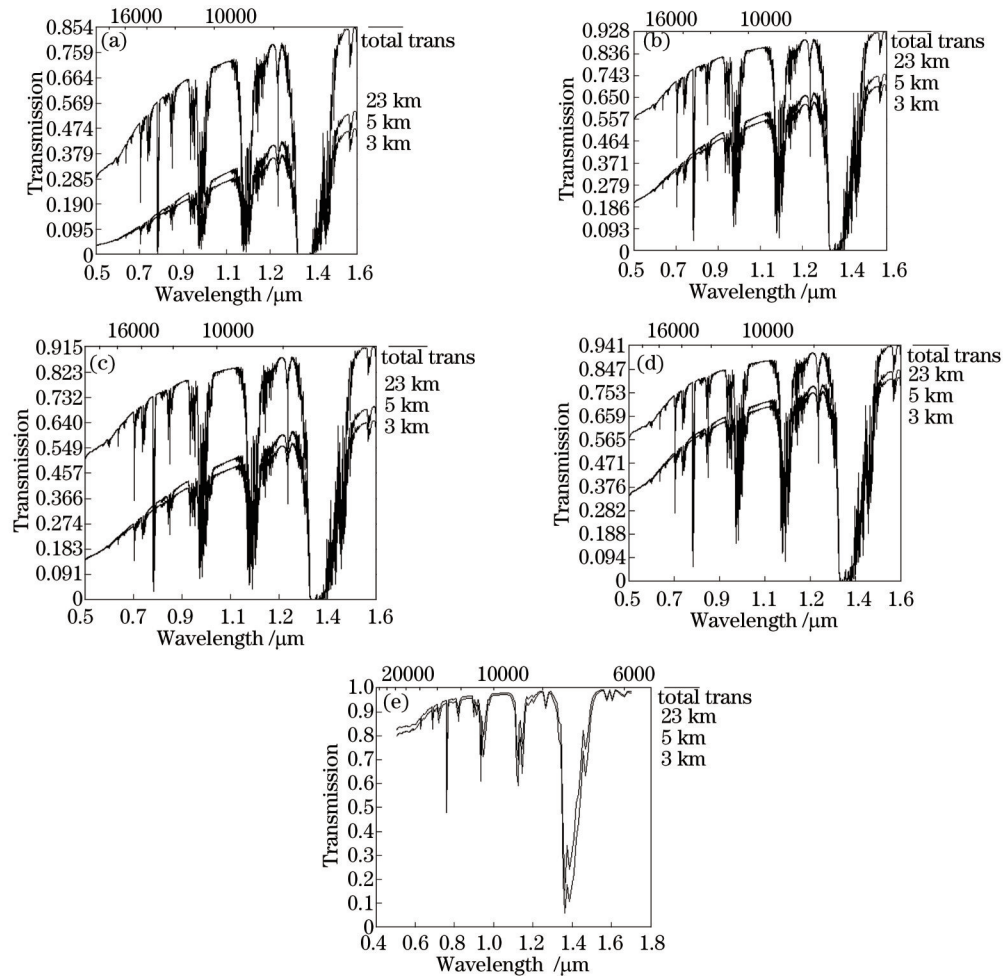


图 1 激光大气透射率随波长的变化关系。(a) 长春站; (b) 昆明站; (c) 海南站; (d) 乌鲁木齐站; (e) 阿里站

Fig.1 Atmospheric transmission changes with laser wavelength. (a) Changchun station; (b) Kunming station; (c) Hainan station; (d) Urumqi station; (e) Ali station

不同星地链路在 800、1060、1550 nm 波段的大气透射率仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同链路的大气透射率仿真结果

Table 2 Simulation results of atmospheric transmission of different links

Ground station	Altitude /m	Horizontal angle /(^{\circ})	Visibility /km	Transmission		
				800 nm	1060 nm	1550 nm
Changchun	211	21	5	0.15	0.25	0.43
Kunming	1899	49	5	0.63	0.70	0.73
Hainan	20	45	5	0.34	0.48	0.60
Urumqi	846	39	5	0.40	0.60	0.65
Ali	5022	57	5	0.91	0.93	0.92

由仿真结果可得出以下结论:

1) 相同天气条件下,随着波长的增加,斜程大气散射引起的功率衰减呈减小趋势。对于长春站,当能见度为3 km时,800 nm的透射率为0.15,而1550 nm的透射率可达0.43。这意味着激光波长越长,大气散射引起的损耗越小。若信标光采用800 nm波段,通信光采用1550 nm波段,信标光的功率衰减大于通信光。

2) 随着能见度的降低,大气散射引起的光功率平均衰减加剧。对于长春站1550 nm的波长,当能见度为23 km的晴朗天气时,斜程信道引起的功率损耗仅为0.7 dB(对应透射率0.85);而能见度为3 km时,斜程信道引起的功率损耗则达到4 dB(对应透射率0.4)。能见度越高,大气散射所引起的功率衰减越小,所以需要优化选取单站可通率和链路损耗裕量。

3) 随着地平角的升高,大气引起的功率平均衰减较小。GEO-乌鲁木齐链路的信道地平角 39° ,而GEO-长春链路的信道地平角为 21° ,在相同的3 km能见度条件下,对应的透射率分别为0.65和0.43。所以,地平角较大的链路引起的大气损耗较小。

4) 随着地面站海拔高度的提高,斜程大气散射引起的损耗减小。昆明站和海南站的信道倾角分别为 49° 和 45° ,比较接近,但是昆明的海拔高度为1899 m,而海南仅为20 m。在3 km能见度条件下,对于1550 nm的透射率分别为0.73和0.60。阿里站海拔为5022 m,星地信道的斜程功率损失小于1 dB,条件非常理想,而且受到能见度影响不大,可提高单站可通率。

3.2 典型地区3种吸收分子大气透射率

主要分析典型地区长春、海南、乌鲁木齐和阿里等城市大气模式中3种主要吸收分子 H_2O 、 O_3 及 N_2O 的透射率,图2分别是各地区大气模式中的3种主要分子的透射率,长春、海南、阿里主要均是由于 H_2O 分子的影响,其他2种分子的最大透射率相对较小;乌鲁木齐地区相对中纬度地区来自 N_2O 、 O_3 及 H_2O 分子的透射率相差较小。

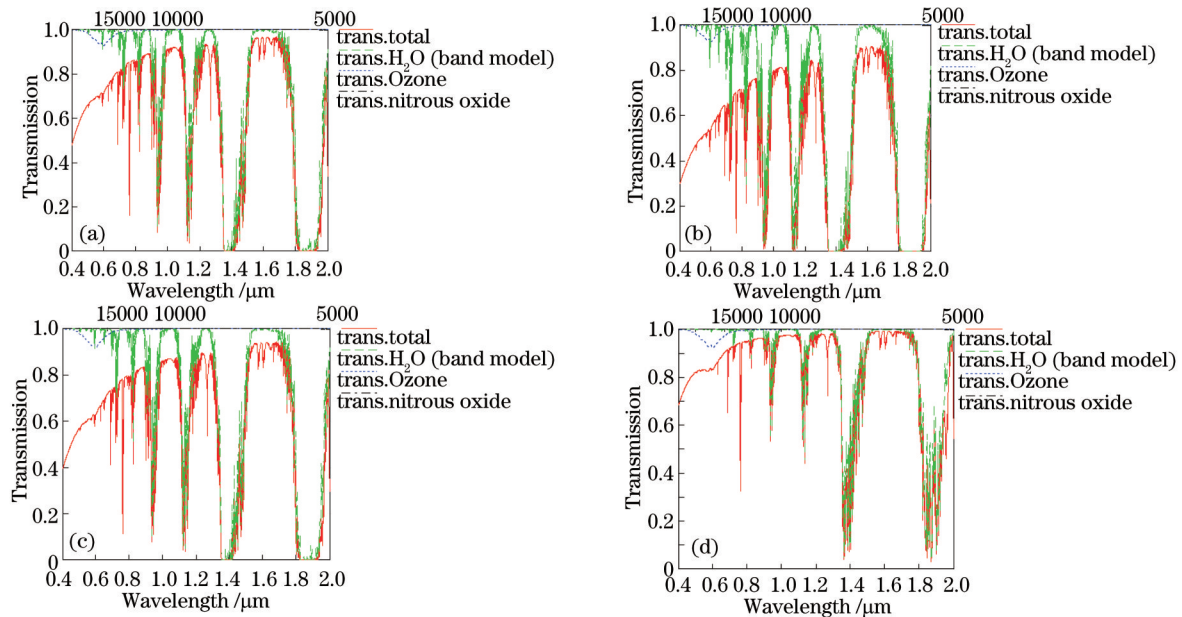


图2 典型地区3种吸收分子(H_2O 、 O_3 和 N_2O)大气透射率。(a) 长春站;(b) 海南站;(c) 乌鲁木齐站;(d) 阿里站

Fig.2 Atmospheric transmission of three kinds of absorption molecules (H_2O , O_3 , N_2O) in different areas. (a) Changchun station; (b) Hainan station; (c) Urumqi station; (d) Ali station

3.3 大气湍流闪烁效应

对于星地激光通信下行链路来说,当传输距离为几百公里以上时,能见度数据的收集是不准确的,湍流强度也很难精确地估计,激光器的发射源在大气层外面,因此,利用平面波模型计算光束中心附近的闪烁指数,结果与高斯光束模型计算结果的差异可以忽略。由Rytov方差简化的平面波闪烁指数定义为^[5-6]

$$\sigma_i^2 = 2.606k^2 \sec \varphi \int_{h_0}^H C_n^2(h) \int_0^\infty \kappa^{-8/3} \times \left\{ 1 - \cos \left[\frac{(h-h_0)\kappa^2 \sec \varphi}{k} \right] \right\} d\kappa dh = 2.25\mu_1 k^{7/6} (H-h_0)^{5/6} \sec^{11/6} \varphi, \quad (2)$$

$$\mu_1 = \int_{h_0}^H C_n^2(h) \left(\frac{h-h_0}{H-h_0} \right)^{5/6} dh, \quad (3)$$

式中 σ_1^2 为光强闪烁指数方差; H 为卫星距地高度(m); h 为海拔高度(m); h_0 为地面海拔高度(m); $k=2\pi/l$ 为空间波数, l 为湍流涡旋的尺度; φ 为发射光束斜程路径的天顶角; κ 为折射率起伏空间波数; μ_1 为折射率结构常数路径积分。

表征大气湍流强弱程度的物理量是折射率结构常数 C_n^2 , 反映了激光在大气中传输时所受到湍流影响的强弱。对于激光大气斜程传输而言, 折射率结构常数 C_n^2 是一个与海拔高度相关的量。本文使用 Hufnagel-Valley 折射率结构常数模型来分析激光传输的闪烁效应^[7-8]。

$$C_n^2(h) = 0.00594(v_v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A_{nv} \exp(-h/100), \quad (4)$$

式中 A_{nv} 为地面附近折射率结构常数的经验值; v_v 为垂直路径风速(m/s),

$$v_v = [1/15000 \int_{5000}^{20000} v_h^2(h) dh]^{1/2}, \quad (5)$$

式中 $v_h(h)$ 为高度 h 处的水平风速正交分量。本文取 $v_v=21$ m/s, $A_{nv}=1.7 \times 10^{-14} \text{m}^{-2/3}$ 。

星地链路激光大气传输孔径平均因子随孔径尺寸变化的公式为

$$A = \frac{1}{1 + A_0^{-1} \left(\frac{D^2}{\lambda h_0 \sec \varphi} \right)^{7/6}}, \quad (6)$$

式中 $A_0 \approx 1.1$; D 为接收孔径直径; 海拔高度

$$h_0 = \left[\frac{\int_{\text{path}} dh C_n^2(h) h^2}{\int_{\text{path}} dh C_n^2(h) h^{5/6}} \right]^{6/7}. \quad (7)$$

大气折射率随机起伏会影响激光束的传播, 进而导致远场光斑在空域上存在随机分布, 对于有限接收光学口径, 其所接收的光功率在时域上存在随机波动; 其次, 从太空发射的激光束到达大气顶部后, 在入射到地面接收机之前会产生波前畸变, 进而导致会聚到焦平面的光斑产生散斑, 高速率的探测器(或光纤端面小于 $50 \mu\text{m}$) 又会对会聚后的散斑($100 \mu\text{m}$) 进行二次空间采样, 最终引起功率损耗和光强起伏。大气湍流闪烁效应将引起接收光功率的强度起伏, 在弱湍流条件下, 其概率密度近似高斯分布, 如图3所示。通常情况下, 大气湍流闪烁效应强弱用起伏方差来描述。当起伏方差小于0.01时, 可视为弱湍流。

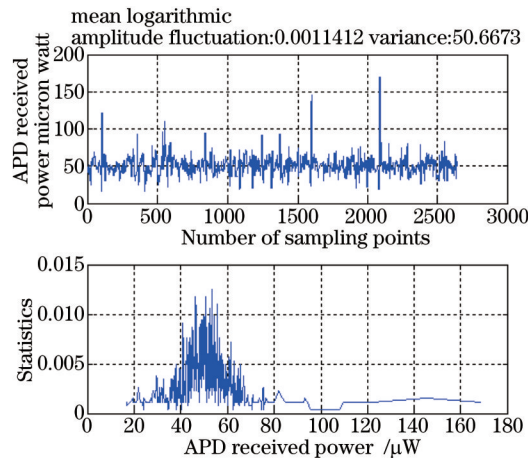


图3 大气湍流闪烁引起的光强闪烁及幅度概率密度曲线

Fig.3 Scintillation intensity and magnitude probability density caused by atmospheric turbulence

起伏方差的大小通常与大气折射率结构常数、链路距离、接收光学口径等因素有关。分别对东经 77° GEO 卫星与长春站、昆明站、海南站、乌鲁木齐站的激光通信链路进行仿真, 得出以下结论:

1) 从图4中可以看出, 没有考虑口径平滑效果前, 波长 λ 越长, 闪烁指数越小; 随着口径的增加, 闪烁指数与 λ 基本无关。

2) 随着接收孔径直径的增加, 闪烁指数快速减小。图4为昆明站和海南站在不同地面接收口径条件下

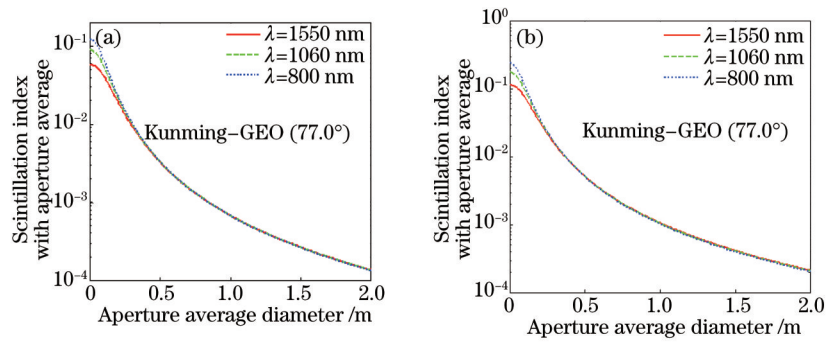


图4 地面接收口径对闪烁系数的平滑效应

Fig.4 Smoothing effect of ground receiving aperture on scintillation coefficient

的闪烁方差。当口径为0.5 m时,闪烁方差可小于0.01。如果接收孔径继续增大(超过1 m后),口径平滑效应减弱。

3) 随着海拔高度的提高,闪烁方差有所改善。在子口径条件下(横坐标接近0),昆明站的海拔高度为1899 m,对应的闪烁方差为0.07;海南站的海拔高度仅为20 m,对应的闪烁方差为0.11。当地面接收口径为1 m时,昆明站对应的闪烁方差小于0.001,海南站对应的闪烁方差也减小到0.002。

4) 随着信道地平角的减小,闪烁方差有所增加。信道倾角减小,意味着浓密大气信道的距离增加,等效大气折射率结构常数变大,闪烁方差增大。通过仿真获得以下结果:同样在1 m口径条件下,长春站的闪烁方差为0.007,乌鲁木齐站的闪烁方差为0.003,海南站对应的闪烁方差也减小到0.002,昆明站的的闪烁方差为0.001。

4 星地激光通信链路功率分析

通信光束若以衍射极限角发射,激光通信的链路方程可以简单描述为^[9]

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot \eta_{ot} \cdot L_r \cdot \eta_s \cdot L_{APT} \cdot G_r \cdot \eta_{or} \cdot \eta_\alpha, \quad (8)$$

式中 P_r 为探测器接收功率; P_t 为发射单元的发射功率; G_t 为发射光学天线增益; η_{ot} 为发射光学单元的效率; L_r 为自由空间损耗; η_s 为信道引起的功率损失(对于自由空间激光通信,其值近似为1,对于大气和海水信道,将存在不同程度的衰减); L_{APT} 为对准、捕获、跟踪(PAT)对准失配引起的功率损耗; G_r 为接收光学天线增益; η_{or} 为接收光学系统效率, η_α 为实际束散角与衍射极限角的额外功率损耗。

表3以GEO-地面站通信下行链路功率分析为例,给出了链路预算设计。系统利用离轴抛物面反射镜大口径平行光管发出的光聚焦到光功率计探头的光敏面上,测出极限接收状况下的出瞳光功率,由此出瞳光功率推算出接收灵敏度。测试结果为:误码率为 10^{-7} 时,通信接收灵敏度为-40 dB。采用大口径激光发射系统,当天顶角 ξ 为0,海拔高度为1 km,波长为1550 nm时,采用基于Hufnagel-Valley(H-V)模型的大气折射率结构常数计算得到的大气相干长度 r_0 为5.4 cm。估算时衰减和增强概率均假定为 10^{-2} ,在误码率为 10^{-6} 时,对光学地面站的光束束散角进行了优化选择,下行链路功率预算分析如表3所示。

表3 GEO-地面之间光通信链路预算设计分析

Table 3 Budget design analysis of GEO-ground optical communication link

Parameter	Down link /dB	Attention
Emission optical path loss	-1.55	Optical emission efficiency 0.7
Far-field loss	-1.75	Far-field loss
Free space loss	-60	Distance 40000 km, beam divergence angle 24 μ rad, receive caliber 1 m
Atmospheric scattering	-6	Altitude 1 km, visibility 5 km, horizontal angle 20
Atmospheric absorption	-1	Wave length 1550 nm
Scintillation loss	-2	Moderate turbulence conditions, horizontal angle 20°, receive caliber 1 m
Optical receiver system	-3	Including transmission and occlusion other than the overall efficiency
Safety margin	2.7	Leave some margin to adapt to weather

由表3计算结果表明,只要实际发射功率大于功率值38 dB,在上述湍流衰落条件下,仍然可以建立和地面站的光通信链路。因为在通信过程中,大气湍流的强度随时间、光学链路天顶角的变化而改变,因此在大气湍流条件下,为了抑制误码率的下降需要更大的功率裕量。

5 结 论

1) 分析了在我国星地链路地面站选址因素,通过STK仿真可知,5个地面站中,纬度越低,对应通信视轴的地平角越大;经度越靠近中继星的经度(东经77°),对应的视轴地平角越大。为了减小大气影响,尽量提高信道的地平角。西藏的阿里同时具有最理想的经度和纬度,地平角为52°,最有利于开展星地激光通信。

2) 通过仿真对不同链路的大气透射率进行了分析。相同天气条件下,随着波长的增加,斜程大气透射率增加,对应的散射引起的功率衰减呈减小趋势。随着能见度的降低,大气散射引起的光功率平均衰减加剧。随着地平角的升高,大气引起的功率平均衰减减小。随着地面站海拔高度的提高,斜程大气散射引起的损耗减小。

3) 对大气湍流光强闪烁及地面接收口径平滑效应进行了分析。波长 λ 越长,闪烁指数越小;随着接收孔径直径的增加,闪烁指数快速减小;随着海拔高度的提高,闪烁方差有所改善;随着信道地平角的减小,闪烁方差有所增加。

4) 对GEO-地面之间光通信链路预算进行设计分析。只要实际发射功率大于功率值38 dB,在给定湍流衰落条件下,仍然可以建立和地面站之间的光通信链路。

参 考 文 献

- 1 Toyoshima M, Yamakawa S, Yamawaki T, *et al.*. Ground-to-satellite optical link between Japanese laser communications terminal and European geostationary satellite ARTEMIS[C]. SPIE, 2004, 5338: 1-15.
- 2 Ma J, Jiang Y, Tan L, *et al.*. Influence of beam wander on bit-error rate in a ground-to-satellite laser uplink communication system[J]. Opt Lett, 2008, 33(22): 2611-2613.
- 3 Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, *et al.*. New method of aerosol extinction coefficient measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- 4 Zhai Chao, Wu Feng, Yang Qingbo, *et al.*. Simulation research of laser beam atmospheric propagation in free-space optical communication[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0505004.
翟超, 武凤, 杨清波, 等. 自由空间光通信中大气光束传输数值模拟研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0505004.
- 5 Lou Yan, Chen Chunyi, Jiang Huilin, *et al.*. Research on available probability for satellite-to-ground laser communication in slant path atmospheric turbulence[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(11): 1378-1383.
娄岩, 陈纯毅, 姜会林, 等. 星地斜程大气信道激光通信可通率研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(11): 1378-1383.
- 6 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.
姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- 7 Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y. Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles[J]. Opt Engng, 2000, 39(12): 3272-3280.
- 8 Wu Xiaoqing, Huang Yinbo, Mei Haiping, *et al.*. Measurement of non-Kolmogorov turbulence characteristic parameter in atmospheric surface layer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0601001.
吴晓庆, 黄印博, 梅海平, 等. 近地面层大气非Kolmogorov湍流特征参数测量[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0601001.
- 9 Wu Z S, Wei H Y, Yang R K, *et al.*. Study on scintillation considering inner- and outer-scales for laser beam propagation on the slant path through the atmospheric turbulence[J]. Progress in Electro-Magnetic Research, 2008, 80: 277-293.