

文章编号 1004-924X(2007)03-0308-06

星地光通信中 PAT 链路的衰落冗余

马 晶,高 宠,谭立英,于思源

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:在考虑大气闪烁、静态瞄准误差和瞄准抖动的影响下,导出了大天顶角和小天顶角传输链路的强度起伏概率密度函数,给出了跟踪中断概率随衰落冗余变化的关系表达式;最后分析了最佳的光束发散角,并对概率密度分布规律和跟踪中断概率随衰落冗余变化的规律进行了模拟分析。结果表明,对于上行和下行链路,光束发散角与瞄准抖动误差均方值的最佳比值为 4 和 6。在最佳光束发散角下,要想确保链路跟踪中断概率小于 10^{-3} ,上行链路需要 10 dB 的衰落冗余,下行链路需要 3 dB 的衰落冗余,克服了星地光通信中强度起伏对链路跟踪稳定性的影响,保证了在跟踪过程中链路所需要的衰落冗余。

关键词:星地光通信;跟踪中断概率;衰落冗余;概率密度函数;强度起伏

中图分类号:TN929.12 **文献标识码:**A

Fade budgets of PAT link in satellite-to-ground optical communications

MA Jing, GAO Chong, TAN Li-ying, YU Si-yuan

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To achieve enough fade budgets for reliable link in satellite-to-ground optical communications, the expressions for the total probability density functions of signal intensity fluctuation are derived at large zenith angles and small zenith angles considering atmospheric scintillation, static pointing error and pointing jitter and relation of the lost-tracking probability variable with fade budgets is given. Finally, the total probability density function and lost-tracking probability are simulated. Experimental results show that the ratio of the optimal beam divergent angle to the square root of the variance of the pointing jitter for uplink and downlink is 4 and 6; the required fade budget at a lost-tracking probability of 10^{-3} is 10 dB and 3 dB for uplink and downlink.

Key words: satellite-to-ground optical communication; lost-tracking probability; fade budget; probability density function; intensity fluctuation

1 引言

与微波通信相比,星地光通信具有通信容量大、抗干扰能力强以及保密性好等优点^[1-3]。瞄准、捕获、跟踪(PAT-Pointing、Acquisition、Tracking)技术可用于星地激光链路的建立和保持,但是接收信号的强度起伏影响PAT链路跟踪的稳定性。在PAT链路设计中必须留有充足的衰落冗余,以克服强度起伏对链路跟踪稳定性的影响。

由于激光器功率的限制,PAT链路的衰落冗余不可能设计得太大,需要采取补偿措施减小强度起伏。接收信号的强度起伏由大气闪烁^[4-6]、静态瞄准误差和瞄准抖动误差共同决定^[7]。对于大气闪烁引入的强度起伏,可以采用时间平滑、孔径平滑^[8,9]和多光束并束技术等措施来补偿^[10];而对于静态瞄准误差和瞄准抖动引起的强度起伏,可以通过增加光束发散角来补偿,但是增加发散角又会增加自由空间传输损耗,因此实际系统有一个最佳的发散角。

文献[11]在忽略静态瞄准误差,考虑大气闪烁和瞄准抖动误差影响的情况下,分析了总强度起伏的分布规律。本文首先同时考虑大气闪烁、静态瞄准误差和瞄准抖动误差等因素,分别对大天顶角和小天顶角传输链路的强度起伏分布规律进行理论研究,并分析强度起伏对链路跟踪稳定性的影响;然后分别分析上行和下行链路的最佳光束发散角;在此基础上,结合孔径平滑和多光束并束技术,模拟分析PAT链路的衰落冗余特性。

2 PAT链路的强度起伏

2.1 接收信号强度起伏

设光功率 P_0 是在没有大气湍流和随机瞄准误差影响下的接收信号强度,考虑自由空间传输损耗、大气吸收散射损耗、发射和接收损耗, P_0 表示为

$$P_0 = P_T \eta_{\text{free}} \eta_{\text{atm}} \eta_t \eta_r, \quad (1)$$

式中 P_T 是信号发射功率, η_{free} 是自由空间传输效率, η_{atm} 是大1气透过率, η_t 是发射效率, η_r 是接收效率。

在实际的PAT链路中,大气湍流和随机瞄

准误差的影响会造成接收信号强度随机起伏。当PAT系统发射的信标光光束通过大气传输时,由于光束截面内包含许多湍流旋涡,这些旋涡各自对照射它的那一部分光束起衍射作用,使光束强度在空间和时间上出现随机变化的现象,引起接收信号强度起伏。

同时各种随机因素导致PAT系统的指向总是随机变化的,产生随机瞄准误差,进而引起强度起伏。随机瞄准误差由静态瞄准误差和瞄准抖动误差组成。静态瞄准误差由热形变误差、姿控误差、装配校正误差和超前瞄准误差等组成;瞄准抖动误差由光束漂移、位置传感器的跟踪误差、常平架机械轴系晃动以及基座扰动引起的瞄准误差等组成。

考虑大气闪烁和随机瞄准误差的影响,接收光功率表示为

$$P_R = P_0 \cdot i_t = P_0 \cdot i_s \cdot i_w, \quad (2)$$

式中 i_t 是总的归一化强度, i_s 是大气闪烁引入的归一化强度, i_w 是静态瞄准误差和瞄准抖动误差组成的随机瞄准误差引入的归一化强度。

2.2 瞄准误差引起的强度起伏

设发射光束是高斯光束,则静态瞄准误差和瞄准抖动引入的归一化强度表示为^[7]

$$i_w(\alpha) = \exp(-2\alpha^2/\theta_t^2), (0 \leq i_w \leq 1), \quad (3)$$

式中 θ_t 是光束发散角, α 是由静态瞄准误差和瞄准抖动误差引起的瞄准偏差角。

瞄准抖动服从正态分布,设瞄准抖动误差径向对称,则瞄准偏差角满足Rician分布^[7]

$$f_a(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma_a^2} \exp\left(-\frac{\alpha^2 + \alpha_0^2}{2\sigma_a^2}\right) I_0\left(\frac{\alpha\alpha_0}{\sigma_a^2}\right), \quad (4)$$

式中 α_0 是静态瞄准误差, σ_a^2 是瞄准抖动角的方差, $I_0(x)$ 是第一类修正贝塞尔函数。

瞄准偏差角概率密度函数 $f_a(\alpha)$ 和强度起伏概率密度函数 $f_{i_w}(i_w)$ 满足关系

$$f_a(\alpha) d\alpha = f_{i_w}(i_w) d(-i_w), \quad (5)$$

由式(3)、(4)和(5)得随机瞄准误差引起的强度起伏的概率密度函数

$$f_{i_w}(i_w) = \gamma i_w^{\gamma-1} \exp(-\eta) I_0(2\sqrt{-\eta\gamma \ln i_w}), \quad (6)$$

式中 $\gamma = \theta_t^2/4\sigma_a^2$, $\eta = \alpha_0^2/2\sigma_a^2$ 。

由式(6)得对数强度起伏的平均值

$$\begin{aligned} \langle \ln i_w \rangle &= \int_0^1 \ln i_w \times f_{i_w}(i_w) di_w = \\ &= \int_0^1 \ln i_w \times \gamma i_w^{\gamma-1} \exp(-\eta) I_0(2\sqrt{-\eta\gamma \ln i_w}) di_w = \\ &= -\gamma^{-1}(\eta + 1), \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)得强度起伏平均值

$$\begin{aligned} \langle i_w \rangle &= \int_0^1 i_w \times f_{I_w}(i_w) di_w = \\ &= \int_0^1 \gamma i_w^\gamma \exp(-\eta) I_0(2\sqrt{-\eta\gamma \ln i_w}) di_w = \\ &= \frac{\gamma}{\gamma+1} \exp\left(-\frac{\eta}{\gamma+1}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 总强度起伏的分布函数和链路中断概率

2.3.1 强度起伏对 PAT 链路跟踪的影响

当完成光束瞄准和捕获以后,由于存在两个终端间的相对运动、光束漂移和星上微振动,面临着将发射端的光束保持在接收端探测器表面上的问题,即链路跟踪。PAT 系统主要完成对链路的跟踪、对准等工作,一般通过高灵敏度位置传感器探测入射信标光来实现链路跟踪。信号强度随机起伏影响 PAT 链路跟踪稳定性,当信号强度衰落到低于探测阈值时,系统判断没有信标光入射,链路跟踪中断,重新开始瞄准和捕获。

为了克服强度起伏对链路跟踪稳定性的影响,在系统设计中必须留有充足的衰落冗余。PAT 链路的衰落冗余是链路设计的重要指标,是指链路达到一定稳定性(即链路中断概率小于某一给定值)所需的衰落冗余,表示为

$$M = P_0' - P_{\text{rec}}', \quad (9)$$

上式参量均以 dB 表示, $P_0' = 10\lg P_0$, $P_{\text{rec}}' = 10\lg P_{\text{rec}}$, P_{rec} 是位置传感器的探测阈值。

研究信号强度起伏分布规律对于链路设计有重要意义。大气闪烁归一化强度满足 $0 < i_s < \infty$, 大气闪烁起伏和随机瞄准误差引起的强度起伏的分布函数分别为 $f_{I_s}(i_s)$ 和 $f_{I_w}(i_w)$, 则考虑它们的影响,总的强度起伏的概率密度函数表示为

$$f_{I_t}(i_t) = \int_0^\infty f_{I_s}(x) f_{I_w}\left(\frac{i_t}{x}\right) \frac{dx}{x}, \quad (10)$$

链路跟踪中断概率是描述强度起伏对链路跟踪稳定性影响的重要指标。设归一化阈值 $i_{\text{th}} = P_{\text{rec}}/P_0$, 则 $\ln i_{\text{th}} = -0.23M$, 链路跟踪中断概率表示为

$$F(M) = \int_0^\infty f_{I_s}(x) dx \int_0^{i_{\text{th}}/x} f_{I_w}(y) dy, \quad (11)$$

2.3.2 小天顶角传输链路

在小天顶角($<60^\circ$)传输链路中,大气闪烁强度起伏服从对数正态分布^[4]

$$f_{I_s}(i_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2} i_s} \exp\left[-\frac{(\ln i_s - \langle \ln i_s \rangle)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad (12)$$

式中 $\langle \ln i_s \rangle = -\sigma_i^2/2$ 。

把式(6)和式(12)代入式(10)得总的强度起伏概率密度函数

$$\begin{aligned} f_{I_t}(i_t) &= \frac{\gamma i_t^{\gamma-1}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{1}{2}\sigma_i^2(\gamma+\gamma^2) - \eta\right] \int_0^\infty I_0(2\sqrt{\eta\gamma\sigma_i x}) \times \\ &= \exp\left[-\frac{(x + \ln i_t/\sigma_i + \sigma_i/2 + \gamma\sigma_i)^2}{2}\right] dx, \end{aligned} \quad (13)$$

当大气闪烁在总起伏中起主导作用,即大气闪烁起伏强度远大于随机瞄准误差引入的起伏强度时,强度起伏分布式(13)可以近似为对数正态分布函数

$$f_{I_t}(i_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln i_t}^2} i_t} \exp\left[-\frac{(\ln i_t - \langle \ln i_t \rangle)^2}{2\sigma_{\ln i_t}^2}\right], \quad (14)$$

根据式(7),总的对数强度的平均值表示为

$$\begin{aligned} \langle \ln i_t \rangle &= \langle \ln i_w \rangle + \langle \ln i_s \rangle = \\ &= -\gamma^{-1}(\eta+1) - \sigma_i^2/2, \end{aligned} \quad (15)$$

根据对数正态分布性质 $\sigma_{\ln i_t}^2 = 2\ln \langle i_t \rangle - 2\langle \ln i_t \rangle$, 由式(8)和式(15)得总的对数强度起伏方差

$$\sigma_{\ln i_t}^2 = 2\gamma^{-1}(\eta+1) + \sigma_i^2 + 2\ln \frac{\gamma}{\gamma+1} - \frac{2\eta}{\gamma+1}, \quad (16)$$

把式(6)和式(12)代入式(11)得小天顶角传输链路的跟踪中断概率

$$\begin{aligned} F(M) &= \frac{1}{2} + \frac{\gamma \exp[-\eta]}{2} \int_0^\infty \exp[-\gamma x] I_0(2\sqrt{\eta\gamma x}) \times \\ &= \text{erf}\left[(-0.23M + x + \sigma_i^2/2)/\sqrt{2\sigma_i^2}\right] dx, \end{aligned} \quad (17)$$

式中误差函数 $\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-x^2) dx$ 。

当强度起伏近似服从对数正态分布时,小天顶角传输链路的跟踪中断概率近似表示为

$$\begin{aligned} F(M) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf}\left\{[-0.23M + \gamma^{-1}(\eta+1) + \right. \\ &= \left. \sigma_i^2/2]/\sqrt{2\sigma_{\ln i_t}^2}\right\}, \end{aligned} \quad (18)$$

2.3.3 大天顶角传输链路

对大天顶角($>60^\circ$)传输链路,由于光束通过大气的传输距离长,大气闪烁起伏服从强湍流起伏特征。Andrews L C 等人提出了 gamma-gamma 分布模型^[5,6],把归一化光强表示为 $I_s = xy$ 积的调制过程,其中 x 是由大尺度湍流引起的光强

起伏, y 是由独立于大尺度的小尺度湍流引起的光强起伏。把大气闪烁起伏看作是大尺度产生的起伏对小尺度产生的起伏调制结果, 此时大气闪烁引起的强度起伏的概率密度函数表示为

$$f_{I_s}(i_s) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} i_s^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta i_s}), \quad (19)$$

式中 $\alpha = 1/\sigma_{\ln x}^2, \beta = 1/\sigma_{\ln y}^2, \sigma_{\ln x}^2$ 和 $\sigma_{\ln y}^2$ 分别是大尺度和小尺度湍流引起的对数强度闪烁方差, $K_v(x)$ 是第二类修正贝塞尔函数。

把式(6)和式(19)代入式(10)得总的强度起伏概率密度函数

$$f_{I_t}(i_t) = \gamma i_t^{(\alpha+\beta)/2-1} \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2} \exp(-\eta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \int_0^1 x^{-(\alpha+\beta)/2+\gamma-1} \times K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta i_t/x} I_0(2\sqrt{-\eta \ln x})) dx, \quad (20)$$

把式(6)和(19)代入式(11)得大天顶角传输链路的跟踪中断概率

$$F(M) = \frac{\pi\gamma \exp(-\eta)}{\sin(\pi\alpha - \pi\beta)\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \left\{ \begin{aligned} & (\alpha\beta)^\beta \frac{\exp(-0.23\beta M)}{\beta\Gamma(\beta - \alpha + 1)} \int_0^1 I_0(2\sqrt{-\eta \ln x}) x^{\beta-1} \times \\ & {}_1F_2[\beta; \beta + 1, \beta - \alpha + 1; \alpha\beta \exp(-0.23M)/x] dx + \\ & (\alpha\beta)^\alpha \frac{\exp(-0.23\alpha M)}{\alpha\Gamma(\alpha - \beta + 1)} \int_0^1 I_0(2\sqrt{-\eta \ln x}) x^{\alpha-1} \times \\ & {}_1F_2[\alpha; \alpha + 1, \alpha - \beta + 1; \alpha\beta \exp(-0.23M)/x] dx \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

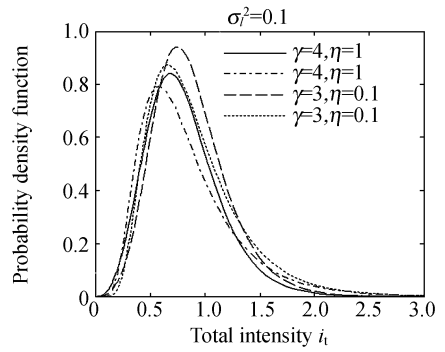
式中 ${}_1F_2(a; b, c; x)$ 是广义超几何函数。

3 数值模拟分析

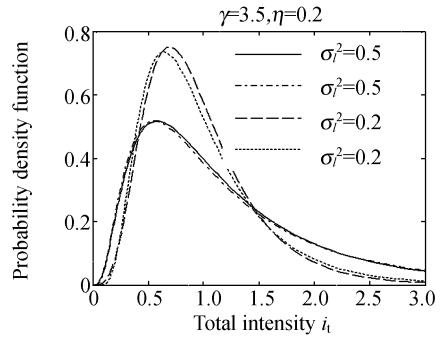
3.1 总强度起伏的概率密度模拟分析

图 1 和图 2 分别是小天顶角和大天顶角传输链路的强度起伏概率密度函数曲线。图 1 中的(—)和(· · ·)代表精确分布式(13), (— · —)和(· · ·)代表对数正态近似分布式(14)。

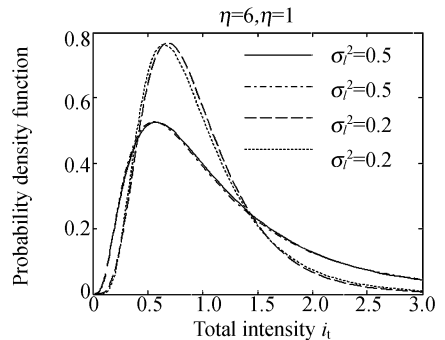
从图 1 可以看出当满足 $\gamma < 3$ (即 $\theta_t < 3.5\sigma_a$) 且 $\sigma_i^2 < 0.1$, 或者 $\eta > 1$ (即 $\alpha_0 > 1.5\sigma_a$) 且 $\sigma_i^2 < 0.1$ 条件时, 总强度起伏概率密度函数与对数正态分布函数有较大偏差, 其余情况下都可以很好地近似为对数正态分布。



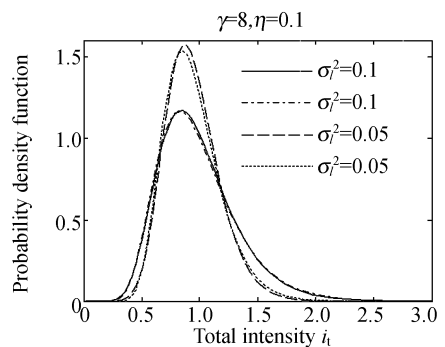
(a)



(b)

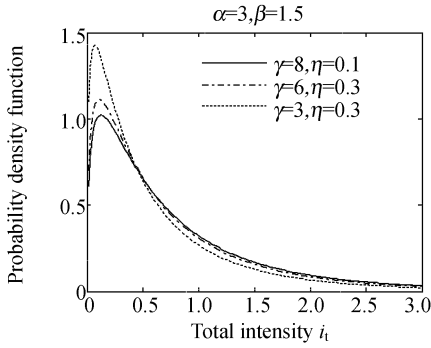


(c)

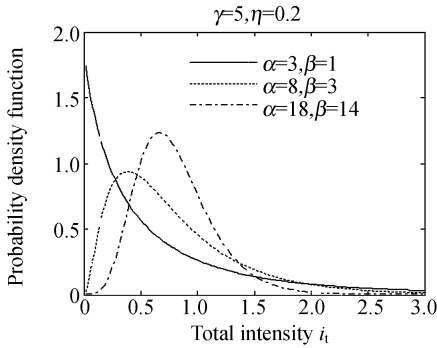


(d)

图 1 小天顶角传输链路的概率密度函数曲线
Fig. 1 Probability density functions for small zenith angles



(a)



(b)

图 2 大天顶角传输链路的概率密度函数曲线

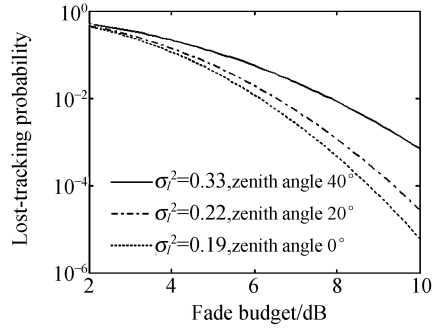
Fig. 2 Probability density functions for large zenith angles

从图 2 可以看出,在大天顶角时,强度起伏主要是由大气闪烁引起的,当改变 γ 和 η 值时,概率密度函数变化不明显。

3.2 衰落冗余的模拟分析

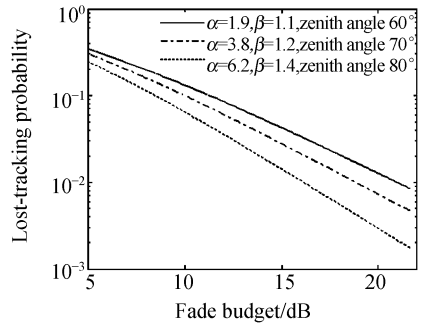
对星地光通信,上行和下行链路的大气闪烁起伏强度不同,所以链路达到一定稳定性需要的衰落冗余也就不同。图 3 模拟了没有补偿强度起伏,上行链路的跟踪中断概率随衰落冗余的变化规律。图中光束发散角为 $40 \mu\text{rad}$,静态瞄准误差为 $4 \mu\text{rad}$,瞄准抖动均方值为 $8 \mu\text{rad}$;大天顶角 $60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ 下的 α, β 和小天顶角 $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ 下的强度起伏方差,是根据折射率结构常数垂直分布 Hufnagel-Valley 模型^[9],在地面折射率结构常数取 $1.7 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ 下计算得到的。

从图 3(a) 和 (b) 可以看出,当不采取补偿措施时,要想实现稳定的传输链路,确保 PAT 链路中断概率小于 10^{-3} ,小天顶角传输链路大约需要 10 dB 的衰落冗余,大天顶角传输链路至少需要 25 dB 的衰落冗余。但是由于激光器发射功率的限制,很难达到 25 dB,因此对于大天顶角链路,



(a) 小天顶角

(a) At small zenith angles



(b) 大天顶角

(b) At large zenith angles

图 3 上行链路的跟踪中断概率随衰落冗余的变化规律

Fig. 3 Lost-tracking probability variable with fade budgets for the uplink

必须采取补偿措施减小强度起伏,否则很难实现稳定的链路。

补偿强度起伏可以减小 PAT 链路达到一定稳定性需要的衰落冗余。对于下行链路,采用孔径平滑可以减小大气闪烁起伏。我们在北京房山地面观测站用 0.6 m 口径的接收天线进行观测实验,测得的归一化强度起伏方差小于 0.01。对于上行链路,当光束通过大气传播到达低轨卫星时,相干半径达到几米到几十米;当到达同步轨道卫星时,可以达到几百米到几公里^[12],远远大于接收孔径,不发生孔径平滑效应,此时可以采用多光束并束技术补偿上行链路的大气闪烁起伏,实验测量采用多光束并束技术补偿后,其方差为 $0.1 \sim 0.2$ ^[13]。

根据式(16)可知,增大 γ 将减小随机瞄准误差引起的强度起伏。对于上行链路,大气闪烁方差大于 0.1,随机瞄准误差引起的起伏方差小于 0.1,总的强度起伏主要是大气闪烁引起的,所以

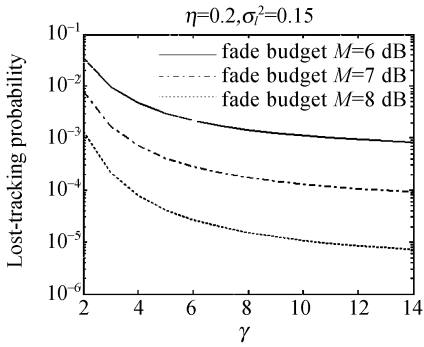
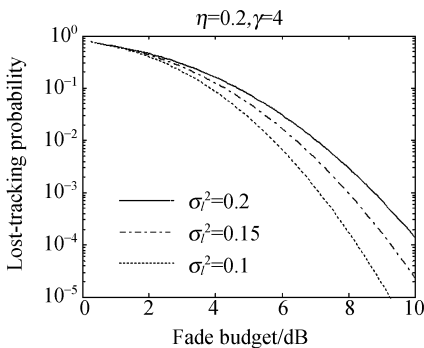


图 4 跟踪中断概率随 γ 的变化规律
Fig. 4 Lost-tracking probability vs γ

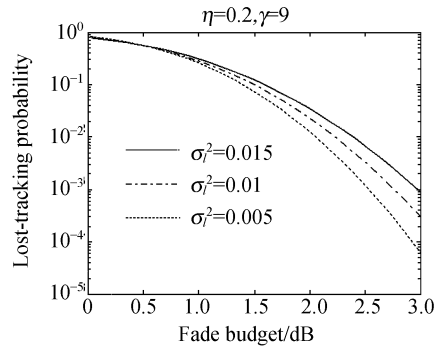
增大 γ 不能有效减小总强度起伏。从图 4 可以看出当 $\gamma > 4$ 时,中断概率随 γ 增大而变化不太明显,此时增大 γ (即增大光束发散角与瞄准误差均方值的比值)并不能减小所需的衰落冗余,但会增加自由空间传输损耗,所以对于上行链路,大约 $\gamma = 4$ 为最佳,即光束发散角与瞄准误差均方值的比值为 4。

对于下行链路,当 $\gamma < 9$ 时,由随机瞄准误差引起的强度起伏起主导作用,其起伏方差大于 0.01;当 $\gamma > 9$ 时,总的强度起伏主要是大气闪烁引起的,此时增大 γ 不能有效减小总的强度起伏,所以对于下行链路,大约 $\gamma = 9$ 为最佳,即光束发散角与瞄准误差均方值的比值为 6。

图 5(a)和(b)分别模拟了在最佳光束发散角下,上行和下行链路的跟踪中断概率随衰落冗余的变化关系。图 5(a)中的大气闪烁方差是考虑多光束并束补偿后给出的;图 5(b)中的大气闪烁方差是考虑孔径平滑给出的。采用孔径平滑或



(a) 上行链路
(a) uplink



(b) 下行链路
(b) downlink

图 5 跟踪中断概率随衰落冗余的变化规律
Fig. 5 Lost-tracking probability vs fade budgets

多光束并束技术补偿后,其大气闪烁起伏服从对数正态分布^[4,10]。可以看出对于上行链路,要想确保 PAT 链路的跟踪中断概率小于 10^{-3} ,大约需要 10 dB 的衰落冗余;对于下行链路,大约需要 3 dB 的衰落冗余。

4 结 论

本文考虑大气闪烁、静态瞄准误差和瞄准抖动的影响,对强度起伏分布规律和链路跟踪中断概率进行了理论分析。分析给出了最佳的光束发散角,并结合孔径平滑和多光束并束等补偿措施,模拟分析了 PAT 链路跟踪中断概率随衰落冗余的变化规律。结果表明:

(1) 小天顶角传输链路概率密度函数在大多数情况下都可以近似为对数正态分布。只有当大气闪烁起伏方差 σ_i^2 、光束发散角 θ_t 、瞄准抖动误差均方差 σ_a 和静态瞄准误差 α_0 满足 $\theta_t < 3.5\sigma_a$ 且 $\sigma_i^2 < 0.1$,或者 $\eta > 1$ (即 $\alpha_0 > 1.5\sigma_a$)且 $\sigma_i^2 < 0.1$ 条件时,不能近似为对数正态分布。

(2) 对于上行和下行链路,光束发散角与瞄准误差均方值的最佳比值分别为 4 和 6。

(3) 在最佳光束发散角下,采用孔径平滑或多光束并束等补偿措施时,要想确保 PAT 链路的跟踪中断概率小于 10^{-3} ,上行链路需要 10 dB 的衰落冗余,下行链路需要 3 dB 的衰落冗余。