

文章编号: 0253-2239(2006)09-1297-6

# 星地激光通信中分布式接收阵列的特性研究

向劲松 胡 渝

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

**摘要:** 星地激光通信中,发射机对准误差及大气湍流会引起接收信号衰落,对带前置光放大的阵列接收机,分析了分布式接收阵列的抗衰落性能。研究表明,分布式接收阵列对发射机对准误差引起的衰落具有一定抑制作用,阵列中各子接收孔径之间的距离可根据发射机对准误差及湍流的强弱进行优化设计。与传统式阵列相比,分布式阵列可以采用更窄的发射光束宽度,降低对发射功率的要求。分布式阵列的另一个重要特性还在于:当实际发射机对准误差标准差大于设计值时,通过调整阵列各子接收孔径之间的距离,可以在很大程度上降低发射机对准误差引起的功率损失。

**关键词:** 光通信技术;星地激光通信;前置光放大;分布式阵列接收;对准误差;大气湍流

中图分类号: TN929.1 文献标识码: A

## Study on Characteristics of Distributed Array Receiver for Satellite-to-Ground Laser Communication

Xiang Jingsong Hu Yu

(College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

**Abstract:** Pointing error of transmitter and atmospheric turbulence cause signal fading for satellite-to-ground laser communication, and the anti-fading characteristics of distributed ground-based array receiver with optical preamplifiers are analyzed. It is shown that the distributed array receiver can decrease the influence of pointing error of transmitter, and the distance between the sub-apertures can be optimized according to the pointing error of transmitter and atmospheric turbulence. Compared with the conventional array receiver, optimal transmitting beam width decreases and transmitting power requirement is debased in the distributed array receiver. Another important advantage of distributed array is when the actual rms pointing error is larger than the designed value, the power penalty can be reduced greatly by changing the distance between the sub-apertures.

**Key words:** optical communication technology; satellite-to-ground laser communication; optical preamplifier; distributed array receiver; pointing error; atmospheric turbulence

## 1 引 言

在星地激光通信中,为了使接收到的光功率更大,一般采用很窄的发射光束,由于发射机对准误差的影响,发射光束会偏离接收机位置,使接收信号产生衰落,在一定的衰落概率下,存在一个最优发射光束宽度使所需发射功率最小<sup>[1,2]</sup>。另外星地激光通信中,大气湍流也会引起接收信号衰落,采用多孔径的阵列接收技术可以有效地抑制湍流引起的衰落,并且与单个大的接收孔径相比具有更好的鲁棒性及灵活性<sup>[3,4]</sup>。目前的阵列接收技术主要集中在对湍

流的抑制上,还未见用阵列接收抑制发射机对准误差引起的信号衰落的报道。本文分析了一种带前置光放大的分布式接收阵列对发射机对准误差及大气湍流引起的信号衰落的抑制特性,并与传统集中式阵列接收方式进行了比较。

## 2 分布式接收阵列结构

对于一般的为克服湍流影响的地面阵列接收方式,各子接收孔径距离相对比较小时(大于湍流的第一菲涅耳区尺寸),而从卫星上传播到地面的激光光束

作者简介: 向劲松(1975~),男,四川宣汉人,电子科技大学物理电子学院博士研究生,主要从事空间光通信的研究。

E-mail: xiangjs@sohu.com

收稿日期: 2005-09-28; 收到修改稿日期: 2006-03-01

光斑尺寸却比较大,发射机对准误差对各个子接收机的影响基本一致,阵列接收及单孔接收对发射机对准误差的要求一致。但如果把各子接收孔径分隔足够远,构成一种分布式的阵列,这种结构可以降低发射机对准误差的影响。

图 1(a)为传统式阵列,图 1(b)为分布式阵列,各子孔径方形布置。当采用分布式阵列时,光斑内子孔径数目比传统阵列少,但如果采用更窄的发射

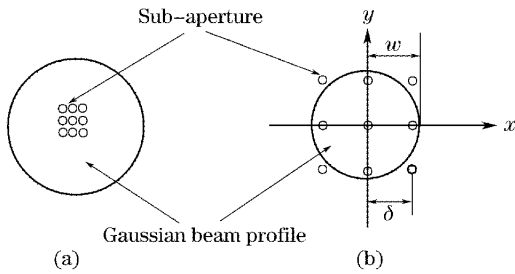


图 1 接收阵列示意图。(a) 传统式接收阵列,(b) 分布式接收阵列,(c) 信号合成

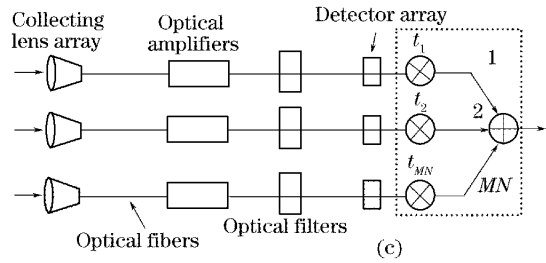
Fig. 1 Schematic of receiver array setup. (a) Conventional receiver array, (b) distributed receiver array, (c) signal combining

### 3 仿真模型

当激光束在湍流大气中传输时,由于大气折射率的随机起伏,光场的振幅及相位随机起伏,引起接收机上光强随机起伏,对于前置光放大接收系统,除了振幅起伏引起的强度闪烁外,由于各个子孔径接收的光信号需耦合进单模光纤进行光放大,湍流波前的相位随机起伏也会使耦合进单模光纤的光信号产生衰落,如不采用自适应光学技术,当接收孔径大于 Fried 参量  $r_0$  时,该衰落源不可忽略<sup>[5]</sup>。这里考虑三种衰落源的影响:发射机对准误差引起的接收光功率起伏,湍流引起的光场振幅起伏而带来的强度闪烁,湍流波前畸变引起的空间光到单模光纤的耦合效率的随机起伏。

接收阵列如图 1(b)所示,有  $M$  行  $N$  列共  $MN$

激光束,总的接收光功率并不一定比传统阵列少。设分布式阵列各子孔径之间的距离为  $\delta$ , $\delta$  可根据发射机对准误差及湍流的强弱进行优化,当  $\delta$  比较小时,分布式阵列变为传统的阵列形式。各子孔径收集到的光信号耦合进单模光纤,经过各自的前置光放大器、光滤波器、光探测器,转换为电信号后在电域进行信号合成[图 1(c)]。



个子接收机,接收阵列所接收到的总光功率为

$$P_r = \sum_{j=1}^{MN} P_j, \quad (1)$$

其中  $P_j$  表示第  $j$  个子接收机接收到的光功率:

$$P_j = \frac{\pi D^2}{4} t_c t_s I(m, n, \epsilon), \quad (2)$$

其中  $D$  为接收子孔径直径,  $t_c$  为空间光到单模光纤的耦合效率(随机量),  $t_s$  为湍流振幅起伏引起的强度闪烁,在弱湍条件下一般服从对数正态分布。各个子接收机的  $t_c$ 、 $t_s$  可认为是相互独立的。 $I(m, n, \epsilon)$  为不考虑湍流时,在存在发射机对准误差  $\epsilon$  时,第  $m$  行  $n$  列位置处的子孔径处的光强。

#### 3.1 对准误差引起的功率起伏

在只存在发射机对准误差  $\epsilon$  时,  $I(m, n, \epsilon)$  为

$$I(m, n, \epsilon) = \frac{2P_t}{\pi w^2} \exp \left\{ \frac{-2}{w^2} \left\{ \left[ L\epsilon_x - \left( m - \frac{M+1}{2} \right) \delta \right]^2 + \left[ L\epsilon_y - \left( n - \frac{N+1}{2} \right) \delta \right]^2 \right\} \right\}, \quad (3)$$

$$(m = 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, N)$$

其中  $P_t$  为发射激光功率,  $L$  为激光传播距离,  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  为发射机对准误差角  $\epsilon$  在  $x$ 、 $y$  方向上的分量,一般假设  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  满足零均值、等标准差  $\sigma$  的正态分布,  $w$  为激光束传播到接收平面处的光斑半径:  $w = L\theta/2$ , 其中  $\theta$  为发射光束远场发散角(全角)。这里没有考虑发射天线效率,接收天线效率及大气层的吸收、散射损耗。

#### 3.2 湍流强度闪烁

弱湍条件下,湍流强度闪烁引起的衰落  $t_s$  服从对数正态分布:

$$p(t_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\ln I, D}^2}} \exp \left[ -\frac{(\ln t_s + \sigma_{\ln I, D}^2/2)^2}{2\sigma_{\ln I, D}^2} \right], \quad (4)$$

其中  $\sigma_{\ln I, D}^2$  为经过直径为  $D$  的接收孔径的孔径平均

效应后的对数强度方差,对于星地信道, $\sigma_{\ln I, D}^2$  可用下式近似计算<sup>[6,7]</sup>:

$$\sigma_{\ln I, D}^2 \approx \sigma_{\ln I}^2 / \{1 + 1.07[D^2 / (\lambda H \sec \psi)]^{7/6}\}, \quad (5)$$

其中  $\lambda$  为激光波长,  $\psi$  为天顶角,  $H$  为大气层等效厚度, 约为 10 km 左右,  $\sigma_{\ln I}^2$  为 Rytov 对数强度方差, 在  $\sigma_{\ln I}^2 < 0.3$  时, 为弱湍区。

对于星地信道, 采用平面波理论,  $\sigma_{\ln I}^2$  为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_{\ln I}^2 = 2.25k^{7/6} \sec^{11/6} \psi \int_0^\infty C_n^2(h) h^{5/6} dh, \quad (6)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $C_n^2$  为折射率结构常数, 这里采用常用的 Hufnagel-Valley 5/7 模型<sup>[8,9]</sup>:

$$C_n^2(h) = 5.94 \times 10^{-53} (21/27)^2 h^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + 1.7 \times 10^{-14} \exp(-h/100), \quad (7)$$

其中  $h$  为距地面高度。如取  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $0^\circ$  天顶角对应的  $\sigma_{\ln I}^2$  约为 0.06,  $60^\circ$  天顶角对应的  $\sigma_{\ln I}^2$  约为 0.23, 满足弱湍条件。

### 3.3 湍流波前畸变引起的耦合效率起伏

通过模拟湍流波前, 来研究湍流波前畸变引起的空间光到单模光纤的耦合效率起伏的概率分布。耦合效率  $t_c$  定义为耦合进单模光纤中的光功率  $P_c$  与接收孔径接收到的光功率  $P_a$  之比<sup>[5]</sup>:

$$t_c = \frac{P_c}{P_a} = \frac{\left| \iint_P E_i E_i^* ds \right|^2}{\iint_P E_i E_i^* ds \iint_P E_i E_i^* ds}, \quad (8)$$

其中  $E_i$  为光瞳面内经湍流畸变的入射光场。如将单模光纤模场近似为高斯分布, 则  $E_i$  为单模光纤高斯模场反向传输到光瞳面处的模场分布, 仍为高斯形式, 光瞳面内与光轴距离为  $r$  处的  $E_i$  为

$$E_i(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi w_a^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{w_a^2}\right), \quad (9)$$

其中  $w_a = \lambda f / (\pi w_b)$ ,  $f$  为光学系统焦距,  $w_b$  为单模光纤模场半径。

在无湍流下, 理想的平行光入射时, 当满足条件

$\pi D w_b / (2\lambda f) = 1.12$  时, 耦合效率达到最大值 81.45%。湍流引起的波前畸变会使耦合效率降低, 并且由于湍流的随机性, 耦合效率产生起伏。湍流对耦合效率的影响由  $D/r_0$  因子决定, 其中  $r_0$  为 Fried 参量, 计算公式为<sup>[10]</sup>

$$r_0 = \left[ 0.423k^2 \sec \psi \int_0^\infty C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (10)$$

对于 Hufnagel-Valley 5/7 折射率模型, 在  $1.55 \mu\text{m}$  波长处,  $0^\circ$  天顶角对应的  $r_0$  约为 19.5 cm,  $60^\circ$  天顶角对应的  $r_0$  约为 12.5 cm, 接收孔径的选择应考虑到  $r_0$  值, 最好与  $r_0$  相当或小于  $r_0$ , 否则湍流波前畸变会对耦合效率产生严重影响。

经湍流畸变的入射光场  $E_i$  可表示为

$$E_i(r) = \exp[i\phi(r)], \quad (11)$$

其中  $\phi(r)$  为距光轴  $r$  处的波前相位, 可通过泽尼克多项式方法模拟<sup>[11]</sup>, 并假设  $z_2, z_3$  项泽尼克系数已通过倾斜纠正系统纠正。

### 3.4 合成信号值

信号合成在电域进行, 以最大化 Q 值作为最优信号合成准则, 对各路电信号进行加权求和, 权重为  $t_j$ , 使合成后的 Q 值最大。假设光放大器的增益  $G$  足够大, 可忽略电路热噪声, 则合成信号“1”码, “0”码的平均电流  $I_1, I_0$  及方差  $\sigma_1^2, \sigma_0^2$  为

$$\begin{aligned} I_1 &= \sum t_j i_{1,j} = RS_{\text{ASE}} B_o \sum t_j + 2RG \sum (t_j P_j), \\ I_0 &= \sum t_j i_{0,j} = RS_{\text{ASE}} B_o \sum t_j, \\ \sigma_1^2 &= \sum t_j^2 \sigma_{1,j}^2 = 8R^2 S_{\text{ASE}} B_e G \sum (t_j^2 P_j) + 4R^2 S_{\text{ASE}}^2 B_o B_e \sum t_j^2, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sigma_0^2 = \sum t_j^2 \sigma_{0,j}^2 = 4R^2 S_{\text{ASE}}^2 B_o B_e \sum t_j^2,$$

其中  $R$  为探测器响应率,  $S_{\text{ASE}} \approx h\nu n_{\text{sp}} G$  为光放大器的噪声谱密度,  $h\nu$  为光子能量,  $n_{\text{sp}}$  为光放大器的自发辐射因子,  $G$  为光放大器的增益,  $B_o$  为光滤波器带宽,  $B_e$  为电路带宽,  $i_{1,j}, i_{0,j}, \sigma_{1,j}, \sigma_{0,j}$  为第  $j$  路信号的“1”码, “0”码的平均电流及方差。则合成信号的 Q 值可表示为

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{\sum (t_j P_j)}{[2 \sum (t_j^2 P_j)]} \left[ \sqrt{\frac{B_o}{B_e} \sum t_j^2 + 2 \sum (t_j^2 P_j) / (h\nu B_e n_{\text{sp}})} - \sqrt{\frac{B_o}{B_e} \sum t_j^2} \right]. \quad (13)$$

对于每组输入信号  $P_j$ , 存在一组加权系数  $t_j$  使合成信号 Q 值最大, 自适应的调整  $t_j$ , 可实现最优信号合成, 但实现比较复杂。这里采用一种对数律系数的信号合成方法<sup>[3]</sup>, 性能与最优合成非常接近,

加权系数  $t_j$  为各子信号的“1”码及“0”码的平均值  $\bar{t}_{1,j}, \bar{t}_{0,j}$  之比的对数:  $t_j = \ln(\bar{t}_{1,j} / \bar{t}_{0,j})$ 。由于大气湍流及对准误差的持续时间一般大于数毫秒, 因此  $\bar{t}_{1,j}, \bar{t}_{0,j}$  应在更短的时间内求平均。

由于信号衰落,  $Q$  是一个具有一定概率密度  $f(Q)$  的随机量, 设系统正常通信时所需的最小  $Q$  值为  $Q_{th}$ , 当  $Q < Q_{th}$  时系统的通信质量不能满足要求, 其衰落概率为

$$P_E^* = \int_0^{Q_{th}} f(Q) dQ. \quad (14)$$

### 4 仿真结果

仿真参量:  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ,  $B_o = 25 \text{ GHz}$  ( $0.2 \text{ nm}$ ),  $B_e = 2.5 \text{ GHz}$ ,  $n_{sp} = 1.4$ ,  $D = 0.2 \text{ m}$ . 图 2 所示为各子接收机中由发射机对准误差、湍流强度闪烁、湍流波前相位畸变引起的衰落及总的衰落大小, 其中发射光束宽度  $\theta_t$  取为单轴对准误差标准差  $\sigma$  的 10 倍, 这是卫星激光通信系统中光束宽度的典型设计值, 参考功率点为发射机正对准子接收孔径时, 子接收孔径所接收到的平均光功率(耦合进单模光纤之前)。从图中可以看到, 在  $60^\circ$  天顶角时, 三种衰落源的影响大致相当, 而在  $0^\circ$  天顶角处, 发射机对准误差是最主要的衰落源。

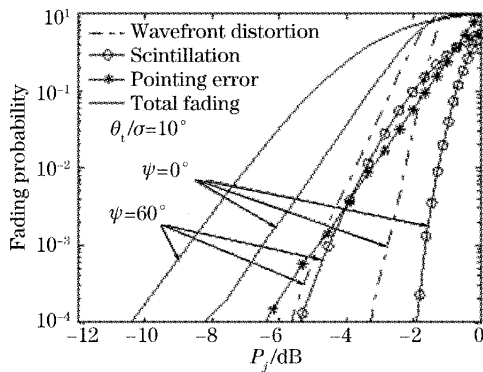


图 2 单个子孔径接收光功率的衰落概率

Fig. 2 Fading probability of single sub-aperture receiving power

图 3 所示为  $3 \times 3$  阵列  $Q$  因子的衰落曲线, 天顶角为  $60^\circ$ , 曲线 1 表示传统式阵列 ( $\delta/w$  很小), 曲线 2 为分布式阵列, 其中  $\theta_t/\sigma$  及  $\delta/w$  分别为  $10^{-3}$  衰落概率处的最优参量, 分布式阵列具有更小的最优发射光束宽度, 曲线 3 表示无发射机对准误差时的情况。从图中可以看出发射机对准误差对  $Q$  因子的影响, 及分布式阵列相对于传统阵列的  $Q$  因子改善情况。

图 4 所示为优化条件下(衰落概率  $10^{-3}$  处优化),  $3 \times 3$  阵列的  $Q$  因子与发射光束宽度的关系。在相同的发射功率下, 对于传统阵列, 当  $\theta_t/\sigma \approx 10$  左右时,  $Q$  达到最大, 增大或减小  $\theta_t/\sigma$  都会使  $Q$  降

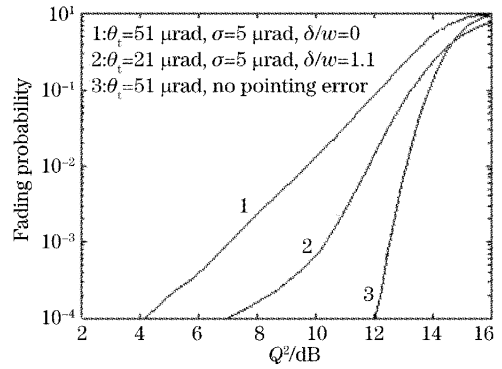


图 3  $3 \times 3$  阵列的  $Q^2$  衰落概率

Fig. 3 Fading probability of  $Q^2$  in  $3 \times 3$  array

低, 而对于分布式阵列, 随着  $\theta_t/\sigma$  的减小, 通过优化各子孔径之间的距离,  $Q$  还可提高, 当  $\theta_t/\sigma \approx 4.2$  时,  $Q$  值最大, 当  $\theta_t/\sigma$  更小时,  $Q$  会迅速降低。与传统阵列相比, 分布式阵列在  $60^\circ$  天顶角处,  $Q^2$  可提高近 3 dB, 在  $0^\circ$  天顶角处,  $Q^2$  可提高约 4 dB。

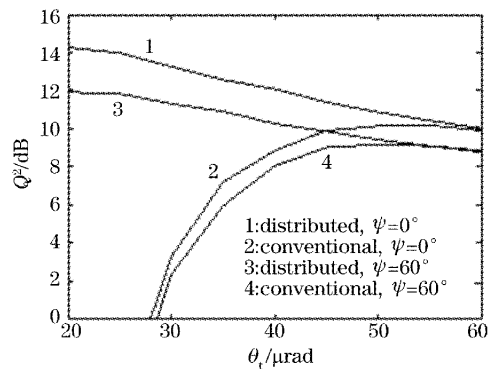


图 4  $3 \times 3$  阵列的最优  $Q^2$  与发射光束宽度的关系

Fig. 4 Optimal  $Q^2$  as a function of transmitting beam width in  $3 \times 3$  array

图 5 所示为分布式阵列中各子孔径之间的最优距离与发射光束宽度的关系(衰落概率  $10^{-3}$  处优化), 在  $\sigma$  一定的条件下, 最优相对距离  $\delta/w$  随发射

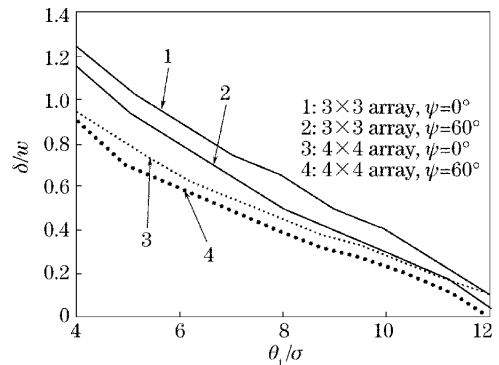


图 5 各子孔径间的最优距离与发射光束宽度的关系

Fig. 5 Optimal distance between sub-apertures as a function of transmitting beam width

光束宽度的增大而减小；随子接收孔径数目的增多而减小；随天顶角的增大而减小，天顶角越大，湍流越强，减小子孔径之间的距离有利于克服湍流引起的衰落。发射机对准误差与湍流对  $\delta/w$  的影响是相反的，在一定范围内增大  $\delta/w$  有利于减小发射机对准误差引起的衰落，减小  $\delta/w$  有利于减小湍流引起的衰落。因此湍流越弱，分布式阵列可得的增益越大(如图 4)。

另外从图 4、图 5 中还可发现，对于  $10^{-3}$  的衰落

表 1 传统阵列与分布式阵列的性能比较( $Q_{th}=5.2, P_E^*=10^{-3}$ )

Table 1 Performance comparison between conventional array and distributed array ( $Q_{th}=5.2, P_E^*=10^{-3}$ )

	$\psi$	3×3 array		4×4 array	
		0°	60°	0°	60°
Conventional array	$\theta_t/\sigma$	10.5	10.2	10.5	10.2
	$P_t/\text{dB}$	0	0.6	-1.7	-1.1
Distributed array	$\theta_t/\sigma$	4.2	4.2	3.5	3.6
	$\delta/w$	1.2	1.1	1.1	1.0
	$P_t/\text{dB}$	-2.7	-1.0	-5.4	-3.6

对于传统式阵列，如忽略湍流的影响，则最优  $\theta_t/\sigma$  与衰落概率  $P_E^*$  的关系为： $\theta_t/\sigma=4\sqrt{-\ln(P_E^*)}$ ，如系统设计时按照发射机对准误差标准差  $\sigma_0$  来优化光束宽度  $\theta_t$ ，则当实际的  $\sigma$  大于  $\sigma_0$  时会带来严重的性能劣化，如图 6 曲线 1 所示，当  $\sigma=3\sigma_0$  时，传统式阵列的功率损失将高达 36 dB，由于大气、器件老化等因素的影响，对准精度很可能不能达到设计值，这时可用分布式阵列来解决这个问题，根据实际的  $\theta_t/\sigma$  及湍流强弱，调整地面各子接收孔径之间的距离  $\delta$ ，可以在很大程度上降低系统的功率损失，如图 6 曲线 2 所示，在  $\sigma=3\sigma_0$  时，调整分布式阵列的距离  $\delta$ ，功率损失可减小到 7.5 dB，靠链路的功率储备仍有可能正常通信。如通信距离  $L=1000$  km，发射光束宽度为  $20\ \mu\text{rad}$ ，则地面上的光斑直径只约 20 m 左

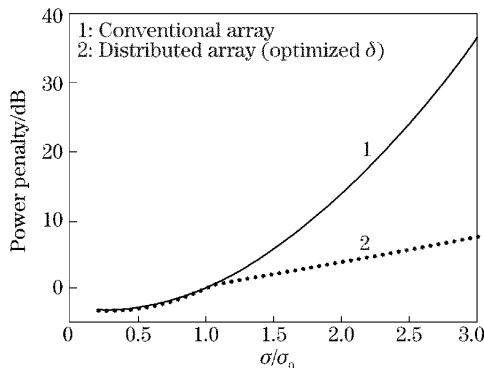


图 6 对准误差标准差  $\sigma$  偏离设计值  $\sigma_0$  引起的光功率损失  
Fig. 6 Power penalty induced by rms pointing error  $\sigma$  offset from the designed value  $\sigma_0$

概率，当  $\theta_t/\sigma\approx 10$  左右时，对于传统的阵列， $Q$  值已最大，此时如使各子接收孔径之间的相对距离  $\delta/w$  为  $0.3\sim 0.4$ ， $Q^2$  还可提高约零点几 dB。

表 1 所示传统阵列与分布式阵列的一些最优参量比较。从中可以看出，湍流越弱(天顶角小)，分布式阵列获得的光功率增益越大，并且  $4\times 4$  阵列比  $3\times 3$  阵列的增益大。如  $4\times 4$  阵列在  $0^\circ$  天顶角时，采用分布式阵列比传统式阵列可使发射功率降低 3.6 dB(-1.7~-5.4)，而  $3\times 3$  阵列只有 2.7 dB。

右，调整  $\delta$  是比较容易实现的(图 6 为  $3\times 3$  阵列， $60^\circ$  天顶角，衰落概率  $10^{-3}$  处优化)。

## 5 结 论

对于星地激光通信，可采用分布式阵列的地面接收机结构，与传统集中式的接收阵列相比，分布式阵列可以在很大程度上降低发射机对准误差引起的衰落，降低对发射功率的要求。但分布式阵列比传统阵列对湍流的抑制效果差，因此在湍流越弱时分布式阵列性能改进越明显。分布式阵列更大的优势还在于当系统实际发射机对准误差大于设计值时，通过改变地面各子接收孔径的相对距离就可以在很大程度上补偿系统的功率损失。分布式阵列适用于  $\theta_t/\sigma < 4\sqrt{-\ln P_E^*}$  时的情况，当  $\theta_t/\sigma > 4\sqrt{-\ln P_E^*}$  时，分布式阵列退化为传统式阵列。

## 参 考 文 献

- 1 J. D. Barry, G. S. Mecherle. Beam pointing error as a significant design parameter for satellite-borne, free-space optical communication systems[J]. *Opt. Engng.*, 1985, 24(6): 1049~1054
- 2 Rong Jian, Hu Yu, Zhong Xiaochun. Study of ATP accuracy and the optimum optical signal transmitting angle[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, 32(2): 221~223 (in Chinese)  
荣 键, 胡 渝, 钟晓春. ATP 跟踪精度与最佳信号光发射角的研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(2): 221~223
- 3 M. Razavi, J. H. Shapiro. Wireless optical communications via diversity reception and optical preamplification[J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2005, 4(3): 975~983
- 4 V. Vilnrotter, C. W. Lau, M. Srinivasan et al.. Optical array receiver for communication through atmospheric turbulence[J].

- J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4): 1664~1675
- 5 C. Ruilier. A study of degraded light coupling into single-mode fibers[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3350**: 319~329
- 6 V. A. Banakh, A. V. Falits. Turbulent statistics of laser beam intensity on ground-to-satellite optical link[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4678**: 132~143
- 7 K. S. Shaik. Atmospheric propagation effects relevant to optical communications[R]. TDA Progress Report 42-94, 1988, 180~200
- 8 L. C. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen. Scintillation model for a satellite communication link at large zenith angles[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(12): 3272~3280
- 9 Yi Xiuxiong, Guo Lixin, Wu Zhensen. Study on the optical scintillation for Gaussian beam propagation in the slant path through the atmospheric turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 433~438 (in Chinese)  
易修雄, 郭立新, 吴振森. 高斯波束在湍流大气斜程传输中的闪烁问题研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 433~438
- 10 Wang Jianye, Rao Ruizhong, Liu Xiaochun. Comparison of experimental study of atmospheric coherence length[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 64~66 (in Chinese)  
汪建业, 饶瑞中, 刘晓春. 大气相干长度的对比实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 64~66
- 11 N. Roddier. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials[J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(10): 1174~1180

## 2006 第五届亚太激光研讨会征文通知

第五届亚太激光研讨会(APLS2006)定于2006年11月23~27日在广西桂林帝苑酒店举行。这是亚太地区激光领域最重要、最具影响的国际学术会议之一。亚太激光研讨会由中国光学学会、韩国光学学会和日本激光学会共同发起的系列国际会议,每两年召开一次,自1998年以来,已连续举办了四届。本届会议由中国科学院上海光学精密机械研究所主办。

大会主席: 朱健强

共 主 席: 周炳琨 In Won Lee (Korea) Shuji Sakabe (Japan)。

本次会议的主要议题包括:

- 高功率激光及其应用
- 飞秒激光和光纤激光
- 半导体激光
- 激光材料加工/激光测量/激光镀膜
- 激光等离子体/粒子相互作用与激光聚变能源
- 医学激光及其应用
- 激光光谱和非线性光学
- 衍射和微光学加工
- 高能辐射和激光加速
- 激光化学

论文摘要提交截止时间: 2006年9月15日。

会议论文提交截止时间: 2006年10月15日。

本届会议收录论文将由 *Chinese Optics Letters* 以增刊形式出版。

国内代表的论文请按照投稿要求,同样 Email 到会议秘书处: [apls2006@siom.ac.cn](mailto:apls2006@siom.ac.cn);有关投稿、注册、会议安排等详细信息请查阅会议专用网站 <http://www.siom.ac.cn/apls2006>

联系人: 林红香 电话: 021-69918209 传真: 021-69918006