

文章编号: 0253-2239(2010)s100206

紫外光散射通信电均衡器研究

罗 畅^{1,2} 李霖野¹ 陈晓敏¹

(¹中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 紫外光通信信道码间干扰非常严重, 研究最小均方算法(LMS)和常模量算法(CMA)均衡器在紫外通信中的应用。基于通断键控(OOK)调制信号进行研究, 计算了信道响应系数向量, 然后对算法仿真。仿真表明, 紫外信道误码率极高, 只适合低速率通信; LMS 均衡算法在紫外信道中收敛很慢, 滤波器阶数与均衡器输出误码率关系不明显, 但是迭代步长存在一个最优的值; 同时还得到了两种变步长 LMS 均衡算法中的参数和均衡器输出误码率的关系。还证明了紫外信道是最小相位系统, 可以进行盲均衡, 结果指出, 只要迭代次数足够, CMA 盲均衡器输出误码率与滤波器阶数、迭代步长关系不是很明显。

关键词 光通信; 紫外光通信; 均衡; LMS 均衡; 盲均衡

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100206

Electrical Equalizer for Ultraviolet Scattering Communication

Luo Chang^{1,2} Li Jiye¹ Chen Xiaomin¹

(¹Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The degradation of the performance in wireless non-line-of-sight ultraviolet (UV) communication is due to the presence of the intersymbol interference. Least mean square (LMS) class and constant modulus algorithm (CMA) equalizer are studied based on on-off key (OOK) modulation. The results indicate that the bit error rate (BER) is so high that only low bit rate communication can be used. The convergence rate is very slow for LMS equalizer on UV channel, BER is nearly not affected by equalizer tap numbers and step size has an optimal value. The relations between parameters of two variable step size LMS algorithms and BER are obtained. It is proved that UV channel is a minimum phase system and can use blind equalizer. BER is not sensitive to the step size and tap number for CMA blind equalizer.

Key words optical communications; ultraviolet communications; equalization; LMS equalization; blind equalization

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.0060

1 引 言

紫外光散射通信(简称紫外通信)是利用大气中的粒子、气凝胶和灰尘等微粒对日盲波段紫外光的散射作用进行信息传输的一种新型通信模式。大气中的微粒对紫外光有很强的散射作用, 所以无线紫外光通信可以进行非视距光通信, 这是激光红外通信不可比拟的优点。但由此带来的码间干扰非常严重, 这是紫外光通信最大特点之一, 所以采用优良的

均衡技术十分必要。紫外通信的研究还局限于大气条件对通信性能的影响^[1]、能量衰减特性^[2]、调制技术^[3]和信道模型^[4~6]的研究, 另外作者还探讨了紫外通信信道基础问题和自适应信号检测问题^[7]。光通信中的电均衡问题研究主要是集中于光纤通信、可见光通信和红外激光通信^[8,9], 据我们所知, 目前还没有紫外通信中的均衡器的研究报道。本课程将研究均衡器在紫外无线通信中的应用, 从工程应用

收稿日期: 2010-06-08; **收到修改稿日期**: 2010-08-05

作者简介: 罗 畅(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事无线通信和信号处理等方面的研究。

E-mail: changluo888@163.com

导师简介: 李霖野(1954—), 男, 研究员, 主要从事军用通信设备方面的研究。E-mail: lijy0001@yahoo.com.cn

实际考虑,主要研究了最小均方算法(LMS)类均衡器在紫外通信中的应用,因为这类均衡器是最成熟也是应用最广泛的均衡器,同时还讨论了盲均衡器在紫外通信中的应用。为简便起见,所有的研究均是基于通断键控(OOK)调制方式。

2 紫外通信信道模型

紫外光在大气中的传播近似是一个非常复杂的过程,在高信噪比时,紫外信道是一个时不变,加性高斯白噪声信道。信道响应函数有多个,在这里采用文献[4]提出的模型

$$h(t) = \frac{A\beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} \exp(-t/\beta), \quad (1)$$

式中 A 为归一化因子, α 与 β 为与系统几何结构,大气因数有关的参量。假设通信距离为 $r = 400$ m,比特率为 1 M/s, $\theta_R = 30^\circ$ 为接收机半视场角, $\theta_T = 15^\circ$ 为发射光束发散角, $\beta_R = 45^\circ$ 为接收机顶角, $\beta_T = 60^\circ$ 为发射机顶角。 $k_s = 0.49$ km 和 $k_a = 0.74$ km 分别是大气散射系数和吸收系数,归一化的信道响应系数向量为 $(0.4000, 0.2766, 0.1912, 0.1322)$ 。以此作为一个标准信道来研究均衡器性能。

3 LMS 类均衡

3.1 LMS 均衡

最小均方(LMS)算法简单,计算量小,易于实时处理,在均衡器中得到了广泛应用。该算法不需要计算有关的相关函数,也不需要矩阵求逆运算,基于最陡下降法的 LMS 算法的迭代公式如下^[10]:

$$e(n) = d(n) - x^T(n)w(n), \quad (2)$$

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n), \quad (3)$$

式中 $w(n)$ 为均衡器在时刻 n 的权值向量,均衡器阶数为 N , $d(n)$ 为期望信号, $e(n)$ 为误差信号, $x(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]$ 为时刻 n 均衡器的输入信号矢量, μ 为步长因子。在实际应用中,期望信号是未知的,它是由输出信号进行判决所得的估计信号反馈作为期望信号。LMS 算法的收敛条件是: $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$, λ_{\max} 为输入信号自相关矩阵的最大特征值。

3.2 一种基于均方误差的变步长 LMS 算法

这种算法是一种变步长 LMS 算法,传统 LMS 算法中步长固定,在收敛速度,均方误差稳态值等方面存在矛盾,变步长能一定程度解决这个矛盾。在基于误差信号的变步长 LMS 同类算法中,该算法较优^[10]。步长调整公式如下:

$$\mu'(n+1) = b\mu(n) + ae^2(n), \quad (4)$$

$$\mu(n+1) = \begin{cases} \mu_{\max} & \mu'(n+1) > \mu_{\max} \\ \mu_{\min} & \mu'(n+1) < \mu_{\min} \\ \mu'(n+1) & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $0 < b < 1, a > 0$ 。初始步长一般取最大值。

3.3 调整的基于箕舌线的变步长 LMS 算法

这种算法是一种变步长 LMS 算法,在基于误差信号自相关估计值的变步长 LMS 同类算法中,该算法较优^[10]。步长调整公式如下:

$$\mu(n) = b \left[1 - \frac{1}{a \times |e(n) \times [e(n-1) + e(n)]| + 1} \right], \quad (6)$$

$$\mu(n+1) = \begin{cases} \mu_{\max} & \mu'(n+1) > \mu_{\max} \\ \mu_{\min} & \mu'(n+1) < \mu_{\min} \\ \mu'(n+1) & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

4 紫外信道盲均衡

盲均衡器不需要借助训练序列,仅利用接收信号本身的先验信息,选取合适的代价函数和误差控制量来调节均衡器的权向量,使均衡器输出最接近于发送信号^[10]。由于常模量(CMA)算法简单实用,作为紫外信道盲均衡初步研究,只研究 CMA 算法。

4.1 紫外信道盲可均衡性

4.1.1 发送信号序列特性

在光通信中,以 OOK 调制为例,信号均值一般不为零,这不满足盲均衡的条件^[11]。所以必须让信号序列减去他们的均值,得到一个新的序列 $s(n)$,这个序列具有零均值,平稳独立同分布,属于有限符号集。假设接收信号序列为 $x(n)$,对于 OOK 调制,它的峭度为 1,所以是亚高斯过程,符合盲均衡的要求。同理, M 元脉冲位置调制(M-PPM)信号的歪斜度为 $(M-2)/\sqrt{M-1}$,在 $M > 3$ 时,歪斜度不为零,这说明可以利用高阶量进行信号处理。

4.1.2 紫外信道特性

紫外信道响应(1)式的傅里叶变换的模的平方可以表示为

$$|H(f)|^2 = A^2 / [1 + (2\pi\beta f)^2]^\alpha, \quad (8)$$

分析可知,该系统无零点,极点均在单位圆内,所以信道是一个最小相位系统,是非常稳定的系统,这也说明紫外信道是一个慢变信道,可以取得较好的盲均衡效果。

4.2 CMA 盲均衡算法

CMA 算法适合于所有具有恒定包络的发射信

号的均衡^[10,11],代价函数为

$$J(n) = E\{(|\hat{s}(n)|^P - R_p)^2\}, \quad (9)$$

式中 $R_p = \frac{E\{|s(n)|^{2P}\}}{E\{|s(n)|^P\}}$, P 通常取 1 或者 2, 如果取 2, 就是常见的 CMA 算法, 该算法采用 LMS 准则进行迭代, 则

$$w(n+1) = w(n) + 2\mu e(n)x(n), \quad (10)$$

式中 $e(n) = \hat{s}(n)[R_p - |\hat{s}(n)|^2]$. 和前述 LMS 算法一样, 为了克服收敛速度和稳态误差的矛盾, 可以采用变步长的 CMA 算法。

5 算法仿真

5.1 LMS 算法分析

LMS 算法要正常运行, 首先要保证它能够收敛, 即满足 $0 < \mu < 1/\lambda_{\max} R_{xx}$ 的迹等于 $NE[x^2(n)]$, N 为均衡器的阶数, 于是收敛条件可以表示为 $0 < \mu < 1/\text{tr}R_{xx}$. 假设发射信号为 OOK 信号, 信道响应如前所述, 则计算得 $NE[x^2(n)] = 0.3226N$. 可见步长取值可以取得较大, 接近于 1, 但是在实际应用中, 为了取得较小误差, 通常取得较小. 下面研究都是基于基带信号. 图 1 为有无均衡器情况下的平均误码率, 均衡器抽头数取值为 10.

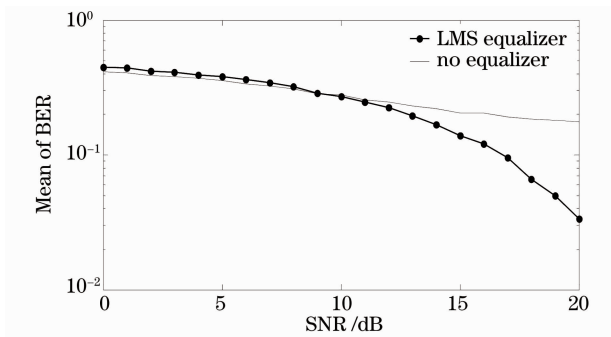


图 1 有无均衡器情况下误码率比较

Fig. 1 Bit error rate (BER) versus signal-to-noise ratio (SNR) with LMS equalizer and without the equalizer

从图可知, 紫外信道的误码率十分严重, 所以在信噪比 (SNR) 比较低时, 均衡器作用不明显, 只有在信噪比很高时, 均衡器作用才显现出来. 所以性能优良的滤波器设计十分重要. 在通信速率为 1 M/s, 4 径信道时, 误码率如此之高, 不可能正常通信, 所以紫外只适合低速通信. 图 2 给出了步长为 $2\mu = 0.005$, 信噪比为 15 dB 时, 滤波器阶数、迭代次数和误码率的关系. 图 3 给出了均衡器阶数为 10, 步长, 迭代次数和误码率的关系. 从图 2 可知, 只要均衡器阶数大于信道长度, 增加阶数对误码率降低不大. 这可能是因为紫外光衰减很快, 超出信道长度

以外的信号能量较低, 干扰作用比较小, 所以增加滤波器阶数作用不大. 迭代 20000 次时比迭代 2000 时误码率低几倍, 这说明在迭代 2000 次时, 算法并没有很好的收敛. 紫外信道误码率高, LMS 算法收敛很慢, 为了取得较好均衡效果, 算法收敛速度是重要的参考指标. 图 3 表明, 在迭代次数一定时, 误码率随迭代步长增加先快速降低, 后缓慢增加, 因此有一个最优的迭代步长存在. 均衡器在紫外信道收敛缓慢, 误码率先随步长增加而快速降低是因为步长较小时, 均衡器收敛非常慢, 增大步长, 收敛加快. 而后又增加是因为这时均衡器已经收敛, 增大步长会增加误码率. 从图可见, 紫外信道最优步长可取 $\mu = 0.005$ 左右.

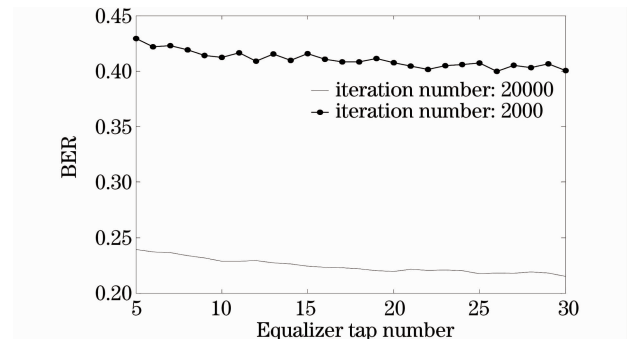


图 2 误码率与迭代次数, 滤波器阶数的关系

Fig. 2 BER versus length of equalizer tap vector for different iteration numbers

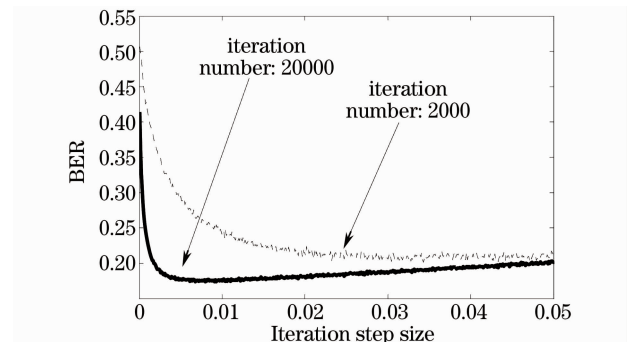


图 3 误码率与迭代次数, 迭代步长的关系

Fig. 3 BER versus step size for different iteration numbers

5.2 一种基于均方误差变步长 LMS 算法分析

在均衡器阶数为 10, 信噪比为 15 dB 时, 取 $\mu_{\max} = 0.3, \mu_{\min} = 0.001$, 对该算法进行仿真研究, 目的是找到适合紫外信道的最优化的参数设置. 因为紫外信道误码率严重, 我们的目的是减少误码率, 所以以误码率作为优化准则. 如图 4 所示, 最优参数 a 的值为 0.01, 在这个值时能取得最小的误码率. 这个结论从图 5 也可以得到, 在参数相同时, $a = 0.01$

能有最低误码率。当误码率相同时,参数的取值越大越好,因为这样可以提高收敛速度,所以参数 b 的最优值是 0.75。即是紫外信道中,该算法参数最优取值是 $a = 0.01, b = 0.75$ 。这个结论和红外信道不同^[9]。比红外相同参数小,这是因为紫外信道误码率高,需要较小的步长。但是这只是在一定条件下的最优,没有绝对的最优值,实际工程中,根据需要选用不同的值。

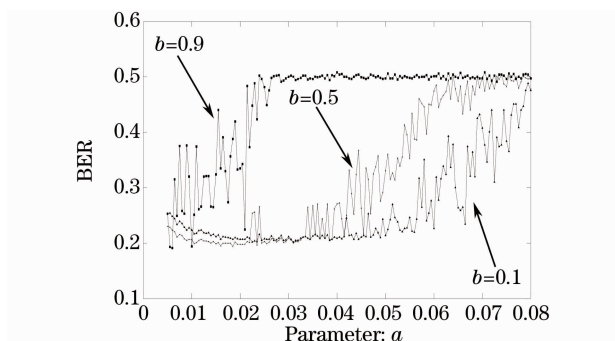


图 4 误码率与参数 a 的关系 ($a = 0.01$)

Fig. 4 BER versus parameter a for different parameter b ($a = 0.01$)

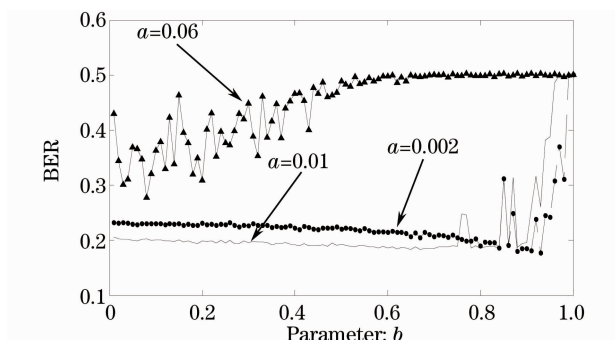


图 5 误码率与参数 b 的关系 ($b = 0.75$)

Fig. 5 BER versus parameter b for different parameter a ($b = 0.75$)

5.3 调整的基于笄舌线的变步长 LMS 算法分析

均衡器配置和前述一样。分析图 6,在参数 a 很小时,参数 b 对误码率影响不明显。但是当参数 $a > 0.1$ 时,参数 b 对误码率影响明显,如果 b 较大,那么对误码率的影响是质的变化。因此, b 不能取得太大,所以主要考虑图中的下面两条曲线。可以看出, $a = 0.35$ 是曲线的最低点,所以最优的 a 的取值近似等于 0.35。当然 a 可以取更小的值,也许可以达到更小误码率,但是收敛将非常慢。而图 7 显示在参数 b 比较小时, a 越大,误码率越小,在 b 较大时,却相反。综合考虑, $b = 0.2$ 是比较适合的。和前面算法一样,参数和误码率变化并不是单调的,所以没有绝对的最优值,得到的只是一定条件下的近似,工程

应用要根据具体情况考虑。

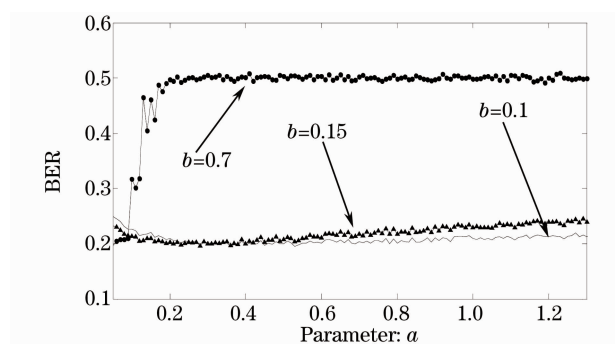


图 6 误码率与参数 a 的关系 ($a = 0.35$)

Fig. 6 BER versus parameter a for different parameter b ($a = 0.35$)

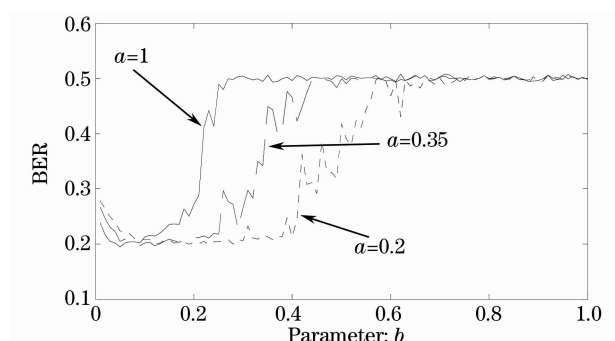


图 7 误码率与参数 b 的关系 ($b = 0.2$)

Fig. 7 BER versus parameter b for different parameter a ($b = 0.2$)

5.4 CMA 算法分析

图 8 是 CMA 盲均衡器误码率和均衡器阶数的关系。结果反应误码率在一个中心值周围起伏,误码率随阶数变化不大。这和 LMS 均衡器产生的原因是应该是类似的,也就是说紫外信道均衡中滤波器阶数可以不用取得太大。图 9 是盲均衡器误码率与迭代步长的关系,表明只要均衡器迭代足够次数收敛后,误码率迭代步长的关系并不十分明显。这可能是因为在紫外信道本身误码率高,均衡器收敛缓慢,所以步长影响不是很大。和图 3 LMS 均衡器结果差异的原因在于 LMS 均衡器稳态误差比 CMA 均衡器小比 CMA 均衡器收敛快,更易受步长的影响。而图 10 是 LMS 和 CMA 均衡器性能的比较,从图知,LMS 均衡器比 CMA 均衡器性能更好,不但收敛速度快,稳态均方误差小,而且收敛过程中均方误差起伏较小,但是由于发送训练序列,牺牲了部分带宽,在紫外低带宽低速通信中,这是非常可惜的。图 9 表明他们稳态均方误差差别不是非常大,所以可以采用由盲均衡器引导启动,在均方误差小于一定值时,切换为 LMS 均衡器。同时指出,CMA

均衡器与滤波器初始权向量值关系密切,在不同的初始值下,结果会有一些差别。

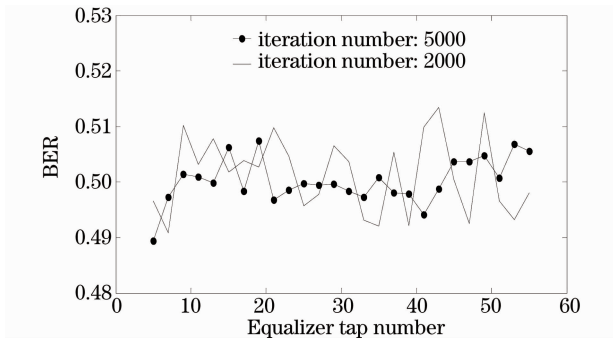


图 8 误码率与迭代次数,盲均衡器阶数的关系

Fig. 8 BER versus length of blind equalizer tap vector for different iteration number

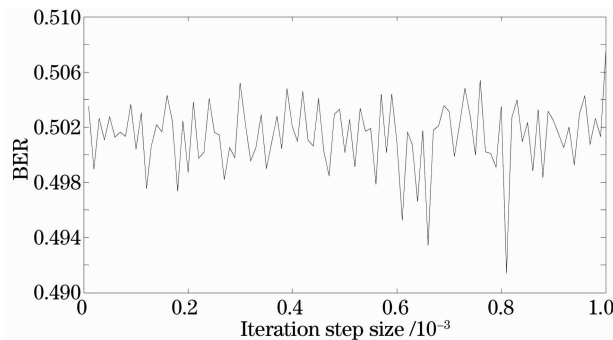


图 9 盲均衡器误码率与迭代步长的关系

Fig. 9 BER versus blind equalizer step size

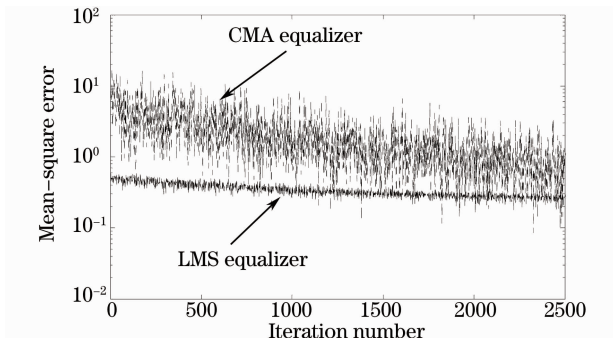


图 10 均方误差曲线

Fig. 10 Mean-square error (MSE) versus iteration number

6 结 论

研究了 LMS 类均衡器和盲均衡器在紫外通信中的应用。基于 OOK 调制方式,分析了紫外信道

响应,得出紫外信道响应系数向量。仿真表明,紫外信道误码率极高,只适合低速率通信,LMS 均衡算法在紫外信道中收敛很慢,滤波器阶数与均衡器输出误码率关系不明显,但是迭代步长存在一个最优的值;同时还得到了两种变步长 LMS 均衡算法中的参数和均衡器输出误码率的关系。证明了紫外信道是最小相位信道,可以进行盲均衡,结果指出,只要迭代次数足够,CMA 盲均衡器输出误码率与滤波器阶数。迭代步长关系不是很明显;同时表明 LMS 均衡器性能优于 CMA 盲均衡器。

参 考 文 献

- 1 Tao Feng, F. Xiong, G. Chen *et al.*. Effects of atmosphere visibility on performances of non-line-of-sight ultraviolet communication systems[J]. *Optik*, 2008, **119**(13): 612~617
- 2 Z. Xu, H. Ding, B. M. Sadler *et al.*. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1860~1862
- 3 Q. He, B. M. Sadler, Zhengyuan Xu. Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communication [C]. *SPIE*, 2009, **7464**: 74640H
- 4 H. Ding, G. Chen, A. Majumdar. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication[J]. *IEEE J. Sel. Area. Commun.*, 2009, **27**(9): 1535~1544
- 5 Feng Tao, Chen Gang, Fang Zujie. Multipath dispersion of pulse signals in a non-line-of-sight optical scattering channel[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 633~635
- 6 Feng Tao, Chen Gang, Fang Zujie. Atmospheric propagation model in non-line-of-sight optical scattering communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1522~1526
冯 涛, 陈 刚, 方祖捷. 非视线光散射通信的大气传输模型[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1522~1526
- 7 Luo Chang, Li Jiye. Adaptive signal detection in wireless ultraviolet and infrared communications [C]. Proceedings of Annual Conference of China Institute of Communications (ISTP), 2010, 363~368
- 8 T. Komine, J. H. Lee, S. Haruyama *et al.*. Adaptive equalization system for visible light wireless communication utilizing multiple white LED lighting equipment [J]. *IEEE Transa. Wirel. Commun.*, 2009, **8**(6): 2892~2900
- 9 G. Katz, D. Sadot. A nonlinear electrical equalizer with decision feedback for OOK optical communication systems [J]. *IEEE Transa. Commun.*, 2008, **56**(12): 2002~2006
- 10 Ke Xizhen, Yin Zhiyun. Coding Theory for Wireless Laser Communication System [M]. Beijing: Science Press, 2009, 287~358
柯熙政, 殷致云. 无线激光通信系统中的编码理论[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 287~358
- 11 Guo Yecai. Adaptive Blind Equalization [M]. Hefei: Hefei Industry University Press, 2007, 16~28
郭业才. 自适应盲均衡[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2007, 16~28