

# 无线紫外通信信道分析

罗 畅<sup>1,2</sup> 李霖野<sup>1</sup> 陈晓敏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 利用大气散射效应,无线紫外(UV)通信能够提供非视距的无线光通信。推导了紫外无线通信信道的脉冲响应近似解析表达式,以此研究紫外信道的特性。得出了信道长度,码间干扰和信道误码率与收发机光学几何结构,数据速率的关系。研究表明,信道带宽和时延扩展主要取决于大气条件,即大气衰减系数,同时得到了信道容量与衰减系数,通信距离的关系。结果表明,紫外通信系统对收发机光学结构敏感,带宽低,码间干扰严重,适合于低速近距离保密通信。

**关键词** 光通信;紫外光通信;信道;脉冲响应;码间干扰;频谱

**中图分类号** TN929.12

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP48.040602

## Analysis of Channel of Wireless Ultraviolet Communication

Luo Chang<sup>1,2</sup> Li Jiye<sup>1</sup> Chen Xiaomin<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Ultraviolet (UV) communication system can provide non-line-of-sight links by exploiting atmospheric scattering of light. The analytic expression of the channel impulse response to received signals is derived and then with this expression the channel characteristic is studied. The relationships between channel lengths, inter symbol interference, bit error rate, bit rate and system geometry configuration are achieved. The results indicate that the channel bandwidth mainly rests on the attenuation coefficient, and channel capability is affected by the communication range and attenuation coefficient. Ultraviolet communication system is sensitive to system geometry configuration and has very narrow bandwidth and severe inter symbol interference. It is suitable for low bit rate, short range and secret communications.

**Key words** optical communications; ultraviolet communications; channel; impulse response; inter symbol interference; frequency spectrum

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 060.0060

## 1 引言

紫外(UV)光散射通信(紫外通信)是利用大气中的粒子、气凝胶、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的通信方式。大气中的微粒对紫外光有很强的散射作用,所以紫外光通信可以进行非视距光通信,这是红外通信<sup>[1~3]</sup>不可比拟的优点。大气散射必然导致多路径接收脉冲展宽,由此带来非常严重的码间干扰,这是紫外光通信最大特点之一。紫外通信的研究还局限于大气条件对通信性能的影响<sup>[4]</sup>,能量衰减特性<sup>[5]</sup>,调制技术<sup>[6]</sup>,信道模型<sup>[7]</sup>的研究,另外本文作者还探讨了紫外通信自适应信号检测问题<sup>[8]</sup>。对信道脉冲响应的研究除了文献<sup>[7]</sup>,对信道其他方面的研究的报道很少。本文将研究紫外无线通信信道基础问题,推导了紫外无线通信信道的脉冲响应近似解析表达式,这个结论和文献<sup>[7]</sup>不同,是从另一

**收稿日期:** 2010-08-23; **收到修改稿日期:** 2010-10-20

**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:** 陈晓敏(1951—),女,研究员,博士生导师,主要从事飞船和卫星有效载荷数管系统设计方面的研究。

E-mail: chenxm@cssar.ac.cn

个角度的分析。然后以此为基础研究了紫外无线通信信道的脉冲响应,频谱特性,信道容量和码间干扰问题。

## 2 紫外光通信非视距单散射模型

紫外光在大气中的传播是一个非常复杂的过程,非视距(NLOS)单散射模型<sup>[9]</sup>是最常用。紫外光通信主要应用于短距离的通信,模型中主要考虑一次散射效应,即发射端发出的光子只经过一次大气散射就可到达接收器。对于非视距通信系统,发射机和接收机的配置结构如图1所示。发射和接收机处于非视距方式,光束的公共区域的光才有可能通过散射到达接收机,发射光束孔径角、接收机视场角、发射机和探测接收机仰角决定了重叠公共区域的大小与形状,从而影响信道的性质。非视距光的传输问题,采用长球面坐标系来分析是常用的方法<sup>[9,10]</sup>,如图2所示。其中, $\eta = (r_1 - r_2)/r$  ( $-1 \leq \eta \leq 1$ )。

假设系统配置如下, $\Omega_t$ 是发射立体角, $r$ 是收发间距, $r_1$ 和 $r_2$ 是公共重叠区域分别到发射机和接收机的距离, $\theta_R$ 是接收机半视场角, $\beta_R$ 是接收机顶角, $\theta_T$ 是发射光束发散角, $\beta_T$ 是发射机顶角, $E_t$ 是发射脉冲的能量, $k_s, k_a, k_e$ 分别是大气散射系数,吸收系数,衰减系数, $\theta_s$ 是散射角, $p(\theta)$ 是散射相位函数, $A_r$ 是接收天线表面积。假设在时间 $t = 0$ 时发出一个能量为 $E_t$ 的脉冲,假设能量均匀分布在发射立体角内,则接收机接收到的辐照度是<sup>[9]</sup>

$$E(\xi) = \begin{cases} 0 & \xi < \xi_{\min} \\ \frac{E_t c k_s \exp(-k_e r \xi)}{2\pi \Omega_t r^2} \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} \frac{2g[\phi_2(\xi, \eta)]}{\xi^2 - \eta^2} P(\theta_s) d\eta & \xi_{\min} < \xi < \xi_{\max} \\ 0 & \xi > \xi_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

$$\cos(\zeta) = \cos \beta_R \cos \psi_1 + \sin \beta_R \sin \psi_1 \cos \phi, \quad (2)$$

$$g[\phi_2(\xi, \eta)] = \phi_2(\xi, \eta) \cos \beta_R \cos \psi_1 + \sin \beta_R \sin \psi_1 \sin \phi_2(\xi, \eta), \quad (3)$$

式中 $\phi_2(\xi, \eta)$ 是 $\phi$ 坐标的积分限。

## 3 无线紫外通信信道响应特性

### 3.1 信道脉冲响应

从上面单散射模型的推导可知, $\xi = ct/r$ ,将其代如(1)式得到 $E(t)$ , $E(t)$ 就是信道的脉冲响应,但是该计算表达式过于复杂,所以下面将其化简。在散射体积比较小时, $\cos \zeta$ 是一个常数,根据文献[9], $\phi_2(\xi, \eta)$ 在某些情况下也就是一个常数,同时这种假设虽然会丢失一些精确性,但分析它的性能特点是足够的。现在(1)式的一个关键问题是坐标 $\eta$ 积分限的选取。根据文献[9]

$$\begin{cases} \eta_1(\xi) = \max\{\eta_{1,R}, \eta_{1,T}\} & (\xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max}) \\ \eta_2(\xi) = \min\{\eta_{2,R}, \eta_{2,T}\} & (\xi_{\min} \leq \xi \leq \xi_{\max}) \end{cases} \quad (4)$$

通过分析发现, $\eta$ 是关于 $\xi$ 的单调函数,在 $\xi$ 取较小的值时,也就是信道响应的初始阶段,得到 $\eta_{1,T} \geq \eta_{1,R}$ , $\eta_{2,T} \geq \eta_{2,R}$ 。一般情况下,信道响应初始阶段是起决定性作用的,所以得到 $\eta$ 的积分限是 $\eta_{1,T} \leq \eta \leq \eta_{2,R}$ 。对(1)式积分运算,并且将 $\xi = ct/r$ 代入得到脉冲响应

$$h(t) = \frac{mk_s \exp(-k_e ct)}{16\pi^2 r \sin^2(\theta_T/2)} \times \frac{1}{t} \times \{\ln[(c^2 t^2 - r^2)^2 - \ln\{[c^2 t^2 - 2rc \cos(\beta_R - \theta_R)t + r^2]\} - \ln\{[c^2 t^2 - 2rc \cos(\beta_T - \theta_T)t + r^2]\}]\}, \quad (5)$$

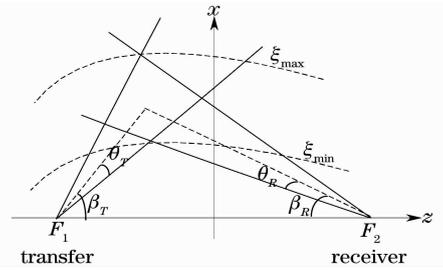


图1 非视距散射通信线路

Fig. 1 Non-line-of-sight communication

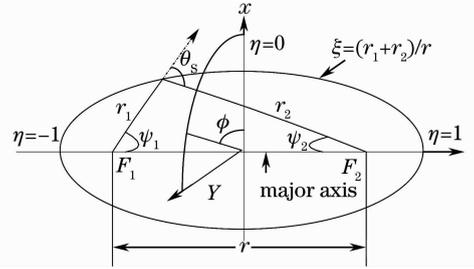


图2 长球面坐标系

Fig. 2 Prolate-spheroidal coordinates

式中  $m$  是一个常数,为便于分析,可取值为 1。取函数  $\ln(\cdot)$  的泰勒展开式,可知有一个多项式衰减部分。相比室内红外信道的指数衰减模型<sup>[11]</sup>,紫外信道还有多项式衰减部分,可以证明, $t$  在趋于无穷时,多项式部分是趋于 0 的。同时还有指数衰减部分,指数衰减系数有一个常数光速  $c$ ,所以指数部分的衰减是非常大的,能量与距离  $r$  的关系也非常复杂,对距离的依赖关系没有无线电通信和视距光通信大,在大于一定距离后,随距离  $r$  的变化不是很明显。 $\ln(\cdot)$  函数项和  $1/t$  项衰减速度远小于前面的指数衰减项,所以在分析时可以只保留指数衰减项。文献<sup>[5]</sup>的另一种近似方法也得到了类似的结论,结合上面的分析

$$h(t) = \frac{k_s \theta_R \theta_T^2 \sin(\beta_R + \beta_T) \exp(-k_e c t)}{4\pi^3 r \sin(\beta_T) (1 - \cos \theta_T)}, \quad (6)$$

### 3.2 信道长度

无线紫外通信信道相对稳定,是一个时不变信道。定义信道长度为  $L$  (以时间为单位),从图 1,图 2 可以计算出  $\xi$  的范围,从而得到信道长度<sup>[9]</sup>

$$L = \frac{r}{c} \times \frac{1 + \cos(\beta_R + \theta_R - \beta_T - \theta_T)}{\cos(\beta_R + \theta_R) + \cos(\beta_T + \theta_T)} - \frac{r}{c} \times \frac{1 + \cos(\beta_R - \theta_R - \beta_T + \theta_T)}{\cos(\beta_R - \theta_R) + \cos(\beta_T - \theta_T)}, \quad (7)$$

从(7)式知信道长度与  $r$  成正比,距离越长,码间干扰越大,同时信道长度与收发机配置密切相关。 $r = 500$  m,  $\beta_R = \beta_T = \pi/3$ ,  $\theta_T = \pi/12$ ,  $\theta_R = \pi/6$ ,  $k_e = 0.74$  km<sup>-1</sup>,  $k_s = 0.49$  km<sup>-1</sup>, 脉冲响应如图 3 所示。该图表明信道是一个有限脉冲响应(FIR)信道,并且信道展宽较大,码间干扰较为严重。图 4 描述了在半视场角为一确定值的情况下,收发机轴顶角,发射光发散角与信道长度的关系,假定收发机顶角相等,收发机顶角,发射光发散角增加将导致信道长度增加。图 5 表明在收发机顶角一定时,半视场角与发射光发散角的增加将引起信道长度的增加。图 6 说明在视场角与发射光发散角一定时,发射机与接收机顶角的增加将使得信道长度的增加。上面的结论说明,在设计实际系统时,收发机角度配置是十分重要的。从图 6 所示,信道长度的变化可以达到  $10^{-4}$  s,如果数据率为 1 Mb/s,那么在不同收发机配置结构时,信道长度的变化可有 100 个码元周期,这将对通信系统的性能造成巨大影响。

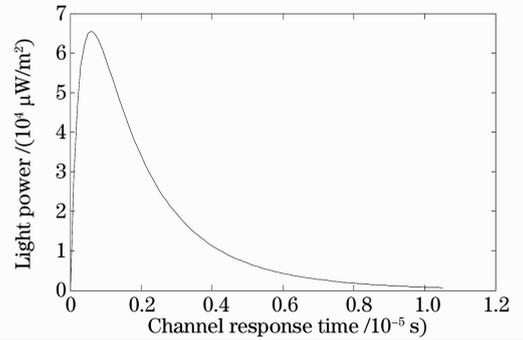


图 3 无线紫外通信信道

Fig. 3 UV communication channel

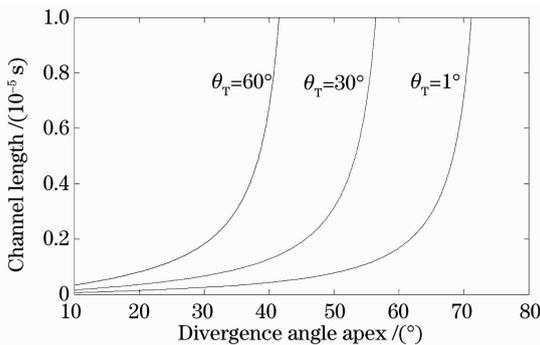


图 4 信道长度与收发机顶角,发射角关系

Fig. 4 Relationships between beam divergence angle, apex angle and channel length

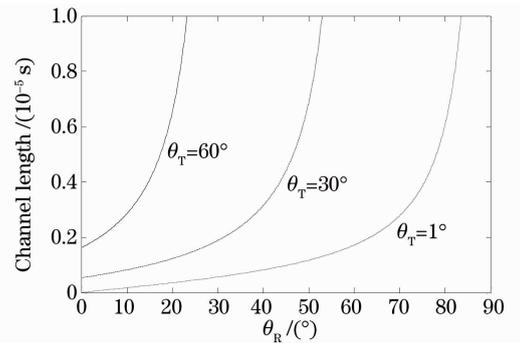


图 5 信道长度与视场角,发射角的关系

Fig. 5 Relationships between beam divergence angle, field of view and channel length

### 3.3 信道误码率

无线紫外通信信道误码率的分析是基于加性高斯白噪声信道,不考虑信号衰落等其他因数,也不考虑收发滤波器,只考虑大气物理信道。在光通信中开关键控(OOK)调制方式下,在信噪比较高时,在码间干扰存在时,误码率是<sup>[12]</sup>

$$R_{BE} = 2^{-M} Q[D_{SNR} (2h_0 - 1)], \quad (8)$$

$M$  是离散信道“尾巴”长度,如果码间干扰只发生在相邻比特之间,那么  $M=1$ 。 $Q(\cdot)$  是经典的  $Q$  函数,  $D_{\text{SNR}}$  是数字信噪比,  $h_0$  是信道归一化系数向量的第一个值,紫外通信信噪比(SNR)较高,在信噪比较高时,主要受它的影响。根据(8)式,如果  $h_0 < 0.5$ ,由于码间干扰,眼图是闭合的时误码率是非常高的,这只有  $h_0 > 0.5$ ,才可能取得比较低的误码率,  $h_0$  越大,误码率越小。在图 7 分析中,假定没有过采样,接收信噪比是 20 dB,发射光发散角  $10^\circ$ ,半视场角  $30^\circ$ ,距离  $r=200$  m,数据率 1 M/s。

图 7 描述了收发机顶角与  $h_0$ , 衰减系数的关系。在收发机顶角比较小时,误码率较小,且随顶角,衰减系数变化不大,因为这时信道长度较短,码间干扰不严重。在大于一定角度后,信道长度快速增加,误码率快速增大。从图 7 中还可以看出,在顶角大于  $60^\circ$  时,误码率太大,没法进行速率 1M 的通信,只有降低码率,无线紫外通信是一种低码率通信系统。图 8 说明数据速率与误码率的关系密切,数据速率越大,在信道不变的情况下,发生干扰码元数量就越多,必然引起误码率的增加。和图 7 类似,在顶角大于一定角度后,信道长度快速变长,如果数据率比较高,那么干扰码元增加越大,所以误码率会更高。紫外通信系统数据速率几乎不可能达到 500 kb/s。为了提高性能,在紫外通信中,通过信道估计采用自适应编码和均衡技术是必要的。

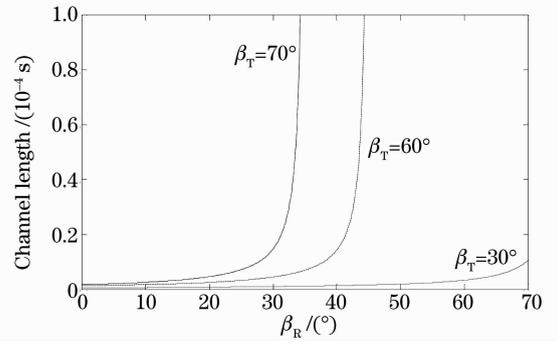


图 6 信道长度与发射顶角,接收顶角关系  
Fig. 6 Relationships between TR apex angle, RE apex angle and channel length

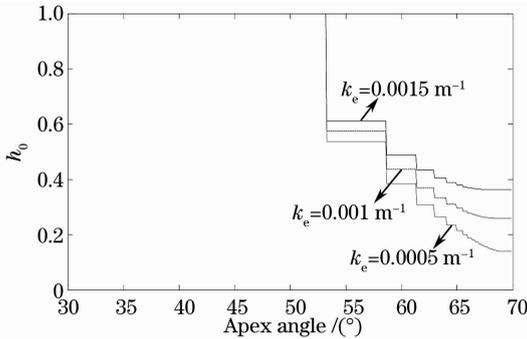


图 7 收发机轴顶角,衰减系数与  $h_0$  的关系  
Fig. 7  $h_0$  versus apex angle with different attenuation coefficients

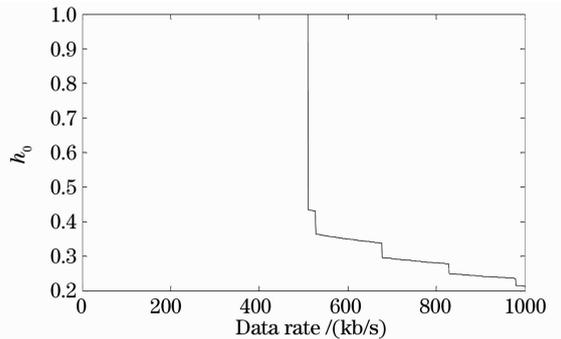


图 8 数据速率与的  $h_0$  关系  
Fig. 8  $h_0$  versus bit rate

#### 4 无线紫外通信信道频谱,带宽与信道容量

对(5)式进行傅里叶变换并取模的平方,得到信道的幅频响应

$$|H(f)|^2 = \left( \frac{k_s \theta_R \theta_T^2 \sin(\beta_R + \beta_T)}{4\pi^3 r \sin(\beta_T) (1 - \cos \theta_T)} \right)^2 \times \left\{ \frac{\exp(-2k_e c t_{\min}) + \exp(-2k_e c t_{\max})}{(k_e c)^2 + 4\pi^2 f^2} - \frac{2\exp[-k_e c(t_{\min} + t_{\max})] \cos[2\pi f(t_{\max} - t_{\min})]}{(k_e c)^2 + 4\pi^2 f^2} \right\}, \quad (9)$$

式中  $t_{\max}$  与  $t_{\min}$  是信道响应时间范围。信道的带宽可以用幅频函数的 3 dB 截止频率来表示。(9)式中,余弦项的变化值是  $(-1, 1)$ ,而分母  $f$  值的变化十分巨大,所以余弦函数值随  $f$  的变化可以不计,由此得到单边带宽

$$f_c = k_e c / 2\pi, \quad (10)$$

从而得到信道带宽主要受衰减系数影响,即是带宽主要受物理大气特性影响,与收发机配置结构关系不大。如果衰减系数是  $1.2 \text{ km}^{-1}$ ,那么截止频率是  $0.57 \times 10^5 \text{ Hz}$ ,这带宽是十分窄的,信号传输速率十分有限,所以也从理论上证明了紫外是一种短距离低码率传输系统。衰减系数越大,带宽越大,这是因为衰减系

数大,干扰码元的能量相对变小,码间干扰变小的缘故。假定  $r=500$  m,收发机顶角为  $60^\circ$ ,发射光发射角和半视场角  $15^\circ$ 。图 9 说明在信噪比较高时,随着衰减系数增加,信道容量也是增加的。这是因为衰减系数增加,引起信号能量减小,但因为噪声功率比较小,信号能量的减小对信噪比影响不大,这时起主要作用的是信道带宽,而信道带宽随衰减系数增加而增加。而在低信噪比时,图 10 表明信道容量随衰减系数的增加先是增加而后减小。虽然噪声功率比较大,但在衰减系数比较小时,信号能量随衰减系数的变化非常小,所以对信噪比影响不大,这时带宽起主要作用。而在衰减系数比较大时,信号能量随衰减系数增加而快速减小,引起信噪比降低,所以信道容量减小,图 11 是在高信噪比时得到的,说明信道容量随距离的变化非常大,但小于距离的变化率。随着距离增加,信道容量减小率是逐渐减小的,这表明在距离大于一定值后,信道容量变化比较小,对距离变化不再敏感。同时可以看出,数据速率可以达到每秒几百千比特,但不会超过  $1$  Mb/s。图 12 是在低信噪比时的结论,如果信噪比较低,数据速率最多达到每秒几十比特。综上,紫外通信系统性能随相关参数的变化比较大。

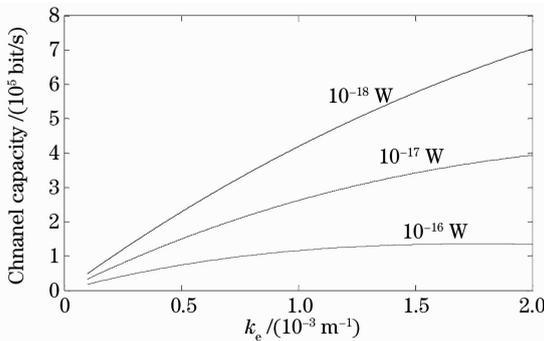


图 9 高信噪比时衰减系数与信道容量的关系

Fig. 9 Channel capacity versus attenuation coefficient with high SNR(noise power)

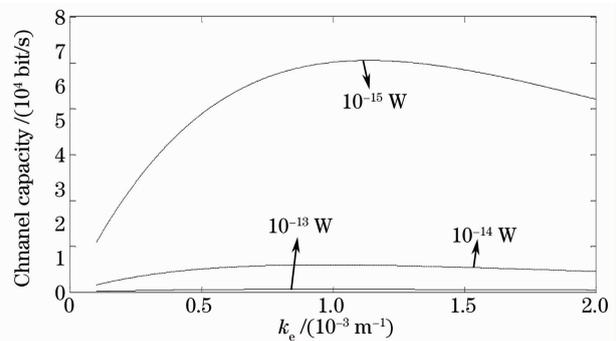


图 10 低信噪比时衰减系数与信道容量的关系

Fig. 10 Channel capacity versus attenuation coefficient with low SNR(noise power)

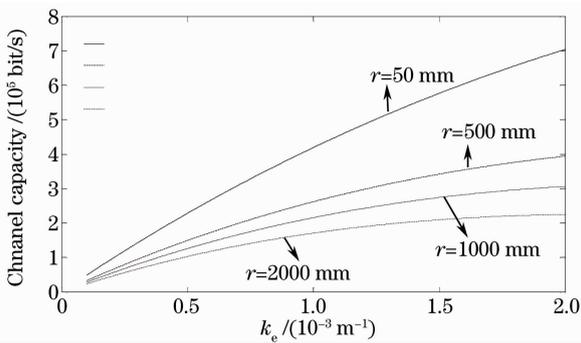


图 11 信道容量与距离,衰减系数的关系

Fig. 11 Channel capacity versus attenuation coefficient with different ranges

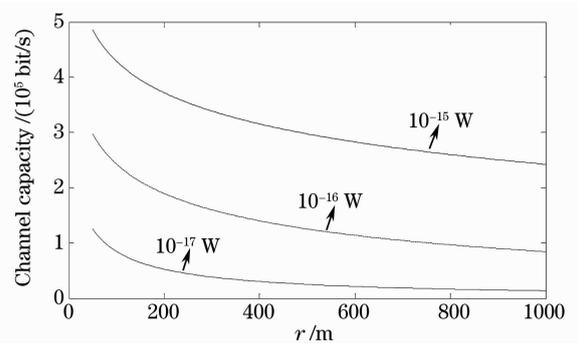


图 12 信道容量与距离,噪声功率的关系

Fig. 12 Channel capacity versus ranges with different SNR(noise power)

## 5 无线紫外通信信道时延扩展

下面采用信道延时扩展来分析码间干扰,紫外信道均方根延时扩展<sup>[12]</sup>  $D = 1/(2k_e c)$ ,而信道相干带宽是  $2k_e c/2\pi$ ,这和上节得到带宽的结论是一致的。延时扩展和带宽决定了数据无差错传输的最高速率。在不同的信道参数下(不同的衰减系数),均方根时延扩展值有很大的差距。这也说明紫外信道在不同情况下的变化较大。时延扩展越大,信道误码率就越高,若信道相干带宽小于信号带宽,则信道是频率选择性信道,信号将发生畸变。紫外通信中常采用强度调制与直接检测的通信方式,发射信号为脉宽不变的矩形脉冲信号,如果衰减系数是常用的  $0.0012$   $m^{-1}$ ,那么信号最高速率是  $57$  kbit/s,信号速率非常低,所以必须采用优良的信号处理技术提高信息速率,但是受限于物理信道实际特点,信号速率不会太高。

## 6 结 论

无线紫外通信是一种新型的通信技术,为了提高通信性能,对通信信道脉冲响应的研究十分必要。但是现在对通信信道的研究主要集中在紫外光能量在大气中衰减模型的探讨,只有几篇文献研究信道脉冲响应。从单散射模型出发,研究紫外信道的特性。得出了信道记忆长度,码间干扰和信道误码率与收发机光学几何结构,数据速率的关系。研究表明信道带宽和时延扩展主要取决于大气衰减系数,同时得到了信道容量与衰减系数,通信距离的关系。结果表明,紫外通信系统对收发机光学结构敏感,带宽低,码间干扰严重,适合于低速近距离保密通信。相关结论对收发机光学结构的设计与定量分析紫外通信系统的性能起到一定的指导作用。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Aimin, Zhou Yu, Sun Jianfeng *et al.*. Technology and progress of compound-axis pointing in satellite laser communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 40601  
闫爱民,周煜,孙建锋等. 卫星激光通信复合轴光跟瞄技术及发展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 40601
- 2 Lu Sha, Liang Zhongcheng, Wang Tingyu *et al.*. Study and simulation of the moving ship platform with free-space optical communication system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2934~2938  
卢莎,梁忠诚,汪亭玉等. 船载无线激光通信系统模拟运动平台的研制[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2934~2938
- 3 Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 347~351  
许楠,刘立人,万玲玉等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 347~351
- 4 Tao Feng, Fei Xiong, Gang Chen *et al.*. Effects of atmosphere visibility on performances of non-line-of-sight ultraviolet communication systems[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2008, **119**(13): 612~617
- 5 Xu Zhengyuan, Ding Haipeng, Sadler. Brian M. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1860~1862
- 6 Qunfeng He, Brian M. Sadler, Zhengyuan Xu. Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications[C]. *SPIE*, 2009, **7464**: 74640H
- 7 Haipeng Ding, Gang Chen, Arun K. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, **27**(9): 1535~1544
- 8 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
- 9 Luetgen. Mark R, Shapiro, Jeffrey H. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. *JOSA A*, 1991, **8**(12): 1964~1972
- 10 Gary A. Shaw, Melissa Nischan, Mrinal Iyengar. NLOS UV communication for distributed sensor systems[C]. *SPIE*, 2000, **4126**: 83~96
- 11 Carruthers. J. B, Kahn. J. M. Modeling of nondirected wireless infrared channels [J]. *IEEE Transactions on Communication*, 1997, **45**(10): 1260~1268
- 12 Aharonovich Marius, Arnon Shlomi. Performance improvement of optical wireless communication through fog with a decision feedback equalizer[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(8): 1646~1654