

无线紫外光非视距通信中链路间干扰模型研究

赵太飞 张爱利 金丹 官亚洲

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 针对无线紫外光散射通信的特点,介绍了无线紫外光通信中三种方式的链路间干扰,建立了基于蒙特卡罗的无线紫外光非视距(NLOS)单次散射通信仿真模型,并用理论公式验证了该模型的正确性。利用该模型仿真了无线紫外光通信非共面情况下的链路间干扰,结果表明:合理地调整工作链路接收端的接收仰角和视场角能更好地减小链路间干扰,提高通信系统的性能。

关键词 光通信;链路间干扰;蒙特卡罗法;非视距;紫外光

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706023

Research on the Inter-Link Interference Model in Wireless Ultraviolet Non-Line-of-Sight Communication

Zhao Taifei Zhang Aili Jin Dan Guan Yazhou

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract The characteristic of scattering and three kinds of inter-link interferences of wireless ultraviolet non-line-of-sight (NLOS) communication are studied. The wireless ultraviolet NLOS single scattering communication simulation model based on Monte Carlo method is established. The correctness of the model is verified by the theoretical formula. Using this model the non-coplanar inter-link interference in wireless ultraviolet communication is simulated. The results show that adjusting the receiving elevation and field angle of the working link receiver reasonably can reduce the inter-link interference and improve the performance of communication system.

Key words optical communications; inter-link interference; Monte Carlo method; non-line-of-sight; ultraviolet

OCIS codes 060.2605; 060.4251; 060.4510; 060.4250

1 引 言

无线紫外(UV)光通信主要采用波长为 200~280 nm 的波段作为传输介质,由于该波段的太阳辐射被臭氧分子强烈吸收,使得在近地太阳光谱中几乎没有此紫外光波段,该波段通常被称为“日盲区”^[1]。在“日盲区”进行信息传输时背景噪声小,并且可以全天候工作。由于大气中存在大量的粒子,紫外辐射在传输过程中存在较大的散射现象^[2],这种散射特性使无线紫外光通信系统能以非视距(NLOS)的方式传输信号,克服了自由空间光通信必须工作在视距方式的弱点^[3],从而能适应复杂的

地形环境。和传统的通信方式相比,无线紫外光通信的优点^[4]有数据传输的保密性高、系统的抗干扰能力强、全方位性,NLOS 通信和无需捕获、跟踪、对准(APT)^[5]等,因而被广泛应用到诸多领域^[6]。

在无线紫外光 NLOS 通信中,光信号经过发送光束和接收视场的空间重叠区域内有效散射体散射后到达接收端。文献[7]提出了一种非共面紫外光 NLOS 单次散射路径损耗模型,研究了发射端和接收端在非共面情况下的链路性能,但并没有研究同时存在多条通信链路情况下的非共面链路间干扰;文献[8]分别用数值分析法和蒙特卡罗(Monte

收稿日期: 2013-03-28; **收到修改稿日期**: 2013-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61001069)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2011JQ8028)、陕西省教育厅产业化培育项目(2012JC19)、西安市技术转移促进工程重大项目(CX12166)

作者简介: 赵太飞(1978—),男,博士,副教授,主要从事紫外光通信网络和无线光通信等方面的研究。

E-mail: year623@163.com

Carlo)法仿真了无线紫外光 NLOS 单次散射信道模型的路径损耗,但并没有仿真分析单次散射信道中多个发送节点对接收端的影响;文献[9]研究了紫外光 NLOS 串行共面中继链路的性能及链路间干扰,但并没有研究紫外光通信中多个节点通信时非共面任意角度交叉的链路性能。因此,本文研究了基于 Monte Carlo 的无线紫外光 NLOS 单次散射通信仿真模型,理论验证了该模型的正确性。在此基础上,研究多节点非共面通信时的链路间干扰,无线紫外光通信与发送仰角、接收仰角、发散角和视场角息息相关,仿真分析这些角度对链路间信噪比(SNR)的影响,通过合理地调整这些角度,可以减小链路间的干扰。该研究结果为无线紫外光通信网络的功率控制和拓扑控制提供了理论基础。

2 无线紫外光 NLOS 通信的链路间干扰分析

无线紫外光 NLOS 通信链路的平面图如图 1 所示,其中 T_x 为发送端, R_x 为接收端, ϕ_1 为发散角, θ_1 为发送仰角, ϕ_2 为视场角, θ_2 为接收仰角, V 为有效散射体区域, r 是发送端到接收端的基线距离, r_1 和 r_2 分别为发送端到有效散射体的距离和有效散射体到接收端的距离^[10]。 T_x 以 ϕ_1 和 θ_1 向空间发射光信号,光信号在有效散射体内散射后, R_x 以 ϕ_2 和 θ_2 进行光信号接收^[11]。无线紫外光接收端接收到的功率公式为^[10]

$$P_{r, \text{NLOS}} = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)} \cdot \exp\left[-\frac{K_e r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right], \quad (1)$$

式中 r 为通信直线距离, P_t 为发送功率, $K_e = K_a + K_s$ 为大气信道衰减系数(即消光系数),其中 K_a 为

吸收系数, K_s 为散射系数, A_r 为接收孔径面积, P_s 为散射角 θ_s 的相函数。根据 θ_1 和 θ_2 值大小的不同,将无线紫外光 NLOS 通信分为三种: $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$, 称为 NLOS(a); $\theta_1 < 90^\circ, \theta_2 = 90^\circ$, 称为 NLOS(b); $\theta_1 < 90^\circ, \theta_2 < 90^\circ$, 称为 NLOS(c)。

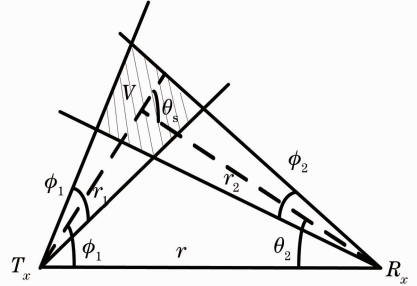


图 1 紫外光 NLOS 链路
Fig. 1 An NLOS UV link

无线紫外光散射通信存在严重的衰减,而信号发射功率又受到一定的限制,通过无线紫外光网络可以扩大其有效覆盖范围,充分发挥无线紫外光散射通信的优势。当多个节点进行组网通信时,节点的覆盖范围^[12]和链路间干扰^[9]直接影响紫外光通信网络的性能。衡量链路间干扰的性能指标有路径损耗、误码率和 SNR 等。通常,无线紫外光网络中常见的两条链路间关系有以下三种情况,如图 2 所示。其中图 2(a)为平行链路;图 2(b)为垂直链路,当两个发送端合并为一个发送端时,也属于垂直链路的一种;图 2(c)为任意角度交叉链路,平行链路和垂直链路属于任意角度交叉链路的特殊情况。基于此,链路间干扰也有三种情况,在图 2 的三种情况中, $T_{x1} - R_{x1}$ 和 $T_{x2} - R_{x2}$ 两条链路同时通信,若 R_{x1} 同时在 T_{x1} 和 T_{x2} 的覆盖范围内,那么 R_{x1} 就会同时接收到 T_{x1} 和 T_{x2} 发出的信号, R_{x1} 接收到 T_{x2} 发出的信号就是干扰信号。

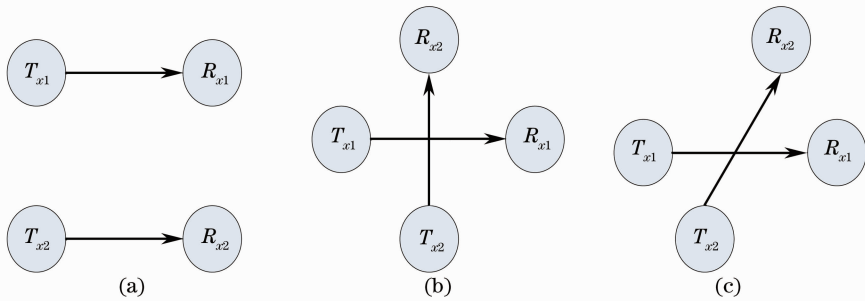


图 2 链路间关系的三种情况。(a)平行链路;(b)垂直链路;(c)任意角度交叉链路

Fig. 2 Three modes of link relationship. (a) Parallel link; (b) vertical link; (c) link with arbitrary angle

在实际的紫外光通信网络中,紫外光通信节点的发送端和接收端的位置关系有两种:共面的和非共面的。路径损耗 L 分别为^[13]

$$L_{\text{coplanar}} = \xi r^{-\alpha}, \quad (2)$$

$$L_{\text{noncoplanar}} = \xi r^{-\alpha} \exp(b\phi), \quad (3)$$

式中 ξ 为路径损耗因子, α 为路径损耗指数, ϕ 为发送端的偏轴角, b 是和收发仰角、发散角、视场角有关的因子。

无线紫外光非共面的链路间干扰如图 3 所示, $T_{x1} - R_x$ 处于共面位置,称为工作链路; $T_{x2} - R_x$ 处于非共面位置,称为干扰链路;图 3 所示通信情况称为单工作链路-单干扰链路。图 3 右上方的圆表示 T_{x2} 锥体和 R_x 锥体相贯的截面。若工作链路正在进行通信,此时干扰链路的 T_{x2} 也在发送信息,如果 R_x 同时在 T_{x1} 和 T_{x2} 的覆盖范围内,那么 R_x 就会同时接收到 T_{x1} 和 T_{x2} 发送的信息。链路间干扰最严重的位置即 T_{x2} 光轴在水平面的投影刚好在 $T_{x2} - R_x$ 连线的延长线上,此种情况称为 T_{x2} 对准 R_x 干扰,其他任意角度的链路间干扰在此种情况上,有一定角度的偏转。

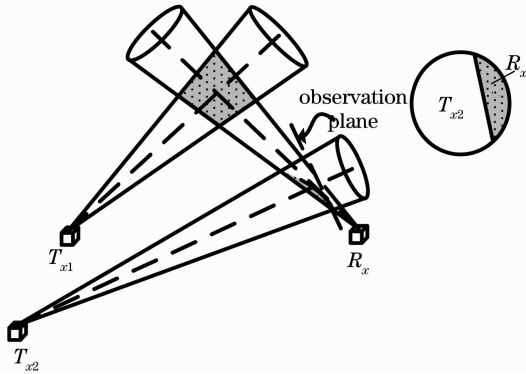


图 3 非共面的链路间干扰

Fig. 3 Inter-link interference with non-coplanar

3 基于 Monte Carlo 的无线紫外光 NLOS 单次散射通信仿真模型

Monte Carlo 法是一种基于随机数的模拟方法,基于 Monte Carlo 法的无线紫外光 NLOS 单次散射传输模型主要包括光源发射光子束、光子在大气中的散射传输和光子传输中止等。

光子的初始化主要确定光子的发射点和发射方向,将光子的发射限定在一定视场立体角范围内。图 4 为无线紫外光 NLOS 发射光子的立体图^[14],原点 O 为点光源位置,点光源的中心光轴在 xOz 平面内,光源在发射仰角 θ_1 和发散角 ϕ_1 内均匀发射光子。

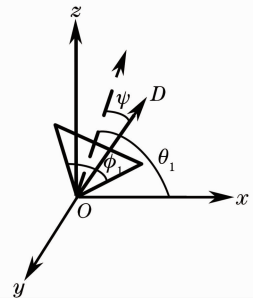


图 4 光源的发射立体角

Fig. 4 Solid angle of source

由于光源发射光子在 ϕ_1 内均匀发射,其方位角 ψ 和偏转角 θ 由计算机产生的 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数 $\xi^{(\psi)}$ 和 $\xi^{(\theta)}$ 得到, θ 在 $[0, \phi_1/2]$ 内取值, $\cos \theta$ 在 $[\cos(\phi_1/2), 1]$ 内均匀分布,则^[15]

$$\cos \theta = 1 - \xi^{(\theta)} [1 - \cos(\phi_1/2)]. \quad (4)$$

光子传输方向 OD 的坐标,在新坐标系下表示为 (u_x, u_y, u_z) ^[14], 即

$$\begin{cases} u_x = \sin \theta \cos \psi \\ u_y = \sin \theta \sin \psi. \\ u_z = \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

随机步长为^[15]

$$\Delta s = -[\ln \xi^{(s)}]/K_s, \quad (6)$$

式中 $\xi^{(s)}$ 是 $[0, 1]$ 区间服从均匀分布的随机数。

随机步长 Δs 确定以后,根据光子的初始状态坐标 (x, y, z) 和传输方向 (u_x, u_y, u_z) ,得到光子散射点的坐标为 (x', y', z') ^[14], 即

$$\begin{cases} x' = x + u_x \Delta s \\ y' = y + u_y \Delta s. \\ z' = z + u_z \Delta s \end{cases} \quad (7)$$

以上过程是无线紫外光光子的单次散射过程。根据无线紫外光波长与散射粒子尺寸的关系,无线紫外光通信的散射主要有瑞利散射和米氏散射。当散射体的尺寸小于光波波长时,称为瑞利散射,散射相函数如(8)式所示;当散射体的尺寸与光波波长相当时,称为米氏散射,散射相函数如(9)式所示^[14]:

$$p^{\text{Ray}}(\cos \theta_s) = \frac{3[1 + 3\gamma + (1 + \gamma)\cos^2 \theta_s]}{16\pi(1 + 2\gamma)}, \quad (8)$$

$$p^{\text{Mie}}(\cos \theta_s) = \frac{1 - g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1 + g^2 - 2g\cos \theta_s)^{3/2}} + f \frac{0.5(3\cos^2 \theta_s - 1)}{(1 + g^2)^{3/2}} \right], \quad (9)$$

式中 r, g, f 是模型参数。

无线紫外光 NLOS 传输的最后过程是光子的接收,即对接收端探测到光子的概率进行分析。首

先确定探测光子的角度,光子的发射仰角服从 $(\theta_1 - \phi_1/2, \theta_1 + \phi_1/2)$ 内的均匀分布,产生随机步长并发生散射,产生随机散射角 θ_s ,判定接收仰角是否在接收端的探测器范围 $(\theta_2 - \phi_2/2, \theta_2 + \phi_2/2)$ 内,若在此范围内光子被接收^[14],否则认为光子死亡。

散射后光子散射方向指向探测面的概率 p_{11} 为

$$p_{11} = \frac{1}{4\pi} \int [s_r p^{\text{Ray}}(\theta_s) + s_m p^{\text{Mie}}(\theta_s)] d\Omega, \quad (10)$$

式中 s_r, s_m 分别为瑞利散射和米氏散射的概率, $s_r = \frac{K_s^{\text{Ray}}}{K_s}, s_m = \frac{K_s^{\text{Mie}}}{K_s}$,散射系数 $K_s = K_s^{\text{Ray}} + K_s^{\text{Mie}}$; $p^{\text{Ray}}(\theta_s), p^{\text{Mie}}(\theta_s)$ 分别为瑞利散射和米氏散射的相函数; $d\Omega$ 为散射点指向探测面的立体角微元。

散射后光子不经过消光直接到达探测面的概率 p_{21} 为^[14]

$$p_{21} = \exp(-K_e |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}'|), \quad (11)$$

式中 \mathbf{r}_1 为散射的位置矢量, \mathbf{r}' 为接收端的位置矢量。

散射后光子的权重为

$$\omega_1 = (1 - p_{11}) \exp(-K_a |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|) \omega_0, \quad (12)$$

式中 $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0|$ 为随机步长, ω_0 为光子的初始权重。

综上探测器最终能够接收到光子的概率为^[15]

$$P = \omega_1 p_{11} p_{21}. \quad (13)$$

4 无线紫外光散射 Monte Carlo 仿真模型的正确性验证

为了验证 Monte Carlo 仿真模型的正确性,采用 Matlab 软件仿真平台将(1)式的计算结果和

Monte Carlo 仿真模型的结果进行对比。无线紫外光通信中 NLOS(b)最具有代表性,通过调整角度可以很容易地转换为 NLOS(a)和 NLOS(c),这里主要针对 NLOS(b)做具体的仿真。仿真过程中,系统模型参数的取值如表 1 所示^[14]。

表 1 系统模型参数

Table 1 System model parameters

Parameter	Value
Simulated photon number	10^6
Area of receiving aperture A_r/m^{-2}	1.77×10^{-4}
Absorption coefficient K_a	0.802×10^{-3}
Mie scattering coefficient $K_s^{\text{Mie}}/\text{m}^{-1}$	0.284×10^{-3}
Rayleigh scattering coefficient $K_s^{\text{Ray}}/\text{m}^{-1}$	0.266×10^{-3}
Rayleigh phase function scattering parameter γ	0.017
Mie phase function asymmetry parameter g	0.72
f	0.5

利用(1)式对提出的 Monte Carlo 模型进行验证,两者的仿真结果对比如图 5 所示,MC 和 TS 分别表示 Monte Carlo 和理论公式的仿真结果。图 5(a)分别采用 Monte Carlo 方法和理论公式仿真了 ϕ_1 对路径损耗的影响,其中 θ_1 为 $20^\circ, \phi_2$ 为 $30^\circ, \theta_2$ 为 90° ,由图可以看出两种方法的曲线变化基本一致,并且两者的仿真差值最大不超过 1 dB, ϕ_1 的变化对路径损耗影响不大。图 5(b)分别采用 Monte Carlo 法和理论公式仿真的 θ_1 对路径损耗的影响结果,其中 ϕ_1 为 $20^\circ, \phi_2$ 为 $30^\circ, \theta_2$ 为 90° ,可以看出两种方法仿真的曲线的趋向是一致的, θ_1 从 10° 变化到 80° ,路径损耗从 98 dB 变化到 108 dB;随着通信距离 r 的增加,路径损耗也是增大的。

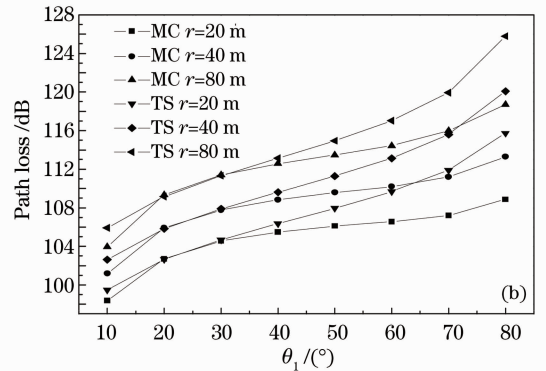
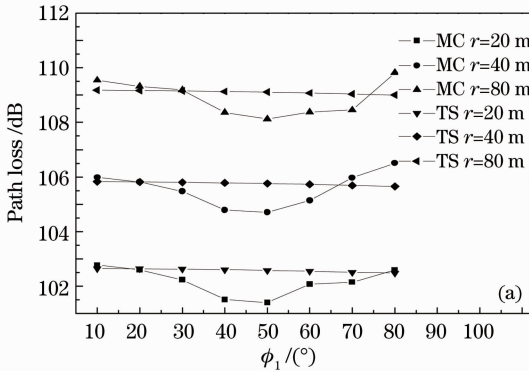


图 5 Monte Carlo 法和理论公式的仿真结果。(a)发送角对路径损耗的影响;(b)发送仰角对路径损耗的影响

Fig. 5 Simulation results of Monte Carlo method and theoretical formula. (a) Path loss versus transmitting beam angle; (b) path loss versus transmitting elevation angle

根据图 5(b)可以看出,当 $\theta_1 \geq 65^\circ$ 时,仿真结果的区别比较明显,这是因为(1)式适用于有效散射体体积较小的情况。其中对有效散射体的平面分析如

图 6 所示,当 θ_1 ($\angle BAG$)为 $65^\circ, \phi_1$ ($\angle CAE$)为 $20^\circ, \theta_2$ ($\angle ABH$)为 $90^\circ, \phi_2$ ($\angle FBD$)为 30° 时, AC 和 BD 平行,有效散射体 V 的体积趋近于无穷大。因此,当

$\theta_1 \geq 65^\circ$ 时, Monte Carlo 的仿真结果和理论公式的仿真结果会有 3 dB~7 dB 的差异。在实际的通信中, 虽然多次散射^[16]对接收到的光子数也有一定的影响, 但是一般单次散射起主导作用, 因此主要考虑了无线紫外光 NLOS 单次散射, 从图 5 中可以看出 Monte Carlo 模型和理论公式的仿真结果基本相吻合, 因此 Monte Carlo 模型的正确性得到了验证。

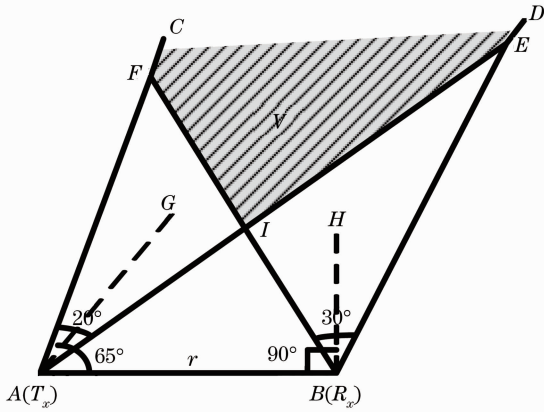


图 6 有效散射体的平面分析

Fig. 6 Analysis of effective scattering volume

5 无线紫外光链路间干扰的仿真结果

为了研究无线紫外光的非共面链路间干扰, 根据图 3 的节点非共面拓扑, 采取两种方案研究干扰链路对工作链路的影响: 1) T_{x1} 的 θ_1 和 ϕ_1 都为 20° , R_x 的 θ_2 和 ϕ_2 分别为 90° 和 30° , 研究 T_{x2} 参数变化对 SNR 的影响; 2) T_{x1} 的 θ_1 和 ϕ_1 都为 20° , T_{x2} 的 θ_1 和 ϕ_1 分别为 40° 和 20° , 研究 R_x 参数变化对 SNR 的影响。

T_{x2} 参数变化对 SNR 影响的仿真结果如图 7 所示, T_{x2} 的 θ_1 从 10° 变化到 90° , 变化间隔为 10° , 图中每条曲线应该有 9 个仿真值, 图中没有出现的点是因为干扰链路的影响远低于自然界的背景噪声。结

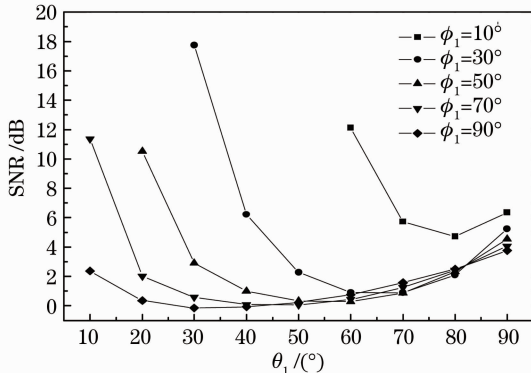


图 7 T_{x2} 参数变化对信噪比的影响

Fig. 7 SNR versus different T_{x2} parameters

果表明, SNR 的值对小的 ϕ_1 和 θ_1 变化比较敏感; 当 T_{x2} 的 θ_1 一定时, T_{x2} 的 ϕ_1 越小, SNR 的值越大; 当 T_{x2} 的 ϕ_1 一定时, T_{x2} 的 θ_1 越小, SNR 的值就越大。这是因为 T_{x2} 的 ϕ_1 和 θ_1 越小, 有效散射体的体积就越小, 因此 R_x 能够接收到的干扰光子数就越少, T_{x2} 对 $T_{x1} - R_x$ 链路的干扰就越小。当 ϕ_1 为 90° , 随着 θ_1 的增大, SNR 的值基本不变, 是因为发射光子数是一定的, 虽然有效散射体的体积增大, 但是单位体积内的光子数减小。在 θ_1 为 60° 时, SNR 的值最小, 此时有效散射体的体积接近于无穷大, 能够接收到的干扰光子数是最多的。因此, 当 $T_{x1} - R_x$ 链路确定时, 尽可能减小 T_{x1} 的 θ_1 和 ϕ_1 , 降低链路间干扰, 提高 SNR 的值。

R_x 参数变化对 SNR 影响的仿真结果如图 8 所示, 对数值的处理和图 7 一样, 舍弃了背景噪声低于自然噪声的点。结果表明, 当 R_x 的 θ_2 一定时, R_x 的 ϕ_2 越小, SNR 的值越大; R_x 的 ϕ_2 一定时, R_x 的 θ_2 越小, SNR 的值越大; 因为 R_x 的 ϕ_2 和 θ_2 的越小, 有效散射体的体积就越大, R_x 能够探测到的光子数就越少。当 R_x 的 θ_2 为 60° 时, SNR 的值最小, 因为此时有效散射体的体积达到最大值, R_x 接收到的干扰光子数最多, 此结果和理论仿真结果基本是一致的。从整体来看, 图 8 的 SNR 变化范围比图 7 的 SNR 变化范围要大, 因此, 调整 R_x 端的参数, 更能有效地减少链路间的干扰, 提高通信系统的性能。

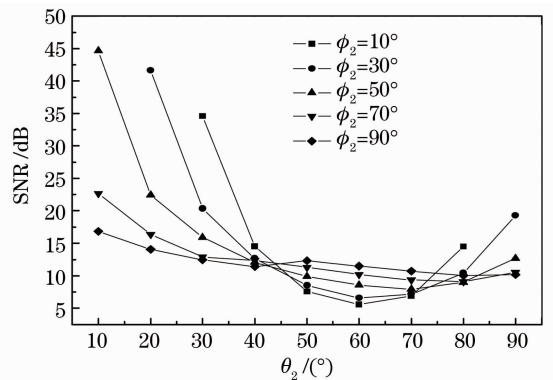


图 8 R_x 参数变化对信噪比的影响

Fig. 8 SNR versus different R_x parameters

6 结 论

介绍了无线紫外光 NLOS 通信的基本原理, 建立了基于 Monte Carlo 的无线紫外光 NLOS 通信仿真模型, 并且用理论公式验证了该模型的正确性。在此基础上研究了紫外光网络中非共面的链路间干扰问题, 针对单工作链路-单干扰链路通信情况, 调

整工作链路接收端参数比调整干扰链路发射端参数得到的效果要好,即能很好地减小链路间干扰。通过研究干扰最严重的情况即干扰链路发送端对准工作链路接收端时的链路干扰,可以为无线紫外光组网通信和网络拓扑控制提供理论基础。

参 考 文 献

- 1 Haipeng Ding, Gang Chen, Arun K Majumdar, *et al.*. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels [C]. SPIE, 2011, 8038: 80380.
- 2 Yi Tang, Zhongliang Wu, Guoqing Ni, *et al.*. NLOS single scattering model in digital UV communication [C]. SPIE, 2008, 7136(2): 713615.
- 3 Li Fei, Wu Yi, Hou Zaihong. Analysis and experimental research on bit error rate for free-space optical communication systems through turbulent atmosphere [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0606002.
李 菲, 吴 毅, 侯再红. 湍流大气光通信系统误码率分析与实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0606002.
- 4 M Geller, G B Johnson, J H Yen. Short-range UV communication links [C]. Fort Wayne: Proceedings of the Tactical Communication Conference, 1986. 60.
- 5 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
- 6 Wang Zhengfeng, Fu Xiuhua, Zhang Jing. Research on imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1207002.
王正凤, 付秀华, 张 静. 日盲紫外告警洗系统中成像滤光片的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1207002.
- 7 Yong Zuo, Houfei Xiao, Jian Wu, *et al.*. A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels [J]. Opt Express, 2012, 20(9): 10359–10369.
- 8 Pengfei Luo, Min Zhang, Dahai Han, *et al.*. Performance analysis of short-range NLOS UV communication system using Monte Carlo simulation based on measured channel parameters [J]. Opt Express, 2012, 20(21): 23489–23501.
- 9 Qunfeng He, Zhengyuan Xu, Brian M Sadler. Non-line-of-sight serial relayed link for optical wireless communications [C]. The 2010 Military Communication Conference, 2010. 1588–1593.
- 10 Zhengyuan Xu. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links [C]. IEEE International Conference, 2007. III-577–III-580.
- 11 Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306001.
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306001.
- 12 Zhao Taifei, Feng Yanling, Ke Xizheng. Research on the coverage area of communication in the solar-blind UV communication network [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2230–2235.
赵太飞, 冯艳玲, 柯熙政. “日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2230–2235.
- 13 Leijie Wang, Yiyang Li, Zhengyuan Xu. Wireless ultraviolet network models and performance in noncoplanar geometry [C]. IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications, 2010. 1037–1041.
- 14 H P Ding, G Chen, A Majumdar. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1535–1544.
- 15 Shao Zhengzheng, Chang Shengli, Lan Yong. Numerical simulation of NLOS ultraviolet signal propagation characteristics [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(6): 18–24.
邵铮铮, 常胜利, 兰 勇. 非视线紫外光信号传输时间特性的数值模拟[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 18–24.
- 16 Haipeng Ding, Gang Chen, Zhengyuan Xu, *et al.*. Characterization and modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering communication channels [C]. Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010. 593–597.

栏目编辑: 王晓球