

包含非视距链路的室内可见光通信倾角式光学接收端的设计与分析

沈振民, 蓝天, 刘国彦, 李湘, 倪国强

(北京理工大学 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 室内可见光通信是一种利用室内照明白光 LED 灯来实现高速通信的新兴技术。当接收器在室内角落时较大的接收角限制了光电探测器的接收功率, 从而降低了系统信噪比。为了实现接收器在室内各个位置处均能获得最大功率, 提出了包含非视距链路情况下(墙壁一次反射)倾斜探测器接收面的设计方法, 即在考虑视距链路(直射)的同时, 还考虑了墙壁一次反射非视距链路下倾斜接收器的倾角设计。在室内各个位置处的最优倾斜角度可以通过牛顿算法得到, 该快速算法的迭代次数仅为 3~4 次。仿真结果表明, 倾斜接收器后系统最小信噪比提高大约 5 dB, 最大信噪比和平均信噪比均提高大约 2 dB。尤其对改善室内角落处的信噪比最为显著。

关键词: 光通信; 光电探测器; LED; 非视距链路

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2783-06

Design and analysis of optical receiver end by tilting receiver plane in indoor visible light communication including the NLOS link

Shen Zhenmin, Lan Tian, Liu Guoyan, Li Xiang, Ni Guoqiang

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Indoor visible light communication is a burgeoning technology that uses white light-emitting diodes (LED) for illumination to realize high rate communication. The receiving power of photodetector is limited when receiver is in the corners of the room due to the larger receiving angle, thus the signal to noise ratio (SNR) is decreased. The design method of tilting receiver plane was proposed to obtain the maximum in each place of the room including the Non-Line-of-Sight (NLOS) link. In this paper, the Line-of-Sight(LOS) was not only considered, but also the NLOS link was considered for the method of tilting the receiving plane. Newton method was employed to find the optimal tilting angle of receiver in each position of the room and the iteration numbers of this algorithm were about three or four steps which was very fast. The simulation results show that the minimum SNR is increased 5 dB and the maximum and average SNR are both increased 2 dB. Especially, the SNR in the corners of the room is obviously increased.

Key words: optical communications; photodetectors; light emitting diode; line-of-sight

收稿日期: 2015-01-07; 修订日期: 2015-02-03

基金项目: 国家 973 项目(2013CB329200)

作者简介: 沈振民(1983-), 男, 博士生, 主要从事可见光方面的研究。Email: szm@bit.edu.cn

导师简介: 倪国强(1946-), 男, 教授, 主要从事光信息处理方面的研究。Email: nigq01@sina.com

0 引言

近些年来随着白光 LEDs 光源的迅猛发展,使其用于室内照明成为了现实。与白炽灯和日光灯相比,白光 LEDs 具有高能量效率,低功耗,长寿命等优点。除照明优点外,高达几 MHz 到几百 MHz 的调制带宽使其用于通信成为可能,且不需频谱许可^[1-4]。

目前,国内外对于可见光通信系统的研究主要聚焦在调制方式和信道模型上。

调制方式主要有 OOK、OFDM、WDT 等^[5-7];而信道模型是根据红外通信演变而来,主要分析室内信道的功率分布、码间干扰对通信速率带来的影响等。目前报道可见光通信速率在较短距离内可以实现 1 Gbit/s 以上^[8-9]。参考文献[10]报道了在 30 cm 的范围内使用 WDT 调制技术数据传输速率可达 3.4 Gbit/s。对于可见光通信系统的研究主要关注如何提高通信速率,而忽视了实际的应用场景。在室内接收端位置与 LED 灯最短距离也要大约 2 m,而且在角落处距离更远,并且角落处接收器相对较大的接收角会使得接收功率大大降低。

合理的光学接收端的设计能增加系统的接收功率,提高系统的信噪比以及避免阴影遮挡引起的通信中断,进而提高系统的通信速率。参考文献[11]设计了多面体式光学接收端,实现了水平 360°视场角、垂直 180°视场角的全方位覆盖,而此种设计方法成本较高,需要七个探测器。参考文献[12]中使用了倾斜接收器的方式,但是仅仅考虑了视距链路(直射)的情况;而且当多个 LED 灯布局时,仅仅在室内周

$$P_{R(NLOS)} = \begin{cases} \sum_{i=1}^k \left\{ \int_{\text{walls}} \frac{(m+1)A_R}{2\pi^2 D_1 D_2} P_S \rho \cos^m(\phi_i) \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) T_S(\psi') g(\psi') \cos(\psi') dA_{\text{wall}} \right\}, & 0 \leq \psi' \leq \Psi_c \\ 0, & \psi' > \Psi_c \end{cases} \quad (4)$$

图 1(a)为接收器水平放置在桌面上,而图 1(b)接收器朝着 LED 灯的方向有一个倾角 β 。

如图 1 所示,当接收器倾斜时,认为其中心位置坐标不变,则无论倾斜与否,LED 灯与接收器的坐标位置不发生改变,即向量 V_{RS} 不发生改变,其坐标表示为 $V_{RS}=(a, b, c)=(X_S, Y_S, Z_S)-(X_R, Y_R, Z_R)$; 向量 V_{RW} 也不发生改变,其坐标表示为 $V_{RW}=(a', b', c')=(X_W, Y_W, Z_W)-(X_R, Y_R, Z_R)$; 向量 V_{SW} 也不发生改变,其坐标

边进行了接收器的倾斜。而文中在原有基础上将墙壁一次反射的非视距链路情况也包含在内,因为墙壁反射对室内接收功率和信噪比的影响不可忽视,另外当多个 LED 灯布局时,对室内每个位置接收器均进行了倾斜,使其达到最大信噪比接收。

1 包含非视距链路的倾角式接收器设计原理

假设 LED 光源符合普通朗伯辐射模式,其辐射强度为:

$$R(\phi) = \frac{m+1}{2\pi} P_S \cos^m(\phi) \quad \phi \in [-\pi/2, \pi/2] \quad (1)$$

式中: m 为辐射模式数,有 $m = \ln(1/2)/\ln(\cos(\phi_{1/2}))$; $\phi_{1/2}$ 为 LED 半功率角; P_S 为辐射功率; ϕ 为辐射方向角。

室内可见光通信系统接收器接收光信号能量包括两部分:视距链路(直射)和非视距链路(墙壁反射)。参考文献[12]中仅考虑了视距链路情况,而忽略了墙壁反射对信噪比分布带来的影响,而文中考虑了墙壁一次反射的情况,因此,接收器接收的总功率为:

$$P_{R(\text{Total})} = P_{R(\text{LOS})} + P_{R(\text{NLOS})} \quad (2)$$

视距链路接收功率为:

$$P_{R(\text{LOS})} = \begin{cases} \sum_{i=1}^k \frac{(m+1)A_R P_S}{2\pi L_i^2} \cos^m(\phi_i) \cos(\psi_i) g(\psi_i), & 0 \leq \psi_i \leq \Psi_c \\ 0, & \psi_i > \Psi_c \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为 LED 灯个数; A_R 为探测器有效面积; L_i 为光电探测器到各个 LED 灯的距离, $g(\psi) = \begin{cases} n^2/\sin^2(\Psi_c), & 0 \leq \psi \leq \Psi_c \\ 0, & \psi > \Psi_c \end{cases}$; $T_S(\psi)$ 为光学滤波增益; Ψ_c 为接收器半视场角; n 为光学接收天线折射率。

非视距链路(墙壁一次反射)接收功率为:

表示为 $V_{SW}=(a'', b'', c'')=(X_W, Y_W, Z_W)-(X_R, Y_R, Z_R)$; 角度 ϕ 也不发生改变,可表示为:

$$\cos \phi = \frac{Z_S - Z_R}{\|(X_S, Y_S, Z_S) - (X_R, Y_R, Z_R)\|} \quad (5)$$

接收器倾斜后,由于向量 V_{SW} 和向量 V_{RW} 不发生改变,因此墙壁某一点处角 θ_1 和角 θ_2 不变。由于墙壁有四面,因此墙壁法向量有两种: $V_W=(1, 0, 0)$ 或 $V_W=(0, 1, 0)$ 。则角度 θ_1 和 θ_2 分别可表示为:

$$\cos \theta_1 = \frac{V_{SW} \cdot V_W}{\|V_{SW}\| \times \|V_W\|} = \frac{a''}{\sqrt{a''^2 + b''^2 + c''^2}} \quad (6)$$

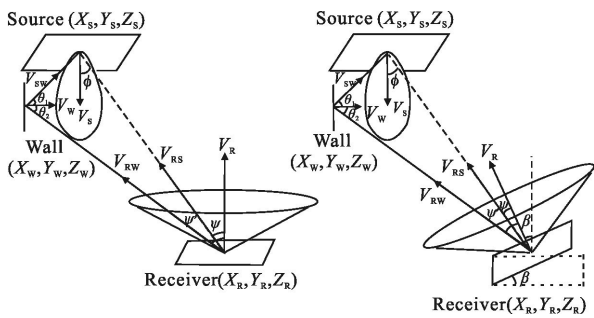
或

$$\cos \theta_1 = \frac{V_{SW} \cdot V_W}{\|V_{SW}\| \times \|V_W\|} = \frac{b''}{\sqrt{a''^2 + b''^2 + c''^2}} \quad (7)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{V_{RW} \cdot V_W}{\|V_{RW}\| \times \|V_W\|} = \frac{a'}{\sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2}} \quad (8)$$

或

$$\cos \theta_2 = \frac{V_{RW} \cdot V_W}{\|V_{RW}\| \times \|V_W\|} = \frac{b'}{\sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2}} \quad (9)$$



(a) 接收器水平方式 (b) 接收器倾斜放置
(a) Before tilting receiver plane (b) After tilting receiver plane

图1 光源和接收器示意图

Fig.1 Sketch map of light source and receiver

接收器朝着LED灯的方向倾斜后,接收器平面的法向量发生改变,从而导致角度 ψ 和 ψ' 发生改变。水平放置在桌面的接收器接收面的单位法向量坐标为 $V_R=(0,0,1)$, 而朝着LED灯方向倾斜 β 后,接收器接收面的单位法向量为 $V_R=(\sin\beta\cos\alpha, \sin\beta\sin\alpha, \cos\beta)$ 。其中方位角 α 是LED灯在水平桌面的投影点与接收器中心点构成的线段与X轴的夹角,该投影点相对于接收器中心点位置有四种情况,如图2所示。即分别位于以接收器为中心的 I、II、

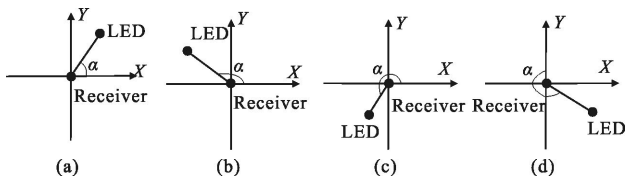


图2 LED灯在水平桌面投影点与接收器的位置关系

Fig.2 Position relation between receiver and LED for horizontal projection of point

III、IV象限内,可表示为:

$$\alpha = \begin{cases} \arctan(|(Y_S - Y_R)/(X_S - X_R)|) & \text{I} \\ \pi - \arctan(|(Y_S - Y_R)/(X_S - X_R)|) & \text{II} \\ \pi + \arctan(|(Y_S - Y_R)/(X_S - X_R)|) & \text{III} \\ 2\pi - \arctan(|(Y_S - Y_R)/(X_S - X_R)|) & \text{IV} \end{cases} \quad (10)$$

接收器水平放置时,视距链路下 $\psi = \phi$ 。接收器倾斜 β 角后,视距链路下 ψ 为:

$$\cos \psi = \frac{V_{RS} \cdot V_R}{\|V_{RS}\| \times \|V_R\|} = \frac{a \sin \beta \cos \alpha + b \sin \beta \sin \alpha + c \cos \beta}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (11)$$

接收器水平放置时,非视距链路下 ψ' 为:

$$\cos \psi' = \frac{V_{RW} \cdot V_R}{\|V_{RW}\| \times \|V_R\|} = \frac{c'}{\sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2}} \quad (12)$$

接收器倾斜 β 角后,非视距链路下 ψ' 为:

$$\cos \psi' = \frac{V_{RW} \cdot V_R}{\|V_{RW}\| \times \|V_R\|} = \frac{a' \sin \beta \cos \alpha + b' \sin \beta \sin \alpha + c' \cos \beta}{\sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2}} \quad (13)$$

因此,在只有一个LED灯时,接收器朝着LED灯倾斜 β 角后的总接收功率为:

$$P_R(\beta) = \frac{(m+1)A_R \cos^m(\phi)}{2\pi L^2 \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} P_S(a \sin \beta \cos \alpha + b \sin \beta \sin \alpha + c \cos \beta) T_S(\psi) g(\psi) + \int_{\text{walls}} \frac{(m+1)A_R(a' \sin \beta \cos \alpha + b' \sin \beta \sin \alpha + c' \cos \beta)}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2 \sqrt{a'^2 + b'^2 + c'^2}}$$

$$P_S \rho \cos^m(\phi) \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) T_S(\psi') g(\psi') \cos(\psi') dA_{\text{wall}} \quad (14)$$

当室内分布多个LED灯时,一个接收器不可能向多个LED灯同时倾斜,在这里笔者让接收器朝距离最近的LED灯倾斜。当距离最近的LED灯有多个时,只针对其中一个进行倾斜。倾斜后总的接收功率为:

$$P_R(\beta) = \sum_{i=1}^k \frac{(m+1)A_R \cos^m(\phi_i)}{2\pi L^2 \sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}} P_S(a_i \sin \beta \cos \alpha_i + b_i \sin \beta \sin \alpha_i + c_i \cos \beta) T_S(\psi_i) g(\psi_i) + \sum_{i=1}^k \int_{\text{walls}} \frac{(m+1)A_R(a'_i \sin \beta \cos \alpha_i + b'_i \sin \beta \sin \alpha_i + c'_i \cos \beta)}{2\pi^2 D_1^2 D_2^2 \sqrt{a_i'^2 + b_i'^2 + c_i'^2}} P_S \rho \cos^m(\phi_i) \cos(\theta_{1i}) \cos(\theta_{2i}) T_S(\psi'_i) g(\psi'_i) dA_{\text{wall}} \quad (15)$$

当接收器(仅一个)和LED灯(一个或多个)位置确定后,公式(14)和(15)中变量仅为倾角 β ,即 β 取何值时接收的总功率达到最大。使用牛顿算法可快速算出 β 值。牛顿算法如公式(16)所示,初始 β 值为0。

$$\beta_{N+1} = \beta_N - \frac{P_{R(\text{Total})}^{(1)}(\beta_N)}{P_{R(\text{Total})}^{(2)}(\beta_N)} \quad (16)$$

式中： $\beta_N^{(1)}$ 和 $P_{R(\text{Total})}(\beta_N)$ 和 $\beta_N^{(2)}$ 和 $P_{R(\text{Total})}(\beta_N)$ 分别是 $P_{R(\text{Total})}(\beta_N)$ 的一阶和二阶导数。

2 倾角式接收器对系统信噪比的提高

可见光通信系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 可见光通信系统参数

Tab.1 Parameters of VLC system

Item	Value
Room length/m	5
Room width/m	5
Room height/m	3
Desk of height/m	0.85
Distance from LED to ceiling/m	0
Reflectivity of wall	0.7
Semi-angle of at half illuminance of an LED/(°)	70
Physical area of the detection/m ²	10 ⁻⁴
Field of view of the detection/(°)	160
O/E conversion efficiency/A·W ⁻¹	0.54
Refractive index	1.5
Modulation	0.2
Position for an LED	[2.5,2.5,3.0]
Position for four LEDs	[1.5,1.5,3.0] [3.5,1.5,3.0] [1.5,3.5,3.0] [3.5,3.5,3.0]

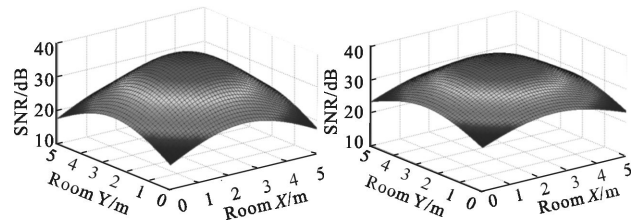
对于 OFDM 调制方式,其信噪比可表示为:

$$SNR = \frac{(\gamma P_R M_i p(t))^2}{\delta_{shot}^2 + \delta_{thermal}^2} \quad (17)$$

式中： γ 为探测器响应度； M_i 为调制度； $p(t)$ 为归一化的 OFDM 调制信号的功率，即 $|p(t)|^2=1$ ； δ_{shot}^2 为散粒噪声； $\delta_{thermal}^2$ 为热噪声^[13]。

当室内仅有一个 LED 灯时 (具体位置见表 1)，单个 LED 功率是 16 W，桌面上接收器倾斜前后的信噪比分布如图 3 所示，倾斜前后的最大信噪比均是 37.96 dB，这是因为当接收器位于 LED 灯正下方时才会有最大功率，此时接收器无需倾斜。倾斜前与倾斜后最小信噪比分别是 17.35 dB 和 23.03 dB，提

高了 5.68 dB。从图 3 可以看出最小信噪比位于室内四个角落处，说明在室内角落附近通过倾斜方式信噪比有明显的改进。倾斜前与倾斜后的平均信噪比分别是 28.32 dB 和 30.96 dB，说明通过倾斜后平均信噪比也有一定的改进，但是增大幅度没有最小信噪比增加明显。



(a) 倾斜前

(b) 倾斜后

(a) Before tilting receiver plane (b) After tilting receiver plane

图 3 室内天花板仅有一个 LED 灯时可见光通信系统信噪比分布

Fig.3 SNR distribution of indoor VLC with one LED light on the ceiling

图 4 显示了单灯情况下室内各个位置处接收器倾斜后信噪比增加的情况，可以看出在室内角落处信噪比增加最为明显。

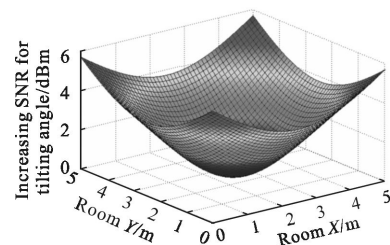


图 4 倾斜放置比水平放置时信噪比的增加值(1 个 LED 灯情况)

Fig.4 Increasing SNR distribution of indoor VLC with one LED light on the ceiling after tilting receiver plane

当有四个 LED 灯对称分布于室内时 (具体位置见表 1)，每个 LED 功率是 4 W，桌面上接收器倾斜前后的信噪比分布如图 5 所示，倾斜前后的最大信噪比分别是 32.33 dB 和 33.88 dB，最大信噪比位置坐标均是(2.5,2.5,3)。说明接收器在室内中心位置处也要发生倾斜，由于此时距离四个 LED 灯距离相等，所以可以朝向任何一个 LED 倾斜。倾斜前与倾斜后最小信噪比分别是 19.57 dB 和 23.99 dB，提高了 4.42 dB，最小信噪比也位于室内四个角落处，通过倾斜接收器对室内角落信噪比也有明显提升。提升程度没有单个 LED 时提升幅度大的原因是：四个

LED 灯布局时,室内角落到最近 LED 灯的距离小于单个 LED 灯时角落到灯的距离。倾斜前后的平均信噪比分别是 23.16 dB 和 30.21 dB,说明通过倾斜后平均信噪比也有一定的改进,但是增大幅度没有最小信噪比增加明显。仅对灯布局而言,单灯和四个灯的布局对平均信噪比影响不大。

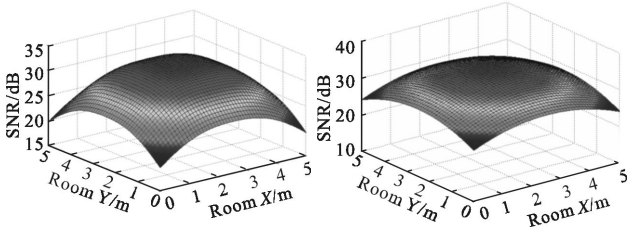


图 5 室内四个 LED 灯对称分布于天花板上时可见光通信系统信噪比分布

Fig.5 SNR distribution of indoor VLC for four LED lights on the ceiling

图 6 显示了四灯布局情况下,室内各个位置处接收器倾斜后信噪比增加的情况,也可以看出在室内角落处信噪比增加最为明显。

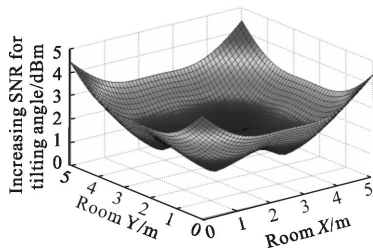


图 6 倾斜放置比水平放置时信噪比的增加值(4 个 LED 灯情况)

Fig.6 Increasing SNR distribution of indoor VLC with four LED lights on the ceiling after tilting receiver plane

为能更充分说明倾斜后信噪比的改善情况,分析了其他不同功率 LED 灯的信噪比,如表 2 所示。

从表 2 中可总结出单灯分布和四灯分布时不同功率情况下倾斜前后信噪比增加值,如表 3 所示。可以看出,对于单灯布局而言,8 W、12 W、16 W、32 W 四种功率时,信噪比的最小值增加值和平均值增加值基本不变;对于四灯布局而言,8 W、12 W、16 W、32 W 四种功率时,信噪比的最大值、最小值增加值和平均值增加值也基本不变。因此可以说明该倾斜接收器设计方案信噪比增量不受 LED 功率的影响。

表 2 不同 LED 功率情况下的信噪比分布

Tab.2 SNR distribution with the different power of LEDs

	Max of SNR /dB	Min of SNR /dB	Average of SNR/dB
An LED:8W (before tilting)	32.01	11.34	22.33
An LED:8W (after tilting)	32.01	17.02	24.99
An LED:12W (before tilting)	35.49	14.86	25.84
An LED:12W (after tilting)	35.49	20.54	28.49
An LED:16W (before tilting)	37.96	17.35	28.32
An LED:16W (after tilting)	37.96	23.03	30.96
An LED:32W (before tilting)	43.83	23.36	34.29
An LED:32W (after tilting)	43.83	29.02	36.92
Four LED:2W/EA (before tilting)	26.35	13.56	22.16
Four LED:2W/EA (after tilting)	27.90	17.99	24.22
Four LED:3W/EA (before tilting)	29.85	17.08	25.67
Four LED:3W/EA (after tilting)	31.40	21.50	27.73
Four LED:4W/EA (before tilting)	32.33	19.57	28.16
Four LED:4W/EA (after tilting)	33.88	23.99	30.21
Four LED:8W/EA (before tilting)	38.28	25.58	34.13
Four LED:8W/EA (after tilting)	39.81	29.98	36.17

表 3 探测器倾斜前后信噪比增量

Tab.3 Increasing SNR after tilting the detector

SNR increment after tilting	Increment of maximum SNR/dB	Increment of minimum SNR/dB	Increment of average SNR/dB
An LED:8W	0	5.68	2.66
An LED:12W	0	5.68	2.65
An LED:16W	0	5.68	2.64
Four LED:32W	0	5.66	2.63
Four LED:2W/EA	1.55	4.43	2.06
Four LED:3W/EA	1.55	4.42	2.06
Four LED:4W/EA	1.55	4.42	2.05
Four LED:8W/EA	1.53	4.40	2.04

图 7 分别显示了不同光源布局场景下桌面各个位置处利用牛顿算法优化得到的接收器倾斜的最佳

角度。在单个 LED 灯的场景下,中心位置无需倾斜,即倾斜角度为 0° ,最大倾角位于室内四个角落处,倾角为 58.7° 。在四个 LED 灯的场景下,最小倾角位于四个 LED 灯的正下方位置,倾角为 25.4° ,最大倾角也位于室内四个角落处,倾角为 53.1° 。

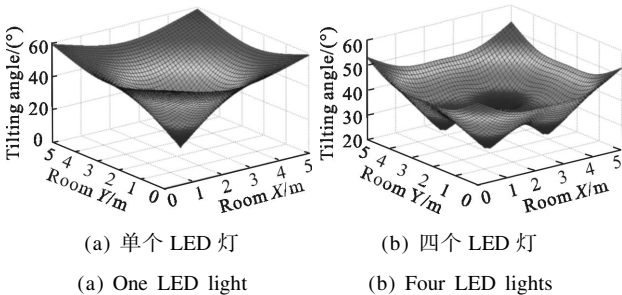


图 7 室内桌面各个位置处接收器需要倾斜的最佳角度
Fig.7 Optimum tilting angle of receiver plane in each place of the room

图 8 分别显示了不同光源布局场景下桌面确定位置处牛顿算法的迭代次数。图 8 (a)、(b)分别为单个、四个 LED 灯。可以看出仅仅需要三次迭代即可算出最佳倾角,优化速度非常快。

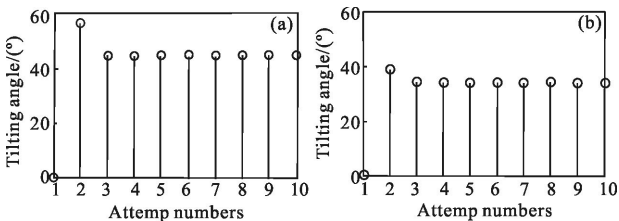


图 8 牛顿方法达到最优倾角的迭代次数

Fig.8 Attempt times of Newton method to reach the optimum angle

3 结论

提出了通过倾斜接收器的方式来提高包含非视距链路可见光通信系统的信噪比,仿真分析了单个 LED 灯和四个 LED 灯两种布局场景下不同功率时,接收器倾斜前后室内桌面各个位置处的信噪比分布(考虑了非视距链路情况)。通过倾斜接收器,信噪比的最小值大约提高 5 dB,平均值大约提高 2 dB。对于四个 LED 灯对称分布的场景,信噪比最大值也会有近 2 dB 左右的提高。通过牛顿算法计算得到了两种 LED 灯布局场景下接收器在室内桌面各个位置处的最佳倾角,寻找最佳倾角的迭代次数仅需 3~4 次,优化速度非常快。从仿真结果可以看出,倾斜接收器对室内角落处信噪比有明显提升,对室内中心位置附

近信噪比也有一定提升。

参考文献:

- [1] Kumar N, Lourenco N R. Led-based visible light communication system: a brief survey and investigation [J]. *Eng Appl Sci*, 2010, 5: 297-307.
- [2] Langer K, Vucic J, Kottke C, et al. Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs [C]// 13th Annual Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2011: 1-5.
- [3] Wang Hong, Zhang Xiaofan, Wang Haihong, et al. Design for optical freeform reflector of LED streetlight [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 727-731. (in Chinese)
- [4] O'Brien D C, Zeng L, Le-Minh H, et al. Visible light communications: challenges and possibilities [C]// PIMRC, 2008: 1-5.
- [5] Wang Y Q, Wang Y G, Chi N, et al. Demonstration of 575-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB led and phosphor-based LED [J]. *Opt Express*, 2013, 21(1): 1203-1208.
- [6] Afgani M Z, Haas H, Elgala H, et al. Visible light communication using OFDM [C]// International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development on Networks and Communities, 2006: 129-134.
- [7] Vucic J, Kottke C, Habel K, et al. 803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary [C]// Proc OFC, OWB6, 2011.
- [8] Khalid A M, Cossu G, Corsini R, et al. 1-Gb/s transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation [J]. *IEEE Photon J*, 2012, 4 (5): 1465-1473.
- [9] Cossu G, Khalid A M, Choudhury P, et al. 2.1 Gbit/s visible optical wireless transmission [C]// Proceedings of ECOC, 2012, 16(73): 16-20.
- [10] Cossu G, Khalid A M, Choudhury P, et al. 3.4 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED [J]. *Opt Express*, 2012, 20(26): B501-B506.
- [11] Kong Meimei, Liang Zhongcheng, Zhang Guohu. Optical receiving antenna design based on angle diversity technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 750-754. (in Chinese)
- [12] Wang Z, Yu C, Zhong W D, et al. Performance improvement by tilting receiver plane in M-QAM OFDM visible light communications [J]. *Opt Express*, 2011, 19(14): 13418-13427.
- [13] Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Trans on Consumer Electronics*, 2003, 50(1): 100-107.