

文章编号:1001-9081(2016)10-2675-05

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2016.10.2675

无线光接入网中光源阵列简化的适用性分析

徐春*, 郭文强, 古力米热·阿吾旦

(新疆财经大学 计算机科学与工程学院, 乌鲁木齐 830012)

(*通信作者电子邮箱 272000963@qq.com)

摘要:针对光源阵列简化处理在无线光接入网信道建模中的适用程度进行了量化评估,具体讨论了发端阵列简化操作在不同光源阵列配置、接收端视场角、光源辐射特性下的适用表现。量化结果显示,简化处理的适用表现对视场角有很强的依赖性,仅当视场角不低于60°时,简化对关键指标路径损耗和时延扩展特性的偏差分别被限制在1.53 dBo和0.77 ns以内。

关键词:无线光接入网络;光源阵列简化;传输特性;适用性

中图分类号:TP393.01 **文献标志码:**A

Adaptability of light source array simplification in wireless optical access network

XU Chun*, GUO Wenqiang, GUNIMIRE Awudan

(College of Computer Science and Engineering, Xinjiang University of Finance and Economics, Urumqi Xinjiang 830012, China)

Abstract: The adaptability of light source array simplification in channel modeling of wireless optical access network was evaluated, the applicable performance of this simplification to channel characterization under different transmitter configuration, different Field Of View (FOV) and different source radiation pattern was discussed. Simulation results illustrate that the applicable performance has a strong dependence on the FOV, only when the FOV is no less than 60°, the induced deviation to optical path loss and root mean square delay spread are limited within 1.53 dBo and 0.77 ns, respectively.

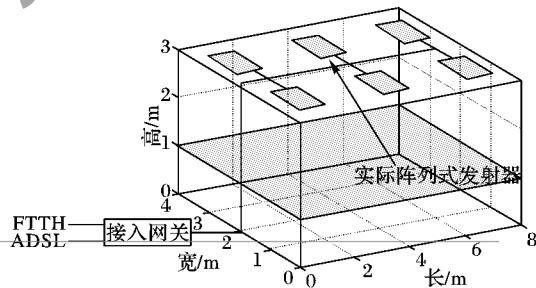
Key words: wireless optical access network; source array simplification; transmission characteristic; adaptability

0 引言

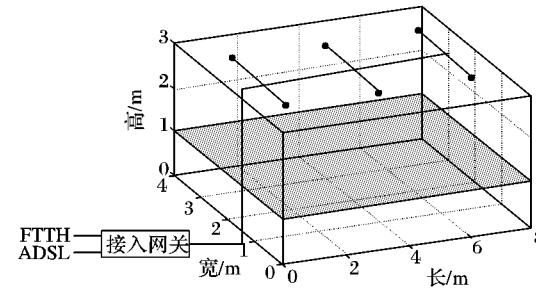
无线光接入网在研究和开发上已经获得了超出预期的成长,相应的各种面向不同应用和系统的标准化工作也取得了长足的进展^[1-3]。与此同时,将频分复用用于下行链路及上行光纤有线传输,将时分复用用于双向无线光传输的混合接入协议也得到了实验验证^[4]。信道模拟将是分析无线光多径物理特性所必不可少的部分^[5-7],大量的基础性工作显示单个或几个光源在发射功率上明显受限,多数信号电平仅仅在几十毫瓦的数量级上。因此,为了保证无线光接入网络的覆盖能力,所采用的发射器基本都属于阵列式,如图1(a)所示;每个阵列多由十几个甚至几十个发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光源组成^[1,5]。为保证互联互通,光源阵列需要各自连接到接入网关的总线,并进而通过光纤到户(Fiber To The Home, FTTH)或非对称数字用户环线(Asymmetrical Digital Subscriber Loop, ADSL)技术连接到商用宽带接入网络。

为便于分析,依据工程经验将发射器简化理论加以应用。具体地,在进行无线光覆盖的信噪比优化过程中,多个基于LED的发射器阵列被看作是多个离散的点光源,如图1(b)所示,在阵列内部每个LED各自空间位置信息并未予以考虑^[1,8-9]。这种简化处理可以显著地降低建模所需的时间投

入和硬件资源,尤其是当LED总的数量级达到几十甚至上百的典型实际情况下。然而,截至目前,这类简化处理对实际场景以及不同光源阵列的适用程度仍然有待充分的评估。同



(a) 实际阵列式发射器的典型室内场景



(b) 发射器简化的典型室内场景

图1 典型室内场景

收稿日期:2016-04-13;修回日期:2016-06-22。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61163066);新疆自然科学基金资助项目(2013211A032)。

作者简介:徐春(1977—),女,新疆乌鲁木齐人,副教授,博士研究生,主要研究方向:无线光网络、自然语言处理;郭文强(1975—),男,新疆乌鲁木齐人,教授,博士,主要研究方向:计算机网络、信息安全;古力米热·阿吾旦(1975—),女(哈萨克族),新疆乌鲁木齐人,讲师,硕士,主要研究方向:无线网络、电子商务。

时,相关基础支撑的不足也限制了简化处理在潜在适用场景的广泛应用。

本文聚焦了在典型会议室场景下,该简化方案对不同光源阵列配置、不同接收端视场角(Field Of View, FOV)、不同光源辐射特性下信道特性表征的适用表现。为了便于比较,在光源阵列内部,LED 光源之间的距离始终保持为 4 cm。接下来将具体从路径损耗和时延扩展特性两方面讨论光源阵列简化的适用性表现。

1 光源阵列未简化及简化条件下的传输特性

在光源阵列简化处理中,图 1(a) 中由 LED 阵列所构成的发射器被抽象为图 1(b) 中的点光源。这种简化处理将引起无线光信号在传播模型上的改变。下面对简化及未简化信号传播模型进行描述。

1.1 典型的光源阵列配置

在无线光通信链路中,强度调制(Intensity Modulation, IM)和直接检测(Direct Detection, DD)是被广泛采用的技术选择^[5-11]。在这一配置下,无线光信道的多径传播特性可以借助冲击响应进行准确的表征。采用由 LED 光源所发出的光信号经过直射路径或者来自室内墙面、天花板或地面的反射路径抵达接收器。已有的实验实测结果显示许多典型材料例如石灰、水泥墙面的反射特性可以通过朗伯辐射特性进行很好的近似^[5],而且白光 LED 等半导体光源也具有近似的朗伯辐射特性^[1,5,10]。朗伯光源在某一空间方向上的辐射强度可以表示为:

$$R(\varphi_0) = \frac{m+1}{2\pi} P_s \cos^m(\varphi_0) \quad (1)$$

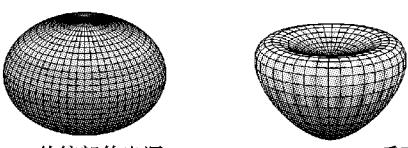
其中: m 为光源的朗伯指数; P_s 为单一 LED 光源的平均发射功率; φ_0 为该空间方向相对于光源发光表面法线方向的出射角。具体地,朗伯指数可以根据式(2)给出:

$$m = -\frac{1}{\ln(\cos(\varphi_{1/2}))} \quad (2)$$

其中: $\varphi_{1/2}$ 为光源的半功率角。但是也有一些商用 LED 的辐射特性并不符合朗伯模式。例如,LUXEON Rebel 系列光源的辐射强度只能通过高斯函数的累加来表示:

$$R(\varphi_0) = P_s \sum_{i=1}^2 g1_i \exp\left[-\ln 2\left(\frac{|\varphi_0| - g2_i}{g3_i}\right)^2\right] \quad (3)$$

式(3)中两组高斯函数系数包括: $g1_1 = 0.76$, $g2_1 = 0^\circ$, $g3_1 = 29^\circ$, $g1_2 = 1.10$, $g2_2 = 45^\circ$, $g3_2 = 21^\circ$ ^[12]。虽然上述非朗伯辐射特性与传统朗伯类辐射特性有着显著的差异,但其仍然是旋转对称的;也就是说,任意方向出射光的辐射强度,独立于出射方向的方位角。图 2 给出了上述两种 LED 光源的三维空间辐射特性。



(a) 传统朗伯光源 (b) LUXEON Rebel 系列产品
图 2 不同 LED 光源的三维空间辐射特性

在典型光源阵列配置下,从第 n 个发射器中第 i 个 LED 光源,即 $S_{n,i}$ 经直射路径(Line Of Sight, LOS)到达第 j 个接收器 R_j 后所产生的冲击响应可由式(4)^[10]给出:

$$h^{(0)}(t; S_{n,i}, R_j) = \begin{cases} \frac{A_R}{d_0^2} R(\varphi_0) \cos \theta_0 \delta(t - \frac{d_0}{c}), & 0 \leq \theta_0 \leq FOV \\ 0, & \theta_0 > FOV \end{cases} \quad (4)$$

其中: A_R 为有效接收面积; d_0 表示光源与接收器之间的直线距离; ψ_0 和 θ_0 分别表示光信号的出射角及入射角; FOV 表示接收器的接收视场;c 为光速。为便于比较,本文假设所有光源阵列的整体发射功率为 1 W。较之于传统的固态光源(如激光器),LED 光源属于非定向光源,因而在自由空间条件下,光信号从光源发出后,有相当一部分是经过周围环境表面的反射作用后抵达接收器。为研究反射路径对接收器整体冲击响应的贡献,必须将室内环境表面划分为大量尺寸一致的反射元素,同时将每个反射元素的中心位置作为整个元素面积的空间位置。当光源所发出的脉冲信号仅仅经过一次反射作用的情况下,可将反射路径分为两个部分:

1) 从光源 $S_{n,i}$ 发出脉冲信号,经过直射路径入射到某一反射元素 e_l 。在这一过程中,反射元素 e_l 起到接收器的作用,反射元素处所产生的脉冲响应可以参考式(5)给出:

$$h^{(0)}(t; S_{n,i}, e_l) = \begin{cases} \frac{A_e}{d_1^2} R(\varphi_1) \cos \theta_1 \delta(t - \frac{d_1}{c}), & 0 \leq \theta_1 \leq 90^\circ \\ 0, & \theta_1 > 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

其中: A_e 为反射元素面积; d_1 表示光源与反射元素之间的直线距离; θ_1 和 ψ_1 分别对应表示光信号的出射角及入射角。不同于式(4),式(5)反射元素的接收视场角始终为 90° 。

2) 反射元素将作为二次光源,进而反射信号从反射元素经直射传播入射到接收器。因而,脉冲信号从光源 $S_{n,i}$ 入射到反射元素 e_l ,经 e_l 反射入射到接收器 R_j 所产生的冲击响应可以表示为:

$$h^{(1)}(t; S_{n,i}, e_l, R_j) = \begin{cases} h^{(0)}(t; S_{n,i}, e_l) \otimes \rho_l \frac{A_R}{\pi d_2^2} \cos \varphi_2 \cos \theta_2 \delta(t - \frac{d_2}{c}), & 0 \leq \theta_2 \leq FOV \\ 0, & \theta_2 > FOV \end{cases} \quad (6)$$

其中: ρ_l 为反射元素所在表面的反射率; A_R 为接收器有效面积; d_2 表示反射元素与接收器之间的直线距离; \otimes 表示卷积运算; θ_2 和 ψ_2 分别对应表示光信号的反射元素出射角及入射到接收器的入射角。光信号除了经过一次反射后被接收器捕获之外,也可能经历二次、三次甚至更多次反射后入射到接收器。具体地, k 次反射路径在接收器所产生的冲击响应 $h^{(k)}(t; S_{n,i}, R_j)$ 可以通过 $(k-1)$ 次反射冲击响应 $h^{(k-1)}(t; S_{n,i}, e_l)$ 的迭代运算得到:

$$h^{(k)}(t; S_{n,i}, R_j) = \sum_{l=1}^L h^{(k-1)}(t; S_{n,i}, e_l) \otimes \rho_l h^{(0)}(t; e_l, R_j) \quad (7)$$

其中: L 是反射元素的总数量。这样一来,整体冲击响应是全部来自直射路径及反射路径的冲击响应的累积,可由式(8)表示:

$$h(t; R_j) = \sum_{n=1}^{N_{\text{array}}} \sum_{i=1}^I \sum_{k=0}^K h^{(k)}(t; S_{n,i}, R_j) \quad (8)$$

其中: N_{array} 是 LED 阵列的数量; I 是每个阵列中 LED 的数量。

此外, k 代表发射次数, 而 K 为所考虑反射次数的上限。考虑到随着反射次数的增加, 用反射路径对最终冲击响应的贡献会快速地减弱。因此, 为降低计算的复杂度同时保持结果的可靠性, 本文延续传统的做法, 考虑到三次发射 ($K = 3$) 的作用^[10-11]。

1.2 简化的光源阵列配置

在发射器简化的情况下, 由第 n 个抽象点光源 S_n 到第 j 个接收器 R_j 的冲击响应可被重新表示为:

$$h^{(0)}(t; S_n, R_j) = I \frac{A_R(m+1)}{2\pi d_{\text{pot}}^2} \cos^m(\varphi_{\text{pot}}) \cos(\theta_{\text{pot}}) \cdot \text{rect}\left(\frac{\theta_{\text{pot}}}{FOV}\right) \delta\left(t - \frac{d_{\text{pot}}}{c}\right) \quad (9)$$

其中: d_{pot} 表示抽象点光源与接收器之间的直线距离; φ_{pot} 和 θ_{pot} 分别表示光信号的出射角及入射角。式(9)中, 每个发射器的全部功率被集中于对应的抽象点光源, 所以相对于式(3)必须乘以系数 I 。换言之, 来自第 n 个抽象点光源的发射功率可以表示为 $P_n = \sum_{i=1}^l P_{ni}$, 其中, P_{ni} 是来自第 n 个发射器中第 i 个 LED 的发射功率。点光源简化处理抛弃了发射器中具有 LED 的位置信息, 因而最终的冲击响应可被进一步简化表示为:

$$h(t; R_j) = \sum_{n=1}^{N_{\text{pot}}} \sum_{k=0}^K h^{(k)}(t; S_n, R_j) \quad (10)$$

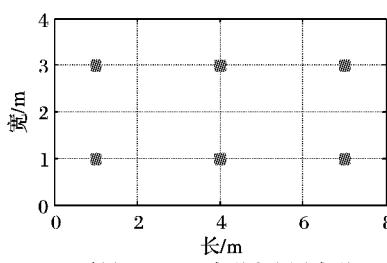
其中: N_{pot} 为抽象点光源的总数量, 其在数值上与发射器光源阵列数量 N_{array} 相等。类似地, 参考式(6), 从第 n 个 S_n 抽象点光源经历 k 次反射后在接收器 R_j 所产生的冲击响应 $h^{(k)}(t; S_n, R_j)$ 可以由式(11)给出:

$$h^{(k)}(t; S_n, R_j) = \sum_{l=1}^L h^{(k-1)}(t; S_n, \delta_l) \otimes \rho_l h^{(0)}(t; \delta_l, R_j) \quad (11)$$

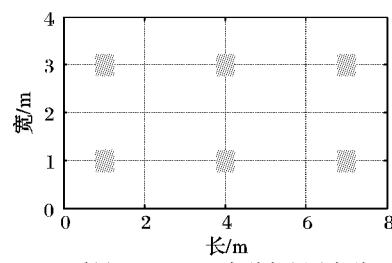
为与未简化场景下保持一致性, 本文在光源简化下也考虑三次反射。

2 表现评估

为了评估未简化及简化情况下无线光接入网络在传输特性上的差异, 本文将应用场景设定为一个典型的会议室, 如图 1 所示。该会议室中 6 个 LED 光源阵列被均匀地分布于天花板上。为了全面地分析光源阵列简化所带来的影响, 引入三种发射器配置进行量化分析, 如图 3 所示。接收器的位置被设定为与桌面同样高度的接收平面上。详细参数见表 1^[1,5]。本章将从光路径损耗以及均方根时延扩展, 对简化处理引入的量化偏差进行分析。



(a) 采用 5×5 LED 阵列式光源阵列



(b) 采用 10×10 LED 阵列式光源阵列

表 1 相关参数

参数	值
房间尺寸	$8 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$
天花板反射率	0.8
室内墙面反射率	0.5
地面反射率	0.2
接收器高度	1 m
接收器视场角	$30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$
接收器有效探测面积	1 cm^2
发射器高度	3 m
发射器数量	6
未简化发射器中 LED 数量	$5 \times 5, 10 \times 10, 15 \times 15$
未简化发射器中 LED 间距	4 cm
总发射功率	1 W
LED 半功率角	80°
发射器中心位置	$(1,1,3), (4,1,3), (7,1,3), (1,3,3), (4,3,3), (7,3,3)$
光滤波器增益	1.0

2.1 光路径损耗分布的比较

作为对无线光接入网络的主要损耗之一, 由自由空间传播及反射对发射光信号所造成的衰减可以由光路径损耗来度量。光路径损耗可由式(12)^[5]给出:

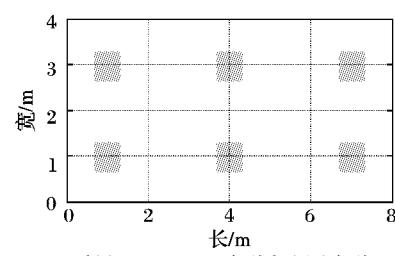
$$PL = -\lg(H(0)) \quad (12)$$

其中 $H(0)$ 为信道的直流(Direct Current, DC) 增益。该增益可由前文所述的信道冲击响应 $h(t)$ 参照下式进一步给出:

$$H(0) = \int h(t) dt$$

为了直观地展示在接收平面上光路径损耗的差异, 对接收平面上各个接收位置的光路径损耗进行统计分析。当光源辐射特性为朗伯模式时, 光路径损耗的偏差程度与接收端的 FOV 有着明显的依赖性。如图 4 所示, 当 $FOV = 30^\circ$ 时, 简化情况下的光路径损耗与不同尺寸光源的实际光路径损耗有着明显的统计差异, 特别是对于光路径损耗高于 64 dB_o 的部分。根据表 2, 该 FOV 配置下, 各最大偏差中最大值能够达到 7.00 dB_o, 各最大偏差中最小偏差也有 6.28 dB_o, 考虑到 58 dB_o 以上的整体光路径损耗水平, 这种程度的偏差显然是过高的。但是, 对于 $FOV = 60^\circ$ 以及 $FOV = 90^\circ$ 两种高 FOV 情况, 简化情况下的光路径损耗能够很好地拟合不同光源阵列的实际光路径损耗。根据表 2, 该 FOV 配置下, 各最大偏差中最大值也不过 1.52 dB_o, 各最大偏差中最小值仅有 1.04 dB_o; 较之于 56 dB_o 以上的整体光路径损耗水平, 这种程度的偏差是可以接受的。

虽然在空间辐射特性上, 朗伯模式和 LUXEONR Rebel 光



(c) 采用 15×15 LED 阵列式光源阵列

图 3 天花板上的光源阵列分布情况

源模式有着显而易见的差异,但在光路径损耗的偏差上,两者呈现出一致的表现;通过表2,不难确认,在LUXEONR Rebel光源模式下,FOV设定仍然主导了光路径损耗的偏差表现。当 $FOV=30^\circ$ 时,简化情况下的光路径损耗与不同尺寸光源的实际光路径损耗同样存在着明显的统计差异,最大偏差能够达到7.44 dBo,最小偏差也有6.84 dBo。而一旦FOV增加到 60° 以上,简化情况下的光路径损耗同样能够很好地呈现不同

光源阵列的实际光路径损耗,最大偏差的最大值进一步减小至1.39 dBo,各最大偏差中最小值也降至0.89 dBo。上述量化结果显示,在光路径损耗分析上,光源阵列简化对于有不同辐射特性的光源有着较为一致的适用表现。

此外,通过表2不难确定,随着光源阵列几何尺寸的增加,对光路径损耗的偏差也会稳步的增加;但是,相对于FOV的主导作用,这一因素对于适用性的影响仍然相对有限。

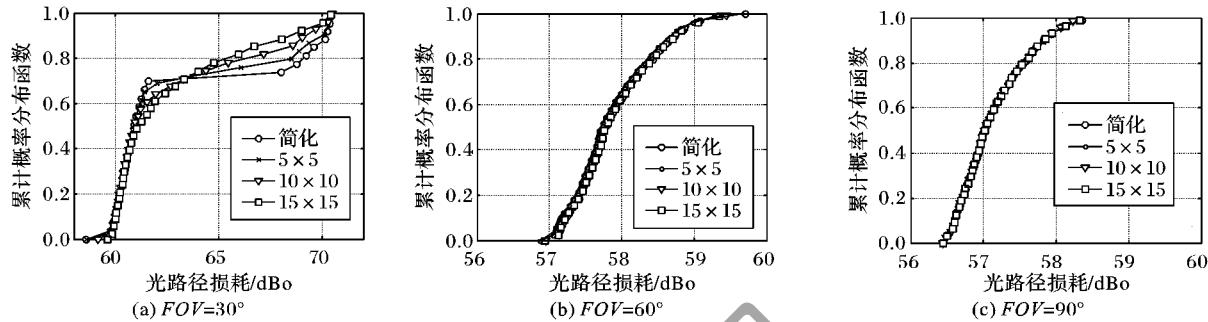


图4 朗伯光源下路径损耗空间分布的累计概率统计

表2 路径损耗的最大偏差统计

辐射模式	FOV/(°)	不同光源阵列尺寸下的最大偏差/dBo		
		5×5	10×10	15×15
朗伯模式	30	6.28	6.99	7.00
	60	1.09	1.52	1.09
	90	1.04	1.35	1.04
LUXEONR	30	6.84	7.42	7.44
Rebel	60	1.09	1.31	1.53
光源模式	90	0.89	1.17	1.39

2.2 时延扩展分布的比较

由于室内环境下,在非直射链路中多重漫反射的存在,由发射器所发出的无线光信号将不可避免经历在时域上的展宽以及与之密不可分的多径畸变。为了度量无线光接入网络中多径传播对信号的弥散程度,必须准确地表征无线光信道的时延扩展,时延扩展与信道的传输带宽成不严格的倒数关系。也就是说,当时延扩展较高时,信道的传输能力也就会不可避免地维持在较低的水平。在无线光通信中,无线光多径信号的均方根时延扩展可以根据冲击响应 $h(t)$ 由式(13)^[10] 得到:

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} (t - \tau_0)^2 h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt}} \quad (13)$$

其中 τ_0 为平均时延,可由式(14)具体给出:

$$\tau_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t h^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} \quad (14)$$

接下来,首先对朗伯光源下阵列简化操作对均方根时延扩展的适用表现进行量化分析。如图5所示,当 $FOV = 30^\circ$ 时,简化情况下的均方根时延扩展与不同尺寸光源的实际均方根时延扩展的空间分布有着明显的统计偏差,这一偏差起始于约1.5 ns,终止于约7.5 ns;根据表3,在该FOV设定下,对于不同光源配置的最大偏差,其中的最大值可达到

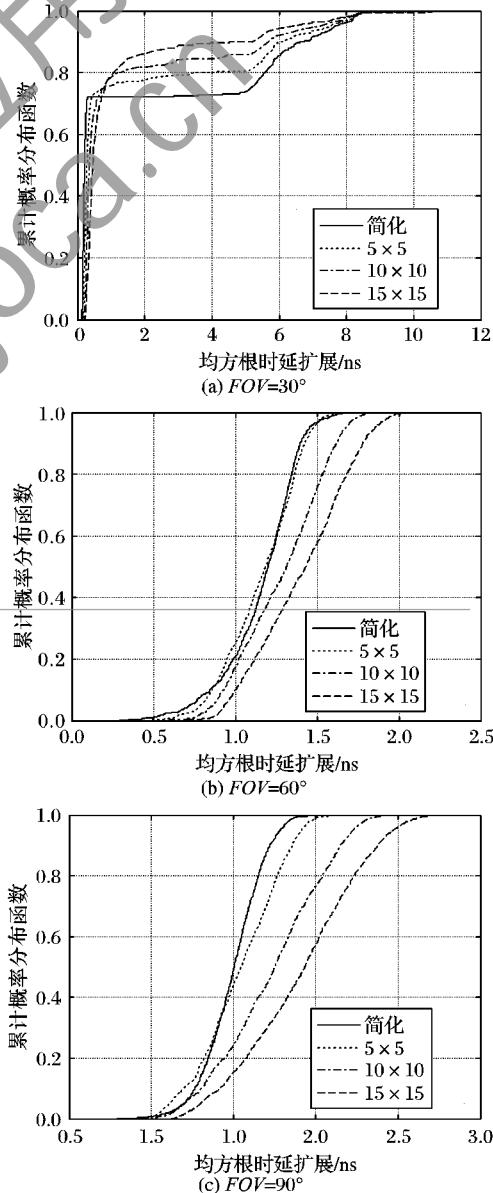


图5 朗伯光源下均方根时延扩展空间分布的累计概率统计

6.09 ns,即便是最小值也不低于5 ns。同样在 $FOV=30^\circ$ 设定下,对应时延扩展的最大值不过10.9 ns,因而这一偏差比例达到难以接受的45.9%。不同于光路径损耗,即便是对于 $FOV=60^\circ$ 和 $FOV=90^\circ$ 的高 FOV 设定,这种偏差虽然有所缓解但却无法从根本上消除。在此基础上,随着光源阵列尺寸从 5×5 增大至 10×10 ,再到 15×15 逐步增加,均方根时延扩展的偏离程度也在持续的增加,如图5(a)和(b)所示。具体地,在 $FOV=60^\circ$ 条件下,最大偏差的最大值为0.46 ns,较之于约2.0 ns的时延扩展最大值,偏差比例仍达到约23%;同时,最大偏差的最小值也有0.20 ns,较之于1.78 ns的时延扩展最大值,偏差比例也不低于11.2%。类似地,在 $FOV=90^\circ$ 条件下,最大偏差的最大值为0.77 ns,较之于2.8 ns的所有位置时延扩展最大值,偏差比例达到27.5%;同时,最大偏差的最小值也有为0.18 ns,较之于2.14 ns的所有位置时延扩展统计最大值,偏差比例也达到8.41%。

类似地情况也出现在LUXEONR Rebel光源模式下,如表3所示。整体上,较之于朗伯模式,该模式下的均方根时延扩展的适用性表现略有所提升。具体地,在 $FOV=30^\circ$ 条件下,虽然对于不同光源配置的最大偏差的最大值降至5.78 ns,最小值降至4.68 ns,但对应的偏差比例仍然分别高达53.2%和48.3%。对于 $FOV=60^\circ$ 和 $FOV=90^\circ$ 的高 FOV 设定,最大偏差的最大值降为0.32 ns,最大偏差的最小值也降为0.12 ns,相应的偏差比例分别降至13.7%和5.75%。

表3 均方根时延扩展的最大偏差统计

辐射模式	$FOV/(^\circ)$	不同光源阵列尺寸下的最大偏差/ns		
		5×5	10×10	15×15
朗伯模式	30	5.16	5.33	6.09
	60	0.20	0.30	0.46
	90	0.18	0.49	0.77
LUXEONRR	30	4.68	5.13	5.78
Rebel	60	0.13	0.23	0.31
	90	0.12	0.23	0.32

3 结语

本文研究了发射器简化对无线光接入网络传输特性的影响,具体从光源阵列配置、接收端 FOV 、光源辐射特性三个方面量化分析发端光源阵列简化操作的适用性表现。较之于其他两个方面, FOV 配置对适用性表现有着明显的主导作用;当 FOV 不高于 30° ,简化操作无法获得良好的适用性表现。相对于光路径损耗,简化处理在均方根时延扩展上引入的偏差更为显著也难以忽视;即便在高 FOV 条件下,均方根时延扩展的最大偏差统计中的最小值所对应的偏差比例也维持在5.7%以上。因此,为保证简化处理的实用度,应该尽可能提高 FOV 的设定,降低光源阵列的空间几何尺寸。

参考文献:

- [1] WU L, ZHANG Z C, DANG J, et al. Adaptive modulation schemes for visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(1): 117–125.
- [2] WU S, WANG H G, YOUN C H. Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications [J]. IEEE Network, 2014, 28 (6): 41–45.
- [3] 郝宏刚, 唐帅, 张丹丹, 等. 基于白光LED的无线通信实验研究[J]. 半导体光电, 2014, 35 (5): 885–888. (HAO H G, TANG S, ZHANG D D, et al. Experimental study of wireless communication based on the white LED [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 885–888.)
- [4] WANG Y, CHI N, WANG Y, et al. Network architecture of a high-speed visible light communication local area network [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(2): 117–125.
- [5] ALSAADI F E, ALHARTOMI M A, ELMIRGHANI J M H. Fast and efficient adaptation algorithms for multi-gigabit wireless infrared systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31 (23): 3735–3751.
- [6] 贾倩, 宋志群, 郎磊. 基于光线追踪的室内可见光通信链路研究[J]. 无线电工程, 2015, 45(1): 5–8. (JIA Q, SONG Z Q, LANG L. Channel characteristics of indoor visible light communication basic links based on ray-tracing [J]. Radio Engineering, 2015, 45(1): 5–8.)
- [7] 程甜华, 方安安. 一种改进的高速可见光通信系统信道均衡算法[J]. 现代科学仪器, 2013, 3(6): 57–59. (CHENG T H, FANG A A. An improved algorithm of high-speed visible light LED communication system [J]. Modern Scientific Instruments, 2013, 3 (6): 57–59.)
- [8] WANG Z, YU C, ZHONG W D, et al. Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4564–4573.
- [9] WANG Z, YU C, ZHONG W D, et al. Performance improvement by tilting receiver plane in M-QAM OFDM visible light communications [J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13418–13427.
- [10] BERRY J R, KAHN J M, KRAUSE W J. Simulation of multipath impulse response for indoor wireless optical channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1993, 11(3): 367–379.
- [11] ISKANDAR S, NOR H B H, TANG T B. Optical wireless communications through visible light LEDs: an overview [J]. International Journal of Engineering Research & Technology, 2014, 3 (3): 1152–1156.
- [12] MORENO I, SUN C. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1808–1819.

Background

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61163066), the Natural Science Foundation of Xinjiang Province (2013211A032)

XU Chun, born in 1977, Ph. D. candidate, associate professor. Her research interests include wireless optical network, natural language processing.

GUO Wenqiang, born in 1975, Ph. D., professor. His research interests include computer network, information security.

GUNIMIRE Awudan, born in 1975, M. S., lecturer. Her research interests include wireless network, electronic commerce.