

## 室内无线光局域网中漫射多径建模方案的演进

徐 春\*

(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 xu-yc@163.com)

**摘 要:** 针对面向传统单光源无线光接入网络的分析性建模方案无法充分地适用于正在兴起的基于阵列式发光二极管(LED)光源的无线接入网络问题, 提出了两种新的演进方案。第一种演进方案全面引入对各光源漫射分量的表征; 第二种演进方案在前一方案基础上更精细化地引入对各漫射相对时延的考虑。两种演进方案都克服了现有的演进方案未考虑绝大部分光源所引入的漫射多径分量而高估信道基带传输特性的缺陷。量化结果显示, 由于对漫射分量的充分考虑, 避免对基带传输带宽的高估最高可达近 50 MHz, 避免传输幅度低估最高可达近 15 dB。此外, 两种演进方案能够表征接收位置、反射率以及接收端视场角(FOV)各自与传输特性的高度相关性, 弥补了现有演进方案无法表征上述相关性的不足。

**关键词:** 室内无线光局域网; 漫射多径; 建模方案演进; 传输特性

**中图分类号:** TP393.1 **文献标志码:** A

### Evolution of diffuse multipath modeling scheme for indoor wireless optical local area network

XU Chun\*

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

**Abstract:** To overcome the inadaptability of conventional single source-oriented modeling scheme in satisfying the need of Light Emitting Diode (LED) array-based wireless optical access network, two novel evolution editions of this scheme were proposed. The first one sufficiently covered the diffuse portion from all sources. Based on the first one, the second evolution edition more precisely included the relative delays of all diffuse components. The two proposed schemes were capable of avoiding the overestimation in baseband transmission characteristic by current evolution scheme. Numerical results indicate that, the overestimation in baseband transmission bandwidth and transmission gain can be up to 50 MHz and 15 dB respectively as diffuse path components of all sources are sufficiently characterized. Moreover, two novel schemes are capable of quantifying the correlation between one of receiver position, reflectance and Field Of View (FOV) of receiver and transmission characteristic which overcomes the limitation of current evolution edition in characterizing above correlation.

**Key words:** indoor wireless optical Local Area Network (LAN); diffuse multipath; modeling scheme evolution; transmission characteristic

## 0 引言

智能手机、平板电脑等移动设备的普及不可逆转地助推无线网络对自身接入能力的不断提升。近期, 思科所发布预测显示: 无线基础设施必须持续地完善才能承担无线数据的增长。然而, 设备的消费数据能力和网络能力之间仍然存在明显的不平衡<sup>[1-2]</sup>。客观地讲, 流量卸载(Traffic Offloading, TO)已经成为主要的缓和对策。例如, 业界也在探索 WiFi 的本地化能力并将链路压力有针对性地分摊到有线基础设施。然而, 此类射频(Radio Frequency, RF)解决方案仍然需要共享甚至占用有限的可用频段。在另一方面, 基于光传输媒介的无线光网络正在提供新的频谱机遇。在不远的将来, 室内无线系统将需要能够提供吉比特级别的连接能力<sup>[3-5]</sup>。考虑到以发光二极管(Light Emitting Diode, LED)为代表的绿色固态照明技术的推广、普及以及产业化, 在不远的将来, 室内环境的新一代照明基础设施将为无线光网络接入技术提供天然

的基础设施。因此, 在最后一公里网络接入上, 无线光网络逐渐被产业界和学术界视为一种卓有前景技术选项<sup>[6-7]</sup>。

实际上, 从最先被提出来支持高数据速率, 无线光网络技术已经经历了 30 年的技术沉淀与演进。在 20 世纪, 最初的无线光网络技术形态是基于红外光源, 这种光源对人眼是不可见的同时在高功率情况下可能对人眼造成永久性的损伤, 因而必须对光源的数量(绝大部分配置是单光源)和整体发射功率进行严格的限制, 这类限制或者说天然缺陷在很大程度上降低了技术的整体表现和用户体验<sup>[8-9]</sup>。然而, 新型无线光网络接入技术却不再受制于上述缺陷。一方面, 该技术是基于照明光源所提供的可见光, 由于信号的天然可见性, 因而对人眼的永久性损害可以降至最小<sup>[8-10]</sup>, 即便出现光信号过强的情况, 用户也会第一时间察觉。实际上, 由于固态光源出色的稳定表现, 这种情况出现的概率极小; 另一方面, 该技术所采用的光源通常是阵列式的。换言之, 每个发射器的主体实际上由十几个, 甚至数十个 LED 光源阵列组成, 这就克

收稿日期: 2015-04-30; 修回日期: 2015-05-31。

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: 计算机网络、自然语言处理。

服了传统基于红外光源的无线光接入技术在发射功率上的不足。尽管新型无线光网络接入技术有广受瞩目的发展前景,但是在面向实际室内应用场景时,仍然缺少便于工程应用同时能准确表征实际漫射多径信道特性的建模方案。在传统基于红外单光源的无线光网络领域中,分析性建模方案,也称积分球建模方案有着出色实际应用表现,图1给出了多重漫射多径的积分球建模方案示意图。不同于其他的确定性建模方案或者光线追踪建模方案,该方案将室内环境抽象为一个尺寸的积分球<sup>[10-11]</sup>。这样一来,仅需借助房间的几何参数、收发器特性和主要的室内表面特性,该方案就能以很小的计算代价,在短时间能给出较为可靠的无线光局域网的信道特性。然而该方案是面向单光源的情况,在解决当前新兴无线光接入技术时,必须对该初始方案进行有针对性的拓展。截止目前,Grubor等<sup>[12]</sup>给出了相对粗糙的拓展方案,该方案的局限性在于仅对直射径(Line Of Sight, LOS)部分进行了拓展,并未引入对新增光源所伴生的漫射部分的表征。本文在此基础上,对该建模方案进行了进一步的演进,使之能够更为全面地表征全部漫射分量对整体信道特性的影响。此外,本文还进一步引入了对各漫射分量相对时延的表征,使得最终的演进方案更为精细。

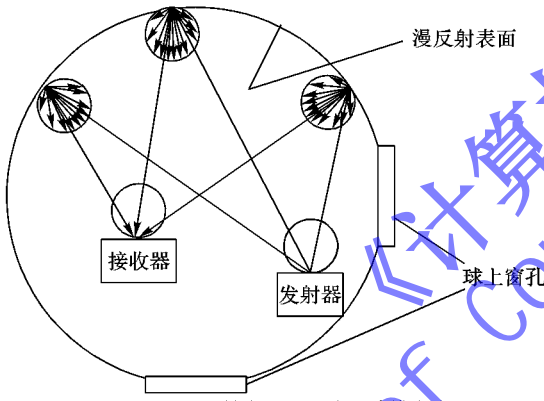


图1 多重漫射多径的积分球建模方案

## 1 漫射多径建模方案演进

本章将系统给出已有的初始面向单光源的积分球建模方案以及由 Grubor 等<sup>[12]</sup>提出的面向阵列光源的初步拓展方案,进而针对上述方案在表征全部反射分量上的局限性,给出了两种逐步完备的演进方案。

### 1.1 面向单光源的积分球建模方案

在该建模方案中,发射器配置被限定在单光源。因而,在接收端,对应从该单光源的直射径信号与多径漫射信号进行叠加,图2(a)给出了面向单光源的积分球建模方案冲击响应示意图。其中,LOS信号产生了一个持续时间非常短暂的冲击脉冲,该部分在抵达接收器的探测表面后也基本不会展宽,紧随该冲击脉冲之后的是一个由于室内空间漫反射所产生的连续信号。显而易见,在时域,这两部分可以被清晰地区分。在这种情况下,单光源无线光信道的冲击响应<sup>[10-11]</sup>可以被表示为:

$$h(t) = \eta_{\text{LOS}}\delta(t) + h_{\text{DIFF}}(t - \Delta T) \quad (1)$$

其中: $\eta_{\text{LOS}}\delta(t)$ 和 $h_{\text{DIFF}}(t - \Delta T)$ 分别为LOS信号和漫反射。

$\eta_{\text{LOS}}$ 是LOS信号的增益而 $\Delta T$ 是LOS信号与漫射信号起始时间之间的时延。对于LOS部分,对应信道即便在很高频率处也是无畸变的。根据收发两端间的空间几何关系,LOS信道增益可以表示为:

$$\eta_{\text{LOS}} = \frac{A_R}{r^2} \frac{(m+1)}{2\pi} \langle \mathbf{n}_T, \mathbf{n}_{\text{LOS}} \rangle^m \langle \mathbf{n}_R, \mathbf{n}_{\text{LOS}} \rangle \quad (2)$$

其中: $\langle \mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j \rangle$ 代表一个数积, $\mathbf{n}_{\text{LOS}}$ 是从光源T到接收器R之间LOS方向的单位向量, $\mathbf{n}_T$ 与 $\mathbf{n}_R$ 分别是T与R各自方向法向量的单位向量。一般的, $\mathbf{n}_T$ 对应于T的最大发射功率方向,R对应于最大灵敏度的方向。需说明,当 $\langle \mathbf{n}_T, \mathbf{n}_{\text{LOS}} \rangle \leq 0$ 或 $\langle \mathbf{n}_R, \mathbf{n}_{\text{LOS}} \rangle \leq 0$ 时, $\eta_{\text{LOS}} = 0$ 。 $A_R$ 为接收器接收面积, $m$ 为光源的朗伯指数,该指数与光源的半功率角 $\phi_{1/2}$ 关系是 $m = -\ln 2 / \ln(\cos(\phi_{1/2}))$ 。相对于LOS分量,漫射部分需经历 $\Delta T$ 的时延,这就引入了与频率相关的相移 $2\pi f$ 。最终,整体的信道传递函数<sup>[10-11]</sup>可以由式(3)给出:

$$H_{\text{DIFF+LOS}}(f) = \eta_{\text{LOS}} + \eta_{\text{DIFF}} \frac{\exp(-j2\pi f \Delta T)}{1 + j f / f_0}; f_0 = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (3)$$

其中漫射部分的信号功率效率 $\eta_{\text{DIFF}}$ 可以具体表示为:

$$\eta_{\text{DIFF}} = \frac{A_R}{A_{\text{ROOM}}} \frac{\langle \rho \rangle}{1 - \langle \rho \rangle} \quad (4)$$

其中: $A_{\text{ROOM}}$ 为整个房间的表面积而 $\langle \rho \rangle$ 为反射表面的平均反射率。此外,式(3)中 $f_0$ 为截止频率。指数衰减时间 $\tau$ 可以由式(5)给出:

$$\tau = -\frac{\langle t \rangle}{\ln \langle \rho \rangle} \quad (5)$$

具体地,参量 $\langle t \rangle$ 可视为两次反射之间的平均时间而 $-1/\ln \langle \rho \rangle$ 项为光信号从发出到接收之间所可能经历反射的平均次数。在矩形房间的室内环境条件下,根据 Jungnickel 等<sup>[11]</sup>的研究, $\langle t \rangle$ 可由式(6)给出:

$$\langle t \rangle = \frac{4V_{\text{ROOM}}}{cA_{\text{ROOM}}} = \frac{2}{c} \frac{l \cdot w \cdot h}{l \cdot w + l \cdot h + w \cdot h} \quad (6)$$

其中: $l$ 、 $w$ 和 $h$ 分别对应为房间的长、宽和高。

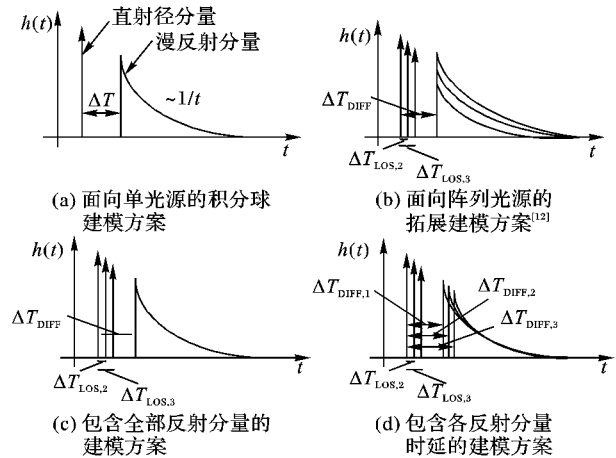


图2 冲击响应示意图

### 1.2 面向阵列光源的拓展建模方案

不同于传统基于红外光源的无线光网络,新兴的无线光局域网是基于下一代室内照明基础设施,也就是LED照明光源。由于单颗LED的发射功率相对有限,商用的LED照明

光源是包含多个 LED 的光源阵列。如前文所述,传统积分球建模方案是面向单光源,必须对该建模方案进行拓展才能适用于当前基于 LED 光源阵列的无线光局域网络。针对该问题,Grubor 等<sup>[12]</sup>在其发表的文献中首先给出了面向阵列光源的拓展建模方案,他们认为相对于 LOS 路径,接收器通过反射路径接收到的功率很小,因此仅需对 LOS 路径部分进行拓展。相应地信道的频率响应表达式<sup>[12]</sup>可以表示为:

$$H(f) = \sum_i \eta_{\text{LOS},i} \exp(-j2\pi f \Delta T_{\text{LOS},i}) + \eta_{\text{DIFF}} \frac{\exp(-j2\pi f \Delta T_{\text{DIFF}})}{1 + j f/f_0} \quad (7)$$

通过比较不难发现,相对于式(3),拓展后的表达式包含了来自不同光源的 LOS 贡献。同时,由于不同光源自身空间位置的差异,还必须要考虑相较于最先到达 LOS 分量传播时间,其他,例如第  $i$  条,LOS 分量不可避免要引入各自的相对时延  $\Delta T_{\text{LOS},i}$ 。此外,来自第  $i$  个光源的 LOS 信道增益  $\eta_{\text{LOS},i}$  可以参考式(2) 获得。

虽然文献[12] 中并没有明确给出冲击响应的数学表达,但是根据该拓展方案与原始的单光源建模方案之间的对应关系,可以得到信道特性的时域表达式:

$$h(t) = \sum_i \eta_{\text{LOS},i} \delta(t - \Delta T_{\text{LOS},i}) + h_{\text{DIFF}}(t - \Delta T_{\text{DIFF}}) \quad (8)$$

式中其余参量的含义与前文一致,在此不再赘述。图 2(b) 给出了该拓展建模方案所描述的信道冲击响应示意图。限于篇幅,图中只考虑了 3 个光源的情况,但是已经足够展示与原始点光源建模方案之间的内在拓展关系。

### 1.3 包含全部反射分量的建模方案

一般来说,在无线光通信网络中,为了便于大规模生产进而降低生产成本,发射器会采用同样类型的 LED 发射器,即 LED 阵列。同时出于驱动设计与可靠性的考虑,LED 阵列也会普遍采用同一类型 LED 光源。基于 LED 光源间基本光电特性上高度一致,各个 LED 光源所面对的信道特性也不会有根本性的差异。根据前文对单光源情况的讨论,可以确定光源与接收器之间的信道有两部分分量构成,即 LOS 分量以及多径漫射分量。两种分量是对应于各自光源而相对出现的。从单光源到阵列式多光源情况,信号的 LOS 路径随着光源数目显著增加的同时,漫射多径分量也会同时增加并最终对收发端之间的信道特性产生联合影响。

基于上述分析,在多光源情况下,信道建模应该涵盖所有光源在接收端引入的漫射信号贡献。这样一来,必须对已有的面向阵列光源的拓展建模方案<sup>[12]</sup>作进一步的完善,包含全部反射贡献的信道传递函数表达式可由下式具体给出:

$$H(f) = \sum_i \eta_{\text{LOS},i} \exp(-j2\pi f \Delta T_{\text{LOS},i}) + \sum_i \eta_{\text{DIFF},i} \frac{\exp(-j2\pi f \Delta T_{\text{DIFF},i})}{1 + j f/f_0} \quad (9)$$

根据式(4) ~ (6) 可知,在积分球建模中,漫射路径信号增益是由无线光网络所覆盖的室内环境几何及表面特性所决定的。因而,改增益  $\eta_{\text{DIFF},i}$  在数值上对任意 LED 光源  $i$  都是不变的,上述讨论是建立在不考虑接收端的因素。实际上,接收端视场角(Field Of View, FOV) 的大小在很大程度上会改变

漫射路径对整体信道的主导程度。具体漫射路径增益与 FOV 之间的关系可由下式给出:

$$\eta_{\text{DIFF}}(\text{FOV}) = \eta_{\text{DIFF}} \sin^2(\text{FOV}) \quad (10)$$

该等式成立的条件是接收器 FOV 所面对的环境表面都是有漫反射特性的各项同性表面。一般的室内表面建筑材料都能令人满意地满足这一前提条件。相应地,拓展建模方案所描述的信道冲击响应:

$$h(t) = \sum_i \eta_{\text{LOS},i} \delta(t - \Delta T_{\text{LOS},i}) + \sum_i h_{\text{DIFF},i}(t - \Delta T_{\text{DIFF},i}) \quad (11)$$

其中: $h_{\text{DIFF},i}$  为对应于第  $i$  个 LED 光源通过漫射路径在接收端所产生冲击响应。为便于直观理解,图 2(c) 给出了包含全部反射分量建模方案的冲响示意图。

### 1.4 包含各反射分量时延的建模方案

虽然上述拓展建模方案引入了对各个光源天然伴生的漫射信道分量,但是仍然停留在用相同的漫射分量时延  $\Delta T_{\text{DIFF}}$ 。在传统的面向单光源积分球建模方案中,漫射分量时延是相对于该光源 LOS 信号所需的传播时间,一般来说  $\Delta T \approx 2 \cdot \langle t \rangle$ <sup>[10]</sup>。在面向实际无线光网络的多光源条件下,每个光源的 LOS 信号所需的传播时间是有明显差异的。这样一来,相对于最先抵达接收器的 LOS 信号,不同光源反射分量的实际传播时延是有天然差异的。为了更为全面表征漫射多径的信道特性,就必须对上述建模方案进行进一步的演进。假设  $\Delta T_0$  为最先抵达接收器的 LOS 信号的传播时间,则任意第  $i$  个 LED 光源的相对时延为  $\Delta T_{\text{LOS},i} = \Delta T_i - \Delta T_0$ 。

其中, $\Delta T_i$  为第  $i$  个 LED 光源的实际传播时间。这样一来对应应该光源的漫射分量的相对时延为  $\Delta T_{\text{DIFF},i} = (\Delta T_{\text{LOS},i} + \Delta T_{\text{LOS-DIFF},i})$ 。相应地,面向阵列光源的漫射信道传递函数就可以进一步拓展为:

$$H(f) = \sum_i \eta_{\text{LOS},i} \exp(-j2\pi f \Delta T_{\text{LOS},i}) + \sum_i \eta_{\text{DIFF},i} \frac{\exp(-j2\pi f (\Delta T_{\text{LOS},i} + \Delta T_{\text{LOS-DIFF},i}))}{1 + j f/f_0} \quad (12)$$

依据信道传递函数与冲击响应之间的映射关系,在该演进建模方案中,冲击响应可以相应地表示为:

$$h(t) = \sum_i \eta_{\text{LOS},i} \delta(t - \Delta T_{\text{LOS},i}) + \sum_i h_{\text{DIFF},i}(t - \Delta T_{\text{DIFF},i}) \quad (13)$$

图 2(d) 给出了包含各反射分量时延建模方案的冲响示意图,不难看出图中三个光源的漫射分量有各自的相对时延,相应的冲击响应也不再是在时域上严格的对齐。

## 2 量化评估

为了量化比较上述 4 种建模方案在实际建模输出上的差异,本章将在同一典型室内场下对四种方案的建模结果进行比较。具体地,将分别比较在不同接收位置、不同环境表面反射特性以及不同接收端视场角条件下,四种建模方案输出的变化特点。如图 3 所示,本文所采用的场景为一个典型的会议室场景,长宽高分别是 8 m、4 m、3 m<sup>[3]</sup>,涉及的全部接收器



被设定在距离地面 1 m 高度的虚设通信平面。

这一配置与已有的多篇文献的设定保持一致。虽然原始的积分球建模方案仅能适用于单光源的系统配置,考虑到该方案的基础性对照作用,本文仍保留对其建模表现的展现。不同于后三种面向阵列式光源的情况,对应于该方案的系统配置仅使用位于天花板中心位置处的单一点光源,图 3(a)给出了采用传统单光源室内场景。面向当前无线光网络接入技术的实际配置,后三种方案将施用于配置 LED 光源阵列的接入网设计,图 3(b)给出了采用阵列光源的室内场景。此外,量化分析涉及的参数由表 1 具体给出。

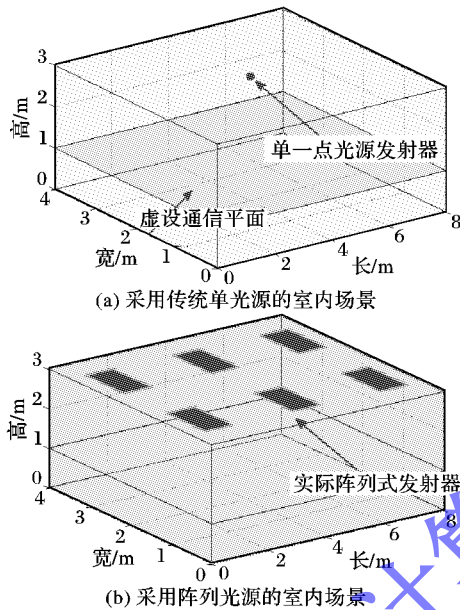


图3 两种光源室内场景图

表1 相关参数

参数	值
房间尺寸	8 m × 4 m × 3 m
环境表面平均反射率	0.4, 0.6, 0.8
发射器高度	3 m
发射器数量	6
发射器中 LED 数量	5 × 5
发射器中 LED 间距	7 cm
LED 半功率角	60°
发射器中心位置	(1, 1, 3) m, (4, 1, 3) m, (7, 1, 3) m, (1, 3, 3) m, (4, 3, 3) m, (7, 3, 3) m
接收器视场角	30°, 60°, 90°
接收器有效探测面积	1 cm <sup>2</sup>
接收器高度	1 m
单一 LED 的发射功率	1 W

## 2.1 不同接收位置的多径传输特性

具体地,本节将从接收位置的角度对 4 种方案的建模表现进行量化分析。为了不失一般性,将量化讨论 3 个典型位置处所捕获无线光信号所经历的漫射多径传输特性。考虑到房间的对称性,3 个接收位置分别设定于虚设通信平面的中心位置,边缘位置以及角落位置。对应的具体坐标分别是: (4, 2, 3) m、(4, 0.1, 3) m 以及 (0.1, 0.1, 3) m。为了使得表现差异不受其他因素的干扰,本节将环境表面反射率以

及 FOV 统一设定为 0.6 和 90°。图 4(a)具体给出了面向单光源原始积分球建模方案所给出的三个位置的信道频响情况。不难发现,随着接收位置从中心位置向边缘位置以及角落位置的逐次搬移,频响曲线整体水平也在逐次抬升。造成这种现象的主要原因在于,随着接收位置按上述路径的改变,接收器与中心处单光源的最短距离在快速地拉远。相应地,所接收到的 LOS 分量也不断地缩小,其在整体频响中的支配程度也在显著地降低。在中心位置和边缘位置处,整体的频响曲线还相对平坦。对应的 3 dB 传输带宽分别能保持在 9.92 MHz 和 6.94 MHz。然而,在角落位置处,频响曲线的平坦程度被严重破坏,由于传输特性基本被漫射分量主导,3 dB 传输带宽甚至降到了 6.18 MHz。图 4(b)具体给出了现有 Grubor 等<sup>[12]</sup>的拓展建模方案在 3 个位置处的信道频响情况。相对于单光源情况,图 4(b)中整体的频响水平有了根本性的抬升,从初始的约 -110 dB 上下升到了约 -75 dB,抬升幅度达到了约 30 dB。造成这种抬升的原因是阵列式发射器配置在光源数量上有了很大的跃升。在传输特性上,3 个位置所对应的频响曲线也给出了高度一致的平坦表现,对应的传输带宽分别是 65.69 MHz、52.11 MHz 和 43.72 MHz。虽然该方案中仍然保留了原始积分球建模方案中的单一漫射分量,但是其对整体信道特性的影响十分有限,仅能体现在约 100 MHz 高频区间的连续波动。

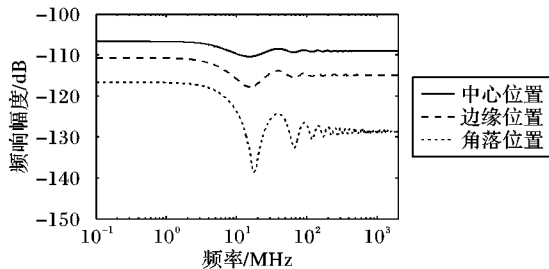
一旦引入对全部光源所对应反射分量,3 个位置的频响特性会发生显著的改变,图 4(c)给出了在 Grubor 等<sup>[12]</sup>的面向阵列光源拓展建模方案下不同接收位置条件下的频率响应。不难看出,虽然在频响整体水平上仍与图 4(b)一致,但是频响的平坦区间已经被明显缩短,剧烈波动的起始位置从约 100 MHz 压缩至约 20 MHz。这说明,现有 Grubor 等<sup>[12]</sup>的拓展建模方案所给出的结果明显高估了多径漫射信道的传输特性。相应的 3 个接收位置的 3 dB 传输带宽分别是 6.79 MHz、6.56 MHz 和 6.33 MHz,参照单光源情况的结果,可确认属于合理区间的范畴。此外,当借助第二种演进方案,也就是进一步引入各漫射分量的相对时延如图 4(d),会发现信道特性不会出现显著的改变,可察觉的差异就在于高频范围波动程度的减弱以及在 20 MHz 左右位于原始点光源频响的相似程度在提升。

## 2.2 不同反射条件的多径传输特性

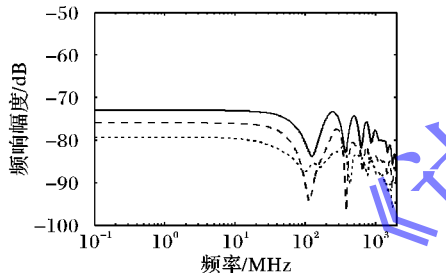
多径传输特性不仅与上述接收器所在位置有关,也深受室内环境表面反射特性影响。整体来讲,绝大多数室内环境表面相对于光波波长来说,可认为是粗糙表面,当无线光信号入射到环境表面后,会按照朗伯模式以表面法向为轴向外漫射。但是,并不是全部入射无线光信号的功率都被漫射出去,仅有按照反射表面反射率比例的人射光功率会被反射出去。不同反射材料的平均反射率有着一定的差异,但总体上处于 0.4~0.8。本节具体讨论了 3 个典型的反射率,分别是 0.4, 0.6 和 0.8。为了使得表现差异不受其他因素的干扰,本节将接收器位置以及 FOV 统一设定为 (0.1, 0.1, 3) m 和 90°。

具体地,图 5(a)显示在单光源方案下,随着反射率的增加,基带部分的频率响应水平不断地抬升,反射率每增加 0.2,基带部分的频率响应水平会抬升约 5 dB。由于高频部分仍然由反射分量所主导,因而随着反射率的增加,信道的传输带宽会逐步减小,分别是 8.09 MHz、6.18 MHz 及 3.43 MHz。当采用 Grubor 等<sup>[12]</sup>的拓展建模方案时,反射率对信道传输特性

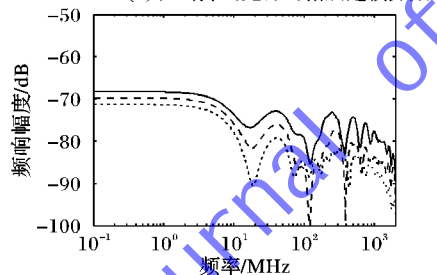
的影响基本上无法察觉,图5(b)给出了由该建模方案获得的不同平均反射率下频率响应。由于所考虑的反射分量与LOS分量的数量严重的不对等,因而三种反射率的条件下,传输带宽始终维持在约44 MHz。当采用本文提出的第一种拓展方案时,基带部分的频响水平会随着反射率稳步的抬升,这一变化趋势与单光源情况的结果高度类似,如图5(c)所示。但是,由于光源数量上巨大差异,3种反射率条件下的基带增益最终抬升至约75 dB、70 dB和65 dB。在该方案对应于3种反射率的传输带宽分别是9.16 MHz、6.33 MHz及3.43 MHz。当进一步引入对各反射分量相对时延的表征时,基带部分的3条频响不会有显著的变化;在高频部分,频响的波动程度会有所缓解,图5(d)给出了由包含各反射分量时延建模方案获得的频率响应。不难发现,在图5(a)~(d)中,高频部分有很大的相似性,这显示由于反射分量的影响集中于基带附近,高频部分始终由整体LOS分量所主导。



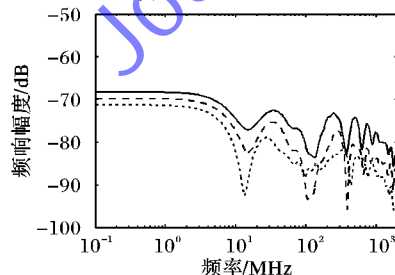
(a) 面向单光源的积分球建模方案



(b) 面向阵列光源的拓展建模方案



(c) 包含全部反射分量的建模方案

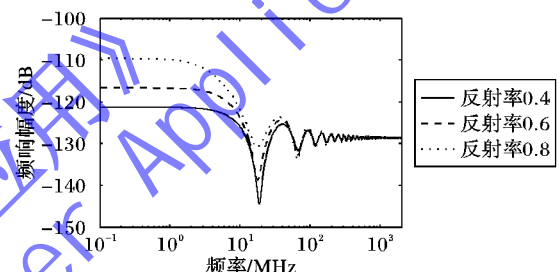


(d) 包含各反射分量时延的建模方案  
图4 不同接收位置条件下的频率响应

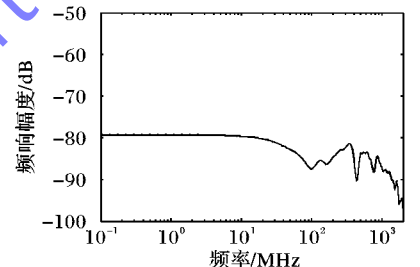
### 2.3 不同视场角下的多径传输特性

本节讨论视场角对频响特性的影响。为了使得表现差异不受其他因素的干扰,将接收器位置以及反射率统一设定为

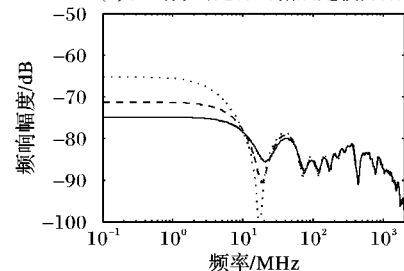
(0.1, 0.1, 3) m和0.6。在单光源情况下,当FOV为30°时,频响区间不超过100 MHz,图6(a)给出了面向单光源的积分球建模方案下不同FOV设定下的频率响应。这是由于FOV过小,仅能接收到漫射分量,相应的传输带宽仅为8.62 MHz。当FOV增至60°时,由于能接收到足够充分的直射分量,基带增益显著地从约-130 dB抬升至约-120 dB。当FOV进一步增至90°时,频响水平只有微小抬升,这是由于所接收到的LOS分量并未改变,仅仅是接收到漫射分量有所增加。对应于后两种FOV的传输带宽分别是6.03 MHz和6.18 MHz。当采用Grubor等<sup>[12]</sup>的拓展建模方案时,由于光源配置变为阵列式,基带增益抬升至约-80 dB,图6(b)给出Grubor等<sup>[12]</sup>提出的面向阵列光源的拓展建模方案在3种典型FOV下的频率响应。值得注意的是,在FOV为30°由于接收器仅能捕获到部分LOS分量,因而增益水平略低于其他两种FOV情况。该方案给出的三种FOV情况的传输带宽分别是1002.88 MHz、50.05 MHz和43.72 MHz。



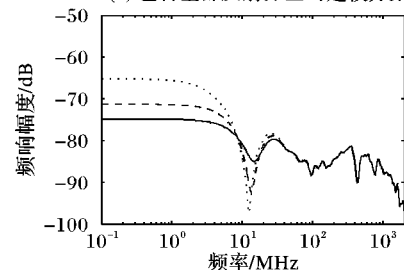
(a) 面向单光源的积分球建模方案



(b) 面向阵列光源的拓展建模方案



(c) 包含全部反射分量的建模方案

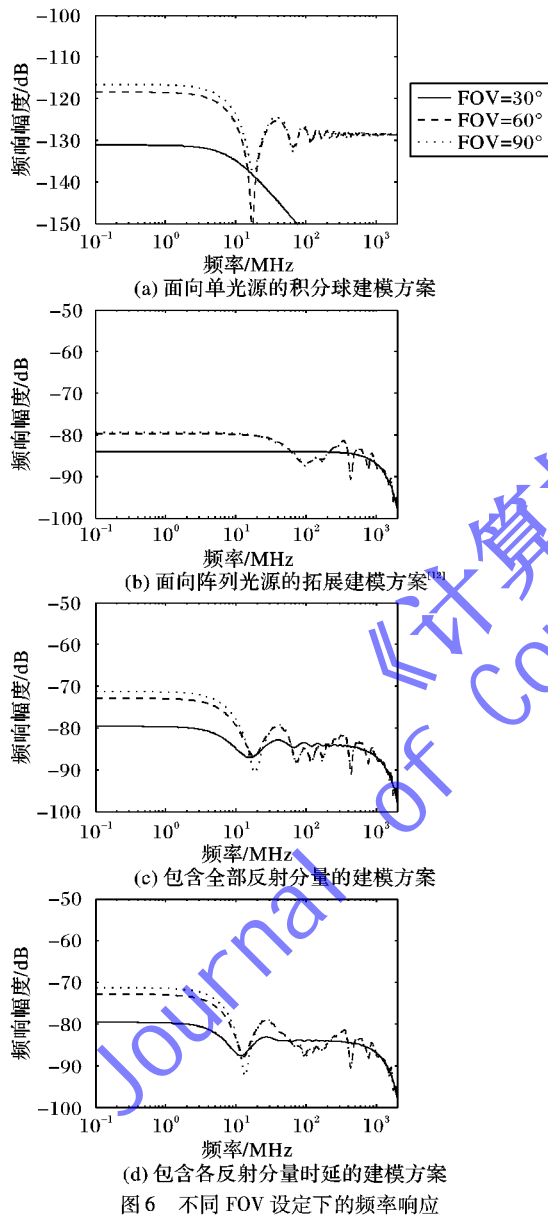


(d) 包含各反射分量时延的建模方案

图5 不同平均反射率设定下的频率响应

当引入全部光源所对应的LOS分量时,3种FOV情况频

响曲线的在基带区域的频响曲线与单光源建模方案给出的频响有明显的相似性。最主要的区别在于频响幅度,对应的传输带宽分别是 6.87 MHz、6.41 MHz 和 6.33 MHz,图 6(c) 给出了包含全部反射分量的建模方案在 3 种典型 FOV 下的频率响应。相对于现有演进方案的结果,由于本文所提出的演进方案充分考虑了全部光源的反射分量,避免了对基带传输特性的高估。当进一步引入各反射分量的相对时延后,高频部分频响曲线的抖动会有所改善,图 6(d) 给出了包含各反射分量时延的建模方案在 3 种典型 FOV 下的频率响应,对应的传输带宽分别是 6.87 MHz、6.41 MHz 和 6.33 MHz。



### 3 结语

针对传统积分球建模方案以及现有针对阵列式光源拓展方案的局限性,本文提出了面向无线光局域网传输特性的拓展方案。这一方案能够在保证方案实用性的同时,充分考虑各光源所引入的反射分量,避免了现有建模方案对室内漫射多径传输特性的表征偏差,避免高估基带传输带宽最高可达

近 50 MHz,避免传输幅度低估最高可达近 15 dB。此外,本文分别从接收器位置、室内环境表面反射率以及 FOV 3 个方面展现了拓展方案在传输表征上的准确性与合理性。同时,量化分析显示,虽然进一步引入对各反射分量相对时延可以使得高频响应更为精细,但是对整体传输带宽相对有限,在实际工程应用时,为快速获得可接受传输特性,可选择性引入反射分量相对时延。

### 参考文献:

- [1] SLAIMAN I, HAMID N H B, BOON T T. Optical wireless communications through visible light LEDs: an overview [J]. International Journal of Engineering Research and Technology, 2014, 3(3): 1152 - 1156.
- [2] Cisco. Cisco visual networking index: forecast and methodology [EB/OL]. [2014-05-26]. [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white\\_paper\\_c11-481360.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html).
- [3] 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.
- [4] WU S, WANG H, YOUN C H. Visible light communications for 5G wireless networking systems: from fixed to mobile communications [J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 41 - 45.
- [5] WEI C C, WU F M, CHEN Z Y, et al. Indoor VLC system with multiple LEDs of different path lengths employing space-time block-coded DMT/CAP modulation [Invited] [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(3): A459 - A466.
- [6] WANG K, LIM C, NIRMALATHAS A, et al. High-speed optical wireless communications in personal area networks [C]// Proceedings of the 2014 13th International Conference on Optical Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2014: 1 - 4.
- [7] CHEN S-H, CHOW C-W. Single-input multiple-output visible light optical wireless communications supporting quality of service [J]. Electronics Letters, 2015, 51(5): 406 - 408.
- [8] ZHAO H, LIU Y, HUANG K, et al. A study on networking scheme of indoor visible light communication networks [C] // Proceedings of the 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2014: 1 - 5.
- [9] EBIHARA K, KAMAKURA K, YAMAZATO T. Spatially-modulated space-time coding in visible light communications using  $2 \times 2$  LED array [C] // Proceedings of the 2014 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. Piscataway: IEEE, 2014: 320 - 323.
- [10] WU L, ZHANG Z, DANG J, et al. Adaptive modulation schemes for visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(1): 117 - 125.
- [11] JUNGnickel V, POHL V, NONNIG S, et al. A physical model of the wireless infrared communication channel [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(3): 631 - 640.
- [12] GRUBOR J, RANDEL S, LANGER K D, et al. Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(24): 3883 - 3892.