

# OOK 通信中的软判决辅助 ML 信道估计和 MAP 检测

孟 婷<sup>a</sup>, 缪慧敏<sup>a</sup>, 张浩波<sup>b</sup>, 吴茗蔚<sup>b</sup>

(浙江科技学院 a. 机械与能源工程学院; b. 信息与电子工程学院, 杭州 310023)

**摘 要:** 为了研究自由空间光(free space optical, FSO)通信开关键控(on-off keying, OOK)系统的信号接收问题,提出一种 FSO-OOK 信号的接收方案。首先基于最大似然(maximum-likelihood, ML)原理提出一种软判决辅助(soft decision aided, SDA)ML 信道估计方法;然后根据 SDA-ML 估计子进行逐符号最大后验概率(maximum a posteriori, MAP)检测。通过蒙特卡洛仿真试验,对比这种接收方案与传统方案的接收性能。结果表明,该方案的均方误差和误比特率在中高信噪比、任意发送信号先验概率的情况下优于传统方案,并接近理想估计和理想检测的误差性能下界。因此,基于 SDA-ML 估计子进行 MAP 逐符号检测的信号接收方案的信道估计结果准确,信号检测的抗衰落能力强,适用于 FSO-OOK 通信场景。

**关键词:** 软判决辅助;最大似然估计;最大后验概率检测;自由空间光

**中图分类号:** TN911.72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2021)05-0349-08

## Soft decision aided ML estimation and MAP detection for OOK

MENG Ting<sup>a</sup>, MIAO Huimin<sup>a</sup>, ZHANG Haobo<sup>b</sup>, WU Mingwei<sup>b</sup>

(a. School of Mechanical and Energy Engineering; b. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** A FSO-OOK receiver was proposed with a view to studying the receiver of free space optical (FSO) communication using on-off keying (OOK). First, a soft-decision-aided maximum-likelihood (SDA-ML) channel estimation was formulated on the basis of ML principle algorithm. Then, the SDA-ML estimator was applied to conduct the symbol-by-symbol maximum a posteriori (MAP) detection. Finally, the performance of this receiver was compared with that of traditional methods by virtue of Monte Carlo simulation. Results show that both mean square error and bit error probability performance of this proposed method are superior to those of traditional methods, approximating the lower bound of error performance of ideal estimation and detection. Thus, the symbol-by-symbol MAP detection receiver based

**收稿日期:** 2020-09-28

**基金项目:** 浙江省教育厅一般科研项目(研究生专项)(F703106J11);国家自然科学基金项目(61571316)

**通信作者:** 吴茗蔚(1977—),女,浙江省杭州人,教授,博士,主要从事无线通信和光通信传输技术研究。E-mail: wu\_mingwei2004@aliyun.com。

on SDA-ML estimator boasts accurate result of estimation and strong anti-fading ability, being applicable to FSO-OOK communication scenarios.

**Keywords:** soft decision aided; maximum-likelihood estimation; MAP detection; FSO

自由空间光(free space optical, FSO)通信技术拥有带宽高、不易被窃听、不需要光谱许可等优势<sup>[1-3]</sup>, 因此成为弥补射频通信缺点的互补技术之一<sup>[4]</sup>。但 FSO 的通信链路设备复杂, 成本较高, 因此大都采用简便的强度调制/直接检测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)方法进行调制解调<sup>[5-6]</sup>。其中, 基于开关键控(on-off keying, OOK)的 IM/DD 系统实现最为简便。这种 IM/DD 通信系统发射端的激光器发出一段稳定激光束, 该激光束受到驱动电路的控制, 发射端出瞳处输出与键控电压成等比的光强信号<sup>[7]</sup>; 接收端的光电探测器对瞬时光功率做出响应, 将光学透镜表面上收集到的光强恢复为电信号<sup>[8]</sup>。

FSO-OOK 信号最佳接收方案是根据瞬时信道状态信息(channel state information, CSI)计算判决门限来进行符号判决, 即若接收信号大于判决门限则判定当前符号为 1, 否则为 0。这是一种理想接收机, 通常假设理想接收机需实现理想信道估计, 信号检测基于真实 CSI 信息, 其误比特率(bit error probability, BEP)是信号接收的理论下界。然而 FSO 信道受到路径损耗、大气湍流、指向误差等因素的影响, CSI 具有随机和时变特性, 实际接收机的检测性能依赖信道估计的准确度, 因此一个准确有效的信道估计算法是接收机进行信号检测的重要前提。最常见的信道估计方法是通过发送一段训练数据<sup>[9-11]</sup>或反复插入导频<sup>[12]</sup>估计信道参数, 这些方法有大量的冗余信息, 造成了带宽的浪费。还有一种盲检测的接收方式也可以应用于 FSO 通信场景<sup>[13-14]</sup>, 盲检测是一种基于多元分布形式的似然函数进行序列检测的信号检测方式。虽然这种接收机的检测性能不再依赖信道估计, 但是需要遍历所有可能的发送序列, 计算复杂度会随着序列长度呈指数增长<sup>[15-16]</sup>。

随着信道测量技术的发展, FSO 信道的路径损耗、大气乱流、指向误差等模型都日趋完善<sup>[17-20]</sup>, 信道估计的精准度有了保证。信道盲估计联合逐符号检测的接收方式, 因为有信道模型工作的支撑而拥有自身的优越性, 虽然这种方法的接收性能强烈依赖于信道估计结果, 但该方法无需导频, 并且复杂度低于直接进行序列检测的接收方式。常见的盲估计方法有判决辅助估计<sup>[21]</sup>、带有动态存储的判决辅助估计<sup>[22]</sup>等。然而我们发现, 现有的信道盲估计方法在化简或近似后的实际操作都等同于对接收信号取时间平均。另外, 这些盲估计方法仅考虑等发送信号先验概率的情况, 在非等发送信号先验概率情况下显然不是最佳的。因此, 本研究首先在假设未知 CSI 的统计分布模型、已知发送信号先验概率和加性高斯白噪声方差的前提下, 基于最大似然(maximum-likelihood, ML)原理, 利用之前和之后反馈的软判决辅助(soft decision aided, SDA)来估计信道的衰减参数, 即 SDA-ML 估计。然后利用 SDA-ML 估计子进行逐符号的最大后验概率(maximum a posteriori, MAP)检测。

## 1 信号模型

发射端出瞳处的发射光场函数  $E_s(t)$ <sup>[23]</sup> 为

$$E_s(t) = C(t)e^{j\varphi(t)}. \quad (1)$$

式(1)中:  $t$  为时间;  $C(t)$  为光信号振幅变化函数;  $e^{j\varphi(t)}$  为光信号相位变化函数; 光信号振幅与发送光功率  $P_s(t)$  的关系为  $P_s(t) = |E_s(t)|^2 = C^2(t)$ 。将接收光功率  $P_r$  的数学模型建立为

$$P_r(t) = IP_s(t) + n(t). \quad (2)$$

式(2)中:  $I$  为光波在 FSO 信道中传播产生的功率衰减;  $n(t)$  为光波在 FSO 信道中传播受到的加性噪声。

在一个数据帧内, 我们假定所有的符号拥有同样的功率衰减  $I$ , 并且  $n(t)$  是均值为 0、方差为  $\frac{N_0}{2}$  的加性高斯白噪声。FSO 通信场景通常需要考虑高斯光束的传播特性、大气对光波的影响、收发机抖动产生的指向性误差等问题, 但研究证明, FSO 信道可以看成是一定动态范围内缓慢变化的链路损耗<sup>[24]</sup>。由于通信数据传输速率的单位已经达到 Gb/s 以上, 所以相对超高的数据传输速度, 缓变的信道在观测窗口内可

以被假设为等效时不变衰落信道。最终的接收光场典型地表现为出瞳处发射光场与恒定信道乘性噪声的调制作用场及加性噪声场形成的复合随机场形式。

基于OOK的IM/DD等效通信系统模型如图1所示。数字序列 $s(k)$ 经过二进制脉冲成型调制后变成一个模拟信号 $s(t)$ 。模拟信号 $s(t)$ 利用驱动电路控制激光器的输出光功率 $P_s(t)$ 的改变。光学发射端一般采用光束准直整形等手段使得光场 $E_s(t)$ 集中在一个较小而适度的立体角内,然后把它扩展为一个完好的光束后将其发射到空中。接收端的光电转换器(photoelectric detector, PD)将收集到的接收光功率 $P_r(t)$ 转换为光电流 $r(t)$ ,光电流由光电子组成,每个接收信号的数值等于一个符号周期内PD转换出光电子的积分。PD后置的模数转换器(analog/digital, A/D)又将连续光电流 $r(t)$ 抽样成离散信号 $r(k)$ 。最终离散信号 $r(k)$ 被送入接收机的信号处理模块进行参数估计和符号判决。

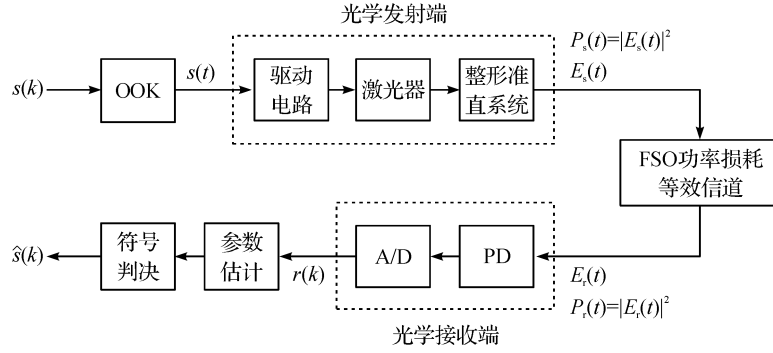


图1 基于OOK的IM/DD等效通信系统模型

Fig. 1 IM/DD equivalent communication system model based on OOK

将抽样后的接收信号样本数据建模为

$$r(k) = hs(k) + n(k). \quad (3)$$

式(3)中: $r(k)$ 为第 $k$ 个符号周期内观测到的接收信号; $h$ 为信道衰减参数; $s(k)$ 为第 $k$ 个符号周期内的发送符号,它有两种取值,分别为1和0,对应的先验概率分别为 $P_1$ 和 $1-P_1$ 。

OOK的信噪比 $\gamma$ 定义为

$$\gamma = \frac{E[s^2(k)]}{N_0} = \frac{P_1 h^2}{N_0}.$$

## 2 SDA-ML 估计和 MAP 检测

### 2.1 SDA-ML 估计的推导

假设接收信号的样本为 $r(1), r(2), \dots, r(N)$ ,将接收信号序列写成集合的形式 $\{r(k)\}_{k=1}^N$ ,对应的发送序列为 $\{s(k)\}_{k=1}^N$ , $N$ 为一个数据帧内包含的符号个数。需要说明的是,OOK调制信号只有高电平1和低电平0两种取值,本研究将OOK调制模块之后直至参数估计模块之前的传输模块全部看作信道,发送光强也作归一化处理,因此估计结果是发送信号受到信道所有乘性影响的总和。另外,每个接收信号及其自身所受到的加性噪声都是相互独立的,因此信号之间没有时间相关性。

单个接收样本 $r(k)$ 的条件概率密度函数(probability density function, PDF)为

$$p(r(k)|s(k)=0, h) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{r(k)^2}{N_0}\right), \quad (4)$$

$$p(r(k)|s(k)=1, h) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right]. \quad (5)$$

根据条件概率的全概率公式,可得单个接收样本 $r(k)$ 的似然函数为

$$p(r(k)|h) = p(r(k), s(k)=0|h) + p(r(k), s(k)=1|h) = (1-P_1)p(r(k)|s(k)=0, h) + P_1 p(r(k)|s(k)=1, h). \quad (6)$$

将式(4)和式(5)代入式(6)可得

$$p(r(k)|h) = \frac{1-P_1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{r(k)^2}{N_0}\right) + \frac{P_1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right].$$

因加性噪声样本为独立同分布,由式(6)可得接收样本 $\{r(k)\}_{k=1}^N$ 关于 $h$ 的似然函数为

$$p(\{r(k)\}_{k=1}^N|h) = \prod_{k=1}^N \left\{ \frac{1-P_1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{r(k)^2}{N_0}\right) + \frac{P_1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right] \right\}. \quad (7)$$

为了求解关于信道参数 $h$ 的 ML 估计结果,需要求解符合似然函数最大值时参数 $h$ 的取值。然而对似然函数式求关于 $h$ 的导数非常复杂,又由于求最大似然等价于求最大对数似然,因此我们对式(7)取对数后再对 $h$ 进行求导。信道参数 $h$ 的对数似然函数为

$$\ln p(\{r(k)\}_{k=1}^N|h) = \sum_{k=1}^N \ln \left\{ (1-P_1) \exp\left(-\frac{r(k)^2}{N_0}\right) + P_1 \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right] \right\} + c. \quad (8)$$

式(8)中: $c$ 为独立于信道参数 $h$ 的常数。为了求解符合最大对数似然的 $h$ 取值,对式(8)取关于 $h$ 的一次偏导,并令偏导数等于0,得到关于 $h$ 的方程:

$$\frac{2}{N_0} \sum_{k=1}^N \frac{P_1 \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right] (r(k)-h)}{(1-P_1) \exp\left(-\frac{r(k)^2}{N_0}\right) + P_1 \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right]} = 0. \quad (9)$$

使式(9)成立的 $h$ 的取值就是信道参数的 ML 估计 $\hat{h}$ 。解式(9)可得最终的估计式为

$$\hat{h} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{r(k)}{(1-P_1) \exp\left[-\frac{2\hat{h}}{N_0} \left(r(k) - \frac{\hat{h}}{2}\right)\right] + P_1}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{(1-P_1) \exp\left[-\frac{2\hat{h}}{N_0} \left(r(k) - \frac{\hat{h}}{2}\right)\right] + P_1}}. \quad (10)$$

式(10)是一个无法进一步简化的隐方程,为了得到最终的信道估计结果 $\hat{h}$ ,本研究采用迭代算法求出它的数值结果。迭代算法的原理是将前一次迭代值 $\hat{h}_{m-1}$ 带入当前估计式的右端解出左端的当前迭代值 $\hat{h}_m$ ,以此来逐渐逼近方程的解,即

$$\hat{h}_m = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{r(k)}{(1-P_1) \exp\left[-\frac{2\hat{h}_{m-1}}{N_0} \left(r(k) - \frac{\hat{h}_{m-1}}{2}\right)\right] + P_1}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{(1-P_1) \exp\left[-\frac{2\hat{h}_{m-1}}{N_0} \left(r(k) - \frac{\hat{h}_{m-1}}{2}\right)\right] + P_1}}. \quad (11)$$

式(11)中: $m$ 为当前迭代次数, $m=1,2,3,\dots$ 。设迭代初值为

$$\hat{h}_0 = \frac{1}{NP_1} \sum_{k=1}^N r(k).$$

设迭代门限为 $\epsilon_h$ 。每次迭代结束后,计算当前迭代结果与前次迭代结果的差,当 $|\hat{h}_m - \hat{h}_{m-1}| < \epsilon_h$ 时,迭代结束,同时取当前迭代值作为最终的 SDA-ML 估计结果,即 $\hat{h}_S = \hat{h}_m$ 。

## 2.2 硬判决和软判决

本文的信道估计方法适用于任意发送信号先验概率的 FSO 通信场景,对应地,我们选择适用于任意发送信号先验概率的 MAP 检测进行逐符号判决。MAP 检测原理为:若 $p(s(k)=0|r(k)) > p(s(k)=1|r(k))$ ,即若 $\frac{(1-P_1)p(r(k)|s(k)=0)}{p(r(k))} > \frac{P_1 p(r(k)|s(k)=1)}{p(r(k))}$ ,则接收机判定发送信号为0,否则判定为1, $p(r(k))$ 为接收信号 $r(k)$ 的概率密度函数<sup>[25]112</sup>。因此将式(4)和式(5)代入 MAP 检测公式为

$$\hat{s}(k) = \begin{cases} 0, & (1-P_1) \exp\left(-\frac{r(k)^2}{N_0}\right) \geq P_1 \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right]; \\ 1, & (1-P_1) \exp\left(-\frac{r(k)^2}{N_0}\right) < P_1 \exp\left[-\frac{(r(k)-h)^2}{N_0}\right]. \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $\hat{s}(k)$ 为发送信号的判决结果。由式(12)可得硬判决条件为

$$\hat{s}(k) = \begin{cases} 0, & r(k) \geq \eta; \\ 1, & r(k) < \eta. \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: $\eta$ 为判决门限,且

$$\eta = \frac{h}{2} - \frac{N_0}{2h} \ln\left(\frac{P_1}{1-P_1}\right). \quad (14)$$

令  $h = \hat{h}_s$ , 式(14)就是本研究方案根据 SDA-ML 估计结果  $\hat{h}_s$  进行硬判决的过程。硬判决就是将信号检测理解成一种量化形式,接收器的输出是量化后的二进制符号。

观察式(9),SDA-ML 估计结果还可以表示为

$$\hat{h}_s = \frac{\sum_{k=1}^N P(s(k) = 1 | r(k), \hat{h}_s) r(k)}{\sum_{k=1}^N P(s(k) = 1 | r(k), \hat{h}_s)}. \quad (15)$$

式(15)中: $P(s(k)=1|r(k), \hat{h}_s)$ 为在当前接收符号  $r(k)$  和信道估计结果  $\hat{h}_s$  的条件下发送符号为 1 的概率。式(15)是一个根据数据帧内所有符号的软判决结果进行信道估计的过程,估计结果是由软判决信息辅助计算得到,因此称本文的信道估计是 SDA-ML 估计。软判决就是将信号检测理解成一种可信度指标分配形式,软判决的结果是发送符号的概率。

### 3 检测性能分析和仿真结果

#### 3.1 接收误比特率下界

理想接收机是基于理想信道估计的,它能够根据真实信道参数计算出判决门限的最佳值,因此当式(14)中的信道参数取理想估计值时,式(14)就是最佳检测的判决规则。理想接收机的 MAP 曲线就是信号接收的误比特率下界,对于 FSO-OOK 信号, BEP 表示为

$$P_b = (1 - P_1)P(s(k) = 1 | s(k) = 0) + P_1P(s(k) = 0 | s(k) = 1). \quad (16)$$

式(16)中: $P_b$  为 BEP;  $P(\hat{s}(k) = 1 | s(k) = 0)$  表示发送符号为 0 时接收机判决为 1 的概率;  $P(\hat{s}(k) = 0 | s(k) = 1)$  表示发送符号为 1 时接收机判决为 0 的概率,且

$$P(\hat{s}(k) = 1 | s(k) = 0) = \int_{\frac{\eta}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(r(k) - h)^2}{N_0}\right] dr(k) = Q\left[\frac{\eta}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right], \quad (17)$$

$$P(\hat{s}(k) = 0 | s(k) = 1) = \int_{-\infty}^{\frac{\eta - h}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}} \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(r(k) - h)^2}{N_0}\right] dr(k) = Q\left[\frac{h - \eta}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right]. \quad (18)$$

式(17)~(18)中: $Q(\cdot)$ 为 Q 函数。将式(17)~(18)代入式(16),可得 BEP 下界为

$$P_b = (1 - P_1)Q\left[\frac{\eta}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right] + P_1Q\left[\frac{h - \eta}{\sqrt{\frac{N_0}{2}}}\right]. \quad (19)$$

#### 3.2 传统均值接收方案和改进

对于一般的矢量信道,MAP 检测就是最佳检测。当发送信号先验概率相等时,MAP 检测简化为 ML 检测<sup>[25]114</sup>。传统的接收方案多采用 ML 检测方式,对于发送信号先验概率相等的 FSO-OOK 信号,ML 检测判决门限  $\eta_{ML}$  为

$$\eta_{ML} = \frac{h}{2}. \quad (20)$$

另外,传统接收方案的信道估计实际操作都是对导频或接收信号取时间平均,判决辅助估计法<sup>[21]1363</sup>的假设前提与本文基本上一致,因此我们将其作为传统接收方案的典例与本文接收方案进行详细对比。

以下为该对比方案的操作过程。

首先,由计算样本均值求出第一次判决的门限

$$\eta_{ML} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N r(k). \quad (21)$$

然后,利用硬判决结果辅助进行信道估计,得到均值估计结果

$$\hat{h}_M = \frac{1}{Q_1} \sum_{k=1}^N r(k) \hat{s}(k) + \frac{1}{N-Q_1} \sum_{k=1}^N r(k) [1 - \hat{s}(k)]. \quad (22)$$

式(22)中: $Q_1$  为第一次判决结果为 1 的符号个数。不难发现,式(22)是加入了后验概率的样本均值。

最后,令式(20)中的  $h = \hat{h}_M$ ,修正判决门限  $\eta_{ML}$ ,进行二次检测。

传统接收方案总是假设发送信号先验概率是对称的,因此选择的是 ML 检测,这显然缺少普遍性。而本文 SDA-ML 估计和 MAP 检测都适用于任何发送信号先验概率的情况。为了在同样的起点进行对比,我们将发送信号先验概率的信息代入对比接收方案,将其推广到任意发送信号先验概率的情况。改进方案的一次检测的判决门限改进为

$$\eta_{ML} = \frac{1}{2NP_1} \sum_{k=1}^N r(k). \quad (23)$$

二次检测的判决门限由式(20)改进为式(14),并令  $h = \hat{h}_M$ 。

### 3.3 性能对比

设置信道衰减参数的真实值  $h = 1$ , 帧长  $N = 20$ , 重复试验次数  $M = 10^5$ , 噪声方差  $N_0$  随信噪比  $\gamma$  改变。设置迭代门限  $\epsilon_h = 0.1$ 。通过蒙特卡洛仿真,对比 SDA-ML 估计、传统均值估计及改进均值估计 3 种方案的 MSE 来衡量信道估计的准确度。

仿真结果表明,当发送信号先验概率对称时,两种均值估计的 MSE 曲线重合,SDA-ML 估计优于其他两种均值估计,如图 2 所示。

当发送信号先验概率不对称时,改进均值估计的 MSE 曲线优于传统均值估计,SDA-ML 估计优于其他两种均值估计,如图 3 所示。

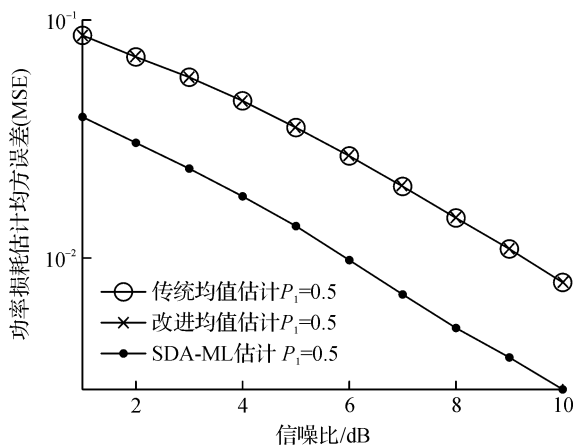
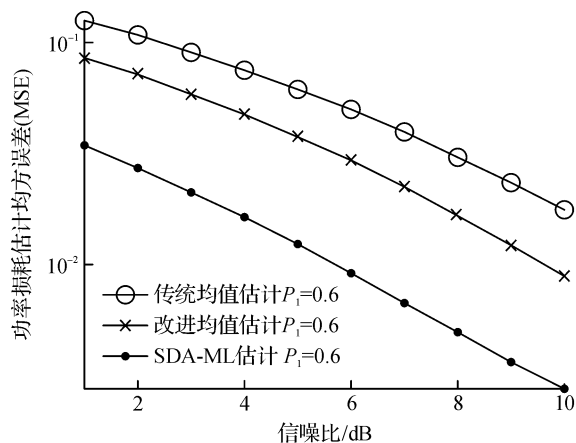
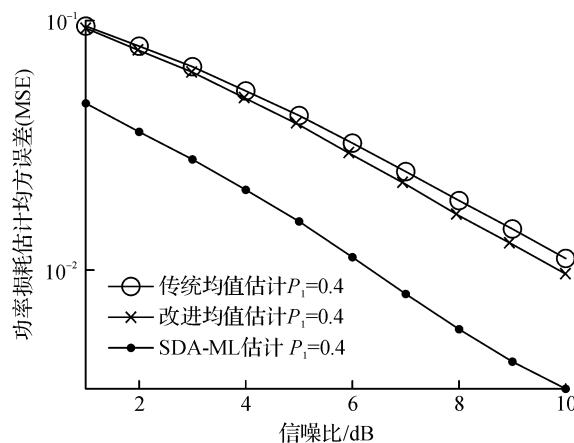


图 2 固定  $P_1$  且发送信号先验概率对称时信道估计的 MSE 曲线  
Fig. 2 MSE curve of channel estimation with static  $P_1$  and symmetric sent probability



(a) 发送信号先验概率  $P_1=0.6$



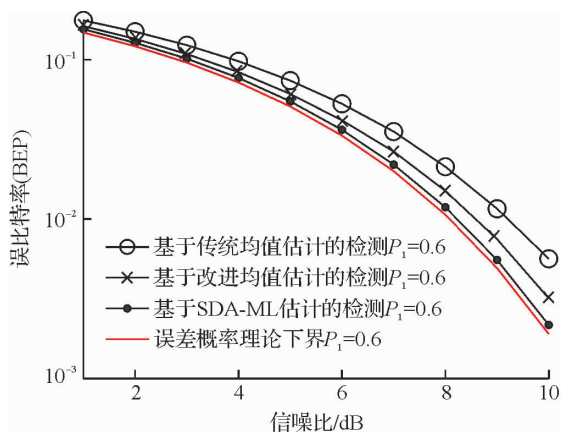
(b) 发送信号先验概率  $P_1=0.4$

图 3 固定  $P_1$  且发送信号先验概率不对称时信道估计的 MSE 曲线

Fig. 3 MSE curve of channel estimation with static  $P_1$  and asymmetric sent probability

设置同样的仿真参数,通过蒙特卡洛仿真对比 BEP 来衡量信号判决的准确度。仿真结果表明,当发送信号先验概率对称时,基于两种均值估计的检测 BEP 曲线完全重合,基于 SDA-ML 估计的检测 BEP 曲线最接近误差下界,因此接收性能优于基于均值估计的检测,如图 4 所示。

当发送信号先验概率不对称时,基于传统均值估计的检测 BEP 曲线离下界较远,性能较差;基于 SDA-ML 估计的检测 BEP 曲线比基于改进均值估计的检测更接近下界,因此接收性能优于基于均值估计的检测,如图 5 所示。



(a) 发送信号先验概率  $P_1=0.6$

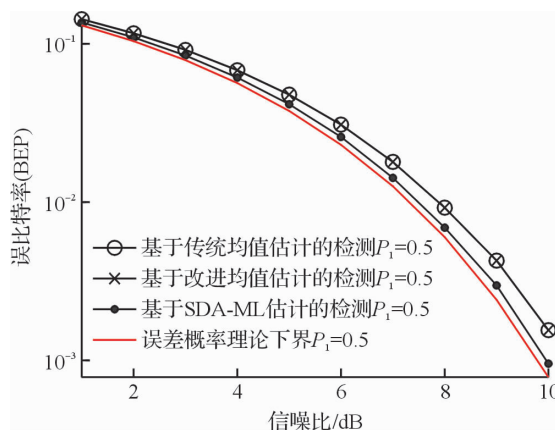
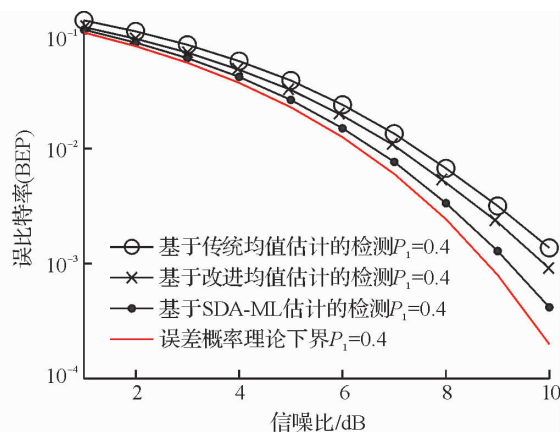


图 4 固定  $P_1$  且发送信号先验概率对称时信号检测的 BEP 曲线

Fig. 4 BEP curve of signaltest with static  $P_1$  and symmetric sent probability



(b) 发送信号先验概率  $P_1=0.4$

图 5 固定  $P_1$  且发送信号先验概率不对称时信号检测的 BEP 曲线

Fig. 5 BEP curve of signaltest with static  $P_1$  and asymmetric sent probability

仿真结果表明,当  $\epsilon_h=0.1$  时,本研究提出的接收方案的平均迭代次数在任意信噪比下都低于两次,如图 6 所示。而传统接收方案进行了两次估计和判决,这确实降低了 BEP,但同时也将复杂度增加了一倍。值得注意的是,此时本文方案仅需要进行一次判决且 MSE 与 BEP 均优于传统接收方案。

#### 4 结 语

本研究提出了一种 FSO-OOK 信号接收方案,包括基于 SDA-ML 原理进行信道估计及根据 SDA-ML 估计子进行逐符号的 MAP 检测。该方法无需导频,复杂度随信号数量呈线性增长。仿真结果表明,本文方案的 MSE 和 BEP 在中高信噪比、任意发送信号先验概率的情况下优于传统方案,并接近理想估计和理想检测的性能下界。

#### 参考文献:

- [1] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 57.

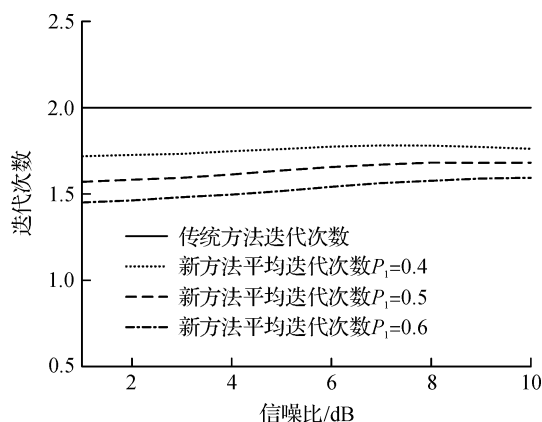


图 6 SDA-ML 估计的迭代次数

Fig. 6 Iteration number of SDA-ML estimation

- [2] HAMZA A S, DEOGUN J S, ALEXANDER D R. Classification framework for free space optical communication links and systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(2):1346.
- [3] TAWFIK I, ERICH L, ZABIH G, et al. Performance improvement of FSO system using multi-pulse pulse position modulation and SIMO under atmospheric turbulence conditions and with pointing errors[J]. IET Networks, 2018, 7(4):165.
- [4] FATHIKAZEROONI S, KAYMAK Y, ROJASCESSA R, et al. Optimal positioning of ground base stations in free-space optical communications for high-speed trains[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(6):1940.
- [5] SONG T, WU M, KAM P Y, et al. Mitigation of the background radiation for free-space optical im/dd systems[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(2):292.
- [6] PEREZ J, CHICHARRO F I, ORTEGA B, et al. On the evaluation of an optical of dm radio over FSO system with IM-DD for high-speed indoor communications[C]//19th International Conference on Transparent Optical Networks. Girona: IEEE, 2017:1.
- [7] 武保剑, 王峰. 光调制与再生技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [8] 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [9] COLE M, KIASALEH K. Signal intensity estimators for free-space optical communications through turbulent atmosphere[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(10):2395.
- [10] MORADI H, HEMMATI H, REFAI H H, et al. A PSAM-based estimator of noise and fading statistics for optimum receivers of free space optics signals [C]//Free-space Laser Communication Technologies XVIII. San Francisco: SPIE, 2010:75870O-1.
- [11] DABIRI M T, SADOUGH S M S. Near MAP channel estimation for FSO-OOK over atmospheric turbulence with pointing errors[C]//2017 Iranian Conference on Electrical Engineering. Tehran: IEEE, 2017:1950.
- [12] ZHU X, JOSEPH M. Pilot-symbol assisted modulation for correlated turbulent free-space optical channels[C]//Free-Space Laser Communication and Laser Imaging. San Francisco: SPIE, 2002:138.
- [13] ZHU X, KAHN J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8):1293.
- [14] ZHU X, KAHN J M. Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51(3):509.
- [15] RIEDIGER M L B, SCHOBBER R, LAMPE L. Multiple-symbol detection for photon-counting free-space optical communications[C]//IEEE International Symposium on Personal. Athens: IEEE, 2007:1494.
- [16] DABIRI M T, SADOUGH S M S, SAFI H. GLRT-based sequence detection of OOK modulation over FSO turbulence channels[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(17):1494.
- [17] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7):1702.
- [18] PAUDEL R, GHASSEMLOOY Z, LEMINH H, et al. Modelling of free space optical link for ground-to-train communications using a Gaussian source[J]. Iet Optoelectronics, 2013, 7(1):1.
- [19] NI X, YAO H, ZHI L, et al. Experimental study of the atmospheric turbulence influence on FSO communication system[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference. Hangzhou: IEEE, 2018:1.
- [20] 吕浩, 迟学芬, 陈洁. FSO 大规模线性 MIMO 阵列斜程上下行信道建模及差异研究[J]. 中国激光, 2018, 45(9):4.
- [21] RIEDIGER M L B, SCHOBBER R, LAMPE L. Blind detection of on-off keying for free-space optical communications [C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls: IEEE, 2008:1363.
- [22] SONG T, KAM P Y. A robust GLRT receiver with implicit channel estimation and automatic threshold adjustment for the free space optical channel with IM/DD[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(3):378.
- [23] 李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [24] MINCH J R, GERVAIS D R, TOWNSEND D, et al. Adaptive transceivers for mobile free-space optical communications[C]//IEEE Military Communications Conference. Washington: IEEE, 2006:1.
- [25] PROAKIS J G. 数字通信[M]. 5 版. 张力军, 张宗橙, 宋荣方, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2011.