

# 大气无线光信道下基于光子计数的迭代译码性能

谢伟良, 汤俊雄

(北京大学电子学系, 北京 100871)

摘要: 为了克服大气无线光信道中光强闪烁带来的长突发错误, 本文提出了一种基于光子计数的迭代译码方案, 并分析基于大气无线光信道下的译码性能. 仿真结果表明, 本方案不仅提高了系统的抗突发错误性能, 并且与传统的信道交织+ 级连码方案相比, 具有不引入信道交织时延和易于硬件实现的优点.

关键词: 无线光信道; 光子计数; 迭代译码

中图分类号: TN9291.12 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 08-1245-04

## Performance of Iterative Decoding Scheme Based on Photons Counting over Atmospheric Optical Wireless Channel

XIE Weiliang, TANG Junxiong

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to overcome long burst error induced by scintillation in atmospheric optical wireless channel, the paper proposes an iterative decoding scheme based on photons counting and analyzes performances of the iterative decoding scheme over atmospheric optical wireless channel. Compared with former channel interleaving+ Concatenated codes scheme, the scheme significantly improves anti-jamming performance of system without channel interleaving delay, and the scheme reduces complementation complexity.

Key words: optical wireless channel; photons counting; iterative decoding

### 1 引言

无线光通信作为一种新型的宽带无线通信技术, 拥有许多无可比拟的优点而备受关注, 与光纤通信相比, 无需铺设光缆, 价格便宜、建设周期短, 且频带可以达到光纤通信的水平; 与微波通信比, 它同样有优势, 频带比微波高 3~4 个数量级, 而且无需进行频率申请. 同时无线光通信设备具有组网机动灵活、无电磁干扰、通信保密性好、性能价格比优、室内外设备安装方便等一系列优点, 因而有着广阔的应用前景. 目前, 无线光通信已成为发达国家宽带通信的关键技术, 美国在政府花巨资开展该领域应用基础研究之后, AT&T、Cisco 和 Nortel 已投入数十亿美金研发该类技术和产品. 无线光通信对中国也十分重要, 中国城市内楼群密集, 需要很大通信容量, 铺设光纤造价太高, 而电缆或无线容量又较小, 无线光通信是解决中国城市、办公区和住宅区大容量、低造价通信的最佳途径之一, 是中国急需的关键技术.

1993 年 Cl Berrou 和 A. Glavieux 首次提出了一种新的信道编码方案))) Turbo 码<sup>[1]</sup>. 目前 Turbo 码已成为第三代移动通信的候选编码方案之一, 但是 Turbo 码在光通信领域的研究较少, 文献[2]将 Turbo 码的译码算法应用于卫星光泊松信道. 对于 Turbo 码及其迭代译码在大气无线光通信中的研究还罕

见报道. 点对点大气无线光信道中有各种的链路功率损耗, 包括: 自由空间损耗, 大气衰减和光强闪烁等<sup>[3]</sup>. 由于无线光信道的不稳定, 为了保证系统的可靠性, 有必要在系统中加入新的技术, 如: 信道编码等技术. 1989 年文献[4]做了交织级连码在无线光通信系统中的性能分析, 主要采用信道交织+ 前向纠错码的方案来克服大气无线光信道下光强闪烁引起的长突发误码. 本文将在分析大气无线光通信理论模型的基础上, 针对大气无线光信道的信道特性, 采用简单的信道估计+ Turbo 码的组合, 降低设计实际系统的复杂性, 并且不引入信道交织时延. 本文还进一步讨论了基于光子计数迭代译码方案的译码特性.

### 2 信道及通信理论模型

我们首先分析存在闪烁效应的大气无线光通信信道模型. 无线光链路中进入接收机视场角的背景光噪声  $P_b^{[3]}$  为:

$$P_b = L \# P \left( \frac{D_r}{2} \right)^2 \# \$ K \# \frac{P}{4} B^2 \quad (1)$$

其中,  $L$  为辐射强度谱函数,  $\$ K$  为滤光器带宽,  $B$  为接收机视场角,  $D_r$  是接收孔径. 背景光噪声的存在将劣化链路的性能, 所以一般采用滤光器来减少背景光噪声. 同时因为无线光通信的激光光束在大气中是以一定的发散角发送光信号的, 根

据高斯光束的空间传输方程可推出光斑中心处光强的表达方式, 如果再考虑大气衰减的损耗和光学系统的损耗, 则还要加上大气衰减因子  $Atten$  (单位 dB/km) 和发射、接收天线效率  $G_t, G_r$ , 则接收平面光斑中心的光强为:

$$I(0, 0, R) = \frac{2Pt\#G\#G}{Pw^2(R)} @10^{-Atten\#R/10} \quad (2)$$

其中  $Pt$  为发射功率,  $W(R)$  是链路传输距离为  $R$  处的光斑尺寸, 通常  $W(R)$  远大于接收机的接收孔径  $D_r$ , 所以可以把接收孔径内的光强近似为均匀分布, 这样, 接收功率  $Pr$  为:

$$Pr = I(x, y, R)\#P\left(\frac{D_r}{2}\right)^2 = I(0, 0, R)\#L_p\#P\left(\frac{D_r}{2}\right)^2 \quad (3)$$

其中  $L_p$  是瞄准偏角引起的衰减因子. 由于闪烁效应, 接收平面处的光强  $I$  是起伏变化的. 对于无线光通信系统中的光强闪烁效应, 由于接收孔径较大, 一般为几十厘米, 如果考虑孔径平均效应, 闪烁值是接收孔径  $D_r$  内的一个统计平均值, 因而是一个下降了的闪烁值, 对于距离在几公里以内的光强闪烁一般为弱闪烁, 其光强闪烁近似服从对数正态分布<sup>[6]</sup>:

$$P_1(I) = \frac{1}{2\sqrt{2PR_kI}} \exp\left[-\frac{\left(\ln\frac{I}{I_0} + 2R_k^2\right)^2}{8R_k^2}\right] \quad (4)$$

其中  $I_0$  表示光强均值,  $R_k$  表示闪烁指数.

假设系统采用 APD 探测器, 在接收机热噪声不可忽略的情况下, 电子计数近似服从高斯分布<sup>[5]</sup>, 解码比特错误概率为:

$$Pe(I) = \frac{1}{2}P(M > \mathcal{M}|0) + \frac{1}{2}P(M > \mathcal{M}|1) \\ = \frac{1}{2}Q\left(\frac{\mathcal{M} - M_0}{R_0}\right) + \frac{1}{2}Q\left(\frac{M_1(I) - \mathcal{M}}{R_1(I)}\right) \quad (5)$$

式中  $\mathcal{M}$  是判决门限,  $M_0, R_0, M_1, R_1$  分别表示 0 信号和 1 信号的均值和均方差, 且:

$$M_1(I) = g\#e\#(Ks(I) + Kb) \quad (6)$$

$$M_0 = g\#e\#Kb \quad (7)$$

$$R_1^2(I) = g^2F\#e^2\#(Ks(I) + Kb) + R_n^2 \quad (8)$$

$$R_0^2 = (g\#e)^2F\#Kb + R_n^2 \quad (9)$$

其中  $F$  为附加噪声因子,  $R_n^2$  为热噪声计数方差,  $g$  为光电倍增因子,  $e$  为电子电荷. 接收机的信号光与背景光的比特光子计数均值  $Ks, Kb$  分别为:

$$Ks(I) = \frac{2G}{hv}\#Pr(I)\#Tb \quad (10)$$

$$Kb = \frac{G}{hv}\#Pb\#Tb \quad (11)$$

其中  $G$  为量子效率,  $h$  为普朗克常数,  $v$  为光波频率,  $Tb$  为码周期. 在获得了  $Pe(I)$  之后, 就可以得到系统的平均误码率为:

$$BER = \int_0^1 e(I) \frac{1}{2\sqrt{2PR_kI}} \exp\left[-\frac{\left(\ln\frac{I}{I_0} + 2R_k^2\right)^2}{8R_k^2}\right] dI \quad (12)$$

图 1 为光强闪烁强度与系统平均误码率的关系曲线, 图中给出了闪烁指数  $R_k$  分别为 0.1、0.15、0.2、0.25 时的误码特性. 从图中可以看出, 随着闪烁强度的增大而系统的误码率将恶化, 所以必须采用信道编码来提高系统的抗干扰性能.

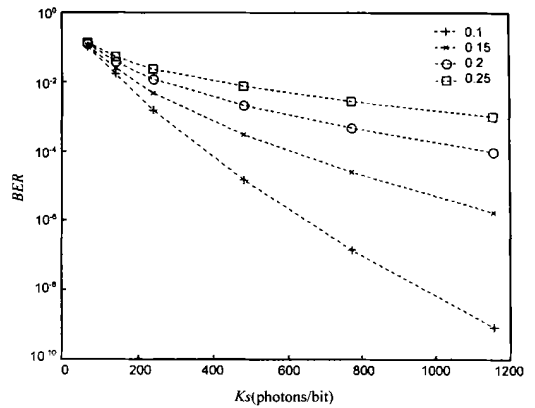


图 1 大气无线光信道误码特性曲线 ( $Kb = 50$ )

### 3 无线光信道下基于光子计数的迭代译码

对于光线光通信, 由于光强闪烁等将导致接收信号的强度起伏变化, 信号比特计数可以近似为高斯分布, 同时由于无线光通信系统的信号与噪声是相关的, 不是独立的, 从式(6)~式(9)中我们可以看出信号/10的均值和方差都与  $Ks$  有关, 为了获得信道的状态参量  $M_0, R_0, M_1, R_1$ , 提出采用估计光子计数均值  $Ks$  来获得信道的状态信息. 光强闪烁的功率谱密度一般在 200Hz 频带内, 闪烁频率远远低于通信码率, 本文基于通信码率远远大于光强闪烁频率的无线光信道特性, 同时根据无线光通信一般采用的强度调制特性, 提出了一种无线光信道下的  $Ks$  简单估计方法.

由于光强闪烁频率相对于通信码率是一个慢变化过程, 可以近似认为在一定的时间内  $Ks$  值基本不变, 则光电计数只受到高斯分布的影响, 这样就可以对这段时间内的  $Ks$  做出估计, 这个时间范围称为估计时间窗. 为了进行估计时间窗内  $Ks$  的估计, 可以假设接收信息中的 0 和 1 的概率一样. 如果对估计时间窗内接收机 APD 接收到的  $N$  比特的信号  $M$  求平均, 则信号均值将等于  $(M_0 + M_1)/2$ , 即:

$$\frac{1}{N} \sum M = \frac{M_0 + M_1}{2} = \frac{ge(2Kb + Ks)}{2} \quad (13)$$

利用上述的估计方程, 则可以得到  $Ks$  的估计值:

$$Ks_{est} = \frac{2 \sum M}{g\#dN} - 2Kb \quad (14)$$

在获得了信号/10的光子计数均值  $Ks$  后, 就可以算得估计时间窗内信号/10的均值  $M_1$  和均方差  $R_1$  的估计值, 从而进行 Turbo 码的第一个分量译码器的译码计算. 如果采用 log-BCJR 算法<sup>[7]</sup>, 则支量  $C_i(R_k, mc, m)$  为:

$$C_i(R_k, mc, m) = \Pr\{d_k = i, R_k, S_k = m | S_{k-1} = mc\} \\ = \Pr\{R_k | x_k\} \# \Pr\{d_k = i, S_k = m | S_{k-1} = mc\} \quad (15)$$

其中  $m$  表示编码器的状态,  $mc$  表示  $m$  的前一状态,  $d_k$  表示  $k$  时刻的输入比特,  $x_k$  表示  $k$  时刻编码器的输出比特,  $R_k$  表示接收到的比特信息. 后一项与编码器的编码方式有关, 前一项为信道的转移概率, 与信道模型有关, 在大气无线光信道下,

可以得到前一项为:

$$\Pr\{R_k | x_k\} = \Pr\{y_{k,i} | x_{k,i}\} \# \Pr\{y_{k,p} | x_{k,p}\}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2P}R_{k,i}} \exp\left(-\frac{(y_{k,i} - x_{k,i})^2}{2R_{k,i}}\right) \frac{1}{\sqrt{2P}R_{k,p}}$$

$$\# \exp\left(-\frac{(y_{k,p} - x_{k,p})^2}{2R_{k,p}}\right) \quad (16)$$

式中的  $x_{k,i}$ ,  $y_{k,i}$  分别为发送和接收的信息比特,  $x_{k,p}$ ,  $y_{k,p}$  分别为发送和接收的校验比特, 如果在对数域上计算则进一步可得到:

$$\ln\{\Pr(R_k | x_k)\} = -\ln\left[\sqrt{2P}R_{k,i}\right] - \frac{(y_{k,i} - x_{k,i})^2}{2R_{k,i}}$$

$$- \ln\left[\sqrt{2P}R_{k,p}\right] - \frac{(y_{k,p} - x_{k,p})^2}{2R_{k,p}} \quad (17)$$

在  $C_i(R_k, mc, m)$  计算公式中, 后一项由编码电路决定, 它将决定前一项计算式子中的信息比特  $x_{k,i}$ ,  $y_{k,i}$  和校验比特  $x_{k,p}$ ,  $y_{k,p}$  的转换关系. 在无线光通信中, 因为噪声与信号并不是独立的,  $R_{k,i}$ ,  $R_{k,p}$  并不相等, 所以  $C_i(R_k, mc, m)$  中的后一项也将影响前一项中  $R_{k,i}$ ,  $R_{k,p}$  的取值.

本文提出的方案是信道估计+ Turbo 码, 为了提高本方案的性能, 我们把 Turbo 码的迭代思想扩展到  $K_s$  估计. 可以取估计时间为 Turbo 码的交织深度, 这样可以按照 Turbo 码的迭代思想进行  $K_s$  迭代估计. 因为在数据流中  $/10$  的概率并不一定等于  $/0$  的概率, 所以第一次分量译码完成后第二个分量译码器译码之前, 结合前一次译码的硬判决进行  $K_s$  的第二次估计, 假设第一次译码所获得的硬判决中有  $L$  个  $/10$ , 则第二次  $K_s$  的估计方程将为:

$$\frac{1}{N} \sum M = \frac{(N-1)M_0 + LM_1}{N} = \frac{gc(N @ Kb + L @ Ks)}{N} \quad (18)$$

通过上述方程可得到第二次分量译码时  $K_s$  的估计值:

$$K_{s\text{est}} = \left[ \frac{\sum M}{gc} - N @ Kb \right] / L \quad (19)$$

得到第二次  $K_s$  的估计值之后, 将它应用于第二个分量码的译码计算. 这样在反复迭代译码的同时反复迭代估计  $K_s$  值, 基于光子计数的迭代译码框图如图 2.

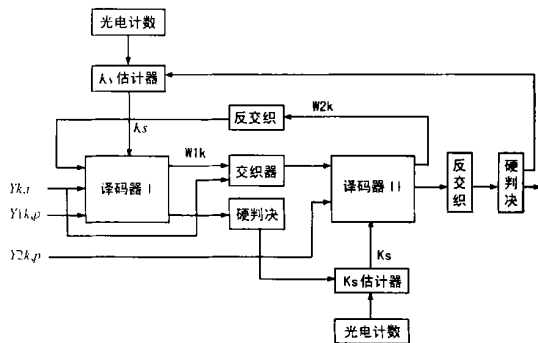


图 2 无线光信道下基于光子计数的迭代译码框图

估计时间窗口不可设置的太大, 因为在估计时间窗内要满足  $K_s$  基本不变的条件, 可以根据闪烁频率和通信码率的大小具体设定估计时间窗的大小.

### 4 仿真结果及分析

为了具体分析本文提出的无线光信道下基于光子计数迭代译码方案的性能, 我们进行了系统仿真. 系统采用 OOK 的光信号调制方式, 光强闪烁频谱在 100Hz 内, 闪烁指数  $R_k = 0.25$ . 采用  $1/3$  码率的 Turbo 码, 生成多项式为  $g(31, 33)_{\text{occl}}$ , 交织器使用伪随机交织器, 交织深度为 500 比特, 分量译码算法采用  $\log_2$  BCJR 译码算法, 最大迭代次数为 6 次.

图 3 给出了无线光信道下基于光子计数迭代译码方案的性能曲线, 码率  $R = 1/2$  和  $R = 1/3$  两种情况被仿真. 我们首先分析  $BER = 10^{-4}$  的情况, 从曲线图中可以看出, 在码率  $R = 1/2$ ,  $BER = 10^{-4}$  时, 本方案可以为系统带来 91.2dB 的编码增益, 在码率  $R = 1/3$  时, 则可提供 101.6dB 的增益. 而在  $BER = 10^{-5}$  的情况下, 译码方案在码率  $R = 1/2$  可以提供大约 111.1dB 的增益, 在码率  $R = 1/3$  时, 可以提供大约 121.0dB 的编码增益. 说明本译码方案可以很好的改善系统的抗干扰性能, 并且光子计数估计采用在线估计, 实现较容易且不引入信道交织时延. 如果采用信道交织+ 级连码的方案, 由于无线光信道光强闪烁的时间尺度具有随机性, 一般在几毫秒到几十毫秒, 所以采用信道交织技术很难实现充分交织, 并且无线光通信为高速通信系统, 采用信道交织时交织块将会很大, 硬件实现较难, 且带入时延. 为了说明本文采用的迭代估计方法的性能, 我们还给出了在完美  $K_s$  估计下迭代译码的性能仿真曲线, 结果表明, 迭代估计与完美估计的性能非常接近, 说明了迭代估计方法的准确性.

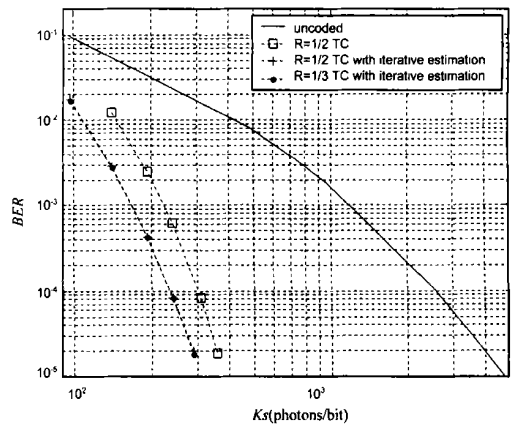


图 3 无线光信道下基于光子计数的迭代译码性能

图 4 给出了本方案的迭代特性曲线, 其中的曲线 0 表示未编码系统的误码特性, 曲线 1、2、4、6 分别表示译码迭代次数为 1 次、2 次、4 次、6 次的仿真结果. 从上述的结果, 可以看出随着译码迭代次数的增加, 系统性能进一步提高, 但是迭代的作用也将逐步减小, 第一次迭代译码的效果最大, 当迭代次数大于 6 次时, 系统性能的改善已经很小了, 这对于译码硬件设计具有指导意义.

从图 5 中可以看出本译码方案在码率  $R = 1/3$  时, 对于不同背景噪声系统的改善作用. 在误码率为  $10^{-5}$  时, 对于  $K_b = 50$  和  $K_b = 100$  两种系统的编码增益分别为 121.0dB 和 121.8dB,

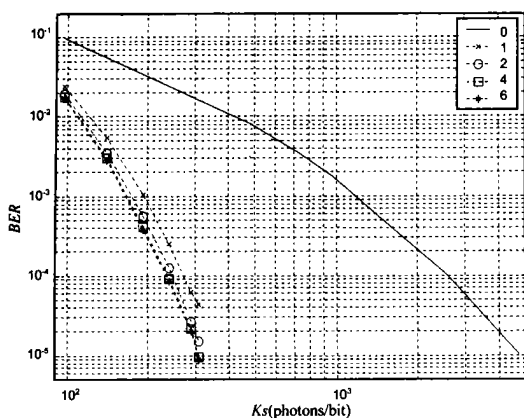


图 4 基于光子计数迭代译码方案的迭代特性  
信道越恶劣译码方案作用越大, 说明译码方案具有很好的抗背景干扰作用。由于大气无线光通信要求用大功率高带宽半导体激光器来满足链路预算的要求, 但是同时为了满足国际激光应用的安全标准, 大气无线光通信一般要求在 Class 3B ( $< 500\text{mW}$ ) 以下。如果应用迭代译码的方案将大大降低系统对功率的要求, 并且可以扩展链路的传输距离, 为无线光网络设计和系统的广泛应用提供益处。

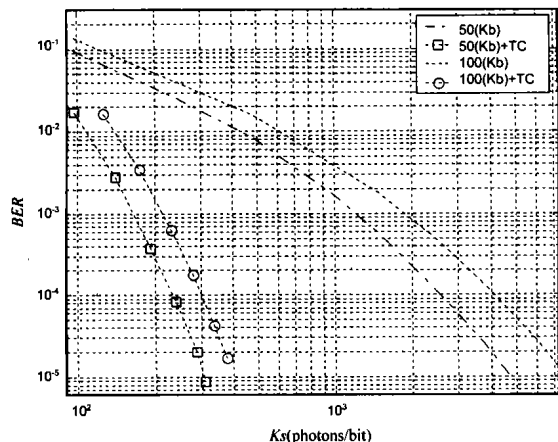


图 5 不同背景噪声下的迭代译码特性

## 5 结论

本文首先分析了大气无线光通信的信道特性, 并给出了存在光强闪烁效应的系统误码模型。在此基础上为了解决光强闪烁导致的长突发误码, 提出了一种大气无线光信道下基

于光子计数的迭代译码方案, 仿真结果表明本方案不仅提高了无线光系统的抗突发错误性能, 并且与传统的信道交织+级连码的方案相比, 具有易于实现和不引入信道交织时延的优点。

## 参考文献:

- [1] C Berrou, A Glavieux, et al. Near Shannon limit error correcting coding and decoding: Turbo codes [A]. Proc. ICC 93 [C]. 1993. 1064-1070.
- [2] Shu-ming Tseng, Shiau-he Tsai. Performance of Parallel Concatenated Convolutional Coded On-Off Keying Communication System [J]. IEEE Photonics technology letters. 1999, 11(6): 721-723.
- [3] P R Barbier, D W Rush, et al. Characterization of optical wireless link performance [A]. SPIE: Optical wireless communications [C]. 1998, vol. 3532. 41-48.
- [4] Y T Koh, F Davison. Interleaved Concatenated coding for the Turbulent Atmospheric Direct Detection Optical Communication Channel [J]. IEEE Trans Commun. 1989, 37(6): 648-651.
- [5] Robert M. Gagliardi, Sherman Kap. 光通信技术与应用 [M]. 陈根祥, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [6] J H Churnside, R J Hill. Probability density of irradiance scintillations for strong path integrated refractive turbulence [J]. J. Opt. Soc. Am. A. 1987, 4(4): 727-733.
- [7] Robertson P, Villebrun E, et al. A comparison of optimal and sub-optimal MAP decoding algorithms operating in the Log domain [A]. Proc. ICC-95 [C]. 1995. 1009-1013.

## 作者简介:



谢伟良 男, 1974 年出生于福建省, 1997 年和 2000 年在南开大学先后获得学士和硕士学位, 现为北京大学信息科学技术学院电子学系博士研究生, 主要研究方向为 Turbo 码、差错控制策略与无线光通信。Email: nk\_xiewl@sina.com

汤俊雄 男, 1941 年出生于湖南, 1964 年毕业于北京大学物理系, 现为北京大学电子学系教授, 博士生导师, 量子器件与无线光通信实验负责人, 感兴趣的研究方向为卫星激光通信, 地面无线光通信, 量子滤波器等。