

无线光通信中 RCPT/ARQ 自适应 差错控制机制的研究

谢伟良, 汤俊雄, 刘 璐
(北京大学信息科学技术学院电子学系, 北京 100871)

摘 要: 为了克服无线光通信中的光强闪烁、大气衰减等信道干扰, 本文结合无线光信道下 Turbo 码迭代译码算法, 分析了 RCPT 码的穿孔图案特性, 在此基础上完整给出了无线光通信系统 RCPT/ARQ 自适应差错控制方案, 仿真表明 RCPT/ARQ 自适应差错控制方案显著提高了链路的吞吐量和稳定性. 同时结合无线光信道的特性, 提出了 RCPT/ARQ 机制下的排序重发策略, 进一步优化系统在恶劣信道条件下的链路吞吐量.

关键词: 无线光通信; Turbo 码; 混合 ARQ; 排序重发

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-0223-04

Study on the Adaptive Rate Compatible Punctured Turbo-Coded ARQ Scheme in Optical Wireless Communication

XIE Wei-liang, TANG Jun-xiong, Liu Lu

(Department of Electronics School of Electronics Engineering and Computer Science Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to overcome fading in optical wireless channel, such as attenuation and scintillation, this paper introduces the adaptive rate compatible punctured turbo-coded ARQ scheme in optical wireless communication based on analysis of puncturing patterns. Simulations show that the adaptive error control scheme improves the throughput and stability of optical wireless link. Moreover, this paper proposes the rank retransmitting protocol to further improve throughput efficiency under adverse channel conditions according to optical wireless channel characteristic.

Key words: optical wireless communication; turbo code; hybrid ARQ; rank retransmitting

1 引言

无线光通信作为一种新型的通信技术, 可以同时满足通信服务的宽带和可移动性的要求, 系统可以在数小时内安装调试, 实现快捷的通信建设, 并且系统无需频率申请, 同时由于采用激光进行通信, 很容易实现宽带传输, 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, 并且已经成功的应用于悉尼 2000 年奥运会的通信网系统. 无线光通信对中国也十分重要, 中国城市的楼群和道路密集, 铺设光纤造价太高, 而电缆或无线通信又无法满足高速宽带接入的要求, 所以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. 由于大气无线光信道的不稳定, 为了保证系统的可靠性, 必须设计一定的功率裕量, 但是无线光通信是功率受限系统, 所以有必要在系统中加入新的技术来保证系统的稳定性, 如: 差错控制等技术. 关于无线光通信系统中差错控制技术, 1988 年 Frederic M Davidson 和 Yutai T Koh 分析了基于交织卷

积码的无线光通信系统性能^[1]. 本文建议结合 Turbo 码和混合 ARQ 技术来进行无线光通信系统的自适应差错控制. 在基于 Turbo 码的混合 ARQ 方案中, (rate compatible punctured Turbo codes) RCPT/ARQ 机制的研究较多, 性能也最好. 目前, RCPT/ARQ 研究的主要领域是在移动通信和无线通信中, 文献[2]分别研究了 RCPT/ARQ 机制在无线通信不同信道下的特性和设计方法, 而对于 RCPT/ARQ 在无线光通信系统中的方案研究和性能分析还未见报道. 本文首先分析无线光信道的特性, 并给出无线光信道下 Turbo 码迭代译码算法, 在此基础上首次提出了无线光通信系统 RCPT/ARQ 自适应差错控制方案, 分析了 RCPT 码在无线光信道下的穿孔图案特性, 并通过仿真得到了 RCPT/ARQ 机制在无线光信道下的性能, 相比于传统混合 ARQ 机制系统性能有了较大的提高. 结合无线光信道的特性, 本文进一步提出了 RCPT/ARQ 机制下的排序重发策略, 增强了恶劣信道条件下 RCPT/ARQ 机制的纠错能力, 从而进一步优化链路的吞吐量.

收稿日期: 2003-01-13; 修回日期: 2003-10-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60077019-60240420237)

2 信道模型与译码算法

2.1 无线光信道模型

大气无线光通信是激光穿过大气进行通信,由于激光光束在接收端会形成一个较大半径的光斑,所以带来了一定的自由空间衰减,发射和接收望远镜之间的瞄准偏差也会带来系统的衰减,雨、雾等空气介质对激光传输将产生功率衰减,同时无线光信道中还存在着光强闪烁效应,它是一个快速变化的信号强度起伏过程,所以对于无线光通信系统设计要留有充足的功率裕量才可以保证系统的全天候工作^[3]. 下面我们首先分析存在光强闪烁效应的大气无线光信道模型.

假设系统采用 APD 为探测器,在接收机热噪声不可忽略的情况下,光电计数近似服从高斯分布^[4]:

$$\begin{aligned} M_1(I) &= g \cdot e \cdot (Ks(I) + Kb) \\ M_0 &= g \cdot e \cdot Kb \\ \sigma_1^2(I) &= g^2 F \cdot e^2 \cdot (Ks(I) + Kb) + \frac{2}{n} \\ \sigma_0^2 &= (g \cdot e)^2 F \cdot Kb + \frac{2}{n} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 M_0 、 σ_0 、 M_1 、 σ_1 分别表示“0”信号和“1”信号的均值和均方差, F 为附加噪声因子, $\frac{2}{n}$ 为热噪声计数方差, Ks 、 Kb 分别为接收机的信号光与背景光的比特光子计数均值. 同时无线光通信中由于还存在着光强闪烁,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,闪烁值是接收孔径内的一个统计平均值,因而是一个下降了闪烁值,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^[5].

2.2 译码算法

由于 Turbo 码的特殊译码结构及无线光信道的特性,所以无线光通信下的 Turbo 码译码算法不能从无线电通信中直接移植过来,要进行算法的修正才可以用于无线光通信系统. 在文献[6]中,作者给出了泊松光信道下的 Turbo 码译码算法,而本文是在高斯近似光信道的假设下,所以必须进行新的 Turbo 码译码修正才可以应用于无线光通信系统. 在 Turbo 码的译码算法中,最主要的参数是: $i_k(m)$, $k(m)$, $i(R_k, m, m)$ 及外信息 W_k , 其中 m 表示编码器的状态, m 表示 m 的前一状态, R_k 表示接收到的第 k 比特的信息.

如果采用 log-BCJR 算法,则从 log-BCJR 算法^[7]我们可以得到:

$$(d_k) = \log \frac{\prod_{m, j=0}^{m, j=0} i(R_k, m, m) \cdot i_{k-1}(m) \cdot k(m)}{\prod_{m, j=0}^{m, j=0} o(R_k, m, m) \cdot i_{k-1}(m) \cdot k(m)} \quad (2)$$

在这些参数中 $i_k(m)$, $k(m)$ 又是基于 $i(R_k, m, m)$ 来进行前向递推和后向递推运算,然而 $i(R_k, m, m)$ 值与信道模型密切相关,要有正确的信道特性参数才可以进行 $i(R_k, m, m)$ 的计算,同时外信息量 W_k 也与信道模型有关. 所以我们必须针对高斯光信道的模型进行 $i(R_k, m, m)$ 和 W_k 算法的修正.

从 Turbo 码译码算法我们可知:

$i(R_k, m, m) = Pr\{R_k | x_k\} \cdot Pr\{d_k = i, S_k = m | S_{k-1} = m\}$ (3)
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,在高斯光信道下,我们可以得到前一项为:

$$\begin{aligned} Pr\{R_k | x_k\} &= Pr\{y_{k,i} | x_{k,i}\} \cdot Pr\{y_{k,p} | x_{k,p}\} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{k,i}} \exp\left(-\frac{(y_{k,i} - x_{k,i})^2}{2\sigma_{k,i}^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{k,p}} \\ &\quad \exp\left(-\frac{(y_{k,p} - x_{k,p})^2}{2\sigma_{k,p}^2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

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. 如果进一步在对数域上计算可得到:

$$\begin{aligned} \ln\{Pr\{R_k | x_k\}\} &= -\ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{k,i}}\right) - \frac{(y_{k,i} - x_{k,i})^2}{2\sigma_{k,i}^2} \\ &\quad - \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{k,p}}\right) - \frac{(y_{k,p} - x_{k,p})^2}{2\sigma_{k,p}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$\sigma_{k,i}$, $\sigma_{k,p}$ 分别为信息比特和校验比特的均方差,需要注意在无线光通信中,因为噪声与信号并不是独立的, $\sigma_{k,i}$, $\sigma_{k,p}$ 并不相等. 在修正了 $i(R_k, m, m)$ 之后,以同样的方法修正外信息 W_k 的算法.

3 RCPT/ ARQ 差错控制机制

RCPT 码是由基本的 Turbo 码经过周期性的穿孔之后得到的^[8],由于是周期性的穿孔,假设穿孔周期为 P ,则编码比特可以用一个 $3 \times P$ 的矩阵来表示穿孔操作,我们称这种穿孔矩阵为穿孔图案. 例如对于穿孔周期 $P=2$ 的穿孔方案,可以形成以下 $\{1, 2/3, 1/2, 2/5, 1/3\}$ 等不同码率的穿孔图案,如下所示:

$$\begin{array}{cccccc} \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline 0 & 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline 1 & 1 \\ \hline \end{array} \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{信息比特} \\ \text{—— 校验比特 1} \\ \text{—— 校验比特 2} \end{array}$$

穿孔图案中的“1”代表未被穿孔的比特位置,“0”代表被穿孔的比特位置. RCPT 码的传输码率可以表示为:

$$R_l = \frac{P}{P+l}, \quad (l=0, 1, \dots, 2P) \quad (6)$$

其中 P 为穿孔周期,参数 l 为穿孔因子,其实质上是代表了 $1/3$ Turbo 码中未被穿孔的校验比特数目.

RCPT/ ARQ 机制是将 RCPT 码与混合 ARQ 结合起来形成的自适应差错控制方案. RCPT/ ARQ 协议如下:

(1) 输入信息比特并按照 Turbo 码的编码方式进行 $1/3$ 编码,存储所有编码器产生的信息比特和校验比特;(2) 首先只发送信息比特,在接收端对接收到的比特进行迭代译码,如果译码后结果判断正确,则发送 ACK 信号,如果译码结果中存在误码则发送 NAK 信号给发射机;(3) 发射机如果收到 ACK 信号,则清除该帧的存储空间,如果收到 NAK 信号,则按照递增冗余的方式分批发送附加校验比特,接收机每一次都将附加发送的校验比特和原有的接收比特进行码组合,并进行迭代译码,如果译码正确则发送 ACK,如果译码结果中仍然存在误码,则发送 NAK;(4) 当发射机将所有的冗余比特都发送完,仍然收到 NAK 信号,则重复第 2 步直到译码正确.

RCPT 机制的重要原则就是在高码率穿孔码中的所有比特必须兼容在低码率的穿孔码中,这样才能按照递增冗余的方式进行反馈重发,通过 ARQ 协议来实现自适应差错控制.无线光信道因为光强闪烁和大气衰减,信道传输性能起伏不定,应用 RCPT/ARQ 机制则可以自适应的根据无线光信道状况调节传输码率,以避免冗余过度,从而提高信道的吞吐量,同时当 1/3 Turbo 码也不能保证数据传输质量的情况下,则 RCPT/ARQ 可以通过反馈重发机制来克服光强闪烁等因素引起的光信号深度衰落,从而保证通信系统的传输质量.下面我们分析无线光信道下 RCPT/ARQ 机制的特性,并进一步提出优化方案.

4 分析与仿真

4.1 穿孔图案的分析与选择

RCPT/ARQ 机制必须满足码率兼容原则,所以对于 RCPT 码穿孔图案的特性分析就十分关键.因为 Turbo 码中包含着一个交织器,交织器的不同对穿孔图案的特性影响很大,所以目前还没有统一的穿孔图案选取原则,本文采取系统仿真的方式来选取穿孔图案.为了分析 RCPT 穿孔图案的性能,我们分别对两路校验比特序列进行对称穿孔和非对称穿孔及非系统穿孔,各种穿孔图案见下图.设置穿孔周期为 4,码率分别为 2/3、1/2 和 2/5 三种情况.

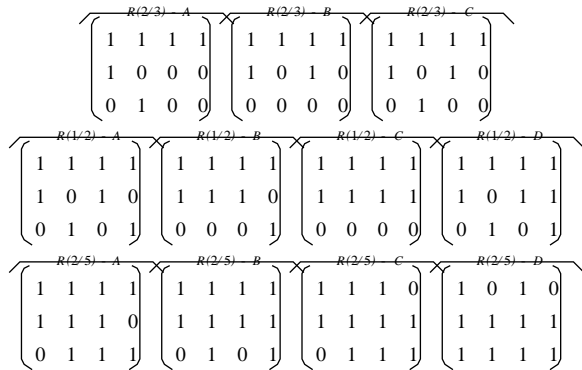


图 1 不同码率下的穿孔图案

无线光通信仿真系统采用 OOK 的光信号调制方式,光强闪烁频谱在 100Hz 内,闪烁指数 $\alpha = 0.25$,背景光噪声计数 $Kb = 50$,采用 1/3 码率 Turbo 码编码器,生成多项式为 $g(31, 33)_{octal}$,交织器采用伪随机交织器,交织深度为 500 比特,译码算法采用 log-BCJR 译码算法,最大迭代次数为 6 次.通过系统仿真,各种穿孔图案下的误帧率性能如图 2 所示.

从图 2 的结果中,可以看出在码率为 2/5 的四种穿孔图案中,系统穿孔和非系统穿孔的性能较为接近,系统穿孔图案 $R(2/5)-B$ 略好于其它的穿孔图案.在码率为 1/2 的四种方案中,系统对称穿孔图案 $R(1/2)-A$ 的性能最佳,其中非对称穿孔图案 $R(1/2)-C$ 的误帧率性能最差,同样在码率 2/3 的各种方案中,也是非对称穿孔 $R(2/3)-B$ 的性能最差,这可能是由于 Turbo 码的非对称穿孔降低了两个分量译码器之间的迭代作用.根据仿真的结果我们可以选用 $R(2/3)-A$ 、 $R(1/2)-A$ 和 $R(2/5)-B$ 作为 RCPT/ARQ 机制相应码率下的穿孔图案.

4.2 RCPT/ARQ 机制的性能分析

在分析和选择了穿孔图案的基础上,按照选择重发 ARQ 的协议,本文进行了无线光通信下 RCPT/ARQ 性能的仿真.

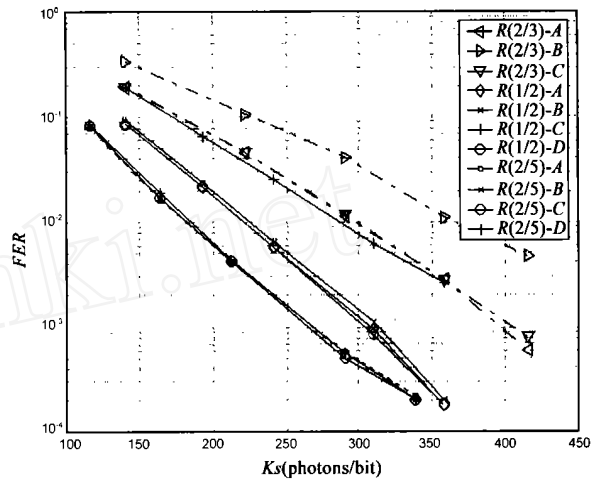


图 2 各种穿孔图案的误帧率

图 3 给出了无线光通信下 RCPT/ARQ 机制的链路吞吐量,同时为了比较,图 3 也给出了传统混合 ARQ 的链路吞吐量性能曲线,与 RCPT/ARQ 不同的是传统混合 ARQ 采用固定编码码率

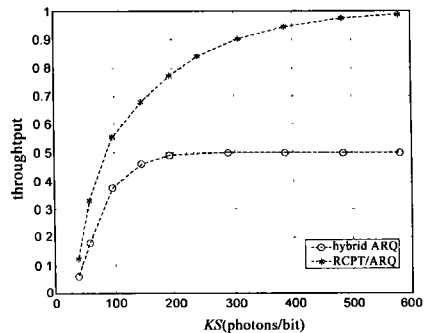


图 3 无线光通信 RCPT/ARQ 差错控制机制的性能

为 1/2 的 Turbo 码.从图 3 中可以看出,在高 K_s 值时 RCPT/ARQ 机制的链路吞吐量逐渐收敛于 1,而传统混合 ARQ 由于采用固定码率的 Turbo 码,只能收敛于其固定码率 1/2.链路的吞吐量随着 K_s 的减小而降低,但是 RCPT/ARQ 机制的性能始终优于传统混合 ARQ 的性能,这说明 RCPT/ARQ 自适应差错控制机制可以在很大范围内适应传输信道的变化,实现自适应差错控制,从而提高系统性能.

4.3 排序重发策略下的 RCPT/ARQ

RCPT/ARQ 机制一般采用递增冗余方式来进行自适应差错控制,当发送完一个整码之后就重复发送操作,发送控制流程不变.根据文献[9]提出的基于可靠性的混合 ARQ 协议,结合 RCPT/ARQ 机制,本文在无线光信道下提出了基于 K_s 可靠性进行排序重发的策略,这是针对无线光信道的特点提出的.RCPT/ARQ 机制是将整码分成几组进行分组发送,根据上述的无线光通信信道特性,即光强闪烁频率远小于通信码率,所以可以近似认为每一次发送的同一组比特的 K_s 值基本不变,也就是无论信息比特或者校验比特,每一组比特都对应着一个近似的 K_s .在排序重发策略中,当接收机收到一个整码之后,对整码中分组接收到的每一组比特进行 K_s 估计,根据

K_s 估计值进行可靠性排序,将 K_s 值最小的那一组比特确定为最不可靠的数据,并将组号和 NAK 信号一起传送给发射机,让发射机重传最不可靠的一组比特。相比于文[9]中的逐比特操作,本方案也大大减小了反馈链路的开销。

排序重发策略下的 RCPT/ARQ 具体协议如下:(1)输入信息比特并按照 Turbo 码的编码方式进行 1/3 编码,存储所有的信息比特和校验比特;(2)首先发送信息比特,在接收端对接收到的比特进行迭代译码,如果译码后结果判断正确,则发送 ACK 信号,如果译码结果中存在误码则发送 NAK 信号给发射机;(3)发射机如果收到 ACK 信号,则清除该帧的存储空间,如果收到 NAK 信号,则按照递增冗余的方式分组发送附加比特,接收机每一次都进行码组合,如果译码正确则发送 ACK,如果译码结果中仍然存在误码,则发送 NAK;(4)当发射机发送一个整码之后,仍然收到 NAK 信号,则将启动排序重发策略,在接收端进行各组比特的 K_s 排序,将 K_s 估计值最小的一组比特确定为最不可靠比特,并将组号反馈给发射机;(5)发射机收到最不可靠的比特组号后,重新发送最不可靠的一组比特,接收机收到重新发送的比特后,进行 RCPT 码组合并译码,如果接收机译码正确,则该帧传输结束,如果发射机仍然收到 NAK 信号,则重复第 4 步排序重发过程,直到译码正确。

图 4 给出了排序重发策略下的 RCPT/ARQ 机制的链路吞吐量性能曲线,因为排序重发策略只是应用于接收机接收到一个完整 Turbo 码之后,所以排序重发策略主要针对信道恶劣和系统低吞吐

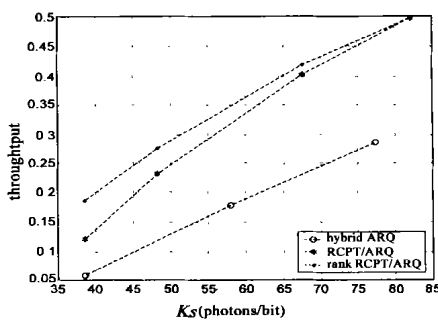


图 4 无线光通信 RCPT/ARQ 机制下排序重发策略的性能

量的情况。图 4 还给出了未采用排序重发策略的 RCPT/ARQ 机制和传统混合 ARQ 的链路吞吐量,从三者的比较中可以看出,排序重发策略可以很好的改善无线光通信在恶劣信道下的链路吞吐量,并且随着 K_s 的减小,改善作用越显著。在 $K_s = 39$ 时,排序重发策略将链路的吞吐量从 0.120 提高到 0.187,链路的吞吐量提高了 55.8%,而相对于传统混合 ARQ,链路的吞吐量则提高了 216.9%。链路系统吞吐量的提高说明了对于发送同样的信息数据需要更少的冗余校验比特,即需要更少的重发次数,这也将降低数据传输的平均延迟,提高无线光通信系统的通信质量。由于排序重发策略提高了恶劣信道条件下 RCPT/ARQ 机制的性能,这为功率受限的无线光通信系统设计提供了更大的设计空间,并且对于系统的广泛推广和应用提供了更稳定的保障。

5 结论

本文在分析了 RCPT 码的穿孔图案特性的基础上,通过仿真分析了 RCPT/ARQ 自适应差错控制机制在无线光通信系统中的性能,结果表明 RCPT/ARQ 自适应差错控制机制能够很好的适应无线光信道变化和进行自适应地差错控制,并显著提高了链路的吞吐量和稳定性。同时本文根据无线光信道特性,进一步提出了排序重发策略来优化 RCPT/ARQ 机制在恶劣信道条件下的链路吞吐量。

参考文献:

- [1] Frederic M Davidson, Yutai T Kón. Interleaved convolutional coding for the turbulent atmospheric optical communication channel [J]. IEEE Trans Commun, 1988, 36(9): 993 - 1003.
- [2] Tingfang Ji, Wayne E Stark. Turbo-coded ARQ schemes for DS-CDMA data networks over fading and shadowing channels: throughput, delay, and energy efficiency [J]. IEEE journal on selected areas in communication, 2000, 18(8): 1355 - 1364.
- [3] P R Barbier, D W Rush, et al. Characterization of optical wireless link performance [A]. SPIE: Optical wireless communications [C]. Boston, Massachusetts, USA, 1998, 3532: 41 - 48.
- [4] Robert M Gagliardi, Sherman Karp. 光通信技术与应用 [M]. 陈根祥, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [5] 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.
- [6] Shu-ming Tseng, Shiauhe Tsai. Performance of parallel concatenated convolutional coded on-off keying communication systems [J]. IEEE Photonics technology letters, 1999, 11(6): 721 - 723.
- [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]. Seattle, WA, USA, 1995. 1009 - 1013.
- [8] A S Barbulescu, S S Pietrobon. Rate compatible turbo codes [J]. Electronics letters, 1995, 31(7): 535 - 536.
- [9] J M Shea. Reliability-based hybrid ARQ [J]. Electronics letters, 2002, 38(13): 644 - 645.

作者简介:

谢伟良 男, 1974 年出生于福建省柘荣县, 1997 年和 2000 年在南开大学分别获得学士和硕士学位, 现为北京大学电子学系博士研究生, 目前主要研究方向为 Turbo 码、自适应差错控制与无线光通信。E-mail: nk_xiewl@sina.com.

汤俊雄 男, 1941 年 1 月出生于四川绵阳, 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室负责人, 感兴趣的研究方向为卫星激光通信, 无线光通信等。