

AWGN 信道下 Turbo 码误比特率模型^{*})

冯 镛 刘文予 朱光喜 马 展

(华中科技大学 武汉光电国家实验室 武汉 430074)

摘 要 本文研究信道编解码及信道特征对误比特率性能的影响。在实验基础上,通过曲线拟合等数学工具,得到加性高斯白噪声信道条件下,信道编码采用 Turbo 码、通信系统端到端的误比特率经验模型。通过该模型,可以在发送端预测出在一定信道条件及系统参数设置下接收端的误比特率。实验表明,该模型具有极高的精度,平均误差在 3% 左右。该模型可以应用在信源信道联合编码及端到端的率失真优化中。

关键词 Turbo 码,经验模型,曲线拟合,误比特率

A BER Model for Turbo Code on AWGN Channel

FENG Bin LIU Wen-Yu ZHU Guang-Xi MA Zhan

(Wuhan Optical-Electronic National Laboratory, Huazhong Univ. of Sci. & Tech. Wuhan 430074)

Abstract Bit error rate(BER) characteristics is researched in this paper under the influence caused by the channel codes and channel statistic. Using mathematic tool such as curve fitting etc., an empirical model on BER is derived on the basis of extensive experiments. The channel model used is AWGN channel. Turbo codes are used as channel codes. Given certain channel statistic and parameter set, the BER in receiver end can be estimated in sender end using this model. Extensive experimental results demonstrate that this model bears high accuracy, whose average error is around 3%, thus can be used in joint source-channel coding and end-to-end rate-distortion optimization.

Keywords Turbo codes, Empirical model, Curve fitting, BER

1 引言

自从 1993 年 C. Berrou 等人提出 Turbo 码以来^[1], Turbo 码凭借其逼近 Shannon 限的优异性能得到了学术界的广泛重视,成为信道编码领域新的研究热点。Turbo 码满足 Shannon 定理中随机编译码的条件,并利用了迭代译码算法,这使得它不仅能够抵抗恶劣的噪声环境,而且具有很强的抗干扰和衰落的能力,因此在无线通信系统中有很大的应用潜力。从第三代移动通信系统候选方案来看,普遍要求提供中速或者高速的数据业务,比较第二代移动通信中的级联 RS 加卷积码, Turbo 码性能可提高 1dB 以上。在 IMT-2000 多种方

案中,已经将 Turbo 码作为传输高速数据的信道编码标准之一^[2,3]。因此,研究 Turbo 码在无线通信中的应用是有实用价值的^[4]。

但是,由于 Turbo 码的理论尚不完善,特别是由于编码器中交织器的存在,使得对 Turbo 码的性能进行数学分析显得非常困难,国内外在这方面的研究成果也少见报道。有很多学者致力于 Turbo 码误比特率上限的研究,但是这种上限仅在高信道信噪比条件下与实际性能相接近。例如,Barbulescu 等人的研究表明,对于码率为 1/3 的 Turbo 码,信噪比门限为 2.03dB;当信道信噪比低于这个门限时,性能上限与 Turbo 码实际性能之间存在相当大的差距^[5]。而且,上限

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目——无线信道下的信道广义率失真模型研究(No. 60372067)、国家 863 资助项目——数字视音频编码、传输、测试于应用示范系统(No. 2002AA119010)。冯 镛 博士研究生,主要研究方向为多媒体通信;刘文予 教授,博士生导师,主要研究方向为多媒体通信、计算机视觉;朱光喜 教授,博士生导师,主要研究方向为多媒体通信与计算机图像图形处理;马 展 硕士研究生,主要研究方向为信源信道联合编码。

- Multimedia Modelling Conference, MMM 2005, Melbourne, Australia, 2005. 322~327
- 3 Wang F, et al. A Generic Framework for Semantic Sports Video Analysis Using Dynamic Bayesian Networks [C]. In: Proceedings of the 11th International Multimedia Modelling Conference, Melbourne, Australia, 2005. 115~122
 - 4 ISO/IEC JTC1/SC29/WG11. Int'l Organization for Standardisation, Overview of the MPEG-7 Standard [S]. 2000
 - 5 边肇祺, 张学工, 等. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
 - 6 卢力, 田金文, 柳健. 统计模式识别研究进展. <http://www.cioworld.net/cgi-new/violethtml/2/2004-04-24/20040424165850.html>, 2005
 - 7 Thomaz C, D G, Q F. A New Covariance Estimate for Bayesian Classifiers in Biometric Recognition [J]. IEEE Trans. on circuits and Systems for video technology, 2004, 14(2): 214~223
 - 8 Pazzani J M. An iterative improvement approach for the discretization of numeric attributes in Bayesian classifiers [C]. In: Int'l Knowledge discovery and mining, Montreal, Canada, 1995. 228~233
 - 9 Mittal A L-F C. Addressing the problems of Bayesian network classification of video using high-dimensional features [J]. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(2): 230~244
 - 10 What are cross-validation and bootstrapping. <http://www.faqs.org/faqs/ai-faq/neural-nets/part3/section-12.html>
 - 11 Elisseeff A. Leave-one-out error and stability of learning algorithms with applications. <http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/M.Pontil/reading/natoasi.pdf>, 2005

毕竟不能代替真实误比特率,所以并不能用这种上限来预测 Turbo 码误比特率。因此,需要一个简单精确的数学模型,来反映 Turbo 码的误比特率性能。

本文在大量实验数据的基础上,通过曲线拟合等数学工具,得到在加性高斯白噪声(AWGN)信道条件下端到端的误比特率模型。实验证明,该模型简单实用,具有极高的精度。第2节介绍仿真系统结构;第3节重点介绍该模型的推导过程;第4节通过实验数据验证了模型的正确性;最后对全文进行总结及后续工作的展望。

2 仿真系统结构

影响无线信道传输失真的因素很多。信道特征(衰落、多径等特性)、信道编码方式及其保护粒度都会对无线数据传输的失真产生影响,并且它们之间互相融合、相互影响,使得信道失真模型非常复杂。为了突出影响传输失真的主要因素,在本文的模型中,仅考虑信道特性及信道编码对失真的影响。仿真系统结构如图1所示。

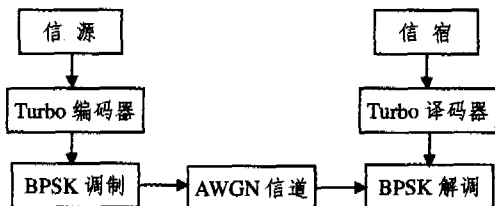


图1 Turbo码仿真系统框图

这里信源采用随机信息序列; Turbo 编码器由两个相同的分量编码器通过交织器并行级联而成,分量编码器采用码率为 1/2 的(13,15)递归系统卷积码(RSC),交织器为伪随机交织器。经过 Turbo 编码后得到的序列经过 BPSK 调制后,通过加性高斯白噪声(AWGN)信道,在接收端收到的序列经过相关解调后送入 Turbo 译码器。译码器采用 MAP 译码算法,译码结果输出到信宿。比较信源处和信宿处的数据序列,计算残留误比特率 BER。

在图1的各模块中,影响残留误比特率 BER 的参数有4个: Turbo 码编码器模块中的交织器长度、编码码率、AWGN 信道模块中的信噪比、 Turbo 码解码器中的迭代次数。我们将研究这4个参数对 Turbo 码 BER 的影响。

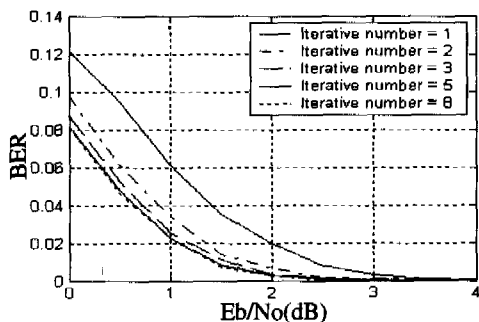


图2 迭代次数对 Turbo 码性能的影响

通过大量的实验,我们得到迭代译码次数和编码码率对 Turbo 码性能的影响。图2表示的是迭代译码次数对 Turbo 码误比特率的影响,其中 E_b 是每比特的信号能量, N_0 是高斯噪声的单边功率谱密度。从图中可以看出,误比特率随迭代次数的增加而明显下降。但是,迭代次数越大,译码复杂度与时延也越大。所以在实际应用中,要折衷选择迭代次数,以兼顾性能与复杂度。在本文下面的分析与预测模型的推导

中,都是针对迭代次数为8的情况。这个假设符合实际应用的条件,且并不影响问题的本质。

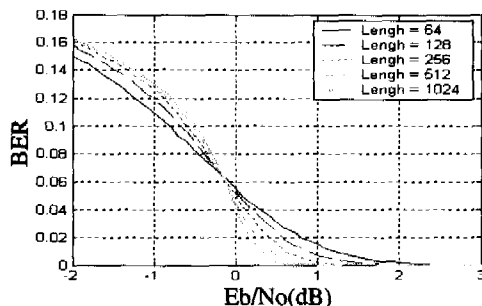


图3 不同交织长度时的 Turbo 码性能

图3表示编码码率为 1/3 时,在5种不同的交织长度下,误比特率随 AWGN 信道信噪比变化的曲线。文[6]指出, Turbo 码的性能随着交织器长度的增加而提高,但每个信息比特的译码复杂性却不随交织长度的改变而改变。正是这个原因使得 Turbo 码,特别是在大的帧长条件下,是一种强有力的编码工具。从图中可以看出,并不是在所有情况下大的交织长度都比小的交织长度具有更好的性能。当信道状况比较恶劣时(例如 $E_b/N_0 < 0$), Turbo 码性能反而随着交织长度的增加而降低;只有当信道信噪比大于某个门限时,大的交织长度的优势才能体现出来。这是因为 Turbo 码采用迭代译码算法,这使得每个码元译码时都可以用到序列中几乎所有码元的信息。当信道状况比较恶劣时,序列中错误码元的概率较大,这时候交织器长度越长,迭代译码过程中用到错误码元的概率就越大,造成译码后序列的误比特率更大;而只有在信道状况较好时,交织长度越长,迭代译码才能够利用更多的正确码元,使译码后序列的误比特率更小。

本文在 C 语言环境下实现图1的仿真系统,针对编码码率分别为 1/2 和 1/3 时,交织长度分别等于 64,128,256,512,1024 的情况进行了仿真。随机序列长度为 1M bits,信道信噪比变化范围从 -2dB 到 +6dB。其中,在 -2dB 到 +2dB 范围内,由于误比特率变化比较剧烈,因此选择 0.1dB 较小的信噪比变化步长;在 +2dB 到 +6dB 范围内,由于误比特率变化比较缓慢,因此选择信噪比步长为 0.5dB。信道噪声均值为 0,方差为 1。考虑到 AWGN 信道噪声的随机性,实测结果均是 10 次测试的平均值。下面将利用仿真实验得到的数据,归纳出误比特率预测模型。

3 误比特率预测模型

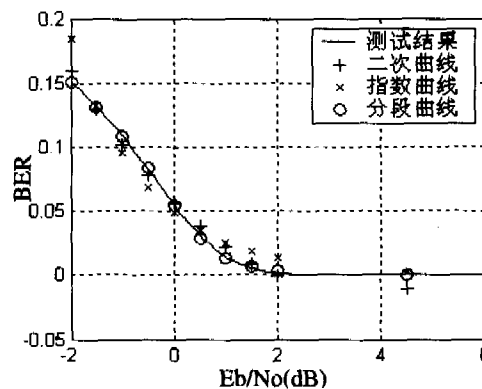


图4 不同拟合方法对比

对于图3中的每一条曲线而言,误比特率随信噪比增大

而减小的趋势类似于二次曲线。以码率为 1/3、交织长度为 64 的曲线为对象,分别采用二次曲线、指数曲线以及结合二次曲线和指数曲线的分段函数进行拟合,效果如图 4 所示。

这里,分段曲线是以 $E_b/N_0=0\text{dB}$ 为界,这是因为由图 3 观察发现曲线族在 0dB 附近有一个交点,且在交点两侧,曲线的趋势不同;当 $E_b/N_0 < 0$ 时,误比特率随信噪比的增加而快速降低,类似于开口向下的二次曲线;当 $E_b/N_0 > 0$ 时,误比特率随信噪比增加而缓慢降低,类似于负指数曲线。

为了定量比较 3 种曲线拟合的精度,定义平均误差如下:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N |m(i) - p(i)|}{\sum_{i=1}^N m(i)} \quad (1)$$

其中 $m(i)$ 为实测的 BER 序列, $p(i)$ 为曲线拟合得到的结果, N 表示序列长度。由公式(1)计算 3 种曲线拟合的平均误差如表 1 所示。

表 1 三种曲线拟合的平均误差

	二次曲线	指数曲线	分段曲线
平均误差 δ	10.80%	18.33%	1.65%

从表 1 的结果中可知,结合二次曲线和指数曲线的分段函数的误差比另外两种要低一个数量级左右,所以对于码率为 1/3、交织器长度为 64 的曲线,可以用下式进行拟合:

$$BER(P) = \begin{cases} a * P^2 + b * P + c, & P < 0 \\ \exp(d * P + e), & P \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

表 2 不同交织器长度下的拟合系数

Length	a	b	c	d	e	δ
64	-0.0098	-0.0923	0.0811	-1.46	-2.42	1.65%
128	-0.0234	-0.1266	0.0752	-2.01	-2.41	1.41%
256	-0.0314	-0.1449	0.0744	-2.77	-2.50	1.46%
512	-0.0358	-0.1535	0.0755	-3.83	-2.57	1.80%
1024	-0.0374	-0.1555	0.0779	-4.87	-2.79	2.62%

其中 p 表示无线信道信噪比; a, b, c, d, e 为待定拟合系数,可以通过实验确定。实验得到当交织长度为某些特定数值时,

表 3 Rate = 1/3 时的拟合系数

Rate	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2	d_1	d_2	e_1	e_2
1/3	-0.0068	0.0265	-0.0153	-0.0119	-0.0006	0.0817	-0.8640	3.9240	-0.0900	-1.8180

表 4 Rate = 1/2 时的拟合系数

Rate	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2	d_1	d_2	e_1	e_2
1/2	0.0000	-0.0093	0.0021	-0.0808	0.0066	0.0593	-0.2530	0.4300	0.0950	-2.7860

4 模型检验结果

为了检测公式(3)给出的误比特率预测模型的准确度,做以下的对比实验:利用本文第 2 节给出的实验环境,选取不同的 Turbo 码编解码率和不同的交织长度,在不同的信噪比条件下得到实测数据;同时将对应的参数代入公式(3)中,得到模型预测数据。

表 5 不同码率与交织长度下的平均误差 δ

Length	64	128	256	512	1024	Average
Rate = 1/3	4.76%	2.64%	3.13%	2.17%	2.78%	3.096%
Rate = 1/2	3.18%	3.36%	4.17%	3.87%	4.32%	3.780%

拟合系数 a, b, c, d, e 的取值如表 2 所示。

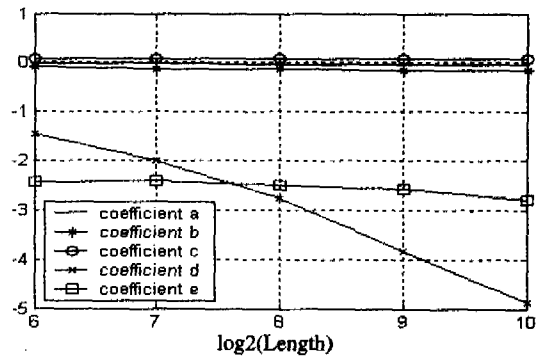


图 5 系数随交织器长度变化关系

为了适应任何长度的交织器,需要确定各个拟合系数和交织长度之间的关系。通过实验,我们发现各系数与交织器长度的对数呈线性关系,以 $\log_2(\text{length})$ 为变量,得到如图 5 的拟合系数随 $\log_2(\text{length})$ 变化的关系曲线。

从图 5 中可以看出,各系数和交织器长度的对数之间,大致呈一种线性的关系。因此公式(2)可以改写为:

$$BER(l, P) = \begin{cases} [a_1 \log_2(l) + a_2] \cdot P^2 + [b_1 \log_2(l) + b_2] \cdot P + [c_1 \log_2(l) + c_2], & P < 0 \\ \exp\{[d_1 \log_2(l) + d_2] \cdot P + [e_1 \log_2(l) + e_2]\}, & P \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中的 l 表示交织长度,其他各系数如表 3 所示。

同样,当采用 1/2 Turbo 码时,可以得到如表 4 的系数结果。

公式(3)是一个基于仿真数据得到的经验模型,并未经过严格的理论推导。这是由于 Turbo 码的理论并不完善,进行纯粹的数学推导非常困难。因此,本文重点关注 Turbo 码传输系统的输入以及输出,而并不要求一个完整的理论描述。基于这样一个研究目的,本文给出的这样一个经验模型是简单并且实用的。

图 6 给出了 4 种不同码率和交织长度的情况下实测数据与模型预测数据之间的比较结果,表 5 给出了 10 种情况下模型预测按公式(1)计算平均误差 δ 的结果。

从图 6 及表 5 可以看出,该预测模型是精确有效的。假设在系统发送端,可以通过某种信道监测手段掌握信道当前状况,得到诸如信噪比之类的统计数据。结合公式(3)和表 3、表 4,就可以计算出在一种码率及交织器长度下接收端的误比特率,通过选择合适的码率以及交织器长度,可以使得接收端误比特率满足系统的要求。

结论 本文提出了 AWGN 信道条件下 Turbo 码传输系统的端到端误比特率预测模型。该模型考虑了信道编解码及信道状况对系统误比特率的影响,利用在发送端存储的少量

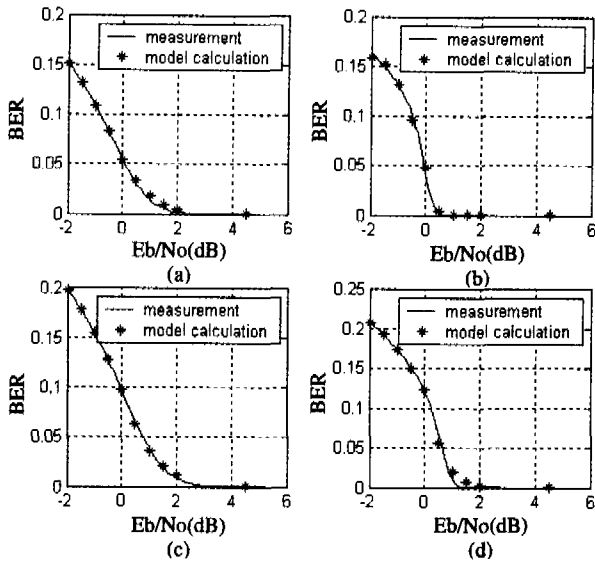


图6 模型预测结果与实测数据比较

(a) rate = 1/3, length = 64; (b) rate = 1/3, length = 1024;
(c) rate = 1/2, length = 64; (d) rate = 1/2, length = 1024

模型参数,通过简单的计算,可以预测出在一定码率、交织长度及信道信噪比条件下系统的误比特率。实验证明,该模型可以精确地与实测结果相吻合。利用该模型,可以在发送端“掌握”原本只能在解码端得到的误比特率,从而可以指导信

源信道联合编码中的码率分配并应用在端到端的率失真优化中。

如何在不过多增加模型复杂度的基础上考虑更多的参数的影响,以及如何将模型延伸到信源编解码部分,是需要进一步研究的方向;其次,尽管该模型是简单并且有效的,但是仍然需要从理论上推导出一个具有类似复杂度且精确实用的模型,并给出理论上的解释。

参考文献

- 1 Berrou C, Glavieux A, Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding; Turbo-Codes. In: Proc. ICC'93, Geneva, Switzerland, 1993(5):1064~1070
- 2 GPP2 C. S0002-A Version 55: Physical layer Standard for cdma2000 Spread Spectrum Systems Release A, 1999. 12
- 3 TS25. 212 V2. 2. 0 (1999-09) 3GPP; Technical Specification Group; Radio Access Network
- 4 Ma X F, Lynch, W E. Iterative joint source-channel decoding using turbo codes for MPEG-4 video transmission. Acoustics, Speech, and Signal Processing, Proceedings (ICASSP '04), IEEE International Conference on, 2004, 4:657~660
- 5 刘东华. Turbo码原理与应用技术. 北京:电子工业出版社,2003
- 6 Benedetto S, Montorsi G. Unveiling Turbo-codes; Some results on parallel concatenated coding schemes. IEEE Transactions on Information Theory, 1996, 42(2): 409~429

(上接第91页)

开始支持 DKIM,通过 Sendmail Milter(mail filter APD)实现,安装 Milter 之前,系统必须安装 OpenSSL 库文件,在域名服务器中修改 DNS 记录,并安装有 Sendmail 8.13 版本以上的服务程序,下面介绍在 Sendmail 中 DKIM 的具体配置和实现。

①安装 DKIM Milter

- 在 Sendmail.net 上下载 DKIM Milter 源程序并解压
- 按照配置说明编辑 dkim-filter/Makefile.m4 文件
- 改变当前目录为解压文件目录,并执行下列命令: sh Build
- 如果没有任何错误,执行下面的命令安装程序: sh Build install

②生成公有密钥和私有密钥

- 键入以下命令产生私有密钥: openssl genrsa -out rsa.private 768
- 键入以下命令产生公有密钥: openssl rsa -in rsa.private -out rsa.public -pubout -outform PEM
- 移动私有密钥到 domainkeys 目录,并改为相应的名字: mv rsa.private /var/db/domainkeys/mail.key.pem

③生成 DNS TXT 记录

建立一个例如 selector._domainkey.example.com 的 DNS TXT 记录如下:

```
mail._domainkey.example.com. IN TXT "g=; k=rsa; t=y; p = MEwwPQRJKoZIhvcNAQcQADQAwAwOAIx-ANPpYHdE2tevfEvpL1Tk2dDYv0pF28/f5MxU83x/0bsn4R4p7waPaz1lBOGs/6bm5QIDAQAB"
```

p=后面的字串是基于 base64 编码的公有密钥, t=y 表示是测试模式

④启动 DKIM Milter

Milter 程序作为后台程序运行,如果你以超级用户运行 Milter,必须建立一个非特权用户,比如建立一个名称为 DKIM 的用户,使用下面的命令启动 Milter:

```
/usr/bin/dkim-filter -l -p inet;8891@localhost -c nowsp -d example.com -s /var/db/dkim/mail.key.pem -S mail -u dkim -m MSA
```

⑤按照 DKIM Milter 重新配置 sendmail.cf,重建后重新启动 Sendmail

⑥测试 DKIM

为了确定 DKIM 是否配置正确,可以发送邮件到 autoreply+dkim@dk.elandsys.com 进行验证,下面是一个经过签名的邮件头的范例:

```
DKIM-Signature: a=rsa-sha1; c=nowsp; d=example.com; s=mail; t=1121360586; h=Received; Date; Message-Id; From; To; Subject; b=c + whUn73dM6nvFUMLTzCug-4IbskDZtKpv9FFk1DACg9zTADH60 + 2nIyuZCZwlPiL
```

如果配置成功,你可以在你的邮件头中发现下面的信息:

```
Authentication-Results: mail.example.net; dkim=pass
```

结束语 DKIM 作为一种新的反垃圾邮件技术标准,已正式提交 IETF,有望成为行业标准。该标准得到大多数邮件服务厂商的支持,并具有高效、部署容易、成本低等优点,将成为反垃圾邮件的主流技术。

参考文献

- 1 <http://mipassoc.org/dkim/index.html>
- 2 <http://antispam.yahoo.com>
- 3 <http://www.identifiedmail.com/>
- 4 <http://www.sendmail.net/>
- 5 <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-allman-dkim-base-01.txt>
- 6 <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-allman-dkim-ssp-01.txt>
- 7 Reffdom. 反垃圾邮件技术解析. <http://www.xfocus.net/releases/200508/a818.html>
- 8 <http://domainkeys.sourceforge.net/>