

基于 SPW 的 LDPC 码的仿真实现

徐位凯¹, 王琳^{1,2}

(¹厦门大学通信工程系, 厦门 361005; ²重庆邮电学院编码技术研究所, 重庆 400065)



摘要: 在通信系统设计中, 采用先进的仿真工具进行系统建模和仿真, 已经成为复杂系统设计必不可少的环节。SPW 是一个先进的通信系统建模、仿真工具, 它具有非常灵活的自定义模块能力。LDPC 码是近来出现的一种高效纠错编码, 具有比 turbo 码更强的纠错能力。在介绍了 LDPC 码原理的基础上, 将 LDPC 码封装为自定义模块, 并在 SPW 环境中仿真了 LDPC 在 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道下的性能, 得到了预期的结果。

关键词: SPW(Signal Processing Worksystem); LDPC 码; 自定义模块; 系统仿真; 信道编码; 误比特率
文章编号: 1004-731X (2005) 10-2467-03 **中图分类号:** TN911.22 **文献标识码:** A

Simulation Implementation of LDPC Codes Based on Signal Processing Worksystem

XU Wei-kai¹, WANG Lin^{1,2}

(¹Department of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 364005, China;

²Institute of Information and Coding Technology, Chongqing University of Posts and Telecomm, Chongqing 400065, China)

Abstract: In the communication systems designing, it has been an absolutely necessary stage to use advanced simulation tools for modeling and simulating. SPW is an advanced tool for modeling and simulating communication systems, and it has very flexible capacity for user-defined token. LDPC code is an effective error-correct code for these years. Its performance is better than that of turbo codes. User-defined token of LDPC code was designed on the base of introducing the principle of LDPC code, and the performances of LDPC code on AWGN and Rayleigh fading channel in SPW environment were simulated, respectively. The simulation results are expectant.

Key words: spw; ldpc code; user-defined token; system simulation; channel coding; bit error rate (ber)

引言

随着现代通信系统复杂性的增加, 在通信系统设计的整个设计流程中, 系统的建模与仿真越来越具有重要的作用, 成为设计必不可少的一个环节。SPW (Signal Processing Worksystem) 软件包是一个基于模块化的, 可完成通信系统建模, 算法验证的系统仿真工具。SPW 除了具有丰富的基本库、可选库外, 还具有很强的用户接口能力, 用户可以编写自己的 C/C++ 代码, 并封装为具有可控参数的基本模块, 除了基本的编译程序外, 不需要其它的开发工具就可完成用户自定义模块的编写。本文在分析了 LDPC 码编译码算法的基础上, 以 LDPC 码编码器和译码器的实现为例, 说明了 SPW 中自定义模块的编写方法, 并利用 SPW 本身的强大功能, 对 LDPC 在 AWGN 信道和 Rayleigh 衰落信道下的性能进行了仿真, 结果显示了 LDPC 码的优异性。

1 LDPC 码的基本原理

1.1 规则 LDPC 码的定义

LDPC 码是目前最逼近香农限的一类纠错码, 由

Gallager^[1]于 1962 年首先提出, 但由于当时的计算机处理能力的限制, 以及相关理论的不完善, 这种优秀的码型一直沉寂了三十多年。直到 1996 年, D.MacKay 从现代编码理论角度出发, 证明了利用迭代译码的 LDPC 码具有逼近香农限的性能^[2]。而不规则 LDPC 码甚至可以距离香农限只有 0.0045dB^[3]。

在这种传统的码型中, 校验矩阵 H 具有恒定的列重量和行重量, 从校验矩阵的双边图上看变量节点和校验节点的度分别为 j, k , 这种具有恒定行重和列重的 H 的 LDPC 码, 称为规则 LDPC 码。



图 1 (12,3,4) 的 LDPC 码的二部图

1.2 编码

对于规则 LDPC 码, 确定分组长度 n 和度 (j, k) 后, 通过随机选择变量点和校验点之间的连线, 即对校验矩阵 H 随机置 1, 根据矩阵 H 就可以生成一组码群 (ensemble)。因此, LDPC 码在编码时, 需要首先生成满足基本限制的 H, 从而得到相应的生成矩阵 G, 根据生成矩阵就可完成编码。

我们采用 (3,6) LDPC 码, 这是目前性能最好的规则 LDPC 码型^[1], 其码率为 1/2。确定分组长度 n 后, 校验方

收稿日期: 2004-09-07 修回日期: 2005-01-25
基金项目: 国家“863”计划项目(2001AA123061); 国家自然科学基金资助项目(60272005); NCET-04-0601。
作者简介: 徐位凯(1976-), 男, 四川人, 助教, 硕士, 研究方向为宽带无线数字通信系统, 尤其纠错编码; 王琳(1963-), 男, 重庆人, 教授, 博士, 研究方向为宽带无线数字通信系统。

程数 $m=n \cdot r=n/2$ 。首先生成一个 $n \cdot m$ 的全 0 矩阵，再随机置“1”。在 H 的生成过程中，有两个基本的限制：(1)避免出现长为 4 的环；(2)避免变量点连接的校验方程过于集中。

1.3 译码

我们的仿真中，译码方案采用了信度传播算法 (Belief Propagation)，也称作消息传播算法 (Message Passing) [4]。在译码迭代过程中，双边图中变量点和校验点之间的每一条边上都在传送消息。变量点向相连的校验点传送该比特为 0 或 1 的概率，校验点接收该消息，并计算该校验方程满足的概率，并传送给相连的变量点。用 q_{mn}^x 表示除了第 m 个校验方程外，由其它 j-1 个校验得到的第 n 个变量点为 0 或 1 的概率； r_{mn}^x 表示除了第 n 个变量点外，由其它 k-1 个变量点得到的满足第 m 个校验的概率。

BP 算法的译码步骤：

(1) 初始化

将 x_n 的似然值赋给 q_{mn}^1 和 q_{mn}^0 。例如，在加性白色高斯噪声信道 AWGN 下，似然值分别为：

$$p_n^1 = \frac{1}{\left(1 + \exp\left(\frac{-2\alpha y_n}{\sigma^2}\right)\right)}, \quad p_n^0 = 1 - p_n^1$$

(2) 从校验点到变量点

$$r_{mn}^0 = \sum_{x_n: n' \in N(m) \setminus n} \Pr\{\text{满足校验}m|x_n=0, \{x_{n'}: n' \in N(m) \setminus n\}\} \prod_{n' \in N(m) \setminus n} q_{mn'}^{x_{n'}}$$
$$r_{mn}^1 = \sum_{x_n: n' \in N(m) \setminus n} \Pr\{\text{满足校验}m|x_n=1, \{x_{n'}: n' \in N(m) \setminus n\}\} \prod_{n' \in N(m) \setminus n} q_{mn'}^{x_{n'}}$$

以上两式得到：当 x_n 分别为 0 和 1 时，除变量点 n 以外，与校验点 m 相连的其它 k-1 个变量点满足校验 m 的条件概率。

(3) 从变量点到校验点

$$q_{mn}^0 = \alpha_{mn} p_n^0 \prod_{m' \in M(n) \setminus m} r_{m'n}^0$$

$$q_{mn}^1 = \alpha_{mn} p_n^1 \prod_{m' \in M(n) \setminus m} r_{m'n}^1$$

α_{mn} ：归一化参数，使 $q_{mn}^0 + q_{mn}^1 = 1$ 。

上两式表示：除校验点 m 以外，从与变量点 n 相连的其它 j-1 个校验得到的 x_n 为 0 或 1 的概率。

最后得到后验概率：

$$q_n^0 = \alpha_{mn} p_n^0 \prod_{m \in M(n)} r_{mn}^0$$

$$q_n^1 = \alpha_{mn} p_n^1 \prod_{m \in M(n)} r_{mn}^1$$

以上两式计算后验概率，即从与变量点 n 相连的所有 j 个校验得到 x_n 为 0 或 1 的后验概率。

(4) 判决

$q_n^0 < q_n^1$ ，则判定 $x_n=1$ 。

$q_n^0 > q_n^1$ ，则判定 $x_n=0$ 。

直到 $X \cdot H^T = 0$ ，否则转到第二个步骤。

2 SPW 中自定义 LDPC 码编译码模块的实现

SPW 主要提供了两种自定义模块的方法，分别是：SPB-C 和 SPB-I。SPB-C 即支持 C 代码也支持 C++ 代码，并且语法形式非常一致，本文采用 SPB-C 生成 LDPC 码编译码模块。用 SPB-C 生成自定义模块需要以下几个步骤。

1) 编辑 LDPC 编译码模块符号，模块主要包括输入/输出端口，以及模块的名字，编辑好的模块以后缀名为“symbol”的文件格式保存，如 ldpc_coder.symbol，如图 2 所示。

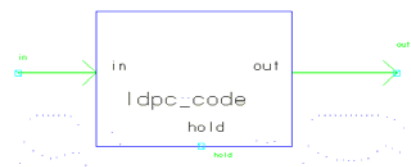


图 2 LDPC 编码器模块符号

2) 编辑参数屏。参数屏包括用户可调的参数，如 LDPC 编码器中的存放校验矩阵 H 的校验文件和存放生成文件 G 的生成文件，以及译码器中的迭代次数等参数。其中还需要加入一个参数名为 FEED_TYPE，参数值为 ALL_FEED_THROUGH 的参数，它是每个模块都必须的参数。在我们的设计中，编译码模块的端口是矢量类型的，因此还需要加入参数 IOVEC_LIST，参数值是端口，如 in, out。LDPC 码编译码器的参数屏如图 3 所示。编辑好的参数屏以后缀名为“params”的文件格式保存，如 ldpc_coder.params，注意文件名应以第一步产生的文件名一致。

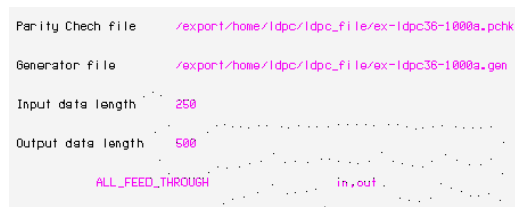


图 3 LDPC 编码器的参数屏幕

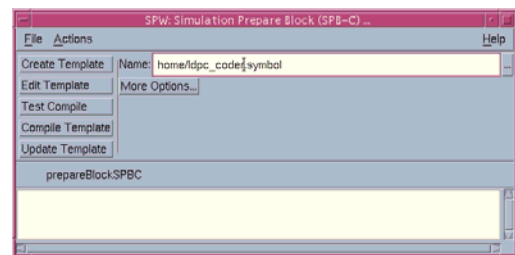


图 4 SPB-C 对话框

3) 点击如图 4 所示的对话框中的“Create Template”按钮产生源代码模板文件，该文件以“cgs.expr”名保存在同一目录下。LDPC 编码器的模板文件如下：

```
@FEED_THROUGH_TYPE: ALL_FEED_THROUGH
@INCLUDE_FILES: { } //要用到的头文件名称
@INCLUDE_DIRS: { } //头文件所在的路径
@LINK_TO: { } //链接到外部的目标文件.o或静态库文件.a
@INPUT_DECLARATIONS: //根据定义生成的输入端口
Ovector I_in;
```

```

Double I_hold;
@OUTPUT_DECLARATIONS: //根据定义生成的输出端口
Ovector O_out;
@PARAMETER_DECLARATIONS: //根据参数屏定义得到的参数
变量
{
Char * P_pchk_file;
Char * P_gen_file;
}
@STATE_DECLARATIONS: //变量的定义
{
}
@BLOCK_DECLARATIONS:
{
}
@INITIALIZATION_CODE: //代码的初始化部分, 在仿真中只执
行一次
{
}
@RUN_OUT_CODE: //代码运行部分, 根据仿真环境的设定, 每采
样一次, 该部分的代码就执行一次
{
}
@TERMINATION_CODE:
{
}

```

LDPC码的C语言源代码我们参考了R.M.Neal^[5]的数据结构定义, 将要用的数据结构和函数定义在外部, 并将包含这些数据结构和外部函数的源文件编译链接为静态链接库ldpc.a, 并把它的完整路径加到@LINK_TO: { }中, 相应的头文件的完整路径也加到@INCLUDE_FILES: { }中。然后将实现编码的代码加入到相应的部分, 保存文件, 点击如图4中的“Compile Template”按钮完成编译。译码器模块的生成和上面类似, 也需要上面的步骤。

4) 对新生成的模块进行测试, 验证是否正确, 本文的验证系统框图如图5所示, 图中我们加入了信源、信道以及误码统计模块等。

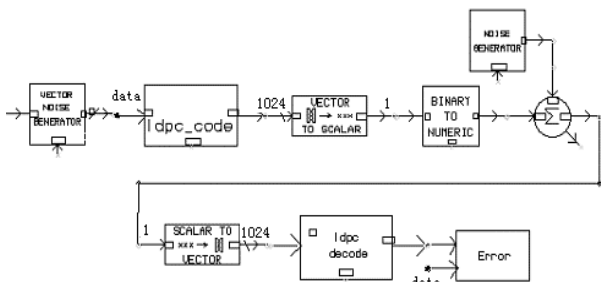


图5 验证LDPC编译码的系统框图

3 仿真结果

模块生成之后, 利用 SPW 强大的仿真能力, 本文对不同帧长的 LDPC 码, 仿真了误比特率与信噪比的关系。仿真参数如下: 仿真总比特数为 1×10^8 ; AWGN 信道; 码率为 1/2 的规则 (3,6) LDPC 码。为了显示 LDPC 的纠错能力,

和卷积码比较了 BER 性能。采用的卷积码参数为(2,1,7), 采用 viterbi 译码。

图 6 分别显示了在帧长为 10000、5000、1000、250 时, (3, 6)-LDPC 码和卷积码的性能对比。只有当帧长为 250 时, 卷积码的性能比规则 LDPC 码稍好。在其它帧长, 当 BER 达到 10^{-6} 时, 规则(3, 6)-LDPC 码对比卷积码可获得 1~2.25 个 dB 的信噪比增益。另外, 不同于卷积码, LDPC 码的性能对帧长变化非常敏感: 从图 6 中可以看出, 在每种帧长下, 误比特率总是随着信噪比的增大而快速降低; 帧长越长, 这种下降速度越快。

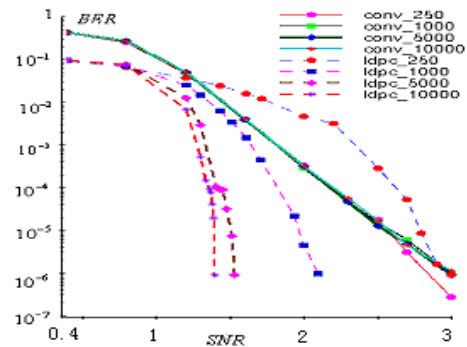


图 6 不同帧长情况下 LDPC 码与卷积码的性能对比图

前面提到, SPW 一个特点就是库非常丰富, 只要将 LDPC 码嵌入到 SPW 中, 就可以将 LDPC 码加入到不同的环境中进行验证。在图 5 的基础上, 在 AWGN 之后加入一个 Rayleigh 平坦衰落的模块, 就可完成 LDPC 码在 Rayleigh 衰落环境下的性能验证。如图 7 显示了 LDPC 码在 Rayleigh 衰落环境下的 BER 性能。同样的, 随着帧长的增加 LDPC 码的性能明显的得到改善, 并且随着信噪比的增加, BER 下降非常快。与 AWGN 信道相比, 在 10^{-6} 时, 性能有 4~6 个 dB 的恶化, 这主要是由于随机衰落造成的。

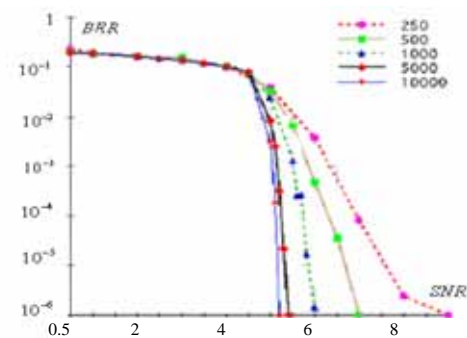


图 7 不同帧长 LDPC 在 Rayleigh 衰落信道下的 BER 性能图

4 结论

通过将LDPC码编译码嵌入到SPW中, 说明了SPW中自定义模块的创建方法, 该方法简单明了, 并且和C/C++完全兼容。它提供了有效使用SPW中开放功能的手段, 即使如LDPC码这种比较复杂的纠错编码也可方便的嵌入到SPW中, 从而使通信系统开发人员可以根据自己的需要扩展SPW

(下转第 2475 页)

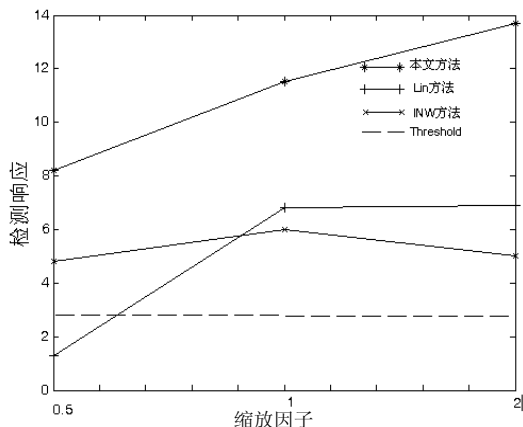


图 10 图像受到缩放攻击后的检测响应

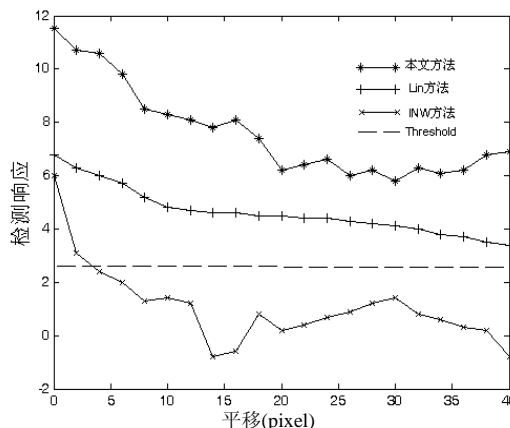


图 11 图像受到平移攻击后的检测响应

5 结论

本文提出了一种抗几何变换的小波域自适应图像水印, 主要研究内容和结果如下:

(1) 根据图像小波变换低频系数和高频系数的特点以及树结构关系, 给每一个低频系数确定一个相关掩蔽参数, 并用此参数控制其对应系数嵌入水印时的相对修改强度。使纹理越强的地方嵌入越强的水印信息, 越弱的地方嵌入越小的印信息, 从而可以保证在小波域低频系数中嵌入水印时水印的不可见性和鲁棒性。

(2) 在图像 DFT 中频域嵌入一个模板水印, 实现检测图像所经历的旋转、尺度缩放。模板嵌入在中频与嵌入低频的检测水印互不干扰, 模板的匹配在 DFT—LPM 坐标中进行, 降低了匹配的运算复杂度。

(3) 在原始水印图像和待测图像中提取一个不受图像剪切、压缩、加噪等图像处理影响的不变质心, 从而实现了原始水印图像和待测图像的平移同步。

实验结果表明: 该水印不仅具有较好的不可感知性, 而且对诸如旋转、缩放、平移等几何变换和常规的图像处理特别是对 JPEG2000 压缩具有较强的鲁棒性。

参考文献:

[1] Lin C Y, Wu M, Bloom A, Cox I J, Miller M L, Liu Y M. Rotation, scale, and translation resilient watermarking for image [J]. IEEE

Transaction on Image Processing, 2001, 10(5): 767-782.

[2] Pereira S, Pun T. Robust template matching for affine resistant image watermark [J]. IEEE Trans.on Image Processing, 2000, 9(6): 1123-1129.

[3] Alghoniemy M, Tewfik A H. Image watermarking by moment invariants [C]. in proc .IEEE Int Conf Image Process, 2001, 1: 73-76.

[4] Alghoniemy M, Tewfik A H. Geometric distortion correction through image normalization [C]. Proceedings of ICME, 2000, 3: 1291-4.

[5] Kaewkamnerd N, Rao K R. Wavelet based watermarking detection using multiresolution image registration [C]. TENCON 2000. Proceedings, 2000, 2: 71-175.

[6] Kang Xiangui, Huang Ji-wu, et al. Spread spectrum watermarking resists to affine transformation [J]. Acta electronica sinica, 2004, 32(1): 7-12.

[7] 康显桂, 黄继武, 等. 抗仿射变换的扩频图像水印算法[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 7-12.

[8] Zhang Li, Sam Kwong, Gang Wei. Geometric moment in image watermarking [C]. Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003, 2: 25-28.

[9] Alghoniemy M, Tewfik A H. Geometric distortions correction in image watermarking [C]. Proceedings of SPIE on Security and watermarking of multimedia content. California, USA, 3971(1): 381-392.

[10] Shapiro J M. Embed image coding using zeortrees of wavelets coefficients [J]. IEE trans.On signal Processing, 1993, 141(12): 3445-3462.

[11] Joseph J K, Ruanaidh O, Pun T. Rotation, scale and translation invariant digital image watermarking [J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 303-317.

[12] Kim Bum-Soo, Choi Jae-Gark, et al. A Robust digital image watermarking method against geometrical attacks [J]. Real-Time Imaging, 2003, 9(2): 139-149.

[13] Barni M, Bartolini F, Cappellini V, Piva A. A DCT-domain system for robust image watermarking [J]. Signal Processing, 1998, 66: 37-52.

(上接第 2469 页)

模块库, 增强了仿真工具的灵活性。通过使用生成的LDPC 码编译码模块, 在AWGN信道和Rayleigh平坦衰落信道下的仿真, 发现LDPC码在中、长帧时具有比约束长度为7的卷积码优越的性能, 同时, 在Rayleigh平坦衰落信道下, LDPC 码也有较好的适应性。这样就为LDPC码嵌入到基于SPW平台中更复杂的系统中, 进行新系统设计与验证打下了基础。

参考文献:

[1] R G Gallager. Low-Density Parity-Check Codes [D]. Cambridge, MA:

MIT Press, 1963.

[2] D J C MacKay, R M Neal. Near Shannon limit performance of low density parity check codes [J]. Electronics Letter, 1996, 32(18): 1645-1646.

[3] S-Y Chung, J G D Forney, T Richardson, R Urbanke. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit [J]. IEEE Commun. Lett., 2001, 5(2): 58-60.

[4] T Richardson, R Urbanke. The capacity of low-density parity check codes under message-passing decoding [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2001, 47(2): 599-618.

[5] R M Neal. Software for Low Density Parity Check Codes [CP], Ftp://ftp.cs.utoronto.ca/pub/radford/LDPC-2001-11-18/index.html