



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103248455 A

(43) 申请公布日 2013.08.14

(21) 申请号 201310128201.5

(22) 申请日 2013.04.12

(71) 申请人 西安理工大学

地址 710048 陕西省西安市金花南路5号

(72) 发明人 张发存 段喜盈

(74) 专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214

代理人 李娜

(51) Int. Cl.

H04L 1/00 (2006.01)

H04L 5/00 (2006.01)

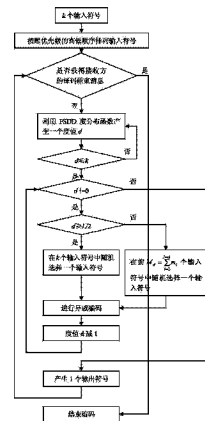
权利要求书2页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法

(57) 摘要

基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,包括信道编码、多载波传输和信道译码三个部分;具体是在发送端进行信道编码后,通过多载波传输,在接收端进行信道译码。本发明解决现有技术存在的对较高优先级数据重复编码和译码效率较低的问题,且提升了不等差错保护传输的可靠性,译码效率可达0.9564,性能参数ρ的值可达0.90。本发明能够在提升频谱利用率和降低带外辐射的情况下,对数据进行不等差错保护,特别是在保证高优先级数据可靠传输的同时,不会减弱对低优先级数据的保护,提升仿真数据的真实可靠性。



1. 基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,其特征在于,包括信道编码、多载波传输和信道译码三个部分;具体是在发送端进行信道编码后,通过多载波传输,在接收端进行信道译码。

2. 如权利要求 1 所述的基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,其特征在于,所述信道编码采用灵活孤子度分布函数 FSDD,利用鲁棒孤子度分布 RSDD 中的参数  $R = c \cdot \log(k/\delta) \sqrt{k}$  控制最大度值范围,同时引入优先级数 L 和输出符号个数 K 两个参数;令  $\Omega(\cdot)$  表示灵活孤子度分布 FSDD,公式如下:

$$\Omega(d) = \begin{cases} \frac{k}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=1 \\ \frac{L \cdot K}{k+L \cdot K} \left( \frac{1}{d(d-1)} \right) & \text{若 } d=2, \dots, k/R \\ \frac{L \cdot R}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=k/R+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$\delta$  为译码失败概率, k 表示输入符号的个数。

3. 如权利要求 2 所述的基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,其特征在于,所述信道编码是在将 k 个输入符号进行编码之前,首先按照优先级 L 的设置顺序重新排列输入符号,将最重要的数据安排在优先级 1,以此类推;每次在编码产生一个输出符号的时候都要查看是否接收到来自接收端停止编码信号;如果没有接收到该信号,则继续进行编码;否则,停止编码,且表示信道编码结束;当没有接收到停止编码的信号时,开始继续编码。

4. 如权利要求 3 所述的基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,其特征在于,所述信道编码产生一个输出符号的具体方法是:首先根据 FSDD 函数随机产生一个度值 d,然后根据条件  $L/2$  判断选择输入符号的范围;如果  $d > L/2$ ,则从所有的输入符号中随机选取一个输入符号进行异或运算,并且度值 d 减 1,循环判断度值 d 是否大于  $L/2$ ,如果大于  $L/2$ ,则仍然从所有的输入符号中随机选取一个输入符号进行异或运算,如果  $d < L/2$ ,则从  $M_d = \sum_{i=1}^d m_i$  个输入符号中随机选择一个输入符号进行异或操作;如果在信道编码开始的时候,  $d < L/2$ ,则这 d 个随机选取的输入符号都来自高 d 个优先级;当 d 值减到 0,即一个输出符号的编码结束。

5. 如权利要求 4 所述的基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,其特征在于,所述信道编码采用基于灵活孤子度分布的不等差错保护 LT 编码模块 FSDD-LT,进行四相相移键控信号调制;经过编码调制后产生一组输出符号  $Out[l]$ ,

$$Out[l] = \begin{pmatrix} X_0 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0[0] & x_0[1] & \cdots & x_0[M-1] \\ x_1[0] & x_1[1] & \cdots & x_1[M-1] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{N-1}[0] & x_{N-1}[1] & \cdots & x_{N-1}[M-1] \end{pmatrix}$$

其中  $l=0, \dots, M \cdot N - 1$ , M 表示时间槽的个数, N 表示子载波的个数。经过串并转换,将输

出符号映射到N个子载波上;每个子载波上可以传输1到M个输出符号。

6. 如权利要求1-5任一项所述的基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,其特征在于,所述多载波传输选取的信道模型为二进制删除信道;多载波传输中的脉冲成形滤波器采用Franks滤波器,Franks滤波器的波形函数为 $p(t)$ ,采样因子设为P,则采样后的符号序列为 $x_k^{(p)}[n] = \sum_{m=0}^{PM-1} x_k[m] \delta[n-mP]$ ,  $n=0, \dots, PM-1$ ; T为符号持续时间,a为滚降因子;

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{T} & |t| \leq \frac{T(1-a)}{2} \\ \frac{1}{T} \left(1 - \frac{|t|}{T}\right) & \frac{T(1-a)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+a)}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中 $\delta$ 为单位脉冲函数;当滤波器的长度len小于载波时间槽的个数M,则采样后的符号序列经过Franks滤波器得到的符号序列为 $x'_k[n] = (x_k^n * g)[n]$ ,  $n=0, \dots, len * M - 1$ ;最后经过上变频获取的符号序列为 $x'_k[n] = x'_k[n] \cdot e^{j \frac{2\pi}{P} kn}$ ;

每个子载波上的符号经历多载波传输,经过并串转换和数模转换等模块后,将符号 $x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x_k[n]$ 从发送端发出,经历二进制删除信道到达接收端。

7. 如权利要求6所述的基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法,其特征在于,信道译码实施步骤如下:

接收端将接受到的信号进行模数转换后为 $y[n]$ ,首先将符号映射到N个子载波上,然后对其进行下变频,即得到的第k载波上的符号为 $y[n] = y[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{P} kn}$ ,接着进行匹配Franks脉冲成形滤波器得到符号序列为 $\hat{x}_k^{(i),P}[n] = (\hat{y}[n] * g)[n]$ ,最后经过向下采样模块获得符号序列 $x_k^{(i)}[m]$ ;对符号序列进行并串转换和解调模块得到编码的输出符号,采用BP译码算法对这些输出模块进行译码,最终得到原始发送信息。

## 基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于无线通信领域,涉及一种基于广义频分复用技术 (Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM) 的多载波无比率编码的传输方法。

### 背景技术

[0002] 移动多媒体广播系统在进行数据传输过程中,由于信道条件和噪声干扰,影响了通信用户的接收性能。自动重传请求 (Automatic Repeat Request, ARQ) 和前向纠错编码 (Forward Error Correction, FEC) 作为两大差错控制技术,通过提高数据传输的可靠性来解决这个问题。自动重传请求是通过对原始信息的重传来保障数据被正确接收。前向纠错编码是通过对传输的数据进行纠错编码来降低传输差错。

[0003] 在 1998 年, Michael Luby 和 John Byers 等人提出了数字喷泉码 (Digital Fountain) 的概念。喷泉码是一种新的,定义在二进制删除信道模型 (Binary Erasure Channel, BEC) 上的前向纠错编码技术。发送端如同源源不断产生水滴 (输出符号) 的喷泉,而通信者只需要用杯子 (接收端) 接受足够数量的水滴,即可达到饮用 (成功译码) 的目的。这就是喷泉码的基本原理。无比率 (Rateless) 是喷泉码的重要特性。

[0004] LT 编码和 Raptor 编码是真正意义上的无比率喷泉码。Raptor 编码是在 LT 编码的基础上增加了一层预编码。预编码和 LT 编码是影响 Raptor 编码整体性能的重要因素。因此,对 LT 编码的优化研究至关重要。度分布 (Degree Distribution) 是 LT 编码的重要组成部分,目前经典的度分布是鲁棒孤子度分布 (Robust Soliton Degree Distribution, RSDD),但是鲁棒孤子度分布 RSDD 也存在一些缺点,当值为 1 的度较少时,根据其译码特性会出现错误平层现象,影响译码性能。因此,设计一个好的度分布函数,对于优化 LT 编码的性能至关重要。

[0005] 传统的喷泉码是采用等差保护 (Equal Erasure Protection, EEP) 对原始信息进行编码,但是,对于多媒体传输 (如视频传输),其某一部分信息是比较重要的,在编码时需要额外的保护,即采用不等差错保护。Mohammad Nekoui, Nazy Ranjkesh and Farshad Lahouti 等人提出了 Adapting LR-LT 编码,虽然其保护了优先级高的数据,但是会出现高优先级的数据被重复编码,而低优先级的数据从未编码,降低了编码效率,并且影响数据传输的误比特率 (Bit Error Rate)。因此,基于 LT 编码,需要结合好的度分布函数设计一种新的编码方式,以提高带有不等差错保护的 LT 编码性能。

[0006] 德累斯顿工业大学 (Technical University of Dresden, TU-Dresden) 与 Vodafone Chair Mobile Communications Systems 公司提出了广义频分复用技术 GFDM,其克服了正交频分复用技术 (Orthogonal Frequency Division Multiple, OFDM) 的一些缺点,如高的峰值平均功率比 (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR),带外辐射较为严重,对载频偏移较为敏感,频谱利用率低等缺点。但是,由于 GFDM 引入了灵活的脉冲成形滤波器,是子载波间的正交性遭到破坏,会产生载波间的干扰 (Inter-Carrier Interference, ICI),因此设计有效的 ICI 干扰消除机制对于 GFDM 技术十分重要。目前,

针对 GFDM 技术的 ICI 消除机制主要是采用串行干扰消除 (Serial Interference Cancel, SIC) 机制。但是在误比特率方面, 其性能低于 OFDM 系统。R. Datta, N. Michailow, M. Lentmaier 和 G. Fettweis 等人提出了双向 SIC 方法用于消除 ICI, 该方法的实施比较复杂。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的是提供一种基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法, 解决现有技术存在的对较高优先级数据重复编码和译码效率较低的问题, 并提升不等差错保护传输的可靠性。

[0008] 本发明的目的是这样实现的, 基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法, 包括信道编码、多载波传输和信道译码三个部分; 具体是在发送端进行信道编码后, 通过多载波传输, 在接收端进行信道译码。

[0009] 本发明的特点还在于:

[0010] 信道编码采用灵活孤子度分布函数 FSDD, 利用鲁棒孤子度分布 RSDD 中的参数  $R = c \cdot \log(k/\delta) \sqrt{k}$  控制最大度值范围, 同时引入优先级数 L 和输出符号个数 K 两个参数; 令  $\Omega(\cdot)$  表示灵活孤子度分布 FSDD, 公式如下:

[0011]

$$\Omega(d) = \begin{cases} \frac{k}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=1 \\ \frac{L \cdot K}{k+L \cdot K} \left( \frac{1}{d(d-1)} \right) & \text{若 } d=2, \dots, k/R \\ \frac{L \cdot R}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=k/R+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0012]  $\delta$  为译码失败概率, k 表示输入符号的个数。

[0013] 信道编码是在将 k 个输入符号进行编码之前, 首先按照优先级 L 的设置顺序重新排列输入符号, 将最重要的数据安排在优先级 1, 以此类推; 每次在编码产生一个输出符号的时候都要查看是否接收到来自接收端停止编码信号; 如果没有接收到该信号, 则继续进行编码; 否则, 停止编码, 且表示信道编码结束; 当没有接收到停止编码的信号时, 开始继续编码。

[0014] 信道编码产生一个输出符号的具体方法是: 首先根据灵活孤子度分布函数 FSDD 随机产生一个度值 d, 然后根据条件  $L/2$  判断选择输入符号的范围; 如果  $d > L/2$ , 则从所有的输入符号中随机选取一个输入符号进行异或运算, 并且度值 d 减 1, 循环判断度值 d 是否大于  $L/2$ , 如果大于  $L/2$ , 则仍然从所有的输入符号中随机选取一个输入符号进行异或运算, 如果  $d < L/2$ , 则从  $M_d = \sum_{i=1}^d m_i$  个输入符号中 (即高 d 个优先级中) 随机选择一个输入符号进行异或操作; 如果在信道编码开始的时候,  $d < L/2$ , 则这 d 个随机选取的输入符号都来自高 d 个优先级; 当 d 值减到 0, 即一个输出符号的编码结束。

[0015] 信道编码采用基于灵活孤子度分布的不等差错保护 LT 编码模块 FSDD-LT, 进行四相相移键控信号 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 调制; 经过编码调制后产生一

组输出符号  $Out[l]$ ,

$$[0016] \quad Out[l] = \begin{pmatrix} X_0 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0[0] & x_0[1] & \cdots & x_0[M-1] \\ x_1[0] & x_1[1] & \cdots & x_1[M-1] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{N-1}[0] & x_{N-1}[1] & \cdots & x_{N-1}[M-1] \end{pmatrix}$$

[0017] 其中  $l=0, \dots, M*N-1$ ,  $M$  表示时间槽的个数,  $N$  表示子载波的个数。经过串并转换, 将输出符号映射到  $N$  个子载波上; 每个子载波上可以传输 1 到  $M$  个输出符号。

[0018] 多载波传输选取的信道模型为二进制删除信道 (BEC); 多载波传输中的脉冲成形滤波器采用 Franks 滤波器, Franks 滤波器的波形函数为  $p(t)$ , 采样因子设为  $P$ , 则采样后的符号序列为  $x_k^p[n] = \sum_{m=0}^{PM-1} x_k[m] \delta[n-mP]$ ,  $n=0, \dots, PM-1$ ;  $T$  为符号持续时间,  $a$  为滚降因子;

[0019]

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{T} & |t| \leq \frac{T(1-a)}{2} \\ \frac{1}{T} \left(1 - \frac{|t|}{T}\right) & \frac{T(1-a)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+a)}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0020] 其中  $\delta$  为单位脉冲函数; 当滤波器的长度  $len$  小于载波时间槽的个数  $M$ , 则采样后的符号序列经过 Franks 滤波器得到的符号序列为  $x'_k[n] = (x_k^n * g)[n]$ ,  $n=0, \dots, len*M-1$ ;

最后经过上变频获取的符号序列为  $x'_k[n] = x'_k[n] \cdot e^{j\frac{2\pi}{P}kn}$ 。

[0021] 每个子载波上的符号经历多载波传输, 经过并串转换和数模转换等模块后, 将符号  $x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x'_k[n]$  从发送端发出, 经历二进制删除信道 (BEC) 到达接收端。

[0022] 信道译码实施步骤如下:

[0023] 接收端将接受到的信号 (符号) 进行模数转换后为  $y[n]$ , 首先将符号映射到  $N$  个子载波上, 然后对其进行下变频, 即得到的第  $k$  载波上的符号为  $\hat{y}[n] = y[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{P}kn}$ , 接着进行匹配 Franks 脉冲成形滤波器得到符号序列为  $\hat{x}_k^{(i),P}[n] = (\hat{y}[n] * g)[n]$ , 最后经过向下采样模块获得符号序列  $\hat{x}_k^{(i)}[m]$ ; 对符号序列进行并串转换和解调模块得到编码的输出符号, 采用 BP 译码算法对这些输出模块进行译码, 最终得到原始发送信息。

[0024] 本发明具有如下有益效果:

[0025] 1、本发明解决现有技术存在的对较高优先级数据重复编码和译码效率较低的问题, 且提升了不等差错保护传输的可靠性。本发明的译码效率可达 0.9564, 性能参数  $\rho$  的值可达 0.90。

[0026] 2、本发明能够在提升频谱利用率和降低带外辐射的情况下, 对数据进行不等差错保护, 特别是在保证高优先级数据可靠传输的同时, 不会减弱对低优先级数据的保护。

[0027] 3、本发明是在软件验证平台 FSDD-LT-GFDM 上进行实现仿真的，利用 GFDM 多载波技术提升频谱利用率，同时采用的二进制删除信道与实际的无线通信环境十分接近，提升了仿真数据的真实可靠性。

[0028] 4、本发明在提升频谱利用率的情况下，在保证优先级高的数据优先传输的同时，可避免低优先级的数据不被传输或者高优先级的数据重复传输。适用于对频谱利用要求高的，且需要不等差错保护的无线通信系统。

#### 附图说明

[0029] 图 1 为本发明基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法的信道编码方法流程图；

[0030] 图 2 为本发明基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法的发送端系统框图；

[0031] 图 3 为本发明基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法的接收端系统框图；

[0032] 图 4 为本发明基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法的 FSDD 灵活孤子度分布概率图；

[0033] 图 5 为本发明基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法的鲁棒孤子度分布 RSDD 分布概率对比图；

[0034] 图 6 为本发明基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法的不等差错保护 LT 编码在广义频分复用多载波 (FSDD-LT-GFDM) 上进行传输的性能示意图；

[0035] 图 7 为 Adapting LR-LT 编码在正交频分复用多载波 OFDM 上进行传输的编码性能示意图；

[0036] 图 8 为本发明基于灵活孤子度分布的不等差错保护 LT 编码在广义频分复用多载波 (FSDD-LT-GFDM) 上进行传输与 Adapting LR-LT 编码在正交频分复用多载波 OFDM 上进行传输的各优先级译码性能对比示意图；

[0037] 图 9 为本发明基于灵活孤子度分布的不等差错保护 LT 编码在广义频分复用多载波 (FSDD-LT-GFDM) 上进行传输与 Adapting LR-LT 编码在正交频分复用多载波 OFDM 上进行传输，以及传统编码等的系统性能参数  $\rho$  对比图。

#### 具体实施方式

[0038] 下面结合具体实施方式和附图对本发明作进一步详细的说明。

[0039] 本发明基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法，包括信道编码、多载波传输和信道译码三个部分；具体是在发送端进行信道编码后，通过多载波传输，在接收端进行信道译码。

[0040] 本发明提出一种新的度分布函数并在信道编码中采用，新的度分布函数称为灵活孤子度分布函数(The function of Flexible Soliton Degree Distribution, FSDD)。参数优先级数  $L$  和输出符号个数  $K$ ，可以提升度分布的灵活性，使其适用于任何源码。灵活孤子度分布 FSDD 在编码刚刚开始的时候可以保证足够的低度值数量，避免在使用 BP 译码时出现波纹消失的现象，提升 BP 译码效率。令  $\Omega(\cdot)$  表示 FSDD 函数， $\delta$  为译码失败概率，

$R = c \cdot \log(k/\delta) \sqrt{k}$  为最大度值的约束参数 ( $c > 0$ ),  $L$  表示优先级数,  $K$  表示输出符号 (编码分组) 的个数,  $k$  表示输入符号的个数, FSDD 函数的公式如下:

[0041]

$$\Omega(d) = \begin{cases} \frac{k}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=1 \\ \frac{L \cdot K}{k+L \cdot K} \left( \frac{1}{d(d-1)} \right) & \text{若 } d=2, \dots, k/R \\ \frac{L \cdot R}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=k/R+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0042]  $R = c \cdot \log(k/\delta) \sqrt{k}$

[0043] 信道编码是在将  $k$  个输入符号进行编码的开始之前, 首先按照优先级  $L$  的设置顺序重新排列输入符号, 将最重要的数据安排在优先级 1, 以此类推; 每次在编码产生一个输出符号的时候都要查看是否接收到来自接收端停止编码信号; 如果没有接收到该信号, 则继续进行编码; 否则, 停止编码, 且表示信道编码结束; 当没有接收到停止编码的信号时, 开始继续编码

[0044] 本发明根据 FSDD 的特点, 通过对具有不等差错保护的 LT 编码方式进行修正, 以提升数据传输的可靠性。该信道编码称为 FSDD-LT 编码, 其信道编码产生一个输出符号的具体描述是: 首先根据 FSDD 函数随机产生一个度值  $d$ , 然后根据条件  $L/2$  判断选择输入符号的范围。如果  $d > L/2$ , 则随机从所有的输入符号中随机选取一个输入符号进行异或运算, 并且度值  $d$  减 1, 循环判断度值  $d$  是否大于  $L/2$ , 如果大于, 则如上述步骤所示, 如果  $d < L/2$ , 则从  $M_d = \sum_{i=1}^d m_i$  个输入符号中 (即高  $d$  个优先级中) 随机选择一个输入符号进行异或操作。如果在信道编码开始的时候,  $d < L/2$ , 则这  $d$  个随机选取的输入符号都来自高  $d$  个优先级。当  $d$  值减到 0, 即一个输出符号的编码结束。

[0045] 多载波传输中基本采用 GFDM 技术框架, 选取的信道模型为二进制删除信道 (BEC), 选择 Franks 脉冲成形滤波器替代 RRC 滤波器。

[0046] 信道编码采用基于灵活孤子度分布的不等差错保护 LT 编码模块 FSDD-LT 进行编码, 在调制模块选取四相相移键控信号 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 进行调制。经过编码调制过程后产生一组输出符号  $Out[l]$ , 其中  $l=0, \dots, M \cdot N-1$ 。  $M$  表示时间槽的个数,  $N$  表示子载波的个数。经过串并转换, 将输出符号映射到  $N$  个子载波上。在 GFDM 中, 每个子载波上可以传输 1 到  $M$  个输出符号。

$$[0047] \quad Out[l] = \begin{pmatrix} X_0 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0[0] & x_0[1] & \cdots & x_0[M-1] \\ x_1[0] & x_1[1] & \cdots & x_1[M-1] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{N-1}[0] & x_{N-1}[1] & \cdots & x_{N-1}[M-1] \end{pmatrix}$$

[0048] 多载波传输过程的实施以第  $k$  个子载波的数据传输为例进行介绍。  $X_k$  符号序列经过向上采样模块 (采样因子设为  $P$ ), 则采样后的符号序列为



$x_k^p[n] = \sum_{m=0}^{PM-1} x_k[m] \delta[n - mP]$ ,  $n=0, \dots, PM-1$ 。其中  $\delta$  为单位脉冲函数。假设滤波器的长度  $len$  是小于载波时间槽的个数  $M$ , 采样后的符号序列经过 Franks 滤波器得到的符号序列为  $x_k^i[n] = (x_k^p * g)[n]$ ,  $n=0, \dots, len * M - 1$ 。最后经过上变频获取的符号序列为  $x_k^l[n] = x_k^i[n] \cdot e^{j \frac{2\pi}{P} kn}$ 。

[0049] Franks 滤波器的波形函数为  $p(t)$ , 其中  $T$  为符号持续时间,  $a$  为滚降因子。

[0050]

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{T} & |t| \leq \frac{T(1-a)}{2} \\ \frac{1}{T} \left(1 - \frac{|t|}{T}\right) & \frac{T(1-a)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+a)}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0051] 每个子载波上的符号经历多载波传输, 经过并串转换和数模转换等模块后, 将符号

$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x_k^l[n]$  从发送端发出, 经历二进制删除信道 (BEC) 到达接收端。

[0052] 信道译码实施步骤如下:

[0053] 假设接收端将接受到的信号 (符号) 进行模数转换后为  $y[n]$ , 首先将符号映射到  $N$

个子载波上, 然后对其进行下变频, 即得到的第  $k$  载波上的符号为  $\hat{y}[n] = y[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{P} kn}$ , 接着进行匹配 Franks 脉冲成形滤波器得到符号序列为  $\hat{x}_k^{(i)P}[n] = (\hat{y}[n] * g)[n]$ , 最后经过向下采样模块获得符号序列  $\hat{x}_k^{(i)}[m]$ 。对符号序列进行并串转换和解调模块得到编码的输出符号, 采用 BP 译码算法对这些输出模块进行译码, 最终得到原始发送信息。

[0054] 本发明提出的基于 GFDM 多载波无比率编码的传输方法是将 FSDD-LT 编码方式与 GFDM 多载波技术相结合, 同时采用 Franks 脉冲成形滤波器替代以往的 RRC 脉冲成形滤波器的新型无线传输方法。

[0055] ①本发明提出度分布函数 FSDD, 它利用 RSDD 中的参数  $R$  控制最大度值范围, 同时引入两个参数: 优先级数  $L$  和输出符号个数  $K$ , 这两个参数可以提升度分布函数 FSDD 的灵活性, 使其适用于任何源码。FSDD 度分布函数在编码刚刚开始的时候可以保证足够的低度值数量, 避免在使用 BP 译码时出现波纹消失的现象, 提升 BP 译码效率; ②本发明根据 FSDD 的特点, 结合不等差错保护编码, 提出一种新的不等差错保护 LT 编码, 称之为基于灵活孤子度分布的不等差错保护 LT 编码 (FSDD-LT); ③在无线通信系统中, 随着人们对频谱资源的使用越来越广泛, OFDM 多载波技术已经不能提升频谱利用率, 而一些研究表明 GFDM 多载波技术在频谱利用率等性能方面较优, 因此本发明在 GFDM 的基础上进行 FSDD-LT 编码仿真验证, 同时将常用的 RRC 脉冲成形滤波器替换成 Franks 脉冲成形滤波器进行 ICI 消除机制的改进。在 GFDM 系统下的 FSDD-LT 编码有显著的抗误码特性, 相比 OFDM 系统下的 Adapting LR-LT-OFDM, 在频谱利用、编译码效率等方面性能更优。

[0056] 实施例,按照本发明提出的基于广义频分复用技术的多载波无比率编码的传输方法的实施内容可分为信道编码、多载波传输、信道译码三个部分。具体实施如下:

[0057] 一、信道编码:

[0058] 1. 信道编码流程图如图 1 所示,在将 k 个输入符号进行编码的开始之前,首先按照优先级 L 的设置,参考表 1,顺序重新排列输入符号,将最重要的数据安排在优先级 1,以此类推。每次在编码产生一个输出符号的时候都要查看是否接收到来自接收端停止编码信号。如果没有接收到该信号,则继续进行编码;否则,停止编码,且表示信道编码结束。

[0059] 表 1 本发明验证平台优先级设置数据表。

[0060]

| 优先级 | 优先级权重      | 优先级符号个数   |
|-----|------------|-----------|
| 1   | $a_1=0.95$ | $m_1=200$ |
| 2   | $a_2=0.85$ | $m_2=400$ |
| 3   | $a_3=0.7$  | $m_3=700$ |
| 4   | $a_4=0.6$  | $m_4=150$ |
| 5   | $a_5=0.5$  | $m_5=550$ |

[0061] 2. 当没有接收到停止编码的信号时,开始继续编码。首先根据 FSDD 函数随机产生一个度值 d,然后根据条件  $L/2$  判断选择输入符号的范围。如果  $d > L/2$ ,则随机从所有的输入符号中随机选取一个输入符号进行异或运算,并且度值 d 减 1,循环判断度值 d 是否大于

$L/2$ ,如果大于,则如上述步骤所示,如果  $d < L/2$ ,则从  $M_d = \sum_{i=1}^d m_i$  个输入符号中(即高 d 个优先级中)随机选择一个输入符号进行异或操作。如果开始编码的时候,  $d < L/2$ ,则这 d 个随机选取的输入符号都来自高 d 个优先级。当 d 值减到 0,则一个输出符号的编码结束。

[0062] 灵活孤子度分布 FSDD 函数描述如下:k 表示输入符号的个数,K 表示输出符号的个数(即产生编码的个数,是动态变化的),R 为度值 d 范围控制因子,  $\delta$  为失败概率。

[0063]

$$\Omega(d) = \begin{cases} \frac{k}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=1 \\ \frac{L \cdot K}{k+L \cdot K} \left( \frac{1}{d(d-1)} \right) & \text{若 } d=2, \dots, k/R \\ \frac{L \cdot R}{k+L \cdot K} & \text{若 } d=k/R+1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0064]  $R = c \cdot \log(k/\delta) \sqrt{k}$

[0065] 二、传输方法采用 GFDM 多载波技术,其实施步骤如下:

[0066] 在本发明中使用的软件仿真验证平台是基于广义频分复用技术 (GFDM) 搭建的。

目前的GFDM技术通常使用的成形滤波器是RRC滤波器,该脉冲成形滤波器可以很好的降低带外辐射,但是抗载波间干扰的能力并不是很强,需要提供额外的载波间干扰消除机制,这样增加了技术实现的复杂度;并且信道模型常为高斯噪声信道模型,该信道模型并不能很好的模仿现实的无线通信环境。因此,本发明根据喷泉码的特点,选取的信道模型为二进制删除信道(BEC),它可以很好的模仿无线通信环境。由于RRC滤波器的抗干扰性并不佳,本发明选择Franks脉冲成形滤波器替代RRC滤波器。

[0067] 1. 仿真验证平台发送端框图如图2所示,编码模块采用基于灵活孤子度分布的不等差错保护LT编码(FSDD-LT),在调制模块选取四相相移键控信号(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制。经过编码调制过程后产生一组输出符号Out[l],其中 $l=0, \dots, M*N-1$ 。M表示时间槽的个数,N表示子载波的个数。经过串并转换,将输出符号映射到N个子载波上。在GFDM中,每个子载波上可以传输1到M个输出符号。

$$[0068] \quad Out[l] = \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0[0] & x_0[1] & \cdots & x_0[M-1] \\ x_1[0] & x_1[1] & \cdots & x_1[M-1] \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{N-1}[0] & x_{N-1}[1] & \cdots & x_{N-1}[M-1] \end{pmatrix}$$

[0069] 2. 多载波传输过程的实施以第k个子载波的数据传输为例进行介绍。 $X_k$ 符号序列经过向上采样模块(采样因子设为P),则采样后的符号序列为 $x_k^P[n] = \sum_{m=0}^{PM-1} x_k[m] \delta[n-mP]$ ,  $n=0, \dots, PM-1$ 。其中 $\delta$ 为单位脉冲函数。假设滤波器的长度len是小于载波时间槽的个数M,采样后的符号序列经过Franks滤波器得到的符号序列为 $x'_k[n] = (x_k^n * g)[n]$ ,  $n=0, \dots, len*M-1$ 。最后经过上变频获取的符号序列为

$$x'_k[n] = x'_k[n] \cdot e^{j \frac{2\pi}{P} kn}。$$

[0070] Franks滤波器的波形函数为 $p(t)$ ,其中T为符号持续时间,a为滚降因子。

[0071]

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{T} & |t| \leq \frac{T(1-a)}{2} \\ \frac{1}{T} \left(1 - \frac{|t|}{T}\right) & \frac{T(1-a)}{2} \leq |t| \leq \frac{T(1+a)}{2} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

[0072] 3. 每个子载波上的符号经历多载波传输的过程如图2所示。经过并串转换和数模转换等模块后,将符号 $x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x'_k[n]$ 从发送端发出,经历二进制删除信道(BEC)到达接收端。

[0073] 三、信道译码部分实施步骤如下:

[0074] 译码验证平台框图如图3所示。假设接收端将接受到的信号(符号)进行模数转换后为 $y[n]$ ,首先将符号映射到N个子载波上,然后对其进行下变频,即得到的第k载

波上的符号为  $\hat{y}[n] = y[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{P}kn}$ , 接着进行匹配 Franks 脉冲成形滤波器得到符号序列为  $\hat{x}_k^{(i),P}[n] = (\hat{y}[n] * g)[n]$ , 最后经过向下采样模块获得符号序列  $x_k^{(i)}[m]$ 。对符号序列进行并串转换和解调模块得到编码的输出符号, 采用 BP 译码算法对这些输出模块进行译码, 最终得到原始发送信息。

[0075] 本发明基于 GFDM 多载波无比率编码的传输方法的性能对比见图 4、5、6、7、8、9 所示。

[0076] 通过图 4 与图 5 的对比可知, FSDD 在保证低度值分布概率稳定的情况下, 提升了高度值的分布概率, 从而提升了编码效率。通过图 6 与图 7 的对比可知, 本发明 FSDD-LT-GFDM 仿真模型不受参数  $c$  和  $\delta$  的影响, 且编码性能稳定, 其译码效率可达 0.9564。图 8 为 FSDD-LT-GFDM 与 Adapting LR-LT-OFDM 等传统编码的各优先级译码性能对比图, 相比其他两种仿真平台, FSDD-LT-GFDM 的前 4 个优先级数据的译码性能最佳, 其不仅保证了重要数据的可靠性传输, 还对低优先级数据进行适当的保护。图 9 为 FSDD-LT-GFDM 与 Adapting LR-LT-OFDM 等传统编码的性能参数  $\rho$  对比,

$$[0077] \quad \rho = \frac{\sum_{i=1}^L a_i \frac{n_i}{m_i}}{\sum_{i=1}^L a_i}$$

[0078]  $n_i$  表示第  $i$  优先级经过译码得到的正确输入符号个数,  $m_i$  表示第  $i$  优先级中初始输入符号个数,  $a_i$  表示第  $i$  优先级权重。参数值  $\rho$  的值越接近于 1 表明不等差错保护的性越好, 通过对比可知, 本发明的性能参数  $\rho$  为 0.90, 最接近于 1。

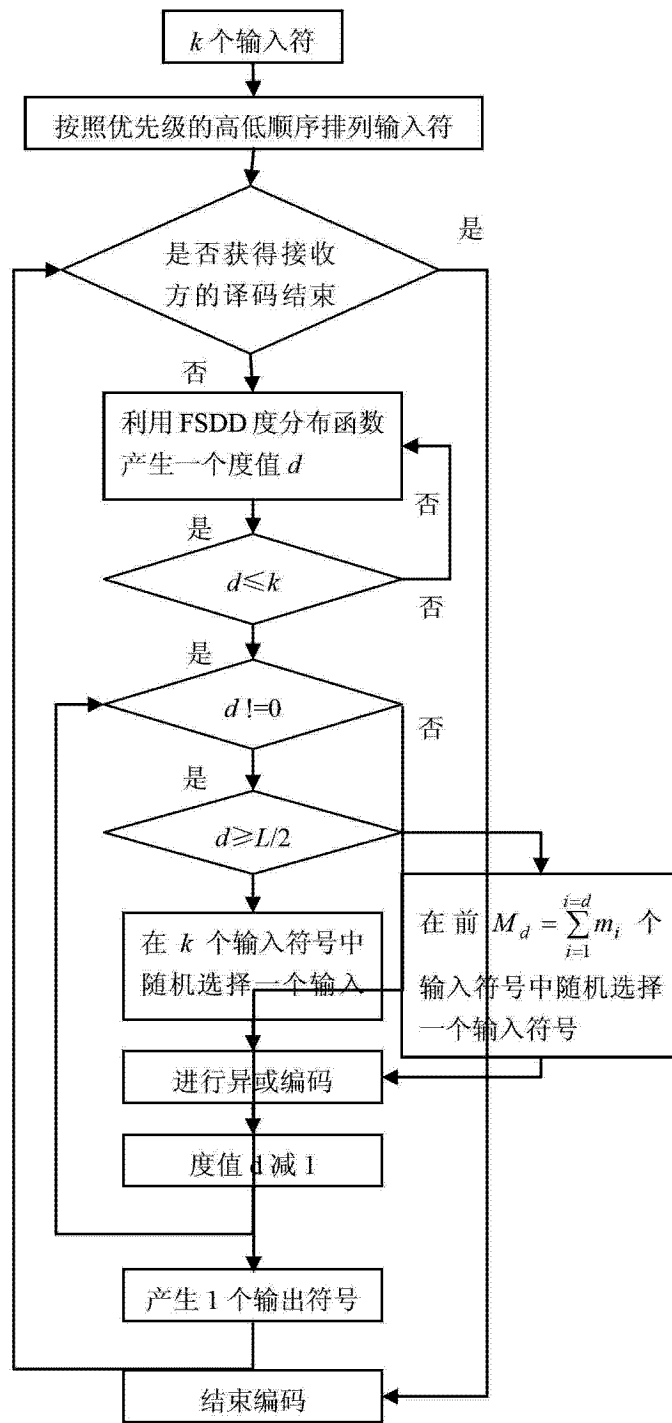


图 1

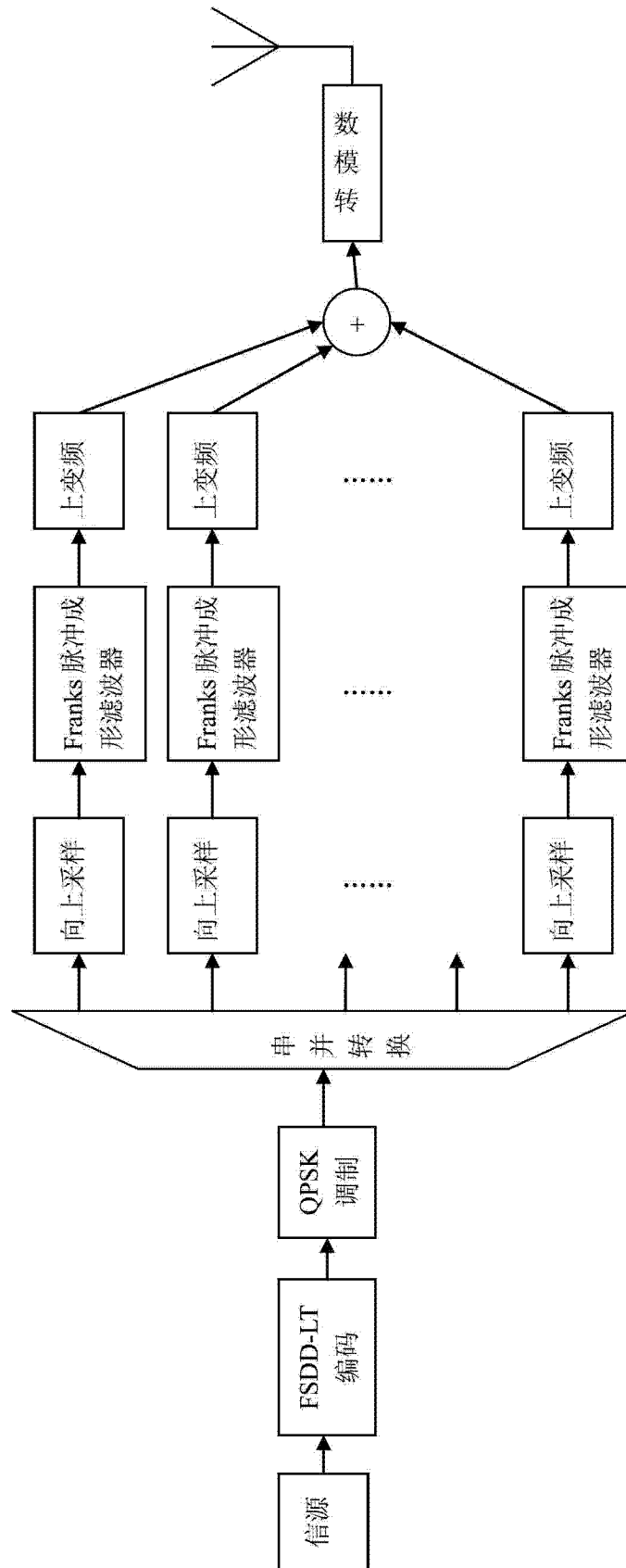


图 2

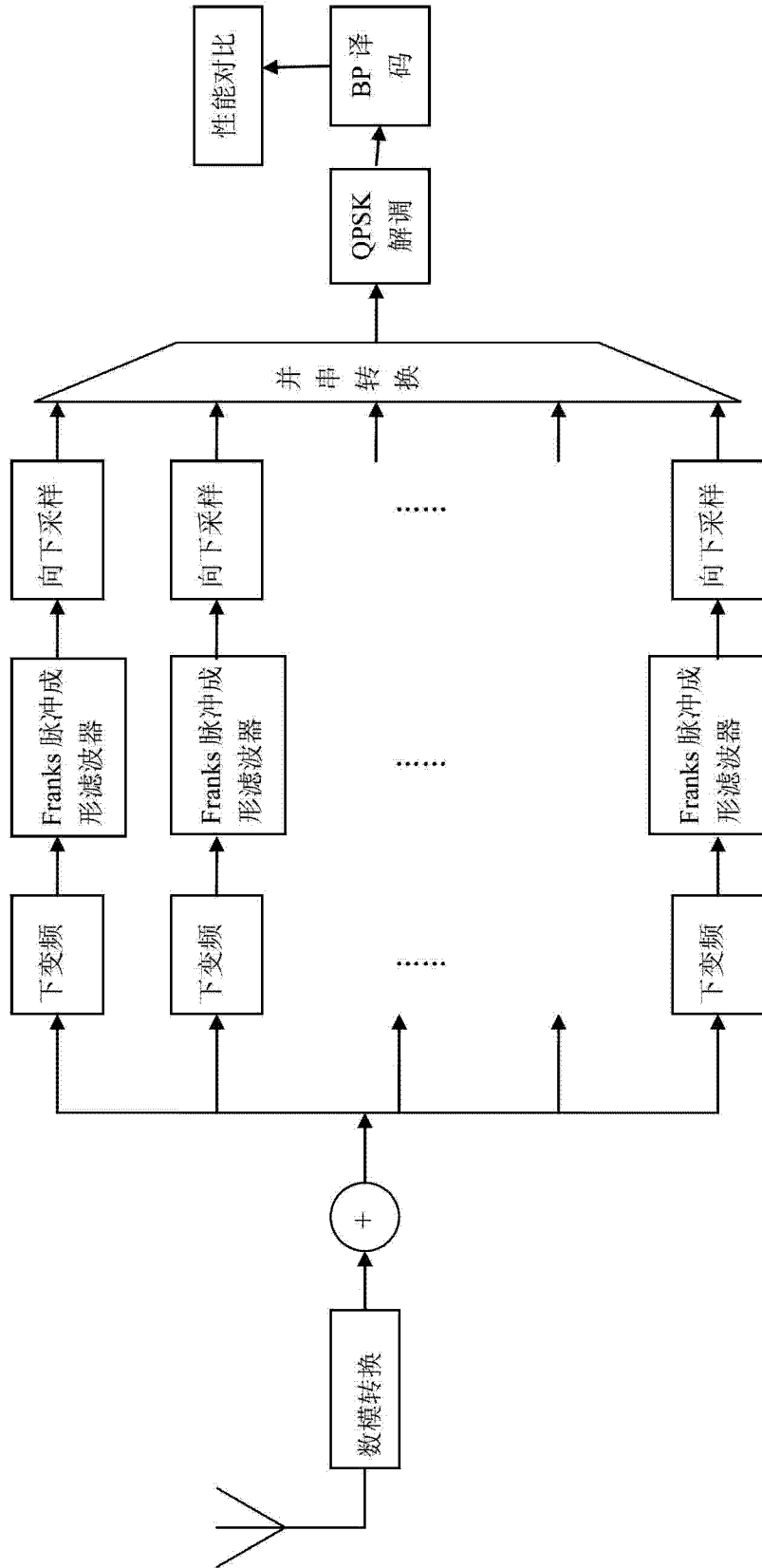


图 3

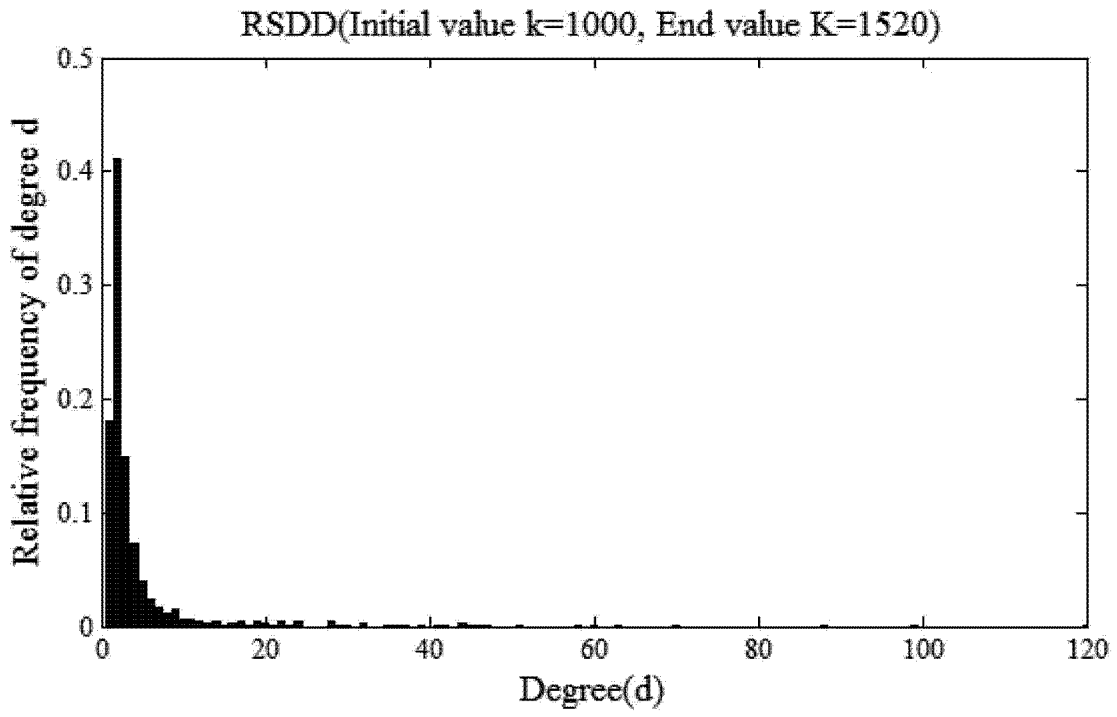


图 4

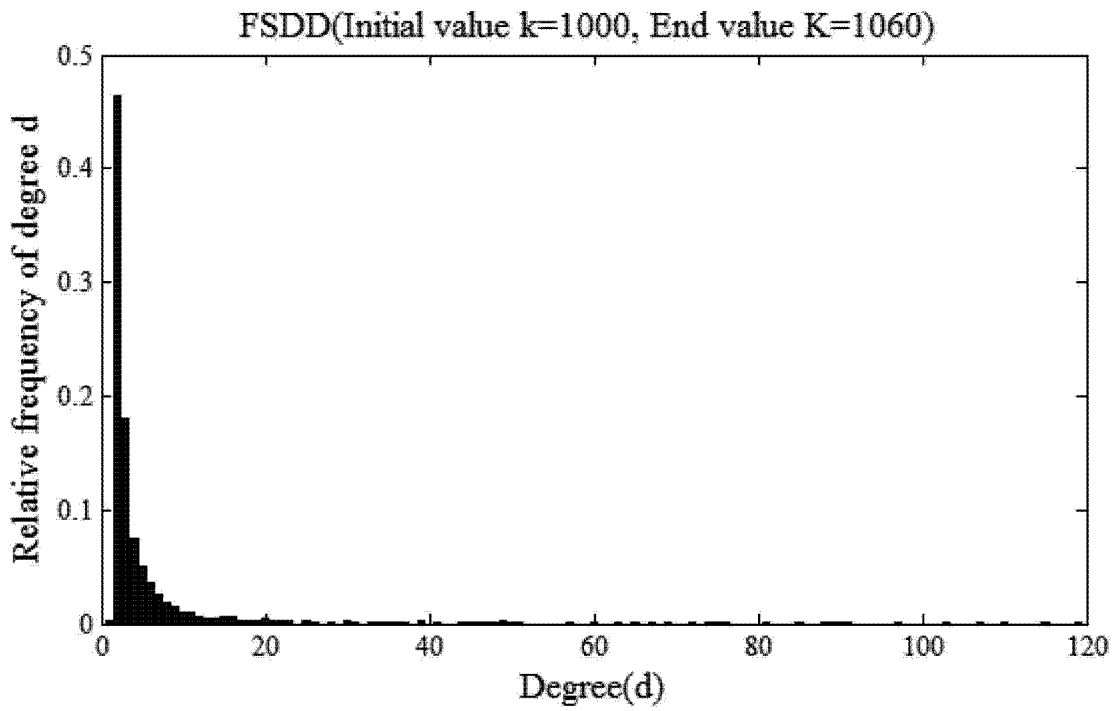


图 5



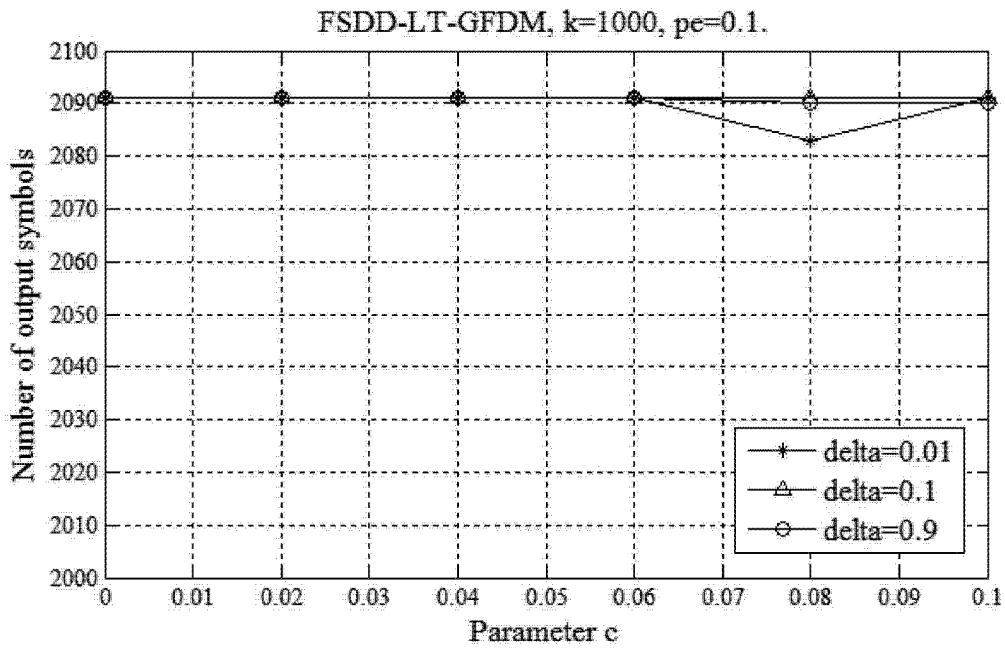


图 6

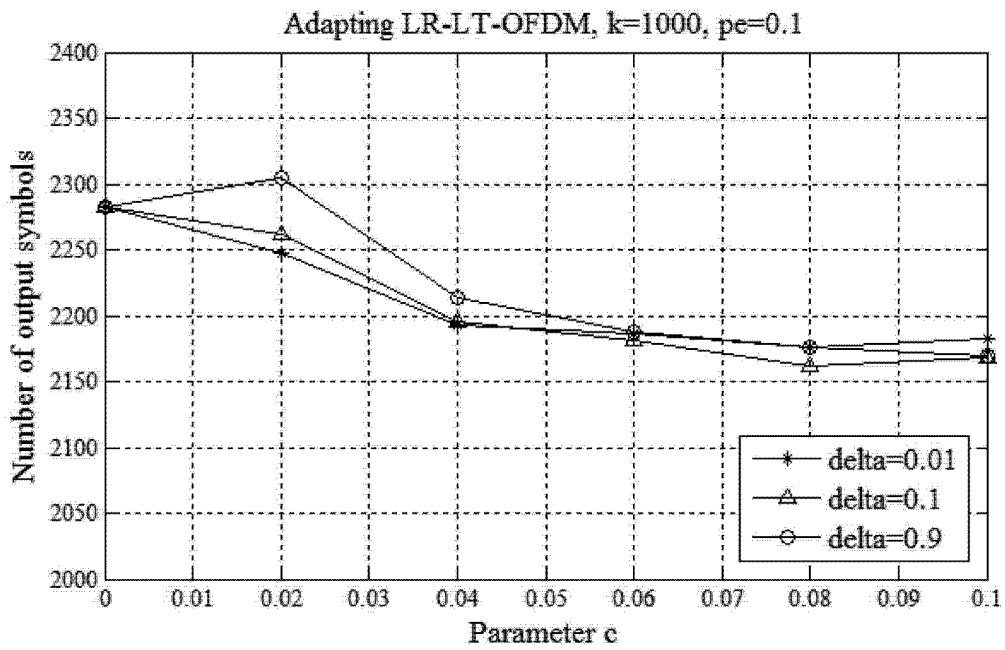


图 7

优先级中译码符号个数对比

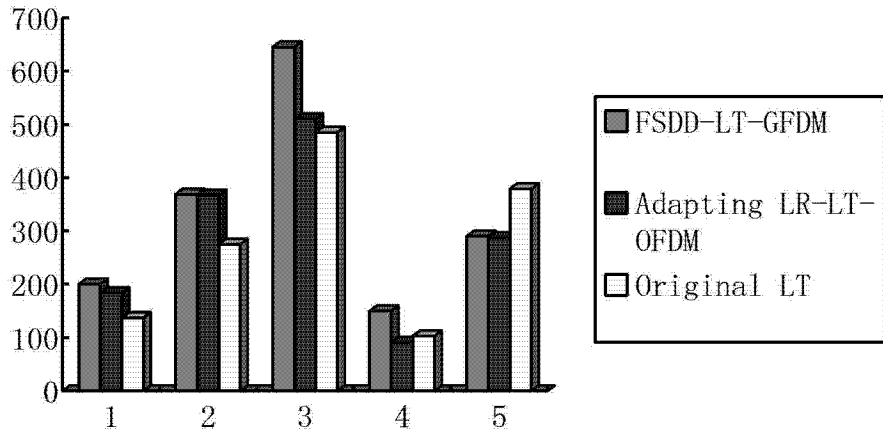


图 8

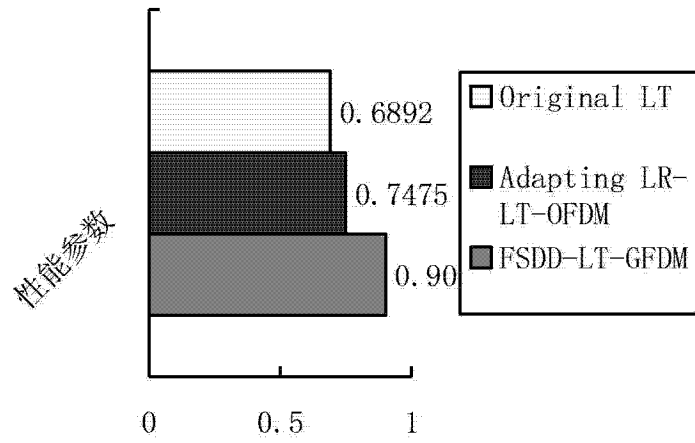


图 9