

一种跳转向量的隐性加权分数傅里叶变换通信方法

刘芳, 黄珂婷, 侯宇, 冯永新

(沈阳理工大学信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 加权分数傅里叶变换 (Weighted fractional Fourier transform, WFRFT) 技术可以极大地改变信号的特性, 使信号的统计特性多样化, 从而有效地保障通信信息安全。为解决单参数 WFRFT 通信抗扫描能力不足的问题, 以单参数 WFRFT 为切入点, 深入研究单参数分数域的形成机理, 分析其潜在的微观特征和暗特征, 从而提出了一种基于跳转向量的隐性 WFRFT 通信方法 (Implicit WFRFT communication method of jump vector, IWVJ)。利用调制阶数与星座图的关系, 建立了跳变矩阵和跳变向量, 并以此制定了控制规则。此外, 通过跳变向量控制获得动态调制阶数, 从而达到安全通信的目的。仿真结果表明, IWVJ 方法对授权接收机具有较高的反变换解调相似度和较低的误码率, 相比于具有普适扫描能力的非授权接收机性能更优。同时对解调阶数误差、基础调制阶数和跳转频率等参数的设置给出了适用的建议, 使 IWVJ 方法能够更好地应用于通信系统, 为具有抗干扰、抗截获和抗欺骗能力的保密通信提供技术依据。

关键词: 加权分数傅里叶变换; 调制阶数; 安全通信; 扫描

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

Invisible WFRFT Communication Method with Jump Vector

LIU Fang, HUANG Keting, HOU Yu, FENG Yongxin

(School of Information Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: The weighted fractional Fourier transform (WFRFT) technology can greatly change the characteristics of the signal and diversify the statistical characteristics of the signal. Thus the security of communication information is ensured. In order to solve the problem of insufficient anti-scanning ability of single-parameter WFRFT communication, taking single-parameter WFRFT as an entry point, the formation mechanism of single-parameter fractional domain is deeply studied, and its potential microscopic features and dark features are analyzed. So an implicit WFRFT communication method of jump vector (IWVJ) is proposed. Using the relationship between the modulation order and the constellation diagram, the hopping matrix and the hopping vector are established. And the control rules are formulated. In addition, the dynamic modulation order is obtained through the hopping vector control to achieve safe communication. Simulation results show that the IWVJ method has higher inverse transform demodulation similarity and lower bit error rate for licensed receivers, which is better than unlicensed receivers with universal scanning capability. At the same time, the appropriate suggestions for the setting of the demodulation order error, the basic modulation order and the jump frequency are given, so that the IWVJ

method can be better applied to communication systems, and provide security information with anti-jamming, anti-interception and anti-spoofing capabilities.

Key words: weighted fractional Fourier transform (WFRFT); modulation order; securing communication; scanning

引 言

随着信息环境的日益复杂,干扰与抗干扰以及控制与反控制变得越来越重要。在高风险情况下,如拒绝、干扰、欺骗和入侵等,在通信过程中保持可靠性、保密性和抗干扰^[1]非常重要。考虑到开放信号传输模式也可能导致潜在的拦截、识别、解码和干扰风险,无线通信应该具有高度机密性。通信过程的安全性通常通过加密和隐藏传输的信息来确保。传统基于密码学理论的加密系统是无线通信领域最成熟、应用最广泛的安全机制^[2]。然而,加密系统的设计理念是传统的计算机网络采用的,它忽略了无线通信系统的物理层特性(如无线信道的开放性、时变网络拓扑和终端的资源约束),这也导致了目前无线通信中出现了前所未有的问题。近年来,出现了大量的安全通信技术和方法,例如,在正交频分复用系统中提出了一些物理层加密方法^[3-5],以及二维加密方法^[6]、基于动态秘密的加密方案^[7]、基于有序等价划分的已知明文攻击方法^[8],以及具有最佳通信效率的加密重建^[9]等技术。

随着信号处理技术的不断深入,包括信号子分量的加权分数傅里叶变换(Weighted fractional Fourier transform, WFRFT)^[10-11]技术应运而生,其每个分量的叠加导致信号特性的本质变化,这使得WFRFT成为一种潜在的信号安全处理技术。WFRFT信号表现出更加多样化的统计特征,与传统通信信号相比,WFRFT信号能有效隐藏通信信息,抵抗非目的接收机的检测和拦截。目前,基于WFRFT的通信系统主要从多个参数的角度增加系统的复杂性^[12-14],从而提高其安全性能。例如:文献[15]结合WFRFT的星座混淆特性与混沌映射轨迹的抗截获特性,提出一种基于物理层安全的双极化卫星联合调制方案,使得信号的星座图发生扰乱,增强了传输信号的隐蔽性。文献[16]中WFRFT被用于增强传统定向调制的安全性能,该方法通过对各个方向的星座进行置乱,为物理层通信提供了额外的安全性,尽管窃听器知道预期的方向,但信息无法解调。文献[17]提出了二维加权分数傅里叶变换(Two-dimensional WFRFT, 2DWFRFT),该方法以有限的计算复杂度获得了较高的抗截获性能。文献[18]提出了一种基于WFRFT的携带人工噪声的数据,以实现卫星传输中的物理层安全,当发射端的信道状态信息不精确时,这种方法优于传统的人工噪声方法。文献[19]提出的基于人工噪声(Artificial noise, AN)的定向调制(Directional modulation, DM)技术具有多参数加权型分数傅里叶变换和混沌置乱,可实现节能和安全增强的无线传输。

上述方法通过基于WFRFT的独有特性,进而结合多样化处理使得物理层加密技术有新拓展,然而考虑到多参数WFRFT处理会显著增加系统的复杂性,并且多参数的生成及接收机硬件实现异常困难,而针对无线通信系统而言,以不牺牲系统复杂度为目的的通信机制已成为主要方向,同时考虑不破坏信号本身处理机制、不颠覆原系统结构,基于单参数的WFRFT的通信方法更具有实际意义。

目前,单参数WFRFT处理中调制阶数的周期性使得其抗扫描能力受限,尤其针对扫描间隔小于0.01的普适扫描用户,将达不到安全及加密的目的。因此,为解决单参数WFRFT通信抗扫描能力不足的问题,本文提出了一种基于跳转向量的隐性WFRFT通信方法(Implicit WFRFT communication method of jump vector, IWVJ)。该方法以单参数WFRFT为切入点,深入挖掘调制阶数和星座图的关系,并以此设计跳转矩阵和跳转向量,通过跳转向量为授权方接收机提供动态解调阶数,使得授权方接收机能够正确接收信号。而对于使用传统单参数WFRFT算法的非授权方接收机而言,因其未获取发

送方的跳转向量,使得非授权接收机成功接收信号的可能大大降低。仿真结果表明,IWVJ相比传统的单参数WFRFT通信方法抗扫描能力更强,并且具有较低的误码率。

1 加权分数傅里叶变换基本原理

WFRFT是分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier transform, FrFT)和加权傅里叶变换的结合,旨在更精确地描述信号在时频域之间的转换,并考虑不同频率成分的重要性,其具体原理如下

$$\begin{cases} F^1[f(x)] = F^1[f_0(x)] \xrightarrow{k=x} f_1(x) = g(x) \\ F^2[f(x)] = F^1[f_1(x)] \xrightarrow{k=x} f_2(x) = f(-x) \\ F^3[f(x)] = F^1[f_2(x)] \xrightarrow{k=x} f_3(x) = g(-x) \\ F^4[f(x)] = F^1[f_3(x)] \xrightarrow{k=x} f_4(x) = f(x) \end{cases} \quad (1)$$

首先是分数阶傅里叶变换。对函数 $f(x)$ 进行4次傅里叶变换得到式(1),其中 $f(x)$ 未经过傅里叶变换的结果定义为 $f_0(x)$,进行一次变换的结果定义为 $f_1(x)$,同理, $g(x)$ 代表函数 $f(x)$ 经过傅里叶变换后的频域表达式。由式(1)可知,4次傅里叶变换后的结果与原函数一致,即傅里叶变换的变换周期为4。

其次是加权傅里叶变换的引入。引入权重函数 $\omega_l(t)$, $l=0,1,2,3$ 以区分不同频率的贡献,其中 t 表示时间。该权重函数是一个关于时间的函数,用于对输入信号进行加权,以考虑不同时间点上的频率成分对变换的贡献,它反映了在频域中不同频率成分的相对重要性。

最后是加权分数阶傅里叶变换的定义。引入分数阶参数(即调制阶数) β_0 和权重函数(即加权系数) $\omega_l(\beta_0)$, $l=0,1,2,3$,根据传统傅里叶变换的周期特性将WFRFT定义为

$$F^{\beta_0}[f(x)] = \omega_0(\beta_0)f_0(x) + \omega_1(\beta_0)f_1(x) + \omega_2(\beta_0)f_2(x) + \omega_3(\beta_0)f_3(x) \quad (2)$$

式中加权系数 $\omega_l(\beta_0)$, $l=0,1,2,3$ 的表示如式(3)所示。 β_0 的周期与傅里叶变换保持一致,可在 $[-2,2]$ 或 $[0,4]$ 的主周期区间内任意取值。

$$\omega_l(\beta_0) = \cos\left[\frac{(\beta_0 - l)\pi}{4}\right] \cos\left[\frac{(\beta_0 - l)\pi}{2}\right] \exp\left[\frac{3(\beta_0 - l)\pi i}{4}\right] \quad (3)$$

加权分数傅里叶变换表达式中的加权系数均定义为复数,且由于加权系数的作用,经过WFRFT处理的信号星座图将随 β_0 的变化发生旋转,并且星座点将发生伸缩形变,但在一个周期内,无论调制阶数 β_0 为何值,其 β_0 和 $\beta_0 + 2$ 条件时的加权系数相同,加权分数傅里叶变换处理信号的星座图最接近,也即这两种条件时的信号特性差异微小,容易被发现或检测,抗扫描能力不足。

2 基于跳转向量的隐性WFRFT通信方法

针对上述WFRFT方法抗扫描能力不足的问题,提出IWVJ。该方法主要包括两部分:构建跳转向量、接收信号的生成。设一个基础周期为 $[0,4]$,该基于跳转向量的隐性WFRFT通信方法的原理如图1所示。

首先是构建跳转向量。由图1可以看出,分析一个周期内调制阶数 β_0 的变化规律与WFRFT处理信号的星座图关系,设定系统可用的多个用户数为 M ,进而定义一个基础调制阶数集 β , m 为用户ID, $m \in [1, M]$,为此,第 m 个用户的基础调制阶数为 β_m 。进而,构建跳转矩阵 C , C 由0、1组成,每个用户利用 C 中的某一行向量,用户 m 的跳转向量 C_m 为 C 中第 m 行向量。

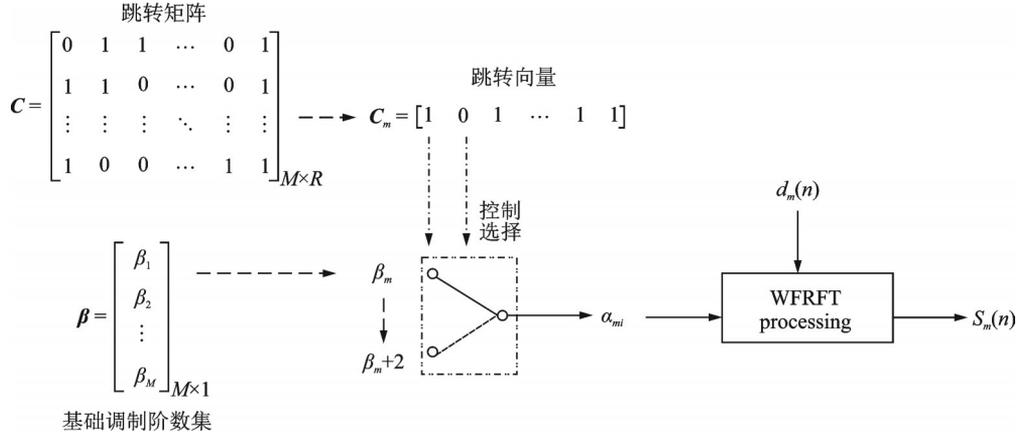


图1 IWVJ方法处理机制

Fig.1 Processing mechanism of IWVJ method

每个行向量的跳转率设为 R , 每次跳转驻留时间为 T , 其计算如式(4)所示。对于每个用户而言都有动态变化的调制阶数, 每隔 T 时间调制阶数的数值变换一次, 用户 m 的第 i 次 T 时间的调制阶数为 α_{mi} , 其数值由 C_m 控制从 β_m 和 $\beta_m + 2$ 中选择, 控制规则如式(5)所示, 其中 $i \in [1 R]$ 。

$$T = 1/R \quad (4)$$

$$\alpha_{mi} = \begin{cases} \beta_m & C_m(i) = 0 \\ \beta_m + 2 & C_m(i) = 1 \end{cases} \quad (5)$$

其次是接收信号的生成。在每次跳转驻留时间 T 内, 利用选出的 α_{mi} 对此用户的待传输数据 $d_m(n)$ 进行 α_{mi} 阶的 WFRFT 处理, 得到接收信号 $S_m(n)$, 信号处理机理如图 1 所示。

$$S_m(n) = F^{\alpha_{mi}}(d_m(n)) = \omega_0(\alpha_{mi})d_m(n) + \omega_1(\alpha_{mi})D_m(n) + \omega_2(\alpha_{mi})d_m(-n) + \omega_3(\alpha_{mi})D_m(-n) \quad (6)$$

式中: $F^{\alpha_{mi}}(\cdot)$ 为 α_{mi} 阶 WFRFT 处理函数, 4 种态函数 $d_m(n)$, $D_m(n)$, $d_m(-n)$, $D_m(-n)$ 分别为用户 m 中 $d_m(n)$ 的 0、1、2、3 次傅里叶变换结果, $\omega_l(\alpha_{mi})$ 为加权系数, 其定义为

$$\omega_l(\alpha_{mi}) = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^3 \exp\left[\frac{2\pi j}{4}(l - \alpha_{mi})k\right] \quad l = 0, 1, 2, 3 \quad (7)$$

对于授权接收机而言, 每个用户的跳转向量的跳转率都为 R , 用户 m 的跳转向量为 C_m , 第 i 次 T 时间的解调阶数为 α'_{mi} , 其数值由 C_m 控制从 $-\beta_m$ 和 $-\beta_m - 2$ 中选择, 其控制规则如式(8)所示, 其中 $i \in [1 R]$ 。

$$\alpha'_{mi} = \begin{cases} -\beta_m & C_m(i) = 0 \\ -\beta_m - 2 & C_m(i) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

进而, 授权接收机对 $S_m(n)$ 进行 α'_{mi} 阶的 WFRFT 处理, 如式(9)所示。其中, 反变换解调阶数满足 α'_{mi} 与发送端调制阶数 α_{mi} 的关系如式(10)所示。

$$F^{\alpha'_{mi}}(S_m(n)) = F^{\alpha'_{mi}}(F^{\alpha_{mi}}(d_m(n))) = F^{\alpha'_{mi} + \alpha_{mi}}(d_m(n)) = F^0(d_m(n)) = d_m(n) \quad (9)$$

$$\Delta\alpha = \alpha'_{mi} + \alpha_{mi} = 0 \quad (10)$$

只有反变换解调阶数满足 $\alpha'_{mi} = -\alpha_{mi}$ 时, 即 $\Delta\alpha = \alpha'_{mi} + \alpha_{mi} = 0$ 时, 则每次跳转驻留时间 T 内跳转规则与发送方同步, 进而利用 WFRFT 的旋转可加性, 授权接收机的反变换结果才能等于 $d_m(n)$, 可以达到正确接收的目的。

然而,对于非授权接收机而言,设其反变换解调阶数为 μ ,如果通过大量的扫描,可以估计得到 μ 与某跳转驻留时间 T 内的调制阶数 α_1 近似满足式(11)的关系。

$$\mu = -\alpha_1 + \Delta\alpha \quad (11)$$

如果此时 α_1 恰好与某用户的基础调制阶数相等,即 $\alpha_1 = \beta_m$,则表明此时 $C_m(i)$ 跳转到0,则 $C_m(i)$ 跳转的成功符号位为0,失败符号位为1。为此每当 $C_m(i)$ 跳转到0时, $\alpha_{mi} = \beta_m$,非授权接收机非法扫描成功,其扫描结果如式(12)所示。而每当 $C_m(i)$ 跳转到1时, $\alpha_{mi} = \beta_m + 2$,非授权接收机扫描失败,扫描结果如式(13)所示。

$$F^\mu(S_m(n)) = F^\mu(F^{\alpha_{mi}}(d_m(n))) = F^{-\beta_m + \Delta\alpha + \beta_m}(d_m(n)) = F^{\Delta\alpha}(d_m(n)) \approx d_m(n) \quad (12)$$

$$F^\mu(S_m(n)) = F^\mu(F^{\alpha_{mi}}(d_m(n))) = F^{-\beta_m + \Delta\alpha + \beta_m + 2}(d_m(n)) = F^{\Delta\alpha + 2}(d_m(n)) \neq d_m(n) \quad (13)$$

同理,如果此时 $\alpha_{mi} = \beta_m + 2$,则表明此时 $C_m(i)$ 跳转到1,则 $C_m(i)$ 跳转的成功符号位为1,失败符号位为0。为此每当 $C_m(i)$ 跳转到1时, $\alpha_{mi} = \beta_m + 2$,非授权接收机扫描成功,扫描结果为式(14)。而每当 $C_m(i)$ 跳转到0时, $\alpha_{mi} = \beta_m$,非授权接收机扫描失败,扫描结果为式(15)。

$$F^\mu(S_m(n)) = F^\mu(F^{\alpha_{mi}}(d_m(n))) = F^{-\beta_m - 2 + \Delta\alpha + \beta_m}(d_m(n)) = F^{\Delta\alpha}(d_m(n)) \approx d_m(n) \quad (14)$$

$$F^\mu(S_m(n)) = F^\mu(F^{\alpha_{mi}}(d_m(n))) = F^{-\beta_m - 2 + \Delta\alpha + \beta_m}(d_m(n)) = F^{\Delta\alpha - 2}(d_m(n)) \neq d_m(n) \quad (15)$$

可见,无论非授权接收机扫描成功的条件满足 $\alpha_1 = \beta_m$ 还是 $\alpha_1 = \beta_m + 2$, α_1 都是固定不变的数值,但是信号传输 $S_m(n)$ 时 α_{mi} 是在每隔 T 时间变换一次。每当 $C_m(i)$ 跳转到相应的成功符号位时,都可以近似接收传输数据,每当 $C_m(i)$ 跳转到相应的失败符号位时,都无法接收传输数据。为此,定义跳转率 γ 为

$$\gamma = \epsilon/N \quad (16)$$

式中: ϵ 为非授权接收机扫描的成功符号位数量, N 为跳转变量 C_m 总长度。 γ 决定着接收数据的抗扫描能力, γ 越大则非授权接收机成功扫描的概率越大,即系统的抗扫描能力越弱,而 γ 越小则非授权接收机成功扫描的概率越小,即抗扫描能力越强,以此来判断基于跳转向量的隐性WFRFT通信方法的抗扫描能力。因此在仿真阶段,首先以 $\gamma = 50\%$ 为条件,对不同的解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 和调制阶数 β_m 进行设置并测试,最后再对 γ 的不同取值进行实验分析,从而给出合理化参数设置建议。

综上,IWVJ可以通过跳转向量 C_m 来控制接收端是否能接收到传输数据,来解决单参数WFRFT处理中在同一周期内存在的调制阶数不同而星座图相似的问题。相比传统的单参数WFRFT通信方法提高了调制阶数 β_0 和 $\beta_0 + 2$ 条件时WFRFT处理信号的星座图差异,使信号不易被发现或检测,从而提高抗扫描能力。

3 仿真分析

为验证IWVJ面对具有普适扫描能力的非授权方接收机(简称非授权方)的抗扫描性,本文以授权方接收机与非授权方接收机为对象,基于仿真平台,从解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 、调制阶数 β_m 以及跳转率 γ 等方面对IWVJ方法的有效性进行测试分析,并结合仿真结果,通过更改不同的 $\Delta\alpha$ 、 β_m 和 γ 来给出适当的设置建议。

3.1 抗扫描测试

首先,利用接收机反变换解调数据与真实数据间的相关性,通过引入相关比例峰值,定义解调数据与真实数据间相似度为 P , P 值越大表明解调数据越接近真实的数据,经统计分析,当 P 大于20(量纲为

1)才可能基本满足部分数据可用;进一步测试反变换解调数据与真实数据间误码率为 P_e , P_e 值越小则表明接收性能越好。

实验 1 基础调制阶数 β_m 为定值、 γ 为50%、解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 分别为0.01、0.1、0.2。基于此参数设置,测试IWVJ方法对授权方与非授权方的抗扫描能力,其中接收方解调相似度 P 结果如图2(a)所示,误码率 P_e 结果如图2(b)所示。结果表明,随着 $\Delta\alpha$ 的增大,授权方与非授权方解调数据的相似度都略降低,当 E_b/N_0 小于0 dB时,两种用户的相似度明显降低,相对而言,授权方的接收数据与真实数据的相似度远远高于非授权方。而且,授权方与非授权方接收数据误码率也随着 $\Delta\alpha$ 的增大而增大,授权方的接收误码率明显低于非授权方。同时,可见非授权方的误码率基本无法满足扫描要求,从而证明IWVJ方法达到了抗非授权用户扫描的能力。

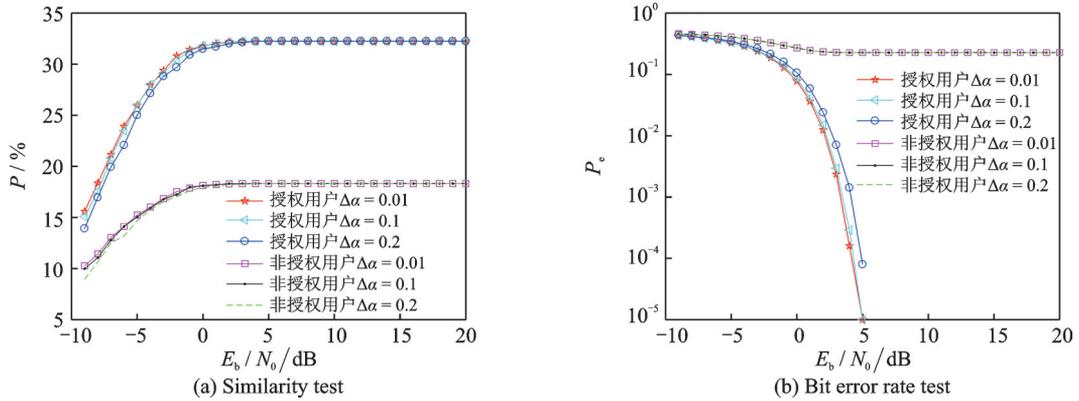


图2 实验1条件下的相似度及误码率测试

Fig.2 Test of similarity and bit error rate under the condition of experiment 1

实验 2 基础调制阶数 β_m 为定值、 γ 为50%、解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 分别为0.3、0.4、0.5。基于此参数设置,接收方解调相似度 P 结果如图3(a)所示,误码率 P_e 结果如图3(b)所示。可见,随着 $\Delta\alpha$ 的增大,授权方与非授权方解调数据的相似度都略降低,当 E_b/N_0 小于5 dB时,两种用户的相似度都逐渐降低,相对而言,授权方的接收数据与真实数据的相似度远远高于非授权方。而且,授权方与非授权方接收数据误码率也随着 $\Delta\alpha$ 的增大而增大,授权方的接收误码率明显低于非授权方,授权方在 $\Delta\alpha$ 为0.5时,无

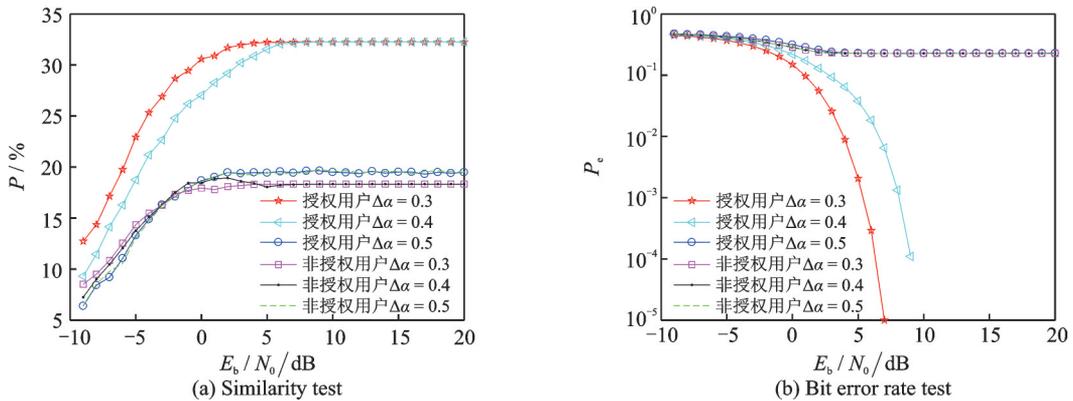


图3 实验2条件下的相似度及误码率测试

Fig.3 Test of similarity and bit error rate under the condition of experiment 2

法有效接收数据,因此建议采用IWVJ方法,解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 在设置时应低于0.5;然而,非授权方的误码率在几种参数条件下基本都无法满足扫描要求,从而证明了IWVJ方法达到了抗非授权用户扫描的能力。

3.2 调制阶数影响测试

在 $\gamma = 50\%$,反变换的解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 分别为0.01、0.32、0.43,基础调制阶数 β_m 分别为0.01、1.274、2、3.021时,反变换解调数据与真实数据相似度 P 如图4所示。可见,随着 E_b/N_0 的增大,相似度逐渐增大,非授权接收机相对稳定但 P 值非常低。解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 越大,授权接收机的相似度逐渐降低,相对而言授权接收机的相似度明显高于非授权接收机。经过统计分析表明,当调制阶数 β_m 非常接近0和2时,IWVJ方法授权接收机的相似度受解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 的影响较大,只有在 $\Delta\alpha$ 小于0.01时,相似度才能够较高,因此,建议IWVJ方法授权接收机避开基础调制阶数 β_m 为0和2的设置。

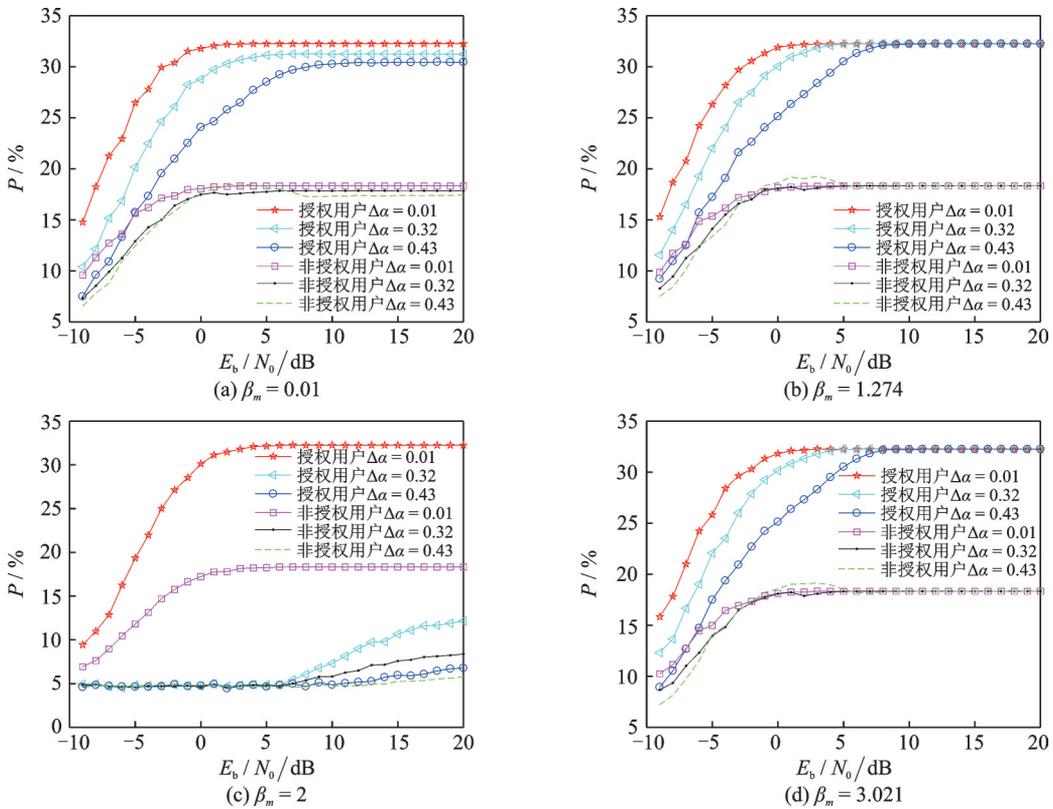
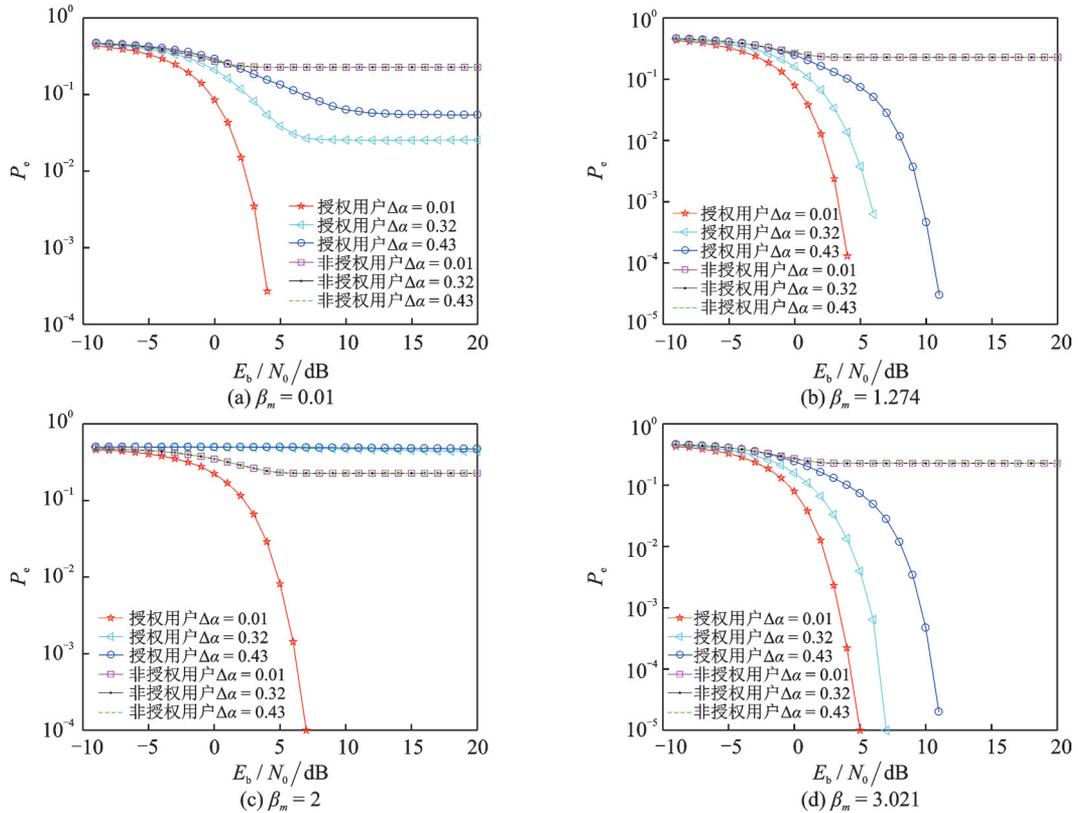


图4 不同 β_m 条件下的相似度结果

Fig.4 Similarity results under different β_m conditions

进一步,基于上述参数条件,误码率结果如图5所示。可见,非授权接收机的误码率非常高,基本无法达到解调要求,不能正确扫描接收数据。授权接收机的误码率随着解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 的增大而增大,相对而言授权接收机的误码率明显低于非授权接收机。同样,经过统计分析表明,当调制阶数 β_m 非常接近0和2时,IWVJ方法授权接收机的相似度受调制阶数误差的影响较大,因此,建议IWVJ方法授权接收机避开基础调制阶数 β_m 为0和2的设置。

图5 不同 β_m 条件下的误码率结果Fig.5 Bit error rate results under different β_m conditions

3.3 跳转率影响测试

反变换的解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 分别固定为 0.01、0.32、0.43、基础调制阶数 β_m 为 3.021、 γ 分别为 0%、40%、80%、100% 时，反变换接收的数据与真实数据的误码率如图 6 所示，相似度如图 7 所示。可见，非授权接收机的相似度和误码率受 γ 的影响较大。 γ 越大，则其相似度越大，且误码率越小，当 $\gamma = 100\%$ 时，非授权接收机的相似度和误码率与授权接收机相似。而授权用户的相似度和误码率不受 γ 的影响，只要 β_m 避开 0 和 2 的数值，其只受解调阶数误差 $\Delta\alpha$ 影响，误差越小相似度越大，且误码率越小。因此，为避免非授权用户的非法扫描接收，建议 $\gamma = 50\%$ ，也即每个用户的 C_m 中 0 和 1 的数量尽可能相等。

3.4 复杂度分析

一般来说，在传统的单参数 WFRFT 通信方法中，WFRFT 的计算复杂度是 $O(N^2)$ ，其中 N 是快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT) 点数。在实际系统中通常使用 FFT 来减小傅里叶变换的计算复杂度，而此时的计算复杂度为 $O(3N \times \log_2 N)$ 。本文提出的 IWVJ 在传统的单参数 WFRFT 通信方法的基础上增加了对调制阶数进行动态控制的跳转向量，该向量的作用是在调制阶数和条件时，通过动态控制接收端来提高此时 WFRFT 处理信号的星座图差异，从而提高该方法的抗扫描能力。可见，该方法仅增加了对解调阶数的动态选择，其复杂度依然为 $O(N^2)$ 。在实际系统使用快速傅里叶变换的情况下，该 IWVJ 方法的复杂度也依旧为 $O(3N \times \log_2 N)$ 。

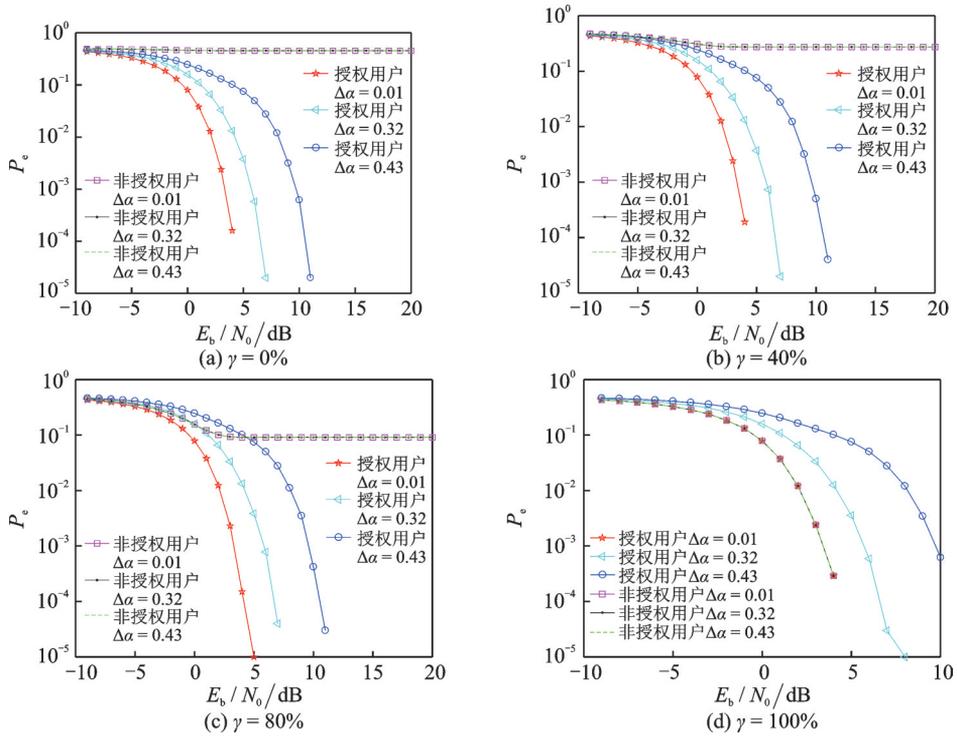


图6 不同 γ 时的误码率结果

Fig.6 Bit error rate results at different γ values

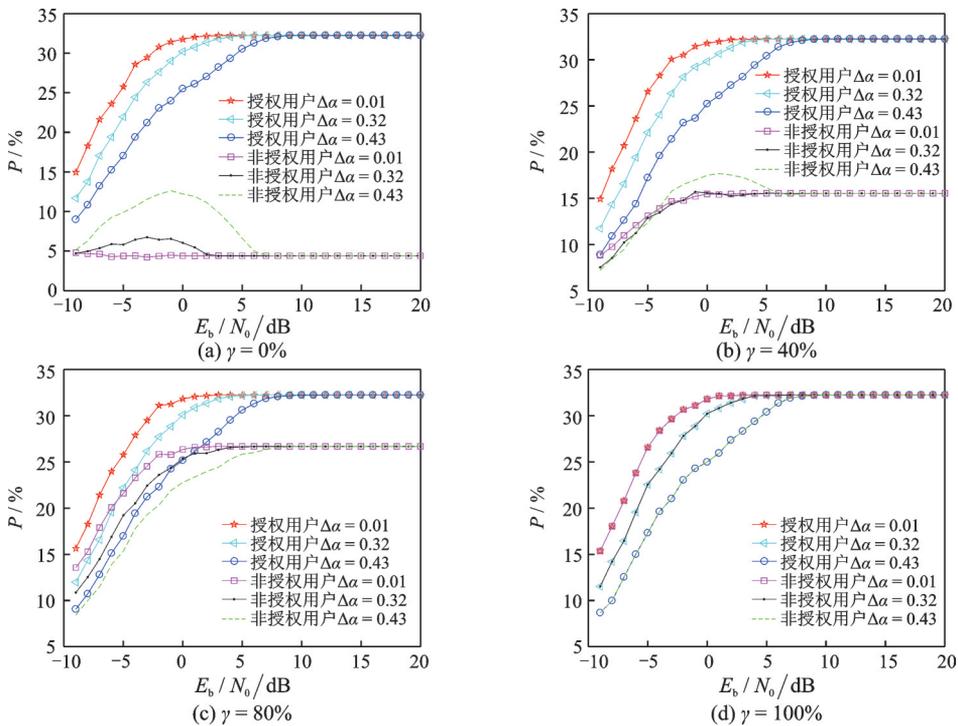


图7 不同 γ 时的相似度结果

Fig.7 Similarity results at different γ values

综上所述, IWVJ引入的计算量相较于传统的单参数 WFRFT 通信方法的计算量可以忽略不计, 因此该方法的复杂度和传统的单参数 WFRFT 通信方法的复杂度相似, 并未增加复杂度。

4 结束语

结合 WFRFT 隐性特征, 为克服其抗扫描能力不足, 本文提出了 IWVJ 方法, 并基于仿真环境, 对 IWVJ 方法进行了测试与分析, 得到如下结论:

(1) IWVJ 方法对授权接收机具有较高的反变换解调相似度, 且具有较低的误码率; 而对具有普适扫描能力的非授权接收机而言, 其反变换解调相似度较低, 且误码率非常高, 不能满足正确接收的需求, 因此表明 IWVJ 方法具有较好的抗非授权接收机扫描的能力。

(2) 为了使 IWVJ 方法更好地应用于通信系统, 给出了 IWVJ 方法的适用建议, 即: 基本调制阶数 β_m 避免 0 和 2 的值; 为避免未经授权用户的非法扫描, 建议 $\gamma = 50\%$; 在每个用户的 C_m 中, 0 和 1 的数量应该尽可能相等。

参考文献:

- [1] WANG Ximing, WANG Jinlong, XU Yuhua, et al. Dynamic spectrum anti-jamming communications: Challenges and opportunities[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(2): 79-85.
- [2] CARLO O, MATTEW J W, MISHA E, et al. Terahertz quantum cryptography[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(3): 483-495.
- [3] MOHAMED F, DONALD R, DANIEL LOVELESS T, et al. Nelder-mead simplex channel estimation for the RF-DNA fingerprinting of OFDM transmitters under rayleigh fading conditions[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2021, 16: 2381-2396.
- [4] 左沅君, 李峭, 熊华钢, 等. 航空电子 MB-OFDM-UWB 无线互连信道分析与仿真[J]. *航空学报*, 2019, 40(7): 171-180.
ZUO Yuanjun, LI Qiao, XIONG Huagang, et al. Analysis and simulation of avionics MB-OFDM-UWB wireless interconnection channel[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2016, 40(7): 171-180.
- [5] 杨炜伟, 陈剑, 陈德川. 射频能量采集非可信中继网络中物理层安全传输[J]. *电子学报*, 2019, 47(8): 1792-1796.
YANG Weiwei, CHEN Jian, CHEN Dechuan. Physical layer secure transmission in RF-powered energy harvesting untrusted relay networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(8): 1792-1796.
- [6] SHEN Hua, ZHANG Mingwu, WANG Hao, et al. A cloud-aided privacy-preserving multi-dimensional data comparison protocol[J]. *Information Sciences*, 2021, 545: 739-752.
- [7] 韩培义, 刘川意, 王佳慧, 等. 面向云存储的数据加密系统与技术研究[J]. *通信学报*, 2020, 41(8): 55-65.
HAN Peiyi, LIU Chuanyi, WANG Jiahui, et al. Research on data encryption system and technology for cloud storage[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(8): 55-65.
- [8] 陈帆, 屈凌峰, 原长琦, 等. 基于有序等价划分的冗余空间转移图像加密安全性分析[J]. *电子学报*, 2021, 49(4): 665-671.
CHEN Fan, QU Lingfeng, YUAN Changqi, et al. Ordered equivalence division based cryptanalysis of redundant space-transfer image encryption[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(4): 665-671.
- [9] YAN Xingfu, LIU Changlu, LU Rongxing, et al. Design of secret reconstruction with optimal communication efficiency[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(8): 1556-1559.
- [10] LIANG Yuan, XIANG Xin, SUN Ye, et al. Novel modulation recognition for WFRFT-based system using 4th-order cumulants[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 86018-86025.
- [11] WANG Zhenduo, MEI Lin, WANG Xiaolu, et al. On the performance of hybrid carrier system based on WFRFT with power allocation[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 29231-29240.
- [12] LIANG Yuan, DA XINYU, XU Ruiyang, et al. Research on constellation-splitting criterion in multiple parameters WFRFT modulations[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 34354-34364.
- [13] RAN Q, YEUNG D S, TSANG E C C, et al. General multi fractional Fourier transform method based on the generalized

- permutation matrix group[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(1): 83-98.
- [14] LI Jing, SHA Xuejun, FANG Xiaojie, et al. 8-weighted-type fractional Fourier transform based three-branch transmission method[J]. China Communications, 2018, 15(9): 147-159.
- [15] NI Lei, DA Xinyu, HU Hang, et al. Research on multi-dimensional joint modulation for satellite covert communication based on MP-WFRFT[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(4): 1183-1191.
- [16] LIU Feng, WANG Ling, XIE Jian. Directional modulation via weighted fractional Fourier transform—A way to enhance security[C]//Proceedings of 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London, UK:[s.n.], 2018: 9-13.
- [17] 黄永新, 房宵杰, 沙学军. 基于二维加权分数傅里叶变换的安全传输方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(5): 11-17.
HUANG Yongxin, FANG Xiaojie, SHA Xuejun. A secure transmission method based on two-dimensional weighted fractional Fourier transform[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(5): 11-17.
- [18] XU Ruiyang, DA Xinyu, HU Hang, et al. Power and time slot allocation method for secured satellite transmission based on weighted fractional data carrying artificial noise[J]. IEEE Access, 2018, 6: 65043-65054.
- [19] LIU Feng, WANG Ling, XIE Jian, et al. MP-WFRFT and chaotic scrambling aided directional modulation technique for physical layer security enhancement[J]. IEEE Access, 2019, 7: 74459-74470.

作者简介:



刘芳(1979-),女,教授,研究方向:无线通信、安全通信等, E-mail: zhqing1019@163.com。



黄珂婷(1999-),女,硕士研究生,研究方向:信号与信息处理。



侯宇(1995-),男,硕士研究生,研究方向:现代通信技术与系统。



冯永新(1974-),通信作者,女,教授,研究方向:无线通信、安全通信等, E-mail: fengyongxin@syhu.eud.cn。

(编辑:陈珺)