

WFRFT-MIMO 卫星抗截获通信系统

翟 东, 达新宇, 梁 源

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对卫星通信安全性不高、易被截获的问题,提出一种采用加权类分数阶傅里叶变换(WFRFT)与多入多出(MIMO)技术相结合的卫星抗截获通信系统。系统采用多层 WFRFT 调制信号,WFRFT 的层数与发射天线数目相同,每层 WFRFT 采用不同的调制阶数。原始信号经 WFRFT 调制后具有时频域特性,能有效抵抗参数扫描,MIMO 能有效提高频谱利用率及系统容量。经理论分析,采用 WFRFT-MIMO 通信系统可以高效地恢复原始信号,同时窃听方无法截获信号。以 2 发 1 收天线为例,分别从合法方与窃听方误码率(BER)性能对比、接收性能与 WFRFT 阶数偏差关系进行仿真,当窃听方调制阶数误差均为 0.1,信噪比为 20 dB 时,其误码率为 10^{-3} ,与合法方相差 4 dB。并通过对不同收发天线组的性能仿真,信噪比为 10 dB 时,3 发 4 收天线的性能较 2 发 1 收天线提高了 4.5 dB。

关键词 卫星通信;加权类分数阶傅里叶变换;MIMO;抗截获性

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.005

中图分类号 V443; TN914.42 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0026-07

Satellite Anti-Interception Communication System with WFRFT and MIMO

ZHAI Dong, DA Xinyu, LIANG Yuan

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aimed at the problems that the security is not high and the interception is easy, this paper proposes a new kind of satellite anti-interception communication system based on weighted-type fractional Fourier transform (WFRFT) and Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology. The system is to modulate the signal by adopting multiple layer WFRFT. The number of WFRFT layers and the transmit antennas is the same. The modulation parameter of each WFRFT layer is different. The original signal subject to WFRFT modulation is characterized as time and frequency domain, can effectively resist the parameter scanning, and MIMO can effectively improve the spectrum utilization and system capacity. By theoretical analysis, the WFRFT-MIMO communication system can be used to restore the original signal efficiently, and the eavesdropper can't intercept the signal. Taking two-transmission and one-reception antennas as an example, the results of the contrast of bit error rate (BER) performance between legal receiver and eavesdropper and relationship between receiving performance and WFRFT order deviation are simulated respectively. When the modulation order error of the eavesdropper is 0.1, and the signal-to-noise ratio is 20 dB, the BER of eavesdropper is 10^{-3} , which is more than the legal receiver 4 dB. The performance

收稿日期: 2017-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61571460)

作者简介: 翟东(1993—),男,山西泽州人,硕士生,主要从事卫星隐蔽通信研究. E-mail:zhaidongwzwdl@163.com

引用格式: 翟东, 达新宇, 梁源. WFRFT-MIMO 卫星抗截获通信系统 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(2): 26-32. ZHAI Dong, DA Xinyu, LIANG Yuan. Satellite Anti-Interception Communication System with WFRFT and MIMO [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 26-32.

between different receiving performance and transmitting antennas groups is simulated, when the signal to noise ratio (SNR) is 10 dB, the performance of the three transmit four receive antennas is higher than that of the two transmit one receive antennas, which increases the 4.5 dB.

Key words: satellite communication; weighted-type fractional Fourier transform; MIMO; anti-interception

卫星通信具有覆盖范围广,数据容量大,传输速率快等优点^[1-4],可用于多种复杂通信环境。然而随着社会经济的发展,民用与军用卫星应用更加广泛,高速高质量的数据传输需求也更加迫切,对卫星通信系统来说需要更多的频谱资源以及增大发射功率,但目前频谱资源越来越紧缺,发射功率也受限。因此,如何采用先进通信技术提高频谱利用率,增大系统容量,已经成为卫星发展的热点问题。研究表明,在移动通信系统中,多入多出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术通过在发送端和接收端配备多个天线单元,可以在不增加额外的发射功率和带宽的情况下,提高系统容量及频谱利用率^[5]。受到 MIMO 技术为地面通信带来的诸多改进的启发,研究人员开始将其应用于卫星通信中, K. P. Liolis 和 A. D. Panagopoulos 等人^[6]最先将多站中的分析方法应用于卫星 SIMO(Single Input Multiple Output, SIMO)中断容量的分析中,得到了 Ku 波段单卫星双站框架下的理论容量界限。文献[7]将正交空时编码应用于地面移动卫星通信系统中,综合空间分集和时间分集的优点,大大提高了频谱利用率。文献[8]将 MIMO-OFDM 应用到卫星通信中,系统抵抗多径衰落的性能更强。因此, MIMO 卫星的频谱利用率更高,可靠性更强,性能更优,具有广阔的发展前景。

卫星信道具有开放性,在星地信道中以及地面信道中都可能存在窃听方,所传信息被窃听的风险增大,需要通过一定的手段来保证信息安全。随着信息化战争的不断发展,对窃密与反窃密技术的关注度不断加强。因此,如何增强卫星通信的抗截获性,已经成为军事大国研究的热点。

目前卫星通信的隐蔽通过跳频、直扩等方式实现^[9-11],但跳频、直扩等传统方式隐蔽性能不强,易被截获。分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)可以实现信号在时频域的旋转,使信号不易被截获,已广泛应用到光学,量子力学等方面^[12-13]。梅林等人在分数阶傅里叶变换的基础上定义了新的变换域技术,即加权类分数阶傅里叶变换(Weighted-Type Fractional Fourier Transform, WFRFT),建立了基于 WFRFT 的新的通信系统框架^[14]。通过对数字信号进行 WFRFT 调制,发现调制后的星座图与原信号相比,已经变得杂乱无序,调

制阶数 α 不同, WFRFT 调制后的星座图差异很大。文献[15]分析了 MAP-WFRFT 信号的星座特性。文献[16]据此提出利用该星座特性进行保密或抗截获通信的可能性。但使用此技术在通信过程中,窃听方在长时间内,可以通过参数扫描,获得调制阶数 α ,从而恢复出原始信号。文献[17]将 WFRFT 与 TDCS 相结合,增强了卫星通信的隐蔽性。文献[18]提出将 WFRFT 与星座扰乱相结合,进一步提高系统隐蔽性。

基于上述分析,作者提出建立多层 WFRFT-MIMO 卫星抗截获通信系统, WFRFT 的层数与发射天线的数目相同,即有多个调制阶数,经过多层 WFRFT 调制后的信号混乱程度更高,窃听方通过遍历法扫描调制阶数破解信号的难度更大,系统的安全性更高。

1 基本原理

1.1 加权分数阶傅里叶变换

根据 A. C. McBride 在 1987 年下的定义^[19], $g(x)$ 的 α 阶连续傅里叶变换为:

$$F^\alpha[g(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) K^\alpha(u, t) dt \quad (1)$$

式中: $K^\alpha(u, t)$ 是变换核函数,通常有很多种不同类型的变换核函数,所以 FRFT 有很多种不同的表达形式。当 $K^\alpha(u, t)$ 被定义如式(2)所示时,表达式变为了由 C. C. Shih 提出的 WFRFT^[20]:

$$K^\alpha(u, t) = \omega_0(\alpha)\delta(t-u) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\omega_1(\alpha)e^{-ju} + \omega_2(\alpha)\delta(t+u) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\omega_3(\alpha)e^{ju} \quad (2)$$

把式(2)代入式(1),得:

$$F^\alpha[g(x)] = \omega_0(\alpha)g(x) + \omega_1(\alpha)G(x) + \omega_2(\alpha)g(-x) + \omega_3(\alpha)G(-x) \quad (3)$$

加权系数的计算方法见式(4):

$$\omega_l(\alpha) = \cos\left[\frac{(\alpha-l)\pi}{4}\right] \cos\left[\frac{2(\alpha-l)\pi}{4}\right] \exp\left[\frac{3(\alpha-l)\pi i}{4}\right], (l=0,1,2,3) \quad (4)$$

从上述公式可以看出, $F^\alpha[g(x)]$ 是 4 项基本函数 $[g_0, g_1, g_2, g_3]$ 和加权系数 $[\omega_0(\alpha), \omega_1(\alpha), \omega_2(\alpha), \omega_3(\alpha)]$ 的总和。 $g_0 \sim g_3$ 是原信号经过傅里叶变换

后的结果。快速傅里叶变换(FFT)的次数是 $0\sim 3$ 。假设 $g(x)$ 是原信号, $g_0\sim g_3$ 可以表示为如下形式:

$$\begin{cases} g_0(x) = \mathbf{F}^0[g(x)] = \mathbf{F}^0[g(x)] \rightarrow g_0(x) = g(x) \\ g_1(x) = \mathbf{F}^1[g(x)] = \mathbf{F}^1[g_0(x)] \rightarrow g_1(x) = G(x) \\ g_2(x) = \mathbf{F}^2[g(x)] = \mathbf{F}^1[g_1(x)] \rightarrow g_2(x) = g(-x) \\ g_3(x) = \mathbf{F}^3[g(x)] = \mathbf{F}^1[g_2(x)] \rightarrow g_3(x) = G(-x) \end{cases} \quad (5)$$

4-WFRFT 在数字通信系统的实现过程见图 1, 它的离散形式见式(6):

$$\mathbf{F}^0[g(n)] = \omega_0(\alpha)g(n) + \omega_1(\alpha)G(n) + \omega_2(\alpha)g(-n) + \omega_3(\alpha)G(-n) \quad (6)$$

DFT 和 IDFT 的定义如下:

$$\begin{cases} G(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) e^{-\frac{2\pi jkn}{N}} \\ g(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} G(k) e^{\frac{2\pi jkn}{N}} \end{cases} \quad (7)$$

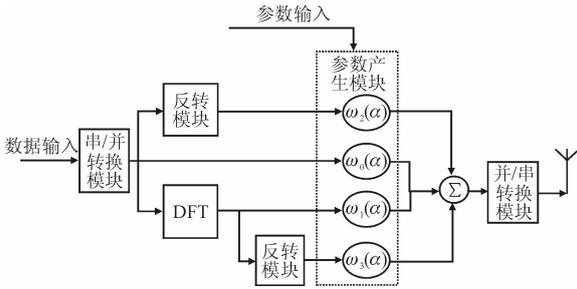


图 1 WFRFT 调制基本实现结构

Fig. 1 The basic realization structure of WFRFT modulation

长度为 N 的一组信息序列经过串并转换后进入 4 个支路分别进行处理。其中 ω_1 和 ω_3 支路的数据,在经过加权处理之前都经过了 DFT 模块,因而 ω_1 和 ω_3 支路对应于频域。与之对应的 ω_2 和 ω_4 支路,没有经过 DFT 模块,即对应于时域。可以将加权分数阶傅里叶变换理解为广义的傅里叶变换,当调制阶数 α 为 0 时, $\mathbf{F}^0[g(n)] = g(n)$,即经过加权分数阶傅里叶变换之后仍为原时域信号。当调制阶数 α 为 1 时, $\mathbf{F}^1[g(n)] = g_1(n)$,即加权分数阶傅里叶变换变为传统的傅里叶变换。经过 WFRFT 调制后的信号属于时频域信号,能量分布更加均匀,经过选择性衰落信道时,性能更优。

1.2 MIMO 卫星

MIMO 技术通过在发送端和接收端配备多个天线单元,同时采用空时分组编码,可以在不增加额外的发射功率和带宽的情况下,提供空间多用户分集增益、空间复用增益、数组和编码增益,降低干扰,提高系统容量及频谱利用率。在卫星通信中,发射端对带宽的需求日益增加,另一方面,可以利用的频

谱是有限的。将 MIMO 技术应用于卫星中可以很好地解决这个问题,尤其在透明转发器中。具有多天线的单卫星与多个地面站或距离较近的多个卫星之间均可组成 MIMO 卫星通信系统^[21]。MIMO 卫星通信系统较传统卫星通信系统提升了系统容量,提高了频谱利用率^[22-23]。

MIMO 技术通过空时分组编码实现空间分集和时间分集,以 2 发 1 收天线为例对空时分组编码进行说明,见式(8),编码器把信号分为 2 组,即 m_1 、 m_2 。并且按照式(8)所示的编码矩阵据进行编码。

$$\begin{bmatrix} m_1 & -m_2^* \\ m_2 & m_1^* \end{bmatrix} \quad (8)$$

信号经编码后,在相应的时刻从相应的天线发射出去,即在 2 个连续发射周期 t_1 、 t_2 ,信号 m_1 和 m_2 在 t_1 分别同时从天线 1 和天线 2 发送出去,信号 $-m_2^*$ 和 m_1^* 在 t_2 分别同时从天线 1 和天线 2 发送出去。这种方法在时间域和空间域都进行了编码。在接收端进行信道估计,空时分组译码。本文中 $N \times M$ 天线表示 N 个发射天线, M 个接收天线,原理图见图 2。

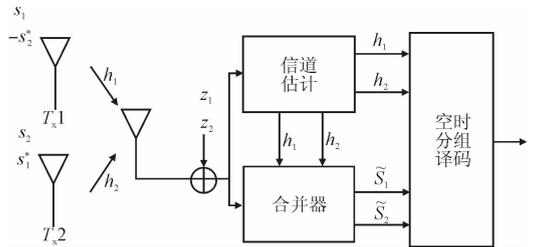


图 2 2 发 1 收天线原理图

Fig. 2 Block diagram of two send and one receive antennas' principle

2 基于 WFRFT-MIMO 卫星抗截获通信系统

本文将 WFRFT 引入到 MIMO 卫星系统中,增加 MIMO 卫星系统的抗截获性。信号经过 WFRFT 调制后的星座图见图 3,可以看出,经过 WFRFT 调制后信号的星座图已经变得混乱无序,调制阶数 α 不同,WFRFT 变换后的星座图也不同。窃听方在不知调制阶数 α 的具体值时,根本没有办法恢复出原信号。因此,将 WFRFT 引入到 MIMO 卫星系统中可以增加 MIMO 卫星系统的抗截获性。

但 WFRFT 只有一个调制阶数 α ,窃听方在付出时间代价的基础上,可以通过扫描调制阶数 α 来截获原信号。针对以上不足,提出将多层加权分数阶傅里叶变换应用到 MIMO 卫星中。基于多层加权分数阶傅里叶变换的卫星抗截获系统见图 4。

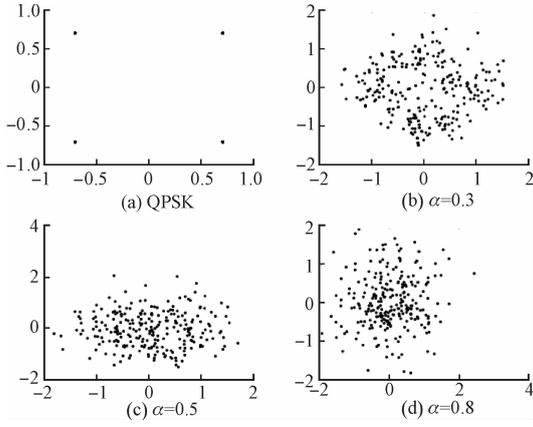


图 3 WFRFT 调制信号星座图

Fig. 3 WFRFT modulation signal constellation

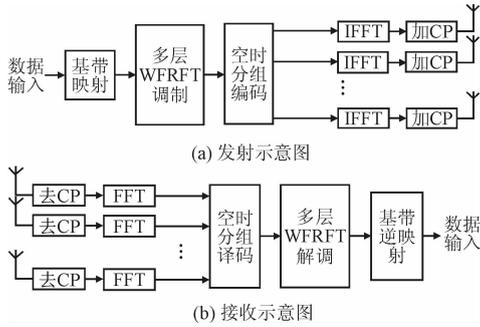


图 4 基于多层 WFRFT-MIMO 的卫星抗截获系统

Fig. 4 The block diagram of satellite anti-interception system based on WFRFT and MIMO

根据发射天线数目确定 WFRFT 的层数,层数和发射天线数目相同,以 2 个发射天线为例,2 层 WFRFT 的结构框图见图 5。

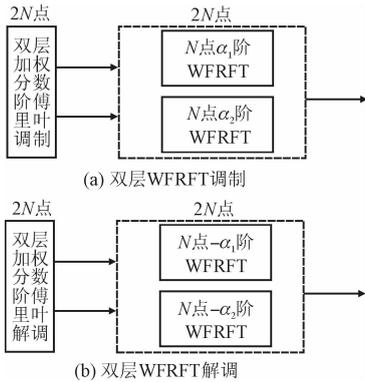


图 5 双层 WFRFT 调制解调示意图

Fig. 5 The schematic diagram of double layer WFRFT modulation and demodulation

由图 5 可以看出,双层 WFRFT 调制有 2 个不同的调制阶数 α ,破坏了 WFRFT 原有特性,同时增加了扫描付出的代价,因此,提高了系统的安全性。

以 2 发 1 收天线为例进行说明,输入数据经过基带映射后为 $2N$ 点序列 $m(n), n=0, 1, \dots, 2N-1$,将连续 N 点数据作为一个数据块 $m_1(n), n=0, 1, \dots, N-1$,将另外连续 N 点作为一个数据块

$m_2(n), n=0, 1, \dots, N-1$ 。对 $m_1(n), m_2(n)$ 分别进行 α_1 阶、 α_2 阶 WFRFT 调制,得到数据块 $M_1(k), M_2(k)$ 。对 $M_1(k)$ 和 $M_2(k)$ 进行空时分组编码,由式(8)可得:

$$\begin{bmatrix} M_1(k) & -M_2^*(k) \\ M_2(k) & M_1^*(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

即在第 1 个周期内天线 1 发射数据块 $M_1(k)$, 天线 2 发射数据块 $M_2(k)$,第 2 个周期内天线 1 发射数据块 $M_2^*(k)$,天线 2 发射数据块 $M_1^*(k)$ 。编码后的信号经过 IFFT 变换后为:

$$\begin{cases} v_{1,1}(n) = \mathbf{F}^{-1}(M_1(k)) \\ v_{1,2}(n) = \mathbf{F}^{-1}(M_2(k)) \\ v_{2,1}(n) = \mathbf{F}^{-1}(-M_2^*(k)) \\ v_{2,2}(n) = \mathbf{F}^{-1}(M_1^*(k)) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $v_{p,q}$ 表示第 p 个周期内天线 q 对应的信号。经过变换后的数据加循环前缀,然后通过对应的天线发送出去。循环前缀的引入使得:一方面避免载波间干扰,另一方面在接收端的序列可等效为发送端序列与信道冲激响应的循环卷积过程。假设信道为慢变信道,及相邻 2 个周期的信道 h 不变。对接收到的信号进行去循环前缀处理,则处理后相邻 2 个周期内接收到的信号分别为:

$$\begin{cases} y_1(n) = v_{1,1}(n)h_1(n) + v_{1,2}(n)h_2(n) + z_1(n) \\ y_2(n) = v_{2,1}(n)h_1(n) + v_{2,2}(n)h_2(n) + z_2(n) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $z_1(n), z_2(n)$ 分别为信道 h_1, h_2 的高斯白噪声。对式(11)进行 FFT 变换,结合式(10),可得:

$$\begin{cases} Y_1(k) = M_1(k)H_1(k) - M_2^*(k)H_2(k) + Z_1(k) \\ Y_2(k) = M_2(k)H_1(k) + M_1^*(k)H_2(k) + Z_2(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $Y_1(k), Y_2(k), H_1(k), H_2(k), Z_1(k), Z_2(k)$ 分别为 $y_1(n), y_2(n), h_1(n), h_2(n), z_1(n), z_2(n)$ 的频域形式。

由文献[22]可知,可对式(12)进行如下变换:

$$\begin{cases} \tilde{Y}_1(k) = \frac{H_1^*(k)Y_1(k) + H_2(k)Y_2^*(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2} \\ \tilde{Y}_2(k) = \frac{H_1^*(k)Y_2(k) - H_1(k)Y_1^*(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2} \end{cases} \quad (13)$$

把式(12)代入式(13),可得:

$$\begin{cases} \tilde{Y}_1(k) = M_1(k) + \frac{H_1^*(k)Z_1(k) + H_2(k)Z_2^*(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2} \\ \tilde{Y}_2(k) = M_2(k) + \frac{H_1^*(k)Z_2(k) - H_1(k)Z_1^*(k)}{|H_1(k)|^2 + |H_2(k)|^2} \end{cases} \quad (14)$$

$\tilde{Y}_1(k), \tilde{Y}_2(k)$ 即为经过空时译码得到的序列,对得到的序列 $\tilde{Y}_1(k), \tilde{Y}_2(k)$ 分别进行 α_1 阶、 α_2 阶 WFRFT 解调、基带逆映射,即得到输出序列。随着发射天线数目的增多,WFRFT 的层数也增多,即调制阶数 α 的数目增多,加密级别更高,窃听方在不知

各层调制阶数 α 的具体值时,根本无法恢复出原始信号。

3 系统性能仿真与分析

为了充分利用频谱资源,卫星转发器通常采用同频极化复用技术,它是指 2 个波束的指向区域可能是重叠的并且使用相同频率,但通过使用不同的极化方式来实现信号之间的隔离。但由于地面发射信号时未调整好极化角或发射功率过高容易产生交叉极化干扰。一般以交叉极化鉴别率来量化交叉极化干扰效应。交叉极化干扰效应对合法方来说,其可靠性会略有下降,对窃听方来说,其解调出的信号误差将更大。

本文首先在瑞利信道下,对双层 WFRFT-MIMO 卫星抗截获通信系统进行仿真。以 2 发 1 收天线为例,参数设置如下,数据块大小为 256 个符号,此时将连续 2 个数据块(512 个符号看作一组),基带映射时,为了分析方便,以 QPSK 为例,进行映射。多径时延为[0 1 2 4 7],相对平均功率增益为[0 -2 -4 -8 -10],由于本文的研究重点是系统的抗截获性,为了研究便利,假设信道为理想估计。在发射端采用多层 WFRFT 来调制信号,增强系统的安全性。在接收端,使用与发射端相一致的调制阶数 α 对数据进行解调。与此同时,窃听方因不知调制阶数 α 的具体值,不得不采用遍历法来扫描正确的调制阶数。多层 WFRFT 调制为加密手段,因此,调制阶数 α 的选取应该具有随机性,使窃听方更加难以破解。

图 6 显示了当进行 WFRFT 解调的调制阶数存在偏差的情况下,系统的误码率(Bit Error Rate, BER)性能。 $\Delta\alpha_1$ 和 $\Delta\alpha_2$ 分别为进行 WFRFT 解调时调制阶数 α_1 和 α_2 的偏差。从图 6 中可以看出,当 WFRFT 解调时调制阶数存在偏差为 $\Delta\alpha_1=0.1$, $\Delta\alpha_2=0.1$ 时,系统性能衰减的特别严重,系统已经不能正常工作。同时合法方因已知 α_1 、 α_2 的具体值,所以可以正确恢复出原始信号。窃听方试图通过遍历法来破解信号的话,如果以 $\Delta\alpha=0.1$ 的间隔进行扫描调制阶数,需要进行 $40 \times 40=1600$ 次,从图 6 中可以看出,当 $\Delta\alpha=0.1$ 时,误码率已经很高了。因此,如果想要获得正确的信号,扫描的次数需要大于 1600 次。为了提高系统的安全性,收发双方以一定的频率进行调制阶数的变化,这样,即使窃听方进行了大量的扫描,只要调制阶数改变的时间小于进行扫描所需付出的时间,窃听方仍然不能破解信号。

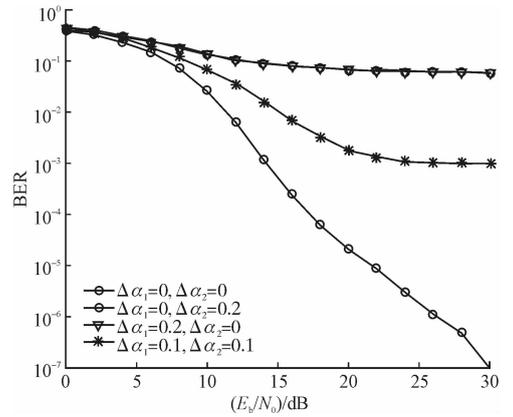


图 6 合法方与窃听方 BER 性能对比

Fig. 6 Contrast of BER performance between legal receiver and eavesdropper

为了确定 WFRFT 解调时调制阶数的偏差对系统安全性的影响,做了下述仿真实验。在这个仿真实验中,我们假设 E_b/N_0 为 30 dB,调制阶数 α_1 、 α_2 的值分别为[0.4, 0.5]。当窃听方不知调制阶数 α_1 、 α_2 的具体值时,窃听方在整个 α 的取值范围内采用遍历法进行扫描。图 7 显示了三维的仿真结果。相较于单层 WFRFT 调制,2 层 WFRFT 调制有 2 个调制阶数,其加密空间扩展了,系统的性能对于调制阶数的敏感性更高。如果采用 3 层、4 层 WFRFT 调制,系统将会有 2 个、3 个调制阶数,其加密空间扩展更大,系统的性能对于调制阶数的敏感性将会比 2 层 WFRFT 更高。因此,采用多层 WFRFT 调制,系统的安全性将更高。

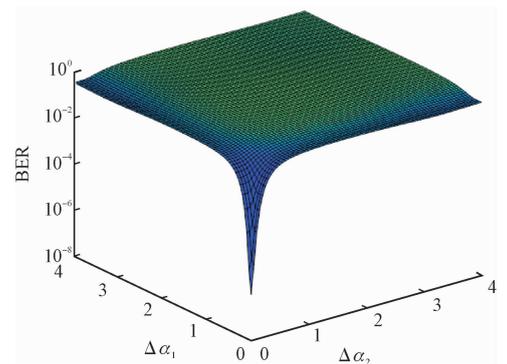


图 7 接收性能与 WFRFT 阶数的偏差关系

Fig. 7 Relationship between receiving performance and WFRFT order deviation

图 8 显示了 WFRFT 分别与 2 发 1 收、3 发 1 收、3 发 4 收天线结合的仿真结果。WFRFT 的层数与发射天线的数目相同,3 种条件下分别为 2 层 WFRFT、3 层 WFRFT、3 层 WFRFT。从图 8 中可以看出,随着收发天线数目的增加,系统的性能在显著增加,符合 MIMO 的理论原理。

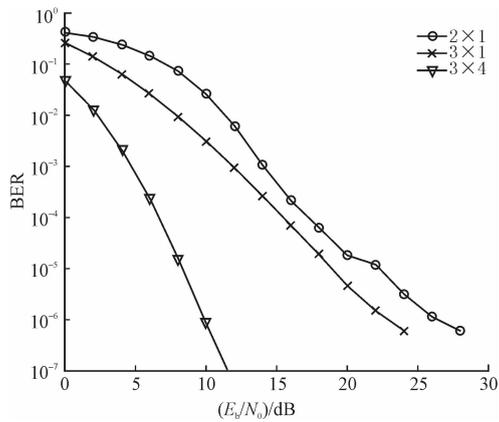


图 8 不同收发天线组的性能对比

Fig. 8 Contrast of BER performance between different receiving and transmitting antenna groups

从上述仿真结果可以看出,当天线数目增多时,系统的性能将得到提升,同时,当 WFRFT 的层数增多时,系统的加密空间更大,系统的性能对调制阶数的敏感性更高。窃听方进行扫描截获信号所需付出的代价将会更大。收发方再以一定的频率改变调制阶数,窃听方几乎不可能破解信号。系统的安全性将得到极大提高。

4 结语

本文提出了一种基于多层 WFRFT-MIMO 的卫星抗截获通信系统,信号经过多层 WFRFT 调制具有抗截获性。在发射端,系统采用多层 WFRFT 调制对信号进行加密,同时采用 MIMO 系统,提高了频谱利用率,增大了系统容量。使用多层 WFRFT 调制,WFRFT 层数越多,系统的加密空间越大,系统的性能对调制阶数的敏感性越高。在接收端,合法方可以正确解调信号。由于信号经过多层 WFRFT 调制,窃听方通过遍历法破解信号所需付出的代价更大,系统的抗截获性更强。

本文的研究重点是系统的抗截获性,假设信道为理想估计,下一步将会对时域均衡、频域均衡以及信道容量进行深入的研究,从而得出时域均衡、频域均衡对系统抗截获性的影响。

参考文献 (References):

[1] 易克初,李怡,孙晨华,等. 卫星通信的近期发展与前景展望 [J]. 通信学报, 2015, 36(6): 2015223-1-2015223-16.
YI K C, LI Y, SUN C H, et al. Recent Development and Its Prospect of Satellite Communications [J].

Journal on Communications, 2015, 36(6): 2015223-1-2015223-16. (in Chinese)

[2] LUTZ E, WERNER, JAHN A. Satellite Systems for Personal and Broad Communications [M]. Berlin: Springer, 2000.

[3] MARAL G, BOUSQUET M. Satellite Communications Systems [M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.

[4] 刘睿,高兴宝. 北斗、GPS 与 GLONASS 组合定位算法[J]. 纺织高校基础科学学报, 2017, 30(3): 379-383.
LIU R, GAO X B. The Integrated Positioning Algorithm of "Beidou", GPS and GLONASS Satellite Navigation System[J]. Basic Science Journal of Textile University, 2017,30(3):379-383. (in Chinese)

[5] KETCHUM J W, WALLACE M, WALTON R J, et al. Pilots for MIMO Communication Systems: CA, EP2363970 [P]. 2013.

[6] LIOLIS K P, PANAGOPOULOS A D, ARAPOGLOU P D M. An analytical Unifying Approach for Outage Capacity Achieved in SIMO and MISO Broadband Satellite Channel Configurations[C]// The 3rd Europ Conf Antennas Propag. EUCAP2009, Berlin, Germany, 2009.

[7] DHUNGANA Y, RAJATHEVA N, TELLAMBURA C. Dual Hop MIMO OSTBC for LMS Communication [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(2): 105-8.

[8] HASAN M, SAGAR S M. Wireless Communication through Long Term Evolution (LTE) over Satellite Channel by Using MIMO-OFDM Model [C]// International Conference on Advances in Electrical Engineering. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2014: 170-175.

[9] 潘申富,王艳君,王赛宇,等. 隐蔽卫星通信终端: CN101505184B [P]. 2012-06-25.
PAN S F, WANG Y J, WANG S Y, et al. Covert Satellite Communication Terminal: CN1015 05184B [P]. 2012-06-25. (in Chinese)

[10] MAGGENTI M A, HA T T, PRATT T. Spread Spectrum Overlay Service in Satellite Communications [C]// Virginia Tech. Piscataway, NJ: IEEE, 1987: 65-69.

[11] MCCARTHY J R. A Direct Sequence Spread Spectrum Overlay for a Satellite Communication System [J]. Journal of Electrical and Electronics Engineering, 1994, 14(4): 262-269.

[12] 赵丽,齐兴斌,李雪梅,等. 基于图像置乱技术融合

- FRFT 的光学图像加密 [J]. 激光杂志, 2014, 35(11): 11-15.
- ZHAO L, QI X B, LI X M, et al. Optical Image Encryption Based on Fusion of FRFT and Image Scrambling Technology [J]. Laser Journal, 2014, 35(11): 11-15. (in Chinese)
- [13] 路向阳. 基于坐标变换的波传播控制及其分数阶 Fourier 分析 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- LU X Y. Wave Propagation Control Based on Coordinate Transformation and Its Fractional Fourier Analysis [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 梅林, 沙学军, 冉启文, 等. 四项加权分数 Fourier 变换在通信系统中的应用研究 [J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(5): 732-741.
- MEI L, SHA X J, RAN Q W, et al. The Research on the Application of 4-WFRFT in Communication System [J]. Science in China Series F: Information Science, 2010, 40(5): 732-741. (in Chinese)
- [15] 张喆, 达新宇, 刘慧军. MAP-WFRFT 卫星信号星座隐蔽特性研究 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017, 29(4): 460-467.
- ZHANG Z, DA X Y, LIU H J, et al. A Study of the Covered Characteristics of MAP-WFRFT Satellite Signals [J]. Journal of Chongqing University of Post and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 29(4): 460-467. (in Chinese)
- [16] MEI L, SHA X J, RAN Q W, et al. The Research on the Application of 4-WFRFT in Communication System [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2010, 53(6): 1251-1260.
- [17] 廉晨. 卫星隐蔽通信 MWFRFT-TDCS 信号特征研究 [D]. 西安: 空军工程大学, 2015.
- LIAN C. Research on MWFRFT-TDCS Signal Characteristics of Satellite Covert Communication [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2015. (in Chinese)
- [18] 刘慧军, 达新宇, 张喆. DL-MPWFRFT 与星座扰乱的卫星隐蔽通信系统 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 73-79.
- LIU H J, DA X Y, ZHANG Z. Satellite Covert Communication System with DL-MPWFRFT and Constellation Scrambling [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 73-79. (in Chinese)
- [19] MCBRIDE A C, KERR, et al. On Namias's Fractional Fourier Transforms [J]. Ima Journal of Applied Mathematics, 1987, 39(2): 159-175.
- [20] SHIH C C. Fractionalization of Fourier transform [J]. Optics Communications, 1995, 118(118): 495-498.
- [21] ARAPOGLOU P, LIOLIS K, BERTINELLI M, et al. MIMO over Satellite: A Review [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(1): 27-51.
- [22] HOFMANN C, STOREK K U, SCHWARZ R T, et al. Spatial MIMO over Satellite: A Proof of Concept [C]//IEEE International Conference on Communications. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2016: 1-6.
- [23] 邱昕, 沙学军, 梅林. 基于加权分数傅立叶变换的混合载波码分多址多天线系统 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(1): 218-222.
- QIU X, SHA X J, MEI L. Hybrid Carrier CDMA Multi-Antenna System Based on Weighted-Type Fractional Fourier Transform [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(1): 218-222. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)