|  |  |
| --- | --- |
| Inline Text Wrapping Picture | Inline Text Wrapping Picture |

硕士研究生学位论文阶段报告

学 号: 2020110006

姓 名: 张彪

学 院: 人工智能学院

专业(领域): 信息与通信工程

研究方向: 多媒体与网络大数据

导师姓名: 别志松

北京邮电大学

2022年11月23日

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 论文题目 | 伪随机预编码通信链路实现 | | |
| 论文类型 | 基础研究 | 选题来源 | 其他 |
| 开题日期 | 2021-12-11 | 是否开题题目 | 是 |
| 论文开始日期 | 2021-12-11 | 报告日期 | 2022-11-22 |
| 报告地点 | 教三812 | 报告时间 | 上午 |
| **研究内容简介**   1. **选题背景**   无人机由于其体积小、部署灵活、零伤亡等优势，符合现代作战理念，已经成信息化战场的一支奇兵，而无人机对地通信和无人机之间通信以及战术自组织网完全依赖它的数据链系统，数据链系统是连通无人机平台和指控中心的纽带，是进行信息共享、监控指挥、打击效果反馈的核心手段，高速数据链是当今世界军事强国在军事通信领域的重点研究对象。数据链的主要目的是解决部队作战的信息交换任务，它的传输规程、链路协议和信息安全等都应满足实时作战的要求，低峰均比、抗截获、大容量实时传输的高速数据链系统能够有效地保障战术信息传输的隐蔽性、可靠性和实时性，是现代信息战能否取胜的关键因素。  随着战场环境的改变，无人机协同化和隐身化的发展趋势，光电传感器和雷达设备性能的提升，数据链面临大容量信息实时交互、低截获、高可靠等诸多挑战，现有数据链已无法满足未来高强度电子对抗的军事需求。一方面，无人机中继节点对地通信的发射机通常安装在无人机上，无人机载体的特点决定了发射机的体积、重量和功耗应当不能过大，而信号的峰均比特性对发射机功率放大器的选配具有决定性作用，为了让传输波形具有更低的峰均比特性和更大的分集获得能力，一味要求传输波形具有完全的单载波特性是不现实的。另一方面，敌对双方的电子对抗和情报分析为了信息保密，均会采用物理层安全加密等技术保障信息传输的安全，与基于密钥体系的传统通信安全技术不同，物理层安全技术利用信道特征来保证信息的传输安全,不需要安全密钥，从而避免了密钥的分发和管理中存在的安全漏洞。传统的无人机隐蔽通信主要通过随机跳码跳频、随机跳时和直接序列扩频等方式实现[1]，然而跳频、直扩等方式隐蔽性不强，容易被敌方截获侦破，同时也无法保证无人机通信传输波形的低峰均比，目前主流的抗截获波形设计策略是将信号参数随机变化或者信号隐藏等方式来降低信号的截获概率。  无人机中继节点对地的链路通信通常采用正交频分复用（OFDM）技术，OFDM技术是一种可以在频率选择性衰落信道中进行高速数据传输的多载波调制技术，其具有频谱效率高、抗多径衰落能力强等诸多优点，然而，OFDM系统最大的一个不足就是传输信号是通过多个子载波的叠加而成的，叠加过程如果多个子载波相位正好同相时，会出现叠加后的信号功率有着极高的峰值，从而导致发射信号过高的峰值平均功率比（peak-to-average power ratio, PAPR），这就对系统内非线性器件提出了很高的要求，如果器件的动态范围不满足要求，会使得信号产生严重的带内失真和带外干扰，从而恶化系统性能。因此，一般在实际的机载OFDM系统中，都需要采用降低PAPR的技术。目前降低OFDM系统的PAPR的方法主要分为四类：第一类是信号预畸变技术，其主要思路是在信号经过非线性器件时，对功率过高的信号进行预畸变，使其功率落入非线性器件的动态范围，常用的预畸变技术包括限幅法（clipping）、压缩扩展法（Companding）等；信号预畸变技术原理简单，复杂度也低，但是该类技术对信号进行了非线性处理，会一定程度上降低OFDM系统的频谱性能和误码率性能；第二类是扰码类技术，该类技术的基本思路是使用扰码对OFDM信号进行加权处理产生备选序列，然后使用峰均比最优的序列来传输，减少高峰值信号出现的概率，目前典型的扰码类技术包括选择性映射（Selective Mapping, SLM）、部分传输序列（Partial Transmit Sequence, PTS）、交织（Interleaving）等，扰码类技术的主要不足在于其实现复杂度搞且一般需要额外的边带信息；第三类为编码类技术，编码类技术的思想是通过分组编码来避免传输高峰值功率的码字以降低信号的PAPR，通常通过冗余信息来生成较低PAPR的时域信号，目前主流的编码方式有分组编码（Block Coding）、雷德米勒码（Reed-Muller）等，但该类技术的编解码实现复杂度较高，尤其当子载波数较大时，其计算复杂度很大提升，因此编码类技术在子载波数目较多的系统中应用一直存在困难；第四类为预编码技术，其基本思路是通过矩阵变换的方式构造编码矩阵，用编码矩阵对原始的基带调制信号进行预编码处理，接收端进行相应的反变换即可恢复出原始信号，目前学界已有的几种主流的正交预编码矩阵，一般是由比较经典的离散化变换、或者非常直观的规律变换而来。经典的正交变换离散化有离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform, DFT）、离散余弦变换（Discrete Cosine Transform, DCT）；而由直观规律迭代获得的正交矩阵例子有旋转矩阵（givens矩阵）、初等反射矩阵（householder矩阵）、沃尔什-哈达玛矩阵（Walsh-Hadamard Transform, WHT）。与其他峰均比抑制技术相比，预编码技术具有较低的实现复杂度，此外，在编解码矩阵已知时，系统无需传输额外的边带信息。  基于上述研究背景，本文针对无人机中继节点对地通信高速数据链的现有架构，从正交预编码的角度研究了PAPR约束下基于变换编码的传输波形的优化设计，提出了一种基于具有理想周期自相关函数（periodic auto-correlation function, PACF）的完备高斯整数序列和它循环移位后的线性组合构造正交预编码矩阵的方法，该种构造方法一方面可以很好的降低传输波形的PAPR，另一方面，该方法易于与物理层加密算法相结合，可以很好的实现空口信号的隐蔽性，大大提高了无人机对地隐蔽通信中波形的抗截获能力，具有十分广阔的应用前景。  通过该种预编码方式构造了具有低峰均比的多模态编码矩阵图样，称之为高斯预编码矩阵，将该矩阵图样施加在基带调制信号后，由于预编码矩阵的每行每列的非零元素个数、非零元素所在位置等参数均受控，预先通过动态调整预编码矩阵的稀疏程度，同时保证预编码矩阵的正交性，能够让使用该类预编码矩阵进行调制的传输波形在保证较低PAPR的同时还能具有可控的伪随机特性，即可以通过动态改变生成预编码矩阵算法的某些特性参数来扰乱基带调制信号的星座图，从而使得空口发射信号具有较高的抗截获能力，即使通信系统的基本样式、基带调制方式等均被非授权用户获取，由于预编码矩阵的未知性和时变的伪随机性，在非授权用户对预编码矩阵参数未知或者部分参数未知的情况下，是无法正常解调出基带信号的，这极大地保障了无人机对地和无人机之间隐蔽通信等场景下的信息安全。  另一方面，由于构造出的预编码矩阵为酉矩阵，接收端只需要增加一次预编码逆矩阵的乘法操作便能够快速恢复出原始基带调制信号，这极大地降低了接收端空口信号解调的实现复杂度。另外，预编码过程是将原来的单个子载波传输的符号扩散到了不同的子载波上进行传输，使得原始的符号获得一定的频率分集能力，从而可以更好地抵抗频率选择性衰落，以达到频率选择性信道等不同场景下的多模态子载波信号传输要求。  随着超第五代通信技术（Beyond 5th-Generation,B5G）和第六代通信技术（6th-Generation,6G）的到来,无线通信系统将致力于提供超高吞吐量和超低延迟服务。快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform-FFT）作为5G中最重要的算法之一,被广泛应用于通信系统中,特别是多输入多输出正交频分复用（Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing MIMO-OFDM）系统。随着带宽、传输流和天线数量的增加,对FFT运算的计算量和时延的挑战也越来越大,传统的FFT架构难以满足高速、高性能和低开销的要求。为了解决传统FFT计算能效、硬件效率低等问题，基于性能、速度的考虑，采用混合缩放和旋转（Mixed-Scaling-Rotation）的CORDIC算法[1]的旋转因子蝴蝶处理单元（PE），避免了传统的乘法累加单元，只使用加法移位运算来计算三角函数；其次还采用的分级存储并行运算的FFT算法[2]，以降低存储器的访问次数。   1. **研究内容**   本文主要实现具有峰均比约束与抗截获性能的伪随机预编码算法的FPGA实现以及FFT/IFFT处理器优化设计。  伪随机预编码算法旨在优化编码矩阵，以此将无人机对地通信和机间通信波形的PAPR限制在一定范围内，以解决无人机中继节点対地通信的传输波形高峰均比问题和信号隐蔽性问题，接下来介绍算法的四个方面：  （1）预编码矩阵构造方法  由文献[3]知，预编码矩阵的构造应满足以下两条设计原则：  （a）预编码矩阵元素呈周期分布  （b）预编码矩阵应为正交矩阵  本节在满足上述设计原则的情况下主要聚焦于在对信号的峰均比做一定限制的同时构造多模态的低复杂度正交预编码矩阵，使得预编码后的基带调制信号具有较低的PAPR，同时尽可能提高调制信号的星座图置乱效果，增强空口波形在传输过程中的抗截获性能。  （2）星座图扰乱加密算法  本算法从物理层安全加密的角度出发，主要保证在实现动态扰乱星座图加密的效果同时保证不改变预编码矩阵低PAPR的特性，传统的物理层星座置乱方法是通过在调制波形加入人工噪声，但这种方式会增加发射功率，不利于降低信号的峰均比，本文从正交预编码的角度提出一种星座图扰乱加密算法，可以从根本上解决无人机通信传输波形的高峰均比和易截获的问题，在不损失发射功率的情况下实现星座图良好的置乱效果。该算法的核心思想是通过伪随机序列控制预编码矩阵的非零元素的幅度和相位以及非零元素的个数与位置发生随机变换，将预编码矩阵左乘到基带调制信号后使得调制信号的星座图形状发生改变，达到物理层加密的目的。  （3）计算复杂度分析  本节主要分析构造出的预编码矩阵的计算复杂度，包括：发射机和接收机端的复数加法和复数乘法次数，同时与现有的预编码方案如Walsh-Hadamard编码、T-OFDM编码等进行复杂度分析对比。  （4） 仿真定量分析  通过MATLAB进行仿真定量分析，验证本文所提出的物理层加密的高斯预编码算法的具体性能，主要从以下三个方面进行性能对比：系统峰均比性能、星座图置乱效果以及系统的误码率性能。  a）PAPR性能：分析提出的高斯预编码后的传输波形的PAPR，与传统OFDM信号以及采用其他预编码方式的波形的PAPR进行对比，给出仿真性能图。  b）星座图置乱效果：分析编码矩阵非零元素个数和星座图置乱效果以及PAPR的定量关系，为了定量分析这几者的关系，这里需要给出星座图置乱效果度量参数：高斯-相似度（Gaussian similarity, GS），该参数定义为：预编码后的传输波形与服从高斯分布的噪声的概率密度函数PDF每一点的差值。分析预编码后的波形的高斯-相似度以及加密后的星座点在仿真图上的置乱效果。  c）误码率性能：分别在AWGN信道、瑞利信道以及莱斯信道等不同信道条件对上述预编码算法进行误码率性能的仿真分析。   1. **关键技术** 2. 混沌序列的生成及性质   本文采用一维非线性Logistic混沌映射模型生成伪随机正交预编码矩阵的所需三组特性参数，其迭代方程如下：  (3-1)  其中，为分支参数，当时，系统处于混沌状态，当时，称为满映射迭代形式，本文选取分支参数。给定四组范围内的初始值作为Logistic映射的种子密钥，利用式（3-1）迭代计算生成混沌序列。三组混沌序列用于产生伪随机预编码算法的三组伪随机特性参数：相位扰乱因子、幅度因子控制向量、循环移位次数控制向量。  Step1：给定三组不同的初始值作为混沌系统的初始值，同时作为收发两端的共享安全秘钥，利用式子（3-1）迭代若干次，生成三组超混沌序列；  Step2：分别兑三组超混沌序列进行整数化处理，得到；  Step3：将弧度分割，通过 转换公式生成最终的相位扰乱因子，通过转换公式生成幅度因子控制向量 ，R位分割区间数；  Step4： 将上述超混沌系统生成的三组伪随机参数（相位扰乱因子、循环移位次数控制向量、幅度因子控制向量）输入到伪随机正交预编码算法中。   1. 高斯预编码矩阵生成算法   在介绍使用完备高斯整数序列和它循环移位的线性组合构造高斯预编码矩阵前，先引入以下几个定义：  **定义1：**设序列和是两个周期为N的时间离散复数序列，则序列和的周期互相关函数（periodic cross-correlation function, PCCF）定义为：    其中，表示共轭复数，表示模N运算，当时，为序列的周期自相关函数（periodic auto-correlation function, PACF），记作。  **定义2：**若时间离散复序列的周期自相关函数满足下式：    其中，为序列的平均能量，是一个正实数，则称序列为完备序列（Perfect Sequence）。  本文提出使用2组不同的基序列构造新的完备序列，这些序列的非零元素均属于集合，其中，为相位扰乱因子，通过将这些基序列或它们的循环移位与任意等幅的非零复系数进行一定的线性组合，即可得到上述定义2提出的完备序列。  特别地，如果复系数为高斯整数，则得到的序列是具有理想PACF的高斯整数序列，这里称之为完备高斯整数序列（Gaussian Integer Perfect Sequences, GIPSs），高斯整数序列是一类实部和虚部均为整数的复数序列，与传统序列相比，高斯整数序列不再限制序列的幅度值，可以同时利用载波的幅度和相位传输信息，在相同序列长度的情况下，使用高斯整数序列可以增加带宽利用率，提高数据传输速率。下面基于完备的高斯整数序列GIPSs进行高斯编码矩阵图样的设计与构造。  本文提出的使用高斯预编码矩阵的系统架构如下图1所示，发送端原始的信息符号向量，通过基带调制后乘以高斯编码矩阵得到发射的空口时域信号：    假设接收端可实现理想同步，则接收端收到的空口时域信号可表达如下：    其中，表示循环卷积，为信道冲激响应，，这里为均值为0和方差为的独立复高斯随机变量，，为信道多径数量，为的循环矩阵，该矩阵的第一列具有如下形式：    为均值为0和方差为的加性高斯白噪声 (AWGN)的时域向量。    图1 高斯矩阵预编码系统基本架构  高斯预编码矩阵由具有理想自相关函数的完备高斯整数序列构造得到，其中序列包含 2组基序列和它们的循环移位，基序列构造如下，每个基序列构造的长度为，序列的第1个元素和第N/2个元素为，其他元素位置均为0。      其中，为相位旋转因子，该参数受一组伪随机序列控制，表示序列的转置。  将上述构造的基序列集合合并为统一的表达式，统一后的基序列第个元素表达如下：    其中，，为单位冲激函数，表示向下取整。  首先通过预先生成的两组伪随机序列分别控制两组基序列的循环移位次数控制向量和幅度因子控制向量，分别对两组基序列的每个元素循环移位次数控制向量后取模，然后进行幅度因子控制向量的线性加权，生成最终的序列，通过该种方式构造出的序列具有完备的理想自相关函数PACF，第个元素表达如下：    其中，，，这里的为幅度控制因子，表示模N运算,为基序列的循环移位次数，且满足。  最终，构造的高斯预编码矩阵由序列s循环移位后再进行矩阵的列交织得到，未经列交织的预编码矩阵为多路对角阵，矩阵表达如下：    其中，表示对序列s进行q次循环移位，。  下图是根据上述编码方式随机生成的一个高斯正交预编码矩阵（N=256，相位旋转因子，幅度控制因子，基序列的循环移位次数z1=N/2,z2=N/4，通过这种方法构造出的预编码矩阵无论是否进行列交织，均为循环矩阵和酉矩阵，矩阵的每一列均为完备的高斯整数序列GIPSs，且矩阵的每行、每列至多有4个非零元素，该非零元素属于集合。将该矩阵图样施加在基带调制信号上后，时域信号的动态范围将远小于传统的OFDM系统，因此可以保证编码后的传输波形较好的PAPR性能，由于完备高斯整数序列自身的理想自相关特性，序列所有元素在傅立叶变换之后都具有恒定的幅度，通过该序列构造的预编码矩阵的非零元素归一化后的幅值均为1/2，这进一步降低了信号传输的BER。  同时，通过这种变换编码方式构造出的高斯预编码矩阵每一行的绝大多数元素都是0，这保证了编码矩阵的高度稀疏性，使得发射机只需要较少的复乘操作就可以完成上述的预编码过程，由于该矩阵为酉矩阵，因此，当接收端收到发送端发来的时域空口信号时，只需进行一次解码逆矩阵乘法操作，这极大地简化了接收端解码的实现复杂度。     1. 星座图   **四、研究及论文计划**  论文结构和章节安排如下：  第一章为绪论，概括性地介绍了无人机通信的发展历史和未来的发展趋势、阐述了无人机数据链OFDM系统目前所存在的高峰均比问题和面临的物理层安全问题并以及国内外物理层安全的研究现状，同时也总结了基于无人机通信OFDM系统的物理层安全算法，最后介绍了论文的主体思路和结构，并对各章内容做简要介绍。  第二章为OFDM系统的峰均比抑制技术，首先介绍了峰均比的定义，OFDM峰均比问题出现的根本原因，然后对OFDM峰均比抑制技术展开讨论，随后分析了过采样以及子载波个数对OFDM的PAPR的影响，本章介绍了目前国内外峰均比抑制技术的研究现状并详细介绍了四种主流的峰均比抑制技术，并对其中的算法进行了仿真分析。  第三章介绍基于预编码的峰均比抑制和物理层加密技术，首先对于基于预编码的峰均比抑制技术进行了介绍，包括预编码技术的基本原理和预编码矩阵的设计原则，然后介绍了几种常用的预编码方案并对其峰均比性能、误码率性能进行了仿真分析；之后介绍无人机通信物理层安全加密的常用算法，理论分析和仿真加密算法对系统的误码率和峰均比的影响。  第四章介绍本文提出的物理层加密的低复杂度高斯预编码算法，该章首先详细介绍了基于正交预编码的思想提出的高斯预编码矩阵的生成算法，综合对比本文提出的预编码方案和其他不同预编码方案如DPSS编码、Givens编码、Walsh-Hadamard编码等的峰均比性能、误码率性能以及收发两端实现的计算复杂度，最后介绍提出的基于上述高斯预编码矩阵设计的星座图扰乱物理层加密算法，并通过仿真进行验证提出的加密算法的星座图置乱效果性能。  第五章为总结与展望，本章总结了全文的研究工作，并对论文中的不足之处进行了分析，最后针对未来该问题领域内有价值的研究方向进行需要解决的问题进行了展望。  **五、论文进度及目标**  2020.12-2021.02 阅读该领域内的相关参考文献，了解无人机通信的研究现状、物理层安全加密相关研究的热点内容，查找收集并阅读基于预编码的峰均比抑制技术的相关资料，找到合理的研究方向和论文创新点，并制定合理的研究计划。  2021.03-2021.05 对现有基于正交预编码的峰均比抑制技术和物理层加密算法用于无人机通信场景进行可行性研究，探索基于完备高斯整数序列构造的预编码矩阵是否能满足预期要求，并进行预编码矩阵PAPR和伪随机性的初步的仿真验证。  2021.06-2021.08 深入研究基于高斯预编码的峰均比抑制算法和常用的物理层星座图扰乱加密算法的原理，对其中的原理进行公式推导和理论研究，并开始着手搭建matlab仿真验证平台，对不同的正交预编码方案包括本文提出的高斯预编码以及Walsh-Hadamard编码等进行PAPR性能的仿真对比，给出基本的仿真结果。  2021.09-2021.12 进一步完善上述matlab仿真验证平台，完成物理层星座图扰乱加密算法的性能、误码率性能的仿真验证工作以及高斯预编码矩阵的计算复杂度分析。  目前论文的大致提纲和每章节的内容基本确定，理论计算已基本完成，但是还需要仿真结果进行数据支撑，对于已经完成的理论工作和仿真，需要进行内容上的合理组织和安排。已经完成了部分实现工作，对于还在进行中的小部分内容，会在已经确定的算法设计基础上完成，并在完成后增加到论文中。  后续还需要进行的工作：  （1）继续完善matlab仿真平台，搭建从发射机到信道再到接收机的完整链路，对构造的高斯预编码矩阵进行计算复杂度的分析，给出理论上的复乘和复加次数，并与其他预编码方案进行复杂度对比。尝试构造不同的伪随机序列如混沌序列等控制预编码矩阵的相位旋转因子等特性参数，从而生成具有伪随机性可控的高斯预编码矩阵，进行星座图扰乱的性能仿真分析，在不同信道条件下进行误码率的仿真分析。  （2）对上述所做的工作进行梳理总结，开始完成大论文。  （3）对于还未完成的内容，进行相关代码编写和内容归纳总结。  （4）完成论文内容后，进行语言润色和格式调整等。 | | | |
|  | | | |

|  |
| --- |
| **论文进展情况**  **一、研究工作计划**  第一阶段（2020年12月-2021年2月）：阅读相关参考文献，了解无人机通信的研究现状、物理层安全加密相关研究的热点内容，查找收集并阅读基于预编码的峰均比抑制技术的相关资料，找到合理的研究方向和论文创新点，并制定合理的研究计划。  第二阶段（2021年3月-2021年4月）：对现有基于正交预编码的峰均比抑制技术和物理层加密算法用于无人机通信场景进行可行性研究，探索基于完备高斯整数序列构造的预编码矩阵是否能满足预期要求，并进行预编码矩阵PAPR和伪随机性的初步的仿真验证。  第三阶段（2021年5月-2021年7月）：深入研究基于高斯预编码的峰均比抑制算法和常用的物理层星座图扰乱加密算法的原理，对其中的原理进行公式推导和理论研究，并开始着手搭建matlab仿真验证平台，对不同的正交预编码方案包括本文提出的高斯预编码以及Walsh-Hadamard编码等进行PAPR性能的仿真对比，给出基本的仿真结果。  第四阶段（2021年8月-2021年11月）：进一步完善上述matlab仿真验证平台，完成物理层星座图扰乱加密算法的性能、误码率性能的仿真验证工作以及高斯预编码矩阵的计算复杂度分析。  第五阶段（2021年12月-2022年2月）：完成所有性能仿真以及实验结果分析整理，完成论文撰写工作，准备毕业设计答辩。  第六阶段（2022年3月）：准备审核，进行答辩。  **二、研究工作实际开展情况**  研究工作计划中的一、二、三阶段已经完成，第四阶段matlab仿真平台中的发射端已基本搭建完成，后续需要搭建整个从信道到接收机的验证平台，分析提出的高斯预编码生成算法的误码率性能以及定量分析伪随机序列生成的预编码矩阵对星座扰乱效果的性能。 |
| **工作成果**  **一、已完成研究工作**  （1）前期论文阅读和理论学习：完成了三十余篇本领域最新论文的阅读研究工作，包括：无人机通信中的峰均比抑制技术、物理层安全加密算法、正交预编码等。关于本论文创新点的可行性进行了前期调研和理论验证。  （2）算法推导和搭建MATLAB仿真验证环境：完成了高斯预编码矩阵的生成算法的公式推导和代码编写工作，给出了PAPR性能仿真分析，目前对预编码的物理层星座图加密置乱算法还需要进一步验证和完善，需要给出定量分析置乱效果的指标并进行仿真。  **二、取得的阶段性成果**  目前已完成高斯预编码矩阵生成算法的公式推导、星座图扰乱加密算法的整体流程以及初步完成了发射端链路的matlab仿真验证环境，对提出的高斯预编码矩阵的PAPR性能、星座图置乱效果进行了初步仿真分析。  （1）PAPR性能分析  下图为采用高斯预编码矩阵的传输波形与采用传统OFDM调制的PAPR仿真性能对比，系统具体仿真参数如下：调制方式16QAM，系统子载波数N=16，每个子载波包含的符号数N\_sym=16，发送的数据帧数N\_fram=50000，相位旋转因子，幅度控制因子。  （a）基序列循环移位次数  通过上述参数生成的高斯预编码矩阵每行每列的非零元素个数为4，保证了预编码矩阵的稀疏性，相比于传统OFDM信号的CCDF，基于高斯编码的传输信号的CCDF取值随着门限值的增大衰减更加迅速，在系统子载波为16的条件下，当CCDF达到时，使用高斯预编码进行波形传输的PAPR对应的门限值比传统OFDM约低4dB，可以看出，结合高斯预编码进行基带信号的传输可以获得很好的峰均比抑制效果。    （b）基序列的循环移位次数  将基序列的循环移位次数更改为时，生成的高斯预编码矩阵每行每列的非零元素个数为2，在保证预编码矩阵为酉矩阵的同时进一步降低了传输波形的PAPR，由下图可以看出，当CCDF达到时，使用高斯预编码进行波形传输的PAPR对应的门限值比传统的OFDM调制低7dB左右，可见，高斯预编码矩阵的稀疏性如矩阵非零元素的个数对时域信号的PAPR起着决定性的作用，本文提出的高斯预编码方式在能够动态调整矩阵的非零元素个数、非零元素所在位置、非零元素的大小等参数的同时还能保证矩阵的正交性，这对于接收端的信号解码有着极大的好处，假设收端能实现理想同步，只需要乘以编码矩阵的逆即可恢复出原始基带信号；另外，由于正交矩阵的稀疏度决定着信号的分集能力，通过动态调整高斯编码矩阵的非零元素个数和位置，可以在某种程度上获得一定的频率分集增益。    （2）星座图置乱效果分析  为了能够定量分析预编码后空口信号星座图的置乱效果，引入高斯-相似度参量，定义为：预编码后的时域信号与服从复高斯分布的噪声概率密度函数PDF的相似程度，定义为类高斯度（Gaussian Similarity, GS）。  经过16QAM调制的信号左乘正交预编码的星座图如下图所示，可以看出，经过预编码后的星座图已经变得混乱无序，相位扰乱控制因子不同，基序列循环移位次数的参数z不同，变换后的星座图也不同。窃听方在不知道预编码矩阵图样的受控参数和变换形式，是无法恢复出原始信号的。  （a）相位旋转因子，幅度控制因子，基序列循环移位次数   |  |  | | --- | --- | | 1. 16-QAM原始星座图 | 1. givens预编码后的星座图 | | 1. DPSS预编码后的星座图 | 1. 高斯预编码后的星座图 |   **三、主要创新点**  （1）首次将基于完备高斯序列构造的高斯预编码矩阵应用在对无人机对地通信中，一方面可以对传输波形的峰均比做一定限制，同时还能实现基带调制信号的星座扰乱效果，另外，构造的高斯预编码矩阵还具有较低的实现复杂度，这在以往的论文中是没有出现的，多数论文主要关注的都是峰均比或者单纯的物理层星座扰乱加密的实现；  （2）首次从物理层加密的角度基于预编码的方式生成伪随机序列如混沌序列来控制高斯预编码的某些特性参数如相位旋转因子、循环移位次数控制向量以及幅度因子控制向量，从而动态改变预编码矩阵的非零元素的位置以及个数，当将基带调制信号左乘构造的伪随机预编码矩阵后，可以良好的置乱基带调制信号的星座图并给出扰乱效果定量参数：高斯-相似度，从而实现传输波形的抗截获。 |

|  |
| --- |
| **计划及进度安排**  2021.10-2021.12 继续完善matlab仿真平台，搭建从发射机到信道再到接收机的完整链路，对构造的高斯预编码矩阵进行计算复杂度的分析，给出理论上的复乘和复加次数，并与其他预编码方案进行复杂度对比。尝试构造不同的伪随机序列如混沌序列等控制预编码矩阵的相位旋转因子等特性参数，从而生成具有伪随机性可控的高斯预编码矩阵，进行星座图扰乱的性能仿真分析，在不同信道条件下进行误码率的仿真分析。  2022.1-2022.2 对上述所做的工作进行梳理总结，整理仿真结果，梳理整体方案，开始着手完成学术论文的撰写；完成论文内容后，进行语言润色和格式调整等  2022.3 准备论文预审和答辩等。 |
| **问题及整改方案**  问题和困难：  （1）未加入伪随机序列控制预编码矩阵的特性参数：已完成高斯预编码矩阵的公式推导和算法仿真，但是还没有加入伪随机序列控制预编码矩阵的相位旋转因子、循环移位次数控制向量以及幅度因子控制向量，目前这几个参数给的是固定值，初始伪随机参数对置乱效果和PAPR的抑制，二者还没有找到一个很好的平衡点；  （2）扰乱星座图加密算法效果分析：目前还没有分析预编码矩阵的非零元素个数、位置与调制信号的星座图置乱效果以及PAPR的定量关系，如预先给定PAPR约束，什么样的参数星座图置乱效果更好。  整改方案：  针对问题（1），需要再研究一下什么伪随机序列更加适配本文提出的高斯预编码矩阵，目前已想到的是利用性能优秀的混沌序列来控制预编码矩阵的3个特性参数，后续其他伪随机序列也需要尝试一下。  针对问题（2），需要通过公式推导和算法仿真找到预编码矩阵的非零元素个数，从目前的仿真结果看，相位旋转因子对PAPR的抑制效果有限，PAPR的上界主要还是取决于预编码矩阵的非零元素个数，但是相位旋转因子可以有效地对调制信号的星座图进行扰乱，后续研究过程中准备定义一个衡量星座图置乱效果的参数：高斯-相似度，预编码后的信号与服从高斯分布的噪声的概率密度函数PDF的差值，通过该参数定量衡量本文提出的星座图扰乱加密算法的效果。同时还需要研究一下如何在PAPR和扰乱效果中进行权衡，找到最佳的平衡点。 |

|  |
| --- |
| **参考文献**   1. Zhi-Xiu Lin and An-Yeu Wu, "Mixed-scaling-rotation CORDIC (MSR-CORDIC) algorithm and architecture for scaling-free high-performance rotational operations," 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03)., 2003, pp. II-653, doi: 10.1109/ICASSP.2003.1202451. 2. 刘志哲,仲顺安.基于分级存储并行运算的FFT处理器设计[J].北京理工大学学报,2011,31(06):691-694.DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2011.06.012. 3. 刘明辉. 无人机高速数据链关键技术研究[D].西安电子科技大学,2019. 4. 谢岸宏,朱立东,翟继强,李雄飞.卫星通信抗截获信号波形设计[J].电讯技术,2018,58(03):269-275. 5. 李勇,修春娣,张震华.OFDM无人机数据链系统峰均比问题研究[J].微计算机信息,2010,26(10):196-198. 6. Kang C, Liu Y, Hu M, et al. A low complexity PAPR reduction method based on FWFT and PEC for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2017, 63(2): 416-425. 7. 王策. 卫星隐蔽通信系统的研究与实现[D].西安电子科技大学,2020. 8. 雷蓓蓓. 基于物理层加密的调制方式隐蔽算法研究[D].西北大学,2012. 9. Hu W W, Wang S H, Li C P. Gaussian integer sequences with ideal periodic autocorrelation functions[J]. IEEE transactions on signal processing, 2012, 60(11): 6074-6079. 10. Wang S H, Li C P, Lee K C, et al. A novel low-complexity precoded OFDM system with reduced PAPR[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(6): 1366-1376. 11. Baojian G, Yujie W, Yongling L, et al. A hiding algorithm for OFDM constellation mapping based on wireless physical layer encryption[J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 13(18): 3790-3797. 12. Sultan A, Yang X, Hajomer A A E, et al. Chaotic constellation mapping for physical-layer data encryption in OFDM-PON[J]. IEEE photonics technology letters, 2018, 30(4): 339-342. 13. Ahmed M S, Boussakta S, Sharif B S, et al. OFDM based on low complexity transform to increase multipath resilience and reduce PAPR[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(12): 5994-6007. |
| |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | 姓 名 | 职 称 | 职务 | 导师类型 | 工 作 单 位 | | 别志松 | 副教授 | 组长 | 硕导 | 北京邮电大学 | | 龚萍 | 副教授 | 成员 | 硕导 | 北京邮电大学 | | 林雪红 | 副教授 | 成员 | 硕导 | 北京邮电大学 | | 王思野 | 副教授 | 成员 | 硕导 | 北京邮电大学 |   **评审小组** |

|  |
| --- |
| **导师评语**  廖进同学自开题以来，围绕峰均比约束下的新型调制波形设计这一课题开展了深入的研究，已经完成了仿真平台的搭建和高斯预编码的峰均比抑制算法等研究工作。遗留问题解决方案详尽可行，可以按期完成论文工作，通过论文阶段检查。 |
| 导师：  日期： 年 月 日 |
| **阶段报告小组意见：** |
| 负责人：  日期： 年 月 日 |
| **学院意见：** |
| 负责人：  日期： 年 月 日 （签章） |