

# 高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统设计

赛燕燕

(烟台职业学院 信息工程系, 山东 烟台 264670)

**摘要:** 在高动态环境下, 短猝发信号传输过程中往往会产生普勒频偏, 增加扩频信号的捕获时间, 甚至降低信号捕获信噪比, 为实现对扩频自适应信号的快速、有效捕获, 设计高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统; 系统硬件采用模块化设计方式, 改装信号接收模块和滤波模块, 从信号缓存和锁相环两个方面调整系统电路; 在硬件系统支持下, 通过扩频过程的模拟确定高动态短猝发扩频信号特征, 通过特征匹配实现对高动态环境中短猝发扩频信号的自适应搜索; 计算捕获长度、频率、门限等参数, 实现系统的短猝发扩频自适应信号快速捕获功能; 实验结果表明, 在无噪声条件下, 优化设计系统输出扩频信号信噪比的平均值为 141.6, 捕获时间平均为 8 s, 捕获面积平均为 90 km<sup>2</sup>; 在有噪声条件下, 系统输出扩频信号信噪比的平均值为 121.8, 捕获时间为 10 s, 捕获面积为 130 km<sup>2</sup>。

**关键词:** 高动态短猝发信号; 扩频信号; 自适应信号快捕; 多普勒频偏

## Design of High Dynamic Short Burst Spread Spectrum Adaptive Signal Fast Capture System

SAI Yanyan

(Department of Information Engineering, Yantai Vocational College, Yantai 264670, China)

**Abstract:** In high dynamic environments, the transmission process of short burst signals often produces Puller frequency offset, increasing the acquisition time of spread spectrum signals, and even reducing the signal-to-noise ratio of signal acquisition. In order to achieve fast and effective acquisition of spread spectrum adaptive signals, a high dynamic short burst spread spectrum adaptive signal fast acquisition system is designed. The system hardware adopts a modular design approach to modify the signal receiving module and filtering module, and adjust the system circuit from two aspects: signal buffering and phase-locked loop. Supported by the hardware system, the characteristics of high dynamic short burst spread spectrum signals are determined through the simulation of the spread spectrum process, and the adaptive search of short burst spread spectrum signals in high dynamic environments is achieved through the feature matching. The capture length, frequency, threshold and other parameters are calculated to achieve the system's fast capture function of short burst spread spectrum adaptive signals. The experimental results show that under the condition of no noise, the average signal-to-noise ratio of the optimized design system's output spread spectrum signal is 141.6, the average capture time is 8 s, and the average capture area is 90 km<sup>2</sup>; Under noisy conditions, the average signal-to-noise ratio of the system's output spread spectrum signal is 121.8, the capture time is 10 s, and the capture area is 130 km<sup>2</sup>.

**Keywords:** high dynamic short burst signal; spread spectrum signal; adaptive signal fast capture; Doppler shift

## 0 引言

在卫星通信等高动态环境下, 接收机会产生很大的多普勒频偏, 甚至是伪码频偏, 且随着空域暴露时间的延长, 其频谱更易被定位和捕获, 且抗干扰能力更弱。为了确保高动态通信信号的质量和安全性, 通常使用短猝发通信模式, 即将原始信息以极高的数据率在随机时间点上集中地传送, 常被用来实现隐蔽通信<sup>[1]</sup>。短猝发通讯可以提高传输速度, 缩短信号的总时长, 让信号在空气中一闪即逝, 从而降低了敌方通信设备的发现几率, 提高了破解的难度。在高动态通信环境中, 短猝发信号在提高通信安全性的基础上, 也为通信目标终端的信号接收工作带来较大难度, 为保证

目标终端能够对高动态短猝发信号成功接收, 需对信号进行扩频处理。扩频通信被广泛用于卫星测控、军用通信和武器制导等诸多军事技术领域。在高动态和低信噪比的突发性通信中, 如何对短猝发扩频信号进行快速精确捕获和补偿, 是实现在高动态和低信噪比条件下获取准确信号的关键技术。扩频通信环境中, 接收信号首先需要进行捕获, 且对捕获的速度和准确度提出更高要求。

当前已有相关领域学者对短猝发扩频信号捕获方法作出了研究。文献 [1] 提出基于快速傅里叶变换的扩频信号快捕算法, 利用 FFT 运算同步, 实现完全相干积累, 提升信号的载噪比; 利用时-频并行处理, 提升数据的处理效

收稿日期: 2023-06-21; 修回日期: 2023-07-24。

基金项目: 烟台职业学院横向课题(HX202246)。

作者简介: 赛燕燕(1987-), 女, 硕士, 讲师。

引用格式: 赛燕燕. 高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 213-219.

率；在微弱信号环境下，最大程度地优化数据的捕获。文献 [2] 提出的低轨星座短报文通信中的扩频信号二维快捕方法，对多普勒特征对低空轨道卫星扩频信号进行快速捕捉的影响进行分析，提出一种将双倍采样、部分匹配滤波和快速傅里叶变换相结合的捕捉方案，并将其与决策导向的同步技术相结合，得出信号捕获结果。文献 [3] 提出一种相干累积，对中频信号进行两次重复取样后，可以应用 FFT 变换；之后，将中频信号与 PN 码共轭相乘，然后进行快速傅立叶逆变换，最后，按照行存列取的方式，对多路相关结果进行 FFT 变换，实现相干累积，并使用峰平均比来评判是否成功捕获信号。利用高斯白噪声的特点，通过相干积累，可以在不积累噪音的情况下，积累出信号的能量，从而可以捕捉到微弱扩频信号。然而上述传统信号捕获方法存在捕获质量差、捕获速度慢等问题，为此设计并开发了高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统，以期能够在保证信号捕获质量的同时，缩短捕获工作时长。

## 1 高动态短猝发扩频自适应信号快捕硬件系统设计

此次高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统的优化设计主要分为两个部分，分别为硬件系统设计和软件功能设计，其中硬件系统主要用来为软件功能提供支持，而软件功能来执行高动态短猝发扩频自适应信号快捕任务<sup>[2]</sup>。模块化设计思路能够有效地降低各子模块间的功能耦合性，为系统的优化和升级提供便利；能够使单一子模块具有更小的尺度，更好地降低和消除其潜在的缺陷；同时有助于故障的快速定位，提升软件的开发效率。

### 1.1 短猝发扩频信号接收模块

为满足优化设计系统对接收模块的硬件要求，对接收器内部结构进行改装，改装设计结果如图 1 所示。

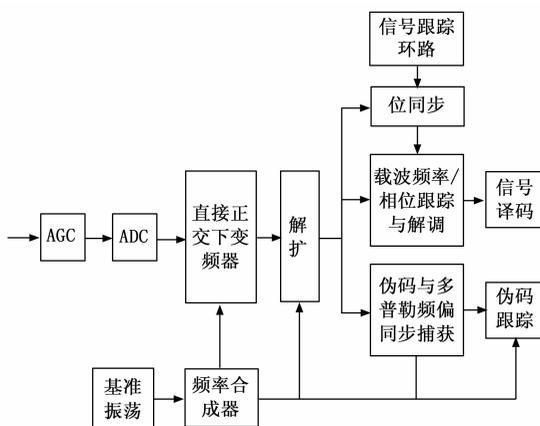


图 1 短猝发扩频信号接收器结构图

通过射频放大和混频滤波处理接收到的射频信号，得到中频的差分相移键控输入信号。经过自动增益控制 (AGC) 调整后，使用带通采样的模数转换器 (ADC) 对信号进行量化，得到数字中频信号<sup>[3]</sup>。随后，将获取的数字中频信号输入到 ADC 进行处理，从而实现解扩、解调。本

项目拟采用 DSP 技术，利用 DSP 实现正交支路与同相支路信号的去扩展，并利用 PN 编码发生器生成的 PN 编码序列，实现对 PN 编码序列的去扩展，进而实现对 PN 编码序列的捕捉与多普勒频率偏移，并在此基础上对 PN 编码进行持续的反馈修正，利用该方法对该信号进行了信道解码，从而获得短猝发扩频信号接收结果<sup>[4]</sup>。从图 1 中可以看出，优化设计的短猝发扩频信号接收模块中添加了一个信号跟踪环路和位同步元件，能够保证高动态环境中多个短猝发扩频信号的同步采集。

### 1.2 短猝发扩频信号自适应滤波模块

短猝发扩频信号自适应滤波模块的运行目的是实现对初始捕获扩频信号的滤波处理，降低初始信号中的噪声含量，从而提高信号捕获结果的信噪比。短猝发扩频信号自适应滤波器的内部结构如图 2 所示。

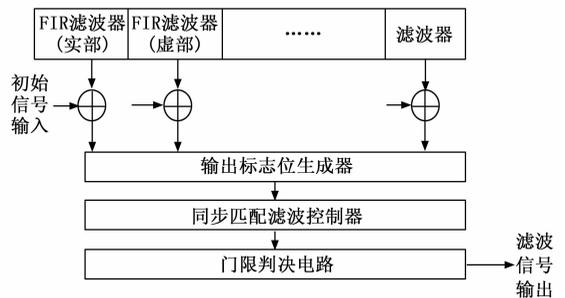


图 2 短猝发扩频信号自适应滤波器内部结构框图

从图 2 中可以看出自适应滤波器由滤波控制器、两套 FIR 滤波器、输出标志位生成器以及判决电路 4 部分组成，滤波控制器用来控制整个滤波处理的逻辑和输入输出，两组 FIR 滤波器用来过滤输入信号的虚实两部分，而输出标志比特发生器则利用 FSM 来交替地生成 4 种状态来标记匹配后的滤波数据，从而方便后端模块对数据的辨识<sup>[5]</sup>。最终通过门限判决电路确定滤波器的具体运行状态。

### 1.3 系统电路模块设计

#### 1.3.1 信号缓存电路设计

采用乒乓缓存的方式优化设计系统的短猝发扩频捕获信号的缓存电路，实现不同信道下捕获信号之间的隔离效果。图 3 为系统信号缓存电路的优化调整结果。

图 3 中，RAM 存储单元的深度为 32，并将其分成高低地址区，每个区有 16 个压缩的相关积分值。乒乓缓存数据读写流程：写控制逻辑过程对乒乓标志位进行读出，如果标志位取值为 0，就将其置位，并从地址 0 顺序地将实时捕获的信号写入 RAM，如果标志位取值为 1，就将其清零后，将捕获信号写入 RAM<sup>[6]</sup>。同理确定读控制逻辑芯片的运行原理和流程，按照上述方式实现实时捕获信号的缓存与输出。

#### 1.3.2 锁相环电路设计

锁相环利用相位同步产生的电压并应用于负反馈控制模块的调谐压控振荡器，以产生目标频率<sup>[7]</sup>。图 4 展示了锁相环电路的调整设计结果。

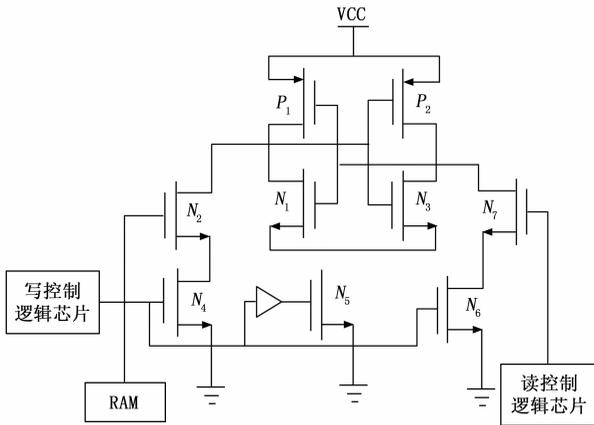


图 3 扩频信号缓存电路

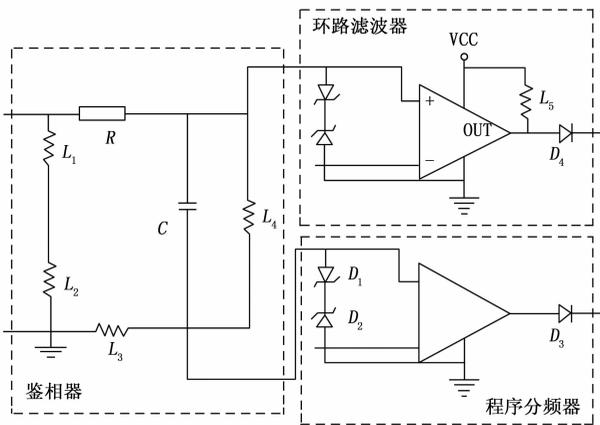


图 4 锁相环电路图

在扩频自适应信号快捕系统中，通过从外部输入来的参考信号，对环路内部扩频捕获信号的频率和相位进行控制，从而实现了输出信号频率对输入信号频率的自适应跟踪，间接地保证系统输出捕获信号的同步性与完整性<sup>[8]</sup>。

## 2 高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统软件功能设计

在硬件系统的支持下，以精准、快速捕获高动态短猝发扩频信号为目的，设计快捕系统的软件功能。系统软件的基本运行思路为：根据高动态短猝发信号的扩频原理，确定扩频信号的基本特征，根据该特征在高动态通信环境中搜索扩频信号目标，并以扩频信号搜索结果作为扩频信号捕获的启动条件，利用信号区间、采集频率等参数，得出高动态短猝发扩频信号的自适应快捕结果。

### 2.1 确定高动态短猝发扩频信号特征

高动态通信信号一般采用直接序列扩频的方式进行扩频处理，扩频原理如图 5 所示。

定义初始高动态环境中的传输信号为：

$$x(t) = \sum g_T n_c T_0 \quad (1)$$

式中， $g_T$  表示持续时间为  $T_0$  的矩形脉冲， $n_c$  为高动态环境中

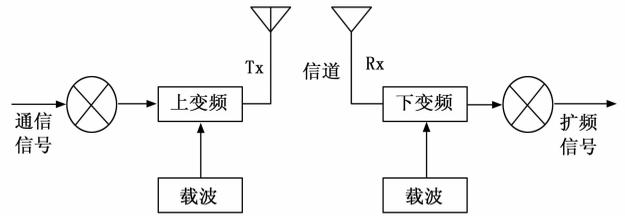


图 5 直接序列扩频原理图

的信道数量<sup>[9]</sup>。在直接序列扩频处理过程中，首先生成伪随机扩频码，生成结果为：

$$\beta = \sum \alpha \cdot p(t - n_c T_0) \quad (2)$$

式中， $p(t)$  为  $t$  时刻的信号脉冲值， $\alpha$  为随机数，取值为 1 或 -1<sup>[10]</sup>。初始传输信号与伪随机扩频码的传输速率分别为  $v_0$  和  $v_\beta$ ，通过初始传输信号与伪随机扩频码的耦合，得出高动态短猝发扩频信号为：

$$x_s(t) = x(t) \otimes \beta \quad (3)$$

由此实现了高动态通信频谱的展宽，扩频增益量为：

$$\Delta G = \frac{v_\beta}{v_0} \quad (4)$$

综合考虑上述高动态短猝发通信信号的扩频原理，可以确定扩频信号的基本传输特征，具体特征值包括：信号传输频率、信号波动峰值等，其中信号传输频率特征的计算公式如下：

$$f_s = f + \Delta G \quad (5)$$

式中， $f$  表示无扩频处理状态下高动态通信环境的传输频率，将式 (4) 的计算结果代入式 (5) 中，即可得出扩频信号传输频率特征的计算结果<sup>[11]</sup>。另外信号波动峰值特征的确定结果如下：

$$\tau_p = y_{\max}(x_s) \quad (6)$$

式中， $y_{\max}()$  为峰值求解函数。同理可以得出其他短猝发扩频信号特征的确定结果，通过多特征分量的加权融合，得出扩频信号综合特征确定结果，记为  $\tau_c$ ，并以此作为判断当前信号是否为扩频信号的比对条件。

### 2.2 自适应搜索高动态短猝发扩频信号

根据高动态短猝发扩频信号特征的确定结果，采用特征匹配的方式所有高动态通信环境中的扩频信号，保证系统输出的快捕信号均为扩频信号<sup>[12]</sup>。采用时域串行搜索法在两个方向上对传输信号进行二维搜索。每个搜索单元的中心点位置，是接收机接收信号位置，在二维搜索范围内，短猝发信号的搜索单元数目为：

$$N_s = \frac{(2\psi_s)(2W_s)}{\Delta\psi\Delta W} \quad (7)$$

式中， $\psi_s$  和  $W_s$  分别为通信信号频率与码相位的搜索范围， $\Delta\psi$  和  $\Delta W$  分别为搜索码带和频带的宽度值<sup>[13]</sup>。对所有的搜索单元进行特征提取与匹配，特征匹配过程可以描述为：

$$\lambda = \sum_{i=1}^{N_s} \frac{\tau_c \cdot \tau_c(i)}{\|\tau_c\| \cdot \|\tau_c(i)\|} \quad (8)$$

式中， $\tau_c(i)$  为第  $i$  次搜索过程中提取的短猝发信号特征。如

果式 (8) 的计算结果高于阈值  $\lambda_0$ ，说明当前搜索范围内的信号为扩频信号，否则认为当前搜索范围内无扩频信号。按照上述方式对实时传输的高动态短猝发信号类型进行判断，并实时调整信号的搜索范围，保证扩频信号能够被全部搜索出来<sup>[14]</sup>。当检测到扩频信号时，接收机停止搜索程序，跳转至信号捕获程序。在实际的扩频信号搜索过程中，需要根据当前通信环境的动态变化对设置的搜索范围进行调整，在保证搜索精度的同时减少搜索消耗的时间开销。

### 2.3 计算短猝发扩频信号自适应捕获参数

高动态短猝发扩频信号捕获参数具体包括：捕获长度、捕获频率、捕获门限等，根据式 (8) 的计算结果，判断当前搜索范围内是否存在扩频信号，实时调整信号的搜索范围，获取无扩频信号的区域范围  $L_b$ ，据此计算捕获长度，公式如下：

$$L = (\Delta\phi + \Delta W) - L_b \quad (9)$$

捕获频率参数的具体取值为：

$$f_c = \frac{N_s}{t_c} \quad (10)$$

式中，变量  $N_s$  和  $t_c$  分别为待捕获的扩频信号量以及扩频信号快捕任务的目标执行时间。利用捕获门限约束扩频信号捕获的执行过程，采用自适应动态调整技术以使门限可以根据信号的功率而动态改变<sup>[15]</sup>。捕获门限值的设置情况如下：

$$\vartheta = \frac{P_a}{\varphi} \quad (11)$$

式中， $P_a$  为扩频信号幅度的变化信号功率值， $\varphi$  为相关峰值<sup>[16]</sup>。根据高动态环境中短猝发扩频信号的变化情况，以自适应的方式调整式 (11) 表示的捕获门限值，若当前捕获程序输出的信号功率与相关峰的比值低于当前门限值，则继续执行捕获程序，否则认为捕获程序完成，终止捕获进程。

### 2.4 高动态短猝发扩频自适应信号快捕功能实现

在硬件设备的支持下，根据捕获参数的设定结果，执行系统的高动态短猝发扩频信号的自适应捕获程序，捕获程序的执行流程如图 6 所示。

采用了串并结合的伪码相关方法，在每个数据周期内可以实现 128 个相位的相关性峰值判定，从而大大降低了信号捕获时间<sup>[17]</sup>。系统最终输出的信号捕获结果为：

$$x_c = f_c \cdot x(t) \cdot \beta(t) \cdot L \cdot \beta(t) \leq \vartheta \quad (12)$$

将相关数据代入式 (12) 中，即可得出短猝发扩频信号的捕获结果。为保证系数输出捕获信号的信噪比，需要对初始捕获扩频信号进行处理，采用一次多点平滑处理方式，对所有多普勒所有码相位状态进行重复多次相关运算<sup>[18]</sup>。在此基础上，利用锁相环电路在环路稳定的情况下，锁相环不仅能保证回路的输出与输入信号的频率相同，又能保证两个回路的相位相同，从而保证了鉴相结果的相位误差接近于 0。在稳态条件下，环路滤波器的输出结果为：

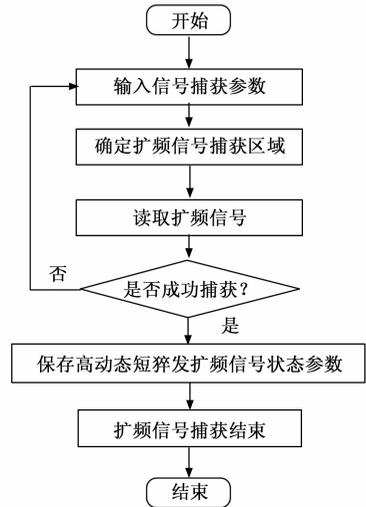


图 6 高动态短猝发扩频自适应信号快捕流程图

$$x_{out}(t) = K_d K_f x_c \quad (13)$$

式中，参数  $K_d$  和  $K_f$  分别为滤波比例系数和积分系数，重复上述操作得出高信噪比的高动态短猝发扩频自适应信号捕获结果，并通过硬件系统中的显示设备以可视化的形式输出。

## 3 系统测试

以测试优化设计高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统的信号快捕功能和运行性能为目的，利用白盒测试与黑盒测试相结合的方式，设计系统测试实验。白盒测试中首先要对软件的内部结构进行分析，然后从逻辑出发，得到相应的测试数据。而黑盒测试主要用来检测系统程序是否按照预期效果正常运行。在此次系统测试实验中，将白盒测试原理应用到快捕功能测试任务中，即在高动态通信环境下，准备短猝发扩频信号，并将准备信号样本作为系统的快捕目标，通过系统输出结果与准备信号样本之间的对比，体现出优化设计系统的快捕功能。而黑盒测试方法主要应用在系统运行功能测试工作中，统计系统运行数据，并与系统的优化设计目标进行对比，判断优化系统运行性能是否满足预期效果。

### 3.1 快捕系统运行与开发工具选择

优化设计的高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统由 QuartusII 工具完成对可执行程序的生成与下载。Quartus II 是 Altera 在 FPGA/CPLD 方面提供的一个完整的开发平台，该平台整合了 Altera 在 FPGA/CPLD 方面的全部功能以及第三方软件的界面。设计人员可以利用这个集成的开发工具来创造、组织和管理自己的设计<sup>[19]</sup>。为了便于系统的可视化操作，将 ModelsimSE6.0 应用于系统的开发和操作中。

### 3.2 高动态短猝发扩频信号样本设置

为获取高动态短猝发扩频信号样本，首先需要对高动态通信环境进行配置，此次系统测试实验选择卫星通信网

络中的全球通信部分作为高动态环境, 该网络以大型卫星为主体, 在距离地球表面 10 390 km 的中轨道上, 共 10 颗卫星, 2 个备用星, 均分置于 2 个轨道面<sup>[20]</sup>。数据传送速度是 140 kbit/s, 最高可以达到 384 kbit/s。在上述高动态环境下, 生成多组通信任务信息, 将其添加到通信网络中, 通过通信任务生成、通信信号调制、通信信号扩频等步骤, 得出高动态短猝发扩频信号样本, 如图 7 所示。

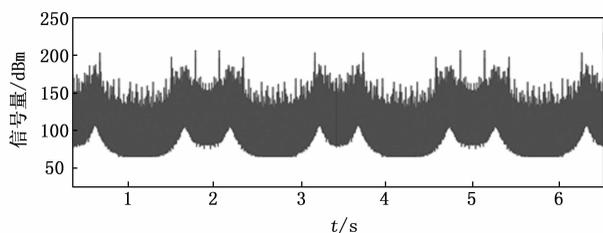


图 7 高动态短猝发扩频信号样本波形图

图 7 表示的是通信网络中第 1 个信道的扩频信号样本, 同理可以得出高动态通信网络中所有信道的信号样本准备结果, 根据时序特征规定样本信号的长度均为 60 s。为了验证优化设计系统是否能够适应高动态环境的不同运行状态, 实现短猝发扩频自适应信号的精准捕获, 在当前高动态通信环境中添加一个噪声源。将添加的噪声源调整至启动状态, 生成的噪声信号强度为 5 dB, 通过与初始扩频信号样本的耦合, 得出噪声条件下的信号样本准备结果。重复上述操作, 得出所有信道在噪声条件的信号样本。

### 3.3 快捕系统硬件设备安装与调试

按照高动态短猝发扩频自适应信号快捕硬件系统的设计结果调整并组装硬件设备, 将连接好的硬件设备与供电电源相连, 完成硬件设备的安装。除上述硬件设备外, 还需要在实验环境中安装一个主测计算机作为系统的运行环境, 在主测计算机内部嵌入一个 Stratix II 芯片。最终对安装的所有硬件设备进行调试, 调试内容可以分为单独调试和联合调试两个部分, 单独调试就是验证硬件设备在运行过程中是否存在故障, 而联合调试则是验证硬件设备之间的适配性, 若设备调试出现异常, 则重新连接硬件设备或对故障设备进行更换, 若设备调试成功则直接进入系统测试实验的下一步操作。

### 3.4 实验过程

利用选择的系统运行与开发工具, 在硬件设备的支持下, 将高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统的软件部分转化为主测计算机可识别的程序代码, 并导入到运行环境中。逐个准备高动态短猝发扩频信号样本, 并将其输入到高动态环境中。启动系统的快捕程序, 获取相应的扩频信号快捕结果。为体现出优化设计系统在快捕功能和运行性能方面的优势, 分别设置传统的基于 FFT 的扩频信号快捕系统和基于相干累积的跳频扩频信号捕获系统作为实验的两个对比系统, 重复上述操作得出系统输出结果以及运行数据统计结果。

### 3.5 设置系统测试指标

根据系统测试实验目的, 分别从系统快捕功能和运行性能两个方面设置量化测试指标, 其中快捕功能测试指标为捕获扩频信号信噪比, 该指标的数值结果为:

$$\epsilon = \frac{n_{\text{spread spectrum}}}{n_{\text{Noise Signal}}} \quad (14)$$

式中,  $n_{\text{spread spectrum}}$  和  $n_{\text{Noise Signal}}$  分别为系统输出信号捕获结果中的有效扩频信号和噪声信号。计算得出信噪比指标  $\epsilon$  取值越高, 证明对应系统的快捕功能越优。另外系统运行性能的量化测试指标包括信号捕获时间和捕获面积, 上述指标的测试结果如下:

$$\begin{cases} t_{\text{capture}} = t_{\text{out}} - t_{\text{firing}} \\ S_{\text{capture}} = \frac{N_{\text{out}}}{t_{\text{capture}} \cdot L_{\text{capture}}} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $t_{\text{firing}}$  和  $t_{\text{out}}$  分别为系统信号快捕程序的启动时间和捕获结果的输出时间,  $L_{\text{capture}}$  为捕捉到的信号长度,  $N_{\text{out}}$  为系统输出的快捕信号量。最终计算得出捕获时间指标取值越大, 证明系统的捕获速度越慢, 捕获面积指标取值越小, 说明系统的捕获范围越小, 即系统的运行性能越差。

### 3.6 系统测试实验结果与分析

分别在有、无噪声条件下, 统计反映系统功能和性能的数据, 通过相关指标的计算得出系统测试结果, 体现出优化设计系统的运行优势。

#### 3.6.1 无噪声条件下系统快捕功能测试

高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统功能在无噪声条件下的测试结果, 如表 1 所示。

表 1 无噪声条件下系统快捕功能测试数据表

信道编号	基于 FFT 的扩频信号快捕系统		基于相干累积的跳频扩频信号捕获系统		优化设计高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统	
	有效扩频信号量/dBm	噪声信号量/dBm	有效扩频信号量/dBm	噪声信号量/dBm	有效扩频信号量/dBm	噪声信号量/dBm
1	193.1	6.5	194.4	3.8	196.3	1.6
2	185.7	5.8	186.2	4.2	187.5	1.4
3	191.3	6.9	192.5	4.5	194.6	1.2
4	195.4	6.6	196.8	5.9	199.2	1.2
5	195.4	5.1	197.6	4.2	200.3	1.5
6	180.8	5.4	181.6	4.3	183.8	1.3
7	183.7	6.8	185.1	3.7	189.4	1.3
8	186.0	5.7	188.4	4.4	190.7	1.5

将表 1 中的数据代入式 (14) 中, 计算得出两种对比系统输出快捕扩频信号的平均信噪比分别为 31.3 和 44.2, 优化设计系统输出扩频信号信噪比的平均值为 141.6。通过式 (15) 计算得出信号捕获的性能, 如图 8 所示。

如图 8 所示, 得出优化设计系统的捕获时间平均为 8 s, 捕获面积平均为 90 km<sup>2</sup>。与对比系统相比, 优化设计系统的捕获时间更短, 捕获面积更大。

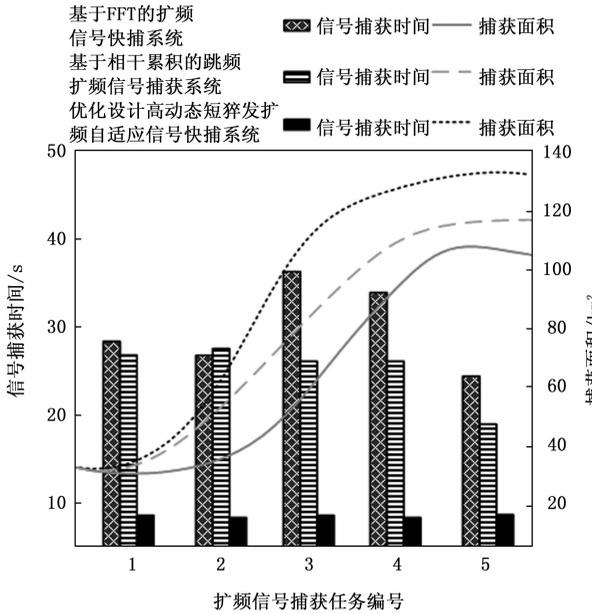


图 8 无噪声条件下系统快捕性能

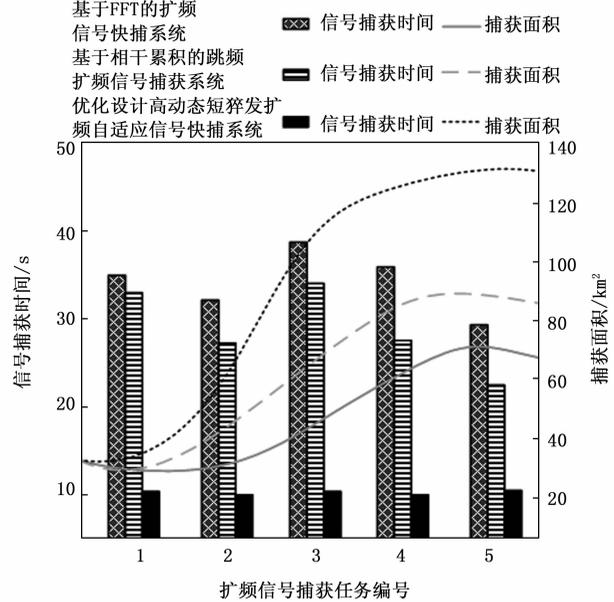


图 9 有噪声条件下系统运行性能测试结果

### 3.6.2 有噪声条件下系统快捕功能测试

在有噪声条件下，重复上述操作，得出系统快捕功能的测试结果，如表 2 所示。

表 2 无噪声条件下系统快捕功能测试数据表

信道编号	基于 FFT 的扩频信号快捕系统		基于相干累积的跳频扩频信号捕获系统		优化设计高动态短猝发扩频自适应信号快捕系统	
	有效扩频信号量/dBm	噪声信号量/dBm	有效扩频信号量/dBm	噪声信号量/dBm	有效扩频信号量/dBm	噪声信号量/dBm
1	193.1	8.5	194.4	4.9	196.3	2.0
2	185.7	8.3	186.2	5.1	187.5	1.6
3	191.3	8.6	192.5	5.5	194.6	1.5
4	195.4	8.4	196.8	5.7	199.2	1.5
5	195.4	7.9	197.6	5.2	200.3	1.7
6	180.8	8.0	181.6	4.8	183.8	1.4
7	183.7	9.1	185.1	5.0	189.4	1.4
8	186.0	8.9	188.4	5.2	190.7	1.7

通过式 (14) 的计算，得出 3 种系统输出结果的平均信噪比分别为 22.4、36.8 和 121.8。另外系统运行性能的测试结果如图 9 所示。

通过平均值计算得出有噪声条件下 3 个系统的信号捕获时间分别为 32、28、10 s，最终捕获面积分别为 64、82、130 km<sup>2</sup>，由此证明优化设计系统的捕获速度更快、捕获范围更大。

## 4 结束语

为实现对高动态短猝发扩频自适应信号的快速捕获，设计并开发了信号快捕系统。从实验结果中可以看出，优

化设计系统具有良好的快捕功能以及运行性能，且能够适应有、无噪声两种通信条件。通过纵向对比，发现与无噪声条件相比，在有噪声条件下系统的捕获速度和捕获范围未发生明显变化，但捕获信号的信噪比仍存在一定程度的下降，因此在未来的研究工作中还需要针对这一问题进一步优化。

### 参考文献:

- [1] 邢亚斌, 王振岭, 杨再秀. 基于 FFT 的突发扩频信号兼容快捕算法 [J]. 河北工业科技, 2017, 34 (6): 395-401.
- [2] 张军, 郑立荣, 林宝军, 等. 低轨星座短报文通信中的扩频信号二维快捕优化与实现 [J]. 空间科学学报, 2021, 41 (6): 976-982.
- [3] 王研, 鲁金昆, 韩航程. 基于相干累积的跳频扩频信号的捕获方法 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (s2): 187-191.
- [4] 强幸子, 金翔, 张天骐. 基于相似度的 NPLC-DSSS 信号扩频码盲估计 [J]. 电子学报, 2022, 50 (8): 2043-2048.
- [5] 曾凌川, 白燕, 卢晓春, 等. 一种基于调制 m 序列的直接序列扩频信号调制方法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (8): 2156-2164.
- [6] 朱国富. 扩频体制低轨卫星通信信号捕获与跟踪系统设计 [J]. 电讯技术, 2022, 62 (5): 576-584.
- [7] 刘惠堂, 何雪云, 孙林慧. 上行免调度 NOMA 系统中基于遗传算法的扩频矩阵优化方法 [J]. 信号处理, 2022, 38 (3): 554-561.
- [8] 姜春晓, 王佳蔚. 高动态卫星 DSSS 信号 Turbo 迭代捕获算法 [J]. 通信学报, 2021, 42 (8): 15-24.
- [9] 严涛, 李天, 田野, 等. 基于码片幅度调制的导航信号扩频码认证方法 [J]. 中国空间科学技术, 2023, 43 (1): 69-78.
- [10] 陈延涛, 董彬虹, 李昊, 等. 一种高动态低信噪比环境下

基于多样本点串行快速傅里叶变换的信号捕获方法 [J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (6): 1691-1697.

- [11] 方竹, 张天骐, 汪锐, 等. 高动态环境二进制偏移载波调制信号的捕获 [J]. 信号处理, 2022, 38 (10): 2164-2172.
- [12] 刘忆. 一种面向深空测距的大多普勒频偏信号捕获算法 [J]. 电讯技术, 2021, 61 (3): 311-315.
- [13] 张天骐, 孟莹, 王晓烨, 等. 冷启动环境下多卫星信号的联合捕获 [J]. 信号处理, 2022, 38 (3): 502-510.
- [14] 张俊, 李赛, 张书衡, 等. NOMA 中的 SS-CPM 卫星信号捕获算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (9): 2929-2935.
- [15] 张天骐, 方竹, 汪锐, 等. 窄带干扰及动态环境 BOC 调制信号多通道并行捕获 [J]. 系统工程与电子技术, 2023,

45 (4): 1222-1230.

- [16] 杨栋, 江虹, 罗颖, 等. 基于 FPGA 的多路传感信号采集系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (6): 75-79.
- [17] 翟东, 达新宇, 张喆, 等. 多层 WFRFT-MIMO 卫星通信系统抗截获性能研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41 (1): 70-75.
- [18] 石荣, 张吉莹. 空分复用 MIMO 通信信号的侦收与码流提取 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17 (10): 959-965.
- [19] 张海燕, 闫文君, 张立民, 等. 通信信号调制识别综述 [J]. 海军航空大学学报, 2022, 37 (1): 126-132.
- [20] 尤雅, 海涵, 蒋学芹, 等. 基于 LDPC 码的低截获概率信号设计与仿真 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2022, 48 (4): 74-78.

(上接第 205 页)

数据集, 未来可以与制造企业进行合作, 获得足够的装配文本进行训练, 对于结果的准确率会有大幅提升。同时随着机械领域相关的自然语言处理的相关研究的增多, 对自动装配等机械领域相关的探索会逐渐深入, 机械装配在自然语言处理的协助下可以向自动化、智能化的方向进一步发展。

#### 参考文献:

- [1] 于嘉鹏, 王成恩, 张闻雷. 复杂产品装配关系矩阵自动生成方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16 (2): 249-255.
- [2] DINI G, SANTOCHI M. Automated sequencing and subassembly detection in assembly planning [J]. CIRP Annals, 1992, 41 (1): 1-4.
- [3] YU J C, LI Y M. Structure representation for concurrent analysis of product assembly and disassembly [J]. Expert Systems with Applications, 2006, 31 (4): 705-714.
- [4] 王佳楠, 梁永全. 中文分词研究综述 [J]. 软件导刊, 2021, 20 (4): 247-252.
- [5] 杨文峰, 陈光英, 李星. 基于 PATRICIA tree 的汉语自动分词词典机制 [J]. 中文信息学报, 2001 (3): 44-49.
- [6] 李庆虎, 陈玉健, 孙家广. 一种中文分词词典新机制——双字哈希机制 [J]. 中文信息学报, 2003 (4): 13-18.
- [7] DEROSE S J. Grammatical category disambiguation by statistical optimization [J]. Computational Linguistics, 1988, 14 (1): 31-39.
- [8] XU N. Chinese word segmentation as character tagging [J]. International Journal of Computational Linguistics & Chinese Language Processing, 2003, 8 (1): 29-47.
- [9] BENGIO Y, SCHWENK H, SENÉCAL J S, et al. Neural probabilistic language models [J]. The Journal of Machine Learning Research, 2003, 3 (6): 1137-1155.
- [10] SUTSKEVER I, VINYALS O, LE Q V. Sequence to sequence learning with neural networks [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 2: 3104-3112.
- [11] RILOFF E. Automatically constructing a dictionary for infor-

mation extraction tasks [C] //Proceedings of the Eleventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'93). AAAI Press, 1993: 811-816.

- [12] KIM J T, MOLDOVAN D I. Acquisition of linguistic patterns for knowledge-based information extraction [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1995, 7 (5): 713-724.
- [13] RILOFE, SHOEN J. Automatically acquiring conceptual patterns without an annotated corpus [C] //Third Workshop on Very Large Corpora. Massachusetts, USA: ACL, 1995: 148-161.
- [14] LI P F, ZHU Q M, ZHOU G D. Joint modeling of argument identification and role determination in Chinese event extraction with discourse-level information [C] // 2013 年第 23 届人工智能国际会议 (IJCAI-2013) 论文集, 2013: 2120-2126.
- [15] FENG X, QIN B, LIU T. A language-independent neural network for event detection [J]. Science China Information Sciences, 2018, 61 (9): 1-12.
- [16] CHEN Z, JI H. Language specific issue and feature exploration in Chinese event extraction [C] //Proceedings of Human Language Technologies: The 2009 Annual Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics, Companion Volume: Short Papers (NAACL-Short'09). Association for Computational Linguistics, USA, 2009: 209-212.
- [17] JACOBS G, HOSTE V. SENTiVENT: enabling supervised information extraction of company-specific events in economic and financial news [J]. Language Resources and Evaluation, 2022, 56 (1): 225-257.
- [18] FEI H, REN Y, ZHANG Y, et al. Enriching contextualized language model from knowledge graph for biomedical information extraction [J]. Briefings in Bioinformatics, 2021, 22 (3): 110.
- [19] 崔晴洋, 梁小峰, 倪静, 等. 基于卫星装配工艺的短文本聚类研究 [J]. 软件工程, 2020, 23 (4): 7-11.
- [20] 张烈材. 特斯尼埃的《结构句法基础》简介 [J]. 国外语言学, 1985 (2): 19-21.