

一种超宽带电子战测频技术的研究

文富忠, 胥全春, 韩学涛, 程 号
(电子信息控制重点实验室 成都 610036)

摘要: 随着雷达技术的发展, 宽带瞬时信号截获是信息化装备的必备功能单元。从理论和试验验证的角度详细分析了超宽带电子战接收机的工作原理、测频技术和应用场景, 提出了一种简化的 MonoDFT 算法, 实现了 2GHz~18GHz 频段内雷达信号辐射源的高精度频率测量, 并设计了两种应用场景和实现方法。理论分析与实验表明, 接收机能够实现瞬时带宽 16GHz, 灵敏度优于-70dBm, 测频精度优于 0.4MHz, 延迟时间小于 270ns, 可广泛应用于电子战领域, 具有很高的工程应用价值。

关键词: 瞬时测频接收机; 瞬时频率指示; 单比特数字接收机; 电子战; 测频

中图分类号: TN975 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)01-0056-08

Research on an ultra-wideband frequency measurement technology based on electronic warfare

WEN Fuzhong, XU Quanchun, HAN Xuetao, CHENG Hao

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: With the progress of radar technology, wideband instantaneous frequency measurement is a compulsory functionality of informationization equipment. In the paper the working principles and frequency measurement and application scenarios of an ultra-wideband electronic warfare receiver are studied in the terms of both theory and experiment. A simplification MonoDFT algorithm is proposed. It is realized to high-precision frequency measurement from 2GHz to 18GHz radar signal emitter. It is designed into two application scenarios and realizations. The analysis and experiment results show that the receiver can adapt to the instantaneous bandwidth 16GHz, a sensitivity more than -70dBm, frequency measurement accuracy over 0.4MHz, and a processing delay time of less than 270ns. The receiver is of high engineering application value in the electronic warfare field.

Key words: IFM; IFI; Monobit digital receiver; Electronic warfare; Frequency measurement

引 言

面对对抗日趋激烈的现代复杂电子战环境, 电子战接收机不仅需要满足超宽带的频率覆盖, 更高的灵敏度、截获概率、频率分辨率和更大的动态范围等战术需求, 还需要解决环境中各种信号的检测和准确处理等问题, 具备复杂环境信号的高概率截获、分选和识别等处理能力^[1]。

现有的能满足宽带需求的 IFM 接收机和引导干扰的 IFI 灵敏度不高 (-55dBm 左右), 且在多信号同时到达的情况下频率测量容易出错。而满足灵敏度要求的超外差数字接收机受 AD 限制, 瞬时带宽无法和雷达匹配。这类接收机虽然可通过频域处理, 适应多信号同时到达, 但需通过高位数的大动态 AD 和高保真通道适应在多信号环境下的频率精确测量, 体积、重量、功耗和成本的代价比较高, 而且需要多个通道数字接收机拼接带宽来实现^[2]。图 1 所示为典型信道化拼接多通道数字接收机原理。

单比特接收机作为一种宽带数字接收机, 能够快速大范围瞬时截获辐射源信号, 具有接收带宽宽、灵敏度高、体积小、功耗低和重量轻等优点。美国空军研究实验室^[3]最早提出单比特接收机的概念, 2002 年左右其采用 ASIC 完成频域处理, 实现了一个小型化的单比特接收机, 测频精度为 5MHz, 瞬时带宽为 1GHz。英国 Filtronic Signal Solution 公司实现了测频精度为 1MHz, 瞬时带宽为 3GHz 的单比特接收

机。单比特接收机能够在行业内得到广泛的应用，其优势在于处理速度快、灵敏度高和测频精度高，核心技术是测频算法。由于单比特接收机量化位数为 1 位，具有非线性的特性，交调谐波较多，动态范围也较小，对同时到达信号只能检测出其中的最大信号^[4]。如何将环境中的多个信号正确检测出来是检测单比特宽带接收机测频性能的一项重要指标。

文献[5]分析了基于实时数字处理的宽带单比特瞬时测频接收技术；文献[6]主要对传统的 DFT 和 MonoDFT 测频方法、积累时间、灵敏度和处理延迟时间进行了理论仿真分析；文献[7]主要分析了单比特接收算法、Rife 精测频算法及其在 FPGA 中的实现；文献[8]主要分析了高采样率情况下测频算法的适应性。本文采用一种简化的 MonoDFT 算法实现了宽带雷达信号的高精度测频，提出了两种典型的作战应用场景和实现方法，并通过仿真、实际环境验证和某型装备实装测试，具有测频精度高和延时时间短等特点，可广泛应用于工程中。

1 单比特接收机的工作原理及应用分析

1.1 工作原理

单比特接收机的一般处理架构如图 2 所示。采用传统的多比特思路变换到一个比特的方式，以牺牲接收机双音动态范围为代价，实现一种大带宽、结构紧凑、体积小的高性能数字单比特接收机，可独立完成信号频率、脉宽和重复周期等参数的提取。其中，射频信号经过放大变频后，输入到高速单比特采样模块中进行采样，然后将采样数据送入 FPGA 处理器中进行 FFT 和参数提取。根据单比特接收机的接收处理工作原理，微波变频通道可采用 SIP 等微系统技术进行简化设计，数字信号处理器可通过 ASIC 芯片技术进行集成设计，实现更小体积和更轻量级的单比特接收机。其核心组成部分是高速单比特采样和数字信号处理器。

其中，单比特接收机的核心处理部分是采用频域傅立叶变换后进行信号检测，这也是单比特接收机能够实现高灵敏度、低虚警等性能的理论基础。射频信号经过宽带限幅放大变频后，输入到高速单比特采样模块中进行采样，然后将采样数据送入 FPGA 处理器中进行 FFT 和参数提取。

1.2 量化位数对测频精度的影响分析工作原理

单比特量化是单比特接收机数字处理的最前端，其性能直接影响接收机的灵敏度和测频精度等关键指标。单比特量化实际上就是一个门限判决，对输入的射频信号高于门限的是 1，低于门限的是 0。为实现宽带覆盖，比较器速率一般都需要达到数 Gbps 以上，因此，在比较器后一般带有一个串并转换器，对高速单比特数据进行降速，便于后面的 FPGA 处理芯片接收。在实际量化过程中由于信号幅度信息的丢失导致大量的频率虚假分量^[9, 10]。频率分析主要采用离散傅里叶变换 DFT 方法，这就会使得这些虚假分量扩散到整个采样频带内，低精度的量化位数得到的 FFT 结果在频谱上显示出了除了信号主峰以外还会产生一定的高阶谱。单比特量化过程引入了虚假的频率分量，还降低了主峰值和噪声基底的相对值，但是主峰信号的频率仍然可以准确地检测出来，由此可见，量化位数对单比特数字化接收机的信号检测和测频性能影响不大。

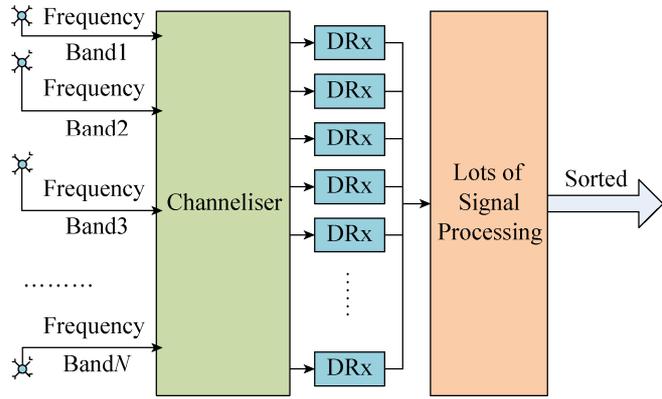


图 1 多通道信道化拼接接收机原理图

Fig. 1 The principle structure of multi-channelized receiver



图 2 单比特接收机一般处理架构图

Fig. 2 The general processing structure of monobit receiver

1.3 单比特接收机测频处理算法

虽然高速单比特采样获得了大的瞬时带宽, 但是超高速率的原始数据送入后续 FPGA 处理器后, 若需实时 FFT 处理, 则对硬件资源需求较大。在现有的 FPGA 资源规模情况下, 若采用传统 FFT 方法实现单比特 FFT 算法难度很大。因此, 有必要采用一种新的算法来实现 FFT 变换。

本文采用简化后的 MonoDFT 方式实现频域测量, 则可以利用现有 FPGA 在较小的代价下实现实时处理。MonoDFT 的主要原理就是利用低比特采样动态范围小的特点, 在进行频域变换的过程中简化 DFT 核函数, 从而避免或减少在计算过程中的乘法运算次数, 降低对处理的资源要求。具体来说, 对于信号 $x(n)$, 进行点数为 N 的 DFT 运算可以表达为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

式 (1) 中信号与核函数 (旋转因子) 的乘法是主要的运算量来源。在 1bit 量化下 $x(n)$ 的形式只有 0 和 1 两种。而旋转因子 $W_{nk} = e^{-j2\pi kn/N}$ 是个浮点值, 且有 N 种选择, N 值较大, 会出现大量复数乘法运算, 处理资源要求很高, 相应地对 FPGA 的实现带来了很大困难。在实际工程实现过程中, 为了最大限度的降低乘法运算的复杂度, 减小处理资源, 需尽量缩减有限个数值。图 3 给出了旋转因子个数分别为 4、8、12 三种情况下的简化示意。

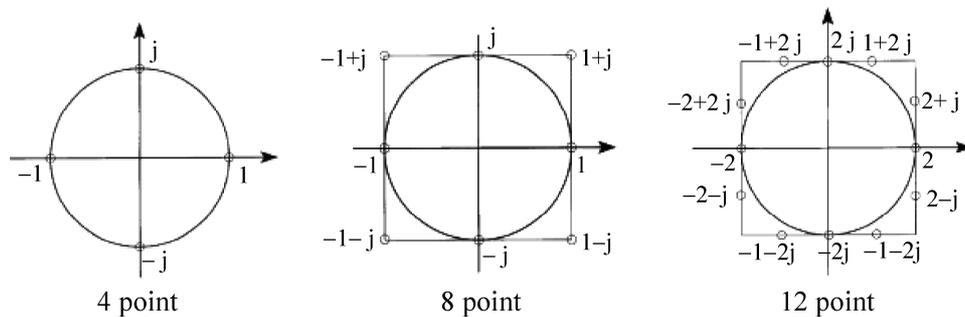


图 3 单比特接收机旋转因子简化示意图

Fig. 3 Monobit receiver simplified rotation factor diagram

由图 3 可看出, 在 4 point 的情况下, 旋转因子只有 ± 1 和 $\pm j$ 的情况, 运算过程中只需要进行加减运算, 计算量大大降低, 对硬件资源需求大大降低。

通过理论分析和计算, 采用 MonoDFT 方式对单比特数据进行频域信号测量, 同标准 FFT 相比在测频精度、测相精度、DFT 幅度和灵敏度等方面具有相同的性能。两种算法的主要差别在于: MonoDFT 可以实现最小的延迟时间和减小对 FPGA 逻辑资源的消耗, 尤其是对大点数 DFT 变换。

1.4 应用场景分析

单比特数字接收机具有灵敏度高、带宽宽、多信号处理能力强等特点, 可应用场景多。在电子侦察应用场景中, 需要更大的宽带截获能力和高精度的测频能力。为更好地解决宽带接收机和超外差窄带接收机之间的灵敏度和测频问题, 单比特数字接收机是最好的选择。利用单比特数字接收机瞬时带宽宽、灵敏度高、测频精度高等特点, 可作为超外差数字接收机的宽带引导功能, 实现信号的高截获概率侦收。首先需要和窄带超外差接收机一样, 把宽开单比特接收机的时域处理转化为频域处理, 这样才能从根本上提升灵敏度和多信号适应能力, 其应用框图如图 4 所示。

随着电子器件的不断发展, 射频通道小型化后, 可通过通道折叠实现窄带侦收, 这时, 单比特接收机可不用于引导, 而用于判断虚假和解频率模糊, 实现宽带处理和大动态处理的带宽匹配, 避免复杂的引导问题, 其应用如图 5 所示。在干扰应用方面, 单比特接收机也可以发挥带宽宽、灵敏度高和测频速度快等优势, 形成频率信息、幅度信息和保宽等信息, 用于引导干扰资源的快速反应, 其应用框图如图

6所示。

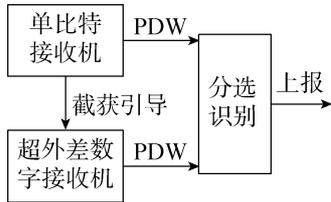


图4 宽带引导窄带框图
Fig. 4 Diagram of the wideband guided narrowband

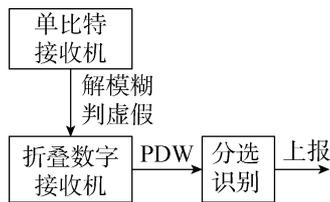


图5 解模糊、判虚假框图
Fig. 5 Diagram of the ambiguity and judging false



图6 干扰引导框图
Fig. 6 Diagram of the jammer guided

2 实现方法

2.1 宽带高灵敏度侦察

针对宽带高灵敏度侦察功能应用，单比特接收机的优势在于灵敏度高和频率测量精度高，对延迟时间要求不高。因此，在FPGA处理算法的设计过程中，对高速单比特采样数据可采用1024点傅立叶变换来完成频率测量和频域信号检测。在宽带高灵敏度侦察功能条件下，单比特基带处理模块中FPGA的处理算法流程如图7所示。

图7为N个信道10Gspss单比特采样的原始数据。首先，各自完成1024点MonoFFT处理和精测频得到精频率码，经过数据融合得到最终结果。举例来说，首先完成一个1024点MonoFFT处理算法，在进行信号检测过程中只测量最大峰值，得到最大值谱线位置并结合原始数据完成对应时间的傅立叶变换幅度、频率和相位信息。然后根据相位信息，利用前后两点进行相位差频率精确测量，完成1024点MonoFFT和相位差法精测频。FPGA处理资源见表1。

从表1可以看出，在一片FPGA中完成两路1024点MonoFFT和精测频的处理资源消耗约为54%。

对宽带高灵敏度侦察功能应用来说，当N个信道上存在多个信号时候，原则上说，对正确的信号都可以给出正确的频率测量结果。首先，通过比较幅度大小的方式给出一个最大幅度值对应的频率码，用以和IFI兼容；同时，通过去虚假等处理后，可以将所有正确的频率码和CP信号输出。

去虚假信号的一般方法是，检测到具有最大功率信号后，对虚假响应的信道进行预测，并利用匿影技术来消除这种虚假响应。这种虚假预测和频谱匿影对于窄带信号比较有效，但对于宽带信号，进行匿影将使频谱的一部分失去，使检测概率产生损失。

①射频信号谐波的影响：由于射频信号谐波和基波存在倍频关系，在起始、结束时间上面也有对应关系，所以，只要保证各个基带测量时间的统一，即使没有幅度信息的情况下也可容易地判断、剔除谐波频点。由于测频有一定误差，所以，通过倍频关系判断谐波有误判的可能性，但时域一致的前提下，谐波处出现真实频点的概率较低，可不考虑。

②信道边沿时候，会带来临近信道响应。对于信号处于信道边沿的时候在临近信道引起响应的问题，

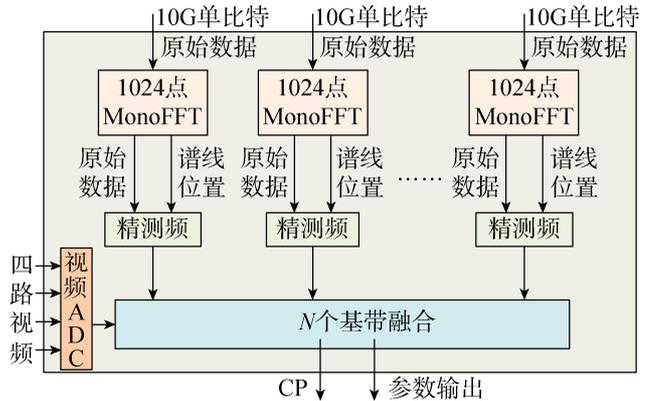


图7 高灵敏度宽带侦察功能处理框图
Fig. 7 The processing structure of high sensitivity wideband reconnaissance function

表1 1024点MonoFFT消耗FPGA资源统计表
Table 1 1024 dot MonoDFT FPGA resource statistical table

功能	块	RAM	Slices	乘法器	备注
256点	78	11,684	15		实现过程中每个FPGA
占用率	13%	31%	10%		处理芯片处理两路

比如 5.8GHz 的输入信号，假如一个信道频段范围为 6GHz~10GHz，与该信号存在 200MHz 频率间隔，将可能会在 6GHz~10GHz 信道上产生频率响应，对这种响应的一般处理方法如下：

- a.基带处理过程中，可适当扩大处理范围，保证搜索到正确的最大峰值，而不是谐波；
- b.针对信号偏移以外的信号，信道已有一定的抑制度，只有当信号功率强到一定程度才会导致临近信道有信号，可以通过临近信道信号幅度来判定，如果有一个很强的信号，那么临近信道的响应可以直接丢弃。

2.2 快速引导

在保证一定灵敏度条件下快速地给出频率码，用于干扰功能的频率快速引导。在 FPGA 处理软件的设计中，可以综合考虑延迟时间和灵敏度的要求。一种典型的 FPGA 处理算法流程图如图 8 所示。

从图 8 可以看出，每个 10Gsp/s 高速单比特采样对应一个 256 点 MonoDFT 运算，完成峰值搜索和判门限，得到结果后再进行融合处理。在融合处理中根据 N 个基带处理给出的频率和幅度信息，通过一定的融合策略最终得出整个单比特接收机输出的频率码和 CP 信号。该处理算法主要包括 256 点 MonoDFT 处理算法和融合。

对 10Gsp/s 高速单比特采样数据，完成 256 点 MonoDFT 可实现 40MHz 的频率分辨率，在 FPGA 实现 MonoDFT 算法主要平衡处理时间延迟和资源的要求。典型的单比特 MonoDFT 处理算法流程图如图 9 所示。

从图 9 可以看出，根据单比特特点进行简化后，经过综合布局布线，单个 256 点 MonoDFT 消耗的处理资源见表 2。

根据每个波段给出各自的检测结果，在融合部分主要完成的功能就是对 N 个基带给出的处理结果进行去虚假，并根据一定的引导策略使得单比特接收机输出引导的粗频率码。由于引导策略需要根据不同的系统应用需求来定，引导策略也有所不同。在判定过程中，如果任意 N 个波段中，只有一个波段的处理结果有信号，那么直接给出该基带的处理结果；如果有多个波段都有信号，主要通过 SDLVA 视频幅度判定一个大的信号给出结果。采用最大幅度判定给出频率码优点在于延迟时间小、判定简单，可在全频段内任意时刻给出瞬时功率最强信号的频率码。

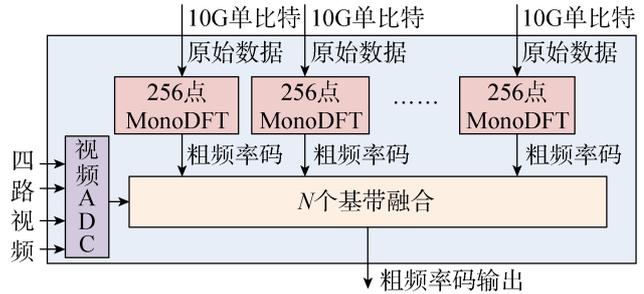


图 8 快速引导功能处理流程图

Fig. 8 The flowchart structure of fast guided function

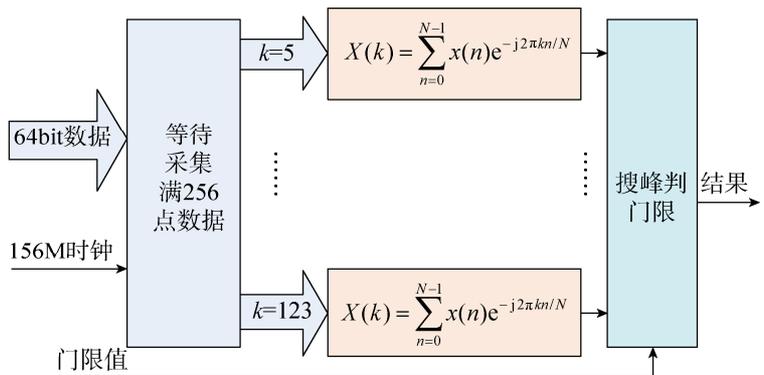


图 9 256 点单比特 MonoDFT 处理流程图

Fig. 9 The flowchart structure of 256 dots monobit receiver MonoDFT processing function

表 2 256 点 MonoDFT 消耗 FPGA 资源统计表

Table 2 256 dot MonoDFT FPGA resource statistical table

功能	块 RAM	slices	乘法器	备注
256 点 MonoDFT	28	3927	2	实现过程中每个 FPGA 处理芯片处理两路
占用率	2%	10%	1%	

3 应用验证

3.1 引导延迟试验

单比特接收机作为一种快速频率引导功能，无论作为引导侦察还是引导干扰功能，都要求引导延迟时间越短越好。考虑技术可实现性和现有 FPGA 的资源 and 功耗等方面的因素，快速引导算法的积累时间为 25ns，也就是说，对 10Gps 单比特采样，完成一个 256 点的快速 FFT 测频并输出，在保证一定灵敏度的基础上，可达到的快速引导延迟时间为 25ns。采用 VHDL 完成代码设计和 ModelSim 仿真，完成一个 256 点 FFT 快速变换和信号检测的延迟时间大约为 160ns 左右。典型的单比特接收机延迟分解图如图 11 所示。

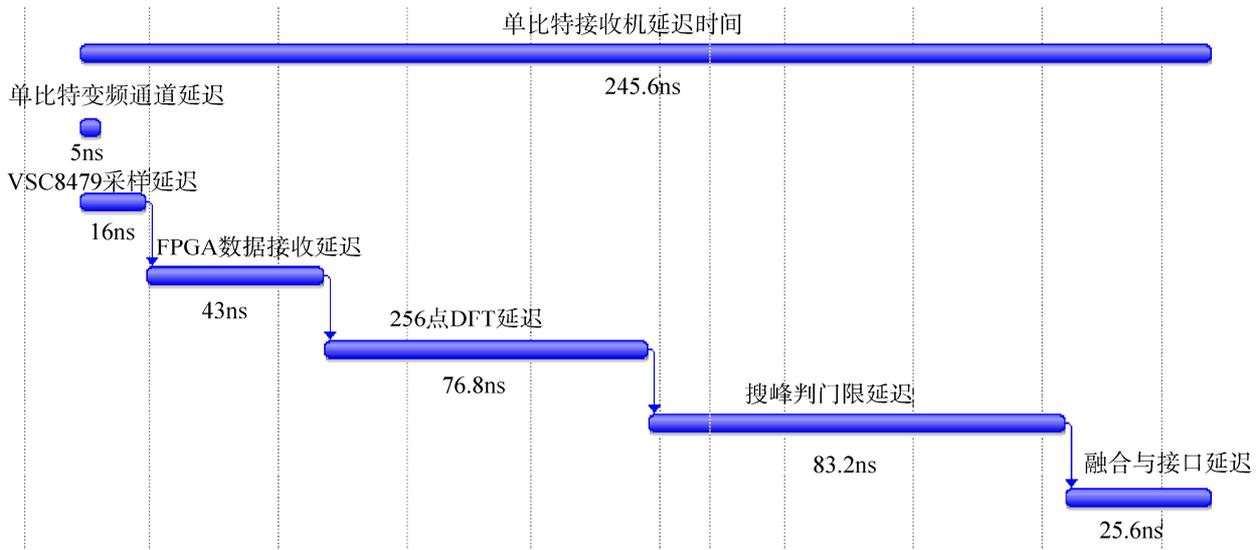


图 10 单比特接收机延迟时间分解图

Fig. 10 The decomposition structure of delay time monobit receiver

从图 10 可以看出，FPGA 数据接收延迟、256 点 DFT 变换和搜峰判门限可以固化的处理算法，这三个部分的延迟就占到了总延迟的 80%左右。随着工艺制造和微系统技术的日益成熟，可将 FPGA 处理算法 ASIC 流片进行集成设计，一方面可以大大减小体积和功耗，另一方面可大幅降低处理延迟时间。

3.2 频率测量试验

一般单比特接收机中的载频测量方法是对时域信号进行滑窗 DFT 处理后，对 DFT 后的频域幅度值进行搜峰处理，最高峰值对应的频率值即为信号的载频测量值，这种载频测量方法的缺点是测量误差太大。以 10GHz 采样率为例，1024 点 DFT 处理，频率分辨率近似为 9.7MHz，对载频分布在 6290MHz~7310MHz 的信号进行蒙特卡洛仿真，得到的载频测量误差如图 11 所示。由图 11 可以看出，载频测量误差约为频率分辨率的一半，载频测量精度较差。这类接收机很难用于电子信号的信号分选、威胁识别和引导干扰等方面，载频测量误差大是制约单比特接收机广泛应用的瓶颈。

为进一步提高载频测量精度，文中采用信号滑窗检测时形成的频谱数据，对常规载频测量方法得到的载频测量值进行修正，最终得到精确的载频测量值。图 12 为采用一种简化 MonoDFT 算法的测频精度仿真分析图。仿真条件：采样率为 10GHz，频域 DFT 点数为 1024，进行频域滑窗检测处理，载频测量误差优于 0.3MHz，载频测量误差仅仅为频率分辨率的 1/30，测量精度远远高于频域 DFT 处理的频率分辨率，大大提高了载频测量精度。图 13 为某型装备在复杂环境中对 2GHz~18GHz 频率范围辐射源信号的频率测量误差图，测频精度优于 0.33MHz (rms)。

在实验室多信号环境下对单比特接收机测频技术进行验证，设置多个模拟信号源对单比特接收机的性能进行验证，测试过程如图 14 所示。

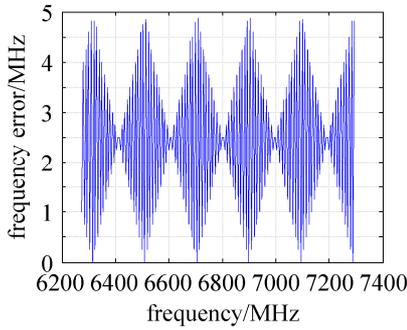


图 11 常规频率测量误差图

Fig. 11 The error structure of conventional frequency measurement

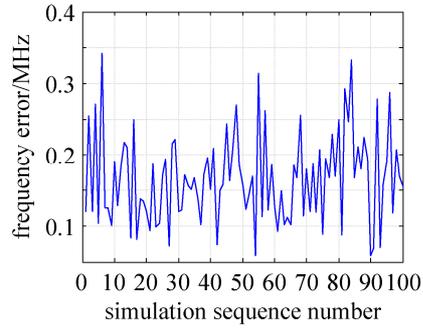


图 12 高精度频率测量误差图

Fig. 12 The error structure of high-precision frequency measurement

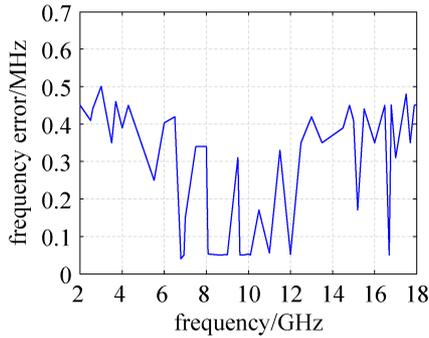


图 13 某型装备频率测量误差图

Fig. 13 The error structure of frequency measurement

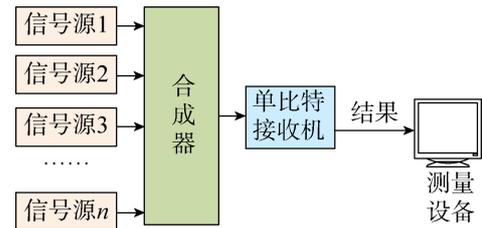


图 14 实验室验证示意图

Fig. 14 The lab validation diagram

图 15 和图 16 是分别在多个信号环境下的桌面测试图和实际环境中某民用飞机气象雷达信号的全脉冲图。从图中可以看出，该接收机能够准确地检测到多信号并进行高精度的信号频率测量，测量精度优于 0.5MHz。

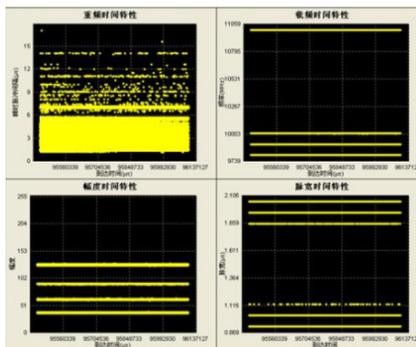


图 15 实验室多信号环境下的频率测量结果图

Fig. 15 The lab multi-signal environment frequency measurement diagram

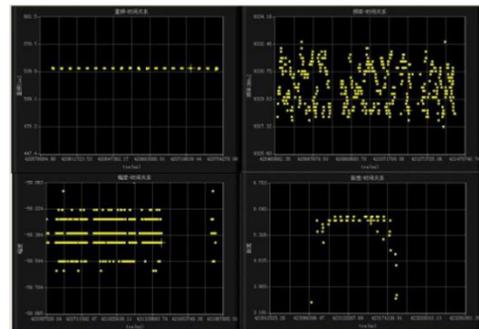


图 16 某气象雷达信号的全脉冲图

Fig. 16 The full-pulse diagram for meteorological radar signals

4 结束语

本文对单比特接收机的工作原理进行了理论和应用分析，提出采用一种简化后的 MonoDFT 算法实现雷达辐射源信号频率的高精度测量，设计了两种具体的应用场景和实现方法，给出了典型的单比特接收机延时计算分解图和一种高精度频率测量仿真图以及某装备实际环境中的信号侦收情况。试验验证结

果表明,采用简化后的 MonoDFT 算法的单比特接收机具有延迟时间短、资源消耗小和测频精度高等特点,可应用于电子战领域。

参考文献

- [1] GRAJAL J, BLAZQUEZ R. Analysis and characterization of a monobit receiver for electronic warfare[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(1): 244–258.
- [2] 柴亚茹. 电子战单比特数字接收机系统[J]. 计算机与网络, 2012, 24: 56–58.
CHAI Yaru. Monobit digital receiver system for electronic warfare[J]. Computer & Network, 2012, 24: 56–58.
- [3] POI, DAVID S K, CHEN C, et al. Chip design for monobit receiver[J]. IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997(45): 2283–2295.
- [4] 王一舒, 沈凤臣. 补偿矩阵测频算法在单比特多波束测向中的应用[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(3): 285–288.
WANG Yishu, SHEN Fengchen. Application of compensation matrix frequency measurement in direction finding based on mono-bit receiver[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2017, 12(3): 285–288.
- [5] 王坤达. 基于实时数字信号处理的宽带单比特瞬时测频接收技术[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(3): 31–36.
WANG Kunda. Wideband single-bit IFM receiving technology based on real-time digital signal processing[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2012, 35(3): 31–36.
- [6] 段国文. 采用 MonoDFT 测频的单比特接收机性能分析[J]. 通信与网络, 2013, 39(11): 96–98.
DUAN Guowen. The 1 bit receiver performance analysis of the MonoDFT processing[J]. Application of Electronic Technique, 2013, 39(11): 96–98.
- [7] 向海生, 王冰. 超宽带单比特数字接收机[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(1): 48–51.
XIANG Haisheng, WANG Bing. An ultra-wideband monobit digital receiver[J]. Radar & ECM, 2016, 36(1): 48–51.
- [8] 杨一鸣, 向海生. 一种单比特测频接收机的设计与仿真[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(3): 119–122.
YANG Yiming, XIANG Haisheng. Design and simulation of a monobit frequency measurement receiver[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2020, 43(3): 119–122.
- [9] 石荣, 阎剑, 张聪. 基于随机抖动的单比特量化理论分析与仿真研究[J]. 现代电子技术, 2013, 36(3): 63–66.
SHI Rong, YAN Jian, ZHANG Cong. Theoretical analysis and simulation of monobit quantization based on random dithering[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(3): 63–66.
- [10] 焦瑞涛, 林晓烘, 叶灵军, 等. 基于单比特量化的低截获雷达信号测向方法[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 79–83.
JIAO Ruitao, LIN Xiaohong, YE Lingjun, et al. Direction finding method of low interception radar signal based on monobit quantization[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(11): 79–83.

[作者简介]

- 文富忠 1975年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为电子对抗技术。
胥全春 1990年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达对抗技术。
韩学涛 1981年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为信号处理技术。
程 号 1985年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达对抗技术。