

高灵敏度大带宽声光信道化接收机

吴 冉,张泽红,陈永峰,廖 婷

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:针对目前雷达侦察接收机难以兼顾瞬时大带宽和高灵敏度性能的紧迫形势,深入研究了声光信道化接收技术。其充分利用声光调制和空间傅里叶变换所具有的大带宽、高速度及并行处理等技术优势,并结合多级自适应积分光电转换,实现复杂电磁环境下对目标信号的高效截获。实验证明,声光信道化接收系统具有捕获信号范围宽,自适应能力强,检测灵敏度高等特点,并能有效分离同时到达信号。经样机测试,系统瞬时工作带宽为1 GHz时,信号探测灵敏度仍可高达-95 dBm,在电子侦察领域具有很高的应用价值。

关键词:高灵敏度;宽带检测;声光调制;时频分析;信道化接收机

中图分类号:TN851

文献标识码:A

Study on Acousto-optic Channelized Receiver with High Sensitivity and Wide Bandwidth

WU Ran, ZHANG Zehong, CHEN Yongfeng, LIAO Ting

(26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: Aiming at the problem that the present radar reconnaissance receiver is hard to take into account both wide instantaneous bandwidth and high sensitivity, the acousto-optic channelized receiver technology has been deeply studied in this work. By making full use of the wide bandwidth, high speed and parallel processing technology advantages of acousto-optic modulation and spatial Fourier transformation and combining the multi-stage adaptive integral photoelectric conversion technology, the proposed acousto-optic channelized receiver can realize the efficient target signal intercept under complicated electromagnetic environments. The experimental results indicate that the acousto-optic channelized receiver system has the features of wide capture range, strong adaptive capacity, high detection sensitivity and can effectively separate the signals at the same time arrived. After the prototype test, when the system works instantaneous bandwidth is 1 GHz, signal detection sensitivity can be as high as more than -95 dBm. It is of high value in the practice of electronic reconnaissance field.

Key words: high sensitivity; wide-band detection; acousto-optic modulation; time-frequency analysis; channelized receiver

0 引言

在21世纪高度信息化的战场上,各种新体制雷达的应用比例迅速增加,雷达侦察接收将面临高密度、高复杂波形、宽频谱捷变、低截获概率(LPI)等雷达信号环境威胁。因此,现代接收机必须具有大带宽、高增益、实时并行处理等性能特征。目前,以常规电子系统为基础的接收机很难达到这些要求^[1]。高灵敏度大带宽声光信道化接收机利用声光调制技术和空间傅里叶变换原理实现多信道并行窄带滤波和频谱识别,并通过多级积分检测技术对信

号进行自适应相干积累。由此,在提高系统灵敏度的同时也兼顾到系统检测动态和响应速度等指标,增强了系统对各种信号的捕获能力,可有效解决目前侦察接收机瞬时大带宽、高灵敏度和实时性等不能兼顾的难题。

1 声光信道化接收技术基本原理

利用声光技术可巧妙实现截获信号的高速并行运算处理,声光信道化接收机通过空域傅里叶变换将信号按空间频道划分,可轻松实现成百上千个信道的并行处理,其原理结构示意图如图1所示。

收稿日期:2015-08-05

基金项目:国家重大基础研究基金资助项目

作者简介:吴冉(1971-),女,重庆人,高级工程师,硕士,主要从事声光信号处理技术研究。

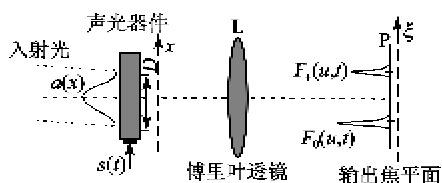


图1 声光信道化接收机空域傅里叶变换结构示意图

当准直激光束入射到由被测信号 $s(t) = A(t) \times \cos 2\pi ft$ 驱动的声光器件时,产生声光互作用。若产生沿声光器件长度 x 方向的空间调制光分布为 $f(x,t)$,则根据傅里叶光学可知,经过声光器件后的光信号在透镜 L 的后焦平面 P 上实现一维傅里叶变换,其傅里叶变换表达式为

$$F(u,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,t) e^{-j2\pi ux} dx \quad (1)$$

声光介质中的空间频率 u 与驱动电信号 $s(t)$ 的瞬时频率 f 之间存在正比关系:

$$u = 1/\Lambda = f/v \quad (2)$$

式中: Λ 为声波波长; v 为介质中的声速。

完成空域傅里叶变换的信号是以透镜后焦平面 P 上的光幅分布存在,还需后续光电转换和数据采集运算配合才能完成信号时频幅参数的识别提取。被测信号频率 f 与 P 平面的物理空间位置 ξ 以及透镜的焦距 F 存在如下关系:

$$f = v\xi/(\lambda F) \quad (3)$$

式中 λ 为光波长。通过线阵图像传感器实时检测映射到 P 平面的衍射光空间位置 ξ ,便可对应得到信号各时间点的频率 f ,且 ξ 上的信号光强与其对应频率成分的功率成正比^[8]。

这里,空域傅里叶变换使时域信号按频率单元形成空间信道划分,其效果相当于建立了窄带滤波器组。由此,声光信道化接收机的数理模型可由窄带滤波、平方律检波和积分等运算处理过程来描述,如图2所示。

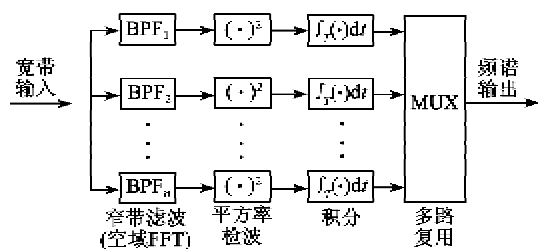


图2 声光信道化接收机数理模型

根据数理模型发现,声光信道化接收机、传统的模拟信道化接收机及目前飞速发展的数字信道化接收机都有类似的信号处理运算过程,只是各自采取

的实现方法不同。传统的模拟信道化接收机利用模拟电路实现信道划分及信号处理,所以,当通道数目较多时,系统体积庞大,功耗和成本都很高,应用受限。数字信道化接收机利用数学运算实现信道处理和参数提取,具有体积小,响应快,运算精准灵活等优势。但随着信号环境的日益复杂,对接收机瞬时带宽要求越来越高,同时还要兼顾高灵敏度和多信号处理,这些要求对纯数字技术提出了非常高难度的挑战。声光信道化接收机主要利用模拟光路和数字技术结合进行信号处理,基本结构小巧简单。其核心器件是声光偏转器,目前随着新材料的出现和换能器制作工艺的提高,声光偏转器的性能已得到迅速提高,其带宽可达 2 GHz,存取时间约 1 μ s,时间-带宽积为 1 000~3 000,并具有良好的相位响应和大动态范围。以声光器件为核心的声光信号处理技术在现代通信和雷达领域具有广阔的应用前景^[1]。

2 高灵敏度大带宽声光信道化接收机设计

2.1 总体设计

声光信道化接收机主要由接收前端、频谱分析和信号处理 3 部分构成,其基本结构如图3所示^[3]。

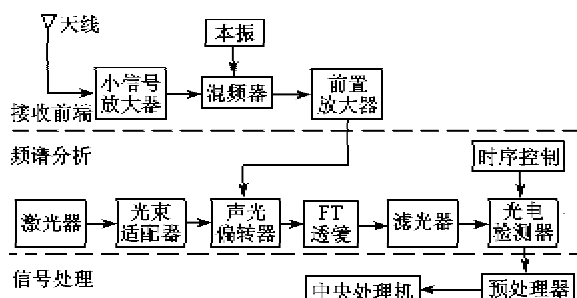


图3 声光信道化接收机基本结构框图

该结构涉及电路系统、光路系统及数字信号处理系统。由图3可见,其与传统声光接收机差异不大,但在关键功能模块的设计制作上已发生了根本改变。比如光束适配器不仅处理光束准直和形状还要处理光束偏振方向;宽带声光偏转器采用了新材料新工艺;滤光器不仅进行空间滤光处理,还要进行偏振滤光处理;光电检测器不再使用 CCD 器件,而是采用读取更高速灵活的 CMOS 器件等。

2.2 接收前端

接收前端部分对信号进行变频和放大处理,使接收信号的频带和功率适配声光偏转器的最佳工作范围。该部分的设计技术与其他种类的接收机差不多,但由于声光接收机后续特有光电隔离环节,对输

入通道的噪声系数要求相对宽松,可降低该部分的设计难度和硬件成本。

2.3 频谱分析

频谱分析部分是声光信道化接收机的核心部分,其利用声光器件将光学技术引入信号接收处理装置,获取以光学手段对信号进行频谱识别、信噪隔离及灵活读取等操作。利用光学信号处理技术的优势如下:首先,在傅里叶变换领域,空间信号比时间信号更易检测,因为在空间傅里叶平面上每个频率的能量都集中成一个精确的点,利用光电检测阵列易完成这些点的视频采样。另外,在光路系统中利用光的偏振方向,可实现高消光比传输信号,高效隔离背景噪声,显著提升系统响应灵敏度和动态范围。图4为应用偏振分离技术前、后光检输出信噪比较。由图4(a)可见,输出频谱信号太弱,已被噪声掩埋无法辨认。由图4(b)可见,输出噪声被有效隔离,同样的弱信号能清楚地进行检测识别。显然,光学系统利用光束偏振方向的差异可轻松实现相同时空信噪的分离,而在电子系统中绝对无法实现相同时频信噪的分离。因此,采用声光技术对信号接收灵敏度的保障是其他技术无法比拟的。

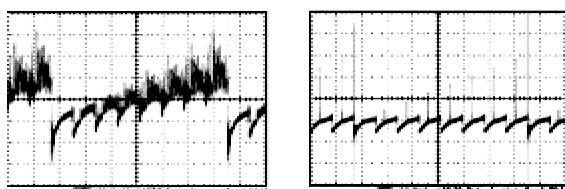


图4 应用偏振分离技术前、后光检输出信噪比较

实验证明,即使针对瞬时带宽1 GHz的信号,通过声光信道化接收机可实现优于-95 dBm的接收灵敏度。2001年,澳大利亚报道了其“防御科技机构(DSTO)”研发的“高灵敏度微波接收机(HSMR)”采用声光频谱分析技术成功实现对低截获概率(LPD)雷达信号的最早监测。

系统的光电检测环节是前端模拟光学技术和后端数字处理技术有效结合的关键节点。设计中应用高速高灵敏度的CMOS图像传感器,针对被测信号特征设计灵活的时序控制读取信号以获取最佳检测效果。如设置像素以非破坏性读数模式工作,可实现信号多级积分以适应更宽范围的强弱信号。图5为光电检测器在两种工作模式下检测弱信号比较。由图5(a)可见,由于积分时间固定,每个帧周期中输出信号幅度不变,当信号很微弱时无法检测。

由图5(b)可见,积分时间从左至右加长,信号幅度也在逐渐升高,所以,在检测弱信号时,即使前几个帧周期未被检出,随着积分时间的加长,信号自动累加提升信噪比,一旦达到设定阈值就可被检出。此种模式也兼顾到强信号能立即检出,确保系统响应时间。

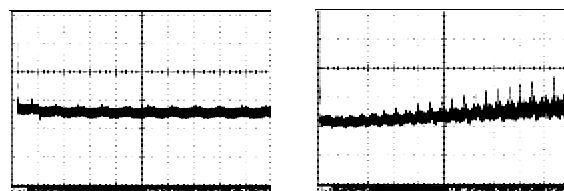


图5 光电检测器在两种工作模式下检测弱信号比较

光检阵列的像素一般设计成3个一组等价于电子系统的一个窄带滤波通道,可以利用具有1 024~4 096位像素的线阵图像传感器实现成百上千个信道传输处理。光学系统高度并行的结构提供了信号瞬时处理容量的巨大增加,最重要的是能保证在宽带频率范围内还具有很高的信号截获概率。而整个频谱分析结构仅由3个有源器件:激光器、声光偏转器和光电检测器组成,功耗仅几瓦,体积约200 mm×150 mm×50 mm。所以,声光信道化接收机可适用于卫星、飞机、轮船、潜水艇和地面车辆等多种电子侦察平台。

2.4 信号处理

信号处理部分主要是对空间频率信道的输出进行模数转换及时-空数据关联处理,提取所需信号参数。由声光频谱分析原理可知,当输入电信号转换为超声波在介质中建立衍射光栅使入射光波被调制时,具有固定孔径时间。超声波陆续通过声光器件的有效孔径(长度为 D)发生声光互作用,输出衍射光再通过透镜进行空域傅里叶变换,即相当于在时域上对信号进行滑动窗口的短时空域傅里叶变换。则离开声光器件的布喇格衍射光振幅分布可表示为(只需考虑衍射复振幅的相对分布,此处未计入布喇格衍射时入射光与光轴倾斜角的影响^[4])

$$f_+(x, t) = ma(x)s(t - x/v) \quad (4)$$

式中: m 为调制度; $a(x)$ 为声光孔径内振幅权函数。将空间窗参数 $x(0 \leq x \leq D)$ 与时间窗参数 τ 的对应关系 $x = v\tau$ 和式(4)代入式(1),可得到与短时傅里叶变换数学定义式一致的表达式(只考虑衍射复振幅的相对分布时,可忽略常数因子 v 和 mv ^[4])。

$$F_1(u, t) = mv \int_{-\infty}^{+\infty} a(v\tau) s(t - \tau) e^{-j2\pi u\tau} d\tau \quad (5)$$

由此, 声光频谱分析系统可实现短时傅里叶变换, 后续采用恰当的光电转换时序和数据处理, 使光信号空域与电信号时域数据关联输出, 可利用短时傅里叶变换理论对瞬变信号进行时频幅参数的分析提取。

在输出焦平面 P 上, 设计线阵图像传感器光敏区长度恰好与被测信号总带宽 Δf 内各频点所映射的衍射光点轨迹相吻合。其像素个数

$$n = \Delta f / \delta f \quad (6)$$

式中 $\delta f = v/D$ 为频率分辨率。定义空间序列 j 为 $1 \sim n$, 时间序列 i 为 $1 \sim m$ 。由此, 空间 j 点对应的信号频率值为

$$f = f_0 - j\delta f \quad (7)$$

式中 f_0 为起点频率修正值。信号出现时间点为

$$t = t_0 + iT \quad (8)$$

式中: t_0 为起点时间修正值; T 为帧读出周期; i 为读全帧次数。当设计 $T = D/v$ 时, 系统对信号的幅度和时间分辨率达到最佳状态。通过建立的时-空原始数据矩阵 A_{ij} 进行时间序列 i 和空间序列 j 的相应运算便可得到被测信号的瞬态二维时频函数 $A(t, f)$ 。随后将 $A(t, f)$ 数据传送到时频显示窗口进行实时显示, 或进一步利用时频参数对信号进行分类识别处理等。

这里对信号的算法处理可逐窗进行, 信号处理流程如图 6 所示。每次计算都只局限在一个时窗之内, 计算规模小, 易实现持续信号的快速识别处理,

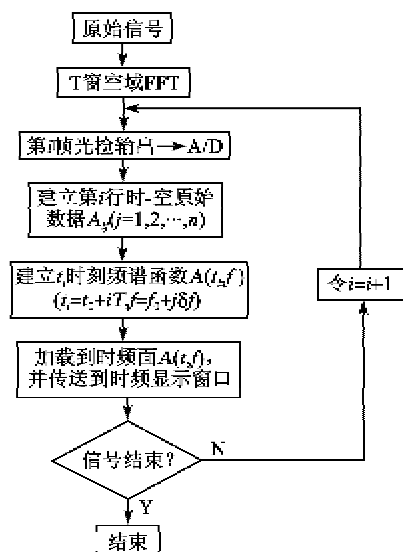


图6 声光信道化接收机提取信号时频幅参数流程图

且多分量信号的识别处理不增加难度, 也不产生交叉项, 容噪能力强。

3 样机实验

用声光信道化接收机实测含有 1 500 MHz 和 1 530 MHz 两个频率分量的脉冲信号时, 时频显示窗口所显示的时频瀑布图如图 7 所示。图中横坐标表示所测频率范围, 纵坐标表示检测到频率成分的时间段(为便于观察, 以 1 ms 为时间单位进行刷新显示, 实际时间精度可达 μs 量级)。信号标志符“|”的颜色可区分信号幅度大小。瀑布图下方是所检测信号的实际参数值。

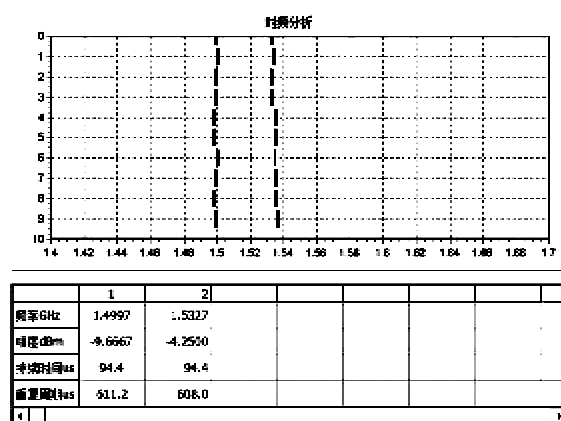


图7 声光信道化接收机的时频显示窗口

样机主要性能指标如下:

- 1) 瞬时工作带宽: 1 GHz。
- 2) 系统灵敏度: 优于 -95 dBm。
- 3) 动态范围: 优于 45 dB。
- 4) 测频精度: ± 2 MHz。
- 5) 测幅精度: ± 1 dB。
- 6) 响应速度: 约 $2 \mu s$ 。

该指标显示高灵敏度大带宽声光信道化接收机已完全能满足实际工程应用需求。

4 结束语

我国早期对声光信道化接收机的研究主要受制于其核心器件宽带声光偏转器的发展, 再者光电技术优势的结合应用也不够深入, 不少研究者误认为声光接收机工作带宽窄、实时动态差, 难以真正满足实际工程需要。目前研究表明, 高灵敏度大带宽声光信道化接收机将声、光、电多门学科技术进行优势互补, 避免了传统技术的硬件繁琐和数据冗余, 能高速、高灵敏度地处理大容量信息, 适合处理复杂电磁

(下转第 936 页)