

高动态范围声光接收机

何大伟 李也凡 许承杰 范俊清

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

摘 要 介绍了一种高动态范围声光接收机, 这种接收机具备实现宽带射频信号幅度, 频率和相位的信道化探测能力。该接收机在 $0.6328 \mu\text{m}$ 激光器的工作条件下 (1.0 mW), 声光布拉格盒在 50 mW 射频信号驱动下, 在 140 MHz 的中心频率上, 20 MHz 带宽内, 对单频信号动态范围测量结果的超过 55 dB ; 当两个等幅、频率不同的射频信号同时加到布拉格元件上, 其动态范围测量的结果超过 50 dB 。频率分辨率可达到 10 kHz 。

关键词 声光, 外差, 动态范围。

1 引 言

由于人们对 $2 \text{ MHz} \sim 300 \text{ GHz}$ 范围的通信雷达信号的侦察接收机要求越来越高, 而对这些信号需要进行截获、分选, 在某种情况下还需进行识别, 工作在这些频段的常规接收机, 例如晶体视频接收机瞬时测频接收机和超外差接收机等都有其局限性; 在给定的时间上它们只能截获一个信号。人们需要一种能够不失真地、同时精确截获几个时间重合信号的接收机。并且能够确定信号的频率、幅度、到达时间(TOA)等, 除此以外还要求有高的截获概率。

能同时截获几个时间重叠信号的接收机有压缩接收机(又称微扫接收机)和信道化接收机。在信道化接收机中输出信号是以并行方式输出的, 其声光信道化技术的特征是宽的带宽, 中等动态范围以及高水平的信道比能力, 因而分辨率也高, 该技术从价格, 可靠性和高水平信道比能力(信道数和单位体积信道数)的简单性等各方面来说, 都特别具有吸引力。

2 工作原理

2.1 数学模型

敏感的外差探测器件需要有与信号光束相干同偏振的、准直平行的参考光束, 考虑信号光由傅里叶变换后空间频率和瞬时频率的关系。施加于布拉格盒上的信号可能是连续信号或者为脉冲信号, 对于脉冲信号的空间频率与瞬时频率的关系较为复杂、本文仅对连续信号并处于覆盖整个光束宽度状态下进行讨论。设加在布拉格盒上的电信号为 $f(t) = s(t) \cos(2\pi f_c t + \Phi)$, 离开布拉格盒后的光振幅为

$$A(x, t) = as(t - x/v) \exp \{j[2\pi f_c(t - x/v) + \Phi]\} \quad (1)$$

其中 f_c 为布拉格盒中心频率, v 为声速, a 为系数, 透镜完成的空间傅里叶变换为:

$$S(\omega, t) = \int_0^D as(t - x/v) \exp \{j[2\pi f_c(t - x/v) + \Phi]\} \exp(j2\pi\omega x) dx \quad (2)$$

其中 D 为光束宽度, ω 为空间频率。利用变换 $u = (t - x/v)$, 把方程(2)写为:

$$S(\omega, t) = av \exp[j(2\pi\omega t + \Phi)] \int_{t-T}^t S(u) \exp[j2\pi(\omega_c - \omega)vu] du \quad (3)$$

其中, $T = D/v$, $f_c = \omega_c v$ 。

为方便起见, 作者令 $as(t - x/v) = 1$, 即光离开布拉格盒时的振幅为单位振幅。方程(3)为如下结果:

$$S(\omega, t) = D \exp[j(2\pi f_c + \Phi)] \text{sinc}[(\omega - \omega_c)D] \quad (4)$$

(4)式表明: 经过空间傅里叶变换后, 振幅的空间频率谱分布为 sinc 函数分布, 其中心频率为 ω_c 振幅的大小与光束孔径成正比。且在整个谱宽度内, 其瞬时频率为 f_c 与空间频率无关, 即与探测单元的位置无关。但是如果在谱分析器中仅有信号光时, 由于探测单元只能接收光强度, 这样探测单元的响应为:

$$I = |S(\omega, t)|^2 = D \text{sinc}[(\omega - \omega_c)D]^2 \quad (5)$$

(5)式表明, 探测单元的响应是随着空间频率变化的强度值。如果利用整个探测阵列, 测量一定空间频率范围的光强度分布, 确定对应最大光强的空间频率, 即 $\omega_{\max} = \omega_c$ 。由 $f_c = \omega_c v$ 可判定输入信号的频率。这是典型的功率谱分析器, 但却失去了位相信息 Φ 。

如果有另外一个本征信号 $g(t)$, 经过另外一个布拉格盒产生参考光束, 此参考光束经过傅里叶变换后空间频率和瞬时频率的关系参照方程(4)有

$$R(\omega, t) = D_r \exp[j(2\pi f_r t + \Phi_r)] \text{sinc}[(\omega - \omega_c)D_r] \quad (6)$$

此时为区别参考光, 可以把信号光振幅的空间-瞬时频率关系(4)式表达为:

$$S(\omega, t) = D_s \exp[j(2\pi f_s t + \Phi_s)] \text{sinc}[(\omega - \omega_c)D_s] \quad (7)$$

把 $R(\omega, t)$ 和 $S(\omega, t)$ 叠加后, 探测单元的响应为

$$I_h = |S(\omega, t) + R(\omega, t)|^2 = |S(\omega, t)|^2 + |R(\omega, t)|^2 + 2S(\omega, t)R(\omega, t) \cos[2\pi(f_s - f_r)t + \Phi_s - \Phi_r] \quad (8)$$

$$I_h = I_s + I_r + 2(I_s I_r)^{1/2} \cos[2\pi(f_s - f_r)t + \Phi_s - \Phi_r] \quad (9)$$

探测单元的响应是由一个直流量 $(I_s + I_r)$ 和一个交流量 $2(I_s I_r)^{1/2} \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\Phi)$ 组成, $\Delta\Phi = \Phi_s - \Phi_r$ 。经过带通滤波后, 不仅可以测 f_s , 而且可以测量输入信号的位相。由此, 相应的射频信号的振幅、频率以及位相可以同时确定。

对于复杂的微弱信号而言, 声光相关技术是主要的检测手段, 而相关信号的接收主要以外差检测为基点。采用外差检测相关信号, 无论是对一次衍射光, 还是二次衍射光, 其输出特点都是: 相关输出在时间轴上被压缩, 输出频率是输入信号频率的二倍, 相关输出有一个延迟时间。所以, 在实时模式工作中, 不仅可以检测任何信号的瞬时频谱、幅度, 而且可以检测相关峰宽度及延迟时间。

2.2 设计思想

声光外差接收机的光路设计是根据下述两个极限条件决定的。

2.2.1 频率分辨率极限

频率分辨率极限 G 为

$$G \leq F\lambda\delta_f/nV \quad (10)$$

式中 n 为有效折射率, F 为傅里叶变换透镜的焦距, λ 为介质中的光波长, V 为声速。此式表明, 在频率差为 δ_f 时, 两频率信号对应的衍射光斑之间的距离要大于探测器单个像元的尺寸, 这样才能够在两个相邻的像元上输出。否则两频率信号的光点不能分辨。

2.2.2 光学分辨率极限

在给定的光学孔径(光束宽度) D 和光束的波长 λ 条件上, 探测器单个像元尺寸 S 要满足光束受限衍射关系:

$$S \geq g\lambda/nD \quad (11)$$

式中 g 为由衍射光斑确定的常数, 在 $1/e^2$ 光强点截断高斯光束在焦面上取全瓣尺寸时, $g = 2.48$ 。此式表明, 探测器单个像元的尺寸必须大于受限衍射光斑的尺寸。否则, 将产生探测单元间的串扰噪声。

2.3 动态范围

声光接收机包括功率谱和干涉式谱分析器。在功率谱分析器中, 光探测单元的电流正比于射频信号的功率, 声光接收机动态范围受到许多因素的限制。诸如, 激光器功率, 系统中光的损耗, 光探测器及放大器的噪声等效功率以及多个信号在布拉格中产生的假信号电平, 这些因素通常使动态范围(对信号功率而言)限制在约 30 dB~ 35 dB(目前, 国际上采用各种方法可以使动态范围提高到 50 dB~ 60 dB)。动态范围的增加可以通过增加激光功率, 提高探测单元的灵敏度等手段来实现。在干涉式谱分析器中, 光探测单元的电流正比于信号光强和稳定的参考光强积的平方根。这样, 干涉式器件的动态范围可望达到功率谱动态范围的两倍。实际上, 由于激光功率分布在一个信号信道和多个参考光信道上, 使得动态范围达不到两倍功率谱的动态范围。

3 实验结果

结合本文的具体目标要求: $\delta_f = 2 \text{ MHz}$, 带宽 $\Delta f = 20 \text{ MHz}$ 。声光外差接收机输入电信号的中频为 140 MHz, 设计分为 10 路并行输出。参考光束是由一柱面镜扩束, 再由会聚透镜而得到的带有角度的实光线, 以覆盖由声光信号产生的带宽范围。由光电探测器接收的声光外差信号与本征信号差频后, 形成中频为 4.8 MHz 的 10 路输出, 每一路的带宽为 2 MHz。对于 $\delta_f = 2 \text{ MHz}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, 变换透镜的焦距 $F = 550 \text{ mm}$ 条件下, 利用(10)和(11)式可以求得 D 和 S 。利用 F 、 D 和 λ 值可以设计透镜。把光信号输入到二极管探测阵列。这样的外差器件结构不仅简单, 而且可以实现较大的带宽。

声光外差接收机光路部分的组成如图 1 所示。激光器发出的激光束经柱面镜扩束、准直后, 由第一分束器分成信号光和参考光, 信号光射到布拉格盒上并产生衍射, 衍射光经透镜射到第二分束器上, 由探测器接收。参考光经第一反射镜反射到第二反射镜再反射至分束器上由探测器接收。在第二分束器里, 信号光和参考光的外差

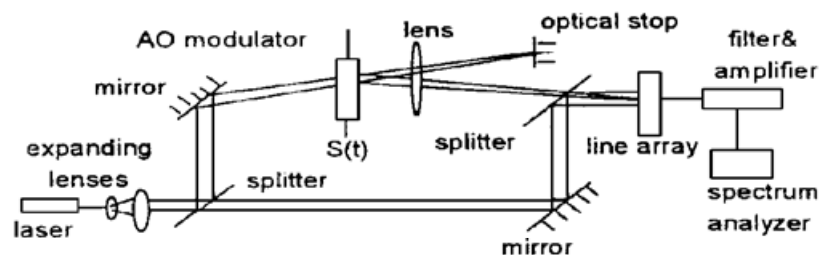


Fig. 1 AO heterodyne device

作用,使光强度产生一个正比于信号的振幅项,信号振幅在两光束间的差频上实现外差,使输出随加在布拉格盒上的射频信号线性地变化,从而增大了系统的动态范围。

布拉格器件由二氧化碲晶体制成,器件的中心频率为 140 MHz,有效带宽 85 MHz,超声渡越时间为 10 μ s。其中光电检测器由光电二极管阵列、电压放大器及滤波器构成。本实验采用 Hp-8592b 频谱分析仪对接收机的性能进行了测试。实验结果是在连续信号条件下获得的(本接收机在布拉格的线性工作区域内也可以接收脉冲信号)。

经过系统的综合联试获得了所需外差信号的相关信息。当改变输入于声光器件的工作频率时,外差信号的相关信息也相应变化,信号光和参考光缺少那一项,外差信号瞬即消失。在 0.6328 μ m 激光器的工作条件下(1.0 mW),声光布拉格盒在 50 mW 射频信号驱动下,在 140 MHz 的中心频率上,20 MHz 带宽内,对单频信号的动态范围进行了测试,其中典型曲线如图 2 所示。动态范围测量的结果超过 55 dB。

两个等幅、频率不同的射频信号同时加到布拉格元件上,其动态范围测量结果的典型曲线如图 3 所示。即在布拉格元件互调项存在的条件下,对两个不同信号动态范围同时测得的结果超过 50 dB,频率分辨率可达到 10 kHz。

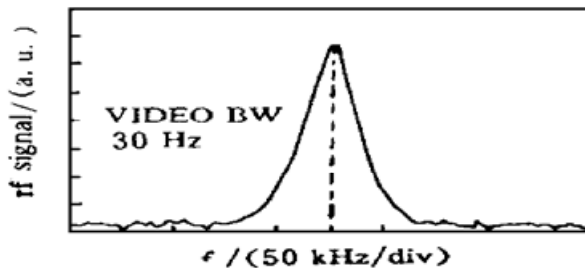


Fig.2 Measured dynamic ranges of rf signal.

Center: 140.00050 MHz

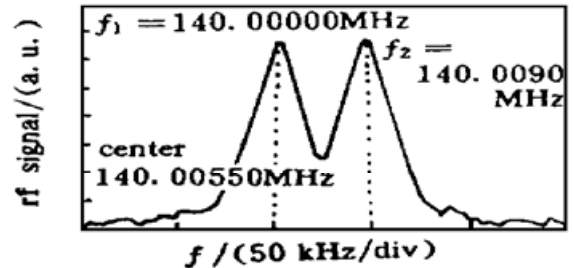


Fig.3 Measured dynamic ranges of rf signals.

Center: 140.00550 MHz

由于通过布拉格元件衍射的信号光束与参考光束发生外差作用,输出便随着加到布拉格元件上的射频信号线性变化(如果布拉格元件是工作在低功率线性范围内),而不是象以前的强度检测那样随射频输入信号强度的平方变化,于是动态范围本质上获得了增加。

结 论 声光接收机采用干涉式谱分析结构可以有效的提高其动态范围,本文在实验上证明了干涉式声光接收机具备实现宽带射频信号幅度,频率和相位的信道化探测能力。在布拉格元件的互调项限制下,两个等幅频率不同的射频信号同时加到布拉格元件上,其动态范围测量的结果超过 50 dB。

参 考 文 献

- [1] A. Vander Lugt, Interferometric spectrum analyzer. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(16) : 2770~ 2779
- [2] Jim P. Y. Lee, Interferometric acousto-optics signal processor for simultaneous direction finding and spectrum analysis. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(6) : 867~ 872
- [3] H. Ansari, J. R. Lesh, Superfine resolution acousto optics spectrum analysis. *Appl. Opt.*, 1991, **30** (11) : 1396~ 1400
- [4] Shalhav Zohar, Spectral window of the acousto-optic folded spectrum analyzer. *Appl. Opt.*, 1993, **32** (32) : 6445~ 6455

High Dynamic Range Acousto-Optic Device

He Dawei Li Yefan Xu Chengjie Fan Junqing

(*Changchun Institute of Physics, The Chinese Academy of Science, Changchun 130021*)

(Received 31 August 1997; revised 17 November 1997)

Abstract A high dynamic range acousto-optic detector is demonstrated. The device have the capabilities for channelized detection of the amplitude, frequency, and phase of wideband rf signals and thus the capability to perform interferometric rf spectral analysis with significantly improved performances over the conventional AO Bragg cells. The device have provide dynamic range of 55 dB above tangential sensitivity, at the bandwidth of 20 MHz centered at 140 MHz at the optical wavelength of $0.6328 \mu\text{m}$, the optical power of 1.0 mW, and the drive power of 50 mW/rf signal input. Two RF singnals of equal strengths and with frequencies f_1 and f_2 were applied simultaneously to the signal Bragg cell, the device dmonstrated dynamic range of 50 dB and frequency resilution of 10 kHz.

Key words acousto-optic, interferometric, dynamic range.