



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113687344 B

(45) 授权公告日 2023. 08. 11

(21) 申请号 202110819174.0

(22) 申请日 2021.07.20

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113687344 A

(43) 申请公布日 2021.11.23

(73) 专利权人 西安空间无线电技术研究所
地址 710100 陕西省西安市长安区航天基地东长安街504号

(72) 发明人 张爱军 王振西 李拴劳 贾建超
郭语 孙嘉 王科

(74) 专利代理机构 中国航天科技专利中心
11009
专利代理师 张辉

(56) 对比文件

CN 104459628 A, 2015.03.25
CN 105005040 A, 2015.10.28
CN 105099976 A, 2015.11.25
CN 108535719 A, 2018.09.14
CN 108802716 A, 2018.11.13
CN 112162254 A, 2021.01.01
CN 112946597 A, 2021.06.11
GB 1404926 A, 1975.09.03
US 2016124075 A1, 2016.05.05
US 2019383930 A1, 2019.12.19
US 5481504 A, 1996.01.02
WO 2018194477 A1, 2018.10.25

审查员 陈丹华

(51) Int. Cl.

G01S 13/58 (2006.01)

权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法

(57) 摘要

一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法,步骤如下:1、通过发射正负调频,获得正负调频的回波信号;2、检测,确定是否有目标的存在;3、计算正负调频回波频谱的相关函数;4、使用重心法计算相关函数的峰值位置;5、通过峰值位置计算速度值。本发明通过对正负调频回波频谱的互相关函数的计算来得到速度,消除了单独求取正负调频回波频谱中心再计算速度方法时,由于距离向展宽带来的中心求取不准而造成的测速精度不高的问题,提高了测速的测量精度,目前该技术已应用于火星探测器微波测距测速敏感器系统设计应用。



1. 一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法,其特征在于包括步骤如下:

(1) 微波测距测速敏感器系统分时发射正调频和负调频线性调频信号,计算接收的正调频回波频谱和负调频回波频谱;

(2) 对正调频回波频谱和负调频回波频谱分别进行检测,确定是否有目标的存在;

(3) 在正调频回波频谱和负调频回波频谱均检测到目标的情况下,计算正调频回波频谱和负调频回波频谱的互相关函数;

利用如下公式计算互相关函数 $Q(m)$:

$$Q(m) = \sum_{i=0}^{N-1-m} S_+(N-i) \times S_-(i+m), m=0,1,\dots,2N-1$$

其中, N 表示回波频谱分析FFT的点数;

(4) 利用重心法计算互相关函数的峰值位置;

利用重心法计算互相关函数的峰值位置的公式如下:

$$i_{\max} = \frac{\sum_{m=0}^{2N-1} Q(m)m}{\sum_{m=0}^{2N-1} Q(m)}$$

i_{\max} 表示互相关函数的峰值位置;

(5) 将互相关函数的峰值位置转换为速度,所述速度即为连续波雷达的速度;

利用如下公式将互相关函数的峰值位置转换为速度:

$$f_d = \frac{f_s}{2N} \times (i_{\max} - N)$$

$$v = \frac{f_d \times \lambda}{2}$$

f_s :表示回波信号的采样率;

f_d :表示目标的多普勒频率;

λ :表示回波信号的波长;

v :表示目标的速度。

2. 根据权利要求1所述的一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法,其特征在于:所述步骤(1)中,正调频回波频谱 $S_+(f)$ 表示为:

$$S_+(f) = \text{abs}(\text{FFT}(x_+(t)))$$

$x_+(t)$ 表示正调频回波信号经接收机去斜后的信号;

负调频回波频谱 $S_-(f)$ 表示为:

$$S_-(f) = \text{abs}(\text{FFT}(x_-(t)))$$

$x_-(t)$ 表示负调频回波信号经接收机去斜后的信号。

3. 根据权利要求1所述的一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法,其特征在于:所述步骤(2)的实现方式为:

对正调频回波频谱进行检测,确定是否有目标存在的方法如下:对正调频回波频谱进行恒虚警检测,如果频谱满足信噪比检测门限,则认为存在目标,如果频谱不满足检测门限,则认为无目标;

对负调频回波频谱进行检测,确定是否有目标存在的方法如下:对负调频回波频谱进行恒虚警检测,如果频谱满足信噪比检测门限,则认为存在目标,如果频谱不满足检测门限,则认为无目标。

一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法,属于深空探测微波测距测速传感器领域。

背景技术

[0002] 微波测速测距传感器是深空探测着陆器导航、制导与控制(GNC)分系统的重要敏感器之一,在着陆下降段为GNC分系统提供探测器相对火星表面的距离、速度信息,确保着陆精度和安全。如何设计雷达系统实现高精度测距和测速是系统设计的关键环节。高精度速度测量对探测器的姿态控制意义重大,对着陆安全判定有着重要的意义。

[0003] 我国的首次火星探测,通过一次发射,实现“绕”、“落”、“巡”三个目标,实现对火星的全球观测与区域观测。任务要求微波测距测速传感器配备四个波束,每个波束同时实现测距和测速功能,而且要求较高的测量精度。微波测距测速传感器采用线性调频连续波体制雷达,实现每个波束的同时测距和测速,在远距离时发射三角调制的线性调频信号,得到目标的距离和速度。

[0004] 传统的三角波调制线性调频连续波雷达,通过分别计算正调频回波的频谱中心和负调频回波的频谱中心,来同时计算得到目标的距离和速度信息。由于天线的波束宽度,以及天线波束在地面照射的脚印,使得回波频谱呈现出一定的宽度,即距离展宽,此时要得到频谱的准确中心,将非常困难,此时得到的测速精度将相对较低。

发明内容

[0005] 本发明的技术解决问题是:克服常规线性调频连续波雷达中通过正负调频回波分别求取频谱中心时由于距离展宽带来的频谱中心求取精度不高的问题,提出一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法,采用正负调频回波频谱的互相关函数来确定目标的速度,可获得精度较高的速度测量值。

[0006] 本发明的技术解决方案是:

[0007] 一种三角波调制线性调频连续波雷达测速方法,包括步骤如下:

[0008] (1)微波测距测速传感器系统分时发射正调频和负调频线性调频信号,计算接收的正调频回波频谱和负调频回波频谱;

[0009] (2)对正调频回波频谱和负调频回波频谱分别进行检测,确定是否有目标的存在;

[0010] (3)在正调频回波频谱和负调频回波频谱均检测到目标的情况下,计算正调频回波频谱和负调频回波频谱的互相关函数;

[0011] (4)利用重心法计算互相关函数的峰值位置;

[0012] (5)将互相关函数的峰值位置转换为速度,所述速度即为连续波雷达的速度。

[0013] 所述步骤(1)中,正调频回波频谱 $S_+(f)$ 表示为:

[0014] $S_+(f) = \text{abs}(\text{FFT}(x_+(t)))$

[0015] $x_+(t)$ 表示正调频回波信号经接收机去斜后的信号;

[0016] 负调频回波频谱 $S_-(f)$ 表示为:

[0017] $S_-(f) = \text{abs}(\text{FFT}(x_-(t)))$

[0018] $x_-(t)$ 表示负调频回波信号经接收机去斜后的信号。

[0019] 所述步骤(2)的实现方式为:

[0020] 对正调频回波频谱进行检测,确定是否有目标存在的方法如下:对正调频回波频谱进行恒虚警检测,如果频谱满足信噪比检测门限,则认为存在目标,如果频谱不满足检测门限,则认为无目标;

[0021] 对负调频回波频谱进行检测,确定是否有目标存在的方法如下:对负调频回波频谱进行恒虚警检测,如果频谱满足信噪比检测门限,则认为存在目标,如果频谱不满足检测门限,则认为无目标。

[0022] 所述步骤(3)中,利用如下公式计算互相关函数 $Q(m)$:

[0023]
$$Q(m) = \sum_{i=0}^{N-1-m} S_+(N-i) \times S_-(i+m), m = 0, 1, \dots, 2N-1$$

[0024] 其中, N 表示回波频谱分析FFT的点数。

[0025] 所述步骤(4)中,利用重心法计算互相关函数的峰值位置的公式如下:

[0026]
$$i_{\max} = \frac{\sum_{m=0}^{2N-1} Q(m)m}{\sum_{m=0}^{2N-1} Q(m)}$$

[0027] i_{\max} 表示互相关函数的峰值位置。

[0028] 所述步骤(5)中,利用如下公式将互相关函数的峰值位置转换为速度:

[0029]
$$f_d = \frac{f_s}{2N} \times (i_{\max} - N)$$

[0030]
$$v = \frac{f_d \times \lambda}{2}$$

[0031] f_s :表示回波信号的采样率;

[0032] f_d :表示目标的多普勒频率;

[0033] λ :表示回波信号的波长;

[0034] v :表示目标的速度。

[0035] 本发明与现有技术相比具有如下优点:

[0036] 本发明通过对正负调频回波频谱的互相关函数的计算来得到速度,消除了单独求取正负调频回波频谱中心再计算速度方法时,由于距离向展宽带来的中心求取不准而造成的测速精度不高的问题,提高了测速的测量精度。

附图说明

[0037] 图1是微波测速测距敏感器系统组成示意图;

[0038] 图2是本发明方法流程图。

具体实施方式

[0039] 下面结合附图进一步说明本发明的工作原理和工作过程：

[0040] 为了提高测速精度，解决回波频谱距离展宽带来的精度问题，本发明提出了一种基于对正负调频回波频谱互相关的测速方法，此时可以避免距离展宽带来的精度影响问题，可以有效提高测速的精度。

[0041] 如图1所示，微波测速测距敏感器由信号处理器、发射通道、接收通道、频综和天线组成。雷达加电后启动接收外部输入控制信号开始工作，信号处理器产生所需的雷达发射波形信号，发射信号经发射机上变频至射频频率并放大经发射天线发射出去。回波信号通过接收天线接收后，经接收机进行低噪声放大、滤波、下变频，送给信号处理器进行模数变换，回波处理、波束中心求取等获得目标的距离和速度信息。

[0042] 雷达分时发射正调频和负调频线性调频信号，接收机通过与发射的线性调频信号进行混频，实现回波信号的去斜处理；回波信号经过去斜处理、回波的FFT等处理以后，首先对正、负调频的回波进行积累和恒虚警检测，当确认检测到目标后，再根据频谱进行速度计算，如果没有检测到目标，则不进行速度的计算。

[0043] 当检测到目标时，对正负调频的回波频谱进行互相关函数的计算，计算互相关函数时，频谱只选择频谱的主瓣部分，目标频谱以外的噪声不选取，降低噪声对互相关函数的峰值位置的影响。

[0044] 在计算互相关函数的峰值位置时，为了提高峰值位置求取的精度，可采用重心法来估计互相关函数的峰值位置。

[0045] 本发明在微波测距测速敏感器系统中采用发射正负调频的线性调频信号，接收回波信号通过与发射信号进行去斜（混频），对去斜后的回波进行FFT变换，得到目标的回波频谱，然后对正负调频的回波频谱进行互相关函数计算，再通过互相关函数的峰值位置求取，最终得到目标的速度。

[0046] 具体技术实施步骤描述如下：

[0047] 微波测距测速敏感器系统组成框图如图1所示，采用收发天线分置，发射天线发射正负调频线性调频信号，接收天线接收回波信号，回波信号通过接收机进行混频（去斜）、放大、滤波等，信号处理器对去斜后的信号进行AD采样、数字下变频、FIR滤波和FFT变换，得到目标的回波频谱。

[0048] 三角波调制的线性调频连续波的测距测速原理：通过发射三角调制的线性调频信号，对于正调频，线性调频信号（LFM）的带宽为B，时宽为 T_s ，距离为R的回波的延时为： $\tau = \frac{2R}{C}$ ，回波

信号通过发射耦合的信号进行混频（去斜）以后，得到的信号频率为： $f_{b+} = -\frac{B}{T_s} \times \tau = -\frac{B}{T_s} \times \frac{2R}{C}$ 。

对于负调频，LFM的带宽为B，时宽为 T_s ，距离为R的回波的延时为： $\tau = \frac{2R}{C}$ ，回波信号通过发

射耦合的信号进行混频（去斜）以后，得到的信号频率为： $f_{b-} = \frac{B}{T_s} \times \tau = \frac{B}{T_s} \times \frac{2R}{C}$ ，当目标多普勒为 f_d 时，正负调频的回波信号的频率如下式所示。

$$[0049] \quad f_{b+} = -\frac{B}{T_s} \times \tau + f_d = -\frac{B}{T_s} \times \frac{2R}{C} + f_d$$

$$[0050] \quad f_{b-} = \frac{B}{T_s} \times \tau + f_d = \frac{B}{T_s} \times \frac{2R}{C} + f_d$$

[0051] C:光速

[0052] R:目标的距离

[0053] f_{b+} :正调频回波信号去斜后的频率

[0054] f_{b-} :负调频回波信号去斜后的频率

[0055] λ :信号的波长

[0056] v:目标的速度

[0057] 因此目标的距离R和速度v:

$$[0058] \quad R = (f_{b-} - f_{b+}) \frac{T_s \times C}{2B}$$

$$[0059] \quad f_d = \frac{f_{b+} + f_{b-}}{2}$$

$$[0060] \quad v = \frac{f_d \times \lambda}{2}$$

[0061] 如图2所示,三角波调制线性调频连续波雷达的测速方法,包括步骤如下:

[0062] (1) 计算正调频、负调频回波的FFT频谱

[0063] 微波测距测速敏感器正负调频回波信号的频谱,表示为:

$$[0064] \quad S_+(f) = \text{abs}(\text{FFT}(x_+(t)))$$

$$[0065] \quad S_-(f) = \text{abs}(\text{FFT}(x_-(t)))$$

[0066] 离散化后,得到 $S_+(k) = \text{abs}(\text{FFT}(x_+(t)))$, $k=0, 1, \dots, N-1$ 。

[0067] $S_-(k) = \text{abs}(\text{FFT}(x_-(t)))$, $k=0, 1, \dots, N-1$ 。

[0068] (2) 正负调频回波频谱检测

[0069] 微波测距测速敏感器正负调频信号频谱的检测采用恒虚警检测(CFAR)方法,获得目标有无的检测结果。

[0070] 对正调频回波频谱进行检测,确定是否有目标存在的方法如下:对正调频回波频谱进行恒虚警检测,如果频谱满足信噪比检测门限,则认为存在目标,如果频谱不满足检测门限,则认为无目标;

[0071] 对负调频回波频谱进行检测,确定是否有目标存在的方法如下:对负调频回波频谱进行恒虚警检测,如果频谱满足信噪比检测门限,则认为存在目标,如果频谱不满足检测门限,则认为无目标。

[0072] (3) 正负调频回波频谱互相关函数计算

[0073] 微波测距测速敏感器正负调频信号频谱的互相关函数如下所示。

$$[0074] \quad Q(m) = \sum_{i=0}^{N-1-m} S_+(N-i) \times S_-(i+m), m=0, 1, \dots, 2N-1$$

[0075] (4) 互相关函数峰值位置计算

[0076] 微波测距测速敏感器正负调频信号频谱的互相关函数的峰值位置 i_{\max} 计算采用重

心法。

$$[0077] \quad i_{\max} = \frac{\sum_{m=0}^{2N-1} Q(m)m}{\sum_{m=0}^{2N-1} Q(m)}$$

[0078] (5)速度计算

[0079] 将互相关函数的峰值位置转换为速度,计算公式如下。

$$[0080] \quad f_d = \frac{f_s}{2N} \times (i_{\max} - N)$$

$$[0081] \quad v = \frac{f_d \times \lambda}{2}$$

[0082] 本发明通过对正负调频回波频谱的互相关函数的计算来得到速度,消除了单独求取正负调频回波频谱中心再计算速度方法时,由于距离向展宽带来的中心求取不准而造成的测速精度不高的问题,提高了测速的测量精度,高精度的速度测量对探测器系统的着陆控制至关重要。

[0083] 目前该技术已应用于火星探测器微波测距测速敏感器系统设计应用。

[0084] 采样传统的测速方法,测速精度大约为 $0.33\% \times V$ (V 为目标的速度),采用该方法以后,测速精度可以提高到 $0.2\% \times V$ 。

[0085] 本发明说明书中未作详细描述的内容属于本领域专业技术人员的公知技术。

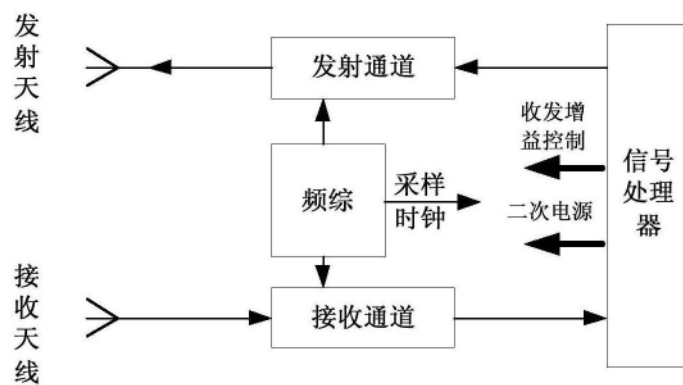


图1

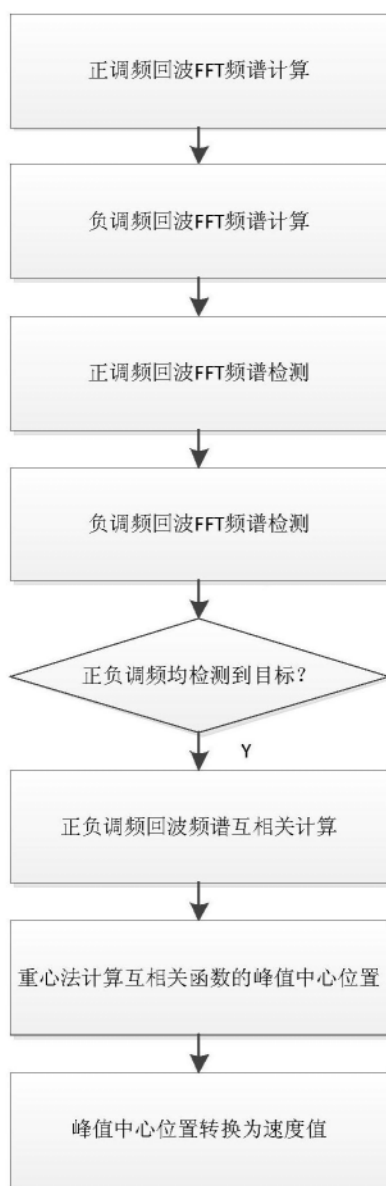


图2