

文章编号: 2096-1618(2018)03-0227-05

一种基于频率与相位算法的雷达雪深探测方法

杨溢文, 姚振东, 余勇, 何文艺
(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

摘要: 积雪深度的探测不仅能够提供气象上的数据资料, 更与人们的日常生活息息相关, 由此提出一种基于 FMCW 雷达的无线、非接触式、自动化积雪深度探测方法, 并提出了利用频率结合相位的测量算法来降低雪深探测误差, 以频率测距得到粗略距离, 再利用相位测距在频率测距的基础上得到更精准的距离数据, 算法能够消除相位整周模糊并进一步提高雷达的探测精度。实验仿真结果表明算法能够将雷达的测距精度优化到毫米级别, 并在雷达雪深探测中使测量精度保持在1 cm以内。

关键词: 调频连续波雷达; 雪深探测; 测距算法; 精度; 距离模糊

中图分类号: TN95

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.03.001

0 引言

积雪灾害每年都会给社会带来巨大损失, 例如突降大暴雪压坏树木与农作物、过厚积雪造成交通堵塞、高山雪崩等, 严重威胁着人民群众的人身与财产安全。雪深探测能够有效监测这些事件的发生, 有助于及时处理以便减小受灾损失^[1-2]。同时, 地面积雪深度的探测在军事、农业、气象等领域都有着实际的应用意义。在积雪深度探测的各种方法中, 人工使用量雪尺测量积雪厚度具有时空密度小, 数据连续性差等弊端^[3], 使用现代电子设备来进行自动积雪观测能够有效克服人工雪深观测的缺陷。目前中国在地面积雪观测上常用激光探测法和超声波探测法, 缺少一种利用电磁波进行探测的手段, 利用 FMCW 雷达进行探测有着适用于恶劣环境、无距离盲区、硬件相对简单、发射功率小等优点^[4-5], 适用于积雪深度探测, 具有重要的理论与实践意义。

1 雷达雪深探测方法

FMCW 雷达通过发射线性调频信号来探测目标, 当线性调频信号遇到障碍物后将会产生一个回波信号, 而回波信号相比于发射信号会有一个频率上的差异, 通过提取差拍信号就能够获得目标的距离以及速度信息。通常的线性调频信号分为三角波和锯齿波, 三角波调频信号可获得距离与速度信息, 而锯齿波调

频信号常用于获得距离信息^[6], 但比三角波调频法有更好的抗干扰性能, 因此文中采用锯齿波调频体制雷达。

在进行积雪深度探测时, 为确保雷达在降雪条件下依然拥有精确的探测结果, 方案设计使用24 GHz频段进行探测, 该频段不易穿透雪面, 同时雪面对该频段具有较强后向散射^[7-10]。设计将雷达放置于离平整地面1.5 m(初始高度)处, 并将其倾斜一个角度 α 放置, 如图1所示。

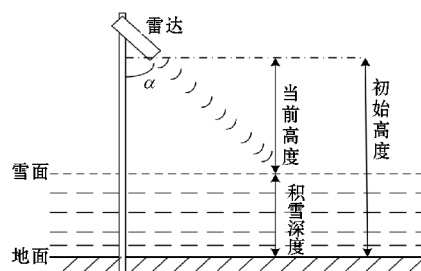


图1 雷达雪深探测图

该放置方法能够有效保证在降雪条件下雷达不遮挡探测范围内的降雪, 从而保证探测精度。根据图1所示, 只需要由雷达探测出当前高度, 即可求得积雪深度。

2 频率与相位算法

2.1 雷达频率测距原理

对于 FMCW 积雪深度探测雷达, 根据距离与频率的对应关系, 由频率测量分辨力和精度便可得到距离测量分辨力和精度。距离分辨力在雷达中一般指分辨距离靠近的目标的能力, 而在进行测距时也表示雷达

收稿日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41475143); 四川省教育厅创新团队资助项目(14TD0019); 中国气象局大气探测重点开放实验室资助项目(KLAS201104)

能够测量的最短距离和精度,这个值与发射信号的带宽 B 成反比,由于硬件以及后端处理的限制,带宽 B 不能够太大,这使得测距精度不够高,但是可以利用后端的数字信号处理来对精度进行优化处理。若假设雷达的中心频率为 f_0 ,差拍信号频率为 f_b ,扫频带宽为 B ,信号调制周期为 T ,回波信号与发射信号的时延为 $\tau = 2r/c$,其中 r 为雷达到目标的距离, c 为电磁波传播速度(3×10^8 m/s),则根据雷达测距原理^[11]可得雷达到雪面的探测距离公式:

$$r = \frac{cTf_b}{2B} \quad (1)$$

在实际中通常是对差拍信号进行采样,然后对采样序列进行离散傅里叶变换 DFT,并采用快速傅里叶变换算法 FFT 计算 DFT。经过 FFT 后可从频域中求得差拍信号的离散频率:

$$f' = k\Delta f \quad (2)$$

其中, $\Delta f = 1/T$ 为 DFT 的频率分辨率, k 为频谱幅值最大处对应的离散序列。将该离散频率带入式(1)中的 f_b 即可求得距离,但由于算法本身的栅栏效应,将会产生一个频率间隔,使得采样点对应的频率不一定刚好是差拍信号的频率,这会导致一个测距误差。想要提高频率测距的精度只有两种途径:一是增加带宽 B ;二是在带宽一定的情况下成倍增加 FFT 的运算点数 N_{fft} ,每当增加一倍 N_{fft} ,则测量精度提高一倍^[12]。然而这两种方法都有其限制,综合考虑雷达硬件以及后端信号处理性能,文中雷达参数设置为:中心频率 24 GHz,带宽 100 MHz,调制周期 200 μ s,采样率 f_s 为 200 KHz,采样点数为 4096,在此参数下,雷达测距仿真数据如图 2 所示。

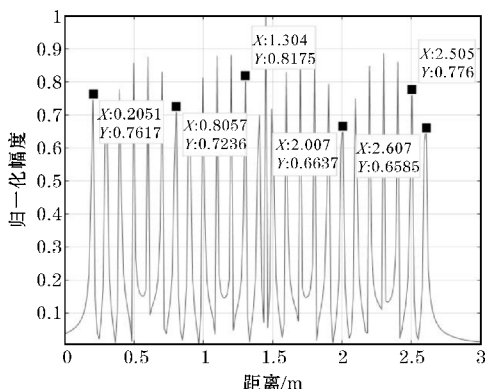


图2 FFT 频率测距图

图 2 中使用数据光标所设距离分别为 0.2 m、0.8 m、1.3 m、2 m、2.5 m、2.6 m,可见误差在 5~7 mm。

2.2 雷达相位测距原理

通过频率法进行雪深探测只能得到一个粗略的测

量结果,其原因在于 FFT 的栅栏效应导致频谱的谱线并不一定正好落在正确的位置上,频率的误差将会引起测距的误差,导致探测的不准确。采用相位测距算法能找出 FFT 算法谱线到实际正确位置的偏差值,从而对频率测距法得到的粗略结果进行修正,最终得到一个更加准确的探测结果。在测距算法中,当对雷达差拍信号进行离散傅里叶变换后,其初始相位不会发生变化,但是会引入额外的相位,而这个额外相位是随探测距离线性变化的,因此可以利用相位在一个距离分辨单元之内更精确地测量距离,但直接利用该额外相位探测将会产生整周模糊,无法得出正确结果。文中采用分段 FFT 相位差法来消除整周模糊^[13],设 τ 为测距时延, N 为采样点数, N_1 为分段后第一个子序列点数,第二个子序列点数即为 $N - N_1$,第一段相位为 φ_1 ,第二段相位为 φ_2 ,则两段子序列的相位可以表示为

$$\varphi_1(k) = 2\pi(f_0 - \frac{B}{2})\tau - \frac{N_1 - 1}{N_1}(k - \frac{N_1}{N}B\tau)\pi \quad (3)$$

$$\varphi_2(k) = 2\pi(f_0 + \frac{B}{2} - \frac{N_1}{N}B)\tau - \frac{N_1 - 1}{N_1}(k - \frac{N_1}{N}B\tau)\pi \quad (4)$$

两个序列的相位差可以表示为

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi(1 - \frac{N_1}{N})B\tau = 2\pi(1 - \frac{N_1}{N})\frac{r}{\Delta R} \quad (5)$$

$$\Delta R = c/2B \quad (6)$$

其中 ΔR 表示雷达距离分辨单元,由式(5)可知,当 N 和 N_1 选择合适,相位差的测量不会出现 2π 模糊问题。例如, N 取 4096, N_1 取 2048,则当 r 的变化量为 ΔR 时, $\Delta\varphi$ 的变化量小于 π 。因此,可以在一个距离分辨单元以内更精确地测量距离:

$$r_{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi(1 - \frac{N_1}{N})}\Delta R \quad (7)$$

2.3 频率与相位结合测距算法

在进行频率测距后,由于 FFT 点数的不同,距离分辨单元也会发生变化,若设 N_s 为一个扫频周期内采样到的数据点数,则相应距离谱上的距离采样间隔 δR 可以表示为

$$\delta R = \Delta R \frac{f_s \cdot T}{N_{fft}} = \Delta R \frac{N_s}{N_{fft}} = \frac{N_s}{N_{fft}} \cdot \frac{c}{2B} \quad (8)$$

令 r_k 表示由频率测距得出的粗略距离估计, $r'_{\Delta\varphi}$ 表示以 δR 为距离库的距离偏移量,则最终更精确的探测公式可以表示为

$$r = r_k + r'_{\Delta\varphi} = k\delta R + \frac{\Delta\varphi}{2\pi(1 - \frac{N_1}{N})}\delta R \tag{9}$$

对于该雷达参数, N 取 4096, N_1 取 2048, 距离精度要达到1 mm, 则相位差 $\Delta\varphi$ 变化 1.2° , 只要系统鉴相精度达到 1° 即能求出精确的探测距离。如表 1 所示为根据式(9)在不加入噪声与加入噪声的情况下求得的距离仿真数据, 其中信噪比为3 dB。

表 1 距离探测部分数据/cm

实际距离	频率法测量值	频率加相位法测量值(不加噪)	频率加相位法测量值(加噪)
20	20.508	20.351	20.35
40	39.551	39.864	39.866
80	80.566	79.942	79.941
100	99.61	100.0	99.99
120	120.12	120.0	119.98
140	140.63	140.0	139.99
160	159.67	160.8	160.81
200	200.68	199.9	199.89
220	219.73	220.0	219.99

由表 1 可以看出, 由频率与相位相结合的方法能有效提高探测距离精度, 与只使用频率的测距方法相比, 测距精度更好。在无噪声情况下, 大多数数据能够保证测量精度达到1 mm, 在加噪的情况下, 算法依然能够保证较高的探测精度。

3 模糊距离估计

由于雷达天线的波束宽度影响, 雷达在进行距离探测时不同于激光测距只有一个点的回波, 雷达测距会在一个范围内都有回波信号^[14], 这将导致探测出现一个距离模糊的问题, 该距离模糊将对积雪探测精度产生影响。根据雷达波束的影响可知, 距离模糊范围类似是围绕中心点的一个椭圆, 则最大模糊距离处于如图 3 所示的最向前与向后两个点上, 当雷达设备以 α 的角度倾斜放置时, 距离模糊与波束宽度 2θ 有关, θ 表示半波束宽度。

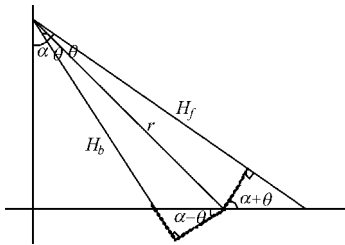


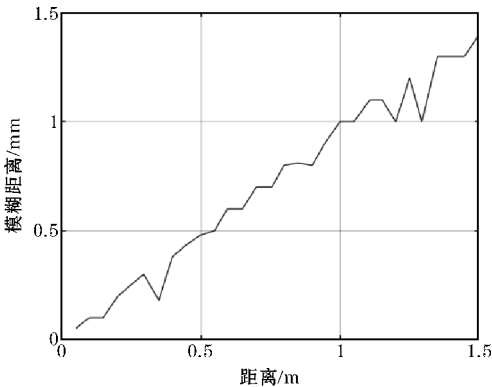
图 3 波束宽度投影几何图

其中 r 表示在理想条件下, 即波束宽度趋于无穷小时探测出的距离, H_f 与 H_b 分别表示前向和后向的受最大模糊距离影响求出的当前高度。通过辅助线以及三角函数性质, 可以得到:

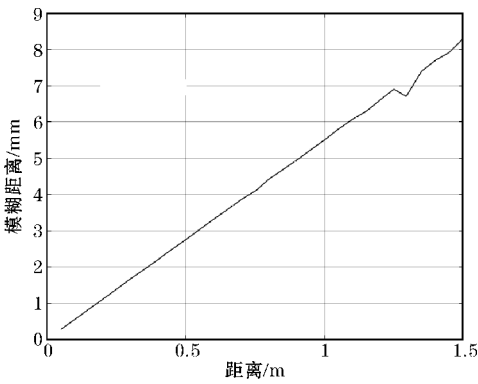
$$H_f = r\cos\theta \cdot \cos\alpha - r\sin\theta \cdot \cos\alpha \cdot \tan(\alpha - \theta) \tag{10}$$

$$H_b = r\cos\theta \cdot \cos\alpha + r\sin\theta \cdot \cos\alpha \cdot \tan(\alpha + \theta) \tag{11}$$

为更直观看出波束宽度产生的距离模糊对积雪探测的影响, 在非降雪条件下, 可以将雷达的放置角度 α 设为 0, 此时能够有效看出波束宽度对探测精度的直接影响, 如图 4 所示。



(a) 波束宽度为 5°



(b) 波束宽度为 12°

图 4 波束宽度模糊距离对比图

由图 4 可知, 当波束宽度一定时, 随着雷达探测的距离增大, 波束宽度产生的模糊距离误差越大; 当测距范围一定时, 随着波束宽度的增大, 产生的模糊距离误差也越大。在 5° 的波束宽度下, 测量距离小于1.5 m 时, 模糊误差最大达到了1.5 mm, 而在 12° 的波束宽度下, 当测量距离达到1.5 m 时模糊误差就达到了8 mm。由此可知, 要提高探测精度需要较小波束宽度的天线, 并且探测距离不易过远。对比两图, 还能看出想要提高探测精度, 减小波束宽度比缩短探测距离更加有效。

若是在降雪条件下, 为了不遮挡降雪, 雷达设备需要

倾斜一定的角度,根据角度的不同,模糊距离也会有相应的变化,当放置角度 α 不为0时,可以测出 α 对模糊距离的影响,此时最大模糊距离分为向前与向后两个(下方曲线表示向前模糊距离,上方曲线表示向后模糊距离)。此时波束宽度为 5° ,距离为1.5 m,如图5所示。

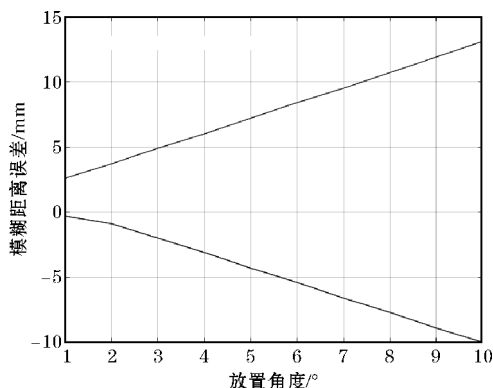


图5 不同放置角度产生的误差曲线图

由图5可知,要使系统的测量误差符合雪深观测规范^[15]要求的1 cm,同时又保证雷达设备不对降雪进行遮挡,那么放置角度需要满足: $5^\circ \leq \alpha < 10^\circ$,原因在于放置最小 5° 时,可以保证雷达设备往探测积雪深度的区域探出13 cm而不遮挡降雪,当放置角度大于 10° 以后,由于波束宽度的影响,模糊误差会使得探测精度大大降低,而雷达天线能够满足有较小的波束宽度的要求,因此可以将其以倾斜的方式进行探测。

根据以上所述,方法将设备放置于1.5 m高度,当波束宽度为 5° ,放置角度为 5° 时,向前方向的模糊距离最大误差为5 mm,向后方向的最大误差为7.2 mm,而实际上这些误差是表示由波束宽度引起的雷达直接探测的最大距离模糊,需要根据式(10)与式(11)将其转化为积雪厚度探测的误差。最终的积雪深度探测误差如图6所示。

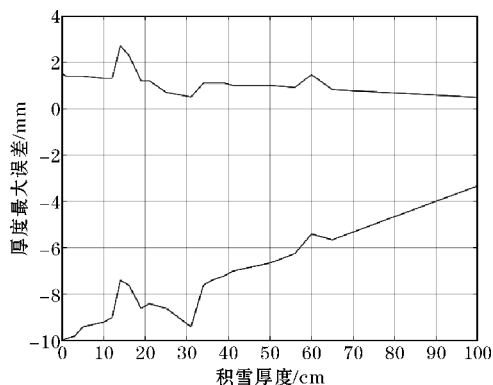


图6 随积雪深度变化的最大误差图

由此可知,随着积雪深度的增加,在该方法下的雪深探测误差会越来越小,同时总体探测误差小于1 cm,

符合雪深探测规范要求。

4 结束语

基于FMCW雷达的雪深探测方法,采用斜放式探测法以及频率与相位相结合的信号处理算法。在算法层面对频率法以及结合相位法后的算法进行评估对比,结果显示结合后的算法拥有更加优秀的探测精度,同时,在模糊距离的影响下对探测方法进行评估,结果表明:在该方法下,不同的放置角度以及雷达天线的波束宽度都会影响雪深探测的结果,在合适条件下,能够将雪深探测精度保持在1 cm以下,符合雪深探测规范对雪深探测精度的要求,在雪深探测的相关应用与研究具有重要意义。

参考文献:

- [1] 吴玮,秦其明,范一大,等. 中国雪灾评估研究综述[J]. 灾害学,2013,28(4):152-158.
- [2] 郝璐,王静爱,满苏尔,等. 中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析[J]. 自然灾害学报,2002,11(4):42-48.
- [3] 章育仲. JMA-79型有线自动雪深计[J]. 气象科技,1985(5):87-93.
- [4] Hans-Peter Marshall, Gary Koh. FMCW radars for snow research [J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 52:118-131.
- [5] 宋玮. FMCW雷达测距精度及其信号处理技术的研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.
- [6] 岳文豹,杨录,张艳花. FMCW雷达近程测距系统设计[J]. 电子技术应用,2012(4):73-76.
- [7] Jinyang Du, Jiancheng Shi, Helmut Rott. Comparison between a multi-scattering and multi-layer snow scattering model and its parameterized snow backscattering model [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114:1089-1098.
- [8] John J. Yackel, Jagvijay P. S. Gill, Torsten Geldsetzer, et al. Diurnal Scale Controls on C-Band Microwave Backscatter From Snow-Covered First-Year Sea Ice During the Transition From Late Winter to Early Melt [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(7):3860-3874.
- [9] Fawwaz T. Ulaby, Thomas F. Haddock, Richard T. Austin, et al. Millimeter-wave radar scattering from snow: Comparison of theory with experimental ob-

- servations[J]. Radio Science, 1991, 26(2): 343–351.
- [10] David G. Barber, A. K. Fung, et al. The Role of Snow on Microwave Emission and Scattering over First-Year Sea Ice [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1750–1763.
- [11] AG Stove. Linear FMCW radar techniques [J]. Radar & Signal Processing IEEE Proceedings F, 1992, 139(5): 343–350.
- [12] 艾俊轶. 毫米波高精度测距雷达信号处理及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [13] 齐国清. FMCW 液位测量雷达系统设计与高精度测距原理研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2001.
- [14] Merrill I, Skolnik. 雷达手册(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 617–661.
- [15] 王柏林, 关彦华, 冯冬霞, 等. 雪深自动观测规范(试行)[M]. 北京: 中国气象局综合观测司, 2012.

A Method of Radar Snow Depth Detection based on Frequency and Phase Algorithm

YANG Yi-wen, YAO Zhen-dong, SHE Yong, HE Wen-yi

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: The detection of snow depth not only provides meteorological data but also is closely related to people's daily life. Therefore, a wireless, non-contact and automatic snow depth detection method based on FMCW radar is proposed. And a measurement algorithm to reduce the snow depth detection error combining the use of frequency with phase is proposed. Firstly, the coarse distance is obtained by frequency distance measurement, then the phase distance measurement is used to obtain more accurate distance data based on frequency distance measurement. The combined algorithm can eliminate the phase ambiguity and further improve the radar detection accuracy. The simulation results show that the proposed algorithm can optimize the ranging accuracy of radar to millimeter level and keep the measurement accuracy within 1 cm in the radar snow depth detection.

Keywords: FMCW radar; snow depth detection; ranging algorithm; precision; range ambiguity