

引用格式: Xu Xin, Zhu Di. Simulation and System Design of Spaceborne Differential Absorption Barometric Radar [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(3): 594-604. [胥鑫, 朱迪. 星载差分吸收气压雷达的系统仿真与性能分析[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 594-604.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.3.0594

星载差分吸收气压雷达的系统仿真与性能分析

胥鑫^{1,2}, 朱迪¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 101400;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:提出一种工作在65~70 GHz强氧气吸收波段的星载差分吸收气压雷达,用以连续获取全球高时空分辨率的海面气压数据。通过对星载差分吸收气压雷达系统设计需求的分析,利用大气廓线数据和大气吸收系数模型,对海面气压差分吸收的性能进行了仿真及性能分析。仿真结果表明:通过强氧气吸收波段下的海面气压和差分吸收指数之间存在线性关系,星载差分吸收气压雷达在66 GHz与69 GHz的工作频率下晴空时得到的海面气压估计的均方根误差在2.6 mbar,不同云况下得到的海面气压估计的均方根误差在3~4 mbar,为后续雷达系统的设计与工程实现提供了参考与依据。

关键词:差分吸收气压雷达;海面气压测量;雷达系统仿真;主动遥感

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)03-0594-11

1 引言

作为重要的气象参数,气压在数值天气预报、热带气旋监测分析以及气候研究中起着关键的作用。目前,全球陆地分布密集的气象站可以提供基本覆盖陆地表面的气压数据,但是探测海洋气压的方法非常匮乏。海洋表面气压数据主要依赖浮标、商船、设置在岛屿的气象观测站以及投探空仪来获取^[1],这些现场观测方法的空间分布非常稀疏。同时,这些现场观测方法经济成本高而且探测精度各有差异,很难满足诸如数值天气预报应用的需求。

相较于浮标等传统观测手段,星载遥感观测具有探测区域广、水平分辨率高、可连续观测等优势,已经成为温度、湿度和风等气象参数获取的主要手段^[2]。利用遥感技术对海面压力的研究可分为间接测量和直接测量。

直接探测海面气压的方法是通过探测均匀混合气体的垂直柱总吸收来获取海面气压信息,主要技术手段包括光栅光谱仪、GPS掩星探测、差分吸

收雷达等。光栅光谱仪通过观测氧气A吸收带(758~778 nm)两个不同频率海面反射的太阳辐射来探测海面气压,其功率比值与海面气压有近线形的关系。由于光栅光谱仪在氧气A吸收带的观测非常依赖于太阳辐射而且云雨对探测的影响较大,因此只能在白天进行气压观测。GPS掩星探测利用电磁波在穿过密度不均的大气过程中产生的折射现象来获取大气折射率信息,进而反演出温度、湿度及海面气压信息。GPS掩星观测可以全天候观测且受云雨影响较小,但空间分辨率只有约300~400 km,同时观测地点无法控制,不能保证对同一个区域的重复观测。

差分吸收雷达通过对强氧气吸收频段的两个或多个通道的反射雷达信号功率比进行测量进而获取海面气压信息。1978年Flower和Peckhan提出了一种六通道雷达系统设计用于海面气压的探测,通过测量6个频率(29.26 GHz、36.56 GHz、44.80 GHz、52.80 GHz、67.51 GHz和73.01 GHz)的

收稿日期:2020-04-11;修订日期:2021-04-19

基金项目:微小卫星大气微波探测有效载荷及应用技术(D040301)。

作者简介:胥鑫(1995—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事遥感探测等方面的研究。E-mail: xuxint2@163.com

通讯作者:朱迪(1978—),男,北京人,研究员,主要从事星载散射计、雷达系统设计等方面的研究。E-mail: zhudi@mirslab.cn

海面回波功率,得到海面的气压。但选择的工作频率跨度较宽,不同通道之间的大气成分影响和海面的后向散射系数差异较大,难以对这些影响进行评估^[3]。2005年Lin等^[4]提出了一种工作在50~55 GHz氧气吸收带的机载差分吸收雷达,利用两个频率接近的通道来探测海面气压,避免温度、湿度和海面后向散射系数等因素的影响,通过测量双通道接收功率的比值来得到海面气压。仿真结果表明,最佳组合频率为52.8 GHz与54.9 GHz,海面气压的探测精度在4~7百帕。该雷达系统可以实现全天候的探测,但由于该差分吸收雷达工作在星载微波辐射计的工作频段,会对辐射计的探测造成污染,因此只能用于机载进行区域性观测,无法提供全球范围内的连续性观测。

目前提出的海面气压主动遥感探测方案还不能实时获取高时空分辨率和连续的海面气压数据,本实验提出的星载差分吸收气压雷达能够克服上述方案的缺陷,采用65~70 GHz频段避免对辐射计辐射测量的污染^[5],同时通过卫星遥感获得数值天气预报等应用所需要的连续的、高时空分辨率的海面气压场。

2 工作原理

星载差分吸收气压雷达通过利用65~70 GHz的强氧气吸收带内的两个通道的反射雷达信号功率的对数比来获取海面气压信息。通过测量大气中氧气的吸收衰减获取氧气总量信息;利用氧气在空气中的恒定占比,以及均匀混合气体的气柱总量与表面气压成正比的关系,同时差分消除大气中液态水和水汽等引起的微波吸收效应和海面反射的影响,实现对海面气压的反演。

对于一波长 λ 、天线增益 G 、发射功率 P_r 的雷达,在视角 θ 距离 R 处抵达一个小表面 Δa 后,由雷达方程可知返回的功率 ΔP_s 为^[6]:

$$\Delta P_s = \frac{P_r G T(\lambda, \theta) \Delta a}{(4\pi R^2(\theta))} \quad (1)$$

其中: T 是该频率下的雷达波的大气透过率。雷达接收机的接收到来自 ΔP_s 的功率 ΔP_r 为:

$$\begin{aligned} \Delta P_r &= \frac{\Delta P_s \sigma^0(\lambda, \theta) T(\lambda, \theta) A_e}{(4\pi R^2(\theta))} \\ &= \frac{P_r G A_e T^2(\lambda, \theta) \sigma^0(\lambda, \theta) \Delta a}{(4\pi R^2(\theta))^2} \quad (2) \end{aligned}$$

其中: A_e 是天线的有效孔径等效于 $\lambda^2 G / 4\pi$, σ^0 是表面

的后向散射系数。接收机接收到的总功率(视角为 θ, φ)为:

$$\begin{aligned} P_r(\lambda) &= \frac{P_r G^2 \lambda^2 \sum T^2(\lambda, \phi, \varphi) \sigma^0(\lambda, \phi, \varphi) \Delta a}{(4\pi)^3 R^4(\theta)} \\ &= \frac{P_r G^2 \lambda^2 \sum T^2(\lambda, \phi, \varphi) \sigma^0(\lambda, \phi, \varphi) \Delta \phi \Delta \varphi}{(4\pi)^3 R^4(\theta)} \quad (3) \end{aligned}$$

其中:关于 $\Delta \phi \Delta \varphi$ 的积分是沿着天线照射角度的,当雷达波束足够窄的时候,视角 θ 和距离 R 可以认为是不变的,所以:

$$\begin{aligned} P_r(\lambda) &= \frac{P_r G^2 \lambda^2 T^2(\lambda, \theta) \sigma^0(\lambda, \theta) \Theta \Phi}{(4\pi)^3 R^2(\theta)} \\ &= \frac{P_r A_e T^2(\lambda, \theta) \sigma^0(\lambda, \theta)}{4\pi R^2(\theta)} \quad (4) \end{aligned}$$

公式(4)是简化大气辐射传递过程的面扩展目标的广义雷达方程。当星载差分吸收气压雷达发射的电磁波穿过大气后,经过海面反射后的回波被雷达天线接收。雷达方程可以表示出回波信号和哪些影响因素有关以及怎样的具体关系。由于在等式(4)中只有参数温度 T ,海面后向散射系数 σ^0 和距离 R 是和环境条件有关的,其他的参数都和雷达系统设计有关,因此可以更进一步简化为:

$$P_r(\lambda) = \frac{C(\lambda) T^2(\lambda, \theta) \sigma^0(\lambda, \theta)}{R^2(\theta)} \quad (5)$$

其中: $C(\lambda) = P_r A_e / 4\pi$ 会随着波长不同雷达系统参数而变化。在星下点(nadir, $\theta=0$)可以更进一步简化为:

$$P_r(\lambda) = \frac{C(\lambda) T^2(\lambda) \sigma^0(\lambda)}{R^2} \quad (6)$$

假设在晴空和没有降水的情况下,大气散射对雷达信号传播的影响可以忽略不计,考虑衰减雷达信号的主要大气成分是氧气、液水和水汽。大气透过率可以表示为大气对电磁波的衰减强度,因此大气单程透过率 $T(\lambda)$ 可以表示为氧气、液水和水汽对电磁波的吸收衰减在其传播路径上的积分^[6]:

$$T(\lambda) = e^{-\int_0^\infty (k_o(\lambda, z) + k_L(\lambda, z) + k_V(\lambda, z)) dz} \quad (7)$$

其中: k_o, k_L, k_V 分别表示氧气、液水和水汽的功率吸收系数。根据比尔朗伯定律可知^[7],功率吸收系数 k 和质量吸收系数 α 之间具有如下关系:

$$k = \alpha \cdot c \quad (8)$$

其中: c 为吸收气体的浓度。所以等式(7)可以表示为:

$$\begin{aligned} T(\lambda) &= e^{-\int_0^\infty (a_o(\lambda, z) \cdot c_o + a_L(\lambda, z) \cdot c_L + a_V(\lambda, z) \cdot c_V) dz} \\ &= e^{-a_o O - a_L L - a_V V} \quad (9) \end{aligned}$$

其中: $\alpha_o, \alpha_L, \alpha_V$ 分别表示氧气、液水和水汽的质量吸收系数, O, L, V 分别是氧气、液水和水汽的垂直气柱质量。在采用星下点观测时,地球大气对电磁波的吸收衰减可以视为氧气、液水和水汽的垂直气柱质量和各自的质量吸收系数共同作用的结果^[8]。由于氧气在大气中是均匀混合的,且体积占比基本不变,因此氧气量与空气质量成正比:

$$O = M_o A \quad (10)$$

其中: M_o 是氧气在混合空气中的比例, A 是空气柱质量。当大气处于静力平衡的状态时,表面气压的大小等于单位截面上的垂直大气柱的重量,即:

$$A = P_0 / g \quad (11)$$

其中: P_0 和 g 分别是表面气压和地球引力的加速度,因此等式(6)可以表示为:

$$P_r(\lambda) = \frac{C(\lambda) \sigma^0(\lambda)}{R^2} e^{-\frac{2\alpha_o M_o P_o}{g} - 2\alpha_L L - 2\alpha_V V} \quad (12)$$

式(12)表示了雷达接收功率与雷达系统参数、海面后向散射系数、观测距离和地球大气中氧气、液水和水汽吸收之间的关系。而海面后向散射系数、液水和水汽等因素对于海面气压的反演是不利的,会对海面气压探测的精度造成影响。如图1所示,当使用具有足够接近波长的两个雷达频道时,液水的吸收衰减和水汽的吸收衰减在两通道的强度差异很小,海面后向散射系数的变化随着频率的变化也很小。同时氧气质量吸收系数 α_o 与大气中温度和气压分布有很弱的相关性^[9],为了简化分析,先假设 α_o 只为频率的函数。所以,将双通道的回波功率进行差分,此时两个频率的雷达接收功率的比值为:

$$\frac{P_r(\lambda_1)}{P_r(\lambda_2)} = \frac{C(\lambda_1)}{C(\lambda_2)} e^{-\frac{2(\alpha_o(\lambda_1) - \alpha_o(\lambda_2)) M_o P_o}{g}} \quad (13)$$

该比值不再与海面后向散射系数、液水和水汽吸收因素有关,主要由表面气压决定,氧气质量吸收系数的温度和气压相关性对功率比的影响是次要的。将表面气压作为雷达功率比的函数,即:

$$P_o = \frac{0.5g}{(\alpha_o(\lambda_2) - \alpha_o(\lambda_1)) M_o} \ln \left[\frac{C(\lambda_2) P_r(\lambda_1)}{C(\lambda_1) P_r(\lambda_2)} \right] \quad (14)$$

或者简单地写为:

$$P_o = C_0(\lambda_1, \lambda_2) + C_1(\lambda_1, \lambda_2) R_i(\lambda_1, \lambda_2) \quad (15)$$

其中: C_0 和 C_1 是雷达功率比和表面气压之间的系数,与波长相关,可以通过雷达测量或雷达系统参数中估算出来。 $R_i(\lambda_1, \lambda_2)$ 是波长 λ_1, λ_2 下雷达接收功率比的对数,下文中称为差分吸收指数。

至此实验建立了星载差分吸收气压雷达观测

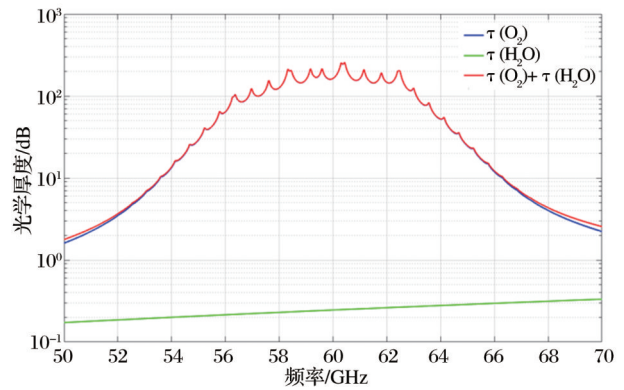


图1 50~70 GHz美国标准大气天底光学厚度随频率的变化
Fig.1 Zenith optical thickness of oxygen, water vapor and total absorption as a function of radar frequency (50~70 GHz) for the standard atmosphere

的差分吸收指数和海面气压之间的关系,这也为之后基于星载差分吸收气压雷达的海面气压反演提供了理论依据。

3 系统仿真

3.1 大气不透明度计算

差分吸收气压雷达利用大气对微波的吸收衰减来测量海面气压,大气对微波的衰减和大气吸收系数之间有着密切的关系,大气吸收系数和大气的复折射率有关。目前关于大气复折射率的计算模型数量很多,其中最常用于氧气、水汽和氮气的吸收系数的计算模型为Liebe提出的MPM模型以及Rosenkranz提出的PWR模型。Liebe和Rosenkranz通过对气体的吸收谱线参数进行测量^[10],不断地对大气吸收系数模型进行修正更新,发展出MPM 89、MPM 93和PWR 98、PWR 04等版本,这些模型对于计算氧气和水汽吸收谱线的吸收系数以及氮气的连续吸收差别不大。

实验采用MPM 89模型^[11]来计算大气的不透明度。

3.2 海面后向散射系数

实验利用的海面后向散射系数模型为改进的几何光学模型GO4(Geometrical Optics 4)^[12]。该模型在Ku、Ka波段与物理光学模型、Ku波段(13.8 GHz)的热带测雨雷达TRMM PR和Ka波段的AltiKa实测数据有较好的一致性,适用于入射角小于15°的情况^[13]。

如图2是垂直入射时50~70 GHz不同风速下的海面后向散射系数,可以看出在一定风速下不同频率下的海面后向散射系数变化很小。尽管差分

吸收气压雷达通过双通道雷达回波的功率差分来消除海面后向散射系数的贡献,但是海面后向散射系数在不同风速、不同入射角度下的大小是不同的。当风速从 3 m/s 提高至 9 m/s 时海面后向散射系数约从 14 dB 减小到 10 dB,这对于雷达的回波强度产生了一定影响,降低回波信号的信噪比,因此针对雷达工作频率下海面后向散射系数的变化也是后续雷达系统设计时应考虑的因素之一。星载差分吸收气压雷达的仿真采用星下点观测。

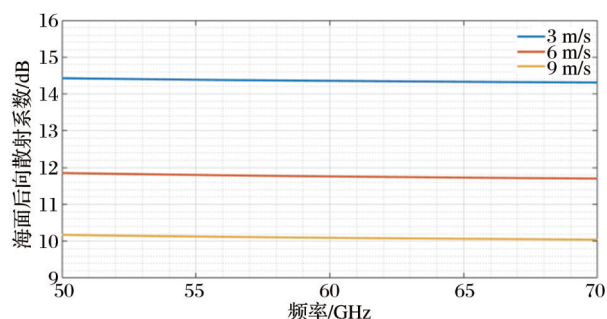


图2 50~70 GHz不同风速下的海面后向散射系数

Fig.2 Sea surface backscattering coefficient (nadir) at different wind speeds (50~70 GHz)

3.3 大气廓线数据

大气温度廓线、水汽密度廓线、气压廓线及海面气压信息采用 ECMWF-AUX.P_R05 数据产品^[14],是由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)所提供的在分析数据与 CloudSat 观测数据时空轨迹匹配得到的。CloudSat 卫星所搭载的云廓线雷达(CPR)^[15]具有的同时探测云粒子和降水粒子、提供云垂直结构的剖面数据的能力,为研究差分吸收气压雷达在云雨天气下的性能模拟提供了重要的数据信息。

CloudSat 卫星每完成一轨的测量便储存为一个 HPF 文件。CPR 每天完成约 14~15 轨的测量,每个轨道上约有 37 082 个探测点,每个点的波束覆盖范围为沿轨 1.7 km、跨轨 1.3 km 的近椭圆形,每个剖面数据上高度分为 125 层,每层厚度约 240 m^[16],共对约 30 km 厚度的大气进行观测。

实验主要使用 2B-CWC_RO_R05 数据产品获取云液态水含量、冰水含量,使用 2B-CLDCLASS-GRANULE_P1_R05 数据产品^[17]获得云层分类、云高度、降雨率等数据,使用 ECMWF-AUX.P_R05 数据产品获取剖面的大气气压、温度、湿度等廓线数据,以上数据可以从 <http://www.cloudsat.cira.collo-state.edu/data-products> 选择产品类型和时间范

围并注册下载。如图 3 所示,数据范围为 2017 年 1 月 1 日至 1 月 5 日共 60 轨数据。

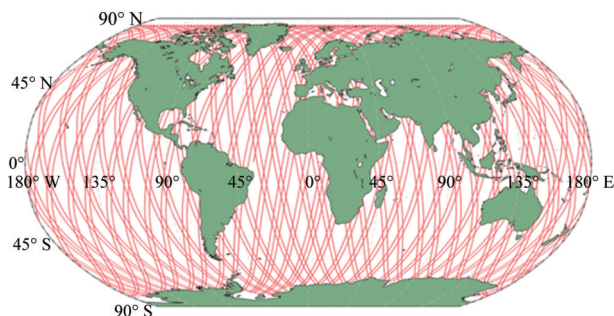


图3 仿真采用的 60 轨大气廓线数据轨迹

Fig.3 Trajectories of 60 atmospheric profile data used in the simulation

3.4 系统仿真参数

在星载差分吸收气压雷达工作时,氧气的吸收会产生最高约 50 dB 的衰减,将极大地影响到回波的功率大小与测量精度,这是星载雷达设计时通常无须着重考虑的。为了保证仿真的合理性以及为后续雷达系统设计提供参考,实验对星载差分吸收气压雷达的重要系统参数进行分析并给出合理仿真指标。

如图 4 所示,在卫星轨道参数方面,星载差分吸收气压雷达拟采用低地球轨道^[18](LEO),工作高度约 500 km,轨道周期约 98 min,这将尽可能地减少差分吸收气压雷达信号的路径传播损失,同时较短的飞行周期将更利于对全球气压观测的大范围覆盖和实现同一地点的重复观测^[19]。

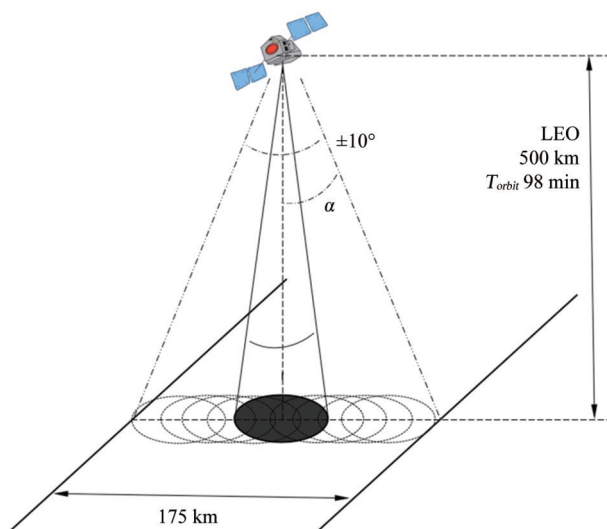


图4 星载差分吸收气压雷达观测几何

Fig.4 Observational geometry of spaceborne differential absorption barometric radar

一般经验下天线增益 G 与天线有效面积 A_e 、波长 λ 及效率 η 有如下关系^[20]:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \eta \quad (16)$$

当天线口径为 1 m, 天线效率 60%~70% 时, 星载差分吸收气压雷达的天线增益大于 55 dB (65~70 GHz), 方位向波束宽度和距离向波束宽度约为 0.34°, 星下点地面足印的距离向和方位向宽度即为 3.046 km, 这也与 Cloudsat 和 TRMM 4 km 的足印相当^[21-22]。由于差分吸收气压雷达的测量是以海面的准镜面反射作为前提, 3 km 的照射面积也足以满足这一要求。

星载差分吸收气压雷达的工作频率在 60 GHz 氧气吸收谱带存在 50~55 GHz 和 65~70 GHz 两段可选“翼区”, 如图 1 所示。根据国际无线电频率委员会的《科学用途的频率分配和频谱保护手册》, 由于 50~55 GHz 频段是星载微波辐射计的工作频段, 会对辐射计的探测造成污染^[23], 而 65~70 GHz 频段不在微波被动探测的保护频段, 可以作为星载差分吸收气压雷达海面气压探测的工作频段。同时, 相较于 50~55 GHz 频段, 65~70 GHz 频段能够在相同口径的天线口径时拥有更大的天线增益, 可以有效提高信噪比或减小雷达的发射功率, 降低雷达系统的工程难度且更有利提升海面气压的探测能力。

发射功率应满足工作在强氧气吸收带时的信噪比要求。虽然 65~70 GHz 不同频率组合的最佳发射功率会存在差异, 但是对于本仿真系统而言, 为了更好地探究氧气衰减、频率等因素对探测性能的影响, 发射功率设为 100 W。另外, 由于差分吸收雷达的工作特性, 如式 (13) 所示, 其发射功率应在双通道应保持一致, 以消除雷达系统参数对差分吸收指数的影响。

脉冲时序是影响系统信噪比的关键因素之一, 为了选取最优的脉冲时序, 当接收窗可容忍的时间偏差为 $\Delta\tau=2\mu\text{s}$ 时, 雷达设计探测的最远距离 $R_{\max}=550\text{ km}$, 最近距离是 $R_{\min}=500\text{ km}$ 时脉冲时序模型的 PRF 约束如图 5 所示。

在保证差分吸收气压雷达的双通道脉冲所测海面区域间隔合理时, 为了尽可能的满足高信噪比的要求, 如图 6 所示, 采用双通道以 2 336 μs 间隔依次发射, 在次脉冲发射后进行本脉冲回波接收。若星载差分吸收气压雷达采用小角度摆扫, 那么可采用脉冲串或脉冲簇形式的发射与接收^[24], 实验仿真采用星下点观测, 故不做进一步考虑。

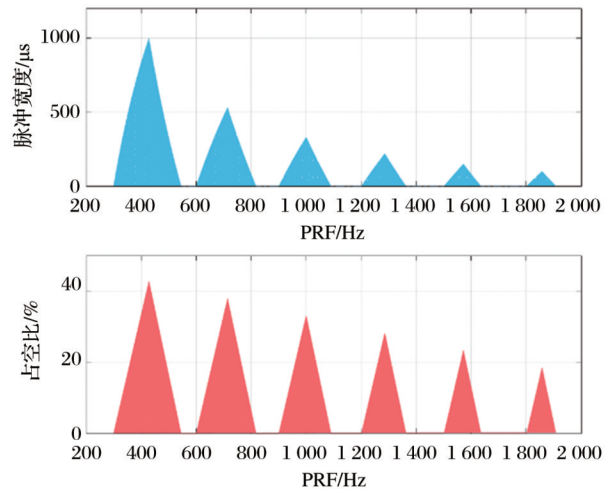


图5 脉冲时序的 PRF 约束

Fig.5 PRF Constraints of the pulse timing model

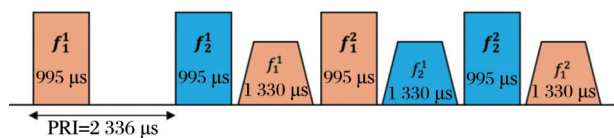


图6 星载差分吸收气压雷达的脉冲时序

Fig.6 Pulse timing design of differential absorption barometric radar

星载差分吸收气压雷达的系统参数的合理设定既是后续仿真的需要, 同时也能为后续系统设计提供参考和优化方向, 用于仿真的系统参数如表 1 所示。

表1 星载差分吸收气压雷达仿真系统参数

Table1 Parameters of spaceborne differential absorption barometric radar simulation system

参数	值
轨道高度	500 km
工作频率	65 ~ 70 GHz
有效天线口径	1 m
天线增益	>55 dB
水平分辨率	3 km (nadir)
垂直分辨率	300 m (nadir)
信号带宽	500 k
脉冲宽度	995 μs
脉冲重复频率	428 HZ
发射功率	100 W
噪声系数	6 dB
系统参考温度	290 K

3.5 仿真流程

差分吸收气压雷达的仿真流程如图 7 所示, 差分吸收气压雷达的仿真模型输入参数包括大气廓线、天气云雨数据、雷达参数 (表 1) 等。利用 2B-CLDCLASS 的云分类数据筛选确定天气对应的来自 ECMWF-AUX 的温度、水汽密度和气压廓线数

据,利用MPM89模型计算双通道的大气不透明度;同时利用ECMWF-AUX的海面风场数据计算双通道的海面后向散射系数。再通过雷达参数及得到的大气不透明度、海面后向散射系数计算双通道接收的回波功率的对数比(差分吸收指数),最后计算差分吸收指数与海面气压的均方根误差。

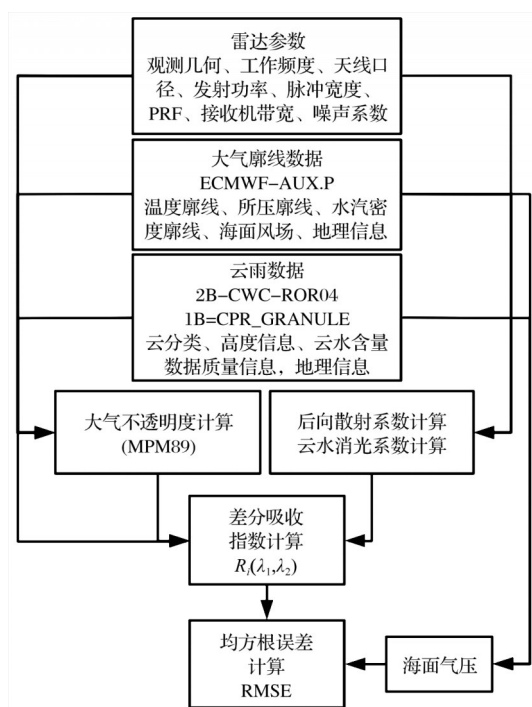


图7 星载差分吸收气压雷达仿真流程

Fig.7 Simulation process of spaceborne differential absorption pressure radar

4 结果与分析

4.1 频率组合的影响

图8是以69 GHz为频率1,0.1 GHz频率为步进间隔的所有频率组合所得到的差分吸收指数与海面气压的均方根误差仿真结果。其中横坐标表示频率2所选择的工作频率,每一条垂直柱代表着一对频率组合(频率1~频率2)的仿真结果。可以看出从69~68.9 GHz的频率组合到69~66 GHz的频

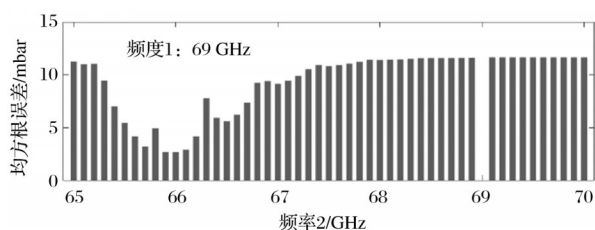


图8 69 GHz的频率组合的均方根误差

Fig.8 Root mean square error of frequency pairs based on 69 GHz

率组合,随着频率组合的频率间隔逐渐增大(由0.1 GHz增加至3 GHz),图中垂直柱高度代表的差分吸收指数与ECMWF海面气压的均方根误差逐渐减小,说明使用星载差分吸收气压雷达的气压探测精度会随着所使用频率组合的频率间隔增大而提高,在使用69~66 GHz的频率组合时雷达双通道得到的差分吸收指数与海面气压的均方根误差可小于3 mbar。

图9显示了65~70 GHz频段的双程大气衰减随频率的变化,从65~70 GHz的双程大气衰减整体上不断减小。这表明星载差分吸收气压雷达在使用频率间隔更大的频率组合时,双通道的双程大气衰减差更大,因此氧气的吸收衰减更大,得到的差分吸收指数会包含更多的大气柱量和表面气压的信息,能够减小差分吸收指数与海面气压的均方根误差。例如68.5 GHz与69 GHz的双程大气衰减的差只有1.1 dB,表面气压的变化几乎不会对差分吸收指数产生太大影响,而66 GHz与69 GHz的双程大气衰减可以达到19.2 dB,均方根误差则会减小约8 mbar。同时这也解释了从69~69.1 GHz到69~70 GHz的频率组合随着频率步进间隔增大而差分吸收指数和海面气压的均方根误差没有明显变化的原因。可以看出选择频率间隔更大的频率组合(更大的双频大气衰减差)可以包含更多的氧气吸收衰减信息和大气柱量信息,有效提高差分吸收指数对气压的敏感度。

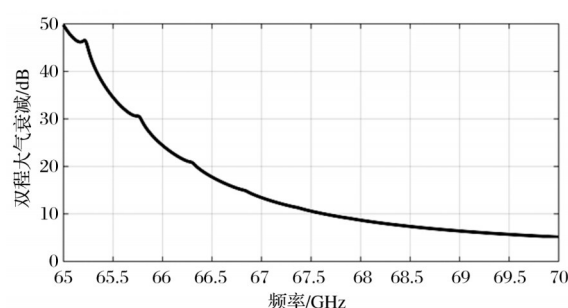


图9 65~70 GHz美国标准大气双程大气衰减随频率的变化

Fig.9 Two-way atmospheric attenuation as a function of radar frequency (65~70 GHz) for the standard atmosphere

随着以69 GHz为频率1的频率组合的步进频率间隔进一步增大,例如69~65.2 GHz的频率组合,虽然该频率组合的双程大气衰减差超过45 dB,具有更强的氧气吸收衰减,但是受制于雷达系统发射功率、天线增益等限制,65.2 GHz通道的氧气吸收衰减过大使得该通道的回波功率变弱,该通道信

噪比只有-3.27 dB,系统噪声的影响变得显著,这将增大均方根误差,影响到气压反演的精度。

因此,虽然选择频率间隔更大的频率组合有利于减小差分吸收指数和海面气压的均方根误差,但这在 65~70 GHz 的频率范围内往往意味着更大的双频大气衰减,对于本实验仿真所设定的雷达系统而言,接近 65 GHz 工作频率的雷达接收机不足以得到有效的回波信号,反而不能获取足够精度的海面气压。值得注意的是,仿真参数限制下的信噪比不足问题是可以增大天线口径、提高发射功率等方法改善的,实验仿真结果可作为有限系统能力下雷达设计的参考。

图 10 给出了 67~69 GHz、66~69 GHz、65~69 GHz 频率组合下差分吸收指数与海面气压的仿真结果,其中 67~69 GHz 频率组合的均方根误差为 9.2 mbar,该频率组合仿真结果不理想的原因主要是双程大气衰减差较小,无法得到足够的氧气吸收衰减信息;65~69 GHz 频率组合的均方根误差为 11.6 mbar,该频率组合仿真结果不理想的原因主要是 65 GHz 通道的氧气吸收衰减过大,无法得到足够信噪比的回波信号,66~69 GHz 频率组合的均方根误差为 2.6 mbar,该频率组合结果理想,在仿真设定的雷达参数等条件下,该频率组合的双程大气衰减差约为 18.3 dB,66 GHz 的回波信号信噪比为 17.9 dB,可以作为星载差分吸收气压雷达仿真的工作频率组合选择。

另外在 69 GHz 频率组合的频率间隔增大过程中,在图 8 中的 65.8~69 GHz、66.3~69 GHz、66.8~69 GHz 点处存在异常凸起,即均方根误差突然较附近点变大。这些凸起点所对应频率正处于氧气的吸收谱线附近,如表 2 所示。吸收谱线中心附近的吸收强度急剧变化^[25],并且海面气压的变化在吸收谱线处所产生的差分吸收指数的变化反而没有附近平滑大气吸收衰减处的变化大,因此在确定差分吸收气压雷达的工作频率时应避免选取在氧气的吸收谱线处,应选择在远离吸收谱线的相对“平滑”的频段。

通过对于不同频率组合的仿真结果分析,频率组合的选择对星载差分吸收气压雷达的海面气压的探测精度的影响主要有以下 3 点:

(1)随着频率组合的频率间隔增加,该组合的双程大气衰减差通常也会增加,可以包含更多的氧气吸收衰减信息和大气柱量信息,有效提高差分吸收指数

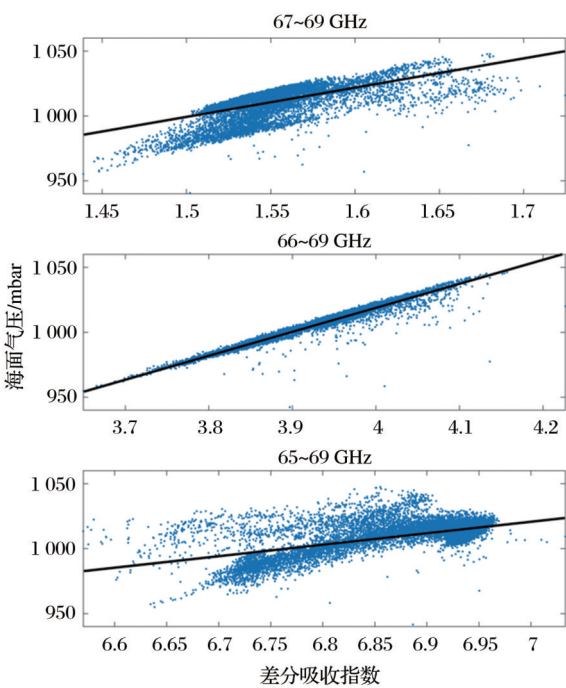


图 10 67~69 GHz、66~69 GHz、65~69 GHz 频率组合下差分吸收指数与海面气压之间的仿真关系

Fig.10 Simulated relationship between differential absorption index and sea surface pressure at frequency pairs of 67~69 GHz, 66~69 GHz, and 65~69 GHz

表 2 65~70 GHz 内氧气的吸收谱线 (GHz)^[26]

Table 2 Oxygen line spectra in 65~70 GHz			
氧气的吸收谱线			
65~69 GHz	65.224 1	65.767 4	66.302 0
66~69 GHz	66.836 7	67.369 4	67.900 7
67~69 GHz	68.430 8	68.960 1	69.488 7

对气压的敏感度,能够提高海面气压的探测精度。
(2)在给定的雷达系统下,越靠近强氧气吸收带的频率组合,其大气的吸收衰减越强烈。而过高的大气衰减使得接收回波信噪比降低,不利于海面气压探测。

(3)频率组合应选择在大气吸收平滑的频段,避免选择在接近氧气吸收谱线处。

在合理的频率组合下,海面气压与差分吸收指数的均方根误差可以优于 3 mbar。

4.2 温度湿度的影响

差分吸收气压雷达利用大气对微波的吸收衰减来测量海面气压,大气衰减和大气吸收系数之间有着密切的关系。虽然氧气的吸收系数与雷达频率有着主要关系,温度也会影响到氧气对电磁波的吸收衰减。

图 11 表示晴空不同温度廓线下的海面气压与

差分吸收指数的关系,展示了温度对利用差分吸收指数估计海面气压的影响。图11(a)为4种不同的温度廓线,表示大气温度随高度的变化情况,这4条温度廓线下的海面气压都在925 mbar左右,误差在1 mbar以内。图11(b)表示对应温度廓线下的差分

吸收指数和海面气压的估计线性关系,采用66~69 GHz的频率组合。可以看出大气温度,尤其是表面温度,对星载差分吸收气压雷达的海面气压反演精度有较大的影响,是影响通过差分吸收指数来进行气压估计的重要因素。

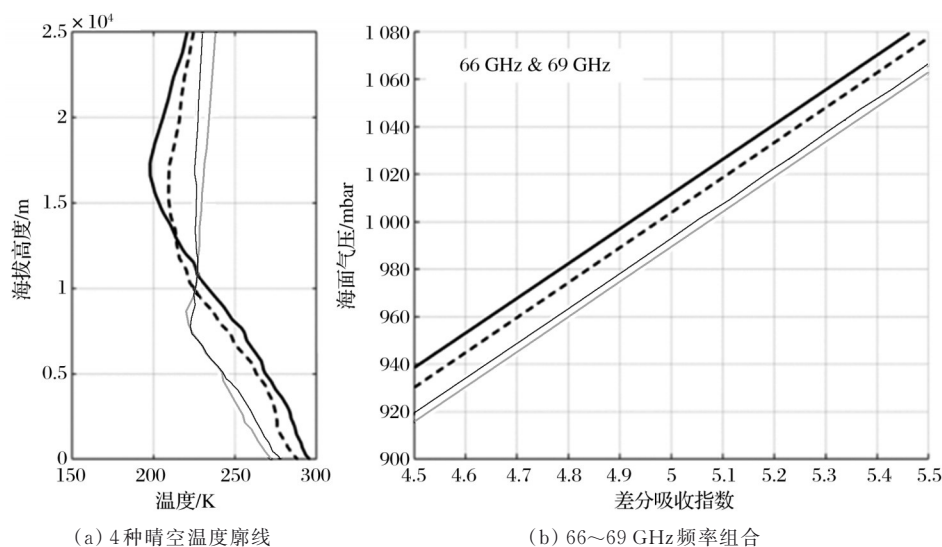


图11 不同温度廓线下海面气压与差分吸收指数之间的关系

Fig.11 The relationships between corresponding surface pressure and differential absorption index at the frequency pair of 66~69 GHz

在第二节中为了简化分析,在差分吸收指数和海面气压的推导过程中假设氧气的吸收系数 α_o 只为频率的函数,因此当差分吸收气压雷达的双通道工作频率确定时,差分吸收指数 $Ri(\lambda_1, \lambda_2)$ 和海面气压之间有着确定的线性关系。而实际上根据Liebe和Rosenkranz的研究,通过使用交迭谱线的频带理论等应用于60 GHz的氧气吸收带并进行合理的近似^[27],氧气的吸收指数 α_o 不仅仅是频率的函数。MPM 89模型中氧气吸收系数可简化表示为:

$$\alpha_o = 0.182f \sum_{i=1}^{44} S_i F_i \quad (17)$$

其中: f 表示频率,在60 GHz的氧气吸收带存在44条吸收谱线, S_i 表示吸收谱线的强度, F_i 表示吸收谱线的形状因子,MPM89模型的谱线形状采用的是修正的范福莱克-威斯科夫模型,形状因子 F_i 与氧气分压强和大气温度等有关。

因此,氧气的吸收系数 α_o 不仅是频率的函数,而且和大气温度有关。所以虽然在仿真时所采取的不同的温度廓线下的海面气压近似相同,但是由于温度对氧气吸收系数 α_o 的影响,导致差分吸收气压雷达双通道的差分吸收指数 $Ri(\lambda_1, \lambda_2)$ 的变化,使用66~69 GHz的频率组合所得到的海面气压估计

值是不同的,影响到海面气压的探测精度。例如仿真结果中黑色实线所代表的温度廓线,其利用差分吸收指数估计得到的海面气压与实际海面气压的误差超过10 mbar。另外值得注意的是仿真结果中表示差分吸收指数和海面气压的关系的斜线是按照每单位差分吸收指数25 mbar的固定斜率拓展得到的,由于大气温度对氧气的吸收系数 α_o 的影响,不同温度廓线下表示差分吸收指数和海面气压的关系线其斜率是有差异的。

虽然温度廓线的变化会对海面气压反演精度产生影响,但是如果能够对于测量的海面温度状况进行估计^[28-29],或者采用主被动联合探测的方式,那么温度对海面气压精度影响将会降低,这在气压反演过程中是可以优化的,这将在后续进行进一步研究。

图12展示了晴空不同湿度下的海面气压与差分吸收指数的关系,图12(a)为4种不同的湿度廓线,表示大气湿度随高度的变化情况。和对温度廓线的仿真一致,这4条湿度廓线下的海面气压都在925 mbar左右,误差在1 mbar以内。图12(b)表示对应湿度廓线下的差分吸收指数和海面气压的估计线性关系,采用66~69 GHz的频率组合。由于星载差分吸收气压雷达通过双通道回波功率的对数

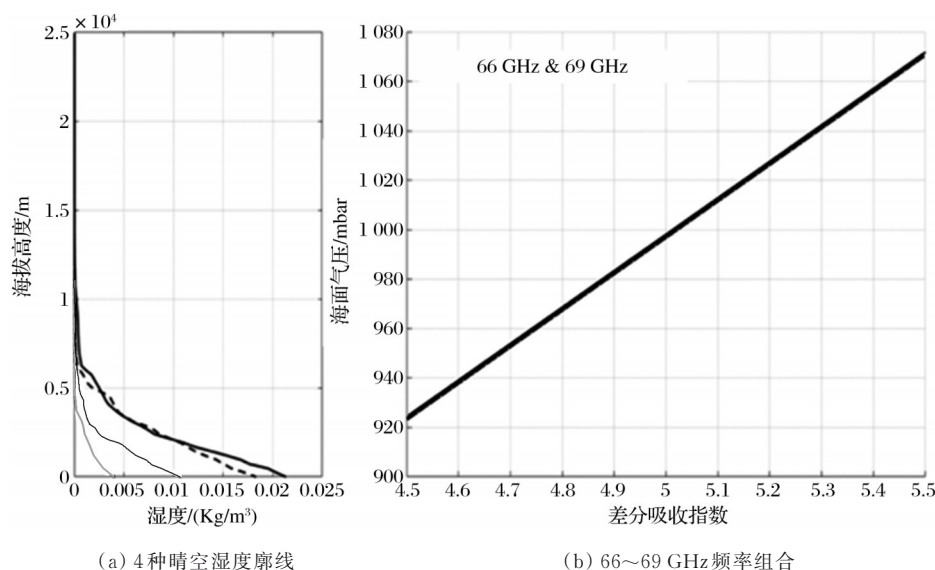


图12 不同温度廓线下海面气压与差分吸收指数之间的关系

Fig.12 The relationships between corresponding surface pressure and differential absorption index at the frequency pair of 66~69 GHz

比消除了大气中水汽的影响,而且氧气的吸收系数和湿度是无关的,因此晴空下不同湿度对海面气压反演的精度几乎没有影响,晴空时空气湿度的影响可以忽略不计。

4.3 云的影响

为了探究云对于差分吸收气压雷达测量精度的影响,其按照云层高度等信息将云分为卷云、高层云、高积云、层云、积云、层云以及乱层云等。在晴空天气条件下,利用水凝物探测信息及降雨率数据排除有雨的情况,图13分别展示了不同云况条件

下差分吸收指数与海面气压之间的关系以及其均方根误差。

图13的仿真结果表明,有云条件下差分吸收指数与海面气压之间仍有着明显的线性关系,不同云况下海面气压的均方根误差在3.1~3.6 mbar之间。例如利用卷云条件下的所有大气廓线数据得到的差分吸收指数和对应的海面气压的线性回归均方根误差为3.2 mbar。这表明在有云条件下差分吸收气压雷达仍然可以获取海面气压的信息并且云对海面气压的探测精度影响很小。

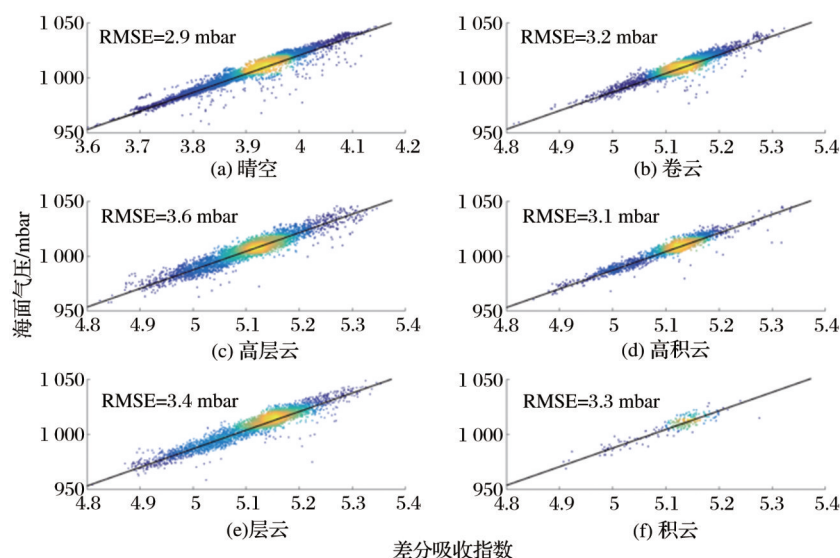


图13 无云晴天 (Clear-Sky)、卷云 (Cirrus)、高层云 (Altostratus)、高积云 (Altostratus)、层云 (Stratocumulus)、积云 (Cumulus) 条件下,66~69 GHz 频率组合的差分吸收指数与海面气压之间的关系

Fig.13 Simulated relationships between surface pressure and differential absorption index at the frequency pair of 66~69 GHz for Clear Sky, Cirrus, Altostratus, Altostratus, Stratocumulus and Cumulus scenarios

晴空条件下电磁波的衰减是由于大气气体的吸收所引起的,是单个分子能级跃迁的结果。而电磁波和云粒子的相互作用既存在吸收又存在散射^[30],云水粒子的复折射率和消光系数与频率和大气温度有关,由于星载差分吸收气压雷达的双通道工作频率接近,因此频率差所造成的云水吸收和散射影响较小。和在上一节对温度廓线的讨论结果相似,大气温度通过影响云水的吸收和散射,间接影响了有云天气下差分吸收指数和海面气压之间的线性关系,增大了海面气压估计的均方根误差。

值得注意的是,不同云类下的仿真结果是在没有考虑大气温度对氧气吸收系数、云水吸收和散射影响的前提下进行的,即海面气压的估计仅仅通过差分吸收指数和海面气压的固定线性关系得到。而在这个前提下海面气压的估计误差在3~4 mbar,这意味着如果能联合大气温度信息,那么星载差分吸收气压雷达的海面探测精度会有进一步提升的空间。

5 结 语

实验通过对星载差分吸收气压雷达的原理进行分析,确定了强氧气吸收频段下的差分吸收指数(双通道回波功率对数比)与海面气压之间的近线性关系,这为通过差分吸收指数反演海面气压提供了理论依据。通过采用大气廓线等数据、MPM89模型及对星载差分吸收气压雷达系统设计的分析,建立了星载差分吸收气压雷达的仿真模型并分析了海面气压估计的性能和影响因素。仿真结果表明,强氧气吸收波段下的表面气压和通过雷达回波数据得到的差分吸收指数之间存在线性关系,66 GHz与69 GHz的频率组合在晴空下得到的海面气压估计的均方根误差在2.6 mbar,不同云况下得到的海面气压估计的均方根误差在3~4 mbar。大气湿度对差分吸收气压雷达的性能影响很小,大气温度对差分吸收气压雷达的性能影响较大,但可以通过对温度廓线的估计来减小影响。同时星载差分吸收气压雷达的系统性能也会影响到海面气压估计,过低的信噪比将增大均方根误差。

实验通过仿真验证了差分吸收测量海面气压的可能性并对星载差分吸收气压雷达的系统设计进行了初步的探讨,这为后续雷达系统的设计与实现提供了参考与依据。通过遥感手段获得高时空分辨率的海面气压信息,将对天气预测、大气动力

学研究,特别是热带气旋结构和动力特征分析等有着重要的意义。

参考文献(References):

- [1] Lin B, Hu Y. Numerical Simulations of Radar Surface Air Pressure Measurements at O₂ Bands [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(3): 324-328.
- [2] Zhang Z, Dong X, Liu L, *et al.* Retrieval of Barometric Pressure from Satellite Passive Microwave Observations over the Oceans [J]. Journal of Geophysical Research, 2018, 123(6): 4360-4372.
- [3] Flower D, Peckham G. A Microwave Pressure Sounder [R]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 1978.
- [4] Lin B, Hu Y. Numerical Simulations of Radar Surface Air Pressure Measurements at O/Sub 2/Bands [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(3): 324-328.
- [5] National Research Council. Handbook of Frequency Allocations and Spectrum Protection for Scientific Uses [M]. Washington, D.C., National Academies Press, 2007.
- [6] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume 1-Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry [M]. Dedham, Massachusetts: Artech House, 1986: 721-820..
- [7] Swinehart, D. F. The Beer-Lambert Law [J]. Journal of Chemical Education, 1962, 39(7): 333.
- [8] Millán L, Lebsock M, Livesey N, *et al.* Differential Absorption Radar Techniques: Surface Pressure [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7(11): 3959-3970.
- [9] Lin B, Hu Y, Harrah S, *et al.* The Feasibility of Radar-based Remote Sensing of Barometric Pressure [J]. Final Report, NASA Earth Science Technology Office (ESTO), 2006, 2(3): 324-328.
- [10] Ku L. Research on the Correction Method of Narrow-band RCS Measurement of Atmospheric Absorption Attenuation [D]. Xi'an: Xidian University, 2012. [库流杰.窄带RCS测量大气吸收衰减修正方法研究[D].西安:西安电子科技大学, 2012.]
- [11] Liebe H J. MPM—An Atmospheric Millimeter-wave Propagation Model [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, 10(6): 631-650.
- [12] Boisot O, Nouguier F, Chapron B, *et al.* The GO4 Model in Near-nadir Microwave Scattering from the Sea Surface [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(11): 5889-5900.
- [13] NouGuier, Frédéric, *et al.* Analysis of Dual-frequency Ocean Backscatter Measurements at Ku- and Ka-bands Using Near-nadir Incidence GPM Radar Data. [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 2016, 13(9): 1310-1314.
- [14] Partain P. Cloudsat ECMWF-AUX Auxiliary Data Process Description and Interface Control Document [J]. Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Colorado State University, 2007, 2394: 1466-1477.
- [15] Li F K, Im E, Durden S L. Cloud Profiling Radar (CPR) for the CloudSat Mission [C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. IEEE, 2000.

- [16] Chan M A, Comiso J C. Arctic Cloud Characteristics as Derived from MODIS, CALIPSO, and CloudSat[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(10):3285-3306.
- [17] Patoux J, Foster R C, Brown R A. An Evaluation of Scatterometer-derived Oceanic Surface Pressure Fields[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(3):835-852.
- [18] Karapantazis S, Pavlidou F N. Design Issues and QoS Handover Management for Broadband LEO Satellite Systems[J]. *IEEE Proceedings-Communications*, 2005, 152(6): 1006-1014.
- [19] Cho D H, Kim H D. Analysis of Orbit Determination of the KARISMA Using Radar Tracking Data of a LEO Satellite[J]. *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, 2015, 43(11): 1016-1027.
- [20] Muri P, Challa O, McNair J. Enhancing Small Satellite Communication Through Effective Antenna System Design[C]// *Military Communications Conference*. IEEE, 2010.
- [21] Stephens G, Winker D, Pelon J, *et al.* CloudSat and CALIPSO within the A-Train: Ten Years of Actively Observing the Earth System[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(3): 569-581.
- [22] Lonfat M. Precipitation Distribution in Tropical Cyclones Using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager: A Global Perspective[J]. *Health Research Policy and Systems*, 2004, 11(1):40-40.
- [23] National Research Council. Handbook of Frequency Allocations and Spectrum Protection for Scientific Uses[M]. National Academies Press, 2007.
- [24] Wang Gang, Dong Xiaolong, Zhu Di. High-resolution Implementation based on Spaceborne Rotating Scanning Radar[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(6): 1071-1077.[王刚,董晓龙,朱迪.基于星载旋转扫描雷达的高分辨率实现[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(6):1071-1077.]
- [25] Zhang Zijin, Dong Xiaolong. Application of Passive Microwave Remote Sensing Sea Surface Pressure in the Analysis of Tropical Cyclones[C]// *The 35th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society*, 2018.[张子瑾,董晓龙.被动微波遥感海面气压在热带气旋分析中的应用[C]//第35届中国气象学会年会, 2018.]
- [26] Liebe H J, Hufford G A, Cotton M G. Propagation modeling of Moist Air and Suspended Water/Ice Particles at Frequencies below 1000 GHz[C]// *AGARD 52nd Specialists' Meeting of the Electromagnetic Wave Propagation Panel*, 1993, 52(11): 2058-2072.
- [27] Rosenkranz P W. Water Vapor Microwave Continuum Absorption: A Comparison of Measurements and Models[J]. *Radio Science*, 1998, 33(4): 919-928.
- [28] Vesecy J F, Onstott R G, Wang N Y, *et al.* Water Surface Temperature Estimates Using Active and Passive Microwave Remote Sensing: Preliminary Results from an Outdoor Wind-wave Tank[C]// *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation. International. IEEE, 1994.
- [29] Che L, Ding Y J, Peng Z M. The Influences of Temperature, Concentration and Pressure Uncertainties on the Measurement Results of Wavelength Modulation Spectroscopy[J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(6):67801-67804.
- [30] Kollias P, Albrecht B A, Marks Jr F. Why Mie? Accurate Observations of Vertical Air Velocities and Raindrops Using a Cloud Radar[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(10): 1471-1484.

Simulation and System Design of Spaceborne Differential Absorption Barometric Radar

Xu Xin^{1,2}, Zhu Di¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A spaceborne differential absorption barometric pressure radar operating in the 65~70 GHz strong oxygen absorption band is proposed to continuously acquire sea surface pressure data with global high temporal and spatial resolution. Through the analysis of the design requirements of the spaceborne differential absorption barometric radar system, the atmospheric profile data and the atmospheric absorption coefficient model are used to simulate and analyze the performance of the sea surface pressure differential absorption. The simulation results show that there is a linear relationship between the sea surface pressure in the strong oxygen absorption band and the differential absorption index. The RMSE of the sea surface pressure estimation obtained by the spaceborne differential absorption barometric pressure radar under clear sky at operating frequencies of 66 GHz and 69 GHz. The error is 2.6 mbar, and the rms error of the sea surface pressure estimation obtained under different cloud conditions is 3 to 4 mbar, which provides a reference and basis for the design and engineering implementation of the subsequent radar system.

Key words: Differential absorption technology; Sea surface pressure measurement; Radar system simulation; Active remote sensing