

地球同步轨道星载毫米波降雨雷达数据模拟 及地表杂波抑制

唐顺仙^{1,2,3}, 吕达仁^{1*}, 何建新³, 李睿^{3,4}, 李学华³, 王皓³

- (1. 中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 成都信息工程大学 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225;
4. 成都理工大学 地球物理学院, 四川 成都 610059)

摘要:首先对地球同步轨道星载降雨雷达进行了介绍;其次基于其技术参数,利用美国第二代机载降雨雷达(APR-2)的实测数据模拟了地球同步轨道星载毫米波降雨雷达的数据并对模拟的强度和速度场数据进行了分析;最后根据时域信号(I,Q)和功率谱数据的特征,采用时域无限脉冲响应(IIR)椭圆滤波器和频域高斯模型自适应处理(GMAP)两种方法对地表杂波进行了抑制,并对抑制前后的廓线数据和回波图进行了对比分析.结果表明,采用IIR和GMAP方法能够对受弱风条件下海面杂波影响的近地面气象回波进行较好的恢复,对地表杂波具有较好的抑制效果.

关键词:地球同步轨道雷达;星载毫米波;数据模拟;地表杂波

中图分类号:P412.25 **文献标识码:**A

Data simulations and surface clutter suppression methods for the geostationary millimeter wave weather radar

TANG Shun-Xian^{1,2,3}, LV Da-Ren^{1*}, HE Jian-Xin³, LI Rui^{3,4}, LI Xue-Hua³, WANG Hao³

- (1. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Chengdu University of information technology, Key Lab of Atmospheric Sounding, CMA, Chengdu 610225, China;
4. Chengdu University of Technology, Geophysical Institute, Chengdu 610059, China)

Abstract: Brief introduction of the geostationary Doppler weather radar (GDWR) was described. Secondly, based on the Satellite-Earth geometry model, observational data of GDWR were simulated using the APR-2 data, and the rainfall intensity and velocity field data were analyzed. By combining the characteristics of power spectrum data and time domain signals, the surface clutter was restrained using the Gaussian model adaptive processing method (GMAP) and fifth-order elliptic infinite impulse response ground clutter filter (IIR). The comparisons were carried out between the filtered data and the original data, which indicates that the weather radar echo influenced by the ocean surface clutter can be correctly recovered using IIR and GMAP methods.

Key words: geostationary weather radar, space-borne millimeter, data simulation, surface clutter

PACS: 84.40.Xb

引言

全球降水将影响地球气候变化以及不同尺度天气过程的形成,对全球降水的观测将是十分必要的,其中对超过全球降水总量约 2/3 的热带降水的遥感将是重中之重^[1]. 由于热带地区被大面积的海洋和植被所覆盖,而地基降雨雷达及机载降雨雷达受到自身探测范围和工作时间等条件的限制,两者均无法连续地获取完整的大范围区域内的降雨信息. 因此,以卫星为搭载平台,采用下视工作方式的星载降雨雷达受到越来越多的重视,并得到成功研制.

星载降雨雷达的研制始于 20 世纪 80 年代,第一颗搭载降雨测量雷达 (Precipitation Radar, PR) 的近赤道非太阳同步轨道热带降雨测量卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 是由美国和日本联合研制并于 1997 年成功发射^[2]. 之后美国和日本又联合进行了全球降雨测量 (Global Precipitation Measurement Dual Frequency Precipitation Radar, GPM-DPR) 计划. 其相比于 TRMM-PR 具有更广的监测范围和更高的测量精度和灵敏度,能够跟踪热带风暴由低纬向中高纬度移动的轨迹以及捕捉到此前无法观测到的微量降水 ($< 0.5 \text{ mm/h}$) 及固态降水^[3]. 低地球轨道星载降雨雷达在成功运行的同时,也存在一些不足. 例如:在对某一气旋系统进行完整采样时,由于平台移动导致的采样频次太低,耗费的采样时间过长 (有时甚至超过一天) 等. 因此,美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 在低轨道星载降雨雷达技术研究的同时,又提出了地球同步轨道星载 Ka 波段多普勒降雨雷达作为下一代星载天气雷达 (NEXRAD in Space, NIS) 的研究计划. 除此之外,中国的空间技术研究机构也在研究地球同步轨道 Ku 和 Ka 双波段的星载降雨雷达. 相比于低轨星载降雨雷达,地球同步轨道星载降雨雷达 (Geostationary Doppler Weather Radar, GDWR) 具有高频次、宽覆盖等优点,能够提供较宽空间区域内降水的垂直分布和具有较高的时间分辨率 (30 分钟或更短),这些特点将十分有利于对飓风和强风暴的监测. 然而,在 GDWR 实现过程中需面临很多挑战,其中之一便是抑制地表杂波对降雨数据的污染.

目前,关于星载降雨雷达地表杂波抑制方法的研究,国外学者作了一些相关工作. Testuya Tagawa 等^[4]提出从星下点开始,倾斜雷达天线波束扫描平面,从而可以减弱地表杂波返回功率. 然而,这种方

法并不适用于采用大型球面反射面天线的 NIS-PR 地表杂波抑制处理. 另外,由于在星下点扫描时,地表杂波影响的距离库数较少,因此可以采用杂波距离库直接剔除法进行地表杂波抑制处理. 然而,这种方法不能运用于远离星下点位置的地表杂波抑制的处理. 关于 NIS-PR 杂波抑制方面的研究主要集中于 S. L. Durden 和 S. Tanelli^[5]等的研究结果,其利用中尺度对流系统的数值模式模拟产生雷达反射率因子和多普勒速度数据,并将这些数据映射到 NIS-PR 的波束分辨体积,最后模拟结果显示陆地杂波出现在零多普勒速度附近,进而可以用凹口滤波器对杂波进行有效地滤除. S. Tanelli、E. Im 和 S. L. Durden 等^[6]为杂波谱特征的了解提供了途径. 对于 NIS-PR 地表杂波的抑制方法,国内学者研究的较少.

对于 NIS-PR 的地表杂波问题,本文首先介绍了 NIS-PR 平台及对地表杂波特征进行了分析,其次阐述了利用 APR-2 的数据对 NIS-PR 的时域回波信号及功率谱数据进行模拟的方法,最后就时域无限脉冲响应 (IIR) 椭圆滤波器和频域高斯模型自适应处理 (GMAP) 两种方法对地表杂波进行了抑制处理并对抑制的效果进行了初步分析.

1 NIS-PR 介绍及地表杂波特性分析

1.1 NIS-PR 平台

地球同步轨道星载降雨雷达是一种新型的星载雷达概念平台^[7],其卫星高度设计为 36 000 km. 本文以 NIS-PR 为对象进行介绍,NIS-PR 拟采用 Ka 波段,其天线为直径 35 米的球型反射面,对应的波束宽度为 0.02° ,偏离星下点的扫描角范围为 $0 \sim 4^\circ$,扫描方式为螺旋式扫描. 由于地球曲率的影响, 4° 的扫描角将会产生最大 28° 的入射角 (与地表法线方向的夹角) 和南北纬 24° 、东西经度 24° 的圆形覆盖范围,即大约 5 300 km 的地表,而完成一个覆盖 5 300 km 的圆盘所需的螺旋式扫描时间大概在 1 h 左右. 同时,NIS-PR 也可对较小重点观测区域进行快速扫描,为热带地区台风的追踪及预警提供有利的信息. 以 NIS-PR 为例,NIS-PR 水平分辨率受天线的尺寸和扫描角变化的影响,范围为 12 ~ 14 km. NIS-PR 的星地几何关系及扫描示意图如图 1^[7].

1.2 NIS-PR 轨道摄动对天线指向的影响

NIS-PR 平台在空间运行过程中,将受到摄动力的影响,即会导致运行轨道倾角度化,进而将会严重影响天线波束指向的准确性,进而影响对气象目标

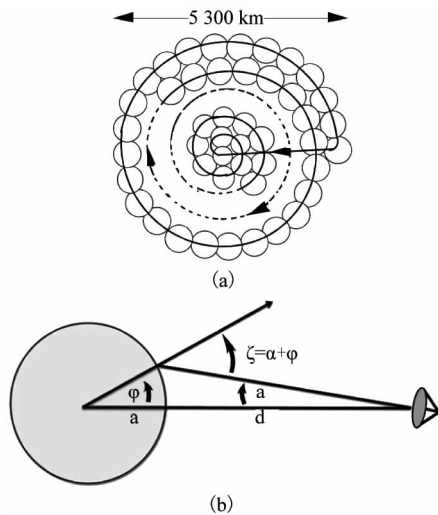


图1 (a) NIS-PR 扫描示意图, (b) NIS-PR 星地几何关系

Fig. 1 (a) NIS-PR scanning schematic and (b) NIS-PR satellite-earth geometry

探测的精度. 因此, 为了保证 NIS-PR 天线波束指向的精度和准确度, NIS-PR 必须定期对自然摄动加以补偿, 以控制其运动窗口在经度和纬度方向 $\pm 0.1^\circ$ 以内^[8]. 因此, 经度 E' 和纬度 N' 在一个周期内的变化可由式 1 表示, 由此引起的入射角偏差 $\Delta\alpha$ 可由式 2 计算:

$$E'(t) = E_0 - \frac{i^2}{4} \sin\left(\frac{4\pi t}{24}\right),$$

$$N'(t) = N_0 + i \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right), t \in [0, 24], (1)$$

$$h_1 = \sqrt{r^2 + (h+r)^2 - 2 * r * (h+r) * \cos(i * \pi / 180)},$$

$$\Delta\alpha = N' + \arccos\left(\frac{h_1^2 + (h+r)^2 - r^2}{2 * h_1 * (h+1)}\right) * 180 / \pi, (2)$$

其中 r, h 分别为地球赤道半径和 NIS 星下点距地面的高度.

NIS-PR 在 $\pm 0.1^\circ$ 的窗口周期运动时, 星下点的经度几乎不会随时间变化, 而最大 0.1° 的纬向偏差会导致足迹测量的偏差 Δh 约为 11 km, 由此引起的 NIS-PR 的 $\Delta\alpha$ 最大为 0.1° . 对 NIS-PR 的 12 km 水平分辨率而言, 在模拟 NIS-PR 数据时需考虑 Δh 及 $\Delta\alpha$ 的影响, 即需对波束照射目标范围及因 $\Delta\alpha$ 所引起的雷达后向散射截面的改变进行修正.

1.3 星载地表杂波特征分析

地表杂波的种类很多, 因本试验所采用的 APR-2 实测数据中地表多为海洋且近海面风速度较小的原因, 且 NIS-PR 入射角较小, 故本文主要对在较小

入射角度 ($\leq 20^\circ$) 下, 对弱风条件下 (1 m/s) 的海面杂波进行分析. 海面的准镜面散射模型^[9] 可由式 3 表示.

$$\sigma^0(\theta) = \sigma^0(0) \cdot \sec^4\theta \cdot \exp\left(-\frac{\tan^2\theta}{s}\right), (3)$$

其中 $\sigma^0(0)$ 为入射角为 0° 时, 归一化雷达后向散射截面; s 为 0.139 7.

基于 NIS-PR 与地基天气雷达均具有相对地球静止的特点, 为了更好的抑制地表杂波, 故可考虑在多普勒频谱上进行地表杂波抑制处理. 在已有研究的基础上^[10], 可以合理的假设弱风下海面杂波的平均多普勒频移为 0 Hz, 且平静海面不规则运动和 NIS-PR 摄动所带来的速度谱宽设为 1 m/s, 其中平静海面的不规则运动为引起谱宽展宽的主要因素. 而由于垂直速度、湍流、波束交叉和非均匀波束充塞等的影响, 降雨的速度谱宽最大约为 4 m/s^[11].

综上所述 NIS-PR 轨道摄动对天线指向影响的分析、地表杂波特征的分析将为后续 NIS-PR 数据模拟以及地表杂波抑制方法的选择提供理论依据.

2 NIS-PR 数据模拟方法

由于 NIS-PR 目前仍属于概念性的星载降雨雷达平台, 因此在 NIS-PR 杂波抑制技术相关的研究工作开展之前, 有必要对 NIS-PR 的数据模拟方法进行研究. 以 S. Tanelli 等^[6] 在评估非均匀波束充塞对星载多普勒雷达速度测量的影响中利用 ARMAR 机载雷达测量的环境场数据对星载降雨数据进行模拟的思想, 并结合 NIS-PR 独特的星地几何关系和轨道摄动所带来的天线指向偏差, 故提出基于 APR-2 与 NIS-PR 空间分辨率之间的联系、两者特定的几何关系以及考虑大尺寸天线方向函数加权的影响来模拟 NIS-PR 的功率谱数据及基本数据.

2.1 采样体积投影

根据 NIS-PR 与 APR-2 的空间采样体积的关系, 可将 NIS-PR 的一个距离库划分成多个 APR-2 的距离库, 在数据模拟之前, 需先根据 APR-2 的回波数据确定雨区的范围, 将超出雨区范围内的数据设置为无效数据. 在受杂波污染的区域, 将会出现地表杂波、气象回波和镜像回波混合的情况. NIS-PR 一个波束内的体目标数据模拟投影到平面的示意图如图 2 所示.

NIS-PR 第 (i, j) 的分辨单元投影到直角坐标 (x, z) 中转换关系如式 (4):

$$x = i \cdot r_a \cdot \sin\alpha + (j + (N_0 - 1) \cdot \Delta n) \cdot h_a \cdot \cos\alpha$$

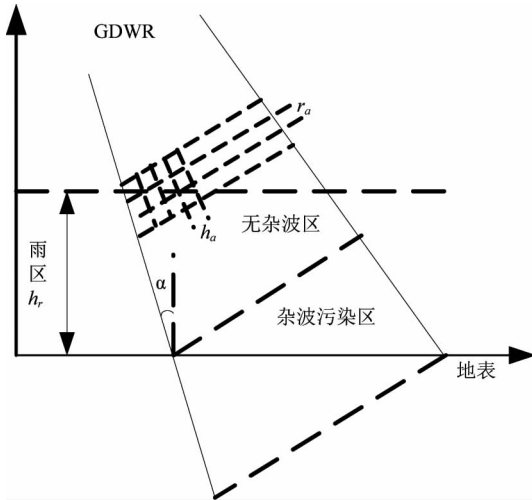


图2 NIS-PR 一个波束内数据模拟投影平面示意图
Fig.2 NIS-PR projected planform of data simulation in one beam

$$z = h_r - i \cdot r_a \cdot \cos\alpha + (j + (N_0 - 1) \cdot \Delta n) \cdot h_a \cdot \sin\alpha \quad (4)$$

式中 i 和 j 分别为 NIS-PR 的某一波束内第 i 个距离库和第 j 个 APR-2 的波束。 r_a 和 h_a 分别为 APR-2 的径向和水平分辨率， h_r 为雨区的高度， α 为 NIS-PR 的入射角， Δn 为 NIS-PR 分辨体积内包含的 APR-2 分辨体积的个数， N_0 为模拟区域包含的 NIS-PR 波束的个数。

2.2 功率谱数据模拟

星载降雨雷达的多普勒谱是散射粒子径向速度的功率加权分布，其功率加权不仅取决于散射粒子的反射率，还取决于天线方向函数、发射脉冲形状和接收机对发射脉冲的响应。对于地球同步轨道星载毫米波降雨雷达而言，不需考虑由于运动平台引起的速度谱形的影响，而需重点考虑地球同步轨道星载雷达 12~14 km 的地面水平分辨率内横向反射率场分布和速度场不均匀对多普勒功率谱特征的影响。星载降雨雷达多普勒谱的计算式如下所示^[4]：

$$P(r, f) = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} P_n(r, f) \cdot W(r) \cdot r \sin\phi d\phi d\theta dr \quad (5)$$

其中 r_1, r_2, r 分别为目标采样体积距离雷达的上下边界及中心距离， f 为接收频率， ϕ, θ 分别为扫描角和方位角， $P_n(r, f)$ 为降雨的固有多普勒速度谱， $W(r)$ 为加权函数，包括天线方向图函数及距离加权函数等影响。

对于 $P_n(r, f)$ ，由于 APR-2 的距离库与常规地基多普勒雷达可比拟，因此可以合理的假设 NIS-PR 的单个分辨单元的功率谱符合高斯分布。

$$P_n(r, f) = -\ln(1 - Rnd) \left\{ \frac{P_r}{\sqrt{2\pi}\delta_f} \exp\left[-\frac{(f - f_d)^2}{2\delta_f^2}\right] + P_N(f)/PRF \right\} \quad (6)$$

在式(6)中，随机变量 Rnd 为在区间上具有均匀分布， $P_N(f)$ 为每秒钟噪声总功率，则 $P_N(f)/PRF$ 为噪声功率谱密度。PRF 为 NIS-PR 的脉冲重复频率。 p_r, f_d 可由 APR-2 的反射率因子和平均径向速度求得。 δ_f 可根据对应距离库上的强度信息对气象目标和地表杂波分别进行设置。

除此之外，还需考虑 NIS-PR 大尺寸天线的方向函数加权的影响。因 NIS-PR 所用的天线为抛物面型的反射器，故天线增益函数^[20]可采用如式(7)表示。

$$G_a^2(\varphi - \bar{\varphi}, \theta - \bar{\theta}) = \frac{4\pi^2 D^2}{\lambda^2} \cdot \frac{J_1^2(u)}{u^2}$$

$$u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \sqrt{(\varphi - \bar{\varphi})^2 + (\theta - \bar{\theta})^2} \quad (7)$$

其中 D 为天线的口径直径， $J_1^2(u)$ 为第一类一阶贝塞尔函数， $\bar{\varphi}, \bar{\theta}$ 分别为波束中心的扫描角和方位角。故加权函数计算式如下：

$$W(r) = \frac{C \cdot G_a^2(\varphi - \bar{\varphi}, \theta - \bar{\theta}) \cdot G_r(r)}{L(r) \cdot r^4} \quad (8)$$

其中 C 为星载雷达常数， G_r 为距离加权函数， L 为双程大气衰减量。

星载多普勒降雨雷达通过脉冲时间采样后，在雷达信号处理器中输出的信号功率谱为：

$$P_0(r, f) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} P(r, f + i \cdot PRF) \quad (9)$$

其中 PRF 为雷达脉冲重复频率。而每一个复电压采样回波信号为雷达分辨率体积内所有降雨粒子后向散射回波线性之各，即采样样本序列为：

$$s_n = \sum_i V_i \cdot W_{i,n} \cdot e^{-2j2\pi R_{i,n}/\lambda} \quad (10)$$

其中 V_i 为粒子的速度， $W_{i,n}$ 为加权系数 $W(r)$ 的离散值， $R_{i,n}$ 为降雨粒子离雷达的距离。式(9)的 $P_0(r, f)$ 是通过 M 个 s_n 作 DFT 变换所得，即星载降雨雷达多普勒谱的分析模型为：

$$P(f) = \frac{1}{M} \left| \sum_i V_i \cdot W_{i,n} \cdot \exp(-2j2\pi R_{i,n}/\lambda) \sum_{n=0}^{M-1} \exp(-2\pi(\frac{2V_i}{\lambda})T_s n) \right| \quad (11)$$

其中 T_s 为采样时间间隔。

2.3 数据处理

考虑到 NIS-PR 采用了脉冲压缩方式来实现

垂直距离上获取较高的距离分辨能力,因此在数据模拟时除需进行天线的水平加权外,还需进行垂直距离上的加权处理. 天线加权及垂直距离的高斯加权函数如图 3 中(a)、(b)所示.

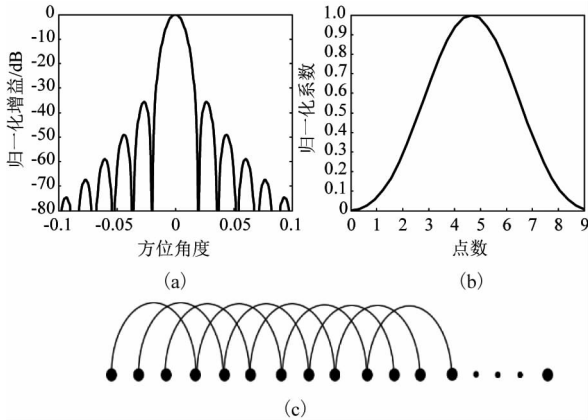


图 3 (a) NIS-PR 天线方向图, (b) 距离加权函数, (c) 滑动平均示意图
Fig. 3 (a) Antenna pattern of NIS-PR, (b) Range weighted function, and (c) Schematic diagram of moving average

关于数据空间分辨率匹配将作如下处理, APR-2 的空间分辨率为:水平 400 m,垂直 30 m;而 NIS-PR 设计的空间分辨率为:水平 12 km,垂直 250 m. 所以在 NIS-PR 水平分辨率数据模拟时,需 30 个 APR-2 的数据进行数据处理得到. 而若依次将 30 * 8 的 APR-2 的数据融合成 NIS-PR 的空间分辨率时,模拟后的 NIS-PR 数据的分辨率及速度估计的准确度将会大大降低,并且天气目标的连续性特征将会被削弱^[12]. 除此之外,还应考虑到摄动所引起 NIS-PR 天线指向偏差的因素. 因此,考虑到这些问题,本文采用了滑动平均窗的方式来处理. 具体实现为水平方向上采用宽度为 30,滑动步长为 $\Delta h/400$ 的滑动窗,而垂直方向采用宽度为 8,滑动步长为 2 的滑动窗,滑动平均窗示意图如图 3(c)所示.

在 APR-2 的采样体积投影到 NIS-PR 采样体积后,获得 NIS-PR 每个分辨单元内的强度和速度数据. 然后利用经典的基于谱模型的直接拟合法建立 NIS-PR 每个距离库内的功率谱,再与设计的天线方向函数、距离加权函数进行加权,进而得到模拟的功率谱. 之后,利用强度估计和多普勒速度估计法(如 FFT 方法),对 NIS-PR 的反射率因子和速度数据进行模拟计算.

3 APR-2 及 NIS-PR 数据分析

为对 NIS-PR 的地表杂波信息进行有效的滤除,

需对 APR-2 实测数据及 NIS-PR 模拟的数据进行分析,以便了解地表杂波的特征及对近地面天气目标的影响程度.

3.1 APR-2 数据分析

APR-2 为美国研制的第二代机载降雨雷达,其具有 Ku 和 Ka 双波段. 图 4 为 APR-2 雷达实测的环境场数据(反射率因子和速度),其中数据已经考虑消除了飞机姿态及抖动等可能会影响数据质量的因素且进行了衰减订正处理. 图 5 为取 40 km、80 km、100 km 等处,绘制的反射率因子、平均径向速度随高度变化的廓线.

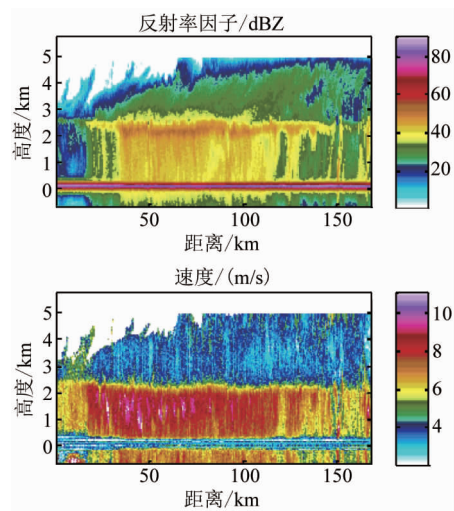


图 4 APR-2 实测回波图
Fig. 4 Measured echo images of APR-2

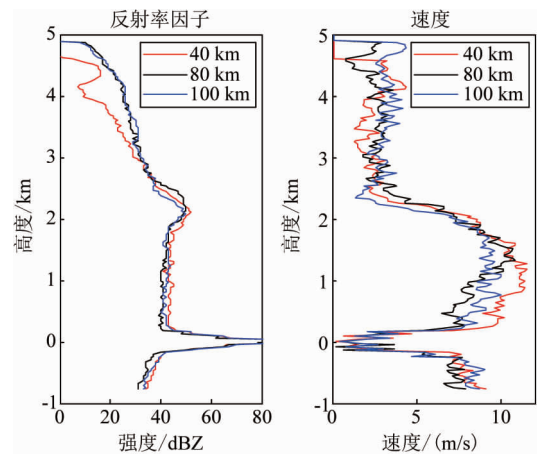


图 5 APR-2 同一水平距离处强度和速度随高度变化的廓线图
Fig. 5 The intensity and velocity contour of APR-2 in the same horizontal distance

从图 4 的反射率因子图中可知,降雨回波处于地表之上 5 km 内,最大反射率因子约在 55 dBZ 左

右. 而地表回波的反射率明显强于降雨回波, 其中在 0 km 以下的回波为镜像回波^[13]. 从平均径向速度图中分析, 地表杂波区域的速度值在 0 m/s 附近, 这一特征也与地物的特征十分吻合. 图 5 的廓线图也清晰地表明了弱风条件下的海面所具有的高反射率因子和低速度的特征.

3.2 NIS-PR 模拟数据分析

NIS-PR 数据模拟与入射角有关, 因此选择了 0°、8°、14° 等三种不同的入射角进行模拟数据的分析. 按照第 2 节所述的方法, 取同一水平距离处以三种不同入射角模拟的反射率因子和速度随高度变化的曲线图, 如图 6 所示.

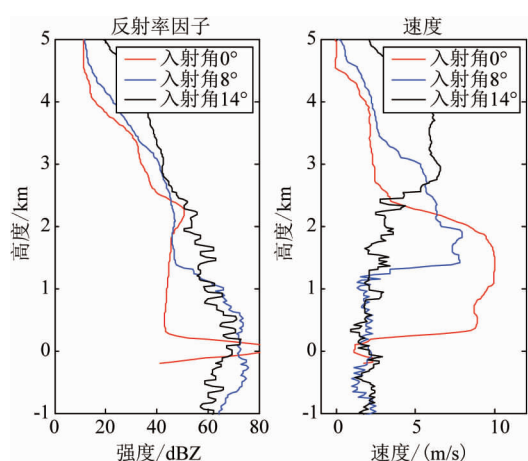


图 6 NIS-PR 不同入射角下模拟的 Z 和 V 随高度变化的廓线图

Fig. 6 The intensity and velocity contour of NIS-PR with the different incident angles at the same horizontal distance

从图 6 中的反射率因子曲线可看出, 在 NIS-PR 垂直下视扫描时, 其曲线特征仍然满足地表杂波的特征. 然而随着入射角度的增大, 即 NIS-PR 处于非垂直下视观测时, 其反射率因子和径向速度特征将会发生变化. 从入射角 0° 到 14°, 反射率曲线的最高点仍然处于地表高度处, 只是尖峰处变得越来越平缓, 最大值也逐渐有所减小, 同时高反射率的杂波影响的高度也在逐渐扩大. 速度曲线也呈现出最大值减小, 杂波影响的高度逐渐上移的趋势.

4 地表杂波抑制及效果分析

根据 NIS-PR 模拟数据中地表杂波的强度及径向速度所呈现的特性, 并结合星上抑制算法不能太复杂且可靠性高, 易于实现等特点, 故可考虑使用地基雷达杂波抑制处理的方法. 本文将分别从时域和

频域的角度对地表杂波的抑制进行研究. 时域抑制的方法为设计无限脉冲响应椭圆滤波器 (IIR), 而频域抑制的方法则采用高斯自适应频域滤波技术 (GMAP).

4.1 IIR 椭圆滤波器

IIR 椭圆滤波器是一个时域数字滤波器, 它通过对时域信号采样的叠加来完成滤波. 对于 NIS-PR 而言, 其地表杂波信号的谱宽比较窄, 且平均多普勒速度基本在零值附近的低速度区. 基于这一特性设计了一个五阶椭圆高通滤波器, 它对应的 Z 变换表达式为:

$$H(z) = A_0 \frac{1 + B_0 z^{-1}}{1 + D_0 z^{-1}} \cdot \frac{1 + A_1 z^{-1} + D_1 z^{-2}}{1 + B_1 z^{-1} + C_1 z^{-2}} \cdot \frac{1 + A_2 z^{-1} + D_2 z^{-2}}{1 + B_2 z^{-1} + C_2 z^{-2}}, \quad (12)$$

其中 $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2, C_1, C_2, D_0, D_1, D_2$ 为滤波器系数.

在 IIR 椭圆杂波滤波器实现中, 其基本参数设置如下: 采样频率为 5 040 Hz, 通带截止速度值为 2 m/s, 阻带截止速度值为 0.5 m/s, 通带最大衰减系数为 0.1, 阻带最小衰减系数为 100. 根据设置的参数可得到滤波器设计所需的系数, 进而可对 NIS-PR 模拟的正交信号 (I、Q) 进行滤波处理.

4.2 GMAP 处理

GMAP 方法是基于地表杂波的窄谱宽以及与气象目标谱宽的差异性, 在频率域设计地表杂波抑制算法, 实现根据回波信号中地表杂波的强度自动选择不同的滤波窗口, 达到有效滤除地表杂波的同时, 最大限度的保留天气目标的信息. 本文采用的 GMAP 实现方法和步骤如下:

1) 窗函数及功率谱的获取

首先对时序 I、Q 复信号进行海明窗加权处理, 然后进行离散傅里叶变换 (DFT) 得到功率谱.

2) 噪声功率的测定

噪声功率的测量一般通过周期噪声功率的测量来获得功率谱噪声功率. 首先将多普勒谱按功率从低到高排序, 取整频率段 5% 至 40% 之间的功率求各并平均, 即为测定的噪声功率.

3) 杂波点的去除

先在零多普勒频率附近寻找满足地表杂波强度范围的峰值区域, 并对地表杂波宽度进行假设. 根据多普勒功率谱和噪声电平, 将地表杂波峰值区域内的功率谱值均置为噪声电平.

4) 杂波点的替换

在滤除地表杂波点的同时, 不可避免的滤除了

部分天气目标的信息. 为了补偿这一损失, 可先根据槽口以外的天气回波信息的谱估计参数并结合高斯模型建立天气目标的功率谱模型, 最后用重建的功率谱信息替换槽口内的杂波点. 在利用重建信息替换杂波点后, 需对重建的准确度进行评估. 因为第一次的重建通常不是很准确的, 所以需利用第一次重建后的合成谱再进行多普勒零阶矩和一阶矩的计算并再次生成重建谱, 满足收敛条件即两次连续操作的功率之差小于 0.2 dB 且速度差异小于奈奎斯特间隔的 0.5%.

5) 窗函数的检查

计算杂波信号比 (CSR) 若 $CSR > 40\text{dB}$, 则窗函数选择布莱克曼窗并重新进行滤波过程; 若 CSR 大于 20 dB, 则使用布莱克曼窗并重新进行滤波, 如果新的 CSR 值大于 25 dB, 滤波过程结束; 若 CSR 大于 2.5 dB, 使用矩形窗并重新滤波, 若 CSR 值小于 1 dB, 则取矩形窗结果; 至于其他情况, 则窗函数选择海明窗并进行滤波处理.

4.3 抑制效果分析

为了分析时域 IIR 椭圆滤波和频域 GMAP 两种方法对地表杂波的抑制效果, 即需对反射率因子、速度廓线进行定量比较. 当入射角为 8° 时, IIR 和 GMAP 滤波前后的反射率因子、速度廓线如图 7 所示. 表 1 给出了当入射角为 0° 、 8° 和 14° 时, 在 0 km 和 1 km 高度处, IIR 和 GMAP 滤波的效果汇总.

从图 7 可以看出: 在入射角为 8° 时, 利用 IIR 和 GMAP 两种方法对地表杂波进行滤除后, 某一水平距离处的反射率因子和速度廓线在受地表杂波影响的高度 (约为 1.6 km) 内均表现为反射率因子降低且速度提升的特征, 与滤波前的高反射率因子、低速度的特征存在明显的不同. 对这两种不同的滤波方法进行比较发现, GMAP 滤除地表杂波后的反射率因子、速度廓线均较 IIR 方法处理后的廓线平滑且抖动较小, 更加接近实际层状云降雨雷达回波的特征.

表 1 对 0° 、 8° 和 14° 三种不同入射角的情况, IIR

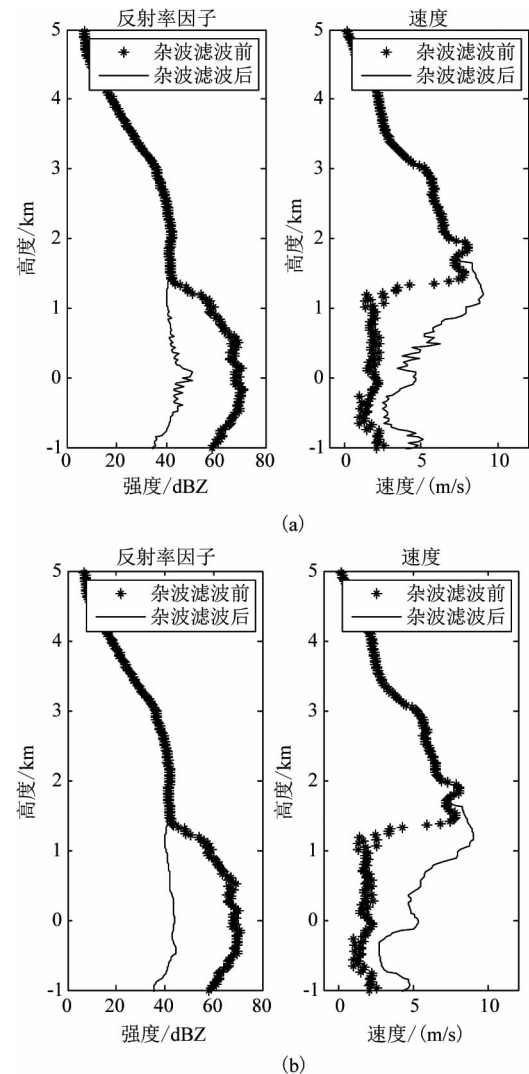


图 7 滤波前后 Z、V 廓线对比, (a) IIR 椭圆滤波处理, (b) GMAP 处理

Fig. 7 The comparison of the intensity and velocity contour before and after IIR elliptic filter and GMAP filtering

和 GMAP 两种方法的滤地表杂波效果进行了汇总. 从表 1 中可以看出: 在入射角为 0° 时, IIR 和 GMAP 方法在 0 km 均体现了较强的地表杂波抑制能力, 且反射率因子的抑制能力均在 28 dBZ 左右, 速度值也从 1.2 m/s 提升到约 4 m/s. 究其原因为垂直观测

表 1 IIR 和 GMAP 滤除地表杂波效果

Table 1 The filtering effect of IIR and GMAP methods

入射角/影响高度	抑制方法	Z/0 km (抑制前后)	V/0 km (抑制前后)	Z/1 km (抑制前后)	V/1 km (抑制前后)
$0^\circ/0.3$ Km	IIR	78.5/50.3 dBZ	1.2/4.1 m/s	40.2/40.2 dBZ	9.2/9.2 m/s
	GMAP	78.5/50.6 dBZ	1.2/3.9 m/s	40.2/40.2 dBZ	9.2/9.2 m/s
$8^\circ/1.7$ Km	IIR	69.4/51.8 dBZ	1.9/4.3 m/s	58.8/40.7 dBZ	1.3/7.9 m/s
	GMAP	69.4/43.2 dBZ	1.9/5.0 m/s	58.8/40.5 dBZ	1.3/8.2 m/s
$14^\circ/2.9$ Km	IIR	65.2/41.5 dBZ	2.5/6.2 m/s	55.3/40.3 dBZ	1.5/6.8 m/s
	GMAP	65.2/39.5 dBZ	2.5/6.5 m/s	55.3/39.8 dBZ	1.5/7.3 m/s

时,地表杂波和降雨回波几乎可以从距离库进行区分,两者在速度上有着明显的区别且混叠现象也并不严重,故 IIR 和 GMAP 均能较好的对地表杂波进行处理. 当 0° 、 8° 和 14° 时,地杂波抑制前的回波强度在 0 km 附近分别为 78.5 dBZ、69.4 dBZ 和 65.2 dBZ 呈下降变化的趋势且速度逐渐增大. 究其原因因为地表的后向散射截面随电磁波入射角的增大而减小,从而造成地表杂波谱在速度的谱估计中权重的下降,故会出现强度下降而速度抬升的现象. 除此之外,随高度的增加,地表杂波的影响程度在减小,故在同一水平距离处地杂波抑制前的回波强度呈减小趋势. 对于非垂直观测时, IIR 和 GMAP 滤波效果的不同,原因可能为 IIR 椭圆滤波器虽然具有设计简单的优势,但在零多普勒频率附件其衰减度不够且过渡带较长,可能无法将强的地表杂波滤除干净. 此外,由于缺乏修正滤波器偏差的措施,只是单纯的去除了地表杂波和天气目标混叠区域内的强地表杂波,对同时滤除的降雨回波没有进行重建,故其引入的误差较大. 而在频域针对功率谱处理的 GMAP 方法改善了时域 IIR 在滤除地杂波过程中对降雨回波功率的损失,在滤除地杂波的同时对损失的天气目标的功率进行了一定的修正. 故总体而言, IIR 的杂波抑制性能在非星下点观测时不如 GMAP. 然 GMAP 处理比于 IIR 设计较为繁杂,在卫星上现时对信号处理器的实时运算速度要求较高.

为了更直观地体现地表杂波抑制的效果,还需对反射率因子和速度的回波图进行对比分析. 取入射角为 8° , NIS-PR 模拟的反射率因子和速度雷达回波图如图 8 所示. 从图 8 中反射率因子和速度图可以看出,在螺旋扫描模式下,当入射角为 8° 时,地表杂波影响的高度维持在约 1.8 km 的水平高度,这与地表杂波影响的理论高度 ($12 * \sin 8^\circ$) 一致. 此外, 1.8 km 内天气目标的反射率因子和速度信息受到地表杂波的严重“污染”,且地表杂波影响程度随高度增加而减弱,这一特征具体体现在雷达图中大片

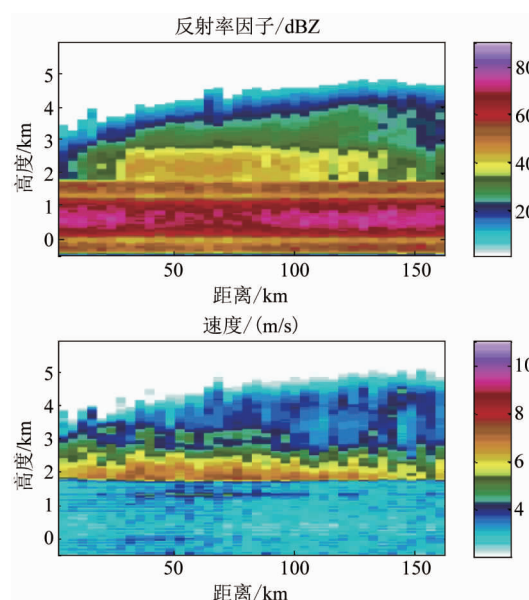


图 8 滤波前的回波图
Fig. 8 Echo images before GMAP filtering

高反射率和低速度区回波的特征,天气目标几乎被完全淹没,这一特征也与理论分析一致. 而在经过 GMAP 方法的地表杂波抑制处理后,其回波图中的高反射率因子和低速度区在滤除的同时,天气目标的特征得到一定程度的恢复,如图 9 所示. 将图 9 与图 4 的 APR-2 实测回波图进行对比分析,虽然两者的分辨率不一致,但是从天气回波的反射率因子及速度分布特征而言,滤除地表杂波后的回波图能够较好完整的体现天气目标的信息.

为进一步检验 GMAP 方法的抑制效果,现选择了 NIS-PR 模拟的三个时间段的中雨及小雨强度的降雨数据进行分析,其抑制效果如表 2 所示.

从表 2 中可知,对于 NIS-PR 模拟的弱风条件下的海面上中雨或小雨等强度的降雨过程, GMAP 方法的地表杂波抑制效果良好. 由于 IIR 椭圆滤波器法和 GMAP 法在贴近地表附近具有相似的地表杂波抑制能力且 IIR 滤波法的运算量小,故在 NIS-PR 对地表杂波进行抑制时,可以采用这两种滤波法相

表 2 降雨过程的地表杂波抑制效果
Table 2 The filtering effect of precipitation

编号	个例日期/时间	降雨强度	入射角	地杂波影响范围的库数	抑制的地杂波库数	成功率	地杂波平均抑制比
1	2003.01.19/04:04	中雨	8°	853	742	87.1%	31.1 dB
			14°	1939	1667	85.9%	23.7 dB
2	2003.01.23/08:59	中雨	8°	935	804	86.1%	31.7 dB
			14°	2098	1853	88.3%	21.9 dB
3	2003.01.27/03:16	小雨	8°	609	527	86.5%	39.4 dB
			14°	1323	1176	88.9%	29.2 dB

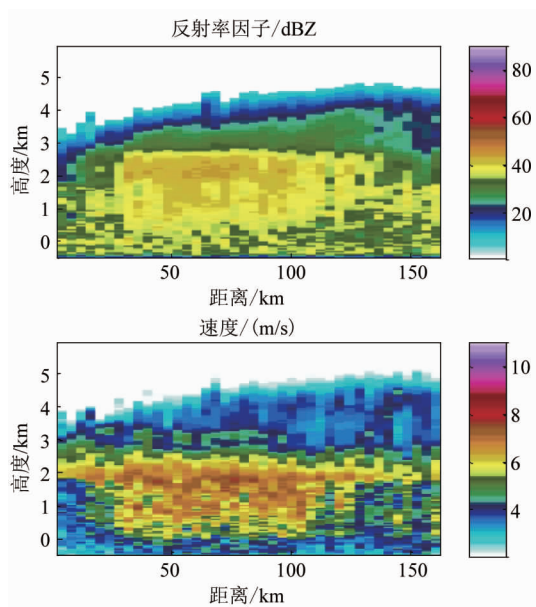


图9 滤波后的回波图

Fig. 9 Echo images after GMAP filtering

结合的方式.

5 结论

本文针对 NIS-PR 这一概念性雷达进行数据模拟并对地表杂波抑制进行了研究. 利用地球同步轨道星载毫米波降雨雷达的技术参数和 APR-2 机载所测的数据, 考虑各自雷达的目标分辨率体积以及 NIS-PR 的天线增益和距离加权等因素, 对地球同步轨道星载毫米波降雨雷达在弱风条件下海面上空的探测数据进行了模拟, 模拟结果表明弱风条件下海面杂波对贴近海面附近气象目标的影响范围随入射角的增大而增大且强度呈下降趋势. 针对受影响的气象目标, 通过 IIR 和 GMAP 方法对海面杂波进行抑制处理并对两者抑制的效果进行了对比分析. 结果表明在非星下点观测时, GMAP 方法比 IIR 法表现出更好的地表杂波抑制能力. 最后将 GMAP 方法运用在海面不同强度的降雨过程中, 对不同入射角的抑制效果进行了统计分析. 结果表明, 对在弱风条件下受海面杂波影响的中雨及小雨天气过程, GMAP 方法能够较好的抑制海面杂波. 基于 IIR 和

GMAP 方法在近地表具有相当的抑制能力且 IIR 运算量小的原因, 在 NIS-PR 地表杂波抑制处理时, 可以采用两种方法相结合的方式.

References

- [1] Huang P, Xie S P, Hu K, *et al.* Patterns of the seasonal response of tropical rainfall to global warming [J]. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(5):357-361.
- [2] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, *et al.* The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, **15**(3):809-817.
- [3] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, *et al.* The global precipitation measurement mission [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, **95**(5):701-722.
- [4] Tagawa T, Okamoto K. Suppression of surface clutter interference with precipitation measurement from space by the dual frequency precipitation radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**:1324-1331.
- [5] Durden S L, Tanelli S. Application of clutter suppression methods to a geostationary weather radar concept [J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, **8**:115-124.
- [6] Tanelli S, Im E, Durden S L, *et al.* The effects of nonuniform beam filling on vertical rainfall velocity measurements with a spaceborne Doppler radar [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2002, **19**(7):1019-1034.
- [7] Lewis W E, Im E, Tanelli S, *et al.* Geostationary Doppler radar and tropical cyclone surveillance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, **28**:1185-1191.
- [8] Soop E M. *Geostationary orbit manual* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (索普. 地球静止轨道手册. 北京: 国防工业出版社), 1999.
- [9] Hanado H, Ihara T. Evaluation of surface clutter for the design of the TRMM spaceborne radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992, **30**:444-453.
- [10] Wu Z S, Zhang J P, Guo L X, *et al.* An improved two-scale model with volume scattering for the dynamic ocean surface [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, **89**(4):39-56.
- [11] Amayenc P, Testud J, Marzoug M. Proposal for a spaceborne dual-beam rain radar with Doppler capability [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2009, **10**(3):262-276.
- [12] Sy O O, Tanelli S, Takahashi N, *et al.* Simulation of EarthCARE spaceborne Doppler radar products using ground-based and airborne data: effects of aliasing and nonuniform beam-filling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, **52**(2):1463-1479.
- [13] Meneghini R, Kozu T. *Spaceborne weather radar* [M]. Artech House Publishers, 1990.