

## 基于北斗信号的降雨信息监测方法\*

安豪<sup>1,2,3</sup>, 严卫<sup>4</sup>, 卞双双<sup>3</sup>, 邓志武<sup>3</sup>, 张义生<sup>3</sup>

(1. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;  
3. 北京应用气象研究所, 北京 100029; 4. 国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101)

**摘要:**为充分挖掘北斗信号大数据资源的应用价值,拓展其在大气海洋领域的应用方向,重点从理论上研究了利用北斗信号的极化相移监测降雨信息问题。结合北斗信号的频率和极化特征,从极化相移的定义出发,分析了北斗信号经过雨区和降雨粒子相互作用的微物理过程,建立了极化相移与降雨强度之间的数学模型;利用数值模拟方法对该数学模型进行分析得出,北斗信号极化相移对降雨强度具有敏感性,这说明了北斗信号监测降雨强度的可行性;还系统研究了雨滴谱分布、雨区路径长度和卫星仰角等关键因素对极化相移的影响,为后续开展实验验证提出了合理化建议。

**关键词:**北斗信号;极化相移;降雨强度;非球形雨滴

**中图分类号:**P228.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2021)02-047-07

## Method to monitor rainfall information based on BeiDou signal

AN Hao<sup>1,2,3</sup>, YAN Wei<sup>4</sup>, BIAN Shuangshuang<sup>3</sup>, DENG Zhiwu<sup>3</sup>, ZHANG Yisheng<sup>3</sup>

(1. Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Changsha 410073, China;

3. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China;

4. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China)

**Abstract:** To fully make use of the value of BeiDou signals big data resources and expand its applications in atmospheric and oceanic fields, a method to monitor rainfall information using polarimetric phase shift of BeiDou signals was studied theoretically. Based on the frequency and polarization characteristics of BeiDou signals, the microphysical process of BeiDou signals passing through rain area and interacting with raindrops was analyzed; from the definition of polarimetric phase shift, the mathematical model between polarimetric phase shift and rainfall intensity was established and analyzed by numerical simulation method. It is concluded that the polarimetric phase shift of BeiDou signals is sensitive to rainfall intensity, which illustrates the feasibility of monitoring rainfall intensity by BeiDou signals. The influence of some key factors such as raindrop size distribution, path length of rain area and elevation angle of satellite on polarimetric phase shift is systematically studied, and reasonable suggestions are put forward for subsequent experimental verification.

**Keywords:** BeiDou signals; polarimetric phase shift; rainfall intensity; nonspherical raindrops

近年来,包括美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧盟的GALILEO以及中国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation Satellite system, BDS)在内的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)蓬勃发展,技术日益成熟。随着2019年9月23日“北斗三号”第22、23颗全球组网卫星的发射,中国已成功将52颗北斗导航卫星发射升空,距离建设属于中国自主的全球导航卫星系统又近了一步。

GNSS系统的建设和发展提供了覆盖全球、

源源不断的L波段GNSS信号资源,充分挖掘GNSS大数据价值的非导航应用得到了广泛关注<sup>[1-2]</sup>。国内外许多科学家对GNSS大气海洋遥感应用展开了诸多研究,主要将干扰导航定位精度的大气延迟、地表反射等误差源,作为遥感探测的信号源,借此反演大气海洋环境要素,比如:电离层电子密度、温湿廓线、大气可降水量、海面风场、海面高度、积雪深度、海冰厚度等信息,逐渐形成了GNSS气象学、GNSS-R(GNSS-reflectometry)技术以及GNSS-RO(GNSS-radio occultation)技术。

\* 收稿日期:2019-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41805026,41505016);地理信息工程国家重点实验室自主研究资助项目(SKLGIE2019-ZZ-2)

作者简介:安豪(1990—),男,河南泌阳人,工程师,博士,E-mail:qingdaodaxueanahao@163.com;

严卫(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:yanwei17@nudt.edu.cn

由于 GNSS 信号源极其丰富、L 波段可实现全天候等特点,这些技术已经成为传统大气海洋环境要素获取手段十分有益的补充,有些甚至已实现业务化应用<sup>[3-7]</sup>。这些研究成功证明了其在大气海洋环境遥感方面的应用价值和前景。

作为一种新兴技术,利用 GNSS 信号探测大气海洋环境要素具有以下特点:信号源丰富、无源探测、成本低、体积小、利于机动观测、隐蔽性好<sup>[8]</sup>。正因为 GNSS 技术具备这些独特的优点,科学家们试图继续挖掘 GNSS 信号在遥感领域的其他应用,2010 年,西班牙研究人员 Cardellach 等探索了 GNSS 信号的新应用方向,提出了利用低轨卫星接收到的 GNSS 极化信号探测强降雨的概念和星载验证实验方案<sup>[9]</sup>;后续在 Radio-Occlusion and Heavy Precipitation with PAZ 项目的支持下,计划发射带有极化 GNSS 掩星接收机的西班牙地球观测极轨卫星 PAZ<sup>[10]</sup>。这一研究概念与近年来兴起的利用通信链路雨衰特性进行降雨强度的观测类似,不同点在于该技术针对雨致极化特性进行研究,更重要的是其优势在于极其丰富的全天候 GNSS 信号源,使得链路上降雨信息获取方式更加灵活。

Cardellach 等通过梳理 42 万多条 COSMIC 掩星廓线以及对应的 TRMM 卫星降雨强度数据发现,掩星观测的极化相移数据与强降雨有极好的相关性<sup>[10]</sup>。随后,该团队开展地基实验,验证了该思路的可行性<sup>[11]</sup>,还研究了基于 GNSS 极化信号反演降雨强度的算法<sup>[12]</sup>。另外,搭载极化 GNSS 掩星接收机的 PAZ 卫星于 2018 年 2 月发射,并收集了大量的极化掩星数据,研究结果初步说明了所得极化相移廓线与降雨区域垂直结构的一致性<sup>[13]</sup>。

国内主要是国防科技大学气象海洋学院的团队先后开展了基于 GPS 信号的机理研究、理论研究<sup>[14-15]</sup>,以及两次地基验证实验和数据处理方法研究<sup>[16]</sup>。综上,国内外主要基于 GPS 信号开展相关研究,而没有对中国自主导航卫星系统的北斗信号进行研究。本文考虑结合北斗信号的特点,重点开展利用该信号的极化特征提取降雨信息的方法研究,为拓展北斗系统的应用、深度挖掘其价值提供重要思路。

## 1 北斗信号监测降雨机理与正演模型

### 1.1 北斗信号基本特征

全球导航卫星系统是所有在轨工作的卫星导航系统的总称。目前,主要包括美国的 GPS、俄罗

斯的 GLONASS、欧盟的 GALILEO 和中国的 BDS 等四大全球性导航卫星系统,也包括印度的区域导航卫星系统 (Indian Regional Navigation Satellite System, IRNSS) 和日本的准天顶系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS) 等区域导航卫星系统。不同导航卫星系统的载波频率如表 1 所示<sup>[16-21]</sup>。

表 1 不同 GNSS 卫星载波频率

导航系统	中心频率/MHz
GPS	1 575.42 (L1)、1 227.60 (L2)、1 176.45 (L5)
GLONASS	1 602.0 (L1)、1 246.0 (L2)
GALILEO	1 575.42 (E1)、1 191.795 (E5)、1 278.75 (E6)
BDS	1 561.10 (B1)、1 268.52 (B3)、1 207.14 (B2)
IRNSS	1 176.45 (L5)、2 492.028 (S)
QZSS	1 575.42 (L1C)、1 227.60 (L2)、1 176.45 (L5)

由表 1 可见,导航卫星系统的载波频率主要集中在 L 波段,北斗信号有三个载波频率,且均处于 L 波段。另外,北斗所有卫星发射的信号都是右旋圆极化信号。北斗信号对降雨强度的敏感性如何,需要建立理论模型进行分析研究。

### 1.2 机理分析

#### 1.2.1 雨滴形状模型

北斗信号在穿过降雨区域过程中,受到降水粒子的影响,其极化特征会发生变化。本质是由雨滴的非球形造成的。实际中,半径较小的雨滴近似为球形,但是当雨滴半径逐渐变大时,会受到空气阻力和外力扰动等因素的影响进而表现为非球形;当雨滴半径较大时,下降过程中容易发生破碎,变成不同形状和大小的雨滴<sup>[16,22]</sup>。随着技术的发展,利用高速摄像机、以 OTT 雨滴谱仪为代表的光学雨滴谱仪、以 2DVD 为代表的高速线阵扫描雨滴谱仪等多种手段可以直观地获得雨滴的形状结构<sup>[16]</sup>。图 1 显示的是实验得到的雨滴形状<sup>[23]</sup>。

由于雨滴模型的数学描述比较复杂,通常将雨滴近似为扁平的椭球体,把雨滴的短长轴比值作为雨滴形状的参数进行计算。Thurai 等<sup>[24]</sup>开展实验,利用 2DVD 雨滴谱仪对从 80 m 高度降落的人工降雨进行观测,得出雨滴形状的非线性方程(简称 Thurai 模型),即

$$\frac{b}{a} = 1.065 - 6.25 \times 10^{-2} D_{\text{eq}} - 3.99 \times 10^{-3} D_{\text{eq}}^2 + 7.66 \times 10^{-4} D_{\text{eq}}^3 - 4.095 \times 10^{-5} D_{\text{eq}}^4 \quad (1)$$

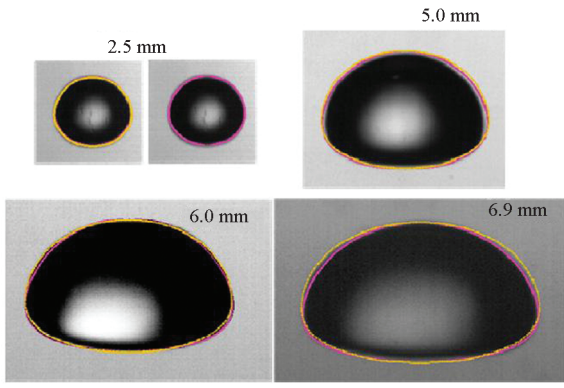
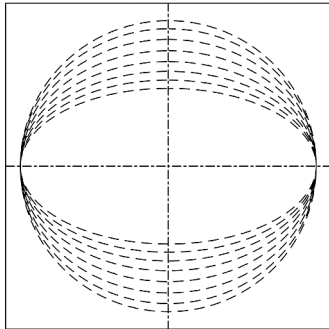


图1 实验中得到的雨滴实际形状

Fig.1 Realistic shapes of raindrops from experiments

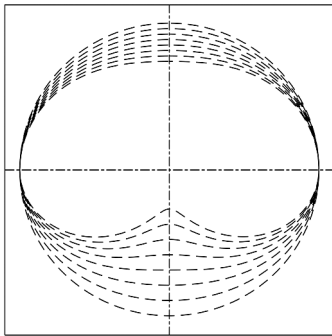
其中,  $D_{eq} = 2r_0$ ,  $r_0$  ( $0.75 \text{ mm} \leq r_0 \leq 4.5 \text{ mm}$ ) 为雨滴等效半径。

图2(a)和图2(b)分别显示的是根据式(1)和MPP(modified Pruppacher-and-Pitter model)模型计算的不同半径时归一化雨滴形状近似模型。图中归一化的雨滴半径大小分别为0.5 cm、1 cm、1.5 cm、2 cm、2.5 cm、3 cm、3.5 cm、4 cm,其中最外圈的半径最小(0.5 cm),最内圈的半径最大(4 cm);MPP模型是根据实际雨滴的非球形



(a) Thurai 模型

(a) Thurai model



(b) MPP 模型

(b) MPP model

图2 两种模型的归一化雨滴形状比较

Fig.2 Normalized oblate spheroid raindrop shapes comparison of two different model

形状总结出来的<sup>[25]</sup>,用于描述复杂的雨滴形状。由图2可见,两种模型的雨滴半径较小时,都近似为球形;而随着雨滴半径的增大,雨滴逐渐表现出非球形。Thurai模型和MPP模型结果非常接近,可用于雨滴和北斗信号相互作用的散射计算。

### 1.2.2 正演模型构建

由于非球形雨滴的存在,北斗信号在穿过雨区过程中产生了极化相移信息。极化相移,是指极化波的水平极化和垂直极化分量的相位差<sup>[10]</sup>,单位为m。极化相移可表示为

$$\Delta\phi = \phi_h - \phi_v \quad (2)$$

极化相移可通过下式计算:

$$\Delta\phi = \int_L K_{DP} dl \quad (3)$$

其中: $L$ 为雨区路径长度(单位为km); $K_{DP}$ 为差分传播相移常数,可由下式得到:

$$K_{DP} = \frac{1}{k} (1 - 2\sigma_\theta^2) (k_h - k_v) \quad (4)$$

其中: $\sigma_\theta$ 是雨滴倾角分布的标准差; $k_h$ 和 $k_v$ 分别为水平和垂直方向的传播常数,可表示为<sup>[12]</sup>

$$k_{h,v} = \frac{2\pi}{k} \int_{f_{h,v}(r_{eq}, 0)} n(r_{eq}) dr_{eq} \quad (5)$$

式中, $k$ 为自由空间传播常数( $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ 为波长), $n(r_{eq})$ 为雨滴谱分布, $f_h$ 和 $f_v$ 分别为单一雨滴的水平方向和垂直方向的前向散射振幅,结合雨滴的形状模型(见式(1)),可由Rayleigh散射近似法<sup>[26]</sup>或T-matrix法<sup>[27]</sup>进行计算。

由于雨滴谱分布和降雨强度有对应关系,比如由MP雨滴谱模型<sup>[28]</sup>可知,雨滴谱分布和降雨强度有经验关系,进而通过式(3)、式(4)、式(5)建立起极化相移与降雨强度的数学关系模型,即 $\Delta\phi - R$ 关系模型。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 数值模拟的参数选取

根据已建立的极化相移和降雨强度的关系模型,采用数值模拟方法,开展基于北斗三个频率信号极化相移监测降雨强度的可行性研究。

北斗卫星仰角选为 $0^\circ$ ,因为此时的极化相移最严重。在北斗信号与降雨介质相互作用过程中,雨滴谱、雨滴倾角、粒子散射算法等都是需要考虑的因素<sup>[16]</sup>。由 $\Delta\phi - R$ 关系模型知,降雨强度反演需要极化相移和降雨强度之间建立数学关系。雨滴倾角分布选择应用较为广泛的高斯分布模型<sup>[26]</sup>;利用 $20^\circ\text{C}$ 情况下的Ray公式得到水的复介电常数<sup>[29]</sup>;北斗信号的波长远大于雨滴半

径,故采用 Rayleigh 散射近似方法计算非球形雨滴的散射<sup>[15]</sup>。

由于 Gamma 分布被广泛接受并被许多雷达气象专家和其他研究人员用于模拟自然雨滴大小分布,这里考虑选取该雨滴谱分布模型。其典型参数<sup>[30]</sup>为  $N_0 = 39\ 600R^{-0.384}$ ,  $\mu = 2.93$ ,  $\Lambda = 10.76R^{-0.186}$ 。

### 2.2 极化相移随降雨强度变化分析

图 3 显示了在雨区路径长度为 20 km、北斗卫星仰角为 0°、雨滴倾角分布的均值为 0°、标准差为 0° 时,北斗信号极化相移随降雨强度的变化情况。由图 3 可见,当降雨强度为 0 时,对于 B1、B2、B3 频率信号而言,都没有产生极化相移,符合实际情况;随着降雨强度从 0 增大到 150 mm/h 的过程中,北斗信号的极化相移逐渐增大。这是由于随着降雨强度的增大,半径较大的非球形雨滴的数目增多,从而引起较大的极化相移。当降雨强度增至 150 mm/h 时,B1 频率的极化相移值达到 30.9 mm。另外,在不同的信号频率时,极化相移随降雨强度的变化趋势基本一致;且频率较高的 B1 频率的极化相移值较大,这和 GPS 系统的情况类似<sup>[16]</sup>。由图 3 可得,极化相移对降雨强度较为敏感,且  $\Delta\phi - R$  关系具有用于监测降雨强度的可行性。

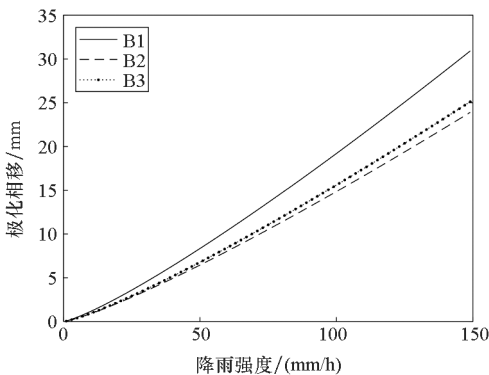


图 3 北斗信号的极化相移随降雨强度变化情况

Fig. 3 Results of polarimetric phase shift versus rain rate of BeiDou signals

考虑到北斗信号接收机的性能和极化相移的可探测性,在 B2 或 B3 频率、降雨强度较小的条件下,极化相移被探测的可能性低一些。因此,建议采取 B1 频率,并在较强降雨条件下测量极化相移的值。

### 2.3 影响因素分析

#### 2.3.1 雨滴谱参数的影响分析

图 3 采用的是雨滴谱分布经验公式,其参数是固定的,且和降雨强度有关。下面考虑采用

不同参数的模拟雨滴谱进行仿真研究。众多研究表明,Gamma 分布在小雨滴和大雨滴的分布模拟上要比其他分布精确,且 Gamma 分布广泛应用于气象雷达领域,故选用三参数的 Gamma 分布进行研究。由于实际雨滴谱变化很大,假定用 Gamma 分布三个参数  $N_0, \mu, \Lambda$  的范围来模拟雨滴谱。综合前人研究,Gamma 分布的参数范围可设定<sup>[16,31-37]</sup>为

$$300 < N_0 < 30\ 000 \tag{6}$$

$$-3 < \mu < 10 \tag{7}$$

$$3 \leq \Lambda \leq 12 \tag{8}$$

其中,限制条件为  $R \leq 150$  mm/h。

对于 Gamma 分布,降雨强度  $R$  可从以下公式得到:

$$R = 6 \times 10^{-4} \pi \int N(D) V_{\infty}(D) D^3 dD \tag{9}$$

其中: $N$  是雨滴谱分布; $D$  是雨滴直径; $V_{\infty}(D)$  为雨滴的下落末速度,单位为 m/s。这里选用应用广泛的 Gunn 和 Kinzer 提出的经验公式进行研究<sup>[38]</sup>:

$$V_{\infty}(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D) \tag{10}$$

该仿真研究,以 B1 频率为例,利用 Rayleigh 散射近似方法进行计算。

图 4 显示的是基于模拟雨滴谱条件下, B1 频率信号极化相移随降雨强度的变化。由图 4 可见,总体而言,极化相移随着降雨强度的增加呈上升趋势。在此条件下,极化相移的值可达 30 mm。可见,雨滴谱的变化可引起极化相移的差异。因此,在实验中,获取局地雨滴谱先验信息至关重要。

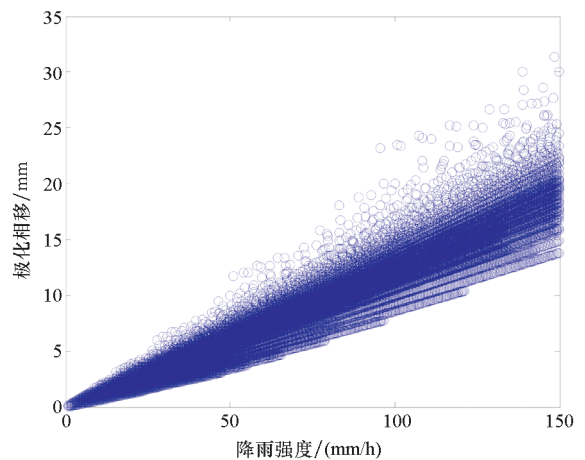


图 4 模拟雨滴谱时,B1 频率信号极化相移随降雨强度的变化

Fig. 4 Results of polarimetric phase shift versus rain rate at B1 frequency of BeiDou signals based on simulated raindrop size distribution

#### 2.3.2 雨区路径长度的影响分析

由式(3)可见,雨区路径长度是计算极化相

移的一个重要参数。这里选用不同的雨区路径长度,并假定该降雨的结构均一。散射算法采用 Rayleigh 散射近似法,雨滴谱利用较为广泛的 Gamma 分布经验公式。图 5 显示的是不同降雨强度时,B1 频率信号极化相移随雨区路径长度的变化情况。由图 5 可见,极化相移随着雨区路径长度的增加而增大;雨区路径长度对极化相移值的影响较大,在降雨强度达到 50 mm/h 时,60 km 的雨区路径长度可引起超过 25 mm 的相移。借鉴 GNSS 地基掩星技术,对于接收机而言,若要获得较大的极化相移,较长的雨区路径长度可满足这一要求,而较长的雨区路径长度则需要在较低卫星仰角下获得。相反,卫星在高仰角时,信号穿过的雨区路径较短,极化相移较小,对于 GPS 卫星也是如此<sup>[16]</sup>。因此,在实验中不建议接收高仰角卫星信号进行降雨监测。

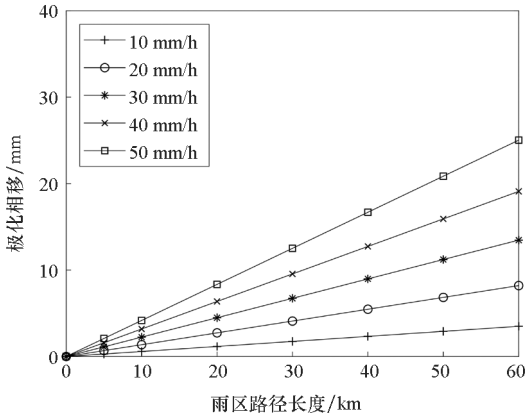


图 5 不同降雨强度时,B1 频率信号极化相移随雨区路径长度的变化情况

Fig. 5 Results of polarimetric phase shift versus rain path length at B1 frequency of BeiDou signals under different rain rates

### 2.3.3 卫星仰角的影响分析

在散射计算中,卫星仰角也是一个输入因素。因此,有必要对卫星仰角的影响进行分析。卫星仰角假定为  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$  和  $80^\circ$ ,其他假定不变。在不同降雨强度条件下,B1 频率信号的极化相移随卫星仰角的变化情况如图 6 所示。

由图 6 可见,随着卫星仰角的增大,极化相移逐渐变小;卫星仰角较大时,不同降雨强度的极化相移相差不大,当其达到  $80^\circ$  时,极化相移几乎一致。由图 6 得出,卫星仰角的影响较大,在实验中是至关重要的因素。为获得较大的极化相移,低仰角甚至  $0^\circ$  仰角是较优的实验条件。

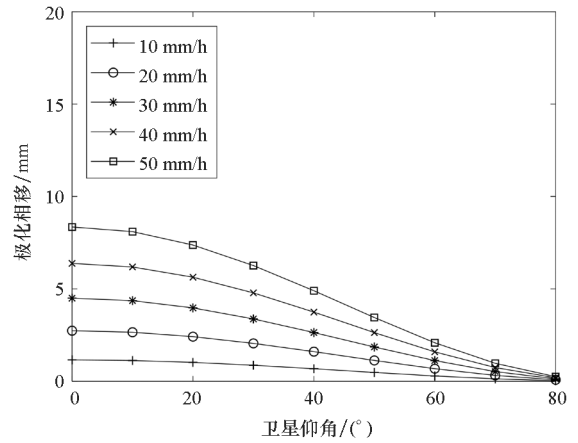


图 6 不同降雨强度时,B1 频率信号极化相移随卫星仰角的变化情况

Fig. 6 Results of polarimetric phase shift versus elevation angle at B1 frequency of BeiDou signals under different rain rates

## 3 结论

本文针对北斗信号特征,从极化相移的定义出发,根据信号穿过雨区的过程,结合实际雨滴形状,分析北斗信号入射到非球形雨滴的微物理过程,建立了极化相移与降雨强度的  $\Delta\phi - R$  关系模型,即正演模型;然后,通过数值模拟,分析了北斗信号反演降雨强度的可行性,并系统研究了雨滴谱分布、雨区路径长度和卫星仰角等因素对  $\Delta\phi - R$  关系的影响,为后续充分发挥北斗卫星导航系统的应用价值奠定了技术基础。所得主要结论如下:

1) 利用北斗信号极化相移监测降雨强度信息具有可行性。

2) 雨滴谱分布、雨区路径长度和卫星仰角是影响极化相移大小的重要因素。在未来的实验验证中,建议获取精确的局地雨滴谱分布特征,并在低仰角条件甚至  $0^\circ$  仰角下对北斗信号进行连续观测。

## 参考文献 (References)

- [1] JIN S G, CARDELLACH E, XIE F Q. GNSS remote sensing: theory, methods and applications[M]. Germany: Springer, 2014.
- [2] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787 - 15801.
- [3] ARMATYS M, KOMJATHY A, AXELRAD P, et al. A comparison of GPS and scatterometer sensing of ocean wind speed and direction[C]// Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) IEEE International,

- 2000: 2861 – 2863.
- [4] HU X, WU X C, GONG X Y, et al. An introduction of mountain-based GPS radio occultation experiments in China[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(10): 1723 – 1729.
- [5] 罗佳, 王涵, 徐晓华. 2014—2016 年 FY-3C 与 COSMIC 掩星电离层特征参数的比较[J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(4): 181 – 186.  
LUO Jia, WANG Han, XU Xiaohua. Comparison of ionospheric characteristic parameters retrieved from FY-3C and COSMIC radio occultation during 2014 to 2016[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(4): 181 – 186. (in Chinese)
- [6] 徐晓华, 刘宏康, 罗佳. 香港地区 2013—2016 年地基 GPS 大气可降水量与实际降雨量的比较[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(5): 14 – 20, 44.  
XU Xiaohua, LIU Hongkang, LUO Jia. Comparison between GPS derived precipitable water vapor and rainfall during 2013 to 2016 over Hong Kong[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(5): 14 – 20, 44. (in Chinese)
- [7] SUN Y Q, BAI W H, LIU C L, et al. The FengYun-3C radio occultation sounder GNOS: a review of the mission and its early results and science applications[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11: 5797 – 5811.
- [8] 王波. 基于雷达杂波和 GNSS 的大气波导反演方法与实验[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.  
WANG Bo. Method and experiment of atmospheric ducts estimation using radar clutter and GNSS[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [9] CARDELLACH E, RIUS A, CERESO F, et al. Polarimetric GNSS radio-occultations for heavy rain detection [C]// *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010: 3841 – 3844.
- [10] CARDELLACH E, TOMÁS S, OLIVERAS S, et al. Sensitivity of PAZ LEO polarimetric GNSS radio-occultation experiment to precipitation events[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 53(1): 190 – 206.
- [11] PADULLÉS R P, CARDELLACH E, DE LA TORRE J M, et al. Atmospheric polarimetric effects on GNSS radio occultations: the ROHP-PAZ field campaign [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(2): 635 – 649.
- [12] CARDELLACH E, PADULLÉS R, TOMÁS S, et al. Probability of intense precipitation from polarimetric GNSS radio occultation observations[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 144: 206 – 220.
- [13] CARDELLACH E, OLIVERAS S, RIUS A, et al. Sensing heavy precipitation with GNSS polarimetric radio occultations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019: 46.
- [14] YAN W, AN H, FU Y, et al. A method for estimating rain rate from polarimetric GNSS measurements: preliminary analysis[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 149: 70 – 76.
- [15] AN H, YAN W, HUANG Y X, et al. GNSS measurement of rain rate by polarimetric phase shift: theoretical analysis[J]. *Atmosphere*, 2016, 7: 101.
- [16] 安豪. 全球导航卫星信号极化相移监测降雨强度技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.  
AN Hao. Research on monitoring rain rate using polarimetric phase shift of GNSS signals [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. *测绘学报*, 2010, 39(1): 1 – 6.  
YANG Yuanxi. Progress, contribution and challenges of COMPASS/BeiDou satellite navigation system [J]. *Acta Geodetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1 – 6. (in Chinese)
- [18] 邵佳妮, 冯炜, 申俊飞. QZSS 系统及其信号设计[J]. *测绘科学*, 2009, 34(S2): 225 – 227.  
SHAO Jiani, FENG Wei, SHEN Junfei. QZSS and signal design [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(S2): 225 – 227. (in Chinese)
- [19] 周蕊, 李洪, 王楚涵, 等. 全球导航卫星系统诱导式欺骗检测[J]. *国防科技大学学报*, 2019, 41(4): 129 – 135.  
ZHOU Meng, LI Hong, WANG Chuhan, et al. Induced spoofing detection of global navigation satellite system [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(4): 129 – 135. (in Chinese)
- [20] AN H, YAN W, BAI H, et al. Research on the retrieval of rain rate using polarimetric GNSS signals [C]// *Proceedings of the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, 2013: 440 – 443.
- [21] GAO G X, CHEN A, LO S, et al. COMPASS-M1 broadcast codes in E2, E5b, and E6 frequency bands [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(4): 599 – 612.
- [22] 刘磊, 李浩, 高太长. 雨滴的近似椭球模型及其近红外散射特性研究[J]. *气象科学*, 2008, 28(3): 271 – 275.  
LIU Lei, LI Hao, GAO Taichang. The approximate ellipsoid model for raindrop and its near-infrared scattering characteristics [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, 28(3): 271 – 275. (in Chinese)
- [23] BEARD K V, BRINGI V N, THURAI M. A new understanding of rain-drop shape[J]. *Atmospheric Research*, 2010, 97(4): 396 – 415.
- [24] THURAI M, HUANG G J, BRINGI V N, et al. Drop shapes, model comparisons, and calculations of polarimetric radar parameters in rain [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24(6): 1019 – 1032.
- [25] LI L W, KOOI P S, LEONG M S, et al. On the simplified expression of realistic raindrop shapes [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1994, 7(4): 201 – 205.
- [26] OGUCHI T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(9): 1029 – 1077.
- [27] MISHCHENKO M I, TRAVIS L. Capabilities and limitations of a current FORTRAN implementation of the T-matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatters [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1998, 60(3): 309 – 324.
- [28] MARSHALL J S, PALMER W M. The distribution of raindrops with size [J]. *Journal of Meteorology*, 1948, 5: 165 – 166.
- [29] RAY P S. Broadband complex refractive indices of ice and water [J]. *Applied Optics*, 1972, 11: 1836 – 1844.
- [30] ULBRICH C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop-size distribution [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1983, 22(10): 1764 – 1775.
- [31] GORGUCCI E, BALDINI L. An examination of the validity of the mean raindrop-shape model for dual-polarization radar

- rainfall retrievals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2752 - 2761.
- [32] CHANDRASEKAR V, BRINGI V N. Simulation of radar reflectivity and surface measurements of rainfall[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1987, 4(3): 464 - 478.
- [33] BRINGI V N, CHANDRASEKAR V, HUBBERT J, et al. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(2): 354 - 365.
- [34] BRINGI V N, HUANG G J, CHANDRASEKAR V, et al. A methodology for estimating the parameters of a gamma raindrop size distribution model from polarimetric radar data: application to a squall-line event from the TRMM/Brazil campaign [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 633 - 645.
- [35] GORGUCCI E, SCARCHILLI G, CHANDRASEKAR V. Specific differential phase estimation in the presence of nonuniform rainfall medium along the path [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(11): 1690 - 1697.
- [36] 冯雷, 陈宝君. 利用 PMS 的 GBPP - 100 型雨滴谱仪观测资料确定 Z - R 关系 [J]. 气象科学, 2009, 29(2): 2192 - 2198.
- FENG Lei, CHEN Baojun. The radar reflectivity-rainrate relationships as inferred from ground-based raindrop spectra observed by GBPP - 100 probe [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(2): 2192 - 2198. (in Chinese)
- [37] 濮江平, 张伟, 姜爱军, 等. 利用激光降水粒子谱仪研究雨滴谱分布特性 [J]. 气象科学, 2010, 30(5): 701 - 707.
- PU Jiangping, ZHANG Wei, JIANG Aijun, et al. Characteristics of Gamma raindrop size distribution based on the precipitation particle spectrometer [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(5): 701 - 707. (in Chinese)
- [38] GUNN R, KINZER G D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1949, 6: 243 - 248.