http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0080

# 地基北斗GEO卫星直反信号功率测量偏差分析

阮宏梁[1]，洪学宝[2,*]，王永宁[3]，汉牟田[4]，杨东凯[4]

(1. 金华职业技术学院 商学院，金华 321017；2. 北京航空航天大学 前沿科学技术创新研究院，北京 100191；3. 中国联合网络通信有限公司 金华市分公司，金华 321017；4. 北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191)

**摘 要**：针对接收天线方向性造成的北斗地球同步轨道（GEO）卫星直反信号功率测量偏差进行研究。给出地基场景下实际天线接收的直反信号及其功率表达式，讨论天线方向性造成的北斗GEO卫星直反信号功率测量相对偏差，设置具体观测场景进行仿真分析。理论与仿真结果表明：具体场景和时刻下的北斗GEO卫星直反信号功率测量偏差为固定偏差，由天线对干扰信号的抑制性能、天线架设高度和反射面介电常数共同决定；相对偏差的大小随着天线对干扰信号抑制性能的增强而减小，随着天线架设高度的变化在某一范围内波动，也会随着反射面介电常数的变化而变化。

**关 键 词**：全球导航卫星反射信号测量技术；北斗卫星导航系统；地球同步轨道卫星；功率测量偏差；天线方向性

**中图分类号**：V19; P237

**文献标志码**：A **文章编号**：1001-5965(2023)04-0825-07

全球导航卫星系统反射信号测量技术(global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)是当前机会信号遥感领域的研究热点之一[1-3]，中国自主建设运行的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satelite system, BDS)在该领域也得到了广泛应用[4-6]，特别是其独有的地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星因能够在地基场景下与观测设备形成持续稳定的几何关系而备受关注[7-9]。

在土壤湿度反演、海面溢油探测等GNSS-R功率测量应用中，通常利用反射信号功率或由直射信号功率归一化后的反射信号功率进行反射面特性的探测，因此，直反射信号功率测量的准确程度对反演结果准确度具有重要影响。在GNSS-R观测场景中，直射信号和反射信号同时存在，直射信号接收天线在接收直射信号的同时会接收到反射干扰信号，反射信号接收天线在接收反射信号的同时也会接收到直射干扰信号和交叉极化反射干扰信号。特别是在地基场景下，直射信号与反射信号之间的时间延迟和频率差别极小，无法通过空域滤波进行信号分离，这会造成直反信号功率测量偏差，最终影响地物参数反演性能。

对于天线方向性影响问题，国内外开展了一系列研究工作。Zavorotny等[10]推导了右旋圆极化(right hand circularly polarized, RHCP)天线接收的GNSS信号模型，建模过程中考虑了地面反射的RHCP多径信号影响，指出RHCP多径信号的存在会使得直射信号功率测量结果中存在偏差。文献[11-12]分别在利用机载数据进行GNSS-R土壤湿度反演过程中，采用低阶多项式拟合方法消除RHCP天线方向性造成的直射信号功率振荡偏差以提升土壤湿度反演精度。Alejandro[13]在GNSS-R陆地遥感应用研究中指出天线的交叉极化增益对

收稿日期：2022-02-18；录用日期：2022-09-18；网络出版时间：2022-11-08 10:43
网络出版地址：kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20221108.0853.001.html
基金项目：浙江省基础公益研究计划 (LGN19D040001)
*通信作者. E-mail：Joyce_hong2008@yeah.net

*引用格式：阮宏梁，洪学宝，王永宁，等. 地基北斗GEO卫星直反信号功率测量偏差分析[J]. 北京航空航天大学学报，2023，49(4)：825-831. RUAN H L，HONG X B，WANG Y N，et al. Power measurement deviations of direct and reflected signals from BDS GEO satellites in ground-based GNSS-R applications[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2023，49(4)：825-831 (in Chinese).*

信号功率测量有重要影响，Roussel等[14]在利用具有较强左旋圆极化(left hand circularly polarized, LHCP)旁瓣的RHCP天线进行GNSS信号采集时观测到了LHCP反射信号对RHCP天线接收信号功率的影响。洪学宝等[15-16]考虑天线主极化和交叉极化增益分布，建立了地基GNSS-R功率测量应用中RHCP和LHCP天线接收信号模型，分析了天线方向性造成的信号相关功率测量系统误差，明确了直反信号功率观测序列中均存在随着卫星高度角变化的趋势偏差和振荡偏差，进而提出基于最小二乘多项式拟合的直反信号相关功率振荡偏差修正方法以提升土壤湿度反演精度。但是，文献[10-16]均是针对非GEO卫星信号展开，地基观测中北斗GEO卫星高度角几乎不变，其直反信号功率测量偏差特点与其他类型卫星势必有所不同，现有研究对此的讨论尚不充分。

本文将以RHCP和LHCP天线组合为例，分析天线方向性造成的北斗GEO卫星直反信号测量偏差及不同因素对偏差大小的影响情况，为基于北斗GEO卫星信号的地基GNSS-R功率测量应用中的天线设计、天线架设方式选取、反演误差分析和偏差修正方法研究等提供一定的支撑。

## 1 实际接收信号功率表达

给定地基GNSS-R观测场景：RHCP天线最大增益方向指向天顶，LHCP天线最大增益方向指向天底，两天线相位中心连线与反射面垂直，距离反射面高度分别为$H_\mathrm{r}$和$H_\mathrm{l}$，北斗GEO卫星高度角为$\theta$。忽略噪声影响，$t$时刻RHCP天线和LHCP天线实际接收信号可表示为

$$\begin{cases} s_\mathrm{r}(t)=s_{\mathrm{r,R}}^{+}(t)+s_{\mathrm{r,R}}^{-}(t)+s_{\mathrm{r,L}}^{-}(t) \\ s_\mathrm{l}(t)=s_{\mathrm{l,L}}^{+}(t)+s_{\mathrm{l,R}}^{+}(t)+s_{\mathrm{l,R}}^{-}(t) \end{cases} \tag{1}$$

式中：$s$为信号；下标r和l分别表示RHCP天线和LHCP天线，R和L分别表示RHCP信号和LHCP信号；上标+和−分别表示信号由天线前向和后向入射。

假定反射面平整，式(1)中的各信号成分具有如下表达：

$$\begin{cases} s_{\mathrm{r,R}}^{+}(t)=\sqrt{P_0G_{\mathrm{r,R}}^{+}}E(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(2\pi f_0t+\varphi_0)} \\ s_{\mathrm{r,R}}^{-}(t)=\sqrt{P_0G_{\mathrm{r,R}}^{-}}|\Gamma_{\mathrm{RR}}|E(t-\tau_1)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}[2\pi f_0(t-\tau_1)+\varphi_0]} \\ s_{\mathrm{r,L}}^{-}(t)=\sqrt{P_0G_{\mathrm{r,L}}^{-}}|\Gamma_{\mathrm{RL}}|E(t-\tau_1)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}[2\pi f_0(t-\tau_1)+\varphi_0]} \\ s_{\mathrm{l,L}}^{+}(t)=\sqrt{P_0G_{\mathrm{l,L}}^{+}}|\Gamma_{\mathrm{RL}}|E(t-\tau_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}[2\pi f_0(t-\tau_2)+\varphi_0]} \\ s_{\mathrm{l,R}}^{+}(t)=\sqrt{P_0G_{\mathrm{l,R}}^{+}}|\Gamma_{\mathrm{RR}}|E(t-\tau_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}[2\pi f_0(t-\tau_2)+\varphi_0]} \\ s_{\mathrm{l,R}}^{-}(t)=\sqrt{P_0G_{\mathrm{l,R}}^{-}}E(t-\tau_3)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}[2\pi f_0(t-\tau_3)+\varphi_0]} \end{cases} \tag{2}$$

式中：$P_0$为单位增益RHCP天线接收的直射信号功率；$G$为接收天线增益；$\Gamma_{\mathrm{RR}}$和$\Gamma_{\mathrm{RL}}$分别为右旋圆极化入射时右旋圆极化出射和左旋圆极化出射的反射系数；$E$为调制有导航电文数据的伪码序列；$\tau_1=2H_\mathrm{r}\sin\theta/c$为RHCP天线接收的反射信号相对于RHCP天线接收的直射信号的时间延迟；$\tau_2=(H_\mathrm{r}+H_\mathrm{l})\sin\theta/c$为LHCP天线接收的反射信号相对于RHCP天线接收的直射信号的时间延迟；$\tau_3=(H_\mathrm{r}-H_\mathrm{l})\sin\theta/c$为LHCP天线接收的直射信号相对于RHCP天线接收的直射信号的时间延迟；$c$为电磁波传播速度；$f_0$和$\varphi_0$分别为载波频率和载波初相。

反射系数为反射面介电常数$\varepsilon$和卫星高度角$\theta$的函数[17]：

$$\begin{cases} \Gamma_{\mathrm{RR}}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\varepsilon\sin\theta-\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}{\varepsilon\sin\theta+\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}+\dfrac{\sin\theta-\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}{\sin\theta+\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}\right) \\ \Gamma_{\mathrm{RL}}=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\varepsilon\sin\theta-\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}{\varepsilon\sin\theta+\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}-\dfrac{\sin\theta-\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}{\sin\theta+\sqrt{\varepsilon-\cos^2\theta}}\right) \end{cases} \tag{3}$$

GNSS-R技术通常采用直射信号闭环同步辅助反射信号开环同步的方式对两天线接收信号进行协同处理。对于地基功率测量应用，两信号处理过程的数学表达为[18]

$$\begin{cases} P_\mathrm{r}(n)=\dfrac{1}{M}\displaystyle\sum_{i=1}^{M}\left|\dfrac{1}{T}\int_{t_0+(n-1)MT+(i-1)T}^{t_0+(n-1)MT+iT}s_\mathrm{r}(t)a(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(2\pi ft+\varphi)}\mathrm{d}t\right|^2 \\ P_\mathrm{l}(n)=\dfrac{1}{M}\displaystyle\sum_{i=1}^{M}\left|\dfrac{1}{T}\int_{t_0+(n-1)MT+(i-1)T}^{t_0+(n-1)MT+iT}s_\mathrm{l}(t)a(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}(2\pi ft+\varphi)}\mathrm{d}t\right|^2 \end{cases} \tag{4}$$

式中：$P$为接收信号功率；$t_0$为相干积分起始时刻；$T$为相干积分时长；$M$为非相干累加次数；$a$为本地伪码序列；$f$和$\varphi$分别为本地载波的频率和相位。

在天线高度较低的情况下，各信号时间延迟$\tau_i,i=1,2,3$造成的数据位翻转和伪码自相关值变化对信号功率测量的影响可以忽略。进一步假定RHCP天线接收到的直射信号完全同步，相干积分和非相干累加期间各信号幅度保持不变，则有

$$\begin{cases} P_\mathrm{r}(n)=P_0\left[G_{\mathrm{r,R}}^{+}+\alpha_\mathrm{r}^2+2\sqrt{G_{\mathrm{r,R}}^{+}}\alpha_\mathrm{r}\cos(2kH_\mathrm{r}\sin\theta+\beta_\mathrm{r})\right] \\ P_\mathrm{l}(n)=P_0\left[G_{\mathrm{l,R}}^{-}+\alpha_\mathrm{l}^2+2\sqrt{G_{\mathrm{l,R}}^{-}}\alpha_\mathrm{l}\cos(2kH_\mathrm{l}\sin\theta+\beta_\mathrm{l})\right] \end{cases} \tag{5}$$

式中：$k=2\pi f_0/c$为GNSS信号波数。其中：

$$\begin{cases} \alpha_\mathrm{r}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta_\mathrm{r}}=\sqrt{G_{\mathrm{r,R}}^{-}}\Gamma_{\mathrm{RR}}+\sqrt{G_{\mathrm{r,L}}^{-}}\Gamma_{\mathrm{RL}} \\ \alpha_\mathrm{l}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta_\mathrm{l}}=\sqrt{G_{\mathrm{l,R}}^{+}}\Gamma_{\mathrm{RR}}+\sqrt{G_{\mathrm{l,L}}^{+}}\Gamma_{\mathrm{RL}} \end{cases} \tag{6}$$

式(5)即为地基GNSS-R功率测量应用中实际天线接收的北斗GEO卫星信号功率表达式。

## 2　信号功率测量相对偏差

在 GNSS-R 功率测量应用中: 对于 RHCP 天线而言, 目标信号为直射 RHCP 信号, 干扰信号为反射 RHCP 信号和反射 LHCP 信号; 对于 LHCP 天线而言, 目标信号为反射 LHCP 信号, 干扰信号为直射 RHCP 信号和反射 RHCP 信号。令式 (5) 中各干扰信号对应的天线增益为 0, 即可得到目标信号功率为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{r}}^{0} = P_0 G_{\mathrm{r,R}}^{+} \\ P_{\mathrm{l}}^{0} = P_0 G_{\mathrm{r,L}}^{+} |\Gamma_{\mathrm{RL}}|^2 \end{cases} \tag{7}$$

对比式 (5) 和式 (7), 可见实际信号功率与目标信号功率之间存在系统误差。为了定量描述二者差别, 这里定义信号功率测量的相对偏差为

$$\delta_{\mathrm{z}} = \frac{P_{\mathrm{z}} - P_{\mathrm{z}}^{0}}{P_{\mathrm{z}}^{0}} \tag{8}$$

式中: $\delta$为功率测量相对偏差; 下标z表示天线极化方式。

将式 (5) 和式 (7) 代入式 (8), 得到 RHCP 天线和 LHCP 天线接收信号功率测量相对偏差为

$$\begin{cases} \delta_{\mathrm{r}} = \rho_{\mathrm{r},1}^2 + \rho_{\mathrm{r},2}^2 + 2\rho_{\mathrm{r},1}\rho_{\mathrm{r},2}\cos(2kH_{\mathrm{r}}\sin\theta + \beta_{\mathrm{r}}) - 1 \\ \delta_{\mathrm{l}} = \rho_{\mathrm{l},1}^2 + \rho_{\mathrm{l},2}^2 + 2\rho_{\mathrm{l},1}\rho_{\mathrm{l},2}\cos(2kH_{\mathrm{l}}\sin\theta + \beta_{\mathrm{l}}) - 1 \end{cases} \tag{9}$$

式中:

$$\begin{cases} \rho_{\mathrm{r},1} = 1 \\ \rho_{\mathrm{r},2} = \left( \dfrac{G_{\mathrm{r,R}}^{-}}{G_{\mathrm{r,R}}^{+}} |\Gamma_{\mathrm{RR}}|^2 + \dfrac{G_{\mathrm{r,L}}^{-}}{G_{\mathrm{r,R}}^{+}} |\Gamma_{\mathrm{RL}}|^2 + 2\sqrt{\dfrac{G_{\mathrm{r,R}}^{-}}{G_{\mathrm{r,R}}^{+}} \cdot \dfrac{G_{\mathrm{r,L}}^{-}}{G_{\mathrm{r,R}}^{+}}} |\Gamma_{\mathrm{RR}}||\Gamma_{\mathrm{RL}}| \cos(\varphi_{\mathrm{RR}} - \varphi_{\mathrm{RL}}) \right)^{\frac{1}{2}} \\ \rho_{\mathrm{l},1} = \sqrt{\dfrac{G_{\mathrm{l,R}}^{-}}{G_{\mathrm{l,L}}^{+}}} \cdot \dfrac{1}{|\Gamma_{\mathrm{RL}}|} \\ \rho_{\mathrm{l},2} = \left( \dfrac{G_{\mathrm{l,R}}^{+}}{G_{\mathrm{l,L}}^{+}} \cdot \dfrac{|\Gamma_{\mathrm{RR}}|^2}{|\Gamma_{\mathrm{RL}}|^2} + \dfrac{G_{\mathrm{l,L}}^{+}}{G_{\mathrm{l,L}}^{+}} \cdot \dfrac{|\Gamma_{\mathrm{RL}}|^2}{|\Gamma_{\mathrm{RL}}|^2} + 2\sqrt{\dfrac{G_{\mathrm{l,R}}^{+}}{G_{\mathrm{l,L}}^{+}} \cdot \dfrac{G_{\mathrm{l,L}}^{+}}{G_{\mathrm{l,L}}^{+}}} \cdot \dfrac{|\Gamma_{\mathrm{RR}}|}{|\Gamma_{\mathrm{RL}}|} \cdot \dfrac{|\Gamma_{\mathrm{RL}}|}{|\Gamma_{\mathrm{RL}}|} \cos(\varphi_{\mathrm{RR}} - \varphi_{\mathrm{RL}}) \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \tag{10}$$

可见, 北斗 GEO 卫星直反信号功率测量相对偏差与卫星高度角、天线对干扰信号的抑制性能、天线相位中心高度和反射面介电常数有关。在实际地基观测场景中, 任何一颗可见的北斗 GEO 卫星的高度角可近似为常数, 对应角度下天线对干扰信号的抑制性能是该星直反信号功率测量偏差的决定性因素: 对于 RHCP 天线, 决定直射信号功率测量相对偏差的性能指标包括其对后向 RHCP 信号的抑制比$G_{\mathrm{r,R}}^{+}/G_{\mathrm{r,R}}^{-}$和对后向 LHCP 信号的抑制比$G_{\mathrm{r,R}}^{+}/G_{\mathrm{r,L}}^{-}$; 而对于 LHCP 天线, 决定反射信号功率测量相对偏差的性能指标包括其对前向 RHCP 信号的抑制比$G_{\mathrm{l,L}}^{+}/G_{\mathrm{l,R}}^{+}$及对后向 RHCP 信号的抑制比$G_{\mathrm{l,L}}^{+}/G_{\mathrm{l,R}}^{-}$。对于性能指标确定的接收天线组合, 在某一具体时刻北斗 GEO 卫星直反信号功率测量相对偏差表现为固定偏差, 其大小仅取决于天线相位中心高度和反射面介电常数。为了直观展现这 2 个因素的影响, 本文接下来将设定具体观测场景对此进行仿真分析。

## 3　相对偏差仿真分析

本节以北斗 B1I 信号(1 561.098 MHz)为例对天线方向性造成的北斗 GEO 卫星直反信号功率测量偏差进行仿真分析。仿真过程中采用文献 [12] 给出的 RHCP 和 LHCP 天线增益分布, 具体架设方式为: RHCP 天线最大增益方向指向天顶, LHCP 天线最大增益方向指向天底, 两天线相位中心在同一铅垂线上。设定反射介质为各向同性均匀的无耗介质, 介质与空气分界面水平。据此计算得到不同卫星高度角下两天线对各自干扰信号的抑制比曲线如图 1 所示。

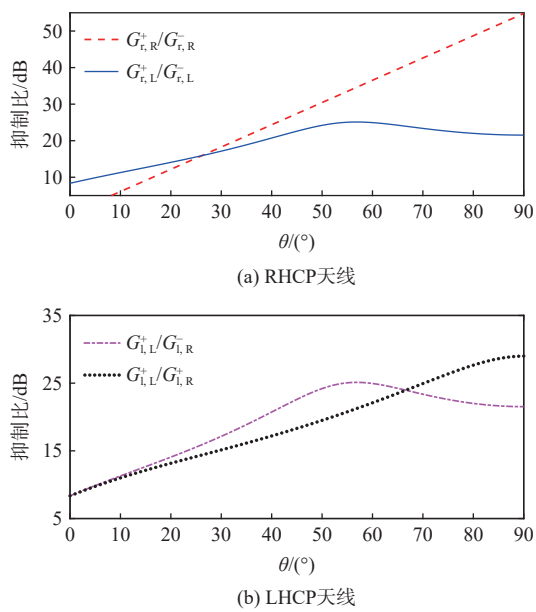



图 1　不同高度角下的天线抑制比

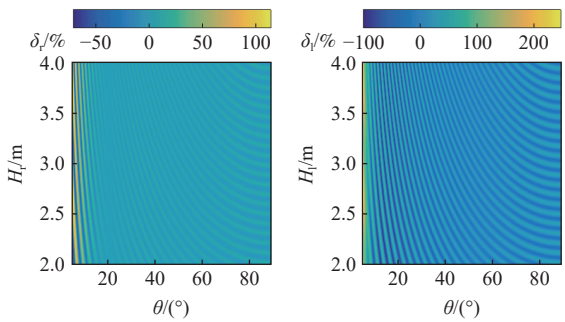
Fig. 1　Antenna rejection ratios under different elevation angle

### 3.1　天线相位中心高度影响分析

天线相位中心高度的不同会造成反射信号相对于直射信号的相位延迟的差别, 进而对直反信号功率测量相对偏差产生影响。

图 2 为反射面相对介电常数为 10, 天线相位中心高度范围为 2～4 m, 卫星高度角范围为 5°～

90°时的直反信号功率测量相对偏差的仿真结果。可以看出，相对偏差在2个维度上均为具有偏置的波动曲线。在相同的天线相位中心高度条件下，随着卫星高度角的增大，相对偏差表现为具有缓变偏置的类余弦振荡曲线，偏置和振荡幅度的变化趋势由天线对干扰信号的抑制比和反射面介电常数共同决定，振荡瞬时频率与卫星高度角余弦值和天线相位中心高度的乘积成正比；在相同的卫星高度角条件下，随着天线相位中心高度的增大，相对偏差表现为具有固定偏置的余弦波动曲线，偏置和振荡幅度同样取决于天线对干扰信号的抑制比和反射面介电常数，振荡频率与卫星高度角正弦值成正比。




(a) 直射信号 (b) 反射信号

图2 不同卫星高度角和天线相位中心高度下的直反信号功率测量相对偏差情况

Fig. 2 Relative deviations of direct and reflected signals power measurements under different elevation angle and antenna height

需要特别说明的是：①在任意具体的卫星高度角条件下，直反信号功率测量偏差在某些天线相位中心高度下出现过零现象，这表明在实际观测中可以通过调整天线架设高度来减小北斗GEO卫星直反信号功率测量偏差；②在任意具体的卫星高度角条件下，直反信号功率测量相对偏差随天线相位中心高度变化的振荡幅度与反射面介电特性相关，这意味着可以通过持续或周期地改变天线高度来构建具有周期波动特性的北斗GEO卫星直反信号功率波形，利用波形幅度等特征实现反射面介电参数的反演。

### 3.2 反射面介电常数影响分析

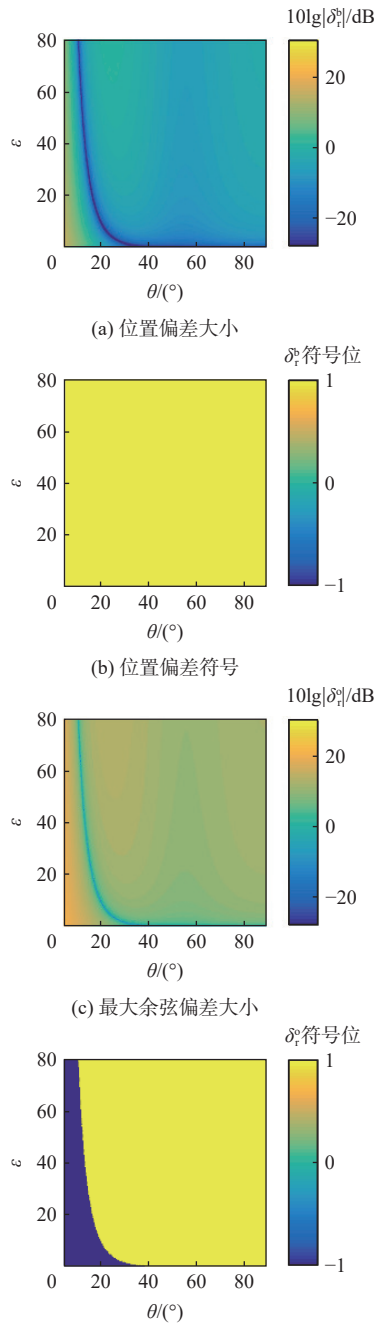
反射面介电常数变化会造成反射面反射系数的变化，进而改变反射信号强度，最终对直反信号功率测量相对偏差产生影响。

对于式(9)给出的相对偏差，可根据表达形式将其分为偏置偏差项和余弦偏差项两部分。在反射面无耗的前提下，其偏置偏差和最大余弦偏差具有如下表达：

$$\begin{cases}\delta_z^{\mathrm{b}} = \rho_{z,1}^2 + \rho_{z,2}^2 - 1 \\ \delta_z^{\mathrm{o}} = 2\rho_{z,1}\rho_{z,2}\cos\beta_z\end{cases} \tag{11}$$

式中：上标b表示偏置偏差，o表示最大余弦偏差。

图3和图4分别为直射信号和反射信号功率测量偏置偏差和最大余弦偏差在反射面相对介电常数1～40、卫星高度角5°～90°条件下的仿真结果。图3(a)和图4(a)、图3(b)和图4(b)分别为偏置偏差的大小、符号(即偏差正负情况，1代表偏差为正，




(a) 位置偏差大小

(b) 位置偏差符号

(c) 最大余弦偏差大小

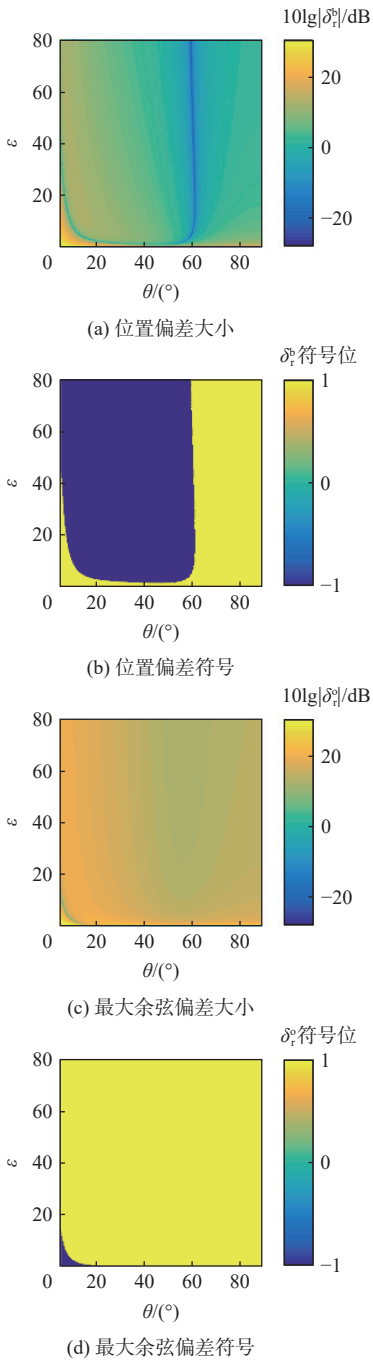
(d) 最大余弦偏差符号

图3 不同卫星高度角和反射面介电常数下的直射信号功率测量偏置偏差和最大余弦偏差情况

Fig. 3 Offset deviations and maximum-cosine deviations of direct signal power measurements under different elevation angle and antenna height

−1 代表偏差为负), 图 3(c) 和图 4(c)、图 3(d) 和图 4(d) 分别为最大余弦偏差的大小、符号。

由图 3(a)和图 3(c)可知, 直射信号功率测量偏置偏差和最大余弦偏差绝对值随卫星高度角和反射面介电常数变化的趋势完全相同, 结合式(9)可以看出二者表达仅有系数上的差别。两图像存在相同的零偏差线, 这是由对应条件下$\alpha_r$为 0 造成的。在零偏差线上: 随着卫星高度角的增大, 零偏差点所对应的相对介电常数迅速减小最终趋近于 1。在零偏差线左侧: 随着卫星高度角的增大, 两偏差迅速减小; 随着反射面介电常数的增大, 两偏差迅速增大后逐渐减小。在零偏差线右侧: 随着卫星高度角的增大, 两偏差趋于增大, 随着反射面介电常数的增大, 两偏差逐渐增大。由图 3(b)和图 3(d)可见, 偏置偏差均为正向偏差, 最大余弦偏差在零偏差线左侧表现为负向偏差, 在零偏差线右侧表现为正向偏差, 这是由$\beta_r$在零偏差线处发生了大小为 π的跳变引起的。




(a) 位置偏差大小

(b) 位置偏差符号

(c) 最大余弦偏差大小

(d) 最大余弦偏差符号

图 4　不同卫星高度角和反射面介电常数下的反射信号功率测量偏置偏差和最大余弦偏差情况

Fig. 4　Offset deviations and maximum-cosine deviations of reflected signal power measurements under different elevation angle and antenna height conditions

根据图 4, 反射信号功率测量偏置偏差和最大余弦偏差在不同的卫星高度角和反射面介电常数条件下具有不同表现。对于偏置偏差, 其零偏差线呈“U”状, 内部为负向偏差, 外部为正向偏差。在零偏差线内部, 随着卫星高度角或反射面介电常数的增大, 偏置偏差绝对值先增大再减小。在零偏差线外部左侧, 偏置偏差随着卫星高度角或反射面介电常数的增大而减小。在零偏差线外部右侧, 偏置偏差随着卫星高度角的增大而增大, 随着反射面介电常数的增大而减小。对于最大余弦偏差图像, 其零偏差线与图 3(a)类似, 但对应的卫星高度角和反射面介电常数更小。在零偏差线左侧, 最大余弦偏差表现为负向偏差, 其绝对值随着卫星高度角或反射面介电常数的增大而迅速减小。在零偏差线右侧, 最大余弦偏差表现为正向偏差, 其绝对值随着卫星高度角的增大而先减小后增大, 随着反射面介电常数的增大而逐渐减小。

综合图 3 和图 4 来看, 直射信号功率偏置偏差和最大余弦偏差在卫星高度角和反射面介电常数较低的情况下较大, 而反射信号功率偏置偏差和最大余弦偏差在较大卫星高度角和反射面介电常数范围内均保持较高水平, 这与文献 [14] 中的分析保持一致。

## 4　结　论

1) 接收天线方向性会造成北斗 GEO 卫星直反信号功率测量偏差, 具体场景和时刻下表现为固定偏差。偏差大小由卫星高度角、天线对干扰信号的抑制性能、天线相位中心高度和反射面介电常数共同决定, 可分解为偏置偏差和余弦偏差两部分。

2) 天线对干扰信号的抑制性能是北斗 GEO 卫星直反信号功率测量相对偏差大小的决定性因素, 天线性能的提升可以有效减小偏置偏差和余弦偏差。在实际应用中, 可通过采用高抑制比天线或者调整天线指向来获取更优的对干扰信号的抑制能力, 从根源上减小信号功率测量偏差。

3) 天线相位中心高度是影响北斗 GEO 卫星直

反信号功率测量测量偏差的一个重要因素。在具体场景中，天线相位中心高度决定了余弦偏差的大小。在本文仿真条件下，相对偏差随着天线高度的变化出现过零现象，表明可以通过调整天线相位中心高度减小直反信号功率测量相对偏差。

4）反射面介电常数是影响直反信号功率测量测量偏差的另一个重要因素。在具体观测中，卫星高度角、接收天线性能及天线架设方式均确定，此时直反信号功率测量相对偏差仅随反射面介电常数的变化而变化，需要在地物参数反演过程中加以考虑。

## 参考文献（References）


[1] 刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(11): 955-960.
LIU J N, SHAO L J, ZHANG X X. Advances in GNSS-R studies and key technologies[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(11): 955-960(in Chinese).

[2] 万玮, 陈秀万, 彭学峰, 等. GNSS遥感研究与应用进展和展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 858-874.
WAN W, CHEN X W, PENG X F, et al. Overview and outlook of GNSS remote sensing technology and applications[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 858-874(in Chinese).

[3] 金双根, 张勤耘, 钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1389-1398.
JIN S G, ZHANG Q Y, QIAN X D. New progress and application prospects of global navigation satellite system reflectometry (GNSS+R)[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1389-1398(in Chinese).

[4] YANG T, WAN W, CHEN X W, et al. Using BDS SNR observations to measure near-surface soil moisture fluctuations: Results from low vegetated surface[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(8): 1308-1312.

[5] GAO C Q, YANG D K, HONG X B, et al. Performance analysis of ground target detection utilizing Beidou satellite reflected signals[J]. Sensors, 2019, 19(9): 2163.

[6] ZHANG Y, HANG S J, HAN Y L, et al. Sea ice thickness detection using coastal BeiDou reflection setup in Bohai Bay[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(3): 381-385.

[7] 邹文博, 张波, 洪学宝, 等. 利用北斗GEO卫星反射信号反演土壤湿度[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 199-204.
ZOU W B, ZHANG B, HONG X B, et al. Soil moisture retrieval using reflected signals of BeiDou GEO satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(2): 199-204(in Chinese).

[8] LI W Q, FABRA F, YANG D K, et al. Initial results of typhoon wind speed observation using coastal GNSS-R of BeiDou GEO satellite[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(10): 4720-4729.

[9] WU J, CHEN Y L, GAO F, et al. Sea surface height estimation by ground-based BDS GEO satellite reflectometry[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13: 5550-5559.

[10] ZAVOROTNY V U, LARSON K M, BRAUN J J, et al. A physical model for GPS multipath caused by land reflections: toward bare soil moisture retrievals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2009, 3(1): 100-110.

[11] KATZBERG S J, TORRES O, GRANT M S, et al. Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: Results from SMEX02[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 17-28.

[12] WAN W, CHEN X W, ZHAO L M, et al. Near-surface soil moisture content measurement by GNSS reflectometry: An estimation model using calibrated GNSS signals[C]// Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2012: 7523 -7526.

[13] ALEJANDRO E E. GNSS reflectometry for land remote sensing applications[D]. Barcelona: Polytechnic University of Catalonia, 2013.

[14] ROUSSEL N, FRAPPART F, RAMILLIEN G. Detection of soil moisture variations using GPS and GLONASS SNR data for elevation angles ranging from 2° to 70°[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(10): 4781-4794.

[15] 洪学宝, 张波, 杨东凯, 等. 地基GNSS-R功率测量应用中的天线方向性影响分析[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(6): 658-664.
HONG X B, ZHANG B, YANG D K, et al. Antenna directivity effect analysis for ground-based GNSS-R power measurement applications[J]. Transactions on Beijing Institute of Technology, 2021, 41(6): 658-664(in Chinese).

[16] 洪学宝, 张波, 阮宏梁, 等. 基于相关功率修正的地基 GNSS-R 土壤湿度反演[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(8): 1558-1564.
HONG X B, ZHANG B, RUAN H L, et al. Ground-based GNSS-R soil moisture retrieval based on correlation power correction[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(8): 1558-1564(in Chinese).

[17] ZAVOROTNY V U, VORONOVICH A G. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 951-964.

[18] 杨东凯, 张其善. GNSS反射信号处理基础与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 82-92.
YANG D K, ZHANG Q S. GNSS reflected signal processing: Fundamentals and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 82-92(in Chinese).

# Power measurement deviations of direct and reflected signals from BDS GEO satellites in ground-based GNSS-R applications

RUAN Hongliang[1]，HONG Xuebao[2,*]，WANG Yongning[3]，HAN Mutian[4]，YANG Dongkai[4]

(1. Business School，Jinhua Polytechnic，Jinhua 321017，China;
2. Research Institute for Frontier Science，Beihang University，Beijing 100191，China;
3. Jinhua Branch，China United Network Communication Co.，Ltd.，Jinhua 321017，China;
4. School of Electronics and Information Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China)

**Abstract**: This paper analyzes the power measurement deviations of the direct and reflected signals from BDS GEO satellites. Firstly, the expressions of direct and reflected BDS GEO signals received by actual antennas in ground-based scenario are presented. Then, the relative deviations of direct and reflected signal power measurement of BDS GEO satellite are discussed. Finally, simulations were carried out to analyze relative deviations in a specific observation scenario. Both theory and simulation show that the power measurement deviation of the direct and reflected BDS GEO signals are fixed under a specific scene and at a given time. The deviations are codetermined by the suppression performance of the antenna to the interference signals, antenna height and the dielectric constant of the reflector. The relative deviation decreases with the enhancement of the suppression performance of the antenna to the interference signal, fluctuates within a certain range with the change of the antenna height, and varies with the dielectric constant of the reflector.

**Keywords**: global navigation satellite system reflectometry; BeiDou navigation satellite system; geostationary earth orbit satellites; power measurement deviations; antenna directivity

**Received**：2022-02-18；**Accepted**：2022-09-18；**Published Online**：2022-11-08 10：43
**URL**：kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20221108.0853.001.html
**Foundation item**：Zhejiang Basic Public Welfare Research Project (LGN19D040001)
* **Corresponding author**. E-mail：Joyce_hong2008@yeah.net