

# 星载 GPS-R 下视天线的可视性研究

张晓坤 袁 洪

(中国科学院光电研究院 北京 100094)

**摘要** 对星载 GPS-R 海洋遥感接收机下视天线的波束中心指向、波束形状、波束推进方式对镜面反射点可视性的影响进行了研究。定义了一个与天线可视区域内地球表面点具有——对应关系的星下点平面，提出了星下点平面内的天线波束覆盖区域的确定方法及数学表达式，在此基础上分析了不同的波束中心指向、波束形状、波束推进方式对可视性的影响，并根据某型号空间飞行器的轨道数据进行了仿真验证。

**关键词** GPS-R, 下视天线, 波束中心指向, 波束形状, 波束推进方式

**中图法分类号** V 414

## Visibility Research on Downward Antenna of Spaceborne GPS-R System

ZHANG Xiaokun YUAN Hong

(Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

**Abstract** The influences on visibility of specular points are investigated from several properties of the spaceborne GPS-R system downward antenna in the oceanographic remote sensing, including beam center pointing, beam geometry and beam scanning manners. In particular, we firstly defined a subastral plane which has a one-to-one mapping relationship with points on the Earth in beam zone coverage; then presented a scheme to figure out beam zone coverage in this plane, and then analyzed the influences on visibility from beam center pointing, beam geometry and beam scanning manners. A configuration of beam geometry and beam scanning manners are proposed, in which the direction with larger half power beam width of the downward antenna's two main directions in the lobe pattern is vertical to the LEO satellite velocity direction in subastral plane. These research conclusions have been verified by simulation in the potential GPS-R system in the oceanographic remote sensing, based on the orbit of a LEO satellite which can be used in the future.

**Key words** Global Position System reflections, Downward antenna, Beam center pointing, Beam geometry, Beam scanning manner

## 1 引言

星载 GPS-R 系统 GPS 星座作为信号发射机, 不断向地球表面发射导航信号, 安装在近地轨道 (LEO) 卫星上的 GPS 信号接收机, 同时具有上视、下视天线, 向上接收 GPS 直达信号, 向下接收从地球海洋表面反射回来的信号。星载观测模式具有信号源丰富、时空分辨率高、实时性高、成本低等特点, 是全球海洋遥感的一种新的低成本和高效工具。由于星载条件下, GPS-R 信号能量很弱, 所以要求下视天线具有一定的增益, 同时为了保证探测效率, 又要具有一定波束宽度。大型相控阵天线是可以满足上述要求的。但是下视天线采用相控阵, 必然会增加整星的重量, 进而影响 LEO 卫星其他设备的设计要求, 提高造价, 这与采用 GPS-R 技术实现低成本高效海洋遥感的初衷不符。2000 年, NASA 的 SuRGE<sup>[1]</sup> 计划提出使用单根高增益定向的下视天线组合进行星载 GPS-R 实验, SAC-C, CHAMP 卫星使用了单根下视天线进行星上 GPS-R 信号采集。

星载 GPS-R 反射信号发出的前缘是镜面反射点, 因此, 镜面反射点的分布直接决定可探测海域的分布。一天中出现的对星载 GPS-R 系统可视的海洋镜面反射点数量和分布, 是衡量星载 GPS-R 系统遥感效率的最直接标准<sup>[2]</sup>。镜面反射点可视性与星载 GPS-R 接收机下视天线配置有关。

本文分析了在星载条件下 GPS-R 海洋遥感的单根下视天线的指向、波束形状和波束推进方式对可视性的影响, 并在中国某型号空间飞行器的轨道上进行了仿真验证。

## 2 GPS-R 海洋遥感系统

GPS 发射右旋极化方式的信号, 经过海面散射后, GPS-R 信号的极化从右旋逐步变为左旋, 且 GPS-R 信号的强度最大为发射信号强度的 60%, 因此 GPS-R 接收机需要两副天线, 一副是低增益的右旋极化方式的上视天线, 方向上向以接收直达的右旋极化信号, 另一副是高增益的左旋极化方式的下视天线, 方向向下以接收反射的左旋极化信号。星载 GPS-R 海洋遥感系统几何示意如图 1 所示<sup>[3]</sup>。图 1 中, 镜面反射点位于原点, 此处信号入射角等于

## 反射角。

文献 [4] 给出了镜面反射点计算方法。该算法考虑地球形状的影响, 利用 GPS 卫星、LEO 卫星的位置坐标, 采用迭代思想, 搜索出地球表面上与 GPS 卫星、LEO 卫星构成 GPS 信号入射角等于反射角的点。本文的仿真实验使用的就是这种方法。

## 3 星下点平面

### 3.1 星下点平面的定义

为方便分析下视天线波束有关问题, 在此定义了一个平面, 称为星下点平面, 如图 2 所示。平面原点在 LEO 卫星的地球表面星下点处, 坐标轴 V 轴指向 LEO 卫星的速度方向, T 轴指向 LEO 卫星轨道面的正法向, 指向 V 轴、T 轴正向的单位矢量  $e_V$ ,  $e_T$ , 在地心天球坐标系中定义为

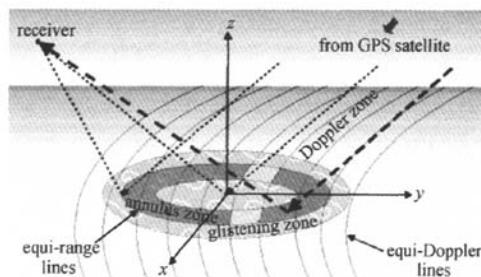


图 1 利用 GPS-R 系统进行海洋遥感的几何关系  
Fig. 1 Geometry of GPS-R system in oceanographic remote sensing

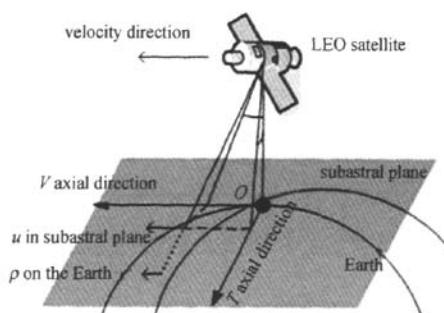


图 2 星下点平面示意  
Fig. 2 LEO subastral plane

$$\mathbf{e}_R = \frac{\mathbf{r}_{\text{LEO}}}{|\mathbf{r}_{\text{LEO}}|}, \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_V = \mathbf{e}_T \times \mathbf{e}_R, \quad (2)$$

$$\mathbf{e}_T = \frac{\mathbf{r}_{\text{LEO}} \times \mathbf{v}_{\text{LEO}}}{|\mathbf{r}_{\text{LEO}} \times \mathbf{v}_{\text{LEO}}|}. \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{r}_{\text{LEO}}$ ,  $\mathbf{v}_{\text{LEO}}$  分别为地心天球坐标系中 LEO 卫星的位置矢量和速度矢量.

图 2 中, 点  $O$  是星下点平面坐标原点, 点  $u$  是位于星下点平面内的任一点, LEO 卫星与点  $u$  连线的延长线与地球表面相交, 得到对应的地球表面点  $p$ , 显然, LEO 卫星位置点、点  $u$  及点  $p$ , 三点共线.

### 3.2 对应关系

星下点平面内点与对应的地球表面点之间具有一一对应关系.

设点  $O, u, p$  在地心天球坐标系中的位置矢量分别为  $\mathbf{r}_o, \mathbf{r}_u, \mathbf{r}_p$ . 点  $u$  在星下点平面内坐标值为  $(v, t)$ ,  $\mathbf{e}_R, \mathbf{e}_V, \mathbf{e}_T$  定义如同式 (1)~(3). 定义矩阵  $H$  如下:

$$H = [\mathbf{e}_V \quad \mathbf{e}_T \quad \mathbf{e}_R]. \quad (4)$$

如果已知点  $u$  坐标  $(v, t)$ , 可通过下述方法求解点  $p$  在地心天球坐标系中的位置矢量  $\mathbf{r}_p$ .

$$\mathbf{r}_u = H \cdot \begin{bmatrix} v \\ t \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{r}_o. \quad (5)$$

因为 LEO 位置点、点  $u$  及点  $p$  三者共线, 显然有

$$\frac{(\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_p) \cdot (\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_p)}{|\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_p| |\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_p|} = 1, \quad (6)$$

$$\frac{(\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_u) \cdot (\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_p)}{|\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_u| |\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_p|} = 1. \quad (7)$$

点  $p$  为地球表面点, 有

$$|\mathbf{r}_p| = R_e. \quad (8)$$

将式 (5) 代入式 (6)~(8), 可求出  $\mathbf{r}_p$ .

如果已知  $p$  在地心天球坐标系中的位置矢量  $\mathbf{r}_p$ , 即可得到

$$\mathbf{r}_u = \mathbf{r}_{\text{LEO}} - \frac{(\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_p) \cdot (|\mathbf{r}_{\text{LEO}}| - |\mathbf{r}_p|)}{|[H^T \cdot (\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_p)]_{(3)}|}, \quad (9)$$

式 (9) 中  $[H^T \cdot (\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_p)]_{(3)}$  表示矢量  $H^T \cdot (\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_p)$  的第三个分量值. 通过下式可以求出点  $u$  在星下

点平面内的坐标  $(v, t)$ .

$$\begin{bmatrix} v \\ t \\ 0 \end{bmatrix} = H^T \cdot (\mathbf{r}_u - \mathbf{r}_o). \quad (10)$$

### 3.3 星下点平面内波束覆盖区域

利用星下点平面内点的坐标  $(v, t)$  可以方便地表示出该点在  $V$  向和  $T$  向上偏离 LEO 卫星正天底方向的角度  $(\alpha, \beta)$ , 表述如下:

$$h = |\mathbf{r}_{\text{LEO}} - \mathbf{r}_o|, \quad (11)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{v}{h}\right), \quad (12)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{t}{h}\right). \quad (13)$$

式 (11) 中,  $h$  为 LEO 卫星的轨道高度, 式 (12) 和式 (13) 的角度取值范围为  $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ , 偏离角度  $(\alpha, \beta)$  能够唯一标记星下点平面内点.

GPS-R 下视天线波束中心指向一般有 5 种方式: 指向正天底、偏离天底指向前方、偏离天底指向后方、偏离天底指向左舷、偏离天底指向右舷. 设  $H_V$  和  $H_T$  分别为  $V, T$  向半功率波束宽度. 星下点平面内的波束覆盖区域建模成椭圆状, 可以涵盖全部真实波束覆盖区域 [5].

当下视天线波束中心指向正天底方向时, 波束中心位于星下点平面的原点, 星下点平面内的波束覆盖区域可描述为

$$a = h \tan\left(\frac{H_V}{2}\right), \quad (14)$$

$$b = h \tan\left(\frac{H_T}{2}\right), \quad (15)$$

$$S = \left[ (v, t) \mid \left(\frac{v}{a}\right)^2 + \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq 1 \right]. \quad (16)$$

当天线波束中心偏离天底指向前方时, 设  $V$  向上的偏离角度为  $\alpha_0$ , 则星下点平面内的波束覆盖区域可描述为

$$v_0 = h \tan \alpha_0, \quad (17)$$

$$a = \frac{h}{2} \left[ \tan\left(\alpha_0 + \frac{H_V}{2}\right) - \tan\left(\alpha_0 - \frac{H_V}{2}\right) \right], \quad (18)$$

$$b = h \sec \alpha_0 \tan\left(\frac{H_T}{2}\right), \quad (19)$$

$$S = \left[ (v, t) \mid \left(\frac{v - v_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq 1 \right]. \quad (20)$$

当波束中心偏离天底指向后方、左舷、右舷时, 星下点平面内的波束覆盖区域模型可参照式(17)~(20)建立。

通过星下点平面, 将地球表面点的可视性问题转变为星下点平面内点的可视性问题, 只要星下点平面内某个点在波束扫描区内, 就说明对应的地球表面点可视。通常, 天线的波束范围用立体角表示, 天线的指向方向用偏离天底的方向角表示, 在星下点平面内分析可视性, 对讨论天线波束中心指向、波束形状、波束推进方式等问题是非常方便的。

## 4 分析

### 4.1 波束中心指向

下视天线波束中心指向偏离正天底方向, 相应的波束覆盖区域会比指向正天底方向时增大, 当波束边缘延长线与地球表面相切时达到最大, 如图 3 所示。波束边缘与地球表面相切的数学表述如下:

$$\alpha_0 + \frac{H_V}{2} = \arcsin\left(\frac{R_e}{|\mathbf{r}_{\text{LEO}}|}\right), \quad (21)$$

$$\beta_0 + \frac{H_T}{2} = \arcsin\left(\frac{R_e}{|\mathbf{r}_{\text{LEO}}|}\right). \quad (22)$$

当  $V$  或  $T$  向上满足式(21)或式(22)时, 波束边缘与地球表面相切。

### 4.2 波束形状及波束推进方式

星载 GPS-R 系统中, LEO 卫星轨道高度范围一

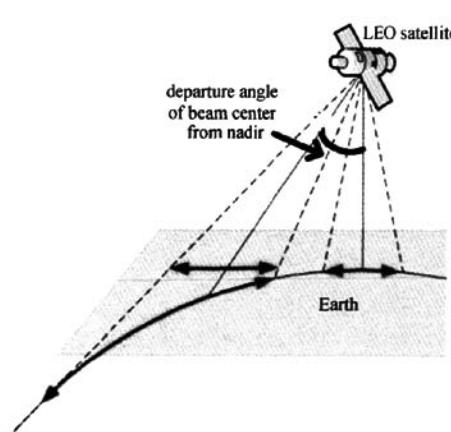


图 3 波束中心指向

Fig. 3 Beam center pointing

般为 300~1000 km, 任意时刻卫星速度可近似表示为

$$|\mathbf{v}_{\text{LEO}}| = \sqrt{\frac{3.986005 \times 10^{14}}{a^3}}. \quad (23)$$

式(23)中,  $a$  为轨道半长轴。对上述轨道高度的 LEO 卫星, 运行速度不低于 7 km/s, 显然有下式成立:

$$h \tan\left(\frac{H}{2}\right) \geq |\mathbf{v}_{\text{LEO}}|. \quad (24)$$

式(24)成立的条件是, 所有方向上的半功率波束宽度  $H \geq 3^\circ$  且  $h \in [300, 1000]$  (单位 km)。这说明, 对星载 GPS-R, 只要半功率波束宽度大于  $3^\circ$ , 当波束中心指向正天底方向时, 下一秒的波束中心仍然在上一秒的波束覆盖区域内, 两秒内的波束覆盖区域有重叠, 见图 4。

图 4 所示为波束中心指向正天底时, 星下点平面内相邻两时刻的波束覆盖区域的移动情况, 实线包围区域是上一秒波束覆盖区, 记为  $S_1$ , 虚线包围区域是下一秒波束覆盖区, 记为  $S_2$ , 图 4 中阴影区是  $S_1$  和  $S_2$  重复扫描区, 相邻两秒间天线波束中心移动距离等于卫星飞行距离, 记为  $l$ 。

在上一时刻的星下点平面内,  $S_1$  和  $S_2$  可描述为

$$S_1 = \left[ (v, t) \mid \left(\frac{v}{a}\right)^2 + \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq 1 \right], \quad (25)$$

$$S_2 = \left[ (v, t) \mid \left(\frac{v-l}{a}\right)^2 + \left(\frac{t}{b}\right)^2 \leq 1 \right]. \quad (26)$$

式(25)和式(26)中对半长轴  $a, b$  的定义同式(14)和式(15), 则  $S_1$  和  $S_2$  重复覆盖区域的面积如下:

$$S_1 \cap S_2 = \pi ab - 2ab \arcsin\left(\frac{l}{2a}\right) - bl \sqrt{1 - \left(\frac{l}{2a}\right)^2}. \quad (27)$$

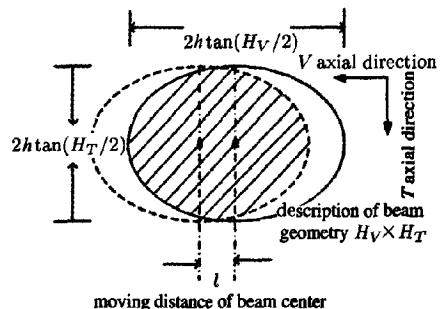


图 4 相邻两秒波束覆盖区域

Fig. 4 Beam zone coverage between an interval of two seconds

前后两秒天线波束总的覆盖区域面积为

$$D = 2\pi ab - (S_1 \cap S_2) = \pi ab + 2ab \arcsin\left(\frac{l}{2a}\right) + bl\sqrt{1 - \left(\frac{l}{2a}\right)^2}. \quad (28)$$

当  $ab \equiv G$  时, 式 (28) 可改写为如下形式:

$$D = \pi G + 2G \arcsin\left(\frac{lb}{2G}\right) + bl\sqrt{1 - \left(\frac{lb}{2G}\right)^2}. \quad (29)$$

式 (29) 等号两边对变量  $b$  求导, 可得

$$D' = 2l\sqrt{1 - \left(\frac{lb}{2G}\right)^2} > 0. \quad (30)$$

式 (30) 表明, 当  $ab \equiv G$  时,  $D$  是  $b$  的增函数.

从物理意义上分析, 对 LEO 星载 GPS-R 系统, 当  $H \geq 3^\circ$ , 对确定波束范围的下视天线来说, 将天线波瓣图两个主方向中具有较大数值半功率波束宽度的那个方向放置在轨道面法向  $T$  向上. 这种方式能够取得较大的天线波束总覆盖区, 即图 5 中的波束推进方式 1. 这种波束推进方式相比方式 2, 在相同时间内, 波束总覆盖区域面积大, 且波束覆盖区域分布在星下点两旁, 分布范围也广, 是一种值得提倡的波束推进方式.

上述结论是根据波束中心正天底指向模式分析得来的, 但对波束中心其他 4 种指向同样适用, 只是后 4 种指向模式下公式推导过程更复杂.

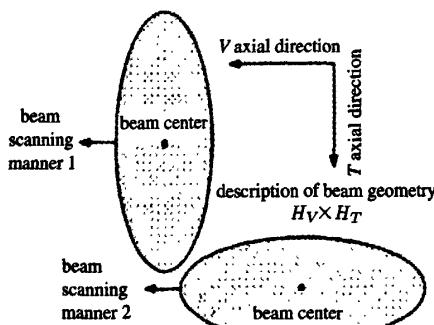


图 5 波束推进方式

Fig. 5 Beam scanning manner

## 5 下视天线波束模拟仿真

实验用 LEO 卫星是一个运行轨道高度大约 350 km 的低轨飞行器, 其轨道特征可以认为能够代表目前的低轨飞行器的运行轨道, 选用其进行 LEO 飞行器实验具有普遍意义.

仿真用两种波束形状, 用半功率波束宽度  $H_V \times H_T$  的形式表示, 分别为  $10^\circ \times 20^\circ$  和  $20^\circ \times 10^\circ$ , 其波束推进方式分别对应图 5 中的波束推进方式 1 和方式 2.

仿真波束中心指向采用下述 5 种方式: 指向正天底、偏离天底指向前方、偏离天底指向后方、偏离天底指向左舷、偏离天底指向右舷. 后 4 种方式的偏离天底角度各自取两个值: 波束中心偏离天底方向到  $30^\circ$  角和波束中心偏离天底至临界角, 以使波束边缘延长线与地球表面相切.

仿真 24 h 内各种方式下镜面反射点可视性的情况, 实验数据列于表 1. 统计中用到的可视镜面反射点数量是指可视镜面反射点出现时间的总秒数, 即某

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

半功率波束宽度/(°)	偏离天底角度/(°)	偏离天底方向	可视的海洋镜面反射点数量
$10 \times 20$	0	N/A	5642
	30	前	6607
	65	前	14409
	30	后	6767
	65	后	13746
	30	左	5406
	60	左	9974
	30	右	3538
$20 \times 10$	60	右	9945
	0	N/A	5680
	30	前	6471
	60	前	13001
	30	后	7324
	60	后	15158
	30	左	6121
	65	左	9822
	30	右	2798
	65	右	8524

时刻由 LEO 卫星和某颗 GPS 卫星位置决定的镜面反射点可视能持续存在整一秒钟时间, 则总的可视镜面反射点数量加一。

分析表 1 数据有如下特点:

① 波束中心偏离天底, 与指向正天底模式相比, 对下视天线可视的闪烁区数量明显增多, 与 4.1 节分析得出的波束中心偏离天底时, 波束在星下点平面及地球表面上覆盖区域面积变大的结论相互印证。

② 波束中心偏离天底至临界角时, 对下视天线可视的闪烁区的数量最多, 与 4.1 节偏离至临界角时, 波束覆盖区域最大的结论相互印证。

③ 对相同的 200 平方度的波束范围, 在  $T$  向上半功率波束宽度  $20^\circ$  的波束推进方式, 相比  $10^\circ$  的方式, 前者总的波束覆盖区面积大, 所以对下视天线可视的镜面反射点分布范围广。即使在个别偏离角度上,  $T$  向上  $10^\circ$  的方式下可视镜面反射点数量要多于  $T$  向上  $20^\circ$  的方式。例如, 表 1 中下视天线偏离天底方向指向 LEO 卫星后方  $30^\circ$  和相切角度时, 可视海洋镜面反射点分布如图 6~9 所示。通过比较  $30^\circ$  时(见图 6 和图 7)及相切时(见图 8 和图 9)的情况, 可以看出, 在  $T$  向上半功率波束宽度  $10^\circ$  的推进方式 2 下, 可视镜面反射点分布在与 LEO 轨迹平行的弧段上(见图 7 和图 9), 尽管数量多, 但是从对海域的覆盖范围上看,  $T$  向上半功率波束宽度  $20^\circ$  的推

进方式 1 要好。所以就海域的探测效率来说, 推进方式 1 优于推进方式 2。与 4.2 节关于波束推进方式的分析结果相互印证。

④ 下视天线的指向偏离天底指向前后时, 仿真得到的结果基本相当。

⑤ 下视天线的指向偏离天底指向左右舷时, 仿真得到的结果也基本相当。

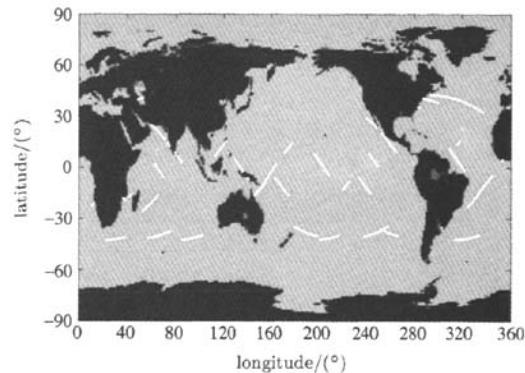


图 7 半功率波束宽度  $20^\circ \times 10^\circ$  下视天线  
偏离正天底指向后方  $30^\circ$  方式下, 一天中可视海洋镜面  
反射点分布情况(反射点数 7324)

Fig. 7 Distribution of visual ocean specular points  
in one day (number is 7324) on  $20^\circ \times 10^\circ$  HPBW and  
rear  $30^\circ$  beam center pointing

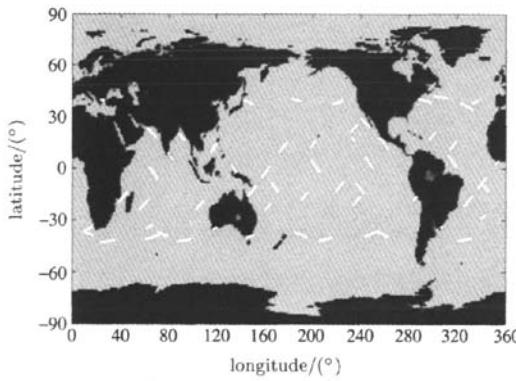


图 6 半功率波束宽度  $10^\circ \times 20^\circ$  下视天线  
偏离正天底指向后方  $30^\circ$  方式下, 一天中可视海洋镜面  
反射点分布情况(反射点数 6767)

Fig. 6 Distribution of visual ocean specular points  
in one day (number is 6767) on  $10^\circ \times 20^\circ$   
HPBW (Half-Power Beam Width) and  
rear  $30^\circ$  beam center pointing

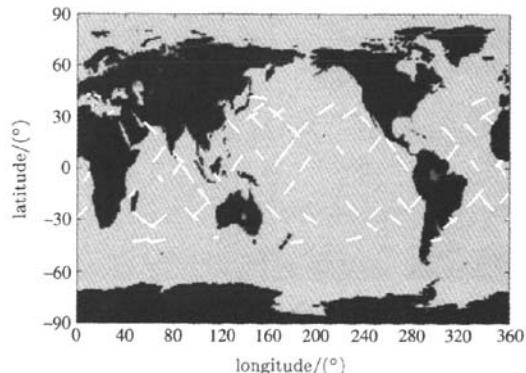


图 8 半功率波束宽度  $10^\circ \times 20^\circ$  下视天线  
偏离正天底指向后方  $65^\circ$  方式下, 一天中可视海洋镜面  
反射点分布情况(反射点数 13746)

Fig. 8 Distribution of visual ocean specular points  
in one day (number is 13746) on  $10^\circ \times 20^\circ$  HPBW and  
rear  $65^\circ$  beam center pointing

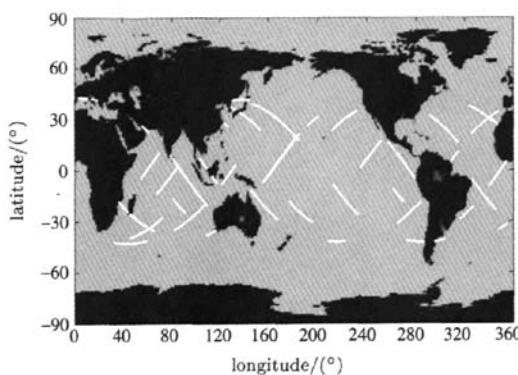


图 9 半功率波束宽度  $20^\circ \times 10^\circ$  下视天线  
偏离正天底指向后方  $60^\circ$  方式下, 一天中可视海洋镜面  
反射点分布情况 (反射点数 15158)

Fig. 9 Distribution of visual ocean specular points in one day (number is 15158) on  $20^\circ \times 10^\circ$  HPBW and rear  $60^\circ$  beam center pointing

⑥下视天线偏离天底指向前后的仿真结果明显优于指向左右舷对应角度下的仿真结果。

综上所述, 基于该型号空间飞行器的仿真结果表明, 一些 LEO 卫星进行 GPS-R 遥感探测具有可行性。

## 6 结论

通过对星载 GPS-R 海洋遥感系统的下视天线波束对镜面反射点的可视性研究, 建立了一个星下点

平面内波束覆盖区域模型, 讨论了波束中心指向、波束形状、波束推进方式对海洋遥感可视性的影响, 并在较典型的低轨飞行器运行轨道上进行了模拟仿真。数学分析和仿真结果表明, 下视天线波束中心偏离天底模式下, 镜面反射点的可视性优于正天底模式; 偏离天底指向前后时, 可视性基本相当, 偏离天底指向左右舷时, 可视性也基本相当, 且偏离天底指向前后的可视性明显优于指向左右舷对应角度; 对相同平方度的波束范围, 本文提出的方式 1 是一种值得提倡的波束扫描方式。这对今后开展星载 GPS-R 实验有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] Emery W, Axelrad P, Masters D, et al. Ocean wind and land surface student satellite (OWLS) [G]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Honolulu: IEEE, 2000. 3084-3086
- [2] Michael Armatys. Estimation of sea surface winds using reflected GPS signals. Boulder: The Graduate School of the University of Colorado, 2001
- [3] Komjathy A, Garrison J L, Zavorotny V U. GPS: a new tool for ocean sciences [J]. *GPS World*, 1999(4):50-56
- [4] Wu S C, Meehan T, Young L. The potential use of GPS signals as ocean altimetry observables [C]. National Technical Meeting of the Institute of Navigation. Santa Monica: JPL, 1997. 543-550
- [5] Garrison J L, Katzberg S J, Hill M I. Effect of sea roughness on bistatically scattered range coded signals from the global positioning system [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(3):2257-2260

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

---



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>