

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SM.2454-0报告
(06/2019)

**卫星无线电导航业务频段
频谱监测技术**

**SM系列
频谱管理**



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电通信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界和区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策（IPR）

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/zh>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R系列报告

（也可在线查询<http://www.itu.int/publ/R-REP/zh>）

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理

注： 该ITU-R报告英文版已按ITU-R第1号决议详述的程序批准。

电子出版
2020年，日内瓦

© 国际电联 2020

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R SM.2454-0报告
卫星无线电导航业务频段
频谱监测技术

(2019年)

概述

全世界有数亿人使用卫星导航系统。卫星无线电导航业务（RNSS）是许多应用程序（如导航和时间信号）的关键。政府、业界和个人在日常生活和在对安全至关重要的情况下使用这些业务。为了使这些业务起作用，需要这些信号的高可靠性、可用性和准确性。

（从太空到地球）存在不同的无线电导航系统。它们是为全球（GNSS – 全球卫星导航系统）或区域覆盖而设计的。它们都对射频干扰（RFI）具有共同的敏感性，因为相对于基于地面的发射机，地球上的接收信号功率非常低。采取技术措施以使信号与接收机噪声良好分离。另一方面，干扰或过多的噪声会导致大范围信号可用性的损失。这样的 RFI 可以来自在 RNSS 频段和/或在相邻或附近频段中工作的发射机。

卫星导航系统的运营商担心干扰 RNSS 信号的接收和使用非法干扰机。全球卫星导航系统国际委员会（ICG）成立了干扰检测与缓解（IDM）任务组，以制定策略来支持检测和缓解电磁干扰源的机制。来自欧盟、中国、美利坚合众国和俄罗斯的 IDM 任务队成员的报告表达了对干扰问题的关注，并举例说明了负面干扰的影响。

特别令人关切的是，非法全球卫星导航系统干扰机的可用性和使用增加，导致接收机出现故障。这种干扰机是通过互联网公开发售的，消费者能够方便使用。由于地球上 RNSS 信号的低信号强度，相对低功率干扰机的影响区域可能相当大。

本报告描述了独立于实际 RNSS 系统运行的 RNSS 频段的频谱监测技术。监测的目的是评估 RNSS 信号接收的条件。本报告概述的技术可用于监测所需信号，检测和定位干扰源，甚至支持传播相关效应的研究。

目录

页码

1	RNSS频段频谱监测的方法	4
1.1	概述	4
1.2	分析附近发射无线电台的信息	4
1.3	执行测量，记录频谱并计算特征值	4
1.4	空间发射分布和频谱功率到达角的图表绘制	7
1.5	结果评估	9
2	监测设备要求	9
2.1	一般要求	9
2.2	对测量设备的要求	10
3	RNSS频段监测的实例	10
3.1	监测GLONASS频段的测量设备	11
3.2	测量点	11
3.3	频率指配分析	11
3.4	执行测量，记录频谱并计算特征值	11
3.5	图表绘制和结果分析	14

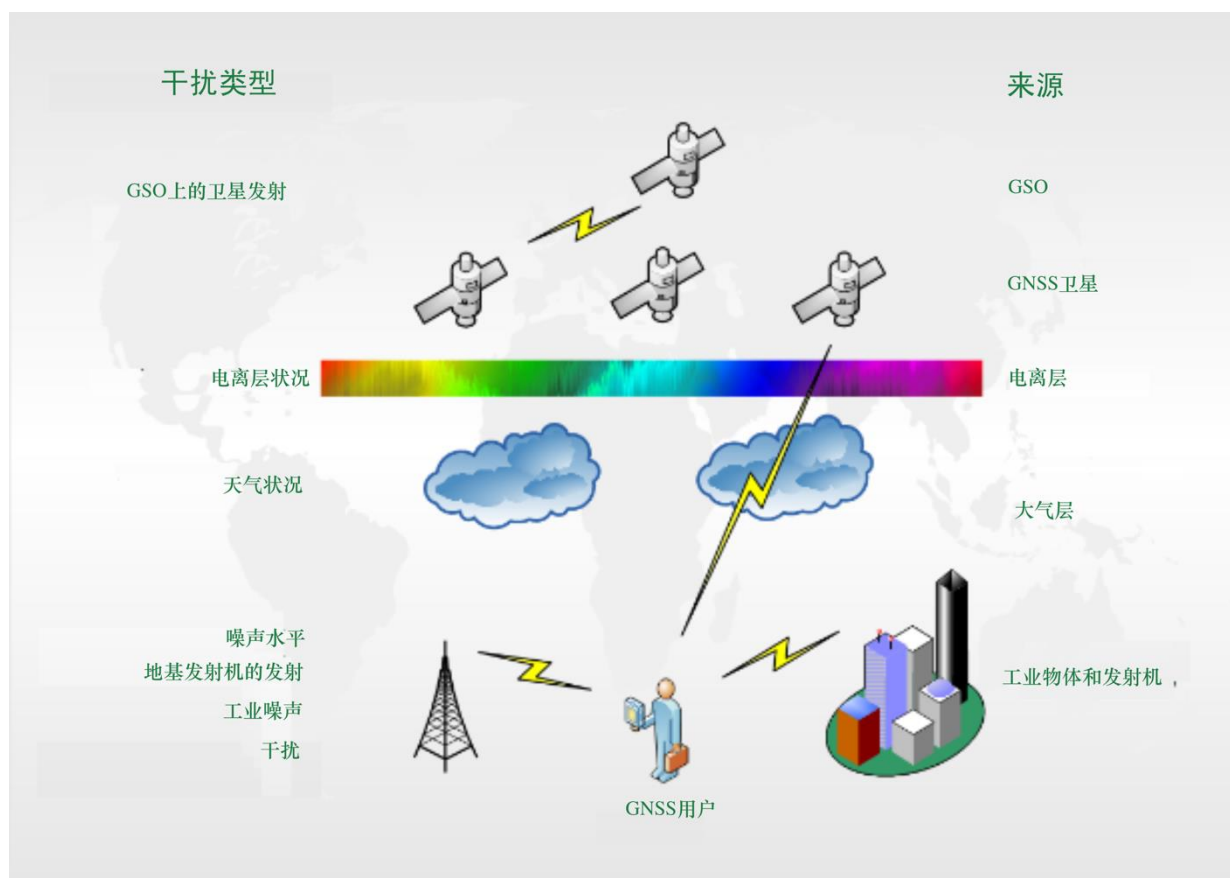
引言

本报告介绍了用于卫星无线电导航业务（RNSS）频段的频谱监测方法。

诸如全球卫星导航系统之类的无线电导航业务接收机的信号电平非常低，这使其很容易受到干扰和噪声的影响。这会导致设备的定时精度降低，最终导致设备报告错误的位置信息。由于这些接收机的广泛使用，例如，对于航空无线电导航或无线电发射机的频率参考，这些频段中的干扰会产生严重后果。频谱监测可以通过检测可能导致 RNSS 信号阻塞的不必要的地面发射来帮助保护 RNSS 频谱。这些频段中此类发射的潜在来源如图 1 所示。

图1

RNSS信号的潜在发射和干扰源



本报告中描述的技术非常适合与基于卫星的导航业务相关的低信号电平。此外，显示了简化复杂监测数据可视化的方法，从而有助于评估许多测量点。这允许监测整个 RNSS 频段，而不仅仅是单个发射。

测量结果得出关于电磁背景噪声的电平以及在测量的确切位置频段中是否存在潜在有害发射的结论。

该报告包括对方法的一般描述和实际示例。

1 RNSS频段频谱监测的方法

1.1 概述

所述方法监测频谱，允许在特定测量位置检测工作条件和潜在干扰源。该方法认为地球上 RNSS 信号的接收电平通常很低。因此，进行测量以检测可能是干扰或高噪声级的高电平信号。测量不仅产生一个单一的频谱，而且还指示检测到的辐射的方位和（可选）仰角方向。这将产生一个非常大的测量数据集。尽管如此，技术被用来将测量数据减少到几个数字，允许在需要检查许多测量的情况下快速描述监测结果。

该方法基于定向天线的使用。在某些情况下，全向天线可用于补充监测设备组并提供附加数据。测量接收机系统通常由计算机控制，以减少数据收集所需的时间。在测量过程中，利用定向天线沿多个方位角进行频谱估计。

方法的主要步骤有以下几点：

- 获取有关测量位置附近的发射无线电台的信息（如果有）；
- 执行测量，记录光谱并计算特征值；
- 在图表中绘制测量结果；
- 评估结果。

这些步骤细化如下。

1.2 分析附近发射无线电台的信息

如果可能，获取有关测量位置附近的发射无线电台的信息。对这些信息的分析可以帮助测量团队了解他们是否期望某个方向的发射。

1.3 执行测量，记录频谱并计算特征值

应使用如图 2 所示安装的定向天线进行测量。除定向天线外，还可以使用全向天线通过比较来验证频谱测量结果。

在测量现场，通过逐步旋转定向天线一整圈来监测选定频段内的频谱（见图 2）。在每个步骤中，记录频谱以进行进一步处理。测量位置的坐标、在定向天线上看到的频谱、测量时间、定向天线的方位角和仰角都已存储。

在此扫描过程中的角分辨率取决于所需的分辨率，并受天线波束宽度的限制。典型的选择是在 15 度左右。

图2

通过定向天线进行空间扫描，以测量频谱和发射的空间分布图



测量结果可以记录在表 1 中。

完成所有测量后，每个频谱都由三个参数（平均功率、峰值功率和噪声功率）表征，如下段落所述。

1.3.1 噪声功率的计算

根据 ITU-R SM.1753 建议书中规定的方法，针对每个记录的频谱，测量整个被监测频段内的噪声功率。

为了进行计算，将功率谱样本按升序排序。接下来，仅选择高于该记录的最小功率电平的前 20% 的样本，并将其用于计算噪声电平的平均值：

$$P_n = 10 \log \left(\frac{1}{C} \sum_{i=1}^C 10^{\frac{P_i}{10}} \right) \quad (1)$$

其中：

- P_n : 平均噪声功率电平，以dBm为单位
- C : 样本的前20%中的元素数
- P_i : 第*i*个样本的值，以dBm为单位。

1.3.2 峰值功率的计算

通过获取功率谱样本的最大值或使用频谱分析仪/接收机的适当标记功能，可以为每个记录的频谱计算整个监测频段内的峰值功率：

$$P_{peak} = \text{MAX}(P_i), i=1, \dots, N \quad (2)$$

其中：

- P_{peak} : 峰值发射功率，以dBm为单位
- P_i : 第*i*个采样的值，以dBm为单位
- N : 记录的样本总数。

1.3.3 平均功率的计算

通过记录所有功率谱样本的平均值，为每个记录的频谱计算整个监测频段内的平均功率：

$$P_{mean} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{P_i}{10}} \right) \quad (3)$$

其中：

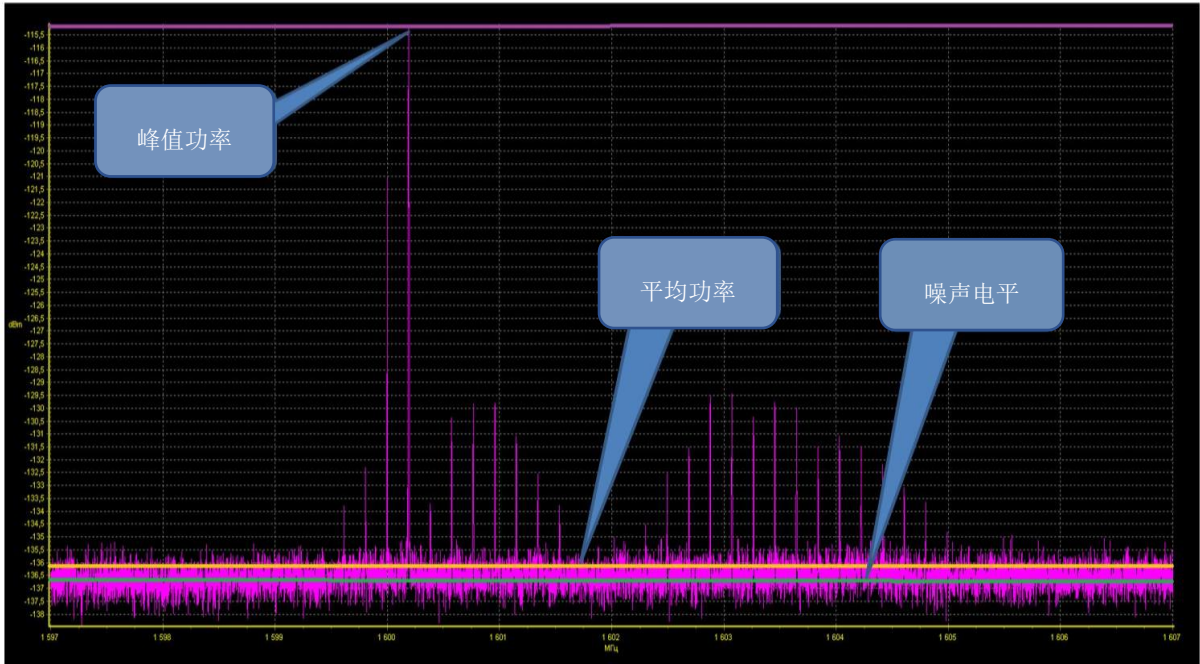
- P_{mean} : 频段内的平均发射功率，dBm
- N : 频谱样本数
- P_i : 第*i*个测量频谱样本的功率，dBm

图 3 显示了根据频谱功率样本集计算出的被监测频段内总发射的总体特性。

1.4 空间发射分布和频谱功率到达角的图表绘制

对于每个记录的频谱，都绘制了一个图表，显示了记录的频谱以及如上所述，图 3 所示计算的噪声、峰值和平均功率电平。

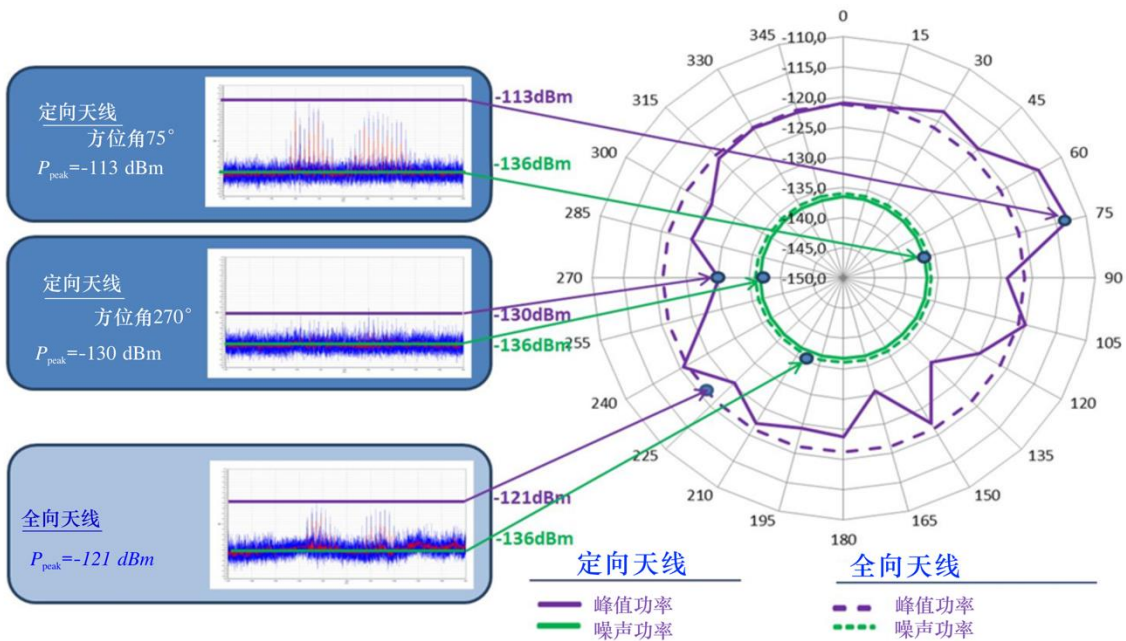
图3
计算的监测频段内总发射的总体特性



使用来自定向和附加的全向天线的第 1.3.1 至 1.3.3 节中所示的三个合计值，可以构建一个圆形图来表示方位角扫描的结果。图的中心代表测量位置。一个例子如图 4 所示。

第 3 节中显示了一个更专门的图来表示用定向天线进行的半球扫描。这可以分析来自地面和空间源的信号。

图4
基于一个测量点处的频谱记录构造方位图



1.5 结果评估

从测量中获得的值和图表可用于检查无用发射的可用性。方位角扫描还可为这些发射提供方向。

通过设置有关峰值或噪声功率意外升高的合适阈值，可以识别出特别有害或干扰发射。

可以将峰值功率、平均功率和噪声功率之间的差异归一化，以便于比较和分类信号。它可以帮助发现潜在的干扰信号。

2 监测设备要求

2.1 一般要求

测量设备的工作频率范围应覆盖适当的 RNSS 频段。表 2 列出了 RNSS 业务的频率划分—GLONASS (L1, L2, L3)，GPS (L1, L2, L5)，伽利略 (E1, E5, E6)，北斗 (B1, B2, B3)。

表2
划分给卫星无线电导航业务的频段

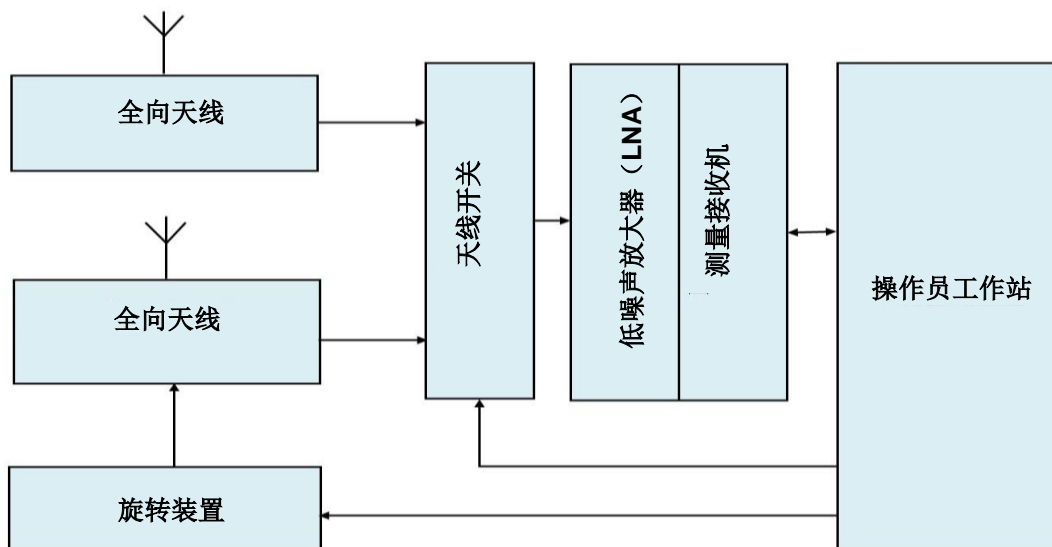
编号	频段 (MHz)
L1, E1, B1	1 559-1 610
L2, E6, B3	1 215-1 300
L3, L5, E5, B2	1 164-1 215

监测设备包括以下元素：

- 定向测量天线，安装在带有转台的三脚架上；
- 全向天线（可选）；
- 天线开关；
- 低噪声放大器（可选）；
- 带通滤波器（可选）；
- 测量接收机或频谱分析仪；
- 记录测量坐标的导航接收机；
- 带遥控接口的计算机。

图 5 显示了设备的框图。

图5
测量设备框图



有关允许干扰电平的信息可以从 ITU-R M.1902、ITU-R M.1093 和 ITU-R M.1905 建议书中获得。这导致：

- 在1 kHz带宽内的接收机灵敏度应为-115... -119 dBm；
- 1 Hz带宽（DANL）中的接收机噪声应为-155... -160 dBm。

2.2 对测量设备的要求

设备要求基于在 RNSS 频段中使用的经验以及 ITU-R SM.1753 建议书中规定的要求。之所以使用实时频谱分析仪，是因为与扫描分析仪相比，它们可以检测、显示和记录短时脉冲事件。

使用以下天线类型：

- 定向：如果感兴趣的是地面信号源，则是用于方位角扫描的喇叭天线或抛物面天线；
- 定向：抛物面天线，用于方位角和仰角扫描（如果感兴趣的信号来自空中和空间源）；
- 全向：用于总览扫描的偶极或双锥形天线（辅助设备）。

如果可能，测量天线的极化应与受保护的 RNSS 系统的极化相匹配。如果使用带馈线的抛物面天线，则极化方向会因反射器而改变：通常，RNSS 是右旋圆极化（RHCP）。当将波从反射器引导到碟形天线时，这将变为左旋圆极化（LHCP）。

3 RNSS频段监测的实例

本示例演示了在 1 597-1 607 MHz 频率范围内特定测量位置的监测。它演示了测量设置以及记录和评估测量数据的过程，包括绘制和解释结果图。感兴趣的 RNSS 系统是 GLONASS。

3.1 监测GLONASS频段的测量设备

以下设备用于测量：

- 1 频谱分析仪：
 - GLONASS L1频段1 597-1 607 MHz，
 - 分辨率带宽（RBW）– 1 kHz，
 - 检测器类型 – 平均，
 - 频谱平均数 – 100。
- 2 测量喇叭天线：
 - 极化 – 线性垂直，
 - 天线高度 – 2.85 m，
 - 仰角 – 0°，
 - 天线方位角 – 0°至360°，步长为15°。
- 3 测量抛物面天线，直径 – 2 m。
- 4 比较全向天线：
 - 极化 – 线性垂直，
 - 天线高度 – 2.85 m。

3.2 测量点

所选的测量点在具有低和中高建筑物的城镇中。

3.3 频率指配分析

根据频率规划和频率指配数据库，预计在 RNSS 频段中没有活动的地面发射机。

3.4 执行测量，记录频谱并计算特征值

在测量现场，通过使用喇叭对方位角进行扫描（“方位角扫描”）来分析频谱。另外，使用全向天线进行测量。最后，使用抛物面天线对半球进行扫描（“仰角扫描”）。之后，计算出特征值（参见第 1.3.1 至 1.3.3 节）。监测的频率范围是 GLONASS L1 频段（1 597-1 607 MHz）。

3.4.1 方位角平面上记录的值

方位角扫描的结果如表 3 所示，并进一步总结于表 4 中。全向天线的结果如表 5 所示。两个表中的数据合并到图 4 中。

表3

使用定向天线观测到的频谱特性

方位角 (度)	峰值发射功率 (dBm)	平均发射功率 (dBm)	噪声功率 (dBm)
0	-121.0	-136.1	-136.5
15	-120.7	-136.0	-136.6
30	-118.1	-136.1	-136.6
45	-119.7	-135.8	-136.6
60	-114.2	-136.1	-136.6
75	-113.0	-136.2	-136.7
90	-124.0	-136.3	-136.7
105	-120.0	-136.1	-136.7
120	-125.1	-136.2	-136.7
135	-130.2	-136.2	-136.7
150	-115.0	-136.2	-136.7
165	-130.6	-136.2	-136.7
180	-123.7	-136.1	-136.7
195	-124.3	-136.2	-136.7
210	-122.2	-136.3	-136.7
225	-125.4	-136.6	-136.7
240	-120.5	-136.6	-136.7
255	-127.3	-136.6	-136.7
270	-130.2	-136.6	-136.7
285	-125.0	-136.5	-136.7
300	-125.7	-136.3	-136.7
315	-121.9	-136.0	-136.6
330	-121.4	-135.9	-136.6
345	-121.6	-136.2	-136.7

表4

测量期间获得的最大、最小和平均值

功率类型	峰值发射功率 (dBm)	平均发射功率 (dBm)	噪声功率 (dBm)
平均值	-120.1	-136.2	-136.7
最大值	-113.0	-135.8	-136.5
最小值	-130.6	-136.6	-136.7

表5

使用全向天线观测到的频谱的特性

参数	实测值 (dBm)
频段内的峰值信号功率	-118.7
频段中的平均功率	-130.5
噪声功率	-134.4
接收机噪声功率	-136.4

3.4.2 在仰角/半球扫描中记录的值

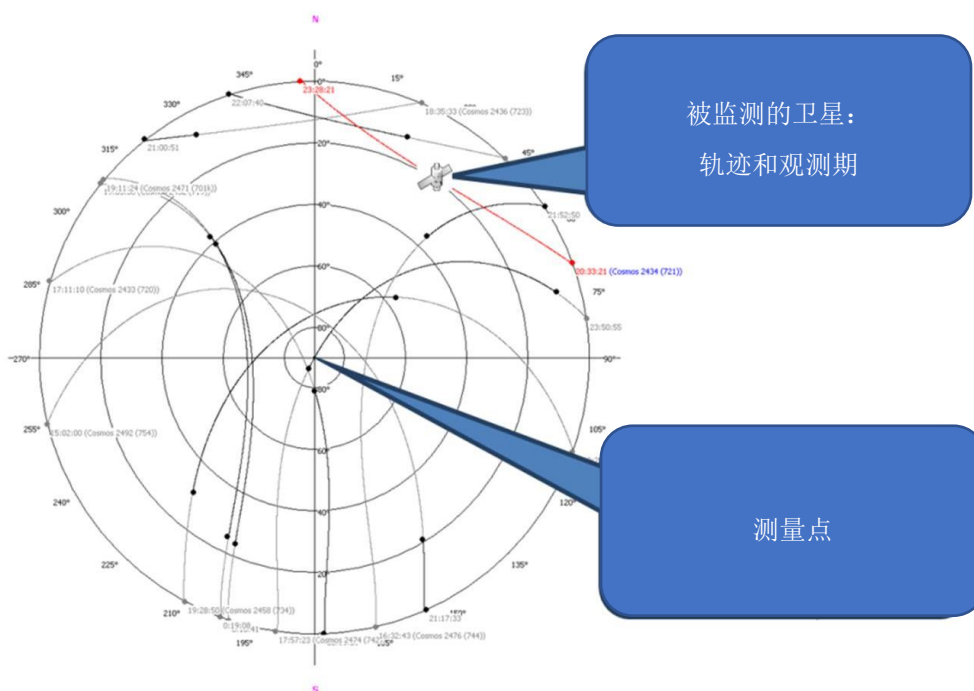
抛物面天线的测量结果非常适合分析来自地面、航空和空间发射源的信号。如果需要对整个半球进行分析，则需要更多的记录和天线角度。

在测量过程中，使用 GLONASS 卫星 Cosmos-2434 (721) 跟踪了无线电可见度期间的轨迹数据，该卫星的轨迹在图 6 中以红色显示。所有其他 GLONASS 卫星均用黑色标记。这些点表示卫星在测量位置进出视野的位置。

另外，图 6 显示了在测量过程中，使用以测量位置为中心的方位/仰角坐标系，所有具有无线电可见度的 GLONASS 卫星的轨迹。黑点表示在测量时间内卫星无线电可见度的起点和终点。

图6

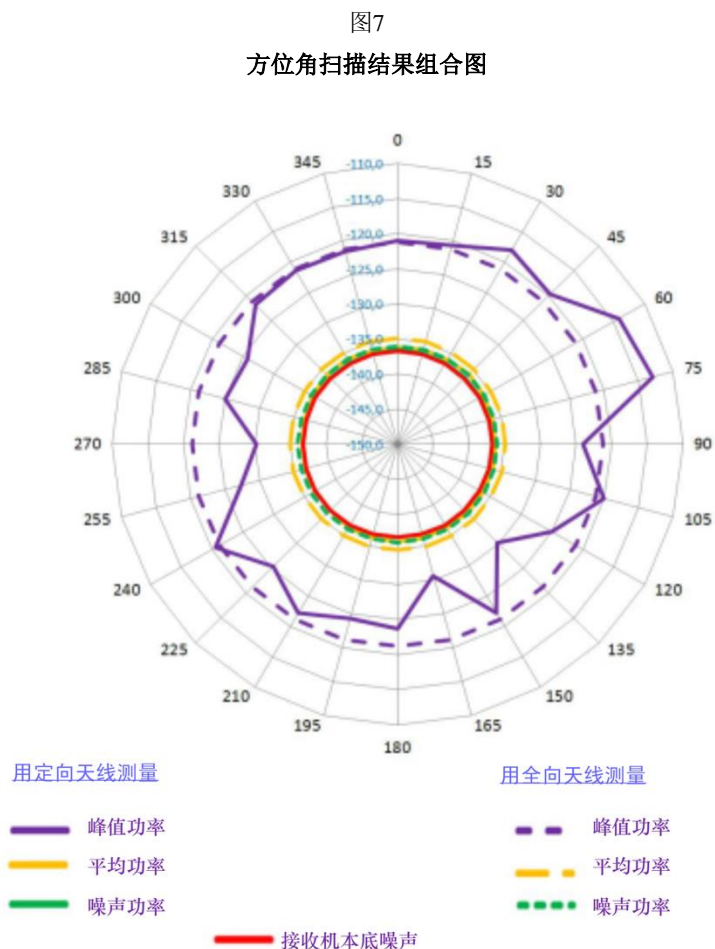
测量期间GLONASS卫星的轨迹



3.5 图表绘制和结果分析

3.5.1 方位角扫描的图表和结果解释

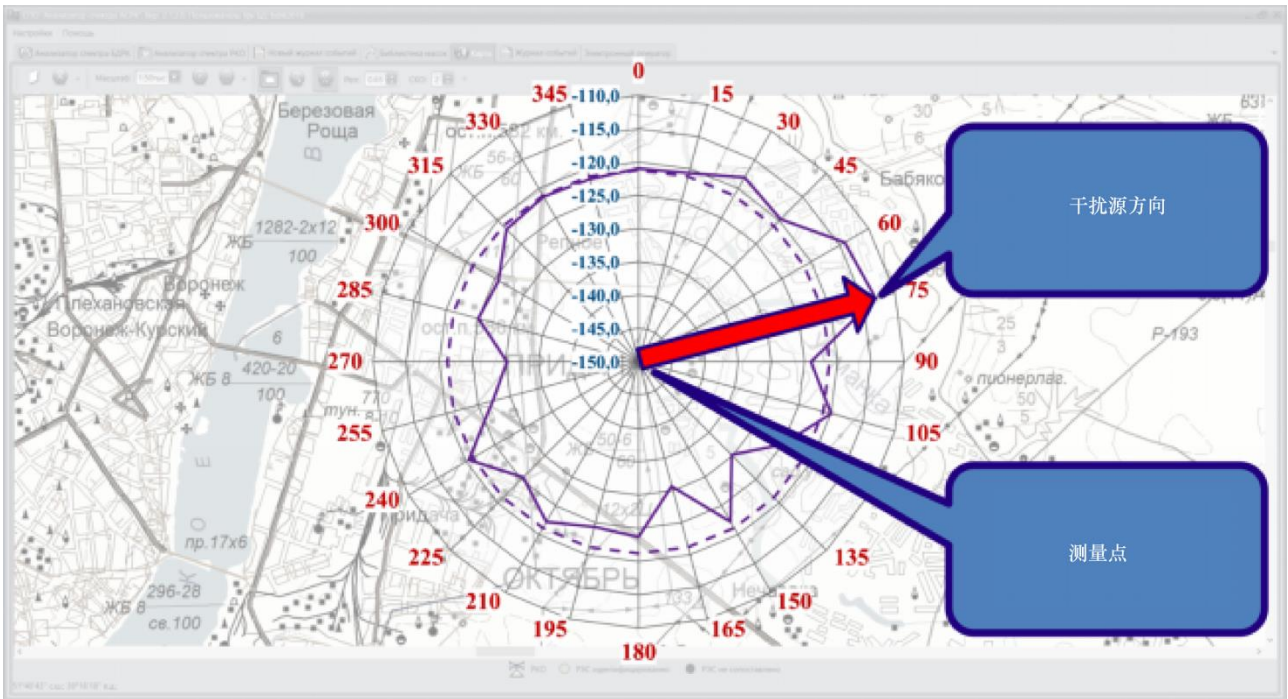
图 7 将表 3 和表 4 的数据合并到一个图中。



该图显示了在 60°-75° 度方向上的明显峰值。图 8 显示了覆盖在数字地图上的图表，该图表清楚地显示了发射和干扰源的存在以及方向。发射和干扰源的方向由数据中的最大值确定。

图8

数字地图上的结果表明了潜在干扰源的方向



由于预计不会在 60° - 75° 方向上发生主动传输，因此将更详细地检查频谱记录。图 9 显示了在测量位置沿峰值电平方向的 L1 频段频谱。峰值电平比平均电平高约 17 dB。

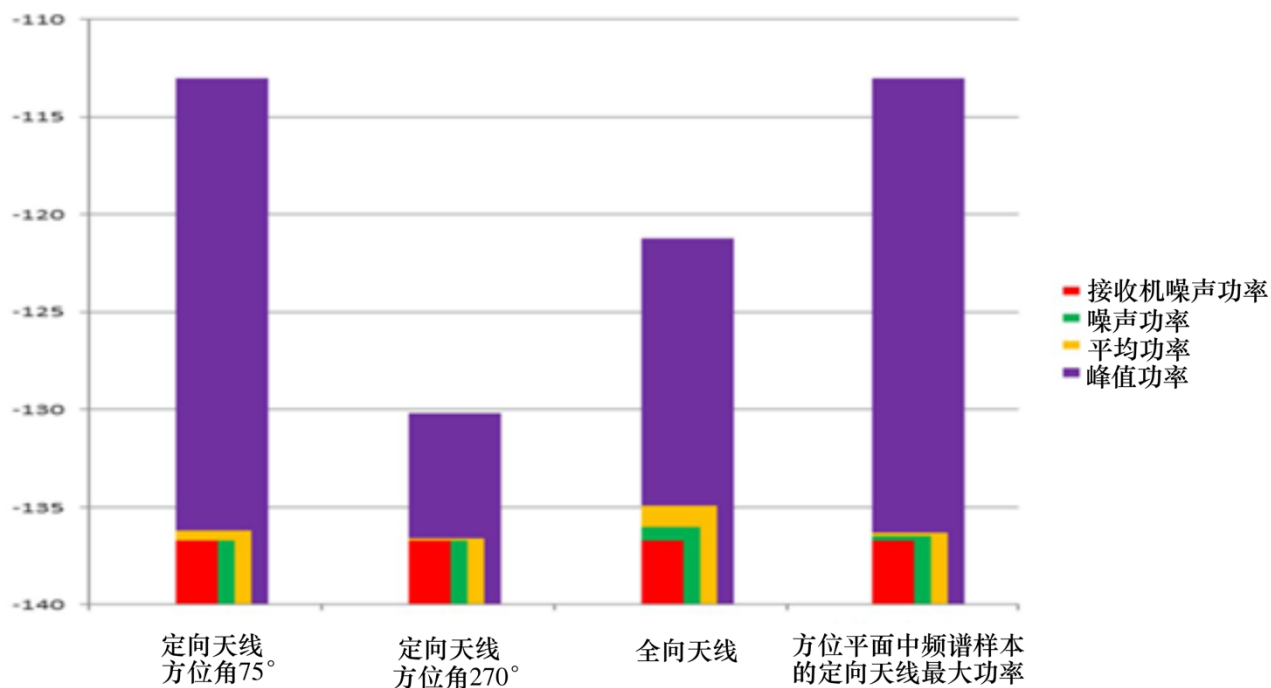
图9

GLONASS L1频段的频谱（定向天线，方位角75°）



图 9 显示了定向天线和非定向天线的频谱测量结果。

图10
GLONASS L1频段的特征接收电平汇总

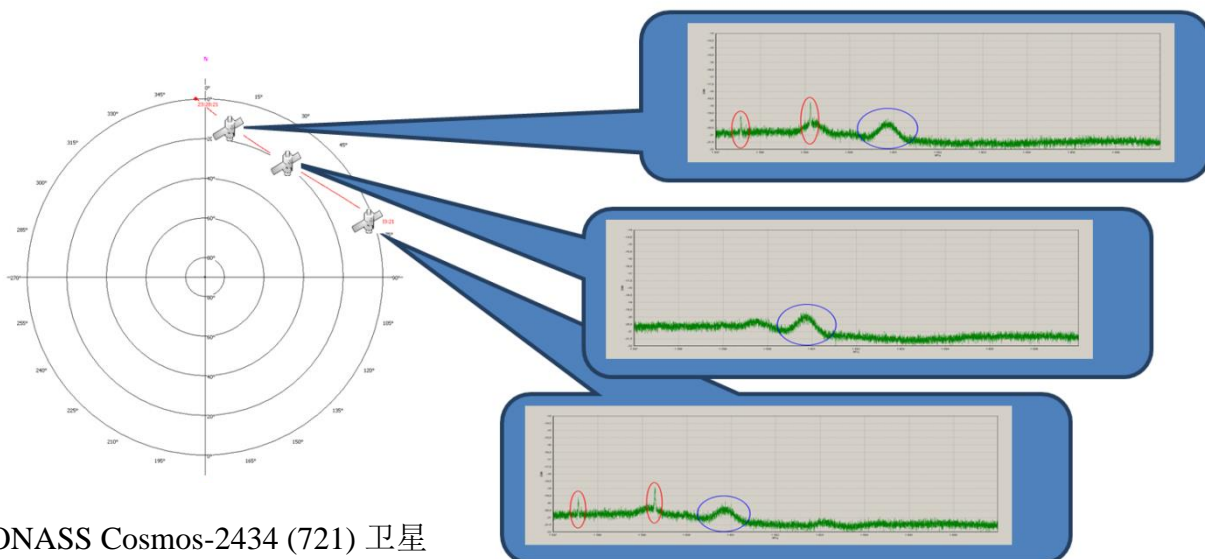


3.5.2 半球扫描的图表和结果解释

图 11 显示了相对于 GLONASS 卫星三个方位角的 1 597 至 1 607 MHz (GLONASS L1) 频段中的频谱。在绘制的频谱中，来自监测的 GLONASS 卫星的信号用蓝色圆圈标记。图 10 还显示了在小仰角处接收到的干扰发射频谱 (标记为红色圆圈)。

图11

GLONASS L1频段1 597-1 607 MHz中相对于
GLONASS卫星三个方位角的频谱



GLONASS Cosmos-2434 (721) 卫星

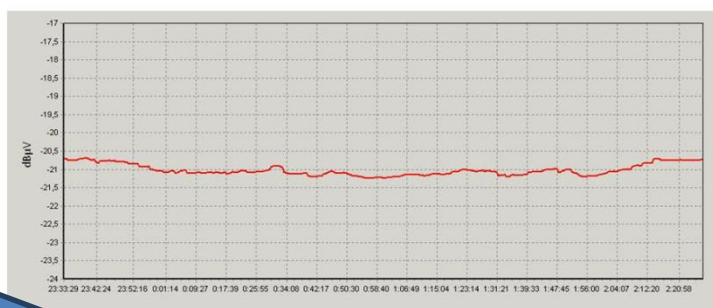
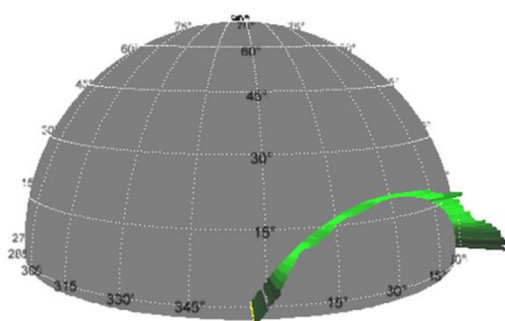
图 12 表示在两个坐标系中沿监测卫星方向记录的平均值的组合：

- 具有“方位角/仰角/发射电平”坐标的3D半球图。发射电平以绿色显示。半球以测量点为中心；
- 具有“观测期内频段内发射电平与时间的关系”的二维图，其中每个时间值对应于朝向被监测卫星的特定方位角和仰角。

图12

1 597-1 607 MHz频段（GLONASS L1）内的发射平均值的组合

观测期内被监测卫星的
平均发射电平与时间的关系



GLONASS Cosmos-2434 (721) 卫星

半球位于
测量位置的
中心

上图中增加的电平表示可能的干扰源，这可能是由于抛物面天线指向地平线而导致的背景噪声电平增加所致。

图 13 显示了使用抛物面天线测得的 1 597-1 607 MHz 频段中平均电平的 3D 图。结果以两种方式显示：

- 具有“方位角/仰角/发射电平”坐标的3D半球图；绿色箭头的长度表示由频谱分析仪测得的功率电平。半球位于测量位置的中心。
- 在“方位角/仰角/发射电平”平面中的3D图，其中球坐标被映射到一个平面上；电平映射到一个色标（深红色表示最大发射值，浅绿色表示最小值）。

给定频段中的平均发射电平图显示了在测量期间，来自空域或外层空间的具有一定的方位角和仰角的高发射电平。

图13

在整个半球上测量的L1频段的最大接收电平

