

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R SA.1014-3 建议书
(07/2017)

载人和无人深空研究的无线电通信要求

SA 系列
空间应用和气象



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或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号决议的附件1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/en>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 系列建议书

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

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
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

说明： 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2018年，日内瓦

© 国际电联 2018

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 SA.1014-3 建议书

载人和无人深空研究的无线电通信要求

(1994-2006-2011-2017年)

范围

本建议书简要描述了空间研究业务（深空）无线电通信的基本特性。这些特性将影响或决定候选频段的选择、协调、频段共享和干扰保护。

关键词

深空，无线电通信，遥测，遥令，数据速率，地球站，空间电台，测距，无线电科学

相关建议书和报告

ITU-R SA.1015建议书、ITU-R SA.2167号报告、ITU-R SA.2177号报告。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 地球与深空空间站间的无线电通信具有独特的需求；
- b) 这些要求会影响候选频段选择、频段共享、协调、干扰保护以及其它规则和频率管理问题，

建议

空间研究业务（深空）及其与其它业务间的相互关系应考虑附件中有关深空无线电通信要求与特性的描述。

附件**载人和无人深空研究的无线电通信要求****1 引言**

本附件介绍了深空研究任务的某些特性，以及在以航天器为手段开展深空研究时对无线电通信提出的功能与性能要求，此类任务所采用的技术方法和系统参数。

有关带宽特性和要求的考虑，请参见ITU-R SA.2177报告。

2 无线电通信要求

深空任务要求在长时间和长距离的情况下确保高度可靠的无线电通信。例如收集有关海王星科学数据的航天器，将历时八年且要求在 4.65×10^9 公里的距离上提供无线电通信。由于深空研究所需无线电通信距离超长，因此地球站的等效全向辐射功率（e.i.r.p.）很高且接收机十分敏感。

目前持续使用的空间研究业务（深空）无线电通信频段是针对一批执行中的任务以及正在规划中的任务。由于许多太空任务耗时几年，且经常会同时执行若干项任务，因此在任何时候都需要相应地与几个航天器进行无线电通信。

此外，各项任务都有可能包括一个以上的航天器，因此有必要同时与几个空间站进行无线电通信。另外，可能还需要协调空间站与几个地球站同时进行无线电通信。

2.1 遥测要求

遥测用于从深空发射维护 and 科学数据。

为确保航天器的安全和任务的成功，必须确保在必要时能够接收到有关航天器状况的维护遥测数据。这便需要一条不受天气影响的、具备足够容量的无线电通信链路。此项要求是确定深空研究优选频段的决定因素之一（见ITU-R SA.2177报告）。

科学遥测的内容包括发送航天器所载科学仪器收集的数据。对于特殊仪器与测量，所需数据速率和可接受的误码率可能大不相同。表1中包括了科学与维护遥测所需的最大数据传输速率。

表 1
深空研究所需的最大比特率

方向和功率	链路特性		
	不受天气影响	正常	高数据速率
地对空			
遥控 (bit/s)	1 000	1 000	2 000
计算机程序 (kbit/s)	50	100	200
音频 (kbit/s)	45	45	45
视频 (Mbit/s)	4	12	30
空对地			
维护遥测 (bit/s)	500	500	2×10^5
科学数据(kbit/s)	115	500	3×10^5
音频 (kbit/s)	45	45	45
视频 (Mbit/s)	0.8	8	30

随着新设备和技术的出现，遥测链路的容量也在稳步提升。容量的上升被用于两个方面：

- 在特定星球或距离收集更多数据；并且
- 将有益的探索延伸到更远的星球。

对于某特定遥测系统，可实现的最大数据速率与无线电通信距离的反平方成比例。在木星附近（ 9.3×10^8 公里）可提供134 kbit/s数据速率的链路容量，在金星附近（ 2.58×10^8 公里）可提供1.74 Mbit/s的数据速率。由于更高的数据速率需要更宽的传输带宽，有效利用最大遥测容量的能力取决于已划分频段的宽度，以及地球站波束宽度内（并在相同频带内工作）同时执行任务的航天器数量。

现在的编码方式允许使用更低的信噪比，而这种编码方法的进步是对遥测工作的一项重要贡献。编码信号需要更宽的传输带宽。超高数据速率使用编码遥测可能会受到划分带宽的限制。

2.2 遥控要求

遥控链路的主要要求是可靠性。在需要时必须能够准确地接收到指令。通常要求遥控链路的比特误码率不大于 1×10^{-6} 。不论航天器的方向如何，甚至在主增益天线并未指向地球的情况下，也必须能够成功地接收到指令。对于这种情况，需要使用近似全向的航天器天线。由于航天器的天线增益低，又需要提供高可靠性，因此需要高e.i.r.p.。

鉴于航天器上安装了计算机，航天器系统的自动排序和操作基本上已经预定，并存储于航天器内供将来操作时使用。对于某些复杂的顺序，自动操作是必要条件。为正确观测到航天器变化或功能失常，若要在飞行途中改变存储指令，则需具备发送遥控的能力。对行程很长的任务，以及排序有赖于早期航天器取得的成果的情况，这一点尤为重要。例如，航天器路线更正指令是基于跟踪测量且无法预先确定。

表1中给出了所需指令数据速率的范围。

可靠的遥控要求有可靠的维护遥测，用以验证指令得以正确的接收且被载入指令库。

2.3 跟踪要求

跟踪可为航天器导航和无线电科学研究提供信息。

2.3.1 导航

导航跟踪测量包括无线电频率的多普勒频移，测距信号往返所需的传播时间，长基线干扰测量信号的接收。测量精确度的制定必须能够满足导航的要求。测量精确度受下述因素变化的影响，即传播速度、台站位置的信息、计时的精确性、地球站和空间站设备的电子电路时延。表2所列示例是目前对导航精确性及相关测量的要求。

表2
导航与跟踪要求

参数	值
导航精确度(m)	300 (木星)
多普勒测量的精确度 (Hz)	± 0.0005
距离测量的精确度(m)	± 0.15
地球站位置的精确度 (m)	± 1
测距（地对空和空对地）码片速率*	
不受天气影响 (MChip/s)	1
标称 (MChip/s)	10
高速率 (MChip/s)	24

* 伪随机噪声（PN）码序列的发射或接收脉冲速率用于测距。

2.3.2 无线电科学

航天器无线电通信链路对传播、相对论、天体力学和重力学的研究可能亦很重要。振幅、相位、频率、极化和时延测量将提供所需的信息。对这些内容进行测量的机会取决于相应划分的可用性。在1 GHz以上，传输时延与法拉第旋转（带电粒子与磁场效应）随频率上升而迅速下降，因此最好用较低的频率进行研究。较高频率受这些影响相对较小，且更适用于相对论、重力学和天体力学的研究。对这些研究，还需要对较低频率产生的带电粒子效应进行校准。

这一基础科学工作需要使用绝对精度可达1至2厘米的距离测量值。这一精度取决于宽带编码以及在对带电粒子校准的同时使用多种频率。

2.4 载人深空任务的特殊需求

此类任务的功能需求与无人深空任务相似。但航天器内搭载宇航员将对遥测、遥控和跟踪功能提出更高的要求。在必要可靠性的基础上，载人与无人深空飞行任务的重要区别在于，地对空和空对地无线电通信中音频与视频链路的使用。表1列出了这些功能的数据速率。

从无线电通信的角度看，这些额外功能所产生的影响便是要求扩大传输带宽，以容纳视频信号。在必要的链路可靠性和支持所需数据传输速率性能的基础上，用于载人和无人深空研究的无线电通信具有相似性。

3. 技术特性

3.1 空间研究业务（深空）地球站的位置和特性

表3列出了一些地球站的位置，这些地球站具备在为深空研究划分的频带内工作的能力。

表3
空间研究业务（深空）地球站的位置

主管部门	位置	纬度	经度
中国	喀什	38° 55' N	75° 52' E
	佳木斯	46° 28' N	130° 26' E
欧洲航天局	塞布利洛斯（Cebreros）（西班牙）	40° 27' N	4° 22' W
	马拉格（Malargüe）（阿根廷）	35° 46' S	69° 22' W
	新诺卡（New Norcia）（澳大利亚）	31° 20' S	116° 11' E
德国	魏尔海姆（Weilheim）	47° 53' N	11° 04' E
乌克兰	伊帕托里亚（Evpatoriya）	45° 11' N	33° 11' E
俄罗斯	梅德维奇（Medvezhi ozera）	55° 52' N	37° 57' E
	双城子（Ussuriisk）	44° 01' N	131° 45' E
日本	白田（Usuda）长野	36° 08' N	138° 22' E
	内浦（Uchinoura）	31° 15' N	131° 04' E
美国	堪培拉（澳大利亚）	35° 28' S	148° 59' E
	金石（Goldstone）加利福尼亚（美国）	35° 22' N	115° 51' W
	马德里（西班牙）	40° 26' N	4° 17' W
印度	拜阿拉鲁（Byalalu）	12° 54' N	77° 22' E

这些地点都有一个或多个天线、接收机和发射机，用于空间研究业务（深空）链路的一个或多个已划分频段。表4中列出了能够定义一个或多个电台最高性能的主要参数。尽管这些特性并不适用于所有电台，但根据可用的最大性能来进行频段划分，并制定干扰保护标准仍然至关重要。为执行和保护国际空间研究业务（深空）任务，需要这些参数。

表4

70米天线的空间研究业务（深空）地球站的特性

频率 (GHz)	天线增益 (dBi)	天线波束 宽度 (度)	发射机 功率 (dBW)	等效全向 辐射功率 (e.i.r.p.) (dBW)	接收系统 噪声温度 (K)	接收系统 噪声功率谱 密度 (dB(W/Hz))
2.110-2.120 地对空	62	0.14	50 56 ⁽¹⁾	112 118 ⁽¹⁾	—	—
2.290-2.300 空对地	63	0.13	—	—	25 ⁽²⁾ 21 ⁽³⁾	-214 ⁽²⁾ -215 ⁽³⁾
7.145-7.190 地对空	72	0.04	43	115	—	—
8.400-8.450 空对地	74	0.03	—	—	37 ⁽²⁾ 27 ⁽³⁾	-213 ⁽²⁾ -214 ⁽³⁾
31.8-32.3 空对地	83.6 ⁽⁴⁾	0.01 ⁽⁴⁾	—	—	83 ^{(2) (4)} 61 ^{(3) (4)}	-209 ^{(2) (4)} -211 ^{(3) (4)}
34.2-34.7 地对空	84 ⁽⁴⁾	0.01 ⁽⁴⁾	30 ⁽⁴⁾	114 ⁽⁴⁾	—	—

(1) 仅在航天器发生紧急情况时使用的56 dBW发射机功率。

(2) 晴好天气，30°仰角，发射与接收同时进行的双工模式。

(3) 晴好天气，30°仰角，仅进行接收。

(4) 估计。

空间研究业务（深空）地球站的接收性能通常用比特噪声谱密度（用于给出某种特定的比特误码率）与信号能量比来定义。另外一种显示这些电台的高性能与灵敏度的方式是天线增益与噪声温度比。比值的商通常被称为 G/T ，且在2.3 GHz时其值约为50 dB/(K)，8.4 GHz时其值约为59.5 dB/(K)。这些值与某些卫星固定业务地球站较低的、典型值（41 dB/(K)）相近。

3.2 空间站

航天器的尺寸和重量受发射工具有效载荷的限制。与地球站对应参数相比，空间站发射机的功率以及天线的尺寸都受到了限制。由于通常会使用未经冷却的前置放大器，接收机的噪声温度会更高。

空间站装有一种名为转发器的收发两用设备，可在任意一种模式下工作。在转向（亦称双向）模式下，从地球站接收的载波信号被用于控制锁相信号循环振荡器。然后，根据固定的比率，此振荡器的频率将被用于控制转发器的发射频率。在单向模式下，航天器发射频率受晶体振荡器的控制。

在双向模式下，由于从地球站接收到的信号异常精确，因此可以十分精确地控制航天器的发射频率及相位。

表5列出了深空研究空间站典型的主要特性。

表 5
深空研究空间站的典型特性

地对空 频率 (GHz)	天线直径 (m)	天线增益 (dBi)	天线波束 宽度 (度)	接收机噪声 温度 (K)	接收机噪声 谱功率密度 (dB(W/Hz))
2.110-2.120	3.7	36	2.6	200	-206
7.145-7.190	3.7	48	0.64	330	-203
34.2-34.7	3.7	61	0.14	2 000	-196

空对地 频率 (GHz)	天线直径 (m)	天线增益 (dBi)	天线波束 宽度 (度)	发射机 功率 (dBW)	e.i.r.p. (dBW)
2.290-2.300	3.7	37	2.3	13	50
8.400-8.450	3.7	48	0.64	13	61
31.8-32.3	3.7	59.5	0.17	13	72.5

由于空间站的e.i.r.p.受限，地球站必须装备最敏感的接收机。如果地球站具备超高的e.i.r.p.，则空间站可以使用灵敏度较低的接收机。数据速率要求、尺寸、重量、成本、复杂程度以及可靠性方面的考虑决定了航天器接收机的噪声温度。

空间站发射机的功率主要受航天器所能提供的电功率的限制。

4 深空无线电通信的方法

深空无线电通信的遥测与遥控等功能一般是通过发射调相载波实现的。多普勒跟踪是根据已接收载波的相位相干检测。通过在调制中加入测距信号，则可以实施测距功能。

4.1 载波跟踪和多普勒测量

地面接收到的、由航天器发射的信号频率受到了多普勒效应的影响。测量多普勒频移的方法，以及航天器的对地速度，将通过载波相位跟踪来实现。地球和空间站接收机将利用锁相环和科斯塔斯环跟踪载波信号。使用双向转发器模式时，空间站锁相环中的频率和相位确定一个或多个空对地频率。这将为与地对空频率相关的地球站提供信号，以便实现精确的多普勒测量。

在单向模式中，空对地频率取自转发器中的振荡器，且多普勒测量是基于对振荡频率的先验知识。

4.2 调制和解调

无线电链路使用射频载波的相位调制。基带数字数据信号用于调制子载波，然后再用此子载波来调制射频的载波。方波子载波通常用于遥测；对于遥控，子载波一般为正弦形态。通过对调制指数进行调整，提供所需的载波功率与数据边带功率比。人们选用这一比率来提供最佳的载波跟踪和接收机数据检测。

射频（RF）载波和数据子载波解调是通过锁相环（PLL）来实现的。数据检测通常使用相关性及相应的滤波技术。

载人任务的视频与音频链路可使用其它调制解调技术。通常，在这些情况下会使用宽带效率的（偏移）四相移相键控（QPSK）和高斯滤波最小频移键控（GMSK）调制解调，其中载波跟踪是通过科斯塔斯环而非PLL实施。

4.3 编码

在数字通信链路中，如果增加信息带宽，则可降低误码概率。编码通过特殊的方式将所有数据比特转换成数量更大的编码符号，以增加信息带宽。有些编码类型的示例采用了块编码和卷积码。传输完成之后，可通过与编码类型相匹配的解码流程将原数据恢复。编码传输的性能优势在于其带宽更宽，其范围从3.8 dB（卷积码，比特误码率 1×10^{-3} ）至9 dB以上（为增强编码（turbo coding）速率的1/6）。

4.4 复用

科学与维护遥测的内容可通过时分复用的方式并入一条数字数据流内；亦可将其置于为提供组合调制信号而增加的、独立的子载波上。此外，还可以与遥测或遥控一起添加测距信号。通过对不同数据信号振幅进行调整，在载波与信息边带之间适当地分配发射机功率。

4.5 测距

测距工作是利用双向模式空间站转发器，通过地球站进行的。地对空信号的测距调制将在转发器中复原，并用于调制空对地载波。在地球站，通过发射与接收测距码的对比，将得出与距离相应的传输时延测量结果。

测距精度的一个基本限制便是测量发射与接收编码间时间相关性的能力。目前正在使用的系统采用了最高编码频率，即2062 MHz。假设信噪比足够的情况下，编码时间段为0.485 μ s，且已经实现了1 ns的分辨率。对于双向路径长度，这一分辨率相当于30 cm，范围为15 cm。这能够满足表2对目前导航精确性的要求。

对于无线电科学试验所需的1 cm精确度（见第2.3.2段），至少需要30 MHz的编码频率。当前的SRS深空伪噪声（PN）测距系统使用24 MChip/s的最大码片速率。

4.6 天线增益和指向

对于深空研究中通常使用的抛物线天线，其最大增益受到天线表面与抛物线近似精度的限制。后一种限制将对可能会被某种天线有效使用的、最大频率产生限制。

无论是对地球站天线还是空间站天线而言，制造精度均是表面精确度的一项因素。对于地球站天线，新产生的表面变形均是受风和热的影响。鉴于仰角不同，根据支撑结构硬度的差异，重力会使表面发生变形。

对于空间站天线，其尺寸受到可用质量、发射机可用空间、现有可伸展天线制造技术的限制。热效应会造成空间站天线表面的变形。

天线最大可用增益受到其精确指向能力的限制。波束的宽度须允许指向时产生角度的不确定性。造成反射面变形的所有因素亦会影响指向的精确性。航天器高度控制系统（通常受能够承载的推进器数量的限制）的精确性是空间站天线指向的要素之一。

地球站和空间站对对方位置了解的精度，会影响最小可用波束宽度和最大可用增益。

表6所示为天线性能的典型限制。

表6
目前对精确度和最大天线增益的限制

限制参数	空间站天线		地球站天线	
	参数的典型最大值	最大增益	参数的典型最大值	最大增益
抛物面的精确度	0.24 mm r.m.s., 3.7 m 的抛物面	34 GHz为 61 dBi ⁽¹⁾	0.53 mm r.m.s., 70 m 抛物面	34 GHz为 84 dBi ⁽¹⁾
指向的精确度	± 0.15° (3σ)	56 dBi ⁽²⁾	± 0.005° (3σ)	82.5 dBi ⁽²⁾

(1) 其它频率的增益更低。

(2) 半功率波束天线的增益是指向精确度的2倍。更高增益天线的波束宽度对指向精度而言过窄。

4.7 其它无线电导航技术

多普勒和测距的测量结果将为导航提供基本的跟踪信息。人们还为提高导航的精度开发了其它技术。

4.7.1 带电粒子对传播速度影响的校准

测距与多普勒测量的结果会受到无线电波传播速率变化的影响，而这种变化是因传输路径上自由电子造成的。电子在太空及星球大气层中的密度不同，且在太阳附近密度最大。若未采取相应措施，此类传播速度上的变化会导致导航计算的误差

带电粒子会加快相速度并降低组速度。将距离变化与集成多普勒进行比较，一段时间后，便可以确定带电粒子所产生的影响。对传播速度的影响与无线电频率的平方成反比。这种频率的相关性可用于提高校准的精度。转向测距与多普勒跟踪可在两个或更多独立频段内，利用同时产生的空对地信号实施。各个频段带电粒子产生的影响，以及这一差异被用于提高校准的精度。

带电粒子对相位和群速度以及距离测量的影响见ITU-R SA.2177号报告。

4.7.2 甚长基线干涉测量 (VLBI)

航天器导航的精确性取决于对导航协调系统中地球站位置的准确了解。假设台站位置存在3 m的误差，在地球与土星这种长度的距离上可能会导致700 km的航天器位置计算误差。使用天体射电源（类星体），以天体空间中基本保持不变的一点作为信号源，VLBI可提供一种能够提高台站位置评估水平的方法。类星体信号的记录方法，能够以很高的精度来确定两个相距很远台站的接收时间差。通过若干种测量，台站位置的相对精度可达10 cm。目前2、8和32 GHz附近的频率用于VLBI。

VLBI技术还直接用于测量航天器倾斜角。存在大南/北距离的、准确定位的地球站能够用于测量与航天器的距离。此后，便可以精确地计算倾斜角。

VLBI方法的第三种应用称为DDOR，可用于提高航天器角度位置测量的精度。两个或多个地球站将对航天器信号和类星体信号进行轮换观测。在已知时间、台站位置和地球旋转对接收到的信号影响的情况下，根据天体的参照，可以确定航天器的角位置。开发完成后，这些技术可将目前0.002弧秒的精确度提高10倍（相当于10 nrad）。精度的提高使更精确的导航成为可能，并因此实现更高效的行星轨道插入。

5 性能分析和设计余量

表7所示为性能分析所用的链路预算。下文中的示例为来自木星的高速率遥测。人们还针对遥控和测距进行了类似分析。上文所述地球站和空间站的特性是计算各种无线电通信功能性能余量的基础。

表7

性能预算，木星航天器对地球

任务：木星 / 土星之旅 1977年 模式：遥测、115.2 kbit/s、编码、8.45 GHz载波	
发射机参数	
RF功率 (21 W) (dBW)	13.2
电路损耗(dB)	-0.2
天线增益(3.7 m) (dBi)	48.1
指向损耗(dB)	-0.2
路径参数	
全向天线间自由空间损耗 (dB) (8.45 GHz, 9.3×10^8 km)	-290.4
接收机参数	
天线增益(64 m, 30° 仰角) (dBi)	72.0
指向损耗(dB)	-0.3
天气衰减 (dB)	-0.1
系统噪声功率谱密度 (22.6 K) (dB(W/Hz))	-215.1
总功率摘要	
链路损耗(dB)	-171.1
接收到的功率 $P(T)$ (dBW)	-157.9
载波跟踪性能(双向)	
载波功率/总功率 (dB)	-15.4
接收到的载波功率(dBW)	-173.3
载波门限噪声带宽($B = 10$ Hz) ($10 \log B$)	10.0
噪声功率(dBW)	-205.1
门限值信号/噪声(dB)	20
门限值载波功率(dBW)	-185.1
性能余量(dB)	11.8
数据检测性能	
数据功率/总功率 (dB)	-0.3
数据接收和检测损耗(dB)	-0.5
接收到的数据功率(dBW)	-158.7
噪声带宽 (115.2 kbit/s数据匹配滤波器检测的有效噪声带宽) (dB)	50.6
噪声功率 (dBW)	-164.5
门限值信号/噪声(5×10^{-3} 比特差错率) (dB)	2.3
门限值数据功率(dBW)	-162.2
性能余量 (dB)	3.5

深空任务设计中最为主要的一点是确保遥测性能余量很低 (示例中给出的值为3.5 dB)。余量很低是为了满足从各个航天器最大限度地获取科学数值的需要。安全余量的设计如果增加10 dB，则遥测数据的数量会减少90%。使用小性能余量系统的风险在于该系统可能会受有害干扰的影响，而对于2 GHz以上的频段，则可能会因天气的影响造成可靠性下降。
