

ITU-R S.1759 建议书

**FSS 频带中 HEO 系统空间操作传输对 GSO 网络的干扰的分析及
将会用于设计和操作 HEO 类 FSS 系统的 TT&C 的相应指导方针**

(2006 年)

范围

按照《无线电规则》(RR) 第 22 条的 e_{pf}d 限制, 本建议书提供了 HEO 类 FSS 系统空间操作传输对 FSS 频带中 GSO 网络的干扰的分析。本建议书依照 RR 第 22 条以确保对共频率的 GSO 链路提供足够保护的方式, 也给出了在 HEO 类 FSS 系统的 TT&C 链路的设计和操作中可能考虑采用的一些技术。

国际电联无线电通信全会,

考虑到

- a) 所有的 FSS 卫星都有遥测、跟踪和指令 (TT&C) 的需求;
- b) TT&C 操作是对各种非对地静止卫星轨道 (non-GSO) 中处于转移轨道期间以及正常 (在轨) 操作过程中的 FSS 卫星进行的;
- c) 发起和终止遥控信号传输是受卫星操作者控制的;
- d) TT&C 载波比 ITU-R S.1716 建议书中建议的正常业务载波需要更高的性能可靠性指标;
- e) 在轨道机动过程中, 丢失到一颗卫星的上行链路指令载波及下行链路遥测和测距载波, 或者卫星上发生一个严重故障时, 都会导致丢失卫星;
- f) TT&C 操作功能通常是在空间站所操作的业务频带内而不是在空间操作业务(SOS)频带内提供的, 具有高于 17 GHz 的业务频带的某些空间站可能在低于 17 GHz 的频带内使用 TT&C;
- g) 应该给予 HEO 类 FSS 操作者一些灵活性以便在最合适的频带内的操作 TT&C;
- h) 大多数 HEO 类 FSS 卫星只有在它们是处于离 GSO 链路有大角度间隔的“激活”弧段内时才发送和接收业务载波, 但是把 TT&C 操作也限于那些激活弧段是行不通的;
- j) 依照《无线电规则》(RR) 第 22 条的 e_{pf}d 限制, 在 FSS 频带中, 可能有几种可能性来克服操作 HEO 类系统的 TT&C 链路所遇到的挑战, 同时对操作在这些频带内的 GSO 系统给予适当保护,

认识到

- a) 在依照 RR 第 22.2 款的频带中,有必要确保 HEO 类上行链路和下行链路 TT&C 传输不会对 GSO FSS 和 BSS 网络造成不能接受的干扰;
- b) 在 RR 第 22 条所确定的某些频带中,要求 HEO 类卫星满足 $epfd$ 限制;
- c) 在除了认识到 a) 中确定的那些频带之外的 FSS 频带中,HEO 类 FSS 系统和 GSO FSS 网络之间的共享要依照 RR 第 9 条第 II 节中的相关规定,

建议

- 1 附件 1 中给出的技术和操作分析及技术手段可以由 HEO 类 FSS 系统的操作者在其 TT&C 系统的设计和操作中考虑采用。

附 件 1

FSS 频带中 HEO 系统空间操作传输对 GSO 网络的干扰的 分析及一些干扰缓解技术

摘要

尽管一颗典型 HEO (此附件中所指的 HEO 系统表示 HEO 类 FSS 系统) 卫星只有当它是在其一个或多个“激活”弧段内时发送和接收业务载波,但是,即使是在这个或这些弧段之外,其 TT&C 载波也必须保持激活,因此,有可能在满足 RR 第 22.2 款时有困难,包括 RR 第 22 条的 $epfd$ 限制(如果适用的话)。在一个样例 HEO 系统中 TT&C 链路的计算仿真获得了克服该问题的多种可能性的证明。

1 引言

近年来,ITU-R 研究组已经收到了许多有关 HEO 系统和 GSO 网络之间干扰的研究结果,通常,这些结果证明了 RR 第 22 条的表 22-1A、B、D 和 E 及表 22-2 中的 $epfd_{\downarrow}$ 和 $epfd_{\uparrow}$ 限制将会被涉及的 HEO 系统所满足。在那些研究中,干扰是对 HEO 系统的业务链路计算的,每个研究都设计成使得所有卫星都顺序地按照一条重复的地面轨迹运行,其远地点位于或靠近最高纬度点,每颗卫星只有当它是在包含远地点的一条“激活”弧段内时才发送和接收。这样一种配置的结果是,在业务链路所涉及的范围内,当卫星正穿过或靠近任何对地静止卫星和地球表面任意一点之间的连线时,没有卫星是正在发射或接收。在最近对 12 种不同的 HEO 轨道配置方案进行的研究中发现,在产生任何 HEO 业务链路传输的地点,到任何 GSO 链路的最小轴外角大于 25° 。典型 HEO 系统的这个特性通常使得它们能够满足 $epfd$ 限制而无需采用额外的干扰缓解技术。

典型地，HEO 系统的“激活”弧段只包含每个轨道周期的 1/4 或者 1/3；在其余部分的时间内，业务链路的连续性是由沿重复地面轨迹运行的其它卫星来维持的。但系统中各颗或每一颗卫星要求在其独有的频率（系统内）上有自己的遥测和遥控载波，并且这些载波需要在卫星在轨寿命期内的任何时候都能够发送。这对于所有类型的对地静止和非对地静止卫星都是正确的，并且不是 HEO 卫星特有的一个特征。很明显，操作一颗只能在每个 12、18 或 24 h 周期的 1/4 或 1/3 时间内发送遥测和遥控载波的卫星是不可行的，并且与 HEO 系统的业务链路不同，很可能的是，可能需要 TT&C 链路在 GSO 链路的“同轴”转换过程中发射。因此，认为有必要在 RR 第 22.2 款的框架内（如果适用的话，包括 RR 第 22 条的 epfd 限制）对 HEO TT&C 链路作单独的评估。此外，也应该注意下列几点：

- 此附件主要集中在 HEO 系统的业务频带而不是空间操作业务（SOS）频带内履行 TT&C 操作上，这是由于现代卫星系统设计通常采用这种方法。RR 第 1.23 款也定义 SOS 如下：“**1.23 空间操作业务**：只与航天器操作有关的一种无线电通信业务，尤其是空间跟踪、空间遥测和空间遥控。这些功能通常是在操作空间站的业务内提供的。”此附件简要探讨了在 SOS 频带内履行 TT&C 操作的可能性。
- 尽管样例 HEO 系统是基于 12-18 GHz 频带（Ku 波段）内的 TT&C 操作，此附件中的结果也适用于在服从 RR 第 22 条的 epfd 限制的其它频带内的 TT&C 操作。
- 对于在不服从 epfd 限制的 FSS 频带内的 TT&C 操作的情况，此附件也有助于分析对 GSO 网络造成的干扰及认定和评估缓解这种干扰的技术。

2 样例 HEO 系统的 TT&C 链路

为了评估引言中概述的问题的性质，构造了一个软件模型，它能够计算来自样例 HEO 系统的 TT&C 链路对各类 GSO 上行链路和下行链路造成的干扰的统计特性。样例 HEO 系统（用 ITU-R 的用语被称为 N-SAT-HEO2）的基本特性如下：

- 3 颗卫星沿相同的地面轨迹运行，在相对于赤道倾斜 45° 的平面内，其升交点在赤道面内相距 120° 的间隔；
- 远地点高度为 39 970 km，其纬度为 45° N，其经度对于 3 个平面是相同的，都是 135° E；
- 近地点高度为 31 602 km，轨道偏心率为 0.099；这个低偏心率导致在整个“激活”弧段内每颗卫星都在对地静止高度之上，并且在穿越赤道时只比对地静止高度低约 412 km。
- 在从北往南的运行过程中，HEO 卫星的地面轨迹在 123.7° E 上与赤道相交，而在从南往北的运行过程中，是在 146.3° E 上与赤道相交；
- 对于业务链路，“激活”弧段是从远地点之前 4 h 延伸到远地点之后 4 h（即卫星纬度高于 26.5° N）；

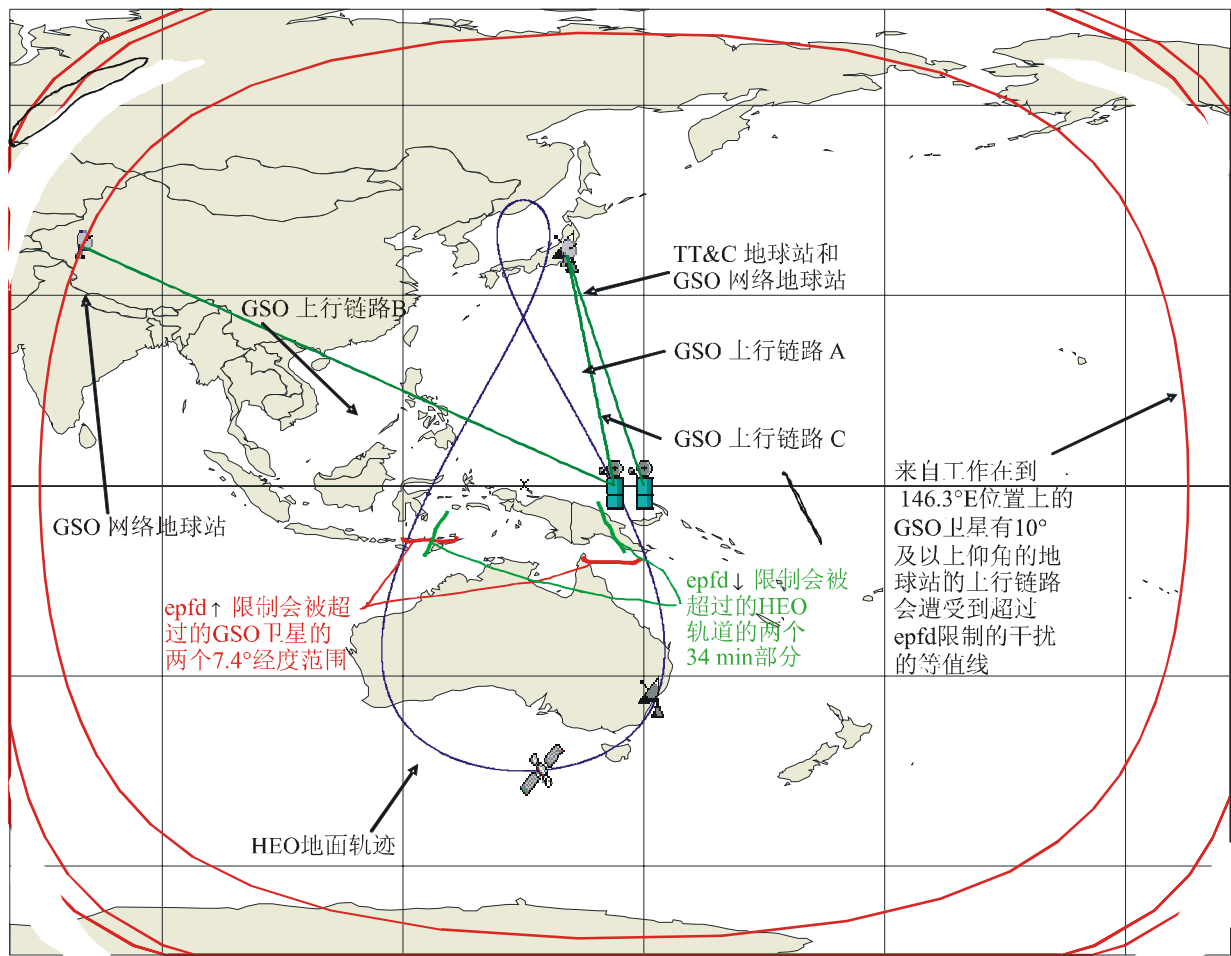
- 在 12 GHz FSS 频带内的各单独载波上, 有 4 个圆极化遥测载波, 即每颗卫星 1 个加上第 4 个作备份, 尽管对于大多数时间, 大部分功率是落在载波中心频率的 ± 20 kHz 内, 但每个载波仍有 605 kHz 的带宽; 这样, 总的下行链路带宽约为 2.5 MHz; 每个遥测载波的卫星 e.i.r.p. 是 7 dBW; 系统设计成每颗卫星都能连续发射其遥测载波;
- 对于 3 颗卫星中的每一颗, 在 14 GHz FSS 频带内的一个单独频率上有一个圆极化遥控载波, 尽管大部分功率正常地还是落在载波中心频率的 ± 20 kHz 内, 但每个载波仍有 600 kHz 的带宽; 这样, 总的上行链路带宽约为 2 MHz; 正常模式下每个遥控载波的 e.i.r.p. 是 50 dBW (应急模式下是 80 dBW); 系统设计成 3 个遥控载波中的每个都可以在任何时间发射; 对每条轨道的大部分时间, 到每颗卫星的遥控载波是从日本的一个 TT&C 地球站 (36.53° N/ 140.39° E) 发射的 (必要时), 但由于近地点对于该地球站是不可见的, 当卫星处于近地点的前后 4 h 内时, 设想由澳大利亚的一个 TT&C 地球站 (33.9° S/ 151.17° E) 负责向每颗卫星发射遥控信号 (和接收遥测信号);
- TT&C 地球站有 10 m 直径的天线, 设计成满足 ITU-R S.580 建议书中的天线方向图, 并且跟踪该卫星直到发射遥控信号; 由于 ITU-R S.580 建议书只提供了从 1° 或 $100 \cdot (\lambda/D)$ (使用较小者, 在此情况中 $100 \cdot (\lambda/D)$ 是较小者) 的方向图, 需要使用其它建议书中的主瓣方向图。此例子中进行的分析, 对主瓣使用了一个修正的 ITU-R S.1428 建议书中的方向图。
- 在每颗卫星上, 用于遥测载波发射和遥控载波接收的波束具有 16 dBi 的峰值增益, 它对应于约 30° 的半功率波束宽度, 并且被做成满足 ITU-R S.672 建议书的模型; 每颗卫星的 TT&C 天线是固定安装在航天器上, 并指向星下点, 除了当卫星指向被控制为保持指向日本时的激活弧段外。

图 1 和图 3 中给出了系统的说明, 从图中可以看到, 3 颗 HEO 卫星是沿着同一条重复的地面轨迹运行, 也给出了日本和澳大利亚的 TT&C 地球站。图 1 举例说明了与 3 条 GSO 上行链路相互干扰的一条遥控载波, 上行链路 A 表示在 HEO 穿越赤道过程中, 由主波束到主波束干扰 (HEO TT&C 地球站对 GSO 卫星) 引起的最差情况; 上行链路 B 表示一条从一个 10° 仰角的 GSO 地球站到一颗最差情况经度下的卫星的链路; 上行链路 C 表示这样一条到 GSO 卫星的链路, 它离两种最差情况经度之一正好足够远从而能够满足 $epfd_{\uparrow}$ 限制。对于上行链路 A 和 C, 注意到 GSO 地球站是与 HEO TT&C 地球站共位置的。对于上行链路 A 和 B, GSO 经度= 146.3° E。对于上行链路 C, GSO 地球站位于 150.0° E 点的东边 3.7° 。

类似地, 图 3 举例说明了与 3 条 GSO 下行链路相互干扰的一条遥测载波, 下行链路 D、E 和 F 与 3 个上行链路具有类似的属性。下行链路 F 有一颗 GSO 卫星和位于赤道上的相应地球站, 都位于经度 121.4° E, 此经度值是计算得到的离 123.7° E (两个最差情况经度之一) 正好足够远 (2.3°) 从而能够满足 $epfd_{\downarrow}$ 限制。对于下行链路 D 和 E, GSO 卫星经度= 123.7° E。下行链路 D 的 GSO 地球站是在赤道上, 也在经度 123.7° E 上。下行链路 E 的 GSO 地球站位于指向 GSO 卫星的仰角为 10° 的一个点上。注意到链路 D 和 F 每个都有 90° 的仰角。

图 1

用于上行链路 epfd 分析的 GSO 轨道位置和地球站位置



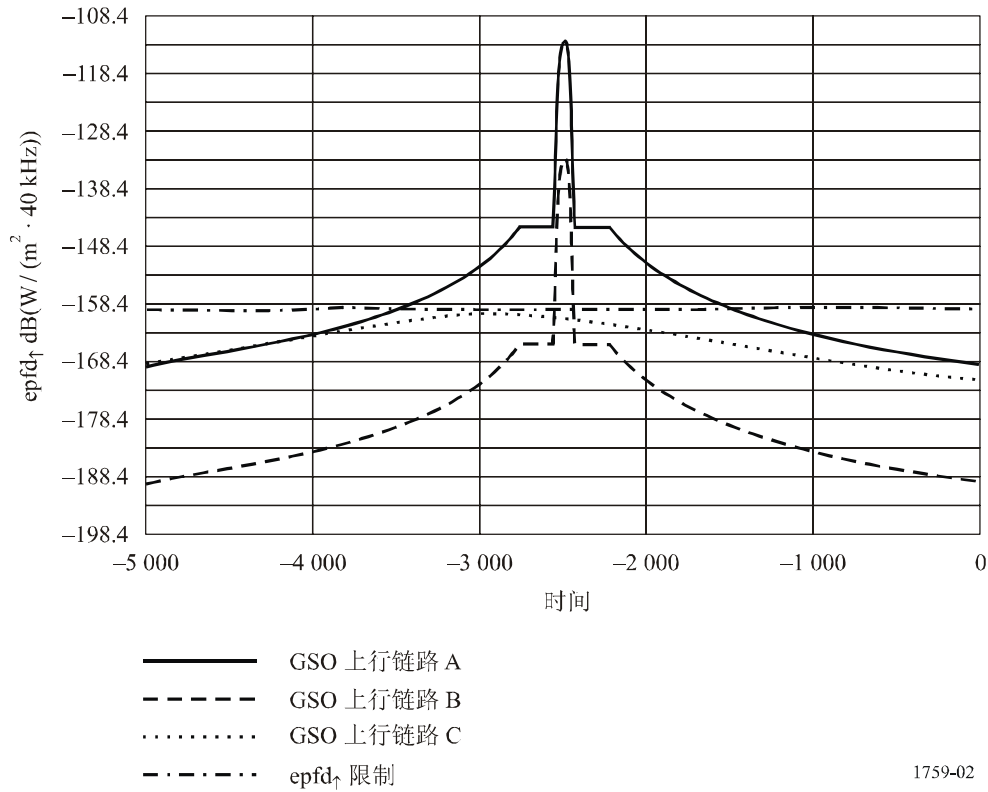
1759-01

注意，为每种情况选择 3 个样例 GSO 链路所蕴含的思想是，涵盖了 epfd 限制将被所涉及 HEO 系统的 TT&C 载波超过的所有情况，除非采取措施避免它。因此：

- 链路 A 是上行链路的最差情况，因为 GSO 卫星位于 HEO 系统穿越赤道的经度点上，这将导致 GSO 卫星周期性地处于高增益的 HEO TT&C 地球站的主波束内；
- 类似地，链路 D 是下行链路的最差情况，因为 HEO 卫星周期性地进入 GSO 地球站接收天线的主波束内；
- 链路 B 和 E 包含在考虑到来自 HEO 系统的干扰的最差情况经度上的各 GSO 卫星，但干扰路径长度对于链路 E 是一个最大值，并且在两条链路中，GSO 地球站都是工作在最低仰角上；以及
- 链路 C 和 F 包含，为了在最短干扰路径上满足相应的 epfd 限制，在经度上离 HEO 赤道穿越点正好足够远的各 GSO 卫星。

图 2 是当其中一颗 HEO 卫星穿越赤道面时上行链路 A、B 和 C 中 epfd_↑ 随时间变化的曲线，图中看到，在前两者中，限制有一段时间被相当大地超过，但在链路 C 的情况中是正好满足。图 4 是 3 条 GSO 下行链路在一个完整轨道周期内 epfd_↓ 统计规律的 CDF，这里可以再次看到，限制罩在链路 D 和 E 中被超过，但在链路 F 中正好满足。

图 2
“同轴”转换过程中 $epfd_{\uparrow}$ 的变化



3 来自样例 HEO 系统 TT&C 的干扰的影响

遥控载波的影响由图 1 来描述，并被量化于图 2 中，并且摘要如下：

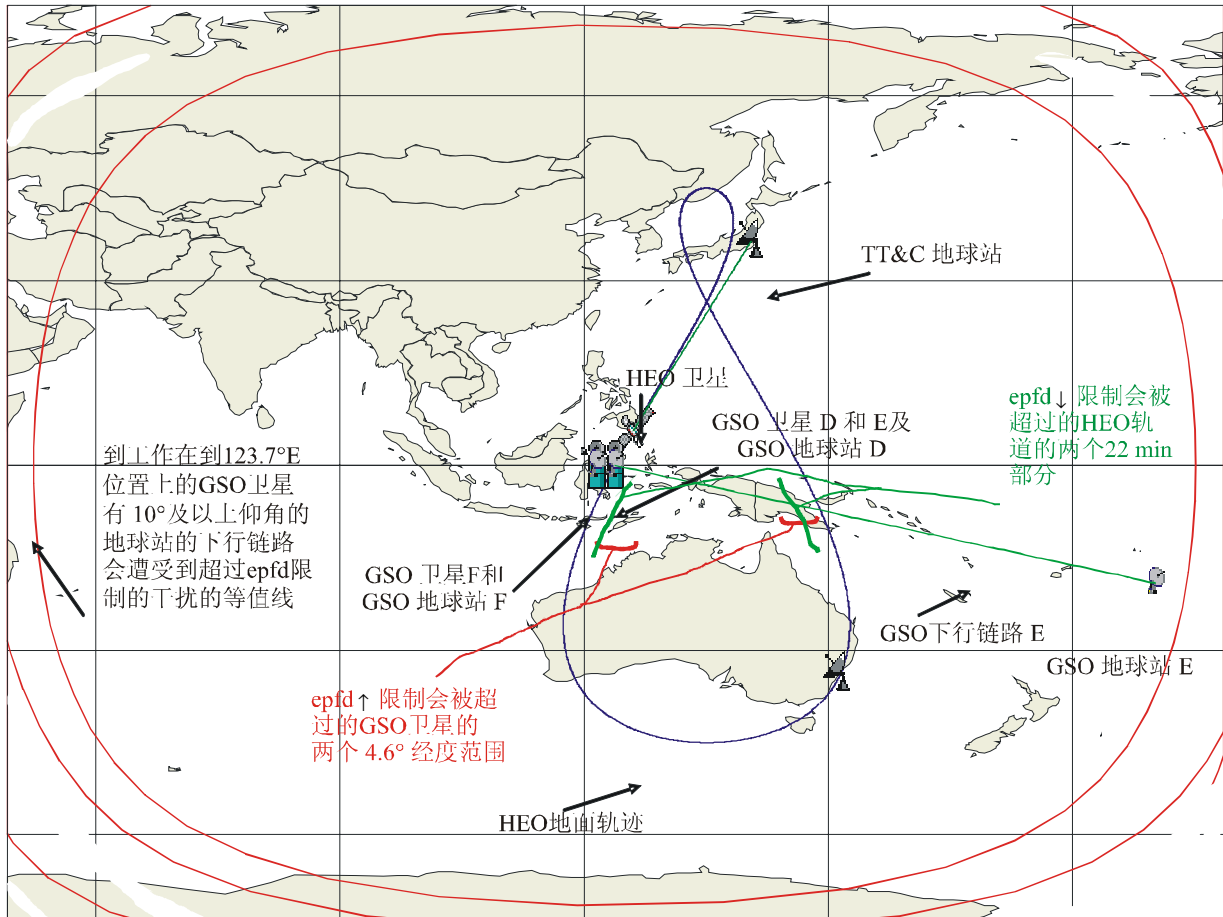
$epfd_{\uparrow}$ 限制在一个约 2 MHz 的总带宽内的某些 40 kHz 子带中会被超过。只有到处于两个 8.0° 范围内经度点上的 GSO 卫星的上行链路会受影响，构成了该区域内约 14% 的可用轨道位置。在这些情况中，在每个轨道周期内有两个最长为 37.7 min 的期间（最多占总时间的 5.25%）该限制会被超过。在最差情况下，在几十分钟的持续时间内，该限制会被超过几十分贝，并且上行链路会受影响的地球站的比例将会是有限的，那些地球站可以在该区域中的任何地理位置上。

遥测载波的影响由图 3 描述，并且量化于图 4 和附件 1 的附录 1（见图 5 和表 1）中，并且摘要如下：

$epfd_{\downarrow}$ 限制罩在约 2.6 MHz 的总带宽内的某些 40 kHz 子带中会被超过。只有来自处于两个 4.6° 范围内经度点上的 GSO 卫星的下行链路会受影响，构成了该区域内约 9% 的可用轨道位置。在这些情况中，对于 1.2 m 的天线，只有在每个轨道周期内有两个最长为 16.5 min 的期间（最多占总时间的 2.3%）该 $epfd_{\downarrow}$ 限制罩才会被超过。在最差情况下，限制罩中的最大 $epfd_{\downarrow}$ 电平（即短的结尾部分）会被超过几分贝，并且限制罩的中间部分会被超过 10-20 dB。尽管其下行链路会受影响的地球站的比例将会是有限的，但那些地球站能够位于该区域内的任何地理位置上。

图 3

用于下行链路 efd 分析的 GSO 轨道位置和地球站位置



1759-03

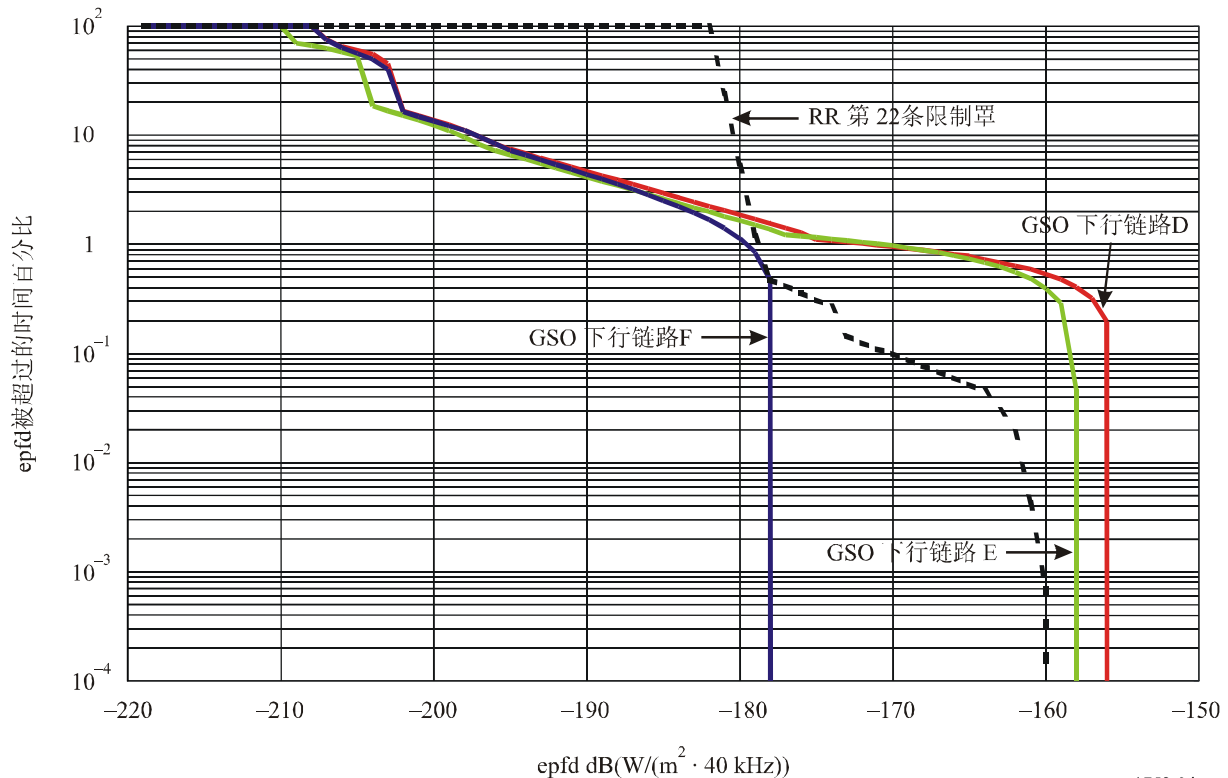
4 缓解潜在干扰的技术

下面两节给出已经被认定为能部分或完全缓解来自 HEO TT&C 上行链路和下行链路传输对 GSO 网络的潜在干扰的技术。对于所研究的每一种技术，给出了如下内容：

- a) 每种技术如何才能被实现，
- b) 每种技术对于 HEO 操作者的潜在优点，及
- c) 对于 HEO 操作者，实现每种技术的潜在挑战和缺点。

在 HEO TT&C 系统的设计过程中，考虑到每种技术的优缺点，包括保持可靠性并降低成本影响的设计挑战，HEO 操作者能够选择实现所认定的干扰缓解技术中的一种或多种。

图 4

对于选择的采用 1.2 m 天线的 GSO 链路的累积 $epfd_{\downarrow}$ 统计特性

1759-04

4.1 上行链路可能性

4.1.1 暂停遥控：如果有可能让去往 HEO 卫星的非紧急的遥控信号在一天中除了图 1 中所标出的紧要期间之外的时间内发送，则干扰是能避免的。如果在一个紧要期间内有必要在一颗卫星上执行一项功能，则可以考虑在紧要期间之前发送指令的可能性，并且把相应的时延与其执行时刻关联起来。

4.1.1.1 实现

- 当前的 TT&C 系统典型地包括控制上行链路遥控指令执行定时的软件功能以便向卫星操作提供灵活性。因此，上述缓解技术能够通过适当地使用此软件功能很容易地实现。
- 有必要在一个紧要期间激活某些指令，这些指令可以在紧要期间之前通过上行链路发送上去，保存在卫星上，并且在适当的时间被激活。

4.1.1.2 优点

- 考虑到上述缓解技术使用了一种已经典型地包括在现代 TT&C 实现中的能力，对于 HEO 卫星及其 TT&C 地球站不要求额外的设备或软件功能。
- 此技术本身向 HEO 遥控链路提供了一种明确表达的含意以便完全满足 RR 第 22 条中的 $epfd_{\downarrow}$ 限制。

4.1.1.3 缺点

- 紧要期间包括 HEO 轨道的升交点和降交点，它们对于站位保持机动是最佳的轨道位置。站位保持机动通常要求在上行链路遥控与下行链路卫星遥测和状态信息之间有一系列实时的交互。在激活卫星推进器之前，通常有必要在 TT&C 地球站上检查实时的遥测信息。其结果是，当卫星是在最佳位置之外几个轨道度时，站位保持机动必须被执行。此操作约束将要求消耗额外的燃料，这将增加 HEO 卫星的重量。

4.1.2 扩频遥控：原则上，通过在 HEO 系统的遥控载波上增加扩频调制来降低 epfd_{\uparrow} 电平是可能的。为了把图 2 中的最大 epfd_{\uparrow} 降低到规则中规定的限制，将要求约 45 dB 的扩展。

4.1.2.1 实现

- 通过在 TT&C 地球站中增加一个扩频 (SS) 调制器及在每颗 HEO 卫星上增加一个 SS 解调器就能实现此干扰缓解技术。
- SS 调制技术的有效使用指出，SS 调制只能用于激活弧段之外，以便不与 HEO 系统的业务链路相互干扰。使用 SS 调制技术会进一步局限于只在紧要期间使用。当 HEO 卫星离开其轨道中的激活弧段（或接近一个紧要期间）时，TT&C 地球站将发送一个指令让卫星切换到 SS 解调方式。当卫星接近激活弧段（或在一个紧要期间之外运行）时，TT&C 地球站就发送一个指令让卫星切换回常规解调方式。利用这种切换操作，SS 调制的带宽只有当卫星是在激活弧段之外的那些时间才需要扩展到业务链路使用的频带内。这个 SS 带宽扩展提供了降低 epfd_{\uparrow} 的可能性。在样例 HEO 系统的情况中，每个遥控载波使用 60 MHz 的带宽就能达到 32 dB 的 epfd_{\uparrow} 下降。如果此技术的实现不能满足 RR 第 22 条的 epfd_{\uparrow} 限制，则需要使用其它的缓解技术。

4.1.2.2 优点

- 利用上述 SS 带宽扩展技术，通常在激活弧段之外不使用的业务上行链路的带宽能被有效地使用以降低 epfd_{\uparrow} 。

4.1.2.3 缺点

- 尽管对于 TT&C 使用 SS 调制不是一种新技术，但目前这不是非常普遍。因此，实现此技术将要求针对 HEO 卫星和 TT&C 地球站开发新的 SS 设备。

4.1.3 地球站分集：原则上，峰值 epfd_{\uparrow} 电平能够通过 TT&C 地球站分集来降低。然而，对于样例 HEO 系统发现，在间隔超过 8 000 km 的两个 TT&C 地球站之间使用最佳切换时刻将降低最大 epfd_{\uparrow} 电平约 15 dB 的同时，该限制仍将被超过许多分贝。

4.1.3.1 实现

- 此干扰缓解技术将要求把 TT&C 地球站设置在相互之间有足够距离的两个或多个位置上。为保持到 GSO 网络有一个足够的间隔角，站切换将根据卫星的位置来执行。

4.1.3.2 优点

- 此方法能够降低最大 epfd_{\uparrow} 电平，并且如果与其它缓解技术联合使用能够潜在地有助于一个 HEO 系统满足 epfd_{\uparrow} 限制。

4.1.3.3 缺点

- 尽管对于 LEO 卫星系统（它具有容易保持到 GSO 网络有足够间隔角的几何）是有效的，HEO 系统的几何在遥控载波将超过 epfd_{\uparrow} 限制的期间内通常不容许到 GSO 有更多的角间隔。因此，此方法对于 HEO 系统的有效性是有限的。
- 具有大的地理间隔的一个或多个额外的 TT&C 地球站（地球站之间必须建立一条可靠的地面通信链路）是需要的，不是所有的 HEO 系统含有此功能。

4.1.4 高增益遥控接收天线：在样例 HEO 系统中，遥控载波是通过一个宽卫星波束（16 dBi 峰值增益）接收的。如果此类系统的业务上行链路是通过一个更高增益波束（比如 30 dBi 峰值增益）接收的，需要考虑到把遥控接收转换到该波束的可能性，这样就能降低 TT&C 地球站 e.i.r.p.（比如 14 dBi），从而会降低相同量的最大 epfd_{\uparrow} 电平。然而，这要求即使是在激活弧段之外也要控制高增益波束，这可能会使卫星设计复杂化。

4.1.4.1 实现

- 通过在 HEO 卫星上包含一副或多副高增益、波束指向可控的 TT&C 接收天线就能实现此干扰缓解技术。这些星上天线将连续跟踪 TT&C 地球站。HEO 卫星将包含使用一种波束切换方法来支持 TT&C 地球站的切换。

4.1.4.2 优点

- TT&C 地球站不需要额外的设备。同时，能够降低 TT&C 地球站所要求的增益。

4.1.4.3 缺点

- 卫星的 TT&C 接收天线必须是一副具有高精度跟踪能力的、能够横跨一个宽指向角的大口径天线。

4.1.5 遥控使用 SOS 频带：如果上面提到的 HEO 系统的 TT&C 传输要使用分配给 SOS 的频带而不是上面提及的频带，就可以消除与 RR 第 22 条的不兼容问题。这样做，在消除与 RR 第 22 条中的 epfd 限制（由于它们在 SOS 频带中不适用）有关的问题的同时，SOS 频带中的物理干扰现象仍是存在的。

4.1.5.1 实现

- 通过在 TT&C 系统（在卫星和地球站上）中安装独立的射频设备（天线、HPA/SSPA、LNA、变频器等）从而使用一个不同于业务链路的频带就能够实现此干扰缓解技术。

4.1.5.2 优点

- HEO 系统 TT&C 操作将不受 RR 第 22 条中 efd 限制的制约。
- 考虑到 SOS 频带是分配在 S 波段或更低的频带中，这更易于保持足够的 TT&C 链路余量。

4.1.5.3 缺点

- 由于 SOS 的每个配置带宽要窄于服从 efd 限制的带宽，与其它系统共享这些频带可能是困难的。
- 卫星和地球站的 TT&C 操作不能够共享用于业务链路的射频设备。

4.1.6 遥控频率选择：考虑到每个卫星系统的 TT&C 上行链路只占用几兆赫兹的带宽，如果所有 non-GSO 系统的遥控载波能够被局限在相同的几兆赫兹频率范围内，则该问题可以简化。

4.1.6.1 实现

- 对于可能的范围，选择的遥控频率应该处于靠近 HEO 赤道穿越点经度的 GSO 卫星的转发器带宽和 TT&C 频带之外。

4.1.6.2 优点

- 考虑到当 HEO 系统提出申请时 GSO 系统已存在，此选项就是直观的。

4.1.6.3 缺点

- 考虑到 HEO 系统是 non-GSO 系统，当前的 RR 不允许在 RR 第 22 条的 efd 限制适用的频带内采用此方法来解决。因此，在此类频带中，这个方法只能限制问题的范围。
- BR IFIC 可能不包含被可能受影响的 GSO 网络所使用的遥控频率的完整信息。

4.1.7 星际链路：如果星际链路是在一个 HEO 系统的卫星之间或 HEO 卫星与数据中继卫星系统之间实现的，则遥控指令能够发送给位于或靠近激活弧段的一颗 HEO 卫星或发送给一颗数据中继卫星，然后再通过星际链路转发给其它卫星。

4.1.7.1 实现

- 通过在每颗 HEO 卫星上增加用于星际 TT&C 链路的额外设备就能实现此技术。

4.1.7.2 优点

- 在任何时间由主 TT&C 地球站指令所有卫星而不对 GSO 网络造成上行链路干扰是可能的。

- 对 TT&C 地球站的影响最小；不需要远端 TT&C 地球站。

4.1.7.3 缺点

- 由于增加用于星际链路及用于星际链路天线捕获和跟踪控制的额外设备而会加重卫星的负担。
- 卫星需要在发生星际链路故障的情况下有一种备份 TT&C 的方法。
- 因为要求 HEO 系统避免对 GSO 网络造成可能会由于 HEO 系统的星际链路几何而引起的干扰，此技术可能会造成额外的设计挑战。

4.2 下行链路可能性

4.2.1 暂停遥测：如果在紧要期间（比如，图 3 中所示的每天的两个 22 min 的期间）内停止来自每颗 HEO 卫星的遥测载波传输是可能的，则就能消除此问题。如果实现了此解决方案，则，如果在其中一个紧要期间内卫星发生了故障，TT&C 地球站上的工作人员就无法意识到故障直到恢复发送遥测载波为止。

附件 1 的附录 1 提供了一种能够用于确定最短的 HEO 遥测关闭时间的迭代方法。这包括确定一颗特定 HEO 卫星的遥测载波被关闭（及打开）的准确的时间/轨道位置以满足相关的 $epfd_{\downarrow}$ 限制。

4.2.1.1 实现

- 当前的 TT&C 系统典型地包括一个能够控制下行链路遥测传输的软件功能，从而为卫星操作提供灵活性。因此，上述缓解技术能够通过适当地使用此软件功能来指令卫星在紧要期间停止遥测传输并且在紧要期间之后立即恢复遥测传输而能容易地被实现。
- 在紧要期间，将由 TT&C 地球站使用轨道预测算法来估计卫星的位置和姿态。

4.2.1.2 优点

- 此技术不要求 HEO 卫星或 TT&C 地球站有额外的设备。
- 此技术本身向 HEO 遥测链路提供了一种明确表达的含意以便完全满足 RR 第 22 条的 $epfd_{\downarrow}$ 限制。

4.2.1.3 缺点

- 在 $epfd_{\downarrow}$ 罩被超过期间 TT&C 地球站不能得到遥测数据。那些期间包括对于站位保持机动是最佳轨道位置的 HEO 轨道的升交点和降交点。站位保持机动通常要求在上行链路遥控与下行链路卫星遥测和状态信息之间有一系列实时的交互。在激活卫星推进器之前，通常有必要在 TT&C 地球站上检查实时的遥测信息。其结果是，当卫星是在最佳位置之外几个轨道度时，站位保持机动必须被执行。此操作约束将需要消耗额外的燃料，这将增加 HEO 卫星的重量。

- 如果在关闭期间发生了 HEO 卫星姿态控制系统的某些故障或影响卫星轨道的任何其它问题，由于停止了遥测传输，卫星操作员在某些时间将不能接收到与该问题有关的可靠数据。这会妨碍卫星操作员采取纠正性行动。
- 暂停遥测导致操作可用度的明显下降。按照 ITU-R S.1716 建议书，14/12 GHz 频带中遥测下行链路的典型可用度是在 99.99%量级，这意味着 0.01%的不可用度。在样例 HEO 系统的情况中，除了由于降雨等因素引起的衰减而导致的不可用度外，由于暂停遥测引起的不可用度是 3.1% ($(22 \text{ min} \times 2)/24 \text{ h} \times 100$)，这要比 ITU-R S.1716 建议书中推荐的典型值恶化超过 300 倍。

4.2.2 扩频遥测：原则上，通过在 HEO 系统的遥测载波上增加扩频调制来降低 epfd_d 统计特性是可能的。以图 4 中结果作为例子，将要求约 20 dB 的扩展才能完全满足最差情况中的限制罩，这将要求每个遥测载波有约 4 MHz 的带宽。另一种可能性也许就是在分配的载波带宽内进行扩频；在目前的例子中，这是 605 kHz，这将允许约 12 dB 的扩展。

4.2.2.1 实现

- 通过在 TT&C 地球站中增加一个扩频 (SS) 解调器及在每颗 HEO 卫星上增加一个 SS 调制器就能实现此干扰缓解技术。
- SS 调制技术的有效使用要求，SS 调制只能用于 epfd_d 电平是紧要的期间。当 HEO 卫星靠近其轨道中的紧要期间时，TT&C 地球站将发送一个指令让卫星切换到 SS 调制方式，当卫星运行到紧要期间之外时，TT&C 地球站就将发送一个指令让卫星切换回常规调制方式。利用这种切换操作，SS 调制的带宽只有当卫星是在激活弧段之外的那些时间才需要在业务链路使用的频带内扩展。这个 SS 带宽扩展提供了降低 epfd_d 的可能性。在样例 HEO 系统的情况中，使用 4 MHz 的带宽就能达到 epfd_d 降低 20 dB。

4.2.2.2 优点

- 利用上述 SS 带宽扩展技术，在激活弧段之外通常不使用的业务下行链路的带宽能被有效地使用，此技术具有无需其它缓解措施而满足 epfd_d 罩的可能性。

4.2.2.3 缺点

- 尽管对于 TT&C 使用 SS 调制不是一种新技术，但目前这不是非常普遍。因此，实现此技术将要求针对 HEO 卫星和 TT&C 地球站开发新的 SS 设备。

4.2.3 高增益遥测发射天线：在样例 HEO 系统中，每个遥测载波是通过一个宽卫星波束（30° 波束宽度）发射的。如果此类系统的业务下行链路是通过一个较高增益波束（比如 6° 波束宽度）发射的，需要考虑到把遥测信号转换到该波束的可能性，从而把 epfd_d 限制超出局限在一个较小的地理区域内。对于样例系统，只有当两个 TT&C 地球站都由较高增益的一个或多个波束覆盖时这才是可行的。然而，这要求即使是在激活弧段之外也要控制高增益波束，这可能会使卫星的技术设计复杂化。

4.2.3.1 实现

- 通过在每颗 HEO 卫星上包含一副高增益、波束指向可控的发射天线就能实现此干扰缓解技术。这些星上天线将在 HEO 轨道的激活弧段部分用于业务下行链路传输。它们将在紧要期间用于遥测下行链路传输，在这些时间上，这些星上天线将连续跟踪 TT&C 地球站。

4.2.3.2 优点

- 任何 TT&C $epfd_{\downarrow}$ 限制超出将被局限到一个较小的地理区域，从而减小可能会受影响的 GSO 地球站的数目。
- TT&C 地球站不需要额外的设备。
- 由于较高的发射天线增益可以降低卫星的发射功率，从而节省星上的功率消耗。

4.2.3.3 缺点

- 卫星的高增益发射天线必须是一副具有高精度跟踪能力的、能够横跨一个相当宽的指向角的大口径天线。
- 即使 HEO 卫星设计已经考虑了业务下行链路的高增益波束，此技术要求即使是在激活弧段之外仍能控制该高增益波束，这可能复杂化卫星的技术设计。

4.2.4 遥控使用 SOS 频带：如果上面提到的 HEO 系统的 TT&C 传输要使用分配给 SOS 的频带而不是上面提及的频带，就可以消除与 RR 第 22 条的不兼容问题。这样做，在消除与 RR 第 22 条中的 $epfd$ 限制（由于它们不适用于 SOS 频带）有关的问题的同时，SOS 频带中的物理干扰现象仍是存在的。

4.2.4.1 实现

- 通过对遥测系统（在卫星和地球站上）安装独立的射频设备（天线、HPA/SSPA、LNA、变频器等）从而使用一个不同于业务链路的频带就能够实现此干扰缓解技术。

4.2.4.2 优点

- HEO 系统 TT&C 下行链路操作将不受 RR 第 22 条中 $epfd$ 限制的制约。
- 考虑到 SOS 频带是分配在 S 波段或更低的频带中，这更易于保持足够的 TT&C 链路余量。

4.2.4.3 缺点

- 由于 SOS 的每个指配带宽是窄于服从 $epfd$ 限制的带宽，与其它系统共享这些频带可能是困难的。
- 卫星和地球站的 TT&C 操作将不能够共享用于业务链路的射频设备。

4.2.5 遥测频率选择：考虑到每个卫星系统的 TT&C 下行链路只占用几兆赫兹的带宽，如果所有 non-GSO 系统的遥测载波能够被局限在相同的几兆赫兹的频率范围内，则该问题可以简化。

4.2.5.1 实现

- 对于可能的范围，选择的遥测频率应该处于靠近 HEO 赤道穿越点经度的 GSO 卫星的转发器带宽和 TT&C 频带之外。

4.2.5.2 优点

- 当 HEO 系统提出申请时，GSO 系统已存在，此选项就是直观的。

4.2.5.3 缺点

- 考虑到 HEO 系统是 non-GSO 系统，当前的 RR 不允许在 RR 第 22 条的 $epfd_{\downarrow}$ 限制适用的频带内采用此方法来解决。因此，在此类频带中，这个方法只能限制问题的范围。当前的 RR 不允许 HEO TT&C 下行链路超过 RR 第 22 条的 $epfd_{\downarrow}$ 限制，可能的例外是由第 22.5CA 款所允许：“22.5CA 2)表 22-1A 至 22-1E 中给出的限制可能会在其电信主管部门已经同意这样的任何国家的领土上被超过（参见第 140 号决议(WRC-03)”。然而，考虑到样例 HEO 系统的 TT&C 下行链路使用一个全球波束，应该注意到，需要获得同意的总的国家数可能会非常大。
- IFIC 可能不包含有关被可能受影响的 GSO 网络所使用的遥测频率的完整信息。

4.2.6 星际链路：如果星际链路是在一个 HEO 系统的卫星之间或 HEO 卫星与数据中继卫星系统之间实现的，则遥测能够通过星际链路发送给一颗位于或靠近激活弧段的 HEO 卫星或发送给一颗数据中继卫星，再从那里转发到地球。

4.2.6.1 实现

- 通过在每颗卫星上增加用于星际 TT&C 链路的额外设备就能实现此技术。

4.2.6.2 优点

- 在任何时间从所有卫星向主 TT&C 地球站传输遥测信息而不对 GSO 网络造成下行链路干扰是可能的。
- 对 TT&C 地球站的影响最小；不需要远端 TT&C 地球站。

4.2.6.3 缺点

- 由于增加用于星际链路及用于星际链路天线捕获和跟踪控制的额外设备而会加重卫星的负担。
- 卫星需要在发生星际链路故障的情况下有一种备份 TT&C 的方法。
- 因为要求 HEO 系统避免对 GSO 网络造成可能会由于 HEO 系统的星际链路几何而引起的干扰，此技术可能会引起额外的设计挑战。

由 WRC-2000 所采纳并且在 WRC-03 作了修改的 RR 第 22.5CA 款指出“表 22-1A 至 22-1E 中给出的 ($epfd_{\downarrow}$) 限制可能会在其电信主管部门已经同意这样的任何国家的领土上被超过。”这提供了通过两个电信主管部门之间的预先协商来寻求下行链路问题的解决方案，其中一个电信主管部门正寻求在服从 $epfd_{\downarrow}$ 限制的 FSS 频带内从 HEO 卫星上操作遥测载波，另一个电信主管部门属于被将要发射遥测载波的波束所覆盖的每个国家。然而，此过程会化费很长时间（与涉及到的各电信主管部门达成协议）。因此，更可取的办法是首先考虑上述的可能性。

在按照 RR 第 22.5CA 款的规定所进行的任何双边会谈中，可能也需要根据所涉及各方的意愿来考虑上述可能性。

5 结论

前述考虑表明，对于工作在服从 RR 第 22 条 $epfd$ 限制的频带内的 HEO 系统，可能有几种可能性来克服操作 TT&C 链路的挑战，同时对操作在这些频带内的 GSO 系统提供适当的保护。注意到，对于在 non-GSO 和 GSO 网络之间共享的其它 FSS 频带，这些技术也将是有帮助的。对于任何特定的 HEO 系统，需要作进一步的研究来确定这些可能的干扰缓解技术中的哪些将是最合适的。

附件 1 的附录 1

确定 HEO 卫星最小遥测载波关闭周期以满足 RR 第 22 条中 $epfd$ 限制的方法

下面描述了能够用于确定一颗特定 HEO 卫星的遥测载波被关闭（和打开）以满足相关 $epfd$ 限制的精确时间/轨道纬度的一种迭代方法。

就如附件 1 的 § 4.2.1 中所解释的，对于一个给定频带内一副给定尺寸的 GSO 地球站天线，通过在卫星穿越赤道面的每个时刻附近一段时间内关闭每条遥测载波就可以避免对 RR 第 22 条 $epfd$ 限制罩的任何超过。为正好满足所涉及的 $epfd$ 限制罩，此期间的最小持续时间及其准确的关闭和打开时间将决定于 HEO 系统的轨道特性以及其遥测载波的传输特性。

对于附件 1 的 § 2 中所描述的样例系统 (N-SAT-HEO2)，假设系统中每颗 HEO 卫星有其自己的遥测载波频率，否则所有遥测载波有相同的传输参数，有必要对一颗卫星只确定最小关闭期间的长度。对于系统中每个其它卫星来说，此期间是相同的，准确的关闭和打开时间将由轨道特性所确定的间隔和沿相同地面轨迹运行的卫星数来简单地区分。

以 N-SAT-HEO2 作为例子，可以按照此附件的图 3 中所示的那样，建立计算机仿真以模拟最差情况的干扰场景，并且用于计算进入到最差位置上的一副参考（比如 1.2 m）GSO 地球站天线的 $epfd$ 电平及用于操作一颗在最差情况经度上的 GSO 卫星。（就如本附件中所阐述的，对于 N-SAT-HEO2，两种最差情况是当 GSO 卫星及其参考地球站都在 0° 的纬度上和对应于 HEO 赤道穿越点之一的一个经度上，即 $123.7^\circ E$ 或 $146.3^\circ E$ ）。这个仿真是运行了一个完整的轨道周期（ $86\ 163\ s = 1$ 恒星日），为每个时间步进（对于此例子， $10\ s$ 的时间步进是足够准确的）计算了 $epfd$ 。然后，结果以相对于 $epfd$ 的时间百分比的累积分布函数 (CDF) 的形式来画出。在目前的情况中，这是本附件的图 4 中的链路 D 的曲线。

注意，当卫星（从近地点开始）是在绕其 23 h 56 min 的轨道约 3/4 路程时发生了 123.7° E 的赤道穿越点，上述仿真可以使用大的时间步进来重新运行，直到进入轨道约 17 h。从该点开始，仿真就能使用一个小的时间步进，直到 epfd_{\downarrow} 电平达到链路 D 曲线与第 22 条罩相交的值（即，在本例子中是约 -179 dBW/m^2 每 40 kHz）。可能会观察到发生此“罩相交”的时刻。然后，仿真可以使用一个小的时间步进继续进行，直到当卫星是直接在赤道上空时 epfd_{\downarrow} 电平达到一个峰值，之后再次回到链路 D 的“罩相交值”并观察到该值。这样仿真就可以停止并且修改模型以便在两个观察时刻之间有效地关闭遥测载波。（在仿真中，遥测载波的关闭可以通过在两个时刻之间的期间内设置 EIRP 到一个可忽略的值来模拟。）仿真就能以这种修改的形式来运行，结果被转换为一个新的 CDF。将会发现，这个 CDF 在所有点上明显低于 RR 第 22 条的罩。（见图 5 中的曲线（c））

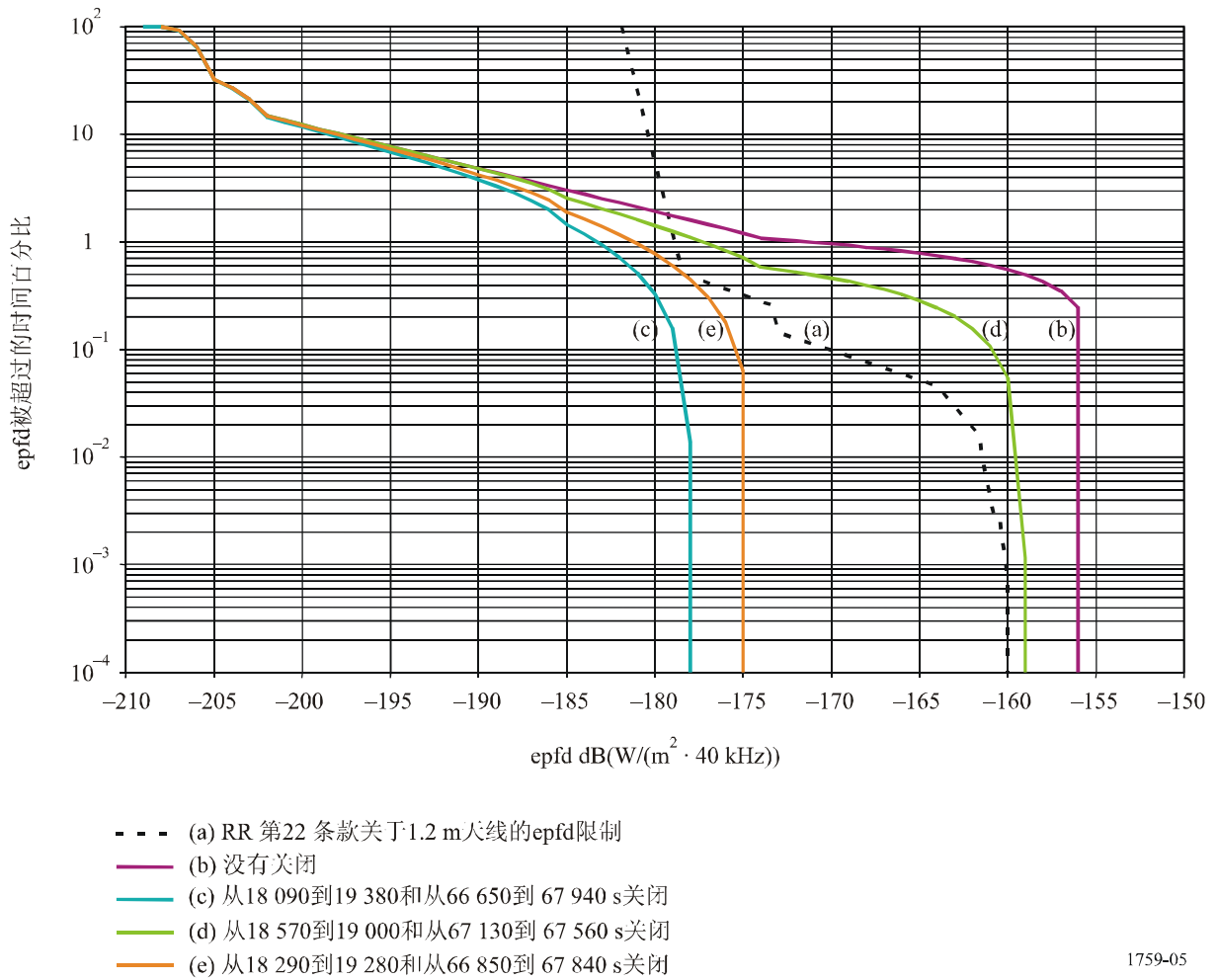
模型就能被进一步修改以便把关闭期间减少到前一段中的时间的约 1/3，但具有近似相同的时间中心，重新运行仿真以产生相应的 CDF。对于重要的 epfd 范围，这个 CDF 会超过 RR 第 22 条的罩是可能的。（见图 5 中的曲线（d））

从前面两段得到的结果将使得能够通过选择在得到曲线（c）和（d）的那些时间之间的期间来估计近似的关闭和打开时间以产生正好满足 RR 第 22 条的罩的 CDF。使用这些时刻就可以作进一步运行。如果得到的 CDF 仍不是最优的，这个过程将进一步迭代将得到一个足够准确的结果。

对 N-SAT-HEO2 和一副 1.2 m GSO 地球站天线及 12.25 GHz 上的一条遥测载波执行上述步骤。得到的 CDF 示于图 5 中，其中曲线(b)是与图 4 中链路 D 的曲线（即没有关闭遥测载波的最差情况的几何）相同的。将会看到，（e）是最优的曲线，因为它刚刚处于 epfd_{\downarrow} 限制罩内。在此情况中，尽管只需要 3 次迭代就能得到最优曲线，对于任何其它的实际情况，需要超过 4 次或最多 5 次迭代是不太可能的。这样，考虑到两个赤道穿越点，目前例子的关闭期间如表 1 中所示。

图 5

不同遥测载波关闭期间的 1.2 m $epfd_{\downarrow}$ 统计特性



1759-05

表 1

对于 12-18 GHz 频段 (Ku 波段) 中 1.2 m 的 GSO 地球站天线确保样例 HEO 系统的遥测载波正好满足 $epfd_{\downarrow}$ 限制的关闭期间

卫星	近地点时刻(s)	第一次关闭时刻 (s)	第一次打开时刻 (s)	第二次关闭时刻 (s)	第二次打开时刻 (s)
1	0	18 290	19 280	66 850	67 840
2	28 680	9 370	10 360	47 000	47 990
3	57 490	38 180	39 170	75 810	76 800

从表 1 中注意到, 样例 HEO 系统中三颗卫星中的每一颗在每个轨道的两个赤道面穿越点的附近地区将必须关闭相同的时间, 以满足 $epfd$ 限制罩。每个关闭期间是 $990\text{ s} = 16.5\text{ min}$, 对应于轨道周期 (一个恒星日) 的 1.15%。考虑到每个轨道有两个关闭期间, 得到总的“遥测中断时间”是对应于每个卫星轨道周期的 2.30%。当涉及到的卫星是在约 $\pm 1.487^\circ$ 的纬度范围内时, 就会发生每个关闭期间。

对于每个连续的轨道, 通过简单地增加 $86\ 163\text{ s}$ (一个恒星日) 就能计算出关闭和打开时刻。