

ITU-R S.1782 建议书

通过卫星固定业务（FSS）系统实现全球宽带互联网接入的可能性

（ITU-R 269/4 号研究课题）

（2007 年）

范围

为了解决无线电通信全会和 WRC-03 共同提出的问题，对于通过卫星以高数据率提供到互联网的接入的可能性，已经进行了初步研究。在附件 1 中做出一个尝试，确定适合的固定卫星业务（FSS）频带，在 11/14 GHz、20/30 GHz 和 40/50 GHz FSS 频带划分内选择 500 MHz 带宽对。基于来自使用 30 cm 天线的用户终端的直接卫星链路，阐述了每种情形的上行和下行链路的特性，计算了每个卫星的容量。估计了为 10 000 000 km² 参考面积提供服务的这种系统的总容量。在附件 2 中，对于为使用 1.2 m 天线的用户终端提供直接卫星链路的系统，阐述了 20/30 GHz 和 11/14 GHz 频带内的上行和下行链路的特性，并再次计算了每个卫星的容量和总容量。在附件 3 中，阐述了一个系统实例的特性，再次计算了对应的每个卫星的容量和总容量，该系统基于通过地面无线链路到“共用”地球站并由此通过 20/30 GHz 或 11/14 GHz 卫星到一个中枢地球站的用户接入。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 在发展中国家，包括最不发达国家、陆围和孤岛国家以及经济转型国家，卫星通信技术具有促进高速互联网业务可用性发展的可能性；
- b) 期望确定固定卫星业务（FSS）系统的技术和操作特性，这可促进单一用户终端设备以可承担的价格进行批量生产；
- c) 期望评估全球容量，这可在 FSS 频率划分中由具有考虑到 b) 中确定的特性的系统提供；
- d) 考虑到 b) 中的决定，应考虑到专门为通过小的用户终端以高数据率实现互联网接入设计系统的可能性，以及一些现有的系统已经包括宽带互联网接入设施的事实；
- e) 对于通过现有的设计用于为其他应用提供服务的 FSS 系统实现宽带互联网接入，采用了多种地球站大小，这些不同大小的地球站使用了几个频带；
- f) 对于互联网应用，为在考虑到 a) 中提到的卫星技术制定的标准促进了卫星在互联网接入中的更广泛使用，

注意到

- a) ITU-R S.1783 建议书描述了高密度固定卫星业务（HDFSS）系统的特性；
- b) ITU-R S.1709 建议书描述了全球宽带卫星系统的空中接口的技术特性，

认识到

- a) FSS 频率划分可用于高速互联网业务的短期、中期和长期全球配置，

建议

1 附件 1、2 和 3 中的信息提供了 3 个可能的实例，为了通过 FSS 以高数据率实现全球互联网接入，可使用这些例子。

附件 1

通过为甚小地球站天线设计的 FSS 系统实现 全球¹宽带²互联网接入的可能性

1 频带考虑

1.1 适合的频带

“短期”应用于已经开发了卫星技术的频带。目前这完全适用于 4/6 GHz 和 11/14 GHz FSS 划分，特别地，也适用于 20/30 GHz FSS 划分。可以预计在“中期”，比如说今后十年，20/30 GHz 频带内的卫星技术将得到充分发展，且 40/50 GHz 频带内的卫星技术也将有所发展，尽管实践暗示这在认为发展完全进行之前将是“长期”的。《无线电规则》（RR）第 5 条中有 50 GHz 以上的 FSS 划分，但是在这些划分内的重要发展看起来不太可能在“长期”之前发生，在此不考虑。

初步研究排除了对于主要应用的 4/6 GHz 频带的使用，依据是低成本终端暗指不太可能在那些频带具有足够的增益的小口径天线为典型涉及的宽波束卫星工作。此外，4/6 GHz 频带的利用率已经很高，即使提供点波束 C 波段卫星，甚小抛物面地球站及其对应的宽的波束宽度也很难与现有的业务共享频率。因此在这一附件中不再考虑 4/6 GHz 频带。

1 在这一研究中，形容词“全球”解释为意指对地静止卫星可提供服务的任何地方。

2 在这一研究中，所使用的“宽带”例子是 2 Mbit/s 的用户速率。

初步研究也考虑到在某一程度上前一段中的考虑也适用于 11/14 GHz 频带。对地球站天线大小的限制不如 4/6 GHz 中的限制严格，因为增益较高，且（中期）点波束运作较普遍，但是类似于 4/6 GHz，11/14 GHz 的非规划频带已经频繁地应用了很多年，所以频率共享是个问题。

20/30 GHz FSS 划分被认为近期在本质上最适用于宽带互联网接入，因为波长与甚小口径天线一致，利用率也还相对较低。而且，到目前为止，单个互联网接入与目前已受管制（即通过与单个地球站的协调进行管制）的 FSS 频带的大多数国际使用的方式不兼容。用户终端将由“商业街”零售商大量销售，在家庭和办公室安装的可能性使得管制机制很有必要，例如制定适合 HDFSS 的管制机制。为方便起见，WRC-03 在其要求对互联网应用可能使用的全球宽带 FSS 系统的研究中所引用的《无线电规则》第 5.516B 款在以下部分重复：

“确定以下频带用于卫星固定业务的高密度应用：

17.3-17.7 GHz	（空对地）1 区，
18.3-19.3 GHz	（空对地）2 区，
19.7-20.2 GHz	（空对地）所有区，
39.5-40 GHz	（空对地）1 区，
40-40.5 GHz	（空对地）所有区，
40.5-42 GHz	（空对地）2 区，
47.5-47.9 GHz	（空对地）1 区，
48.2-48.54 GHz	（空对地）1 区，
49.44-50.2 GHz	（空对地）1 区，
和	
27.5-27.82 GHz	（地对空）1 区，
28.35-28.45 GHz	（地对空）2 区，
28.45-28.94 GHz	（地对空）所有区，
28.94-29.1 GHz	（地对空）第 2 和 3 区，
29.25-29.46 GHz	（地对空）2 区，
29.46-30 GHz	（地对空）所有区，
48.2-50.2 GHz	（地对空）2 区。”

值得注意，这些指定总计达下列总带宽：

20/30 GHz 频带	全球	加上	1 区	2 区	3 区
下行	500 MHz		400 MHz	1 000 MHz	—
上行	1 030 MHz		320 MHz	470 MHz	160 MHz
40/50 GHz 频带					
下行	500 MHz		2 000 MHz	1 500 MHz	—
上行	—		—	2 000 MHz	—

因此，假定为全球使用所指定的频带内的频率可在两个或三个区内同时复用，在这些频带内确定用于 HDFSS 的总频谱是（按区划分的）：

- 1 区 — 3 400 MHz 下行，1 350 MHz 上行；
- 2 区 — 3 500 MHz 下行，3 500 MHz 上行；
- 3 区 — 1 000 MHz 下行，1 190 MHz 上行。

这些总频谱暗示为了满足 1 区 HDFSS 应用的需要，可能需要比上行链路带宽多得多的下行链路带宽，但是在其他两个区中两个传输方向上的需要可能是一样的。

在所考虑的 20/30 和 40/50 GHz 频带范围内，本建议书中的考虑被限制在《无线电规则》第 5.516B 款为所有三个区确定的频带内，即在 19.7-20.2 GHz、28.45-28.94 GHz、29.46-30.0 GHz 和 40.0-40.5 GHz（见表 1）内。

尽管 WRC-03 和无线电通信全会都提请 ITU-R 进行关于当前主题的研究预见 FSS 频带的使用，在这一附件中对于 11/14 GHz FSS 频带的分析将得出与对相邻 BSS 频带（即 1 区和 3 区中的 11.7-12.5 GHz 和 2 区中的 12.2-12.7 GHz）进行的分析类似的结果。

1.2 当前 FSS 使用的频带

为了评估在第 2.1 节中讨论的频带内的未来卫星满足宽带互联网接入要求的程度，必需确定那些频带的轨道/频谱资源的使用程度，是已通过现有的卫星系统利用，还是很快将要由已经为其他 FSS 应用开发的系统使用。注意，从频带到频带的当前和计划使用的指示可从无线电通信局的 SNS 数据库中获得，表 1 比较了在 11/14 GHz、20/30 GHz 和 40/50 GHz 范围内的每个 FSS 划分的一个 500 MHz 分段内的 GSO/FSS 网络的频谱应用数量（截至 2005 年 1 月）。这些 500 MHz 频带内的每一个（除了最后一个）在所有三个区内被划分给 FSS：

表 1
频谱分配的应用比较

FSS 划分	带 宽	传 输 方 向	主 要 目 的	排 列 数 量
10.95-11.2 GHz} 11.45-11.7 GHz}	500 MHz	空对地	一般 FSS 商业应用	12 417
14.0-14.5 GHz	500 MHz	地对空		16 467
19.7-20.2 GHz	500 MHz	空对地	确定用于 HDFSS	5 245
29.5-30.0 GHz	500 MHz	地对空		4 830
40.0-40.5 GHz	500 MHz	空对地	确定用于 HDFSS	1 205
(48.2-48.7 GHz ⁽¹⁾)	500 MHz	地对空		(797)

⁽¹⁾ 这是 WRC-03 在 2 区内为 HDFSS 上行链路确定的频带的一部分。尽管这与 1 区和 3 区中确定的不同，但是为了使得该表可包括上行链路以补充 40 GHz 下行链路，增加了这一部分。

如今有比在较高频带内的有效负载更多的 11/14 GHz 卫星有效负载在工作，从表 1 中的信息可得出下列结论：

- 在 11/14 GHz 的全球 FSS 主要划分当前比已确定用于未来全球 HDFSS 使用的 20/30 GHz 划分的那些部分使用率高得多。
- 确定为未来 HDFSS 使用的 40/50 GHz 频率的 FSS 使用仍必须开始。

2 可能的技术特性

2.1 卫星波束

研究发现，这样的系统可很好地实现以下的目标：单个用户终端以可承受的价格为以高数据率通过卫星实现互联网接入提供设施，即设计为适合在链路的用户端的特小口径天线终端（USAT）的系统，在这一研究中使用 30 cm 直径作为例子。这样的终端具有相对较低的天线增益，特别是在考虑中的较低频带，会导致每个卫星容量不大，从而每信息比特空间部分成本较高，除非每个卫星设计为通过多个点波束频率复用。

表 3、4 和 5 总结了来自 ITU-R S.1328 建议书附件的相关参数，并给出了对现在或不久的将来有可能获得的点波束的大小的指示。在 11/14 GHz 频带的情况下，表 3 中的数据由对 1998 年无线电通信局征询表的回复中推断出来的卫星接收增益数字增加。可以假定，对于表 3、4 和 5 中的窄带（即高增益）端，在不久的将来即将设计用于提供宽带互联网接入的卫星将包含多个点波束。从而对于适合的卫星系统的用户链路的特性，选择表 2 中的参数作为基础。这里假定，为了操作方便，将这样设计卫星天线子系统，即使得每对发射和接收波束具有相同的波束带宽，且它们的脚印在地球表面上具有相同的固定位置。

表 2
选择的卫星点波束特性

FSS 频率范围	11/14 GHz	20/30 GHz	40/50 GHz
波束中心的增益 (dBi)	42	50	55
-3 dB 波束宽度 (度)	1.4	0.6	0.3
每个卫星的双极化发射/接收波束的数量 (n)	12	32	64

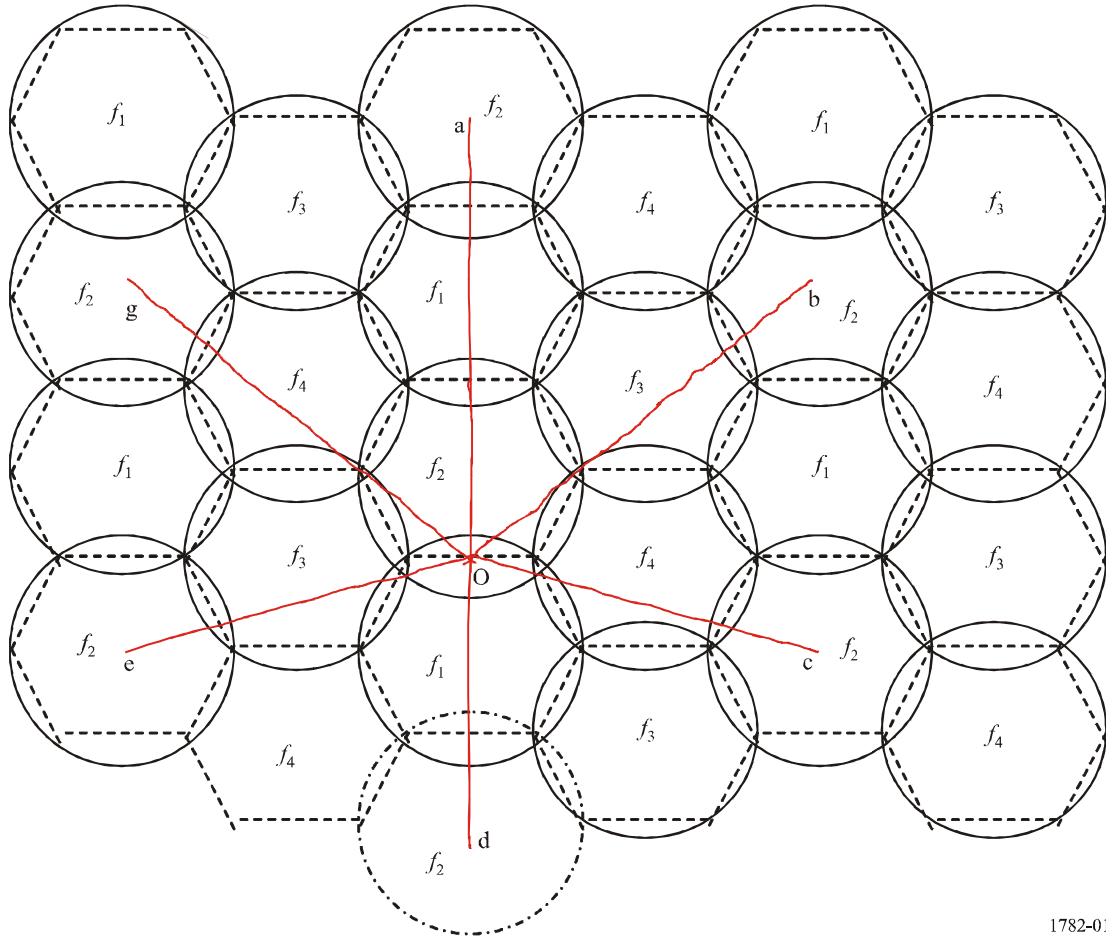
这里要重点注意，由于波束带宽减小，指向精度要求增加，因此控制波束脚印的难度和成本也增加。

根据近年航天器的发展，假定天线馈电排列为可补偿地球表面弯曲度，以使得给定卫星产生的所有波束都能具有相同直径的圆形脚印，而与指向无关，这是合理的。因此，除了在子卫星点的波束指向外，每个波束将具有相似的椭圆横截面，其轴率和方位将取决于其相对于子卫星点的方向的指向方向。主轴 (φ_a) 和次轴 (φ_b) 的波束宽度为 $((\varphi_a) \cdot (\varphi_b))^{0.5} = (\varphi_0)$ ，其中 (φ_0) 是指向子卫星点的（圆周）波束的 -3 dB 波束宽度。

对于多个波束和圆形脚印的连续覆盖范围，可假定重叠的六角形模型，如图 1 所示。

图 1

重叠卫星波束的脚印的六角形模型



1782-01

一个系数为 1/4 的频率复用模型如图 1 所示，假定每个波束被双极化。考虑到可行的滚降率和第一旁瓣电平，如 ITU-R S.672 建议书中的公式所描述的，波束中心和下一同频波束的最近边缘之间的差别应正好足够用于支持这一工作模式。例如，在由频率 f_2 波束提供服务的一个六角形区的边缘处的点“o”，对最接近的 6 个同频波束的干扰贡献可从对向卫星的离轴角 oa 、 ob 、 oc 、 od 、 oe 和 og 计算。从图中的几何学来看：

$$oa = 5(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 2.165(\varphi_0)$$

$$ob = og = (\{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2 + \{3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2)^{0.5} = 1.984(\varphi_0)$$

$$oc = oe = (\{(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ)\}^2 + \{2(\varphi_0/4) + \varphi_0\}^2)^{0.5} = 1.561(\varphi_0), \text{ 以及}$$

$$od = 3(\varphi_0/2) \cdot \cos(30^\circ) = 1.299(\varphi_0)$$

表 3

设计使用 11/14 GHz 频带的 GSO/FSS 卫星的点波束大小

a) 从 ITU-R S.1328 建议书中获取的信息

ITU-R S.1328 建议书附件中的表格 卫星系统	表 2		表 17	表 29
	GSO-C	GSO-D	GSO-VX	Pan-Af
卫星发射天线的峰值增益 (dBi)	30	30	33.5	32-38
卫星发射波束的-3 dB 宽度 (度)	(5.6)	(5.6)	(3.7)	(4.5-2.2)
卫星接收天线的峰值增益 (dBi)			33.5	
卫星接收波束的-3 dB 宽度 (度)			(3.7)	
极化	圆极化	C 波段 双极化	C 波段 双极化	线性极化
每个卫星提供服务的波束数量				10

b) 从无线电通信局征询表的回复中获取的信息

为 90 条 11/14 GHz 链路提供了数据，包括大于 30 dBi 的卫星接收天线峰值增益值。因此对应的半功率波束宽度小于 6°，且波束可看成是点波束。

这些增益值的范围从 30.1 到 45.6 dBi，平均值为 36.5 dBi，分别对应于 5.5°（最大）、0.93°（最小）和 2.7°（平均）的波束宽度。

表 4

设计为使用 20/30 GHz 频带的 GSO/FSS 卫星的波束大小；信息从 ITU-R S.1328 建议书中获取

ITU-R S.1328 建议书附件中的表格 卫星系统	表 1		表 2		表 3			表 5		表 6	表 12		表 13
	GSO13	GSO20	GSO30	GSO F	GSO11	GSO12	GSO13	系统 P		系统 Q	GSO Ka-J		EKX
卫星发射天线的峰值增益 (dBi)	46.5	43.5	55	49	49.5	33	46.5	53.2	46.2	49	41	47	48.4
卫星发射波束的-3 dB 宽度 (度)	(0.84)	(1.18)	(0.32)	(0.63)	0.44	(3.97)	1.4	0.3	0.6	0.55	(1.58)	(0.79)	(0.67)
卫星接收天线的峰值增益 (dBi)	46.5	43.5	55	49	~50 ⁽¹⁾		~47 ⁽¹⁾	57.2	47.7	49			48.4
卫星接收波束的-3 dB 宽度 (度)	(0.84)	(1.18)	(0.32)	(0.63)	(~0.56)		0.9	0.3	0.6	0.55			(0.67)
极化	圆极化	C 波段 双极化	C 波段 双极化		L 波段 双极化	圆极化	C 波段 双极化			C 波段 双极化	圆极化	圆极化	双极化
每个卫星提供服务的波束数量					7 + 7	1	24 + 24						

⁽¹⁾ 从 G/T 中推断出。

表 5

设计为使用 40/50 GHz 频带的 GSO/FSS 卫星的波束大小；信息从 ITU-R S.1328 建议书中获取

ITU-R S.1328 建议书附件中的表格	表 17	表 18	表 19	表 21	表 22	表 27	表 28
卫星系统	GSO-VX	GSO-SV	GSO-LV	GSO-VI	GEOSAT-X	GSOV-B1	GSOV-B2
卫星发射天线的峰值增益 (dBi)	49.0	58.0	52.0	53.0	56.5	51.5	53.1
卫星发射波束的-3 dB 宽度 (度)	(0.63)	0.15	0.15	(0.4)	(0.27)	0.3	(0.39)
卫星接收天线的峰值增益 (dBi)	49.0	58.0	52.0	53.0			53.1
卫星接收波束的-3 dB 宽度 (度)	(0.63)	(0.22)	0.15	(0.4)			(0.39)
极化	圆形 双极化	圆形 双极化	圆形 双极化	圆形 双极化	圆形 双极化	线性极化	
每个卫星提供服务的波束数量		40		24	48	24	80

表 3、4 和 5 的注：

这些表中各种未加括号的数字直接从 ITU-R S.1328 建议书中获得。加括号的波束宽度从如下的相应峰值增益数字中得出：

对于抛物面天线， $G_m = 10 \log ((4\pi) / \lambda^2 (\pi D^2 / 4) \eta)$

其中：

G_m : 峰值增益 (dBi)

D : 直径 (m)

λ : 波长 (m)

η : 口径效率，比如 0.65。

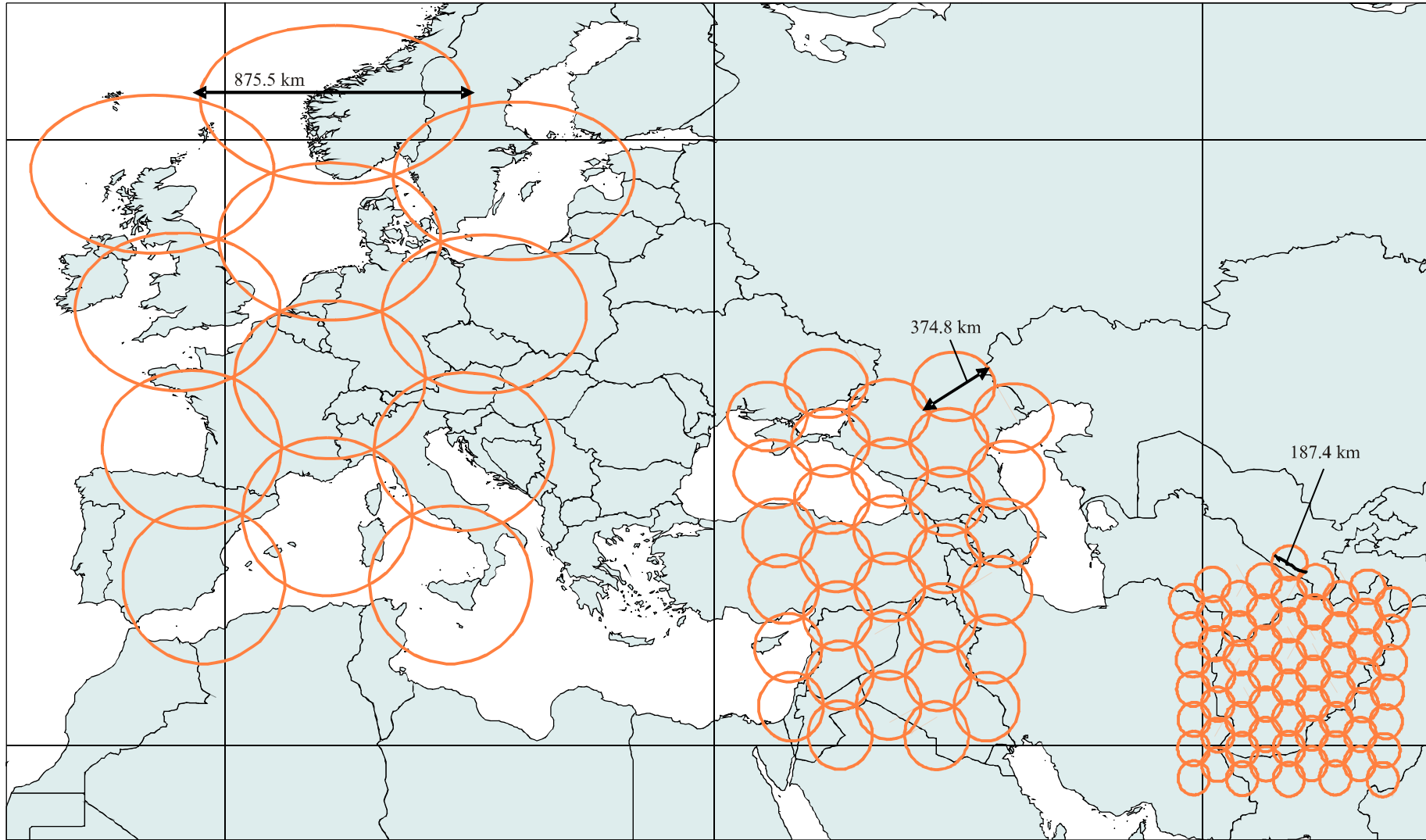
由此 $D/\lambda = (10^{0.05G_m}) / (\pi\sqrt{0.65})$ 。

同样，半功率波束宽度的经验表达式是 $\phi_{-3} = 70\lambda/D$ (度)，取代 D/λ 给出： $\phi_{-3} = (177.3)10^{-0.05G_m}$ (度)。

表格中有空白栏，因为 ITU-R S.1328 建议书中相关数据缺失，不能从可用的数据项可靠地推断出来。

图 2

能提供高速互联网接入的 FSS 卫星的波束排列实例



11/14 GHz 频带内12个波束的脚印

20/30 GHz 频带内32个波束的脚印

40/50 GHz 频带内64个波束的脚印

通过引用关于单个圆形和椭圆形波束的 ITU-R S.672 建议书，可以看出，如果第一旁瓣增益比峰值增益低 25 dB，那么假定每个波束中心有相同的 e.i.r.p.，假定每个波束的同频交叉极化率也是 25 dB，则净载一频复用干扰率由下式给出：

$$(C/I)_{FR} = -10 \log(7\{10^{-(25/10)}\}) = 16.5 \text{ dB}$$

实际上 $(C/I)_{FR}$ 可能比这高，因为所有 6 个干扰源不可能都对应于旁瓣增益。

具有表 2 中概述的波束排列的对地静止卫星的覆盖范围实例如图 2 所示。注意，总覆盖范围大致与频率成反比剧减。

2.2 链路参数实例

当前的研究针对单个用户通过 USAT 直接接入卫星的情况。使用具有较大天线的地球站的可选项包括在附件 2 和 3 中。

对于在第 1 节中描述的所有三个频带，使用下列假设进行卫星用户链路的参数的计算：

- 当用户地球站基于 USAT 时，通过卫星通信且与互联网接口的地球站应包含大的天线，在这里被称为“基站”。基站应比用户终端少得多。
- 应使用具有 3/4 FEC 率的 QPSK 调制。当解调后 BER 降到 1×10^{-6} ，对应于 $C/N = 8.5 \text{ dB}$ ，得出可用性限值。允许由于第 2.1 节中的馈电链路和频率复用干扰造成的降级 ($C/I = 16.5 \text{ dB}$)， $(C/N)_r$ 和 $(C/N)_d$ 值的限值要求应不小于 9.85 dB。

注 1 — 使用 1/2 FEC 率和附加编码如里德—所罗门，可减小要求的 C/N ，从而减小上行和下行链路的 e.i.r.p.s 以及卫星主功率要求。卷积编码是具有类似目标的可能。基于假定某些例如较强编码的 7.0 dB 的 $(C/N)_r$ 和 $(C/N)_d$ 限值的结果被加入到下列结果中。

- 系统将支持使用 30 cm 直径天线的用户终端，这样的天线有助于降低价格，便于终端可携带。则天线发射增益值在 12.75 GHz 为 30.2 dBi，在 14 GHz 为 31.0 dBi，在 28.45 GHz 为 37.2 dBi，在 48.2 GHz 为 41.7 dBi。天线接收增益值在 10.7 GHz 为 28.7 dBi，在 10.95 GHz 为 28.9 dBi，在 19.7 GHz 为 34.0 dBi，在 40 GHz 为 40.1 dBi。
- 最小工作仰角在 11/14 GHz 为 10° ，在 20/30 GHz 为 17° ，在 40/50 GHz 为 25° 。
- e.i.r.p. 电平被设置为包括下列余量以适应在大多数气候下至少 99% 的时间内由雨衰造成的降级：
 - 上行链路：在 14 GHz 为 4.5 dB，在 30 GHz 为 11 dB，在 50 GHz 为 21 dB；
 - 下行链路：在 11 GHz 为 3.5 dB，在 20 GHz 为 7 dB，在 40 GHz 为 20 dB。

为了减小造成干扰的可能性，在 30 和 50 GHz 频带内，很可能实施上行链路功率控制，也许在极干燥的气候中除外。可是，用户终端仍要求输出阶段能够通过增加余量来产生计算的 e.i.r.p.，即使电平大多数时间基本上被回退。上行链路控制在可携带终端中存储电池容量，但是晴朗大气条件下的 e.i.r.p. 应保持在可用限值之上至少大约 2.5 dB，以确保至少 1×10^{-9} 的标称 BER。

- 在计算中使用的卫星波束增益的最小值为比表 2 中第 2 行中给出的值（即波束边界值）小 3 dB。
- 上行链路噪声温度，包括所容许的外部干扰，在 14 GHz 频带为 800 K，在 30 GHz 频带为 1 000 K，在 50 GHz 频带为 1 200 K。
- 下行链路噪声温度，同样包括所容许的外部干扰，在 11 GHz 频带为 200 K，在 20 GHz 频带为 300 K，在 40 GHz 频带为 500 K。
- 对术语“宽带”和“高速”的解释与对互联网接入中的解释一样，这里假定对于发射到卫星和从卫星发射都采用 2 Mbit/s 的用户比特率。对于具有 3/4 FEC 率的 QPSK 调制，允许采用 50% 的余弦滚降滤波，这对应于每个载波 1.6 MHz 的带宽。

在链路预算公式中使用这些假设，给出下列载波功率电平，以在晴朗大气的条件下馈入用户终端天线（{} 中的数字对应于额外的纠错编码的上述假设，且每载波的相关带宽大约为 3 MHz）。

- 14 GHz 频带：14.3 dBW (27 W)，或具有上行功率控制 12.3 dBW (17 W)；
 {11.5 dBW (14 W)} {9.5 dBW (8.8 W)}
- 30 GHz 频带：13.6 dBW (23 W)，或具有上行功率控制 5.1 dBW (3.2 W)；
 {10.8 dBW (12 W)} {2.3 dBW (1.7 W)}
- 50 GHz 频带：19.2 dBW (83 W)，或具有上行功率控制 0.7 dBW (1.2 W)；
 {16.4 dBW (43 W)} {-2.2 dBW (0.6 W)}

给出下列载波功率电平以馈入卫星发射天线：

- 11 GHz 频带：7.3 dBW (5.4 W)；
 {4.5 dBW (2.8 W)}
- 20 GHz 频带：4.4 dBW (2.8 W)；
 {1.6 dBW (1.4 W)}
- 40 GHz 频带：14.4 dBW (27.5 W)；
 {11.6 dBW (14.3 W)}。

假定在下行链路上未实施功率控制，从而由于假定的降雨余量总计大于 2.5 dB，晴朗大气中在所有三个下行链路频带内的网关—用户终端方向上的 BER 总计好于 1×10^{-9} 。

当用户装置的公众健康要求超出了国际电联的权力范围，对于系统规划者来说，关注国内和国际的辐射保护电平和导则以确保遵循它们，特别是在普遍实施的情况下，这是非常重要的。

2.3 每个卫星的容量 (C_s)

注 1 — 这一节的结果和第 3 节中的结果都是以具有 3/4 编码率的 QPSK 载波计算出来的。在本节和第 3 节最后，增加了在第 2.2 节中提到的基于较强编码的近似对应结果。

在许多通信卫星中，转发器的输出功率性能在单载波饱和情况下大约是 40 W，尽管已经建造了具有较大功率转发器的卫星用于特定的应用。具有 90-120 W 转发器的许多 14/11 GHz 卫星正进入轨道。在多载波模式下，为了使得互调的影响完全保持在由频率复用造成的降级之下，必需工作在大约 4 dB 的输出回退上，这使得有用的输出功率减小了大约 16 W。对于在第 2.2 节中得出的每载波卫星发射输出功率的值，这使得每个转发器需要非常少的载波（每个

1.6 MHz 带宽)。必然地, 需要大量转发器来完全利用 500 MHz, 这导致非适宜的有效载波, 因此假定对于当前应用, 采用较高功率的转发器。在此对 11/14 GHz 和 20/30 GHz 卫星, 假定在饱和状态下的转发器输出功率, 即 4 dB 输出回退处为 40 W。由于需要大的下行链路衰减余量, 在 40/50 GHz 卫星的情况下, 假定在饱和状态下 500 W 的转发器容量, 即当回退时为 200 W。值得注意的是, 可能会采用简单地提供高 e.i.r.p. — 例如自适应编码的方法之外的方式来抗击衰减, 进一步的研究可能展示更可取的可选较低功率的转发器, 目标是限制用户终端和卫星功率需求。对于 40/50 GHz 的情况, 这看起来是首选, 因为尽管 100 W 卫星发射机在 11 GHz 和 20 GHz 可用, 500 W 发射机在 40 GHz 尚未可用。

在 20/30 GHz 卫星的情况下, 一个转发器可以发射的 2 Mbit/s 载波数量为 $40/2.8 = 14$ 。假定载波内保护带宽为 10%, 则要求的转发器带宽为 $1.6 \times 1.1 \times 14 = 24.6$ MHz, 这与相邻转发器之间 25 MHz 的间距相符。考虑到每个卫星波束总计 125 MHz 的带宽也即 4 个波束共计 500 MHz 的带宽, 这使得每个卫星波束可以连接 5 个转发器。这些参数与图 1 的 1/4 频率复用模型相符。这样的卫星的总容量计算如下:

$$\begin{aligned} \text{容量} &= (2 \text{ Mbit/s /载波}) \times (14 \text{ 个载波/转发器}) \times (2 \text{ 个极化}) \\ &\quad \times (5 \text{ 个转发器/极化/波束}) \times (32 \text{ 个波束}) = 8\,960 \text{ Mbit/s} \end{aligned}$$

类似地, 算得 11/14 GHz 卫星的容量为 3 024 Mbit/s, 40/50 GHz 卫星的容量为 16 128 Mbit/s。图 3、4 和 5 示出了上述为在 3 个频带内的卫星制订的转发器和波束排列。

注意每个卫星的转发器的数量很多。11/14 GHz 卫星有 216 个转发器, 这在使用固定状态输出时期可能适用, 主功率需求是 54 kW。对于 20/30 GHz 卫星, 相应的数量是 320 个转发器和 80 kW。对于 40/50 GHz 卫星则是不少于 1 152 个转发器和 1.44 MW。11/14 GHz 和 20/30 GHz 航天器很大, 相对比较昂贵³, 在每种情况下, 值得考虑的是, 在两个或多个名义上地点相同的卫星之间划分覆盖范围的可能性, 这些卫星中的每一个具有适当较少的波束和转发器以及较低的主功率。那一选项看起来在 40/50 GHz 情况下是不可避免的, 其中需要在大约 20 个较小的卫星之间划分覆盖范围, 正好可以减少每个单个 11/14 GHz 或 20/30 GHz 卫星的大小和功率。

注 1 — 假定采用较强的纠错编码, 由于每个载波带宽增加, 可能产生图 3、4 和 5 中的那些转发器规划之外的不同的规划, 但是与上述相比, 必要参数大致如下:

每个卫星的容量:

11/14 GHz — 1 612 Mbit/s; 20/30 GHz — 4 778 Mbit/s; 40/50 GHz — 8 600 Mbit/s

卫星主功率:

11/14 GHz — 29 kW; 20/30 GHz — 43 kW; 40/50 GHz — 770 kW

³ 建造和发射一个大的、物理上可实现的卫星 (在 2006 年) 的成本是几亿美元。

图 3

用于适用于高速互联网接入的 11/14 GHz FSS 卫星的转发器和波束排列

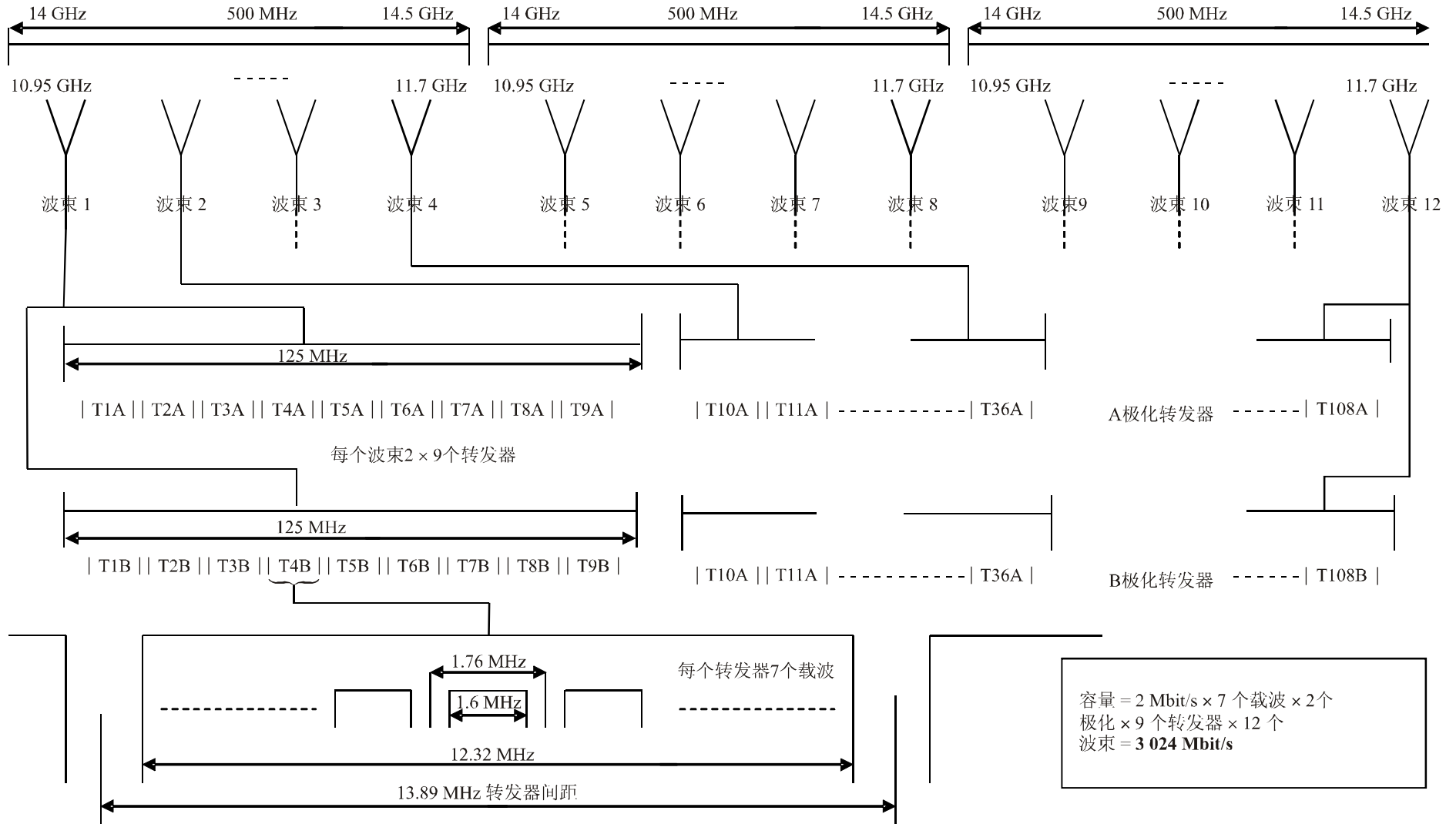


图 4

用于适用于高速互联网接入的 20/30 GHz FSS 卫星的转发器和波束排列

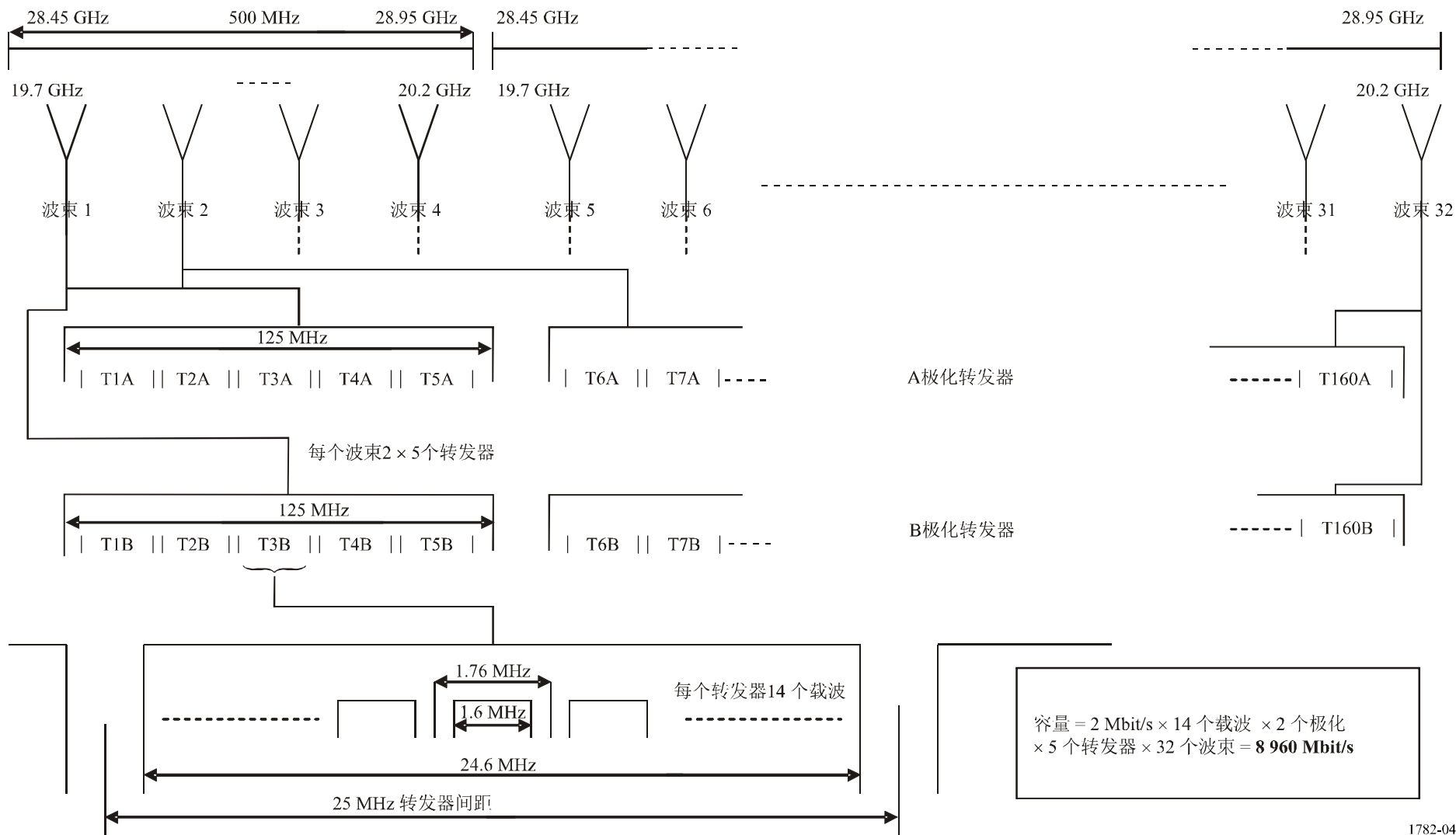
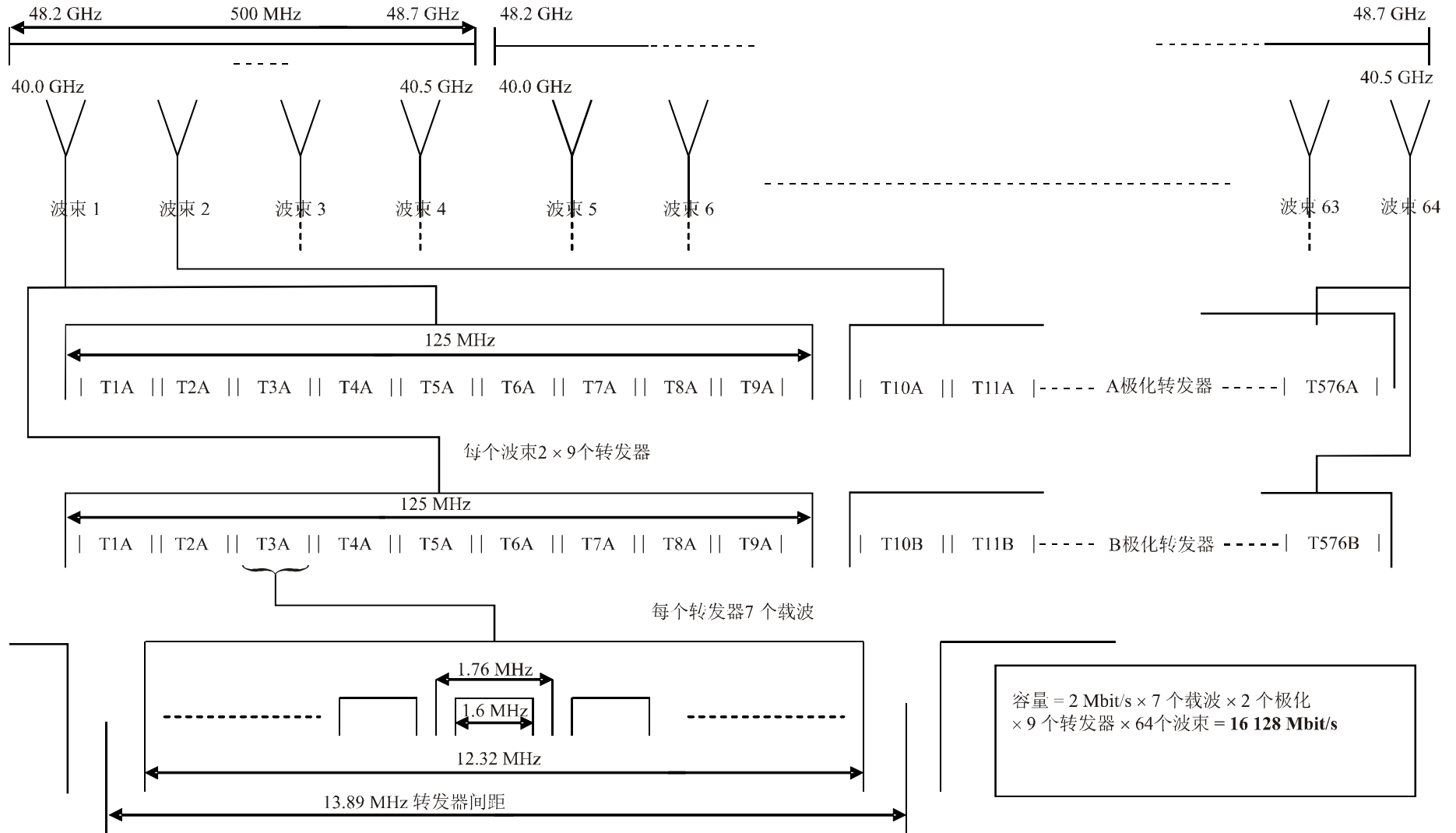


图 5

用于适用于高速互联网接入的 40/50 GHz FSS 卫星的转发器和波束排列

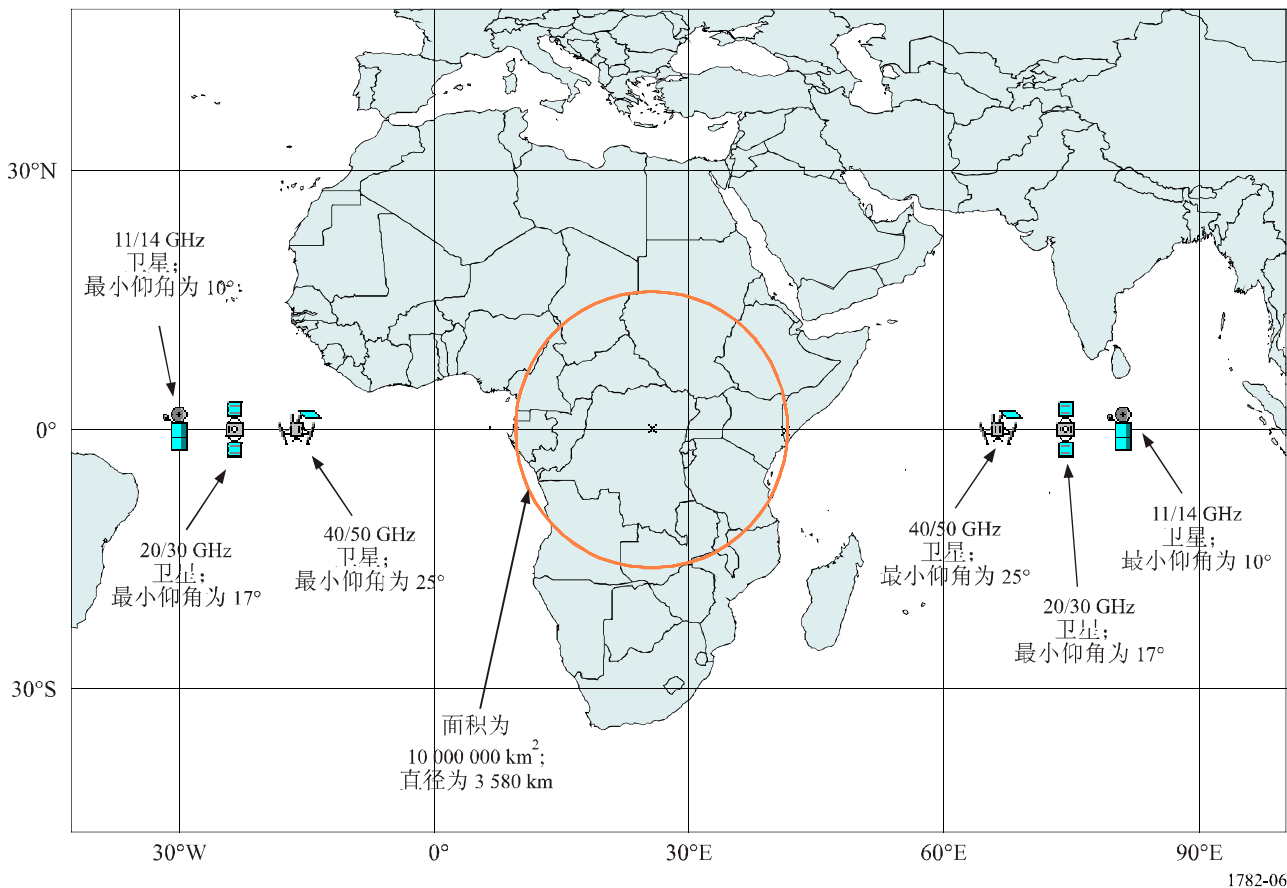


关于卫星主功率，值得注意的是，20 kW 大约是至今设计的平台的最大值，因此减小需求的方法在此引起了重视。在这方面，在上行链路上保持 FDMA 但在下行链路上采用 TDMA 的可能性值得研究，因为这样可以消除转发器回退的需要，因此潜在地将卫星主功率需求减少了 4 dB。

3 可能的总容量 (C_T)

为了在给定的频带内表示 FSS 卫星的总容量以提供宽带互联网接入，必需定义相关的地理地区。可能的选项包括地球的整个表面、地球的全部陆地地区、给定纬度（例如 60°N 和 60°S ）之间的地球表面、给定纬度之间的陆地地区、人口密度高于特定的最小值的陆地地区以及给定大小和纬度的不同地区。出于这一初始研究的目的，采用了以赤道为中心的 $10\,000\,000\text{ km}^2$ 的圆形面积。图 6 是位于中非的这样一个地区的例子，但是结果与任何其他赤道位置得出的结果相同。

图 6

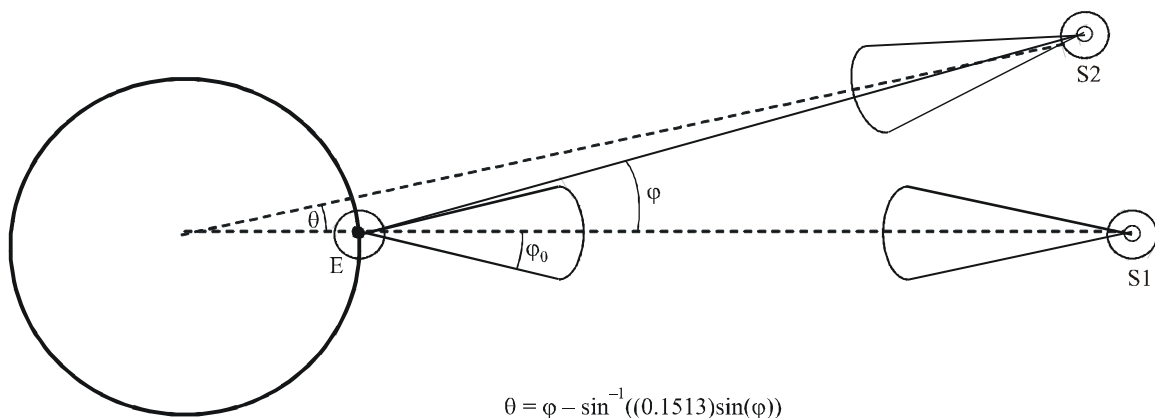
10 000 000 km² 赤道地区的例子

由于在三个频带内最小仰角不同，对地静止卫星可为参考面积提供服务的经度范围也不同。该范围在图 6 中示出，数字如下：

- 对于 11/14 GHz，从 30.1°W 到 81.0°E 的 111.1° 经度范围；
- 对于 20/30 GHz，从 23.4°W 到 74.3°E 的 97.7° 经度范围；和
- 对于 40/50 GHz，从 15.8°W 到 66.7°E 的 82.5° 经度范围。

这些范围内可以为使用相同频率和波束模型的地区服务的卫星数量取决于相邻卫星之间的最小间距，这依次取决于相邻卫星对卫星的上行链路和下行链路的干扰的可接受的电平。为了不严重影响在表 3.2 中计算的总 C/N 率，来自两个相邻卫星的载—干比应最小约为 20 dB，因此那些卫星中的每一个的载—干比 ($(C/I)_{ADJ}$) 应最小为 23 dB。如图 7 所示，干扰电平主要由用户终端天线发射和接收辐射模型的不同决定，它们的滚降比率导致这两个相邻的航天器之外的卫星具有可忽略不计的影响（假定始终具有相同的间距）。

图 7
相邻卫星干扰



1782-07

E 表示为卫星 S1 工作的一个用户地球站，路径 E-S2 是到相邻卫星 S2 和来自相邻卫星 S2 的干扰路径。由于卫星 S1 和 S2 都为相同地区服务，它们的天线模型都不会在干扰路径的方向上有很大的差别。从 E 到 S2 的干扰发生在 φ° ，这与天线在 E 处的轴线有关，E 从 S2 接收到的干扰也发生在那一偏轴角。由于这一研究基于单个类型的载波，“有用的” e.i.r.p.s 和“干扰”地球站的 e.i.r.p.s 相同，“有用的” e.i.r.p.s 和“干扰”卫星的 e.i.r.p.s 也相同。因此在上行链路和下行链路的情况下：

$$(C/I)_{ADJ} = G_M - G(\varphi)$$

其中：

G_M : 天线在 E 上的轴上增益

$G(\varphi)$: 干扰方向上的增益。

保持之前用户天线直径为 30 cm 的假设，在每个选择的频带内对应于最低频带的波束宽度 (φ_0) 在表 6 中计算。

表 6
同频、同覆盖范围的卫星的最大数量 ($\varphi_0 = 70. \lambda / D$)

频率 (GHz)	10.95	14.0	19.7	28.45	40.0	48.2
波束宽度 (φ_0°)	6.39	5.0	3.55	2.46	1.75	1.45
φ_{min} (度)	8.84	6.92	4.91	3.40	2.42	2.01
θ_{min} (度)	7.51	5.88	4.17	2.89	2.05	1.71
N	14	18	23	33	40	48

假设平方率主波束滚降 $G(\varphi) = G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2$ dBi, 从而当 $G_M - (G_M - 12(\varphi/\varphi_0)^2) = 23$ dB 时, 即当 $12(\varphi/\varphi_0)^2 = 23$ dB 时, 发生所需的最小差别。重新整理一下, 对于最小卫星分离 $\varphi = 1.384\varphi_0$, 这些角度在表 6 中作为 φ_{min} 给出。对应的 θ 值在第 4 行给出。记住在 11/14 GHz 频带内在传统 FSS 网络中采用 3° 的卫星间距 (或在 2 区中为 2°), 表 6 中 θ_{min} 的值强调与这些频带内现有系统共享可能的困难。在 20/30 GHz 频带内, θ_{min} 值也与 3° 或 2° 间距的目标不兼容, 但是目前至少只有很少卫星确实存在, 所以这个问题主要程度上还是假设。通常 θ_{min} 值反映了使用小用户终端天线限制轨道/频谱效率的事实。

如图 6 所示由 θ_{min} 对经度范围进行划分, 给出了在每个选定的 500 MHz 频带内为参考面积提供服务的同频卫星的数量, 这些数量在表格的第 5 行中以 “ N ” 给出。由于目前的研究中仅考虑双向链接, 此处相关的 N 值由下行链路频率确定, 在表 6 中突出显示。

单个卫星波束的脚印内的六角形面积 A 可从图 1 和 2 的几何学中示出, $A = 211\,375\,383 (1 - \cos(d/222.63))$ km², 其中 d 是脚印 (km) 的直径, 如图 2 所示。这里所用 A 的值为:

$A = 497\,683.88$ km², 对于 11/14 GHz, $91\,238.83$ km², 对于 20/30 GHz, 以及 $22\,810.94$ km²,
对于 40/50 GHz。

将这些脚印的面积和表 5 中每个卫星波束的数量 n 相乘, 然后再除以表 6 中给出的参考面积的结果, 可以获得如第 3 节所描述的类型卫星的数量, 这些卫星从一个单独的 GSO 位置为参考面积提供服务。这些数量不必一定是整数, 因为可能存在脚印落在参考面积之外的那些波束, 它们表示在参考面积内用户不可用的每个卫星容量的一小部分。参考面积的总容量 C_T 给出如下:

$$C_T = N \cdot C_S \cdot (10\,000\,000) / (A \cdot n) \text{ Mbit/s}$$

其中 C_S 是每个卫星的容量, 如第 3 节所示。

因此在所选的 500 MHz 频带内的双向连接的 C_T 值近似为:

10.95-11.2 GHz + 11.45-11.7 GHz 下行, 14.00-14.50 GHz 上行 — **71 {38} Gbit/s;**

19.7-20.2 GHz 下行, 28.45-28.95 GHz 上行 — **706 {380} Gbit/s;**

40.0-40.5 GHz 下行, 48.20-48.70 GHz 上行 — **4 400 {2 400} Gbit/s.**

注 1 — 括号里的数字对应较强纠错编码的假设。

注意典型的建造和发射大卫星的成本，很明显，这些级别容量的提供是很昂贵的。然而，高数据率全球互联网接入的潜在市场相当大。

这些容量是供持续使用的，由于用户数据率假定为 2 Mbit/s，同时双向连接的数量是每个频带对中容量的一半。如果单个载波“按需”动态划分，那么用户的数量将超过可用载波的数量，它与平均用户活动因子成反比。

对于通过具有 30 cm 天线的用户终端的互联网接入，在第 2.3 节中计算了每个卫星的容量，在本节中计算了总容量。如果假定使用大直径，那么会得到不同的结果，但是要计算这些结果，首先必需确定，除了用户天线直径外，改变其他假设是否适当。如果所有的其他假设保持不变，那么例如将天线的直径增加到 60 cm 会使得 3/4 FEC 率编码可被移除，用户比特率增加到大约 2 560 kbit/s，这会使得每个天线的容量增加 28%，总地区容量乘以大约 2.5 的因子。然而，取决于假设的天线大小，可能会认为牺牲一些或者全部的容量增加以减少用户发射功率和/或卫星主功率需求是合适的。另外，采用部分或全部增加用户天线增益，可以适当减少每个卫星波束的增益，由此增加每个卫星波束的宽度，使得较少的波束可以覆盖相同地区。显然，较大用户天线的容量评估应基于对那一情况适当的假设。

4 结论

这一附件概述了将提供互联网全球宽带接入的 FSS 系统设计类型的关键特性，给出了这样的系统可能提供的总容量的广泛的评估。由于考虑到分析精度的范围及其适合于不同的地理和市场环境是很重要的，应当考虑，包括在《无线电规则》中通过卫星提供到互联网的宽带接入的系统特性，这是不适当的，本建议书应按照发展的眼光时时回顾。

附件 2

通过为较大地球站天线设计的 FSS 系统实现 全球宽带互联网接入的可能性

1 概述

附件 1 中的系统结构主要建立在为用户地球站选择 30 cm 天线的基础上，这样的终端类型有时被称为“特小口径天线终端”或 USAT。如果假设使用较大用户天线，则可能可通过不同系统结果来满足通过卫星（除了便携式终端）实现宽带互联网接入的需求，注意这里只示出一个例子。

对于宽带互联网接入，划分给 FSS 的不同频带直至 50 GHz 的适当性在附件 1 的第 1 节中讨论，在此不必重复。在两种情况下假定使用同一系统结构，基于这一附件中的参数的讨论仅确定用于 20/30 GHz 和 11/14 GHz FSS 频带。

尽管用户天线大小在对于 USAT 之外的终端的系统设计中不占主导地位，它仍然有很大的影响，因此适于选择本附件中的常用的大小。在 1998 年无线电通信局征询表的回复中，通常选用的天线直径为 1.2 m，该征询表涉及使用直径为 0.3 m 到 7.6 m 的天线的 20/30 GHz 地球站。对相同征询表中涉及使用直径为 0.4 m 到 18.0 m 的天线的 11/14 GHz 地球站的回复，通常选用的直径也为 1.2 m。因此在当前的例子中选择 1.2 m，注意使用这一大小天线的地球站在那些被称为“甚小天线口径终端”(VSAT)之中。

如附件 1 所示，目标是推进来自和去往单个用户的 2 Mbit/s 数据率。这里为每个卫星转发器假定的接入方法是 FDMA，调制方法是 QPSK。为了适度地有效利用转发器输出功率，假定增加 1/2 FEC 率编码。

2 系统结构

再一次如附件 1 所示，这个例子基于“星型”配置，在其中通过卫星提供大量用户地球站到连接到互联网的单个“中枢”地球站的链接接入。为了使卫星和中枢地球站之间的链路对带外和带内载波的 C/N 性能的影响最小，假定中枢地球站使用大天线（直径 7.6 m）。图 8 示出了链路排列。

在这个例子中，卫星在传输的上行和下行方向上都使用 500 MHz 频谱，频带像之前一样为：

- 20/30 GHz 系统 — 19.7-20.2 GHz，空对地；28.45-28.95 GHz，地对空；
- 11/14 GHz 系统 — 10.95-11.2 GHz 和 11.45-11.7 GHz，空对地，以及
- 14.0-14.5 GHz，地对空。

3 覆盖范围

对于具有 1/2 FEC 率的 QPSK，在典型解调器/解码器的输出端要求大约 7.5 dB 的 C/N 比率，以便在输出比特流中产生 1×10^{-6} 的 BER，这可能被看作是当前应用的可用限值。如附件 1 所示，假设在大多数气候下，在至少 99% 的时间应满足这一 BER，对此如果对于 20/30 GHz 系统，最小仰角为 17° ，对于 11/14 GHz 系统，最小仰角为 10° ，则用户和卫星之间的链路应设计为在 30 GHz 容许大约 11 dB 的雨衰，在 20 GHz 容许大约 7 dB 的雨衰，在 14 GHz 容许大约 4.5 dB 的雨衰，在 11 GHz 容许大约 3.5 dB 的雨衰。许多如今的卫星具有单独能在单载波饱和的情况下生成 40 W 输出功率的转发器。将这些因素和 1.2 m 用户天线直径一起考虑，适当地允许噪声和内外干扰贡献，可以从链路计算中发现，需要大约 2° 的半功率波束宽度的卫星波束。从图 3 和 4 中可以看出，当前技术的容量很不错。

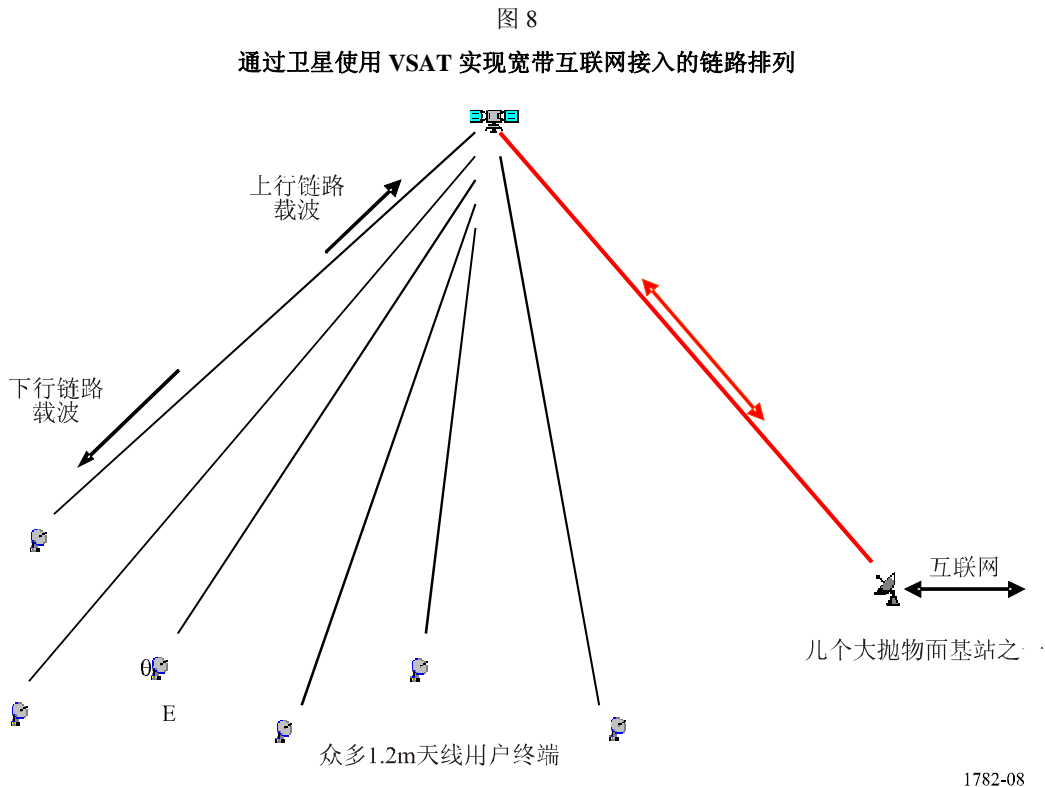


图 9 示出在大小上等于附件 1（图 6）中的 $10\,000\,000\text{ km}^2$ 圆形参考面积的一个连续地区将由 8 个圆形波束（A 到 H）覆盖，每个波束的波束宽度为 2° ，排列为其重叠边界构成连锁的六边形模型。附件 1 中第 2.1 节中示出，一个波束在 4 个波束内的频率复用导致多波束干扰至少为 16.5 dB 时有最小的 C/I 比率。

4 卫星有效负载配置

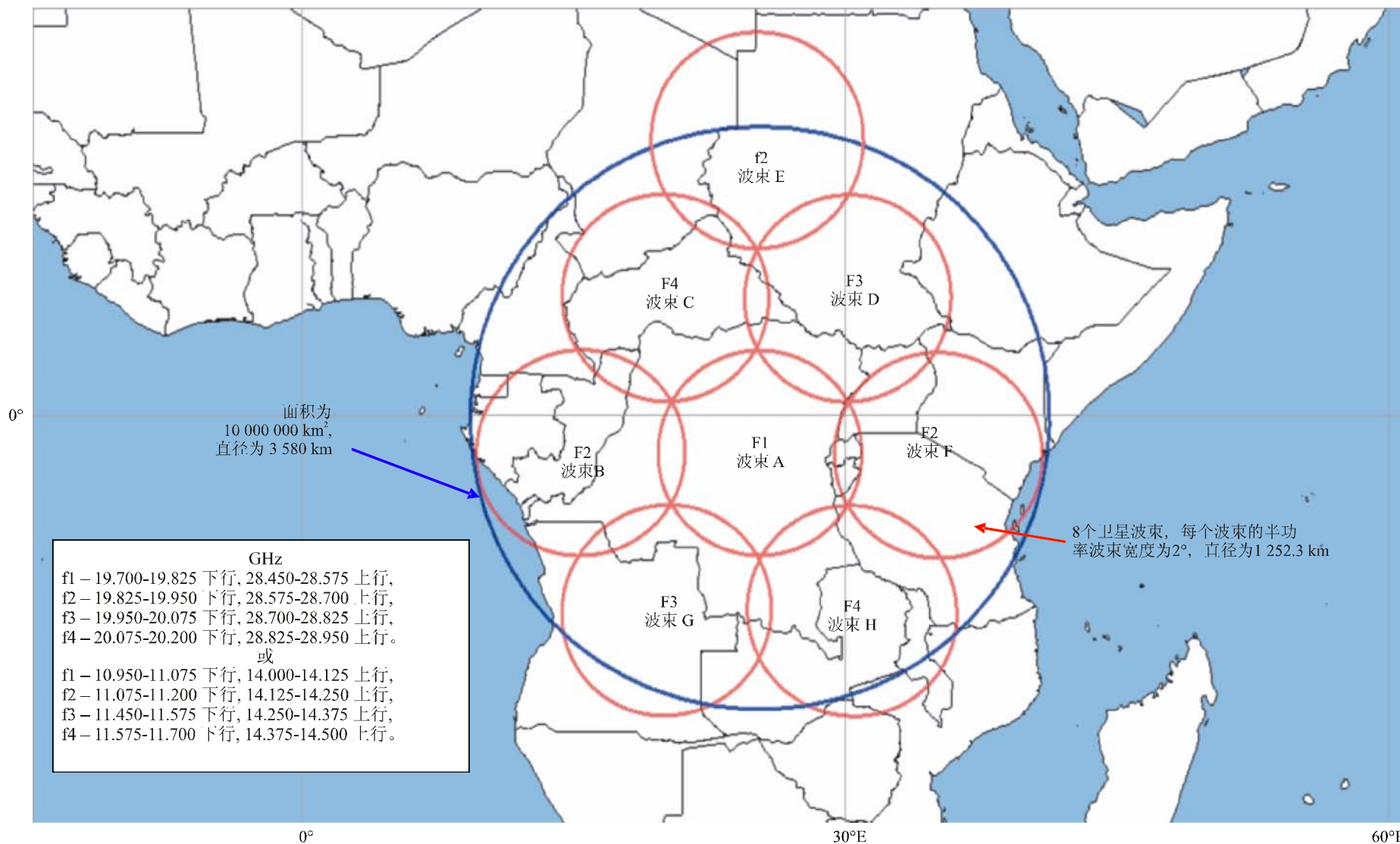
考虑到这一附件之前各节假设的参数，图 10 示出了用以最佳地使用功率和宽带的适当的转发器规划。每个载波的带宽如下：

$$\{2 (\text{Mbit/s 数据率})/2 (\text{QPSK})\} \times 2/1 (1/2 \text{ FEC 率}) \times 1.2 (\text{频谱整形}) = 2.4 \text{ MHz}$$

对于载波间保护频带有 18% 的转发器带宽，这对应于 2.84 MHz 的载波间距。这相对宽松的补偿符合在 28.4 MHz 的转发器带宽内有 10 个载波工作，可以最佳地使用转发器输出功率，如下所示。转发器间保护频带更进一步的 10% 的补偿导致转发器间距为 31.25 MHz，这允许 4 个转发器在 125 MHz — 卫星带宽的 1/4 内适配。这样，半功率脚印如图 9 所示的这 8 个波束可适应每 2 个极化（线性双极化或左右端圆极化）4 个转发器。因此转发器的总数为 64。

图9

使用 1.2 m 天线的用户站通过卫星实现宽带互联网接入的卫星波束排列的实例



5 链路预算

地球站和卫星之间上行或下行链路之间的关系如下：

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df) / (3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228.6) = C/N \text{ dB} \quad (1)$$

其中：

- P_T : 馈入发射天线的功率 (dBW)
- G_T : 发射天线增益 (dBi)
- d : 地球站和卫星之间的路径长度 (m)
- f : 频率 (Hz)
- F : 在所需的时间比例内补偿衰减的余量 (dB)
- G_R : 接收天线的增益 (dBi)
- B : 载波带宽 (Hz)
- T : 链路噪声温度 (K)

C/N (dB): 接收机达到可用限值 BER 的比例。

为了允许卫星—中枢纽站链路上热噪声、多波束频率复用、交叉极化干扰、卫星上的互调以及外部源的干扰带来的性能降级，卫星和用户终端之间的上行链路和下行链路上的载—热噪声比值应至少为 8.5 dB。注意，对于这些总计降级，产生总计 7.5 dB（对应于可用限值）的 $C/(N+I)$ 的 C/I 比是 14.4 dB，频率复用和交叉极化干扰 ($C/I > 16.5$ dB)、互调 ($C/I > 23$ dB)、基站链路噪声 ($C/I > 24$ dB) 以及外部干扰 ($C/I > 23$ dB) 的共同影响可能不会比这更糟（即 > 14.39 dB）。

因此：

在 30 GHz FSS 频带内来自用户地球站的上行链路

如公式 (1) 所示，其中：

$P_T = 11.3$ dBW (13.5 W) (且在晴朗大气中，具有上行链路功率控制 (ulpc) 时大约为 3 dBW)

$G_T = 49.19$ dBi (在 28.45 GHz 处的 1.2 m 天线)

$d \leq 39\,853\,746$ m (最小仰角为 17°)

$f = 28\,450\,000\,000$ Hz

$F = 11$ dB (<1%的时间衰减)

$G_R = 37.7$ dBi (2° 卫星波束的半功率边缘)

$B = 2\,400\,000$ Hz

$T = 1\,000$ K，所以

$C/N = 8.5$ dB。

在 14 GHz FSS 频带内来自用户地球站的上行链路

如公式 (1) 所示，其中：

$P_T = 3.95$ dBW (2.5 W) (且在晴朗大气中，具有 ulpc 时大约为 2 dBW)

$$\begin{aligned}
 G_T &= 43.19 \text{ dBi (在 } 14.25 \text{ GHz 处的 } 1.2 \text{ m 天线)} \\
 d &\leq 40\,583\,982 \text{ m (最小仰角为 } 10^\circ) \\
 f &= 14\,250\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 4.5 \text{ dB (<1\%的时间衰减)} \\
 G_R &= 37.7 \text{ dBi (} 2^\circ \text{ 卫星波束的半功率边缘)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 800 \text{ K, 所以} \\
 C/N &= 8.5 \text{ dB。}
 \end{aligned}$$

在 20 GHz FSS 频带内到用户地球站的下行链路

如公式 (1) 所示, 其中:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 2.1 \text{ dBW (1.62 W)} \\
 G_T &= 37.7 \text{ dBi (} 2^\circ \text{ 卫星波束的半功率边缘)} \\
 d &= 39\,853\,746 \text{ m (最小仰角为 } 17^\circ) \\
 f &= 19\,700\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 7 \text{ dB (<1\%的时间衰减)} \\
 G_R &= 46.0 \text{ (在 } 19.7 \text{ GHz 处的 } 1.2 \text{ m 天线)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 300 \text{ K, 所以} \\
 C/N &= 8.5 \text{ dB。}
 \end{aligned}$$

在 11 GHz FSS 频带内到用户地球站的下行链路

如公式 (1) 所示, 其中:

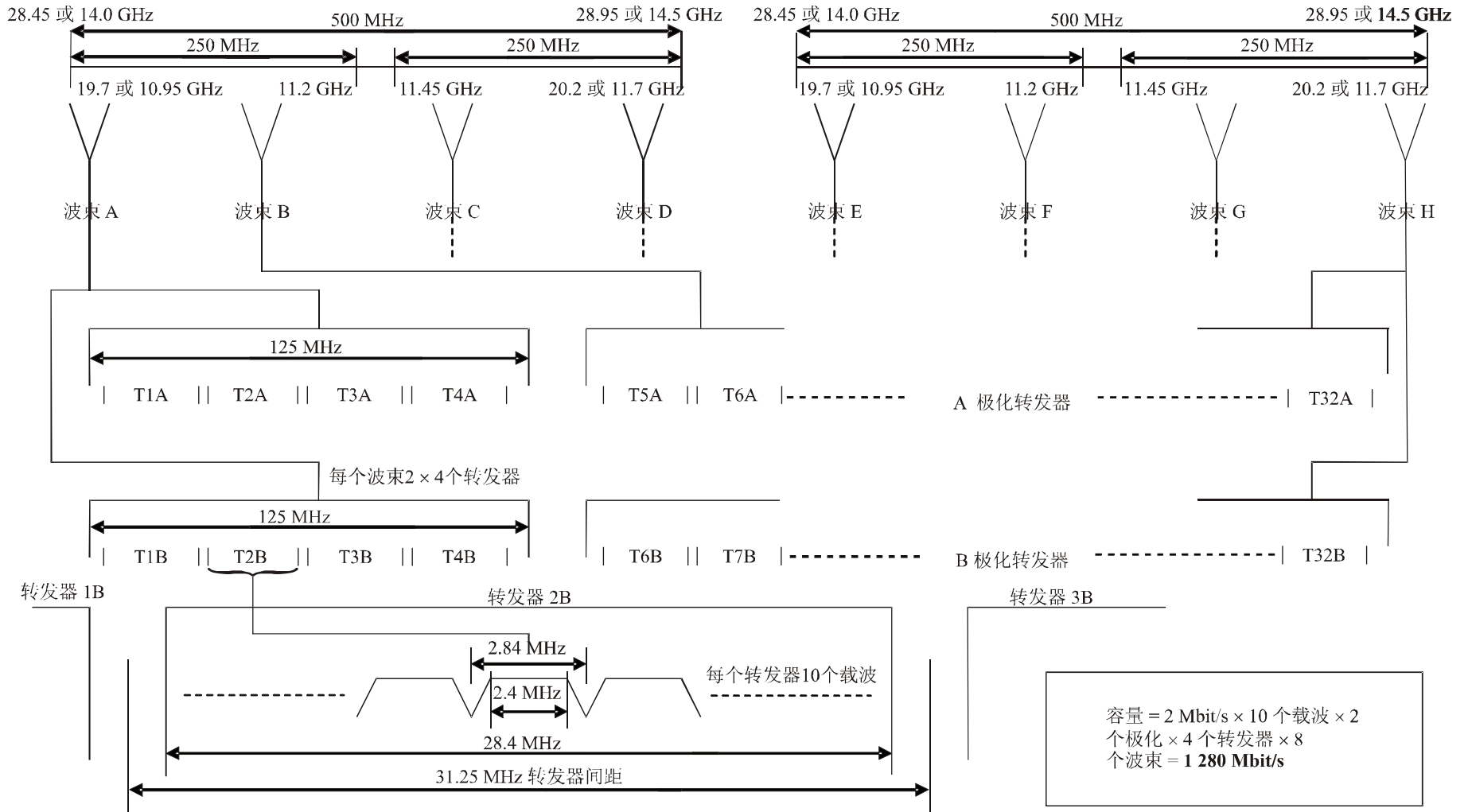
$$\begin{aligned}
 P_T &= 2.1 \text{ dBW (1.62 W)} \\
 G_T &= 37.7 \text{ dBi (} 2^\circ \text{ 卫星波束的半功率边缘)} \\
 d &= 40\,583\,982 \text{ m (最小仰角为 } 10^\circ) \\
 f &= 10\,950\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 3.5 \text{ dB (<1\%的时间衰减)} \\
 G_R &= 40.9 \text{ (在 } 10.95 \text{ GHz 处的 } 1.2 \text{ m 天线)} \\
 B &= 2\,400\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 200 \text{ K, 所以} \\
 C/N &= 13.6 \text{ dB。}
 \end{aligned}$$

这些链路中最关键的是在 19.7 GHz 的下行链路, 其中每个载波所需的卫星输出功率 P_T 是 1.62 W。由于在单载波饱和的情况下 40 W 转发器性能的总计多载波输出功率是 16 W (即具有 4 dB 输出滚降以限制互调), 每个转发器 2 Mbit/s 载波的数量为 **10** (即 $\cong 16/1.62$) — 如图 10 所示。

在 11/14 GHz 系统中, 较低衰减余量导致对于每个载波每个 1.62 W 转发器的 10 个载波有大的 C/N 比值, 较好的排列是每个转发器 11 个载波, 载波间保护频带减小到大约 7.6%, 每个载波的卫星功率减小到 $16/11 = 1.45 \text{ W}$ 。

图 10

适用于高速互联网接入的 20/30 GHz 或 11/14 GHz FSS 卫星的转发器和波束排列



6 每个卫星的容量 (C_S)

具有如图 10 所示的有效负载配置的卫星的容量为：

$$(2 \text{ Mbit/s /载波}) \times (10 \text{ 个载波/转发器}) \times (2 \text{ 套 } 4 \text{ 个转发器/波束}) \times (8 \text{ 个波束}) = \mathbf{1\ 280 \text{ Mbit/s}}$$

假设每个转发器的功率有效性为 35%，有效负载表示 75% 的卫星功率要求，则对于这样一个卫星的总计最初功率要求为大约 $(40 \text{ W} \times 2 \times 4 \times 8) / (0.35 \times 0.75) = 9\ 752 \text{ W}$ ，也即 **10 kW**。

在 11/14 GHz 的情况下，如果每个转发器有 11 个载波在工作，则容量将是 1 408 Mbit/s。

7 潜在总容量 (C_T)

在附件 1 的第 3 节中示出，在 97.7° 的经度范围内，可从整个 $10\ 000\ 000 \text{ km}^2$ 的参考面积上，在 17° 或更大的仰角看到对地静止轨道。也示出对于 10° 的最小仰角，经度范围为 111.1° 。使用那一节中描述的方法，可以发现，对于 20/30 GHz 和 11/14 GHz 的例子，如果用户地球站具有 1.2 m 的天线，则卫星之间的最小间距理论上小于 2° 。然而，为了减小由如未完成的卫星位置控制这样的因素造成的干扰的危险，规则上通常设置 2° 的最小间距，因此这里假定为 2° 。从而在 20/30 GHz 的情况下，这一附件中描述的同时为参考面积提供服务的这一类同频卫星的数量为 48，在 11/14 GHz 的情况下为 55。因此，在参考面积内，用户用以实现宽带互联网接入的当前类型的卫星所潜在提供的总容量为：

- 对于 20/30 GHz 的例子 — $48 \times 1\ 280 = \mathbf{61.44 \text{ Gbit/s}}$,
- 对于 11/14 GHz 的例子 — $55 \times 1\ 408 = \mathbf{77.44 \text{ Gbit/s}}$ 。

然而，由于需要与现有的 FSS 系统共享频率，在可预见的将来，这一容量中的一些可能不能实现，特别是在较低的频带内。

附件 3

通过为“共用”地球站天线和本地地面分布设计的 FSS 系统实现全球宽带互联网接入的例子

1 概述

在附件 1 中目标是提供到使用 30 cm 天线的用户地球站的直接接入，这决定了空间扇区的特性，即具有多个点波束作为窄带的卫星是可行的 — 因此以需要的系统结构类型为特征。然而对于本附件，用户将通过本地无线网络接入到包含“共用”地球站的相对较少的地点，这样的地球站使用的天线大小并不那么关键，可能使用几种系统结构。对于实现本地地面无线网络将用户与“共用”地球站相连接存在很多可能性（包括几个频带）。因此本附件仅提供了一个系统结构的例子，这个系统结构可促进通过以共用地球站为中心的本地无线网络接入宽带互联网。这个例子基于 FDMA 在用户—本地中枢无线网络中的使用以及传统调制和 3/4 FEC 率在 4 GHz FS 频带内的使用。这一选择对本地地球站和连接到互联网的中枢地球站之间的卫星链路的设计有一定影响，但是这一影响还未大到限制此处给出的例子的可能性。

尽管在这一附件中的例子对于本地地面分布使用 4 GHz FS 频带，根据业务类型（例如 FS 或 MS）和频带，提供这一部分的接入网有很多其他的可能性。应用的选择将取决于很多因素，例如数据率和功率要求；来自共用地球站的所需业务范围；与其他业务的频率共享和协调以及管制限制。由于通过同一个卫星实现与互联网的链接的每个本地地面网络将是自含的，对于不同地区有可能使用不同的 FS 和/或 MS 频率划分；当卫星业务地区涉及例如多个国家时，这可能是方便的。

2 频带考虑

关于适用于这一应用的 FSS 频带的确定，附件 1 中的第 1.1 节的第 1 段在此也适用，但是在这—情况下，为地球站提供甚小口径天线的需要不强制使用 4/6 GHz 和 11/14 GHz FSS 频带。原则上，共用地球站可与任何大小的天线一起使用，但在这一角色中使用大天线可能不经济。

对卫星频带当前使用的调查包括在附件 1 的第 1.2 节中，这得出了一个结论，即当前 20/30 GHz FSS 划分的使用不如在较低频带内那样频繁，至今在 40/50 GHz 划分中也很少 FSS 开发。

考虑到上述情况，这一附件阐述了一个共用的基于地球站的系统，给出了其在 20/30 GHz 频带内实现的参数，也给出了其在 11/14 GHz 频带内实现的参数。但是，注意，在不久的将来，对于世界范围内的实施，较高频带与较低频带相比，可能带来较少的频率共享问题，这是可能的。

3 可能的技术特性

3.1 系统结构

这一例子的系统结构如图 11 所示，其中 4 个双向双极化卫星波束可利用总计 500 MHz 的上行链路带宽加上 500 MHz 的下行链路带宽（即每个波束 125 MHz 上行和 125 MHz 下行）。每个波束在一个极化上支持 4 个本地共用地球站加上直角极化上的 4 个本地共用地球站，通过卫星将这 8 个地球站链接到一个中枢地球站，以连接到互联网。这样，卫星可为 32 个本地社区提供互联网接入。

3.2 本地地面无线系统

将每个本地地球站相连，可配置成一个地面无线系统，为半径约为 3 km 范围内的许多用户提供服务。在任何场合能够支持的用户数量取决于他们使用的比特率和他们连接上的活动因子。对于互联网的国内用户，活动因子典型的为大约 30:1，对于商业应用，为大约 10:1。所采用的带宽随着跨越短文本消息直到视频会议的应用的不同而极端不同。业务描述“宽带互联网”通常包括从 256 kbit/s 到高达几 Mbit/s 的速度，但是随着客户期望值的成熟，每几个月增加较低限值。例如，如果假定同时连接的 100 个商业客户希望在 10% 的时间以 2 Mbit/s 运行，则这需要提供 20 Mbit/s 的服务，在 30×23 （256 kbit/s 用户在 6 Mbit/s 内） $\cong 700$ 之间共享更多的 6 Mbit/s 的可用性。因此容量是 100 个商业用户加上 700 个同时上网的家庭用户，或者考虑到商业上的应用，也就是 150 + 1 000。然而，如果用户之一希望运行带宽要求非常高的应用，如实时 TV，那么用户可捕获可用容量的实际部分，除非网络运营商强加某个共享规程。这是一个网络管理事务，超出了该研究的范围。

出于这一附件的目的，采用了 200 个使用每个本地网络的用户作为例子，平均活动因子为 13%，在 4 GHz FS 频带内，其中最多 13 个用户能够同时以 2 Mbit/s 数据率发射，最多 13 个用户能够同时以 2 Mbit/s 数据率接收。如果需要，可能允许一些用户同时以 2 Mbit/s 或更高的比特率数据率发射和接收，不过同时可支持的活动用户数量要比 26 少得多。反之，如果一些用户工作于比 2 Mbit/s 低的比特率，那么同时可支持的活动用户数量要比 26 多得多。

对于这个例子，假定本地地面网络（点到多点网络）中的用户链路将是 FDMA 链路，他们的调制是具有 3/4 FEC 率的 QPSK。在每个共用终端（即地面中枢加上本地地球站）内，输出信号（例如 2 Mbit/s 处 13 个信号）在数位上复用到一个 26 Mbit/s 信号，用于到卫星的前向传输，输入信号（例如 2 Mbit/s 处的 13 个信号）从接收自卫星的一个 26 Mbit/s 信号解复用。

3.3 卫星链路

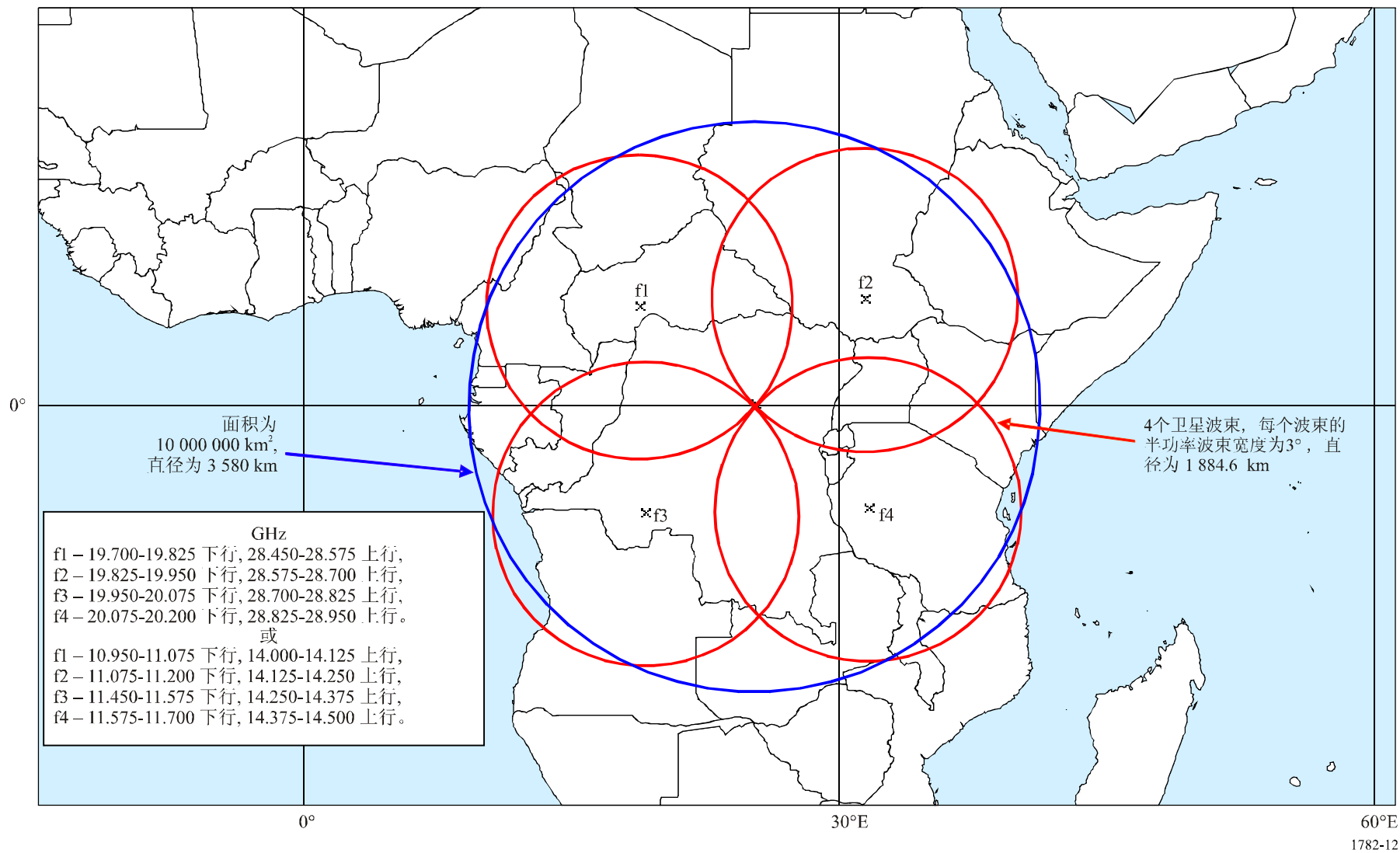
每个共用地球站和卫星之间的上行链路和下行链路都假定为采用具有 3/4 FEC 率的 QPSK 调制，在卫星中，对于卫星和中枢地球站之间的链路，它们可以被转换到 16-QAM 载波或反之。由于每个波束只有一个中枢地球站（或者位于 4 个波束重叠处的每个卫星可能只有一个），它可与一个天线结合使用，这一天线大到足以提供 16-QAM 所需的上行链路和下行链路 C/N 率。在中枢地球站，26 Mbit/s 比特流将按照连接到互联网和来自互联网所必需的格式处理。

3.4 覆盖范围

图 12 示出如果将 4 个卫星（双向、双极化）波束设计为具有大约 3° 的半功率波束带宽，且其指向应使得它们的脚印在赤道上为一个点，它们将共同覆盖一个类似于 10 000 000 km² 面积的总面积，这一面积在附件 1 中用做容量计算的基础（见附件 1 的图 6）。如果该系统在 20/30 GHz 频带或 11/14 GHz 频带内实现，那么这 4 个波束中的每一个所覆盖的频率范围如图 12 所示，卫星天线应这样设计，即使得波束脚印保持圆形，直径相同（在地球表面上为 1 884.6 km），在任一方向上，对于 20/30 GHz，它们向下指向地球表面，最小仰角为 17°，对于 11/14 GHz，它们向下指向地球表面，最小仰角为 10°。

图 12

通过卫星和本地地面无线网络实现宽带互联网接入的卫星波束排列实例



3.5 卫星有效负载排列

预想的卫星有效负载排列如图 13 所示，从其中可以看出，充分利用 500 MHz 上行链路和下行链路带宽（都使用极化）所需的转发器的数量为 64。还可以看出，通过设备内含物将输出 26 Mbit/s 流从 QPSK 转换为 16-QAM，或对于输入流从 16-QAM 转化为 QPSK，带宽的使用率比假定非解调转发器的情况高。对于具有 3/4 FEC 率的 QPSK，2 Mbit/s 载波的传输带宽大约为 $2 \times 1/2 \times 4/3 \times 1.2 = 1.6$ MHz，26 Mbit/s 载波的传输带宽大约为 $26 \times 1/2 \times 4/3 \times 1.2$ MHz = 20.8 MHz。如果可用限值定义为 BER 达到 1×10^{-6} 的点，那么在衰减情况下这些载波所需的总 C/N 大约是 8.5 dB，因此考虑到链路的其他部分的噪声和外部干扰，对于每个信道，必需将其设计为达到至少 9.5 dB 的衰减 C/N。这适用于链路中最关键的一条，它在输出方向是从用户终端到共用终端的链路，在输入方向是卫星到本地地球站的下行链路。其他链路应设计为满足较高的 C/N 限值，以限制它们对端到端性能的影响。

对于 16-QAM 调制，26 Mbit/s 载波的带宽大约为 $26 \times 1/4 \times 1.2 = 7.8$ MHz。基于每个极化，4 个 20.8 MHz 载波加上 4 个 7.8 MHz 载波以及大约 8.5% 的载波间保护频带，这允许为每个波束提供 125 MHz 的带宽。然而，由于每个 7.8 MHz 载波的调制方法是 16-QAM，务必设计为在衰减的条件下满足大约 25 dB（对于 $BER = 1 \times 10^{-6}$ ）的可用 C/N 限值。

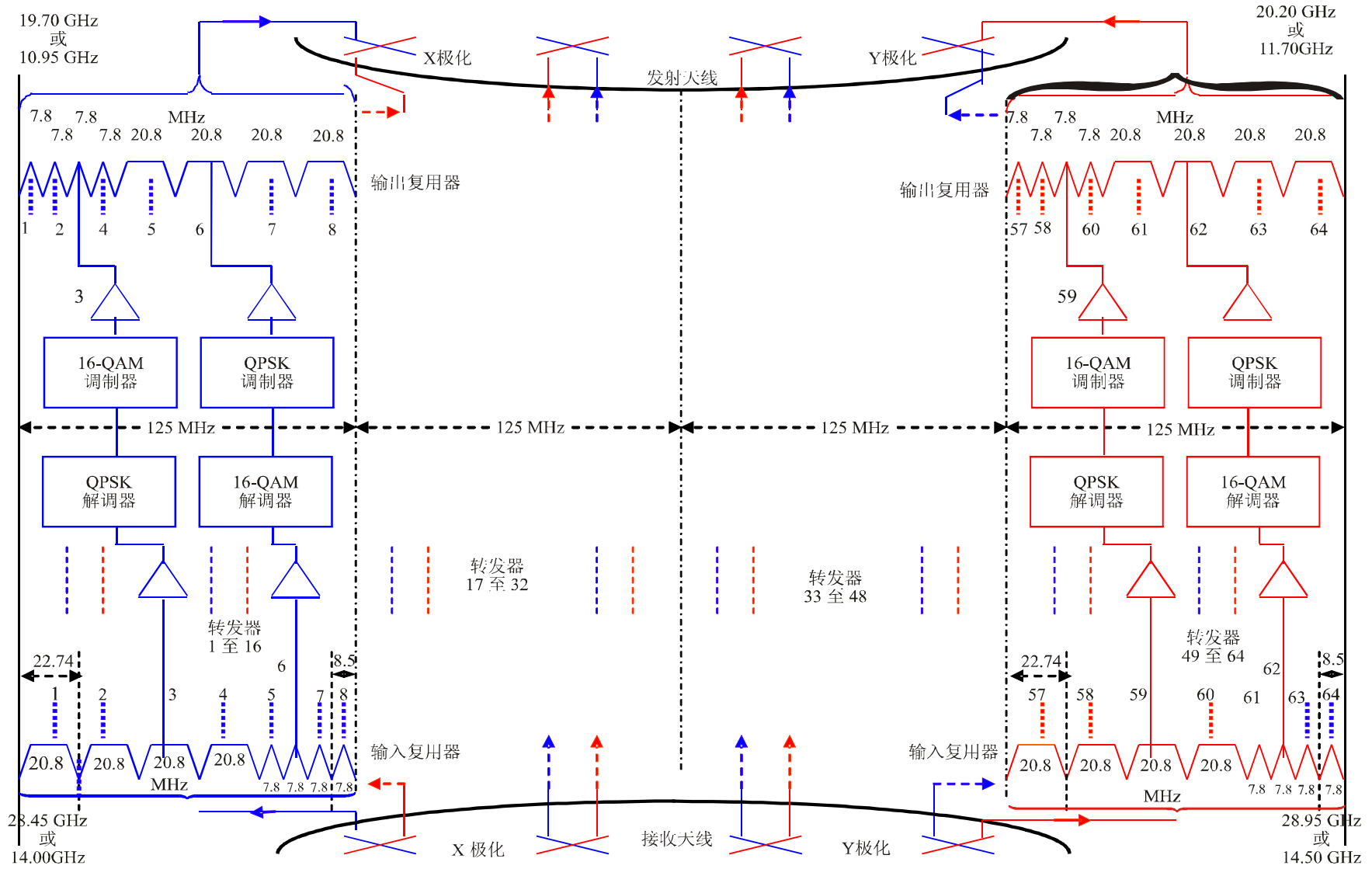
在每个转发器上 QPSK + FEC 和 16-QAM 的转换增加了卫星有效负载的复杂性，但是与全载处理的程度一样。基于“透明的”（“弯管”）转发器的类似的有效负载将仅仅是容量的大约 2/3。

3.6 链路预算

如上所述，4 GHz 本地地面无线链路以及 20/30 GHz 和 11/14 GHz 卫星链路的必要参数在下列链路预算中给出：

图 13

通过卫星和本地地面无线网络实现宽带互联网接入的卫星有效负载排列的例子



3.6.1 本地地面链路

在 4 GHz 频带内用户终端—本地地球站链路

$$P_T + G_T - 20 \log((4\pi df)/(3 \times 10^8)) - F + G_R - 10 \log(BT) - (-228.6) = C/N \text{ dB} \quad (2)$$

其中：

$$\begin{aligned} P_T &= 3 \text{ dBW (2 W)} \\ G_T &= 0 \text{ dBi (低指向性)} \\ d &\leq 3\,000 \text{ m} \\ f &= 4\,000\,000\,000 \text{ Hz} \\ F &= 20 \text{ dB (衰减和阻塞)} \\ G_R &= 10 \text{ dBi (所有方位角)} \\ B &= 1\,600\,000 \text{ Hz} \\ T &= 4\,000 \text{ K, 所以} \\ C/N &= 9.5 \text{ dB。} \end{aligned}$$

在 4 GHz 频带内本地地球站—用户终端链路

如公式 (2) 所示：

其中：

$$\begin{aligned} P_T &= 5.4 \text{ dBW (3.5 W)} \\ G_T &= 10 \text{ dBi (所有方位角)} \\ d &\leq 3\,000 \text{ m} \\ f &= 3\,750\,000\,000 \text{ Hz} \\ F &= 20 \text{ dB (衰减和阻塞)} \\ G_R &= 0 \text{ dBi (低指向性)} \\ B &= 1\,600\,000 \text{ Hz} \\ T &= 4\,000 \text{ K, 所以} \\ C/N &= 12.5 \text{ dB。} \end{aligned}$$

3.6.2 本地地球站和卫星之间的链路

在 30 GHz FSS 频带内来自本地地球站的上行链路

如公式 (2) 所示：

其中：

$$\begin{aligned} P_T &= 24 \text{ dBW (251 W)} \\ G_T &= 53.63 \text{ dBi (在 28.45 GHz 处的 2 m 天线)} \\ d &\leq 39\,853\,746 \text{ m (最小仰角为 } 17^\circ) \\ f &= 28\,450\,000\,000 \text{ Hz} \\ F &= 11 \text{ dB (< 1% 的时间衰减)} \\ G_R &= 34 \text{ dBi (3° 卫星波束的半功率边缘)} \\ B &= 20\,800\,000 \text{ Hz} \end{aligned}$$

$$T = 1\,000\text{ K, 所以}$$

$$C/N = 12.5\text{ dB.}$$

在 14 GHz FSS 频带内来自本地地球站的上行链路

如公式 (2) 所示:

其中:

$$P_T = 16.7\text{ dBW (47 W)}$$

$$G_T = 47.63\text{ dBi (在 14.25 GHz 处的 2 m 天线)}$$

$$d \leq 40\,583\,982\text{ m (最小仰角为 } 10^\circ)$$

$$f = 14\,250\,000\,000\text{ Hz}$$

$$F = 4.5\text{ dB (< 1\% 的时间衰减)}$$

$$G_R = 34\text{ dBi (} 3^\circ \text{ 卫星波束的半功率边缘)}$$

$$B = 20\,800\,000\text{ Hz}$$

$$T = 800\text{ K, 所以}$$

$$C/N = 12.5\text{ dB.}$$

在 20 GHz FSS 频带内到本地地球站的下行链路

如公式 (2) 所示:

其中:

$$P_T = 13\text{ dBW (20 W)}$$

$$G_T = 34\text{ dBi (} 3^\circ \text{ 卫星波束的边缘)}$$

$$d = 39\,853\,746\text{ m (最小仰角为 } 17^\circ)$$

$$f = 19\,700\,000\,000\text{ Hz}$$

$$F = 7\text{ dB (< 1\% 的时间衰减)}$$

$$G_R = 50.44\text{ (在 19.7 GHz 处的 2 m 天线)}$$

$$B = 20\,800\,000\text{ Hz}$$

$$T = 300\text{ K, 所以}$$

$$C/N = 10.7\text{ dB.}$$

在 11 GHz FSS 频带内到本地地球站的下行链路

如公式 (2) 所示:

其中:

$$P_T = 7.8\text{ dBW (6 W)}$$

$$G_T = 34\text{ dBi (} 3^\circ \text{ 卫星波束的边缘)}$$

$$d = 40\,583\,982\text{ m (最小仰角为 } 10^\circ)$$

$$f = 10\,950\,000\,000\text{ Hz}$$

$$F = 3.5\text{ dB (< 1\% 的时间衰减)}$$

$$G_R = 45.34 \text{ (在 } 10.95 \text{ GHz 处的 } 2 \text{ m 天线)}$$

$$B = 20\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 200 \text{ K, 所以}$$

$$C/N = 10.7 \text{ dB.}$$

3.6.3 中枢地球站和卫星之间的链路

在 30 GHz FSS 频带内从中枢地球站到卫星的上行链路

如公式 (2) 所示:

其中:

$$P_T = 24.7 \text{ dBW (295 W)}$$

$$G_T = 63.88 \text{ dBi (在 } 28.45 \text{ GHz 处的 } 6.5 \text{ m 天线)}$$

$$d = 38\,377\,622 \text{ m (仰角为 } 32.7^\circ \text{)}$$

$$f = 28\,450\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 16 \text{ dB (< 0.1\% 的时间衰减)}$$

$$G_R = 36 \text{ dBi (在 } 1^\circ \text{ 卫星波束轴内)}$$

$$B = 7\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 1\,000 \text{ K, 所以}$$

$$C/N = 25.0 \text{ dB.}$$

在 14 GHz FSS 频带内从中枢地球站到卫星的上行链路

如公式 (2) 所示:

其中:

$$P_T = 14.3 \text{ dBW (26.9 W)}$$

$$G_T = 57.86 \text{ dBi (在 } 14.25 \text{ GHz 处的 } 6.5 \text{ m 天线)}$$

$$d = 38\,656\,773 \text{ m (仰角为 } 29.5^\circ \text{)}$$

$$f = 14\,250\,000\,000 \text{ Hz}$$

$$F = 6.5 \text{ (< 0.1\% 的时间衰减)}$$

$$G_R = 36 \text{ dBi (在 } 1^\circ \text{ 卫星波束轴内)}$$

$$B = 7\,800\,000 \text{ Hz}$$

$$T = 800 \text{ K, 所以}$$

$$C/N = 25.0 \text{ dB.}$$

在 20 GHz FSS 频带内到中枢地球站的下行链路

如公式 (2) 所示:

其中:

$$P_T = 15.4 \text{ dBW (35 W)}$$

$$G_T = 36 \text{ dBi (在 } 1^\circ \text{ 卫星波束轴内)}$$

$$d = 38\,377\,622 \text{ m (仰角为 } 32.7^\circ \text{)}$$

$$\begin{aligned}
 f &= 19\,700\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 12 \text{ dB} (< 0.1\% \text{ 的时间衰减}) \\
 G_R &= 60.68 \text{ dBi} (\text{在 } 19.7 \text{ GHz 处的 } 6.5 \text{ m 天线}) \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 300 \text{ K, 所以} \\
 C/N &= 25.0 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

在 11 GHz FSS 频带内到中枢地球站的下行链路

如公式 (2) 所示:

其中:

$$\begin{aligned}
 P_T &= 9.7 \text{ dBW} (9.3 \text{ W}) \\
 G_T &= 36 \text{ dBi} (\text{在 } 1^\circ \text{ 卫星波束轴内}) \\
 d &= 38\,656\,773 \text{ m} (29.5^\circ \text{ 仰角}) \\
 f &= 10\,950\,000\,000 \text{ Hz} \\
 F &= 8 \text{ dB} (< 0.1\% \text{ 的时间衰减}) \\
 G_R &= 55.58 \text{ dBi} (\text{在 } 10.95 \text{ GHz 处的 } 6.5 \text{ m 天线}) \\
 B &= 7\,800\,000 \text{ Hz} \\
 T &= 200 \text{ K, 所以} \\
 C/N &= 25.0 \text{ dB.}
 \end{aligned}$$

4 每个卫星的容量 (C_S)

如从图 11 和图 13 中得出的结论, 这个例子中的 64 个转发器中的每一个在单载波的模式下运行, 可发送一个 26 Mbit/s 的载波。因此每个卫星的总容量为 $C_S = 64 \times 26 = 1\,664 \text{ Mbit/s}$ 。

在单载波的模式下每个转发器需要无回退, 这样从上述的链路预算来看, 能饱和发送 35 W 的转发器足以用于 20/30 GHz 系统, 能饱和发送 9.3 W 的转发器足以用于 11/14 GHz 系统。输出阶段之前的阶段的功率要求相对较小, 因此假设功率转换效率为 33%, 对于 20/30 GHz 卫星, 提供有效负载所需的总的主功率大约为 $(64 \times 35)/0.33 = 6.8 \text{ kW}$, 对于 11/14 GHz 卫星, 则为 $(64 \times 9.3)/0.33 = 1.8 \text{ kW}$ 。

在每个共用地球站点引入广泛的复用和缓冲能力, 使得在这样的网络上可同时支持的终端用户的数量最多。

5 可能的总容量 (C_T)

如附件 1 的第 3 节中计算的, 假设的最小仰角 (对于 20/30 GHz, 为 17° ; 对于 11/14 GHz, 为 10°) 使得卫星为如图 12 所示的 $10\,000\,000 \text{ km}^2$ 的圆形参考面积提供服务的经度范围如下:

- 对于 20/30 GHz, 从 23.4° W 到 74.3° E 的 97.7° 经度范围;
- 对于 11/14 GHz, 从 30.1° W 到 81.0° E 的 111.1° 经度范围。

使用图 7 和相关文本中描述的方法, 可以示出, 本附件中描述的、用以保持相邻卫星干扰足够低的这样类型的卫星之间的最小经度间距在两种情况下技术上都小于 1 度。但是, 考虑到其他一些因素, 例如卫星控制实用性, 对于相邻同频、同覆盖范围的卫星, 认证部门所允许的

最小间距为 2° ，因此在这里被认为是适当的值。由此，本附件中描述的可同时为参考面积提供服务的 20/30 GHz 类型系统的总数算得为 48，11/14 GHz 系统的总数为 55。

因此对于 $10\,000\,000\text{ km}^2$ 赤道地区，使用 500 MHz 的上行链路带宽和 500 MHz 下行链路带宽，这里描述的类型系统可能提供的总容量，对于 20/30 GHz 的例子，算得为 $48 \times 1\,664\text{ Mbit/s} = 79.872\text{ Gbit/s}$ ，对于 11/14 GHz 的例子，算得为 $55 \times 1\,664\text{ Mbit/s} = 91.52\text{ Gbit/s}$ 。但是，由于需要与现有的 FSS 系统共享频率，特别是在较低频带内，在不久的将来，这一容量中的一些可能不能实现。
